

ТРЕА

**ТЕХНОЛОГИЯ И
КОНСТРУИРОВАНИЕ В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**



**С НОВЫМ
2015 ГОДОМ!**

ВАША РЕДАКЦИЯ

www.tkea.com.ua

5—6 2014

СЕНТЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

ШЕСТНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

25 — 29 мая 2015 года
Украина, г. Одесса

Реквизиты для связи
e-mail <tkea@optima.com.ua>
тел. +38 (048) 728-49-46,
728-18-50.

- Информационные системы и технологии
- Компьютерные системы и компоненты
- Системы и средства искусственного интеллекта
- Защита информации в широкополосных системах и компьютерных сетях
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии



www.tkea.com.ua/siet/inf.html

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ»

ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

Зарегистрирован в ВАК Украины по разделам «Физико-математические науки», «Технические науки»

Реферируется в УРЖ «Джерело» (г. Киев) и в Реферативном журнале ВИНТИ (г. Москва).

Включен в базы данных Ulrich's Periodicals Directory, CrossRef, DOAJ и наукометрическую базу РИНЦ



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 23785.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.

Адрес редакции: Украина, 65044, г. Одесса, а/я 17.

E-mail: tkea@optima.com.ua, web-сайт: www.tkea.com.ua,
тел. +38 (048) 728-18-50,
тел./факс 728-49-46.

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.

Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корейская.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Номер выпущен при поддержке
НПП «Сатурн» (г. Киев)
ЧАО «Укрналит» (г. Киев),
НПП «Карат» (г. Львов),
ЦКБ «Ритм» (г. Черновцы)

Подписано к печати 24.12.2014. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 9,0+1,0. Уч.-изд. л. 12,5. Тираж 220 экз. Заказ № 267.

Издательство «Политехперіодика»

(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии РА «ART-V»

(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2014 № 5–6

Год издания 38-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилё

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антощук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

К.т.н. Э. Н. Глушеченко,

зам. главного редактора (г. Киев)

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еримичой,

зам. главного редактора (г. Одесса)

К.т.н. А. А. Ефименко,

ответственный секретарь (г. Одесса)

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

Д.ф.-м.н. М. И. Самойлович (г. Москва)

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

МПП Украины

Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 4 от 23.12 2014 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Поиск оптимальных размеров печатных плат для несущих конструкций электронных средств. *А. А. Ефименко, А. П. Карлангач, С. Н. Лазарев*

3

Системы передачи и обработки сигналов

Новый импульсный модулятор с малой частотой переключений. *В. С. Голуб*

10

Функциональная микро- и наноэлектроника

Кинетика деформации ВАХ оксидных варисторных структур, обусловленная перезарядкой локализованных состояний. *А. С. Тонкошкур, А. В. Иванченко*

15

Акустооптические свойства стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ и акустооптический модулятор на их основе. *Д. И. Блецкан, В. В. Вакульчак, В. И. Феделеш*

24

Обеспечение тепловых режимов

Исследование рабочих характеристик тепловых труб для светодиодных осветительных приборов. *М. А. Лозовой, Ю. Е. Николаенко, Б. М. Рассмакин, С. М. Хайриасов*

32

Технологические процессы и оборудование

Влияние параметров ВЧ-разряда и параметров нагревателя на температуру подложки в плазмохимическом реакторе «Алмаз» для синтеза углеродных алмазоподобных пленок. *В. В. Гладковский, Е. Г. Костин, Б. П. Полозов, О. А. Федорович, В. А. Петряков*

39

Материалы электроники

Элементы твердотельной электроники на основе КНИ-структур и нитевидных кристаллов Si для криогенных температур. *А. А. Дружинин, И. П. Островский, Ю. Н. Ховерко, Р. Н. Корецкий*

46

Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть вторая: эксперимент. *А. С. Гаркавенко, В. А. Мокрицкий, О. В. Банзак, В. А. Завадский*

51

Повышение радиационной устойчивости кремниевых монокристаллических эпитаксиальных слоев. *Ш. Д. Курмашев, О. А. Кулинич, Г. И. Брусенская, А. В. Веремьева*

57

Метрология. Стандартизация

Автоматизированная система определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива. *В. А. Мокрицкий, О. В. Маслов, О. В. Банзак*

63

Список рецензентов номера

72

Новые книги

14, 31, 45, 71

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Пошук оптимальних розмірів друкованих плат для перспективних стандартних несучих конструкцій електронних засобів. *А. А. Єфіменко, О. П. Карлангач, С. М. Лазарєв* (3)

Системи передачі та обробки сигналів

Новий імпульсний модулятор з малою частотою перемикачів. *В. С. Голуб* (10)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Кінетика деформації ВАХ оксидних варисторних структур, обумовленої перезарядженням локалізованих станів. *О. С. Тонкошкур, О. В. Іванченко* (15)

Акустооптичні властивості стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ та акустооптичний модулятор на їх основі. *Д. І. Блецкан, В. В. Вакульчак, В. І. Феделеш* (24)

Забезпечення теплових режимів

Дослідження робочих характеристик теплових труб для світлодіодних освітлювальних приладів. *М. О. Лозовий, Ю. Є. Ніколаєнко, Б. М. Рассамкін, С. М. Хайрмасов* (32)

Технологічні процеси та обладнання

Вплив параметрів ВЧ-розряду і параметрів нагрівача на температуру підкладки в плазмохімічному реакторі «Алмаз» для синтезу вуглецевих алмазоподібних плівок. *В. В. Гладковський, Є. Г. Костін, Б. П. Полозов, О. А. Федорович, В. О. Петряков* (39)

Матеріали електроніки

Елементи твердотільної електроніки на основі КНІ-структур та ниткоподібних кристалів Si для криогенних температур. *А. О. Дружинін, І. П. Островський, Ю. М. Ховерко, Р. М. Корецький* (46)

Іонізаційний відпал напівпровідникових кристалів. Частина друга: Експеримент. *О. С. Гаркавенко, В. А. Мокрицький, О. В. Банзак, В. О. Завадський* (51)

Підвищення радіаційної стійкості кремнієвих монокристалічних епітаксійних шарів. *Ш. Д. Курмашев, О. А. Кулініч, Г. І. Брусенська, А. В. Верем'єва* (57)

Метрологія. Стандартизація

Автоматизована система визначення глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива. *В. А. Мокрицький, О. В. Маслов, О. В. Банзак* (63)

CONTENTS

Electronic means: investigations, development

Search for the optimal size of printed circuit boards for perspective standard mechanical structures for electronic equipment. *A. A. Yefimenko, A. P. Karlangach, S. N. Lazarev* (3)

Signals transfer and processing systems

New pulse modulator with low switching frequency. *V. S. Golub* (10)

Functional micro- and nanoelectronics

Kinetics deformation of current-voltage characteristics of the varistor oxide structures due to overcharging of the localized states. *A. S. Tonkoshkur, A. V. Ivanchenko* (15)

Acousto-optic properties of $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ glasses and acousto-optic modulator on their basis. *D. I. Bletskan, V. V. Vakulchak, V. I. Fedelelesh* (24)

Thermal management

Research on thermal characteristics of heat pipes for led lightning devices. *M. A. Lozovoi, Yu. E. Nikolaenko, B. M. Rassamakin, C. M. Khairnasov* (32)

Production technology and equipment

The influence of HF discharge parameters and heater settings on the substrate temperature in the plasma-chemical reactor «Almaz» for the synthesis of diamond-like carbon films. *V. V. Hladkovskiy, E. G. Kostin, B. P. Polozov, O. A. Fedorovich, V. A. Petriakov* (39)

Materials of electronics

Elements of solid state electronics based on SOI-structures and Si whiskers for cryogenic temperatures. *A. A. Druzhinin, I. P. Osrovsckii, Yu. M. Khoferko, R. N. Koretskiy* (46)

Ionization annealing of semiconductor crystals. Part two: the experiment. *A. S. Garkavenko, V. A. Mokritskii, O. V. Banzak, V. A. Zavadskii* (51)

Increasing THE radiation resistance of single-crystal silicon epitaxial layers. *Sh. D. Kurmashev, O. A. Kulinich, G. I. Brusenskaya, A. V. Verem'eva* (57)

Metrology. Standardization

Automated system for determining the burnup of spent nuclear fuel. *V. A. Mokritskii, O. V. Maslov, O. V. Banzak* (63)

К. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. П. КАРЛАНГАЧ, С. Н. ЛАЗАРЕВ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: aiefimen@gmail.com

ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ДЛЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Предложен метод, алгоритм и реализующая его программа, предназначенные для определения оптимальных размеров печатных плат несущих конструкций и электронных средств различных направлений техники. В качестве критерия оптимизации принят коэффициент заполнения площади печатных плат электронными компонентами. Метод позволяет оперативно определять зависимость коэффициента заполнения от размеров печатных плат для различной элементной базы.

Ключевые слова: размеры печатных плат, несущие конструкции, оптимизация, коэффициент заполнения, элементная база.

Обязательным этапом создания несущих конструкций (**НК**) является определение типоразмерных рядов конструктивных элементов. Для стандартных НК этот процесс имеет особую значимость, которая увеличивается с ростом уровня стандартизации (предприятие, отрасль, страна, международные сообщества), т. к. необходимо учитывать множество факторов, влияющих на возможность создания перспективных электронных средств различных направлений техники для различных условий эксплуатации с высокими показателями качества.

Важность определения типоразмеров касается и печатных плат (**ПП**), поскольку от них зависят типоразмерные ряды конструктивов более высокого уровня иерархии НК и их элементов. При этом необходимо учитывать противоречие между улучшением компоновочных характеристик и снижением технологичности при увеличении количества типоразмеров ПП, требующее оптимизации размеров ПП.

Количество принятых типоразмеров печатных плат напрямую связано с правильным определением их размеров с позиций учета особенностей множества направлений использования электронных средств для получения их наилучших конструкторско-технологических характеристик. Определение оптимальных размеров ПП представляет для разработчиков очень сложную задачу, поскольку кроме тактико-технических требований к аппаратуре, учитывающих условия ее эксплуатации и специфику объекта, где она будет расположена, необходимо учитывать технологические и конструктивные требования, в первую очередь эффективное использование площади ПП. При этом выбор размеров ПП осуществляется на основе ограничения их типоразмеров,

существующими на момент разработки НК [1, 2]. Такой подход имеет свои преимущества, основанные на реализации функционально-узлового метода проектирования. Однако при этом не учитывается достаточно быстрая сменяемость элементной базы и ее влияние на компоновочные характеристики печатных узлов.

Другим решением проблемы определения размеров печатных плат является использование типоразмерных рядов, установленных в международных стандартах [3]. Это имеет свои преимущества, однако в таком случае сложно говорить о выборе оптимальных размеров.

Целью настоящей работы является разработка метода определения оптимальных размеров ПП для несущих конструкций для различных направлений техники и условий использования электронных средств, который позволяет учитывать влияние элементной базы на компоновочные характеристики печатных узлов.

Метод поиска оптимальных размеров печатных плат

В качестве критерия оптимизации принят коэффициент заполнения (K_3) площади печатных плат электронными компонентами (**ЭК**), который является универсальным показателем оценки эффективности использования площади печатных плат: с одной стороны, учитывается их технологичность, а с другой — эксплуатационные характеристики, особенно когда имеется возможность управления плотностью заполнения.

Получение как можно большего значения коэффициента заполнения во многом определяется используемой элементной базой и размерами ПП, от которых зависят компоновочные характеристики. Поиск оптимальных размеров ПП основан на предположении, что с учетом различных комбинаций размещения электронных

компонентов достигаются различные значения коэффициента заполнения для ПП различных размеров. Очевидно, что в пространстве поиска существуют точки, где можно получить максимальное значение K_3 , что будет соответствовать оптимальным размерам печатной платы.

Исходя из этого, представим модель оптимизации:

— целевая функция

$$K_3 = \max \left(\sum_{i=1}^n S_{ЭК_i} / S_{ПП_j} \right), \quad (1)$$

где $S_{ЭК_i}$ — установочная площадь i -го ЭК, размещаемого на ПП j -го типоразмера площадью $S_{ПП_j}$;

— ограничения

A_{\min} , B_{\min} , A_{\max} , B_{\max} — соответственно, минимальные и максимальные размеры ПП по высоте и глубине;

Δa , Δb — шаги приращения размеров ПП по двум координатам;

M — выбранное множество ЭК, которые могут использоваться для электронных модулей на основе печатных плат в тех электронных средствах, для которых разрабатывается НК.

Для нахождения оптимальных с точки зрения максимизации K_3 размеров ПП в дискретном пространстве может быть использован полный перебор или покоординатный поиск всех возможных размеров [4].

С учетом сказанного предлагается метод поиска оптимальных размеров ПП, который заключается в следующем.

1. Создается библиотека множества электронных компонентов M и производится ее структурирование по различным признакам для удобства дальнейшего использования.

2. Исходя из условий конкретной задачи задаются минимальные размеры ПП $A \times B$.

3. Случайным образом генерируется набор ЭК из общей библиотеки.

4. Варьируется размещение ЭК из полученного набора для получения варианта с максимальным количеством компонентов на ПП.

5. Аналогичные вычисления выполняются для всего множества типоразмеров ПП. При этом каждый последующий типоразмер определяется из соотношений $A_{i+1} = A_i + \Delta a$; $B_{i+1} = B_i + \Delta b$ (значения Δa , Δb зависят от конкретных условий, в которых проводится проектирование, иногда можно воспользоваться указаниями п. 2 ГОСТ 10317-79: размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными 2,5 при длине до 100 мм; 5,0 при длине до 350 мм; 10,0 при длине более 350 мм).

6. Выбираются оптимальные размеры ПП из условия достижения целевой функцией (1) максимального значения.

Размеры ПП могут быть установлены с учетом требований к обеспечению тепловых режимов

и электромагнитной совместимости. Поскольку оба они зависят от плотности размещения компонентов, промежутки между ЭК можно регулировать с помощью коэффициента K , увеличивая установочные размеры C_y , D_y компонентов: $C = C_y K$; $D = D_y K$,

где C , D — размеры ЭК с учетом увеличения.

С учетом полученных размеров ЭК производится поиск, результат которого может влиять на выбор окончательных размеров ПП.

Таким образом, изменяя плотность топологического рисунка и расстояние между компонентами, можно управлять электромагнитной обстановкой и влиять на тепловой режим.

Для решения задачи поиска оптимальных размеров ПП можно использовать системы автоматизированного проектирования и, в частности, программы размещения ЭК. В таком случае, однако, невозможно вносить какие-либо изменения в программу и требуются большие затраты времени, поэтому была создана программа автоматического размещения электронных компонентов на ПП.

Алгоритм размещения ЭК на печатных платах

На рис. 1 приведена схема алгоритма, составленного на основании описанного выше метода. В результате его выполнения определяются коэффициенты заполнения печатных плат заданных размеров.

Блок 1. Загрузка необходимых данных об ЭК (наименование, длина, ширина).

Блок 2. Ввод исходных данных:

- размер платы;
- алгоритм выбора электронных компонентов из набора;
- начальная точка размещения ЭК (размещение может начинаться с центра платы либо с верхнего левого угла);
- расстояние между электронными компонентами.

Блок 3. Построение списка ЭК, подлежащих установке (ЭК из библиотеки выбираются случайным образом, список наполняется до тех пор, пока суммарная площадь всех ЭК в списке не будет больше площади платы).

Блок 4. Начало цикла размещения максимального количества ЭК.

Блок 5. Начало цикла перебора ЭК из сформированного в блоке 3 списка (j — номер ЭК в списке).

Блок 6. Проверка наличия в списке неустановленных компонентов, номер и размер которых меньше, чем у текущего ЭК (если такие есть, то происходит переход к следующему ЭК, т. к. текущий установить не удастся).

Блок 7. Начало цикла перебора точек k для размещения текущего ЭК.

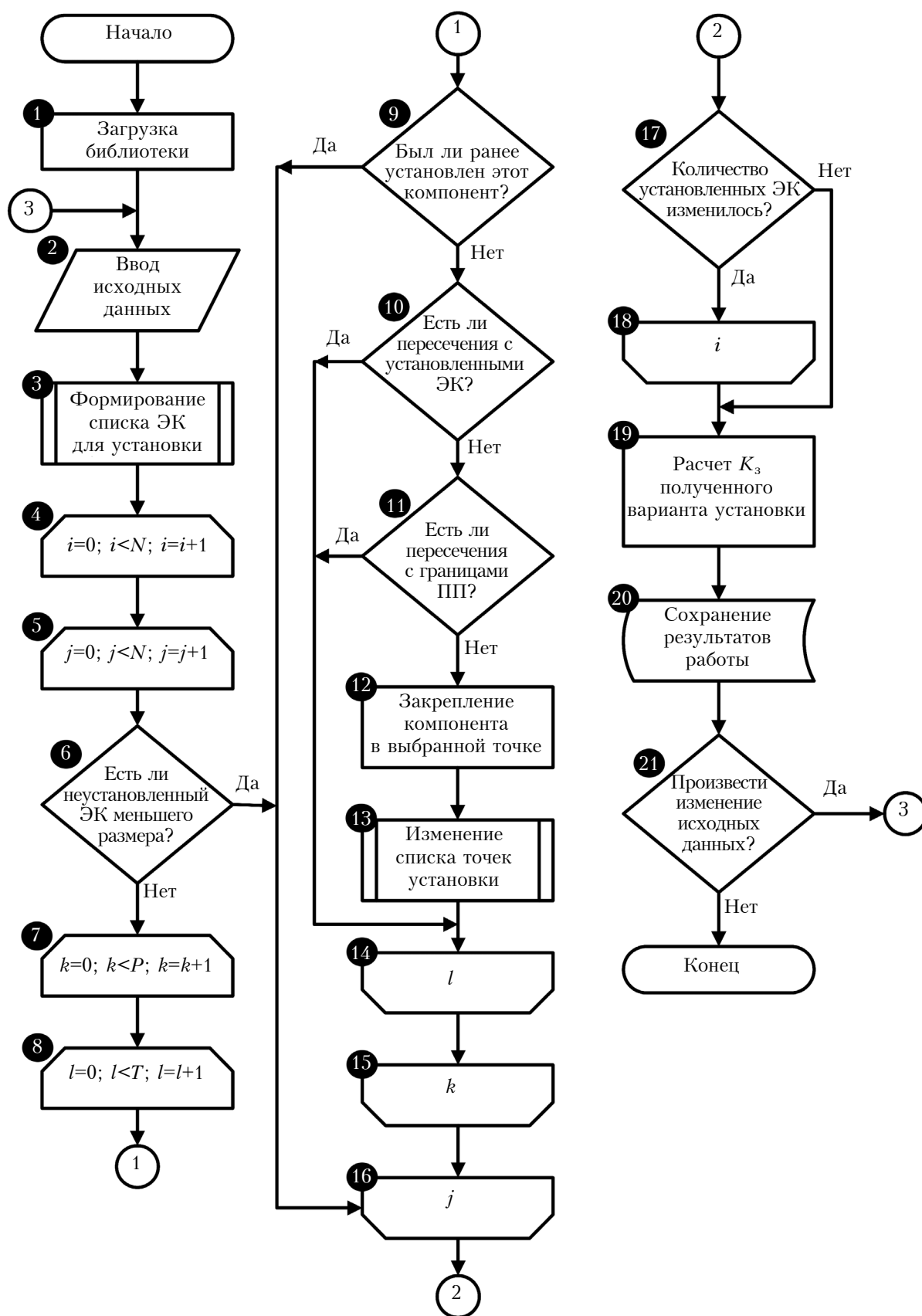


Рис. 1. Схема алгоритма размещения ЭК на печатных платах

Блок 8. Начало цикла перебора вариантов размещения текущего ЭК (положение l) в точке k (см. рис. 2).

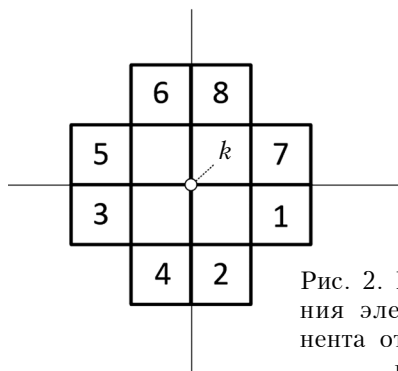


Рис. 2. Варианты размещения электронного компонента относительно заданной точки k

Блок 9. Проверка: был ли ранее установлен текущий электронный компонент.

Блок 10. Проверка на пересечение ЭК в текущем положении хотя бы с одним уже установленным компонентом.

Блок 11. Проверка на пересечение ЭК в текущем положении с границами ПП.

Блок 12. Фиксирование координат компонента на ПП.

Блок 13. К множеству возможных точек установки добавляются точки с координатами углов закрепленного в блоке 12 компонента.

Блок 14. Конец цикла перебора вариантов размещения ЭК, начатого в блоке 8.

Блок 15. Конец цикла перебора точек для размещения ЭК, начатого в блоке 7.

Блок 16. Конец цикла перебора ЭК, начатого в блоке 5.

Блок 17. Проверка изменения количества установленных ЭК после очередной итерации i , контролируемой условием блока 5.

Блок 18. Конец цикла размещения максимального количества ЭК, начатого в блоке 4.

Блок 19. Выполнение расчета коэффициента заполнения K_3 для установленных ЭК.

Блок 20. Сохранение всех результатов.

Блок 21. Запрос пользователю о необходимости повторить работу с другими исходными данными, устанавливаемыми в блоке 1.

Описание программы

Программа, реализующая представленный выше алгоритм для размещения ЭК на печатных платах, написана на языке высокого уровня C# с использованием технологии .Net 2.0.

После запуска программы происходит загрузка библиотеки ЭК. При наличии в библиотеке нескольких независимых подбиблиотек пользователь должен выбрать в диалоговом окне одну из них. После этого открывается главное окно программы (рис. 3), в разделе настроек которого задаются все начальные параметры, реализующие алгоритм, путь папки для сохранения результатов, а также список размеров ПП.

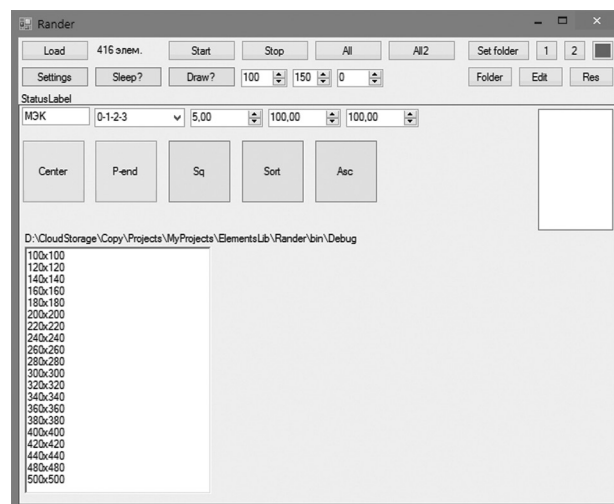


Рис. 3. Главное окно программы

По окончании работы на экране появляется картинка с получившимся вариантом размещения, а также вся необходимая информация для анализа результатов (рис. 4). Для удобства информация представлена в виде таблиц.

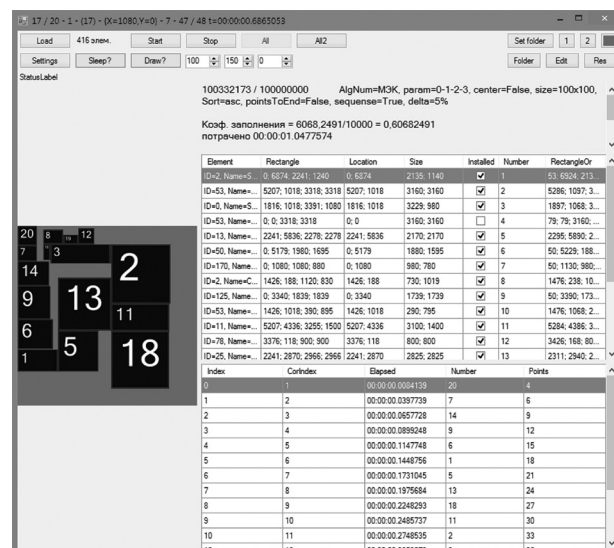


Рис. 4. Окно с результатами размещения ЭК

На рис. 5 показано окно, демонстрирующее работу с подпрограммой редактирования библиотеки ЭК, которая позволяет добавлять и исключать библиотеки и отдельные ЭК, а также проводить редактирование. Электронные компоненты представляются в упрощенном виде с указанием габаритных размеров.

На рис. 6 приведено окно, демонстрирующее работу подпрограммы просмотра всех полученных результатов. В отличие от представления результатов по окончании работы алгоритма (рис. 4), после выполнения подпрограммы можно увидеть не только последний вариант размещения, но и все предыдущие, а также свести все данные по результатам в одну таблицу.

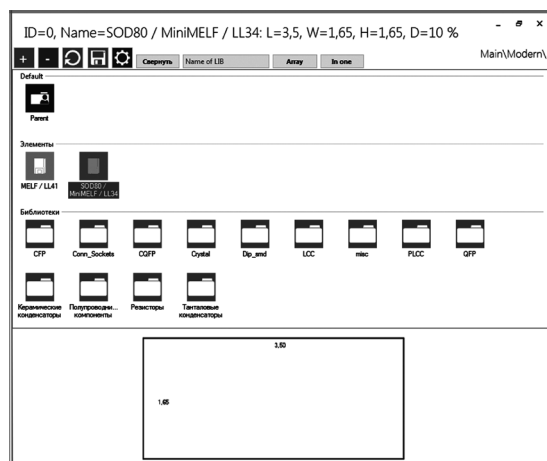


Рис. 5. Окно менеджера библиотеки ЭК

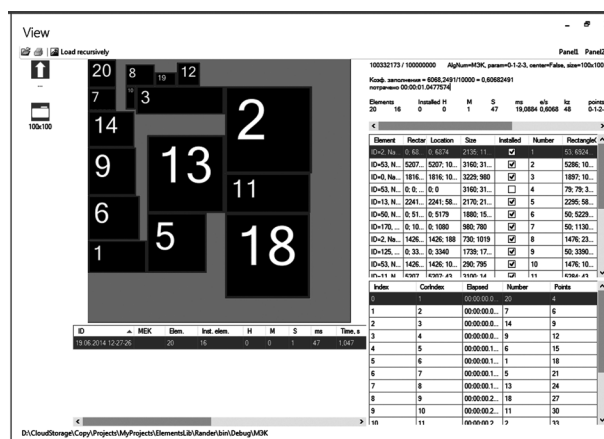


Рис. 6. Окно просмотра результатов

Практическое использование программы и обсуждение результатов

С помощью разработанной программы проведены исследования компоновочных характеристик ПП ряда типоразмеров — от 100×100 мм до 500×500 с шагом $\Delta a = \Delta b = 20$ мм. Размеры выбраны таким образом, чтобы они равномерно перекрывали весь диапазон размеров ПП, наиболее вероятных для применения в несущих конструкциях. При этом следует отметить, что в данном случае не ставилась задача проведения глобальных исследований, а лишь определения тенденции изменения коэффициента заполнения в зависимости от размеров ПП и применяемой элементной базы.

На рис. 7—9 представлены зависимости усредненного значения коэффициента заполнения K_z от размеров (площади S) печатных плат (на каждом рисунке приведено по три кривые, соответствующие различным значениям расстояния между ЭК, которое регулируется величиной коэффициента K ; для наглядности графики

смещены по вертикали относительно друг друга, а значения K_z указаны для всех размеров ПП). На рис. 7 представлены данные, полученные для современной элементной базы для поверхностного монтажа (свыше четырехсот ЭК в библиотеке); на рис. 8 — для навесных ЭК, которые монтируются в отверстия (ЭК, которые предшествовали появлению компонентов для поверхностного монтажа и по разным причинам востребованы сейчас; в библиотеке их около ста); на рис. 9 — результаты, полученные при комбинации предыдущих двух вариантов — использовании элементной базы для поверхностного монтажа и монтажа в отверстия (около пятисот ЭК в библиотеке).

Библиотека электронных компонентов построена на базе библиотек ЭК САПР DipTrace. Основная часть ЭК взята из библиотек General, Cap, Res, Cap_smd. Для возможности просмотра ЭК необходимо открыть программу PCB Layout, которая входит в состав САПР DipTrace, и выбрать необходимую библиотеку.

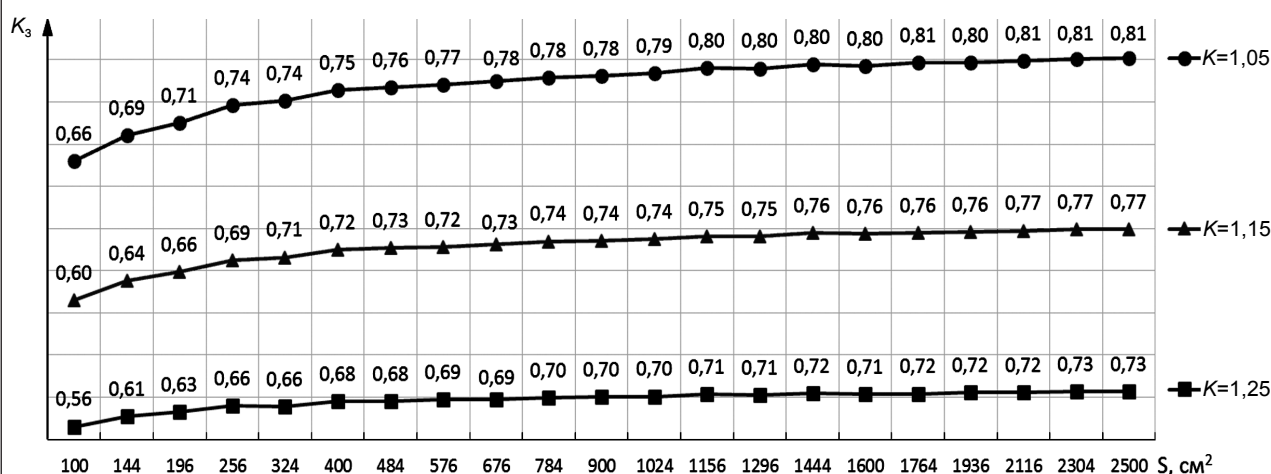


Рис. 7. Зависимости усредненного значения коэффициента заполнения ПП электронными компонентами для поверхностного монтажа от площади ПП при различном расстоянии между ЭК

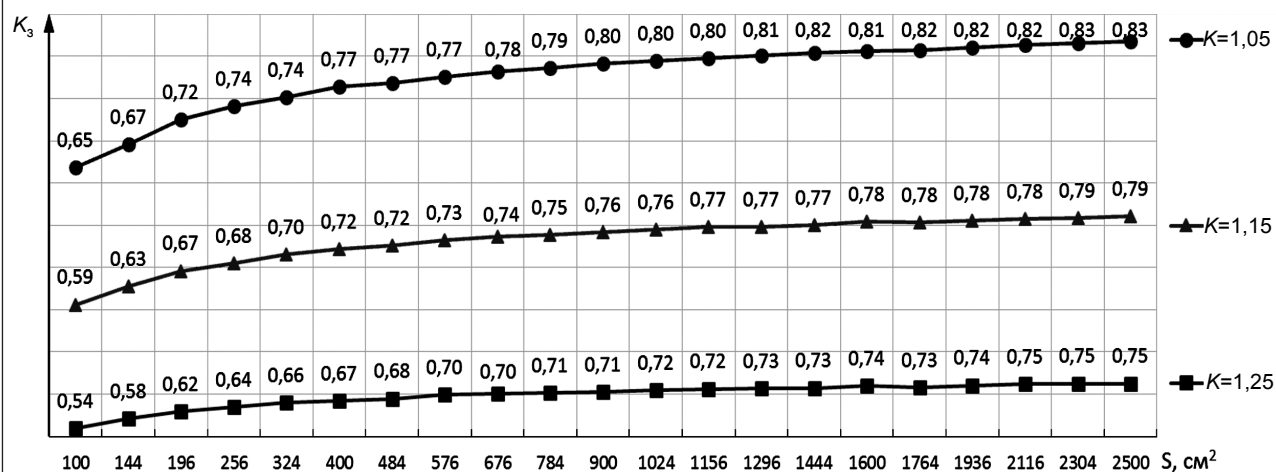


Рис. 8. Зависимости усредненного значения коэффициента заполнения ПП навесными ЭК от площади ПП при различном расстоянии между ЭК

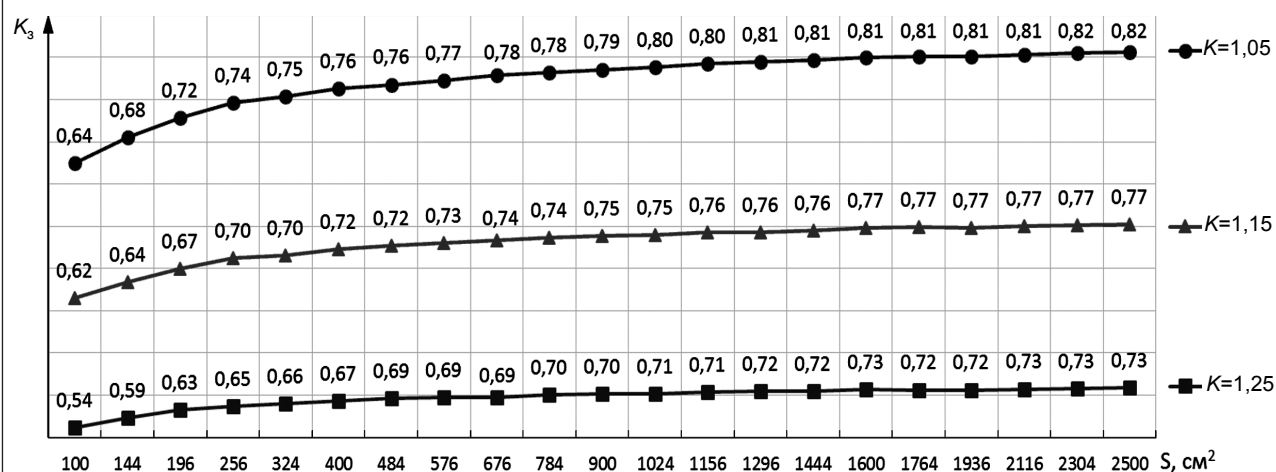


Рис. 9. Зависимости усредненного значения коэффициента заполнения ПП навесными ЭК и компонентами для поверхностного монтажа от площади ПП при различном расстоянии между ЭК

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие выводы.

1. Чем меньше размеры плат, тем более резко увеличивается K_3 при пошаговом их увеличении.

2. Изменение расстояния между ЭК, устанавливаемое коэффициентом K , практически не влияет на характер полученных зависимостей.

3. Прослеживается зависимость величины K_3 от размеров ЭК, а значит от используемой элементной базы:

— электронные компоненты предыдущего поколения для монтажа в отверстия, имеющие большие размеры, дают заметно лучшие результаты по заполнению ПП (рис. 8);

— применение ЭК для монтажа на поверхность и в отверстия (рис. 9) не вызывает заметного изменения коэффициента заполнения по сравнению с использованием только ЭК для поверхностного монтажа (это можно объяснить наличием в обоих случаях электронных компонентов в микрокорпусах, что снижает плотность заполнения площади печатных плат).

4. Экстремальных значений коэффициента заполнения в исследованном ряду типоразмеров не наблюдалось.

Выводы

Разработанный метод, реализованный посредством алгоритма и программы, позволяет оперативно определять зависимость коэффициента заполнения от размеров печатных плат для элементной базы, характерной для электронных средств различных направлений техники. Использование коэффициента, определяющего увеличение установочных размеров ЭК, позволяет влиять на обеспечение электромагнитной совместимости и теплового режима.

Исследование компоновочных характеристик ПП с использованием предложенного метода показало, что ярко выраженные экстремумы коэффициента заполнения отсутствуют. Это говорит о том, что при выборе оптимальных размеров ПП для стандартных несущих конструкций недостаточно учитывать только состав элементной базы, необходимо исследовать зависимость

компоновочных характеристик печатных плат от других факторов, таких как количество возможных контактов соединителей, количество ЭК, образующих функционально законченные печатные узлы, и пр. В то же время, при разработке электронных средств, в тех случаях когда известен набор компонентов в электронных модулях, использование данного метода для определения оптимальных размеров печатных плат вполне оправданно.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Овсищев П. И., Голованов Ю. В., Ковешников В. П. и др. Несущие конструкции радиоэлектронной аппаратуры. — Москва: Радио и связь, 1988.

2. Лутченков Л. С. Оптимальное проектирование несущих конструкций как сложных систем. — Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1990.

3. Романова Ю. С., Шерин К. Ю. Система базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств: состояние проблемы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2005. — № 2. — С. 3 — 5.

4. Фролов В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС. — Киев: Вища школа, 1991.

Дата поступления рукописи
в редакцию 25.06 2014 г.

А. А. ЄФІМЕНКО, О. П. КАРЛАНГАЧ, С. М. ЛАЗАРЄВ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: aiefimen@gmail.com

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РОЗМІРІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ДЛЯ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Запропоновано метод, алгоритм і програму, що його реалізує, які призначені для визначення оптимальних розмірів друкованих плат несучих конструкцій та електронних засобів різних напрямків техніки. За критерій оптимізації прийнято коефіцієнт заповнення площі друкованих плат електронними компонентами. Метод дозволяє оперативно визначати залежність коефіцієнта заповнення від розмірів друкованих плат щодо різної елементної бази.

Ключові слова: розміри друкованих плат, несучі конструкції, оптимізація, коефіцієнт заповнення, елементна база.

DOI: 10.15222/TKEA2014.5-6.03
UDC 621.3.396.6

A. A. YEFIMENKO, A. P. KARLANGACH, S. N. LAZAREV

Ukraine, Odessa National Polytechnic University
E-mail: aiefimen@gmail.com

SEARCH FOR THE OPTIMAL SIZE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS FOR MECHANICAL STRUCTURES FOR ELECTRONIC EQUIPMENT

The authors present a method, an algorithm and a program, designed to determine the optimal size of printed circuit boards (PCB) of mechanical structures and different kinds of electronic equipment. The PCB filling factor is taken as an optimization criterion. The method allows one to quickly determine the dependence of the filling factor on the size of the PCB for various components.

Keywords: printed circuit boards size, mechanical structure for electronic equipment, optimization, fill factor, element base.

REFERENCES

1. Ovsishcher P. I., Golovanov Yu. V., Koveshnikov V. P. et al. *Nesushchie konstruksii radioelektronnoi apparatury* [Bearing structures of electronic equipment]. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 232 p.

2. Lutchenkov L. S. *Optimal'noe proektirovanie nesushchikh konstruksii kak slozhnykh sistem* [Optimal design of load-bearing structures as complex systems]. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1990, 112 p.

3. Romanova Yu. S., Sherin K. Yu. [The base carrying constructions system of the radio-electronic facilities: issues of the day]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2005, no 2, pp. 3-5. (in Russian)

4. Frolov V. A. [Analysis and optimization in applications design RES] *Analiz i optimizatsiya v prikladnykh zadachakh konstruirovaniya RES*, Kiev, Vishcha shkola, 1991, 310 p.

К. т. н. В. С. ГОЛУБ

Украина, г. Киев, Научно-производственная фирма VD MAIS

E-mail: V.Golub@vdmais.kiev.ua

НОВЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ МОДУЛЯТОР С МАЛОЙ ЧАСТОТОЙ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ

Предложен импульсный интегрирующий модулятор (преобразователь аналогового сигнала) с модуляцией частоты и длительности импульсов, подобной сигма-дельта-модуляции (с малой частотой переключений), но без квантования. Модулятор характеризуется отсутствием шума квантования, свойственного сигма-дельта-модулятору, и малой частотой переключений, в отличие от частотно-импульсного. Модулятор рекомендуется, в частности, для преобразования сигналов на входе усилителей мощности класса D.

Ключевые слова: дискретизация, непрерывные отсчеты, аналого-импульсный преобразователь, импульсный модулятор, частота переключений, усилитель класса D.

Для преобразования аналогового сигнала в импульсный используются модуляторы — частотно-импульсный (ЧИМ) [1], сигма-дельта-модулятор (СДМ) [2] и другие — с непрерывными отсчетами аналогового сигнала известными, например, как continuous time.

Частотно-импульсный модулятор обладает повышенной частотой переключений, что приводит, например, к снижению КПД усилителя мощности класса D, если модулятор применяется для его управления. Недостатком сигма-дельта-модулятора является то, что он создает шум квантования, попадающий в спектр сигнала того же усилителя класса D. Для уменьшения шума прибегают к повышению порядка СДМ, что приводит к усложнению его схемы, а также к необходимости повышения частоты дискретизации [3, 4]. Настоящая работа посвящена описанию импульсного модулятора [5], который лишен указанных недостатков и, кроме того, имеет более высокий коэффициент модуляции, чем СДМ.

Рассмотрим обобщенную структурную схему интегрирующих модуляторов с отрицательной обратной связью, приведенную на **рис. 1**.

Модулятор представляет собой цепь последовательно соединенных интегратора, компара-

тора и формирователя импульсов, охваченную отрицательной обратной связью через сумматор, включенный на входе. Из аналогового сигнала на входе модулятора вычитается выходная импульсная последовательность, поступающая по цепи обратной связи. В результате этого поддерживается равновесие в системе, которая является системой автоматического регулирования интегрирующего типа с дискретным преобразованием.

Аналоговый сигнал используется со смещением, его напряжение E_0 может поступать на вход модулятора, как это показано на рис. 1, или же, с обратным знаком, через цепь обратной связи (ОС). Наличие смещения обеспечивает формирование однополярной импульсной последовательности. Вид импульсной модуляции определяется формирователем импульсов и способом его управления. Период дискретизации, который состоит из одного импульса и одного интервала между импульсами, может быть постоянным или переменным в зависимости от вида модуляции.

Формирователем импульсов, например, для ЧИМ является одновибратор [1], для СДМ — D-триггер [2]. D-триггер в модуляторе управляется внешними тактовыми импульсами, зави-

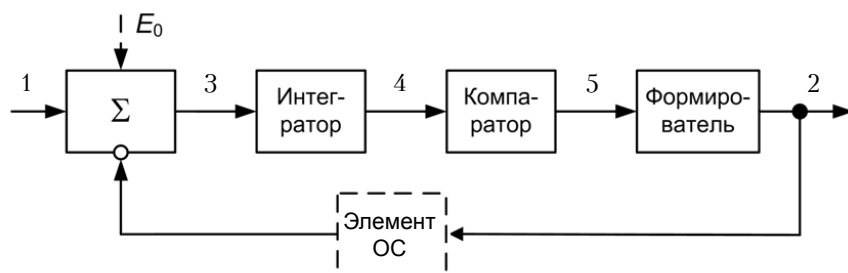


Рис. 1. Обобщенная структурная схема интегрирующих импульсных модуляторов с непрерывными отсчетами аналогового сигнала

сящими от состояния компаратора, которое обусловлено напряжением на выходе интегратора. Поскольку тактовые импульсы не зависят от модулятора, начало и окончание импульсов выходного сигнала модулятора не совпадает с моментами срабатывания и отпускания компаратора. Длительность импульсов модулятора ($\tau_{\text{имп}}$) и интервалов ($\tau_{\text{инт}}$) между ними кратны периоду квантования. Одновибратор же, входящий в состав ЧИМ, срабатывает непосредственно от компаратора, причем без задержки, которая в СДМ является переменной и создает шум квантования. Особенностью разработанного автором модулятора, условно обозначенного **ИМГ**, является наличие двух компараторов с разными уровнями компарирования, а в качестве формирователя импульсов — RS-триггер, поочередно управляемый ими.

Как видно на **рис. 2**, несущие (немодулированные) последовательности импульсов всех трех видов модуляции — одинаковые, типа «мандра», с частотой

$$f_0 = (1/2)/\tau_0, \quad (1)$$

где τ_0 — длительность полупериода немодулированной последовательности, равная длительности импульсов и интервалов между ними (в общем случае длительность импульсов может быть не равна длительности интервалов).

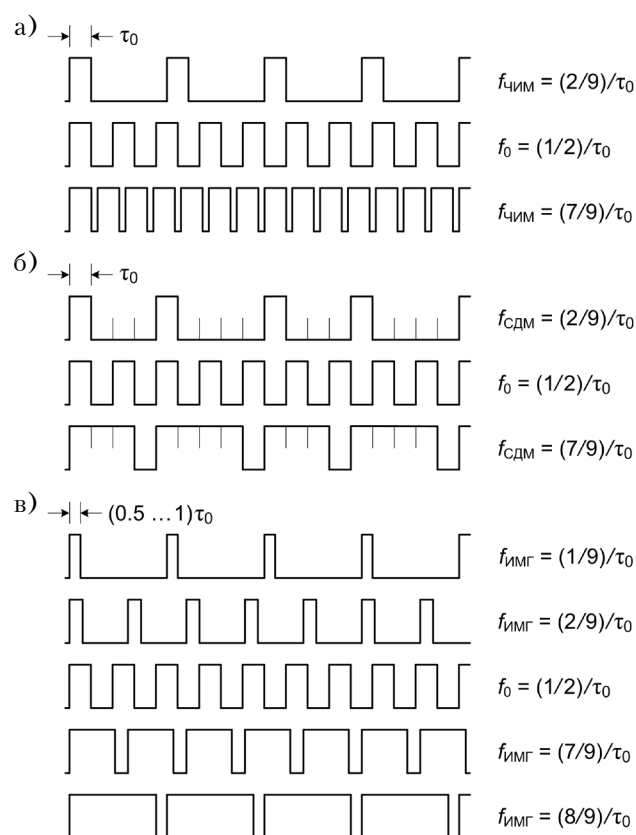


Рис. 2. Импульсные последовательности сигналов различных модуляторов:
а — ЧИМ; б — СДМ; в — ИМГ

На рис. 2 справа показаны условные значения частот для каждого из видов модуляции — $f_{\text{чим}}$, $f_{\text{сдм}}$ и $f_{\text{имг}}$ (общее обозначение — $f_{\text{мод}}$). Условная частота выходного сигнала, которая является плотностью значений «1» в функции времени, пропорциональна аналоговому сигналу на входе (со смещением) и равна

$$f_{\text{мод}} = (\tau_{\text{имп}}/\tau_{\text{дис}})/\tau_0$$

или, с учетом (1),

$$f_{\text{мод}} = 2f_0(\tau_{\text{имп}}/\tau_{\text{дис}}),$$

где $\tau_{\text{дис}} = \tau_{\text{имп}} + \tau_{\text{инт}}$ — период дискретизации.

Отметим важную особенность рассматриваемых модуляторов. В составе выходной импульсной последовательности аддитивно присутствует аналоговая составляющая, соответствующая аналоговому сигналу на входе, которая сравнивается с аналоговым сигналом на входе с учетом коэффициента передачи цепи обратной связи. Помимо аналоговой составляющей, на выходе модулятора присутствует постоянная составляющая E_0 , обусловленная смещением, и переменные импульсные составляющие, обусловленные импульсной формой сигнала и имеющие повышенную по сравнению с аналоговым сигналом частоту. Импульсные составляющие в зависимости от назначения сигнала модулятора (например, для преобразования сигнала на входе усилителей мощности класса D) могут подавляться фильтром нижних частот. Сказанное об импульсных составляющих относится к неквантованным сигналам. Сигналы с квантованием (например, типа СДМ) дополнительно содержат еще и шум квантования, частично попадающий в полосу частот аналогового сигнала.

Частота дискретизации сигналов импульсных модуляторов является частотой переключений ($f_{\text{пер}}$). Для ЧИМ-сигнала (рис. 2, а) $f_{\text{чим}} = f_{\text{пер}}$, а для СДМ-сигнала (рис. 2, б) аналогичное равенство справедливо лишь для частот $f_{\text{сдм}} \leq f_0$. При $f_{\text{сдм}} > f_0$ частота переключений СДМ-сигнала, в отличие от ЧИМ, уменьшается: $f_{\text{пер}} < f_{\text{сдм}}$. В ряде случаев, например для усилителей класса D, это является преимуществом СДМ-сигнала. На рис. 2, б видно также, что СДМ-сигнал является квантованным (квантование показано тонкими линиями): частота одного из его периодов дискретизации — $f_{\text{сдм}} = (1/4)/\tau_0$, другого — $f_{\text{сдм}} = (1/5)/\tau_0$, а средняя частота двух периодов в сумме, как и всей импульсной последовательности в целом (в данном случае), — $f_{\text{сдм}} = (2/9)/\tau_0$.

Сигналы разработанного модулятора, ИМГ, аналогичны сигналам СДМ, но в них отсутствует квантование (рис. 2, в). Кроме того, ИМГ обладает еще одним преимуществом: если при наличии модуляции выходной сигнал СДМ содержит короткие импульсы или интервалы длитель-

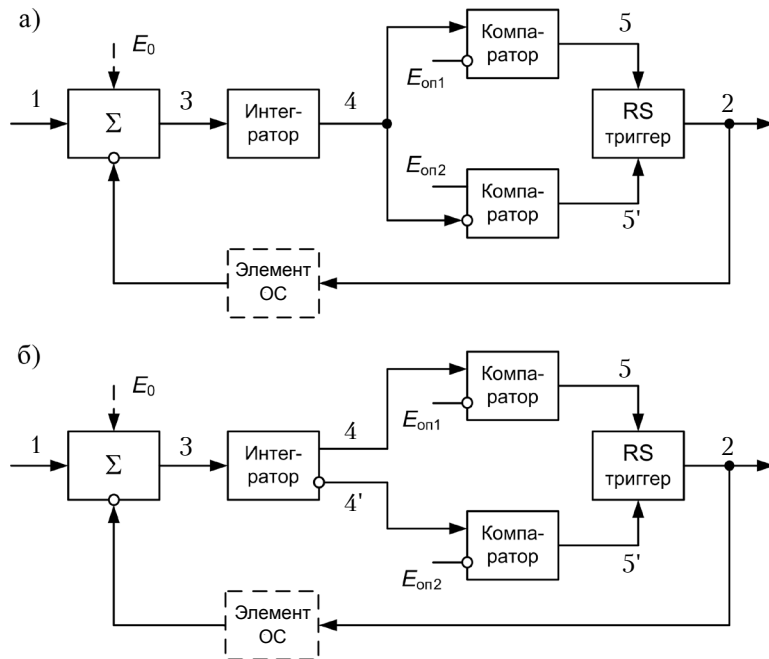


Рис. 3. Структурная схема ИМГ с двухуровневым компарированием и формирователем типа RS-триггера с одним (а) и двумя противофазными (б) выходами интегратора

ностью τ_0 (рис. 2, б), то аналогичные длительности в выходном сигнале ИМГ, зависящие от уровня аналогового сигнала на входе, дополнительно уменьшаются от τ_0 до $\tau_0/2$. В результате при одинаковой частоте переключений, согласно рис. 2, коэффициент модуляции, равный примерно 80% для СДМ ($f_{СДМ} = (2/9)/\tau_0$ и $f_{СДМ} = (7/9)/\tau_0$), в предложенном модуляторе может быть увеличен до 90% ($f_{ИМГ} = (1/9)/\tau_0$ и $f_{ИМГ} = (8/9)/\tau_0$).

На рис. 3 показаны два варианта схемы нового модулятора, отличающиеся подключением компараторов. На рис. 4 показаны две группы эюр напряжений в цепях модулятора: слева — при отрицательных (относительно смеще-

ния) уровнях сигнала, справа — при положительных. Эпюры в строках 1, 2, 3, 4 соответствуют сигналам в тех местах, которые обозначены так же на схеме рис. 3, а также на рис. 1.

На рис. 4 в строке 1 показаны входные сигналы (со смещением), где E_0 — напряжение смещения, равное половине амплитуды выходных (обратной связи) импульсов, а ΔE соответствует сигналам, которые обычно являются переменными, а в данном случае — с постоянными уровнями, отрицательным и положительным. Соответственно, при наличии сигнала длительность импульсов не равна длительности интервалов выходного сигнала 2 (обратной связи), однако при отсутствии модуляции, когда $\Delta E = 0$, они равны (на рисунке не показаны).

Выходные импульсы модулятора формируются RS-триггером. Они же, как было сказано ранее, являются импульсами обратной связи (при коэффициенте передачи цепи обратной связи, равном единице), которые вычитаются из входного аналогового сигнала. В результате на выходе сумматора образуются разностные сигналы, показанные в строке 3, а на выходе интегратора — в строке 4. Длительность формируемых импульсов зависит от нескольких причин: во-первых, от входного сигнала («сигнальная» модулирующая зависимость), преобразуемого вместе с сигналом обратной связи в составе сигнала на входе интегратора; во-вторых, от постоянной времени интегратора и пороговых значений напряжения срабатывания компараторов E_{on1} и E_{on2} («схемная» зависимость).

Запишем математические соотношения для сигналов на выходе интегратора, на участках его импульсов и интервалов между ними:

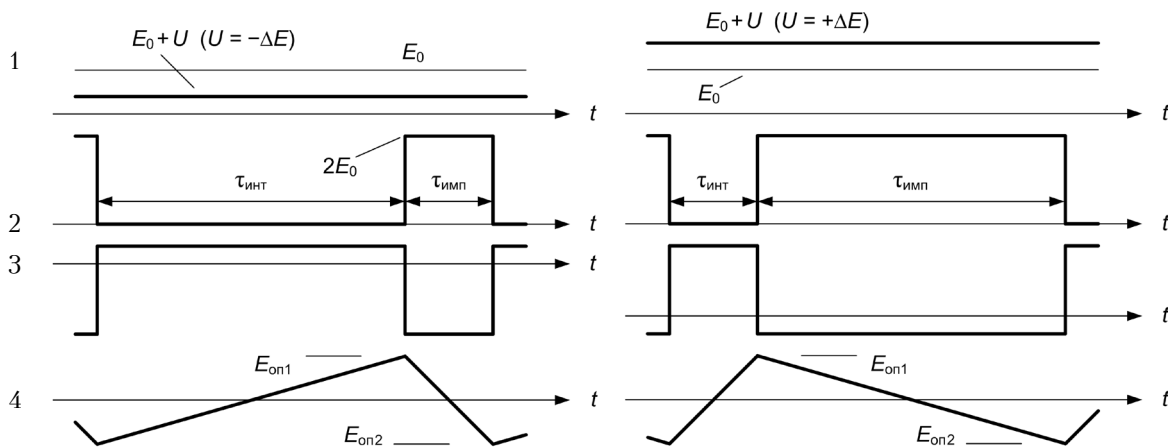


Рис. 4. Эпюры напряжений в различных точках цепи ИМГ с отрицательным (слева) и положительным (справа) уровнями аналогового сигнала:

1 — на входе модулятора; 2 — сигнал обратной связи, обусловленный сигналом на выходе модулятора; 3, 4 — соответственно, на входе и выходе интегратора

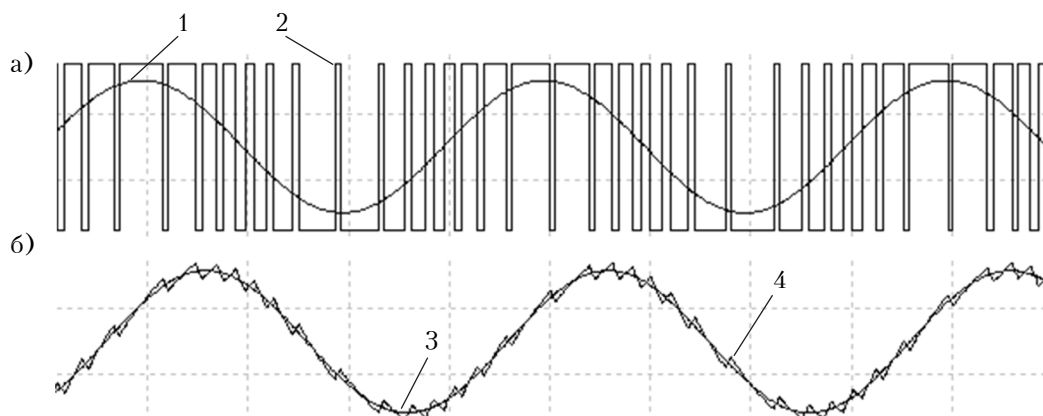


Рис. 5. Сигналы разработанного модулятора, ИМГ, полученные с помощью программы моделирования NI Multisim 10.1 [6]:

a — входной аналоговый синусоидальный (1) и выходной импульсный (2);

б — аналоговая составляющая выходного сигнала с остаточными пульсациями на выходе внешнего фильтра (4), показанная на фоне входного сигнала, прошедшего через такой же фильтр (3)

$$(1/\tau) \int (E_0 - U) dt = (\tau_{\text{имп}}/\tau)(E_0 - U) = E_{\text{оп}}; \quad (3)$$

$$(1/\tau) \int (E_0 + U) dt = (\tau_{\text{инт}}/\tau)(E_0 + U) = E_{\text{оп}}, \quad (4)$$

где τ — постоянная времени интегратора;

$$E_{\text{оп}} = E_{\text{оп1}} - E_{\text{оп2}}.$$

В соответствии с (3) и (4), длительности импульсов и интервалов между ними определяют как

$$\tau_{\text{имп}} = \tau E_{\text{оп}} / (E_0 - U) = \tau_0 / (1 - U/E_0);$$

$$\tau_{\text{инт}} = \tau E_{\text{оп}} / (E_0 + U) = \tau_0 / (1 + U/E_0),$$

$$\text{где } \tau_0 = \tau E_{\text{оп}} / E_0.$$

Исходя из этого, для трех значений U , равных 0, $+E_0$ и $-E_0$, значения указанных длительностей будут, соответственно, следующими:

$$\tau_{\text{имп}} = \tau_0; \rightarrow \infty; \tau_0/2;$$

$$\tau_{\text{инт}} = \tau_0; \tau_0/2; \rightarrow \infty.$$

Эти значения $\tau_{\text{имп}}$ и $\tau_{\text{инт}}$ являются предельными. Реально же вместо $\tau_0/2$ значение может быть несколько большим при коэффициенте модуляции 90%. Последнее (ограничение, например, величиной 90%) обусловлено тем, что импульсные составляющие модулированного сигнала не должны попадать в спектр аналогового сигнала. Возможен выбор и других реальных значений U (в сравнении с E_0) — в зависимости от требуемого соотношения частот в модуляторе.

Из приведенных на рис. 5 результатов моделирования следует, что аналогово-импульсное преобразование в предложенном модуляторе производится «один к одному», без временной задержки между входным сигналом и аналоговой составляющей выходного сигнала. Временная задержка между сигналами, показанными на рис. 5, *a* и на рис. 5, *б*, обусловлена наличием внешних фильтров.

Дополнительно отметим, что элемент ОС, показанный на рис. 1 и рис. 3, может быть линейным или нелинейным. В первом случае устрой-

ство может иметь коэффициент передачи, меньший или больший единицы, а во втором оно может быть формирователем амплитуды импульсов обратной связи. В обоих случаях параметры устройства будут влиять на частоту выходных импульсных последовательностей, что должно учитываться при их выборе.

Выводы

Предложенный модулятор отличается от частотно-импульсных малой частотой переключений и, соответственно, способен обеспечивать более высокий КПД устройств, в которых он может применяться, а также отсутствием шума квантования, свойственного СДМ. Цепь компарирования интегрируемой разности входного и выходного сигналов в нем — двухуровневая, формирующая два сигнала, которые управляют RS-триггером, являющимся формирователем выходного сигнала. Технические характеристики модулятора позволяют рекомендовать его для применения на входе коммутационного каскада усилителя мощности класса D.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Т. 2. — Москва: Мир, 1983.
2. Голуб В. С. Сигма-дельта модулятор: петлевые фильтры и шум квантования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — №2–3. — С. 19–27.
3. Голуб В. Аудио усилители мощности класса D: принципы построения // Электронные компоненты - Украина. — 2010. — №12. — С. 70–78.
4. Hawksford M. Modulation and System Techniques in PWM and SDM Switching Amplifiers // J. Audio Eng. Soc. — 2006. — Vol. 54, №3. — P. 107–136.
5. Патент України № 87966 U. Импульсный модулятор Голуба / Голуб В. С. — 2014. — Бюл. № 4.
6. Макаренко В. Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI Multisim, Ч. 1–9 // Электронные компоненты и системы, 2008, №№ 1–4, 6–9, 12.

Дата поступления рукописи
в редакцию 13.03 2014 г.

НОВИЙ ІМПУЛЬСНИЙ МОДУЛЯТОР З МАЛОЮ ЧАСТОТОЮ ПЕРЕМІКАНЬ.

Запропоновано імпульсний інтегруючий модулятор (перетворювач аналогового сигналу) з модуляцією частоти і тривалості імпульсів, подібною до сигма-дельта-модуляції (з малою частотою перемикань), але без квантування. Модулятор характеризується відсутністю шуму квантування, властивого сигма-дельта-модулятору, та малою частотою перемикань, на відміну від частотно-імпульсного. Модулятор рекомендується, зокрема, для перетворення сигналів на вході підсилювачів потужності класу D.

Ключові слова: дискретизація, безперервні відліки, аналого-імпульсний перетворювач, імпульсний модулятор, частота перемикань, підсилювач класу D.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.10
UDC 621.376.5

V. S. GOLUB

Ukraine, Kyiv, Scientific-Production Company VD MAIS
E-mail: V.Golub@vdmals.kiev.ua

NEW PULSE MODULATOR WITH LOW SWITCHING FREQUENCY

The author presents an integrating pulse modulator (analog signal converter) with the pulse frequency and duration modulation similar to sigma-delta modulation (with low switching frequency), without quantization. The modulator is characterized by the absence of the quantization noise inherent in sigma-delta modulator, and a low switching frequency, unlike the pulse-frequency modulator. The modulator is recommended, in particular, to convert signals at the input of the class D power amplifier.

Keywords: quantization, continuous readouts, analog-pulse converter, pulse modulator, switching frequency, class D amplifier.

REFERENCES

1. Khorovits P., Khill U. *Iskusstvo skhemotekhniki* [The Art of circuitry]. In 2 volumes, vol. 2., Moscow, Mir, 1983.
2. Golub V. S. Sigma-del'ta modulyator: petlevye fil'try i shum kvantovaniya [Sigma-delta modulator: loop filters and quantization noise]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature.*, 2013, no 2-3, pp. 19-27.
3. Golub V. Audio usiliteli moshchnosti klassa D: printsipy postroeniya [Audio power class D amplifiers: construction principles]. *Elektronnye komponenty - Ukraina*, 2010, no 12, pp. 70-78.
4. Hawksford M. Modulation and System Techniques in PWM and SDM Switching Amplifiers. *J. Audio Eng. Soc.*, 2006, vol. 54, no 3, pp. 107-136.
5. UA Patent 87966 U. *Impul'snii modulyator Goluba* [Golub pulse modulator]. Golub V. S., bull. no 4, 2014.
6. Makarenko V. Modelirovaniye radioelektronnykh ustroystv s pomoshch'yu programmy NI Multisim [Simulation of radioelectronic devices using the NI Multisim]. Parts 1-9. *Elektronnye komponenty i sistemy*, 2008, no 1-4, 6-9, 12.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ефименко А. А. Проектирование межблочных электрических соединений электронных средств в базовых несущих конструкциях. — Одесса: Политехперіодика, 2013.

В книге рассматриваются вопросы проектирования межблочных электрических соединений в электронной аппаратуре, создаваемой с использованием базовых несущих конструкций (БНК). Приводится классификация и характеристика современных типов электрических соединений и БНК, формализованы задачи их проектирования. Большое внимание уделено методам и средствам проектирования межблочных электрических соединений и БНК, а также вопросам создания моделей и алгоритмов проектирования. Отдельно рассмотрены методы проектирования электромонтажа с использованием непаяных контактных соединений. Рассматриваемые методы и модели — компьютерно-ориентированные и предполагают широкое использование средств вычислительной техники.

Книга предназначена для разработчиков электронных средств. Вместе с тем, она может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



Д. ф.-м. н. А. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. А. В. ИВАНЧЕНКО

Украина, Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

КИНЕТИКА ДЕФОРМАЦИИ ВАХ ОКСИДНЫХ ВАРИСТОРНЫХ СТРУКТУР, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ПЕРЕЗАРЯДКОЙ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ

Проведено моделирование деформации импульсных вольт-амперных характеристик (ВАХ) отдельного межкуристаллитного потенциального барьера при переходных процессах поляризации/деполяризации, связанной с перезарядкой поверхностных электронных состояний, которые обуславливают этот барьер. Установлено, что в зависимости от концентрации и степени заполнения этих поверхностных состояний электронами воздействие постоянного напряжения может привести к смещению импульсных ВАХ в область больших или же малых токов. Показана возможность применения найденных закономерностей для керамических варисторных структур. Предложенная модель позволяет интерпретировать наблюдаемые при испытаниях варисторов на ускоренное старение «аномальные» эффекты, такие как возрастание классификационного напряжения и уменьшение мощности активных потерь.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, поверхностные электронные состояния, варистор, деградация, поляризация, деполяризация, уход напряжения, релаксация, межкуристаллитный барьер.

Длительное воздействие электрической нагрузки на оксидно-цинковые варисторы приводит к деформации их вольт-амперных характеристик (ВАХ), которую связывают с изменением высоты и ширины межкуристаллитных барьеров, являющихся основным их структурным рабочим элементом. Указанный процесс может быть вызван миграцией ионов висмута, кобальта [1] или цинка [2] к границе кристаллитов (зерен ZnO) при протекании тока, десорбцией кислорода [3, 4], изменением заполнения глубоких поверхностных электронных состояний (ПЭС) на границах кристаллитов ZnO [5–7].

Наиболее известные механизмы, связанные с миграцией ионов и десорбцией кислорода, проанализированы в рамках электромиграционной [8, 9] и термодесорбционной [10] моделей деградации. Эти механизмы приводят к уменьшению классификационного напряжения и увеличению тока (или активной мощности рассеяния) в диапазоне предваристорного участка ВАХ в процессе электрической деградации. Тем не менее, в некоторых случаях при производственных испытаниях варисторов на стабильность имеют место аномальные эффекты, которые не могут быть объяснены в рамках указанных моделей. В частности, для отдельных видов керамики при испытаниях на «ускоренное старение» наблюдается увеличение электрического сопротивления [11] и уменьшение активной мощности рассеяния [12]. Возможность интерпретации этих аномалий в рамках представлений о перезарядке локализованных электронных состояний не выяснена, несмотря на то, что такие переходные

поляризационные явления оказывают влияние на формирование электрических свойств варисторных структур, в частности обуславливают деформацию их ВАХ. Также нет детальных исследований и моделей, учитывающих это в процессах деградации варисторов.

Следует отметить, что исследованиям поляризационных явлений в оксидно-цинковой керамике посвящен ряд работ [13–15]. Однако их направленность ограничивается в основном изучением физики механизмов этих процессов и определением параметров участвующих в них локализованных электронных состояний. Данные об изучении изменений ВАХ и их параметров (коэффициента нелинейности, токов утечки и классификационного напряжения), важные, прежде всего, для обоснования конкретных методов контроля, в литературе отсутствуют. Одним из перспективных средств анализа комплекса проявлений поляризационных процессов в рассматриваемых объектах может быть исследование поведения импульсных ВАХ, при измерении которых можно пренебречь изменением температуры и заполнения образующих межкуристаллитные барьеры поверхностных локализованных состояний.

Целью настоящей работы было проведение моделирования деформации импульсных ВАХ отдельного межкуристаллитного потенциального барьера в переходных процессах зарядовой поляризации/деполяризации и экспериментальных исследований смещений классификационного напряжения высоковольтных варисторных керамических структур в процессе деградации их характеристик при постоянном токе.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ВАХ

Базовые уравнения поляризации/деполяризации

Основная цель теоретической модели — установить связь между импульсными полевыми зависимостями электропроводности, т. е. зависимостями, определенными при фиксированных зарядах на ПЭС, и параметрами самих локализованных состояний.

Керамика, предназначенная для оксидно-цинковых варисторов, состоит из сильно легированных полупроводниковых (*n*-типа проводимости) кристаллических зерен ZnO и небольшого количества межкристаллитной фазы. Электрические свойства варисторной керамики контролируются межкристаллитными потенциальными (МП) барьерами. Эти барьеры образованы истощенными приповерхностными областями пространственного заряда (ОПЗ) двух соседних зерен ZnO и тонким слоем (2 нм) диэлектрической межкристаллитной (МК) фазы между ними [16].

Глубокие локализованные состояния на границе «полупроводник — диэлектрик» являются причиной изгиба энергетических зон в приповерхностных областях полупроводниковых кристаллитов. В постоянном электрическом поле изгиб зон на одной стороне границы кристаллита уменьшается, а на другой увеличивается. Это приводит к поляризации образца за счет дополнительного захвата и потери заряда (электронов) поверхностными и объемными локализованными состояниями, которые энергетически расположены вблизи уровня Ферми, а пространственно — на обеих сторонах тонкого диэлектрического межкристаллитного слоя. Перезарядка локализованных состояний происходит преимущественно за счет электронных переходов между локализованными состояниями и зоной проводимости кристаллитов ZnO. После того как электрическое поле уменьшается до нуля, начинается деполяризация образца. При возвращении образца в исходное состояние происходят обратные изменения в заполнении локализованных состояний.

Для того чтобы при анализе кинетики деформации ВАХ оксидных варисторных структур учитывать только ПЭС, следует принять во внимание следующее.

Во-первых, причиной переходных поляризационных/деполяризационных явлений в исследуемых структурах является наличие в кристаллитах ZnO перезаряжающихся объемных и поверхностных локализованных электронных состояний [16, 17]. При этом перезарядка объемных локализованных состояний доминирует при малых поляризующих напряжениях (не выходящих за пределы предваристорного участка ВАХ). При высокой температуре и сильном электрическом поле (в том числе и им-

пульсном) переходной процесс определяют более «медленные» электронные состояния — поверхностные [18, 19].

Во-вторых, изменение рельефа МП-барьера вызывает только зарядка и разрядка глубоких ПЭС, что в итоге отражается на форме импульсных ВАХ образцов, поскольку во время их измерения распределение заряда на локализованных состояниях практически не успевает измениться.

Построение модели деформации ВАХ основано на определении кинетики функций заполнения ПЭС электронами в кристаллите при его зарядке (поляризации) и разрядке (деполяризации) и исследовании изменений импульсных ВАХ (или их параметров) в зависимости от значений этих функций.

Кинетика перезарядки локализованных состояний

При анализе электрических переходных процессов в варисторах в качестве их элемента использовали одномерную дипольную варисторную ячейку — полупроводниковый слой оксида цинка (толщиной около 10 мкм), заключенный между описанными выше МП-барьерами.

Изменение во времени (*t*) заряда ПЭС (для простоты принят один тип состояний) на границах кристаллита размером *2a* с центром координат в его середине: $\Delta Q(\pm a, t) = -e \cdot N(f(\pm a, t) - f(\pm a, 0))$ при приложении и снятии электрического напряжения к варисторной структуре определяется путем решения соответствующих кинетических уравнений для неравновесной функции заполнения ПЭС электронами $f(\pm a, t)$ в рамках статистики Шокли — Рида — Холла [20]:

$$df(\pm a, t)/dt = c_s^-([1 - f(\pm a, t)] \cdot n(\pm a, t) - f(\pm a, t) \cdot N^-), \quad (1)$$

где c_s^- — коэффициент захвата электронов поверхностным уровнем;

$n(\pm a, t)$ — распределение концентрации свободных электронов на границах полупроводниковых кристаллитов;

N^- — приведенная эффективная концентрация электронов в зоне проводимости для данного ПЭС.

При этом

$$n(\pm a, t) = n_0^- \exp(Y(\pm a, t));$$

$$N^- = N_C \exp(-\Delta E_S/(k_B T)),$$

где n_0^- — объемная концентрация свободных электронов в полупроводниковых кристаллитах, $n_0^- = N_C \exp(-\Delta E_{CF}/(k_B T))$;

$Y(\pm a, t)$ — безразмерные изгибы энергетических зон в ОПЗ полупроводникового кристаллита, $Y(\pm a, t) = e(\phi(\pm a, t) - \phi_0)/(k_B T)$;

N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости;

ΔE_S — энергия ионизации ПЭС;

k_B — постоянная Больцмана;

T — температура;

ΔE_{CF} — энергетическое расстояние между уровнем Ферми и дном зоны проводимости;

$\varphi(\pm a, t)$ — электрический потенциал;
 e — заряд электрона;
 φ_0 — потенциал в объеме полупроводника.

При решении уравнения (1) используются следующие начальные условия:

— при приложении электрического напряжения (поляризации)

$$f(\pm a, 0) = f_{SF}; \quad (2)$$

— при снятии электрического напряжения (деполяризации)

$$f(\pm a, 0) = f_{pol}(\pm a, t_{pol}). \quad (3)$$

Здесь f_{SF} — функция Ферми, определяющая заполнение ПЭС в равновесных условиях, $f_{SF} = [1 + \exp(\Delta E_S / (k_B T) - Y_{S0})]^{-1}$; Y_{S0} — равновесное значение $Y(\pm a, t)$ (до перезарядки ПЭС); $f_{pol}(\pm a, t_{pol})$ — значение функции заполнения ПЭС электронами в момент окончания действия поляризующего напряжения (t_{pol}).

Распределение потенциала

Для нахождения распределения потенциала на поверхности раздела полупроводников «ZnO — диэлектрическая МК-фаза» при поляризации ($Y_{pol}(\pm a, t)$) и деполяризации ($Y(\pm a, t)$) использовались условия непрерывности электрической индукции на границах «изолятор — полупроводник» [18]

$$\varepsilon_0 \varepsilon_d \frac{V_3(t)}{d_d} = \varepsilon_0 \varepsilon_s \frac{d\varphi(x, t)}{dx} \Big|_{x=-a} + e N_s f(-a, t); \quad (4)$$

$$\varepsilon_0 \varepsilon_s \frac{d\varphi(x, t)}{dx} \Big|_{x=a} = \varepsilon_0 \varepsilon_d \frac{V_3(t)}{d_d} + e N_s f(a, t), \quad (5)$$

где ε_0 — электрическая постоянная;

$\varepsilon_d, \varepsilon_s$ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника и МК-фазы, соответственно;

V_3 — падение напряжения V_b , приложенного к дипольной ячейке варисторной структуры, на прослойке МК-фазы, $V_3 = V_b - \varphi(a) + \varphi(-a)$;

d_d — толщина диэлектрической прослойки МК-фазы;

N_s — концентрация ПЭС;

$d\varphi/dx = k_B T / (eL) \cdot F(Y, n_i/n_0^-)$;

$L = [\varepsilon_0 \varepsilon_s k_B T / (e^2 n_0^-)]^{0.5}$ — длина экранирования;

n_i — концентрация свободных носителей заряда в собственном полупроводнике.

При этом $F(Y, n_i/n_0^-)$ — первый интеграл уравнения Пуассона в теории области пространственного заряда для полупроводников с полностью ионизированными объемными примесями:

$$F(Y, n_i/n_0^-) = \text{sign}(-Y) \cdot \{ (n_i/n_0^-)^2 [\exp(-Y) + Y - 1] + \exp(Y) - Y - 1 \}^{0.5} \quad [20].$$

Система уравнений (1), (4) и (5) определяет кинетику перезарядки ПЭС (функция $f(\pm a, t)$) для процесса поляризации равновесной варисторной структуры при использовании начального условия (2) и процесса деполяризации поляризованной варисторной структуры при использовании начального условия (3).

К расчету импульсных ВАХ структур ZnO

При расчете и анализе импульсных ВАХ оксидно-цинковых варисторных структур использована модель одномерного «микроваристора», который представляет собой последовательное соединение объемной части кристаллита и единичного МП-барьера, образованного прослойкой МК-фазы с примыкающими к ней обедненными ОПЗ соседних кристаллитов [16]. При расчете ВАХ использована расчетная схема [21], в которой в качестве наиболее вероятных механизмов электропереноса через МП-барьер приняты следующие [16, 22]:

— термоэлектронная эмиссия с туннелированием через прослойку МК-фазы;

— туннелирование между зонами проводимости соседних кристаллитов через ОПЗ и прослойку;

— переходы электронов с поверхности одного кристаллита через расположенные в приграничной области прослойки «медленные» ПЭС с последующим туннелированием;

— полевая эмиссия из валентной зоны одного кристаллита в зону проводимости другого.

Деформация импульсных ВАХ

Решение системы уравнений (1), (4) и (5) для определения кинетики изменения поверхностного заряда представляет собой сложную математическую задачу, которая может быть решена численными методами последовательных приближений [18]. В зависимости от конкретной ситуации эта задача может быть упрощена. В рамках используемой модели можно сделать упрощения, которые следуют из структуры и электрических свойств варисторной керамики.

Первое упрощение базируется на том, что после того как прекращается полевое воздействие на варисторную структуру, на ПЭС одной из сторон кристаллита ZnO всегда остается отрицательный заряд, и по причине очень малой (нанометровой) толщины диэлектрической прослойки МК-фазы влияние этого заряда распространяется на приповерхностную область соседнего кристаллита. Таким образом, истощающий изгиб зон присутствует всегда.

Второе упрощение основано на анализе [17], где показано, что переходные процессы определяются зависящими от времени параметрами, которые характеризуются постоянной времени релаксации.

Влияние величины постоянного поляризующего напряжения

Исследования проводились с помощью импульсных ВАХ МП-барьеров в поляризованном состоянии после воздействия постоянного напряжения V_{dc} в течение времени t_{dc} (время зарядки).

Для получения ВАХ сначала при заданном V_{dc} из условий непрерывности потенциала и электрической индукции (4), (5) и неравновес-

ных функций заполнения ПЭС электронами проводился расчет стационарных функций заполнения ПЭС электронами $f(\pm a, t_{dc}^*)$. Для этого была использована формула, полученная решением (1) с начальным условием (2) при выше сформулированных приближениях:

$$f(\pm a, t_{dc}) = f(\pm a, t_{dc}^*) + [f_{sf} - f(\pm a, t_{dc}^*)] \cdot \exp\left(-\int_0^{t_{dc}} \frac{dt'}{\bar{\tau}}\right), \quad (6)$$

где $\bar{\tau}(\pm a) = (c_s^- \cdot [\bar{n}(\pm a) + N^-])^{-1}$;

$$\bar{n}(\pm a) \approx 0,5[n(\pm a, 0) + n(\pm a, t_{dc}^*)];$$

t_{dc}^* — время, достаточное для полного установления поляризации (предельной зарядки);

t' — переменная интегрирования по времени.

Неравновесные изгибы зон $Y(\pm a, t_{dc})$ находили из условий непрерывности (4), (5) при $V_{dc} = 0$. Затем при значениях функций $f(\pm a, t_{dc})$, определяемых из (6), находили плотность тока $j_p(V_p, t_{dc})$, протекающего при измерении ВАХ через МП-барьер при приложении к нему напряжения V_p .

На рис. 1 представлены импульсные ВАХ отдельного «микроваристора» до и после воздействия постоянного напряжения V_{dc} (соответствующего $j_{dc} = 0,1 \text{ мА/см}^2$) в течение времени t_{dc}^* . При расчетах были приняты типичные для кристаллитов ZnO значения концентрации свободных электронов $n_0^- = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и энергии ионизации ПЭС $\Delta E_S = 0,8 \text{ эВ}$. Как видно из рисунка, ВАХ существенно изменяются в предваристорной области. Интенсивность и знак этих изменений зависят от концентрации ПЭС и степени их заполнения в исходном равновесном (неполяризованном) состоянии: при малой концентрации ($N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$) ВАХ смещается вверх, в область

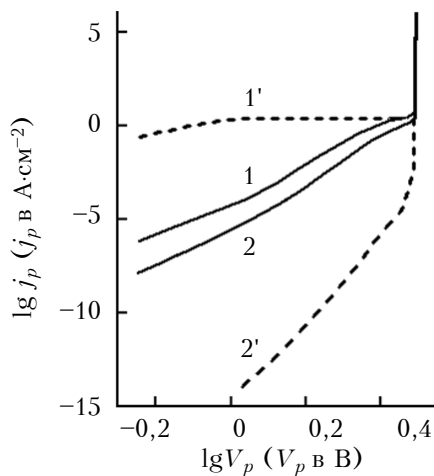


Рис. 1. Расчетные импульсные ВАХ элементов одномерных варисторных структур в исходном состоянии (1, 2) и после предельной зарядки (1', 2') при различных значениях концентрации ПЭС:
1, 1' — 10^{12} см^{-2} ; 2, 2' — 10^{13} см^{-2}

больших токов, если же концентрация близка к предельной (10^{13} см^{-2}) [23], то наоборот.

Отметим, что на рис. 1 приведены ВАХ, полученные при одинаковой полярности постоянного (j_{dc}) и импульсного (j_p) токов. При противоположной полярности их поведение аналогичное с некоторыми отличиями абсолютных величин.

Интерпретация полученных результатов может быть дана на основе представлений о формировании МП-барьера зарядом, захваченным ПЭС [16, 21]. В зависимости от концентрации ПЭС и степени их заполнения электронами формируется высота и ширина МП-барьера. При $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ПЭС практически полностью заполнены электронами ($f(\pm a, 0) \approx 0$), и воздействие напряжения V_{dc} может привести только к уменьшению степени их заполнения в ОПЗ, смещенной в обратном направлении. В результате общий заряд на ПЭС уменьшается, что приводит к снижению высоты МП-барьера и смещению импульсных ВАХ вверх (рис. 1, кривые 1 и 1'). При $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$ наоборот: ПЭС практически пусты ($f_{Si}(0) \approx 0$), поэтому приложение напряжения приводит к заполнению их электронами в ОПЗ, смещенной в прямом направлении. Таким образом, высота МП-барьера увеличивается, а импульсные ВАХ смещаются вниз (рис. 1, кривые 2 и 2').

На рис. 2 и 3 представлены зависимости таких характеристик импульсных ВАХ, как «уход» напряжения $\delta V_p^* = (V_p^* - V_p)/V_p$ и изменение плотности тока j_p^*/j_p после предельной зарядки от величины приложенного напряжения V_{dc} (V_p^*, j_p^* — значения импульсного напряжения и плотности тока через микроваристор после предельной зарядки).

На рис. 2 видно, что с ростом напряжения поляризации V_{dc} уход напряжения при фиксированной плотности тока через МП-барьер может быть как отрицательным, так и положительным, в зависимости от концентрации ПЭС. Данные

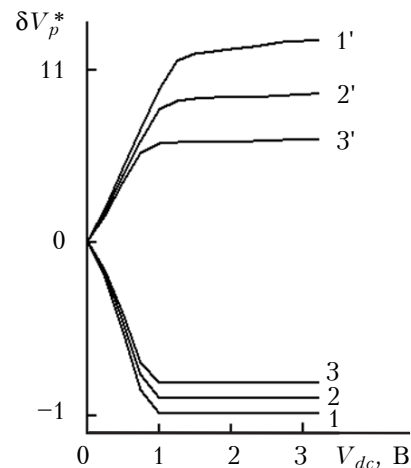


Рис. 2. Зависимость ухода напряжения от поляризующего напряжения V_{dc} , измеренная сразу после предельной зарядки при различных значениях плотности тока j_p (в А/см^2):
1, 1' — 10^{-4} ; 2, 2' — 10^{-3} ; 3, 3' — 10^{-2}

(1, 2, 3 — $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 1', 2', 3' — $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

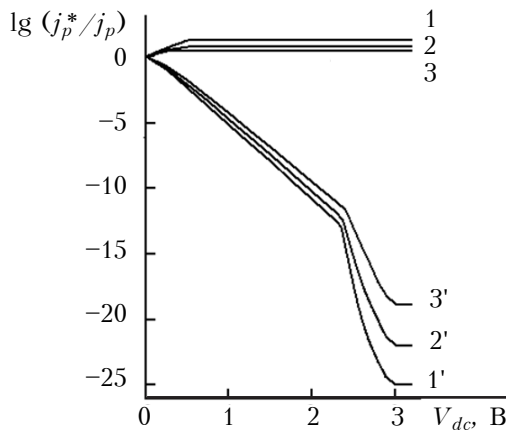


Рис. 3. Зависимость изменения импульсного тока от поляризующего напряжения V_{dc} , измеренная сразу после предельной зарядки при различных значениях напряжения V_p (в В): 1, 1' – 2,0; 2, 2' – 2,2; 3, 3' – 2,4 (1, 2, 3 – $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

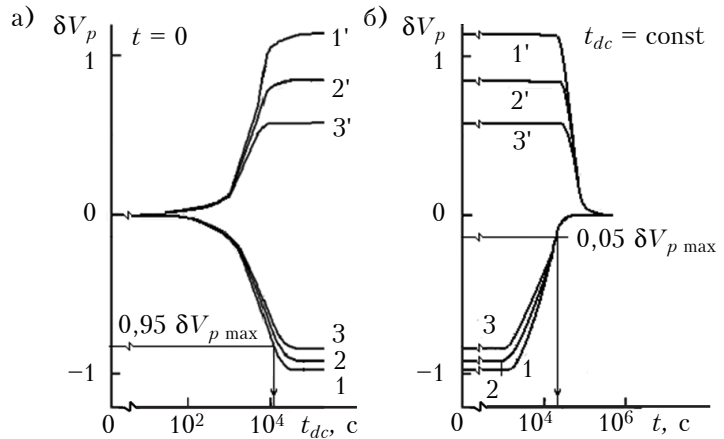


Рис. 4. Зависимости ухода напряжения от времени зарядки t_{dc} (а) и от времени релаксации t (б) после снятия поляризующего напряжения $V_{dc} = 2,56 \text{ В}$, полученные при различных значениях плотности тока j_p (в А/см^2): 1, 1' – 10^{-4} ; 2, 2' – 10^{-3} ; 3, 3' – 10^{-2} (1, 2, 3 – $N_S = 10^{12} \text{ см}^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13} \text{ см}^{-2}$)

рис. 3 показывают, что при фиксированном значении импульсного напряжения плотность тока также может уменьшаться или увеличиваться с ростом V_{dc} , а значит, поляризационная деформация может привести к соответствующим изменениям рассеиваемой на МП-барьере электрической мощности.

Следует отметить, что с ростом V_{dc} указанные параметры ВАХ изменяются лишь до некоторых предельных значений, которые соответствуют полной зарядке ПЭС в прямосмещенной ОПЗ и полной разрядке в обратносмещенной ОПЗ кристаллитов. По мере приближения к варисторному участку импульсной ВАХ (увеличение j_p или V_p) амплитуда ухода напряжения или изменений тока становится меньше.

Переходные изменения

При нахождении зависимостей величины ухода напряжения сразу после снятия постоянного поляризующего напряжения (т. е. при времени релаксации $t = 0$) от времени зарядки использовался описанный выше алгоритм расчета импульсных ВАХ.

Как видно из рис. 4, а, с ростом времени t_{dc} абсолютное значение ухода напряжения $\delta V_p(t_{dc}) = [V_p(t_{dc}) - V_p(0)] / V_p(0)$ возрастает, насыщаясь при больших t_{dc} . При этом, если принять коэффициент захвата электронов ПЭС c_S равным $10^{-9} \text{ см}^3/\text{с}$, время t_{dc}^* , в течение которого абсолютная величина ухода достигает значений $\delta V_p(t_{dc}^*) = 0,95[V_{p \text{ max}} - V_p(0)] / V_p(0)$, будет составлять $3 \cdot 10^4 \text{ с}$. Это значение соответствует величине $\bar{\tau}(\pm a)$, которая получается по формуле, приведенной в экспликации к выражению (6).

Для анализа релаксации импульсных ВАХ МП-барьера после снятия поляризующего напряжения производился расчет исходных зна-

чений функции заполнения электронами ПЭС $f(\pm a, t_{dc})$ при заданных V_{dc} и t_{dc} из условий непрерывности потенциала и индукции (4), (5) и выражения (6). Неравновесные функции $f(\pm a, t)$ определялись путем решения уравнения (1) с начальными условиями (3), соответствующими процессу деполяризации:

$$f(\pm a, t) \approx f_{SF} + (f(\pm a, t_{dc}) - f_{SF}) \cdot \exp\left(-\int_0^t \frac{dt'}{\bar{\tau}}\right), \quad (7)$$

где $\bar{\tau}$ определяется так же, как и в формуле (6).

Расчет неравновесных изгибов зон $Y(\pm a, t)$ из условий непрерывности (4), (5) и импульсных ВАХ при $V_{dc} = 0$ и значениях функции $f(\pm a, t)$, определяемых по формуле (7), производился аналогично описанному ранее алгоритму.

На рис. 4, б представлены кинетические релаксационные зависимости ухода напряжения $\delta V_p(t) = [V_p(t) - V_p(0)] / V_p(0)$ импульсных ВАХ. Время релаксации t^* , в течение которого абсолютная величина ухода напряжения равна $\delta V_p(t^*) = 0,05[V_{p \text{ max}} - V_p(0)] / V_p(0)$, составляет более 10^4 с .

Наблюдаемые на рис. 4 особенности кинетики можно интерпретировать, принимая во внимание наличие двух отличающихся по величине постоянных времени $\bar{\tau}(\pm a) \sim [\bar{n}(\pm a) + N^-]^{-1}$. Если энергетически ПЭС расположены ниже уровня Ферми, то $\bar{n}(\pm a) \ll N^-$, а если выше, то $\bar{n}(\pm a) \gg N^-$. Участвующий в перезарядке уровень ПЭС, расположенный выше уровня Ферми, разряжается, а его постоянная меньше, чем в случае когда он расположен ниже уровня Ферми и заряжается. Таким образом, процесс разряда ПЭС более медленный, чем процесс заряда. Это соответствует более медленным про-

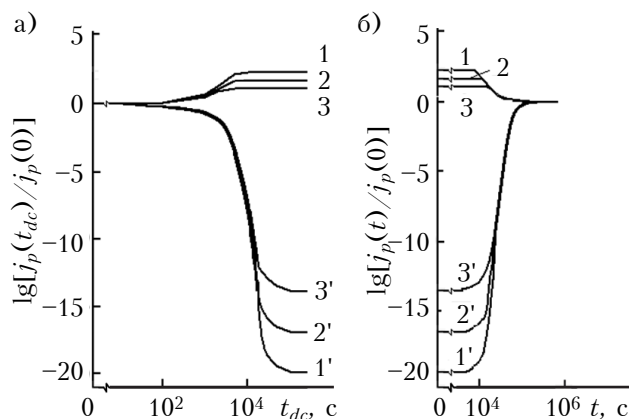


Рис. 5. Зависимости изменения плотности тока от времени зарядки t_{dc} (a) и от времени релаксации t (б) после снятия поляризующего напряжения $V_{dc} = 2,56$ В, полученные при различных значениях напряжения V_p (в В):

1, 1' – 2,0; 2, 2' – 2,2; 3, 3' – 2,4
(1, 2, 3 – $N_S = 10^{12}$ см $^{-2}$; 1', 2', 3' – $N_S = 10^{13}$ см $^{-2}$)

цессам поляризации и более быстрым процессам деполяризации структуры с малой концентрацией ПЭС (когда в равновесии они полностью заполнены электронами). Для структуры с большой концентрацией ПЭС ($N_S = 10^{13}$ см $^{-2}$), где в равновесии ПЭС слабо заряжены, наблюдается обратный эффект.

Аналогичные кинетические зависимости импульсного тока представлены на рис. 5.

Следует отметить, что параметры t^* и t_{dc}^* , определяемые максимальной величиной $\bar{\tau}(\pm a)$, слабо изменяются в исследованных диапазонах значений поляризующего тока j_{dc} и напряжения V_{dc} (рис. 4 и 5).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При проведении экспериментальных исследований основное внимание уделялось изменениям наиболее контролируемого в производственных условиях функционального параметра варисторов – классификационного напряжения [24]. Это напряжение измеряют при кратковременном (1–2 с) пропуске электрического тока величиной 1 мА и обозначают $V_{1.0}$. Поскольку варисторы имеют разные геометрические размеры, при исследованиях варисторной керамики для определения $V_{1.0}$ пользуются плотностью тока, которая для рассматриваемых высоковольтных варисторов составляет порядка 10^{-4} А/см 2 [9].

Образцы и методика исследований

Для экспериментального изучения импульсных ВАХ были использованы образцы коммерческой оксидно-цинковой керамики для варисторов высокого напряжения двух составов: ZnO – Bi $_2$ O $_3$ – Co $_2$ O $_3$ – Sb $_2$ O $_3$ – MnO $_2$ – Cr $_2$ O $_3$ (I) и ZnO – Bi $_2$ O $_3$ – CoO – Sb $_2$ O $_3$ – SnO $_2$ – MnO – B $_2$ O $_3$ (II). Образцы получены в промышленных

условиях путем жидкофазного спекания (из-за присутствия оксида висмута и других оксидов с низкой температурой плавления) и имеют соответственно серебряные (I) и алюминиевые (II) электроды.

Микроструктура керамики обоих составов – типичная и описана во многих исследованиях [16, 25–27]. Исследования методами сканирующей электронной микроскопии показывают, что исследуемые материалы содержат зерна оксида цинка размером примерно 5 мкм и включения оксидных межкристаллитных фаз (в частности, Bi – Sb – Zn – O-фаза). Пористость обоих материалов достаточно низкая, а плотность относительно высокая (около 5,54 г/см 3).

При экспериментальных исследованиях использовалась аппаратура для измерения ВАХ, аналогичная описанной в [28]. Перед каждой поляризацией образца его электроды накоротко замыкали на 30 мин, чтобы обеспечить восстановление исходного заряда ПЭС после предыдущего заряда/разряда. Затем образец подвергали воздействию постоянного электрического тока в течение заданного времени и после отключения тока измеряли ВАХ. Время измерения ВАХ было во много раз меньше времени зарядки образца и составляло не более 2 мин. Измерения ВАХ повторяли после последовательного увеличения абсолютной величины деградационного постоянного тока или времени его пропуска либо через определенные промежутки времени после его выключения.

Результаты и их анализ

Экспериментально полученные зависимости ухода классификационного напряжения $\delta V_{1.0}$ от времени проведения «ускоренного старения» для исследованных образцов варисторной керамики представлены на рис. 6 (кривые получены при одинаковой полярности при измерении классификационного напряжения и напряжения при протекании тока j_{dc}). Температура процесса «старения» составляла 353 К, температура измерения ВАХ – 300 К. Как видно, для керамики состава II, стабилизированной добавкой B $_2$ O $_3$, с ростом времени пропуска деградационного постоянного электрического тока наблюдается

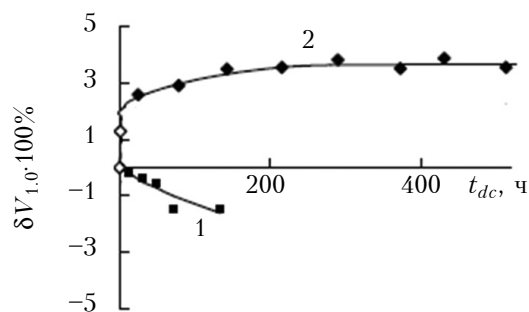


Рис. 6. Зависимости $\delta V_{1.0}$ от времени проведения ускоренного старения для образцов керамики составов I (1) ($j_{dc} = 0,1$ мА/см 2) и II (2) ($j_{dc} = 0,4$ мА/см 2)

ся увеличение напряжения $V_{1,0}$, а для керамики I — его уменьшение.

Приведенные на рис. 6 данные соответствуют теоретическим закономерностям, полученным в рамках разработанной модели деформации ВАХ оксидных варисторных структур, которая обусловлена перезарядкой локализованных состояний.

Следует отметить, что в рамках приведенных представлений могут быть интерпретированы и данные, полученные в [11], где говорилось о противоположных тенденциях в изменениях плотности тока после приложения поляризационного напряжения V_{dc} в течение времени t_{dc} к образцам керамики разных составов. Эти измерения проводились для случая $V_p = V_{dc}$. Данные из [11], представленные на рис. 7 в принятых в настоящей работе координатах — $j_p(t_{dc})/j_p(0)$ и t_{dc} , также согласуются с приведенными теоретическими результатами.

Отметим, что экспериментально наблюдаемые диапазоны изменений параметров $\delta V_{1,0}$ и $j_p(t_{dc})/j_p(0)$ для исследованных керамических структур значительно меньше, чем теоретически рассчитанные для отдельного микроваристора. Это может быть связано с неупорядоченностью керамической структуры и реализацией в процессе ускоренного старения целого ряда других механизмов деградации — миграции ионов, термодесорбции молекул поверхностного кислорода и пр. В зависимости от химического состава и технологических особенностей изготовления керамики доминирующим механизмом может выступать любой из них.

Следует также отметить, что проявление аномального изменения параметров (увеличение $\delta V_{1,0}$ и уменьшение $j_p(t_{dc})/j_p(0)$) связано с таким параметром ПЭС, как коэффициент захвата c_s^- им электронов из зоны проводимости кристаллита. Поскольку $c_s^- = \sigma_s^- \bar{v}_T$, где σ_s^- и \bar{v}_T — сечение захвата ПЭС и средняя тепловая

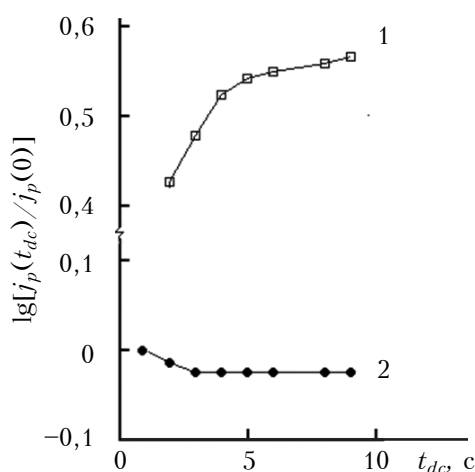


Рис. 7. Зависимость относительного изменения тока через варистор от времени его протекания для образцов керамики составов $\text{ZnO}-\text{Sb}_2\text{O}_3-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Co}_3\text{O}_4-\text{MnO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$ (1) и $\text{ZnO}-\text{Bi}_2\text{O}_3-\text{Co}_3\text{O}_4-\text{MnO}_2-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Sb}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$ (2)

скорость свободных электронов, величина c_s^- отражает природу ПЭС. Типичные значения σ_s^- изменяются в широких пределах — от 10^{-15} см² (нейтральные состояния) до 10^{-19} (кулоновские отталкивающие состояния) [29]. Учитывая, что $\bar{\tau}(\pm a) = (\sigma_s^- \bar{v}_T N^-)^{-1}$, получим диапазон возможных значений $\bar{\tau}(\pm a)$: от 0,5 до 10^4 ч. Таким образом, даже в случае больших концентраций ПЭС и более быстрых изменений исследованных параметров $\delta V_{1,0}$ и $j_p(t_{dc})/j_p(0)$, наблюдаемых в описанном в [19, 30] эксперименте, доминирующими могут выступать другие механизмы деградации, не приводящие к аномальным эффектам.

Введение в керамику добавки оксида бора, по-видимому, приводит к образованию ПЭС, сильно отталкивающих электроны, и обуславливает меньшие их сечения захвата и большее время перезарядки, что и позволяет наблюдать аномальный рост классификационного напряжения и электрического сопротивления в процессе проведения деградации с помощью постоянного электрического тока.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили проанализировать кинетику деформации импульсных ВАХ, которая обусловлена перезарядкой локализованных состояний, и определить, что воздействие поляризующего напряжения может привести к смещению ВАХ в область больших или малых токов в зависимости от концентрации и степени заполнения ПЭС. Время перезарядки ПЭС, связанное с их природными особенностями, может изменяться в широких пределах — от получаса до нескольких тысяч часов. По мере приближения к варисторному участку импульсной ВАХ амплитуда ухода напряжения при фиксированном токе или величина изменения плотности тока при фиксированном напряжении уменьшаются. Анализ полученных результатов позволяет предположить, что для варисторной керамики, содержащей добавку оксида бора, ПЭС, формирующие межкристаллитные потенциальные барьеры, имеют аномально малые сечения захвата электронов, характерные для отталкивающих центров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Chiang Y. M., Kingery W. D., Levinson L. M. Compositional changes adjacent to grain boundaries during electrical degradation of a ZnO varistor // Journal of Applied Physics. — 1982. — Vol. 55, iss. 3. — P. 1765–1768. DOI: 10.1063/1.331647
2. Gupta T. K., Carlson W. G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor // Journal of Materials Science. — 1985. — Vol. 20, iss. 10. — P. 3487–3500. DOI: 10.1007/BF01113755
3. Макаров В. О., Тонкошкур А. С., Черненко И. М. Влияние термовакуумной обработки на электрические свойства оксидно-цинковых варисторов // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1988. — Вып. 1(70). — С. 18–20.
4. Kostić P., Milosević O., Uskoković D., Ristić M. M. Potential barrier degradation at the grain boundary of ZnO-based nonlinear resistors // Physica B+C. — 1988. — Vol. 150, iss. 1-2. — P. 175–178. DOI: 10.1016/0378-4363(88)90120-9

5. Авдеенко Б. К., Тонкошкур А. С., Черненко И. М., Ивон А. И., Щелоков А. И. Температурный коэффициент сопротивления высоконелинейных оксидно-цинковых резисторов // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1980. — Вып. 4(41). — С. 17–19.
6. Iga A. Drift phenomena of capacitance and current in nonohmic ZnO ceramics // Japanese Journal of Applied Physics. — 1980. — Vol. 19, N 1. — P. 201–202. DOI: 10.1143/JJAP.19.201
7. Sato K., Takada Y. A mechanism of degradation in leakage currents through ZnO varistors // Journal of Applied Physics. — 1982. — Vol. 53, iss. 12. — P. 8819–8826. DOI: 10.1063/1.330433
8. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Modeling of the degradation electromigrational processes in structures with intercrystallite potential barriers // Multidiscipline Modeling in Materials and Structures. — 2007. — Vol. 3, iss. 4. — P. 477–490. DOI: 10.1163/157361107782106375
9. Иванченко О. В., Тонкошкур О. С. Електроміграційна модель деградації металооксидних варисторних структур // Український фізичний журнал. — 2012. — Т. 57, № 3. — С. 331–339.
10. Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics // Journal of the European Ceramic Society. — 2004. — Vol. 24, iss. 15-16. — P. 3709–3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004
11. Гансали Ш. М., Гашимов А. М. Влияние процесса деградации на электрофизические характеристики варисторов // Проблемы энергетики. — 2005. — № 2. — С. 67–69.
12. Дмитриев В. Л., Красавина М. А. «Старение» варисторов в процессе эксплуатации ОПН // Новости электротехники. — 2010. — № 1. — С. 1–8.
13. Philipp H. R., Levinson L. M. Long-time polarization currents in metal-oxide varistors // Journal of Applied Physics. — 1976. — Vol. 47, iss. 7. — P. 3177–3181. — DOI: 10.1063/1.323113
14. Тонкошкур А. С., Гомилко И. В., Ляшков А. Ю. Особенности изотермической деполяризации оксидно-цинковой варисторной керамики // Неорганические материалы. — 1998. — Т. 34, № 9. — С. 1123–1127.
15. Tsonos C., Kanapitsas A., Triantis D., Anastasiadis C., Stavrakas I., Pissis P. Low temperature dielectric relaxations in ZnO varistor // Japanese Journal of Applied Physics. — 2010. — Vol. 49, Iss. 1. — P. 051102–051102-5. DOI: 10.1143/JJAP.49.051102
16. Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors // Journal of the American Ceramic Society. — 1990. — Vol. 73, iss. 7. — P. 1817–1840. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x
17. Tonkoshkur Yu. A., Glot A. B. Isothermal depolarization current spectroscopy of localized states in metal oxide varistors // Journal of Physics D: Applied Physics. — 2012. — Vol. 45, N 46. — P. 465305–465305-8. DOI: 10.1088/0022-3727/45/46/465305
18. Khandetsky V. S., Tonkoshkur Yu. A. Investigation of recharging processes for the volume localized states in polycrystalline semiconductors // Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Фізика. Радіоелектроніка». — 2013. — Vol. 21, N 2, iss. 20. — P. 104–110.
19. Тонкошкур А. С., Клименко В. И., Гомилко И. В. Особенности термодеполяризации явлений в оксидно-цинковой керамике для варисторов // Журнал технической физики. — 1997. — Т. 67, №10. — С. 60–63.
20. Sze S. M. Physics of semiconductor devices. — New York: John Wiley & Sons, 1981.
21. Тонкошкур А. С. Вольт-амперная характеристика оксидно-цинкового варистора // Электронная техника. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1991. — Вып. 2(83). — С. 15–19.
22. Einzinger R. Development of physical models of varistors on the basis of ZnO // In book: Polycrystalline Semiconductors: Physical Properties and Applications / Ed. G. Harbeke. — Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo: Springer-Verlag, 1985. — P. 228–240.
23. Вашпанов Ю. А., Смыгина В. А. Адсорбционная чувствительность полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2005.
24. IEC/EN 60099-4, August 2004: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems.
25. Clarke D. R. Varistor ceramics // Journal of the American Ceramic Society. — 1999. — Vol. 82, iss. 3. — P. 485-502. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01793.x
26. Ивон А. И. Параметры кристаллитов ZnO в оксидно-цинковой керамике // Неорганические материалы. — 2000. — Т. 36, № 10. — С. 1272–1276.
27. He J., Zeng R., Chen Q., Chen S., Guan Z., Han S. W., Cho H. G. Nonuniformity of electrical characteristics in microstructures of ZnO surge varistors // Power Delivery, IEEE Transactions on. — 2004. — Vol. 19, iss. 1. — P. 138–144. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820214
28. Тонкошкур О. С., Ігнаткін В. У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010.
29. Кисилев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твердого тела. — Москва: Издательство МГУ, Физический факультет, 1999.
30. Квасков В. Б. Полупроводниковые приборы с биполярной проводимостью. — Москва: Энергоатомиздат, 1988.

Дата поступления рукописи
в редакцию 24.06 2013 г.

Д. ф.-м. н. О. С. ТОНКОШКУР, к. ф.-м. н. О. В. ИВАНЧЕНКО
Україна, Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: IvanchenkoAV@ukr.net

КИНЕТИКА ДЕФОРМАЦІЇ ВАХ ОКСИДНИХ ВАРИСТОРНИХ СТРУКТУР, ОБУМОВЛЕНОЇ ПЕРЕЗАРЯДЖЕННЯМ ЛОКАЛІЗОВАНИХ СТАНІВ

Проведено моделювання деформації імпульсних вольт-амперних характеристик (ВАХ) окремого міжкристалітного потенціального бар'єру під час перехідних процесів поляризації/деполяризації, пов'язаної з перезарядженням поверхневих електронних станів, які обумовлюють цей бар'єр. Встановлено, що залежно від концентрації і ступеня заповнення цих поверхневих станів електронами вплив постійної напруги може привести до зміщення імпульсних ВАХ в область великих або ж малих струмів. Показано можливість застосування знайдених закономірностей для керамічних варисторних структур. Запропонована модель дозволяє інтерпретувати спостережувані при випробуваннях варисторов на прискорене старіння «аномальні» ефекти, такі як зростання класифікаційної напруги та зменшення потужності активних втрат.

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, поверхневі електронні стани, варистор, деградація, поляризація, деполяризація, відхід напруги, релаксація, міжкристалітний бар'єр.

KINETICS DEFORMATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTICS OF THE VARISTOR OXIDE STRUCTURES DUE TO OVERCHARGING OF THE LOCALIZED STATES

Prolonged exposure of zinc oxide varistors to the electrical load leads to current-voltage characteristics (CVC) deformation, which is associated with a change in the height and width of the intergranular barriers, which are main structural element of the varistors. Polarization phenomena in zinc oxide ceramics are studied in a number of works, but those are mainly limited to the study of the physics of the CVC deformation process and to determining the parameters of localized electronic states involved in this process. This paper presents the results on the simulation of the deformation of pulse CVC of a separate intergranular potential barrier at transient polarization/depolarization, associated with recharging of surface electronic states (SES), which cause this barrier. It is found that at high density of SES their degree of electron filling is small and the effect of DC voltage leads to a shift of pulse current-voltage characteristics into the region of small currents. Conversely, the low density SES are almost completely filled with electrons, and after crystallite polarization CVC is shifted to high currents. Experimental studies have confirmed the possibility of applying the discovered laws to ceramic varistor structures. The proposed model allows interpreting the «anomalous» effects (such as increase in the classification voltage and reduction of active losses power) observed during the varistors accelerated aging test.

Keywords: current-voltage characteristic, surface electronic states, varistor, degradation, polarization, depolarization, voltage deflection, relaxation, intergranular barrier.

REFERENCES

- Chiang Y. M., Kingery W. D., Levinson L. M. Compositional changes adjacent to grain boundaries during electrical degradation of a ZnO varistor. *Journal of Applied Physics*, 1982, Vol. 55, iss. 3, pp. 1765-1768. DOI: 10.1063/1.331647
- Gupta T. K., Carlson W. G. A grain-boundary defect model for instability/stability of a ZnO varistor. *Journal of Materials Science*, 1985, vol. 20, iss. 10, pp. 3487-3500. DOI: 10.1007/BF01113755
- Makarov V. O., Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M. [Influence of thermal vacuum processing on the electrical properties of zinc oxide varistors]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1988, iss. 1(70), pp. 18-20. (in Russian)
- Kostić P., Milosević O., Uskoković D., Ristić M. M. Potential barrier degradation at the grain boundary of ZnO-based nonlinear resistors. *Physica B+C*, 1988, vol. 150, iss. 1-2, pp. 175-178. DOI: 10.1016/0378-4363(88)90120-9
- Avdeenko B. K., Tonkoshkur A. S., Chernenko I. M., Ivon A. I., Shchelokov A. I. [Temperature coefficient of resistance of highly nonlinear zinc oxide resistors]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1980, iss. 4(41), pp. 17-19. (in Russian)
- Iga A. Drift phenomena of capacitance and current in nonohmic ZnO ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1980, vol. 19, no 1, pp. 201-202. DOI: 10.1143/JJAP.19.201
- Sato K., Takada Y. A mechanism of degradation in leakage currents through ZnO varistors. *Journal of Applied Physics*, 1982, vol. 53, iss. 12, pp. 8819–8826. DOI: 10.1063/1.330433
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Modeling of the degradation electromigration processes in structures with intercrystallite potential barriers. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2007, vol. 3, iss. 4, pp. 477-490. DOI: 10.1163/15736110782106375
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S. Electromigration degradation model of metal oxide varistor structures. *Ukrainian Journal of Physics*, 2012, vol. 57, no 3, pp. 330-338.
- Ivanchenko A. V., Tonkoshkur A. S., Makarov V. O. Desorption thermal degradation model of zinc oxide ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 2004, vol. 24, iss. 15-16, pp. 3709-3712. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2003.12.004
- Gansali Sh. M., Gashimov A. M. [Influence of degradation process on the electrophysical characteristics of varistors]. *Problemy energetiki*, 2005, no 2, pp. 67-69. (in Russian)
- Dmitriev V. L., Krasavina M. A. [The «aging» of varistors during exploitation process surge arresters]. *Novosti elektrotekhniki*, 2010, no 1, pp. 1-8. (in Russian)
- Philipp H. R., Levinson L. M. Long-time polarization currents in metal-oxide varistors. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, iss. 7, pp. 3177-3181. DOI: 10.1063/1.323113
- Tonkoshkur A. S., Gomilko I. V., Lyashkov A. Yu. Isothermal depolarization in zinc oxide varistor ceramics. *Inorganic Materials*, 1998, vol. 34, no 9, pp. 939-943.
- Tsonos C., Kanapitsas A., Triantis D., Anastasiadis C., Stavarakas I., Pissis P. Low temperature dielectric relaxations in ZnO varistor. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, iss. 1, pp. 051102-051102-5. DOI: 10.1143/JJAP.49.051102
- Gupta T. K. Application of zinc oxide varistors. *Journal of the American Ceramic Society*, 1990, vol. 73, iss. 7, pp. 1817-1840. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1990.tb05232.x
- Tonkoshkur Yu. A., Glot A. B. Isothermal depolarization current spectroscopy of localized states in metal oxide varistors. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, vol. 45, no 46, pp. 465305–465305-8. DOI: 10.1088/0022-3727/45/46/465305
- Khandetsky V. S., Tonkoshkur Yu. A. Investigation of recharging processes for the volume localized states in polycrystalline semiconductors. *Visnyk Dnipropetrovskogo universytetu. Fizyka. Radioelektronika*, 2013, vol. 21, no 2, iss. 20, pp. 104-110.
- Tonkoshkur A. S., Klimenko V. I., Gomilko I. V. [Features of thermodepolarization effects in zinc oxide ceramics for varistors]. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*, 1997, vol. 67, no 10, pp. 60-63. (in Russian)
- Sze S. M. *Physics of semiconductor devices*. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1981, 880 p.
- Tonkoshkur A. S. [Current-voltage characteristic of zinc oxide varistor]. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 5. Radiodetali i radiokomponenty*, 1991, iss. 2(83), pp. 15-19. (in Russian)
- Einzig R. Development of physical models of varistors on the basis of ZnO. In book: *Polycrystalline Semiconductors: Physical Properties and Applications*, ed. G. Harbeke, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer-Verlag, 1985, pp. 228-240.
- Vashpanov Yu. A., Smytnyna V. A. *Adsorbtsionnaya chuvstvitel'nost' poluprovodnikov* [Adsorption sensitivity of semiconductors]. Odessa, Astroprint, 2005, 216 p.
- IEC/EN 60099-4, August 2004: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems.
- Clarke D. R. Varistor ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, 1999, vol. 82, iss. 3, pp. 485-502. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb01793.x
- Ivon A. I. Parameters of ZnO grains in ZnO-based ceramics. *Inorganic materials*, 2000, vol. 36, no 10, pp. 1074-1077.
- He J., Zeng R., Chen Q., Chen S., Guan Z., Han S. W., Cho H. G. Nonuniformity of electrical characteristics in microstructures of ZnO surge varistors. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, iss. 1, pp. 138-144. DOI: 10.1109/TPWRD.2003.820214
- Tonkoshkur O. S., Ignatkin V. U. *Fizicheskiye osnovy elektrichnogo kontrolya neodnorodnykh sistem* [Physical fundamentals of electrical control of heterogeneous systems]. Dneprodzerzhinsk, DDTU, 2010. 290 p.
- Kisilev V. F., Kozlov S. N., Zoteev A. V. *Osnovy fiziki poverkhnosti tverdogo tela* [Fundamentals of physics of solid body surface]. Moscow, Izdatelstvo MGU. Fizicheskyy fakultet, 1999, 284 p.
- Kvaskov V. B. *Poluprovodnikovyye pribory s bipolyarnoi provodimost'yu* [Semiconductor devices with bipolar conductivity]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 128 p.

Д. ф.-м. н. Д. И. БЛЕЦКАН, В. В. ВАКУЛЬЧАК, к. ф.-м. н. В. И. ФЕДЕЛЕШ

Украина, Ужгородский национальный университет

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ И АКУСТООПТИЧЕСКИЙ МОДУЛЯТОР НА ИХ ОСНОВЕ

Проведены комплексные исследования акустических и акустооптических свойств стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Определены их основные параметры, такие как показатель преломления, плотность, скорости продольной и поперечной ультразвуковых волн, упругооптические коэффициенты, коэффициенты акустооптического качества. Показана возможность использования стеклообразных сульфидов германия $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ в качестве материала светозвукопровода акустооптического модулятора и приведены его основные параметры. В режиме дифракции Брегга модулятор на длине волны 0,633 нм He–Ne-лазера характеризуется следующими параметрами: рабочая частота ультразвука 80 МГц, максимальная полоса модулирующих частот 10 МГц, дифракционная эффективность 40%, быстродействие около 80 нс.

Ключевые слова: халькогенидные стекла, коэффициент акустооптического качества, акустооптический модулятор.

Дифракция света на упругих волнах широко применяется в различных акустооптических устройствах, предназначенных для модуляции и пространственного управления лазерным излучением. При создании акустических модуляторов и дефлекторов решающим фактором является выбор материала светозвукопровода, обладающего определенным набором свойств, от которых зависят качество и эффективность работы таких устройств. Количественную оценку потенциальных возможностей акустооптических (АО) материалов проводят с учетом требований, предъявляемых к техническим характеристикам модулятора, а именно [1, 2]:

- большое значение коэффициента акустооптического качества материала светозвукопровода, определяющего АО-мощность, требуемую для получения необходимой эффективности дифракции;

- высокая скорость ультразвука в среде звукопровода;

- малое поглощение акустических волн в материале светозвукопровода, позволяющее сохранить форму аппаратной функции устройства без заметных искажений;

- высокое оптическое качество материала светозвукопровода, прежде всего оптическая однородность, обеспечивающая желаемое пространственно-частотное разрешение модулятора;

- достаточно большой коэффициент электромеханической связи материала пьезопреобразователя, обеспечивающий возможность получения широкой полосы пропускания модулятора при эффективном электрическом согласовании его входа;

- доступность материала и его стабильность в технологическом, конструктивном и эксплуатационном отношениях.

Наряду с кристаллами [2–4], перспективными материалами для создания акустооптических модуляторов и дефлекторов являются халькогенидные стеклообразные полупроводники [5–9], отличающиеся дешевизной, простотой изготовления и возможностью получения образцов необходимых форм и размеров. Кроме того, стекла обладают изотропными физическими характеристиками, которые можно изменять в широких пределах путем варьирования их химического состава.

Использование халькогенидных стекол в современных акустооптических устройствах, способных работать в видимом диапазоне (0,4–0,7 мкм), сдерживается тем обстоятельством, что стекла подавляющего большинства составов прозрачны в красной, ближней и средней ИК-областях спектра, т. е. акустооптические приборы на их основе способны работать только на длине волны 1,06 и 10,6 мкм. На сегодняшний день наиболее широко используемым материалом для создания акустооптических устройств видимого диапазона являются кристаллы парателлурита (TeO_2), прозрачные в спектральном диапазоне 0,35–5 мкм и обладающие высоким значением коэффициента акустооптического качества [10]. Одним из главных недостатков акустооптических приборов, созданных на базе парателлурита, является их высокая стоимость, обусловленная большими затратами на выращивание объемных кристаллов. Кроме того, кристаллы TeO_2 обладают сильной анизотропией оптических и акусти-

ческих свойств, что усложняет процесс изготовления акустооптических ячеек, и также отражается на себестоимости АО-устройств.

Особый интерес представляет разработка акустооптических материалов на базе оксидных и халькогенидных стекол, прозрачных в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, обладающих высоким коэффициентом акустооптического качества и значительно меньшей, чем кристаллы парателлурита, себестоимостью. К числу таких перспективных материалов, прозрачных в видимой области, относятся стеклообразные сульфиды германия $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, стехиометрический состав которых GeS_2 является наиболее широкозонным ($E_g=3,07$ эВ) [11].

В настоящей работе представлены результаты исследования акустических и акустооптических свойств бинарных халькогенидных стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ и основных параметров акустооптического модулятора, созданного на их основе.

Методика эксперимента

Важным условием для практического использования халькогенидных стекол в качестве светозвукопровода АО-устройства является их оптическая однородность, зависящая, прежде всего, от технологии получения и химической однородности, а также от отсутствия ликвационных явлений в стеклах.

Исследуемые образцы представляли собой гомогенные, рентгеноаморфные, визуально прозрачные стекла $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ ($17 \leq x \leq 36$), синтезированные из элементарных компонентов высокой степени чистоты в вакуумированных кварцевых ампулах. На процессы стеклообразования существенно влияет химическое разупорядочение в расплаве. Максимальная скорость охлаждения, необходимая при стеклообразовании образцов, богатых германием, достигает 17 К/с. При незначительном отклонении от стехиометрического состава GeS_2 в сторону избытка серы ($\text{GeS}_{2,01}$) скорость охлаждения понижается до 3 К/с [12]. Способность к стеклообразованию в системе «Ge — S» максимальна для составов, близких к эвтектике [13].

В процессе синтеза стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ очень важно предотвратить попадание кислорода. Для синтеза стекол использовали чистую дегазированную порошкообразную серу и кристаллический германий, а условия синтеза подбирали таким образом, чтобы образующиеся в результате реакций следы SO_2 , GeO , GeO_2 удалялись вакуумной возгонкой (дистилляцией) или откачкой в вакууме. Присутствие оксидов в расплавах системы $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ является нежелательным ввиду того, что даже весьма малые их количества способствуют кристаллизации расплавов в этой системе при охлаждении, являясь центрами кристаллизации. Кроме того, данные примеси обуславливают появление в стекле пузырей и свилей, а также примесных полос погло-

щения, значительно снижающих оптические характеристики стекол. Плотность стекол измеряли гидростатическим взвешиванием в толуоле, а показатель преломления — эллипсометрическим методом [14].

Акустические и акустооптические измерения выполнены на однородных отожженных образцах размером $10 \times 6 \times 6$ мм, вырезанных из объемных слитков с последующей тонкой шлифовкой и оптической полировкой плоскопараллельных торцов и двух боковых граней. Исследования акустооптических свойств проводили на длине волны излучения He—Ne-лазера $0,63$ мкм. Скорость распространения продольных и поперечных ультразвуковых (УЗ) волн определяли акустооптическим методом [15] по измеренному частотному интервалу Δf между соседними максимумами дифракционных картин при возбуждении УЗ-волн в образце. Коэффициент затухания ультразвука определяли методом оптического зондирования.

Для измерения коэффициента акустооптического качества M_2 — основного параметра акустооптического материала — использовали метод Диксона — Коэна [16], позволяющий проводить измерения как на продольных, так и на поперечных акустических волнах. Согласно этому методу, интенсивность дифрагированного света измеряют в эталонном и исследуемом образцах при прохождении через них акустического импульса в прямом (I_1 и I_4) и обратном (после отражения от свободной грани, I_3 и I_5) направлениях, а коэффициент акустооптического качества образца $M_{2\text{обр}}$ рассчитывают по формуле

$$M_{2\text{обр}} = M_{2\text{эт}} \frac{I_4 I_5}{I_1 I_3}. \quad (1)$$

В качестве эталонного образца использовали плавный кварц, коэффициент акустооптического качества $M_{2\text{эт}}$ которого известен.

Акустооптическая ячейка представляет собой светозвукопровод прямоугольной формы из халькогенидного стекла $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, торцевая грань которого приклеена к эталонному образцу из кварца с преобразователем. При создании АО-устройств важную роль играет пьезоэлектрический преобразователь и способ его крепления к акустической среде. В качестве пьезоэлектрического преобразователя была использована монокристаллическая пластина из ниобата лития LiNbO_3 36° Y-среза для возбуждения продольных звуковых волн и 163° Y-среза для возбуждения поперечных. Источником электрической мощности служил генератор Г4-44. При низких рабочих частотах (менее 120 МГц) для крепления преобразователя к исследуемому образцу используют эпоксидную смолу [2]. Ее акустический импеданс удалось повысить путем добавок порошкообразных наполнителей из алюминия и вольфрама. Для компенсации емкостной реактивной проводимости преобразователя и согласования его эквивалентного сопротивления с

внутренним сопротивлением генератора использован резонансный контур. Схемы согласования пьезопреобразователя с генератором электрических колебаний приведены в [2, 17].

Исследование стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$

Коэффициент акустооптического качества материала, характеризующий внутреннюю эффективность дифракции независимо от геометрии взаимодействия, вычисляется по формуле [18]

$$M_2 = n^6 p_{ij}^2 / (\rho v^3), \quad (2)$$

где n — показатель преломления;

p_{ij} — упругооптическая константа;

ρ — плотность;

v — скорость звуковой волны;

i, j — индекс поляризации света и индекс деформации в матричном представлении (в случае стекла $i, j=1, 2, 4$).

Как видно из анализа этого соотношения, наиболее перспективными для создания акустооптических модуляторов являются материалы с большим показателем преломления и малой скоростью звука, что характерно для стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Из приведенных в таблице данных видно, что коэффициент акустооптического качества стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ большинства составов примерно на два порядка больше, чем плавленого кварца. Причиной тому как раз и является тот факт, что в стеклах больший показатель преломления сочетается с меньшей скоро-

стью УЗ-волн, по сравнению с этими же параметрами плавленого кварца.

По измеренным значениям коэффициента акустооптического качества M_2 для двух различных направлений вектора поляризации \mathbf{E} световой волны — параллельно ($M_{2\parallel}$) и перпендикулярно ($M_{2\perp}$) направлению распространения ультразвука — определены упругооптические коэффициенты p_{11} и p_{12} , значения которых приведены в **таблице**.

В акустооптических устройствах требуется не просто наличие определенной эффективности дифракции, а необходимо ее обеспечить в некоторой полосе частот Δf . С учетом этого, эффективность дифракции определяется другим параметром качества, который объединяет в себе основные требования, предъявляемые к свойствам материалов для акустооптических устройств [19]:

$$M_1 = n^7 p^2 / (\rho v). \quad (3)$$

Наконец, существует третье определение коэффициента акустооптического качества, предложенное Диксоном [16]:

$$M_3 = n^7 p^2 / (\rho v^3). \quad (4)$$

Из выражений (2) — (4) следует, что значения M_1 , M_2 и M_3 максимальны у материалов с высоким показателем преломления, большим упругооптическим коэффициентом, малыми значениями плотности и скорости ультразвука.

Акустооптические свойства стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ различного состава и параметры модулятора

Состав	Плавленый кварц [10]	$\text{Ge}_{34}\text{S}_{66}$	$\text{Ge}_{33}\text{S}_{67}$	$\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$	$\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$	$\text{Ge}_{17}\text{S}_{83}$
Область прозрачности, мкм	0,2 — 4,5	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11	0,4 — 11
λ , мкм	0,633	0,633	0,633	0,633	0,633	0,633
ρ , г/см ³	2,20	2,790	2,750	2,680	2,570	2,390
n	1,457	2,16	2,11	2,14	2,12	2,01
v_L , м/с	5960	2714	2728	2537	2467	2314
v_S , м/с	3760	1774	1516	1441	1362	1278
$M_{1\parallel}$, 10^{-8} м ² ·с/кг	8,05	193	135	167	146	70
$M_{2\parallel}$, 10^{-15} с ³ /кг	1,56	117	88	114	113	65
$M_{3\parallel}$, 10^{-11} м ² ·с/кг	1,35	70	49	64	62	55
p_{11}	0,121	0,260	0,226	0,246	0,226	0,167
p_{12}	0,270	0,257	0,219	0,239	0,220	0,166
p_{44}	−0,075	0,002	0,004	0,004	0,003	0,001
$\alpha_{\text{ак}}$, дБ/см ($f = 100$ МГц)	—	2,41	1,48	2,15	2,32	2,5
τ , нс	—	74	74	79	81	86
Δf_m , МГц	—	10,2	10,2	9,5	9,3	8,7
f_0 , МГц	—	83	84	78	76	71
$\eta \Delta f_m$, 10^3 МГц/Вт	—	6,14	4,54	5,49	5,29	2,71

Важным параметром АО-материала является скорость распространения ультразвуковой волны, знание которой позволяет определить его фотоупругие и акустооптические свойства. Для оценки возможности использования стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ в качестве материала светозвукопровода АО-устройства необходимо кроме скорости ультразвука знать и другие параметры, определяющие коэффициенты акустооптического качества материала M_1 , M_2 , M_3 . В таблице приведены значения плотности, показателя преломления, скоростей распространения продольной (v_L) и поперечной (сдвиговой) (v_S) УЗ-волн, упругооптических коэффициентов, позволившие рассчитать по формулам (3), (4) значения M_1 , M_3 и другие акустооптические параметры стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$.

Наиболее чувствительной к качеству материала светозвукопровода характеристикой является частотная зависимость коэффициента акустического затухания $\alpha_{\text{ак}}$. Результаты измерений затухания продольных УЗ-волн в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$, проведенных методом оптического зондирования в частотном диапазоне от 30 до 120 МГц при комнатной температуре, приведены на рис. 1. В этом частотном диапазоне характерно небольшое затухание ультразвука, зависящее от состава стекла. Для стеклообразного GeS_2 и стекол, обогащенных серой, коэффициент акустического затухания возрастает с увеличением частоты и описывается зависимостью $\alpha_{\text{ак}} = \alpha_0 f^m$, где $1 < m < 2$.

Авторы [5], анализируя поведение коэффициента акустического затухания для бинарных и тройных халькогенидных стекол в зависимости от их структуры, пришли к заключению, что наименьшие значения $\alpha_{\text{ак}}$ имеют стекла, структура ближнего порядка которых сформирована тригональными и тетраэдрическими структурными единицами. Структура стехиометрическо-

го стеклообразного GeS_2 сформирована исключительно тетраэдрами $[\text{GeS}_4]$, увязанными в цепочку, и действительно, это стекло имеет наименьшее значение $\alpha_{\text{ак}} = 1,48$ дБ/см. Для сравнения укажем, что для стеклообразного As_2S_3 с тригональной структурой ближнего порядка $\alpha_{\text{ак}} = 4,7$ дБ/см [5], что в три раза больше, чем для стеклообразного дисульфида германия. Нарушение стехиометрии стекол по отношению к стехиометрическому составу GeS_2 в сторону избытка германия сопровождается образованием кроме тетраэдрических $[\text{GeS}_4]$ еще и октаэдрических $[\text{GeS}_6]$ структурных единиц, что приводит к росту $\alpha_{\text{ак}}$. Аналогичное увеличение коэффициента акустического затухания наблюдается также при нарушении стехиометрии в сторону избытка серы, что также связано с изменением структуры стекол. Введение сверхстехиометрической серы приводит к появлению в структурной сетке стекол восьмиатомных серных колец (S_8).

Критерием, определяющим режим работы акустооптического устройства, является безразмерный параметр [20, 21]

$$Q = 2\pi \frac{\lambda L}{\Lambda^2}, \quad (5)$$

где L — длина области взаимодействия света с акустическим пучком. В условиях низких частот при $Q \ll 1$ преобладает режим Рамана — Ната, а при $Q \gg 1$ — брегговской дифракции [21]. Для стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ при длине взаимодействия $L = 6 - 9$ мм и центральной рабочей частоте $f_0 = 80$ МГц значения параметра Q находятся в пределах 2,8 — 3,4. Таким образом, созданные на базе стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ акустооптические устройства работают в режиме, близком к брегговской дифракции.

Акустооптический модулятор

Анализ полученных результатов позволил заключить, что составы стекол $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ и $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ являются оптимальными для изготовления светозвукопроводов.

В продолжение исследований стекол авторами был разработан и испытан АО-модулятор на длину волны He — Ne-лазера $\lambda = 0,633$ мкм, который содержит светозвукопровод, изготовленный из $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ в виде параллелограмма размером $10 \times 6 \times 6$ мм с двумя боковыми гранями оптического качества для ввода и вывода оптического излучения. К одной торцевой грани светозвукопровода прикреплен ультразвуковой излучатель в виде пластины ($5 \times 1,2$ мм) из кристалла ниобата лития 36° Y-среза для возбуждения продольных акустических волн.

Основные характеристики АО-ячейки определяются свойствами среды, в которой происходит взаимодействие света и звука, а также размером области взаимодействия. Одной из важ-

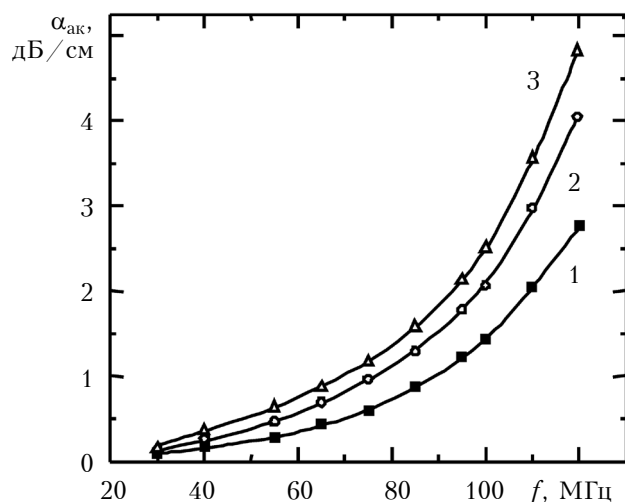


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента акустического затухания стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ различного состава:
1 — $x=33$; 2 — $x=30$; 3 — $x=17$

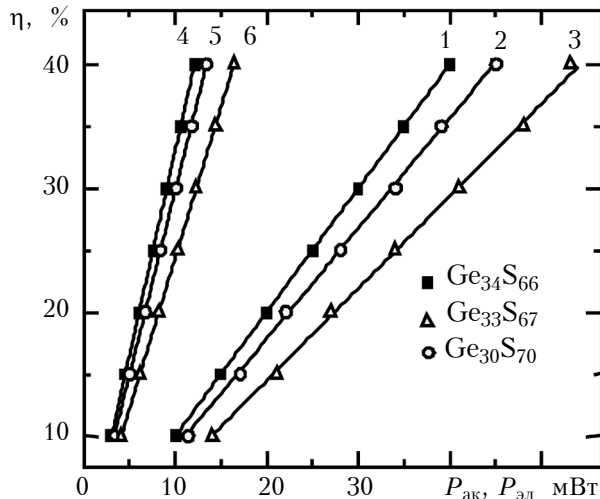


Рис. 2. Зависимость эффективности акустооптической дифракции света на продольной УЗ-волне в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ от мощности управляемого ВЧ электрического (1–3) и акустического (4–6) сигналов

нейших характеристик модулятора является полоса модуляции Δf [10]. Для обеспечения наибольшей полосы модуляции оптического пучка АО-модулятором и достижения высокой контрастности необходимо четко сфокусировать оптический луч в области его взаимодействия с акустической волной, т. е. предельно уменьшить размеры области взаимодействия. При этом наибольшая полоса модуляции получается в том случае, когда перетяжка пучка находится в центре области взаимодействия. Оптимальные размеры светового луча выбирают, исходя из условия $b=b_{\text{опт}}s$, где s — коэффициент запаса; $b_{\text{опт}}=2v/(\pi f_0)$ — радиус перетяжки, при которой прошедший и дифрагированный лучи перекрываются на уровне $1/e^2$ по интенсивности (e — число Эйлера) [23]. Для АО-модулятора с активным элементом из стеклообразного $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ $b_{\text{опт}}=1,1 \cdot 10^{-4}$ м. Ширина H акустопреобразователя выбрана с коэффициентом запаса $s_1=5$: $H=2s_1b_{\text{опт}}=1,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Полоса модулирующих частот на уровне 0,5 от максимальной интенсивности связана с временем τ ($\tau=2b/v$) прохождения фронта акустической волны через падающую световую волну [23]:

$$\Delta f_m = 0,375v/b = 0,75\tau. \quad (8)$$

При разработке АО-модуляторов важное значение имеет произведение эффективности дифракции на полосу модуляции [23]:

$$\eta_1 \Delta f_m \approx 3,43 \cdot 10^{-5} \cdot n v m_2 / (s s_1 \lambda^3), \quad (9)$$

где η_1 — эффективность, отнесенная к 1 Вт СВЧ-мощности. Рассчитанные основные параметры АО-модуляторов на базе стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ приведены в таблице.

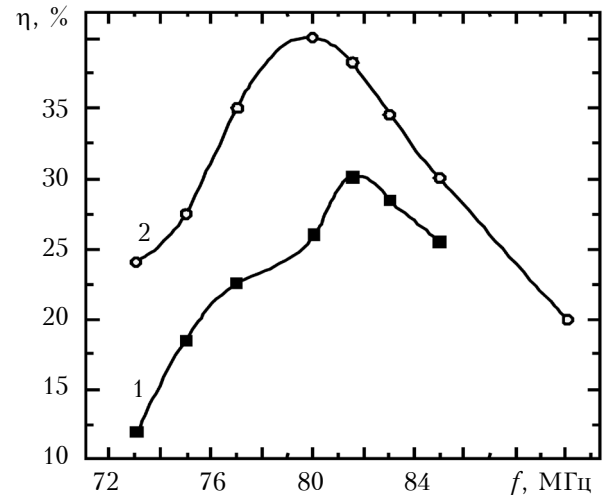


Рис. 3. АЧХ модулятора, измеренная при постоянной мощности $P_{\text{эл}} = 40$ мВт (1) и при условии согласования акустических импедансов материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя (2)

Помимо полосы модуляции Δf , другим важным параметром модулятора является потребляемая электрическая мощность $P_{\text{эл}}$ и управляющая акустическая мощность $P_{\text{ак}}$, определяющие эффективность модуляции. Эффективность акустооптического взаимодействия реализуется при выполнении условия фазового синхронизма и определяется параметром $\eta=I/I_0$ — отношением интенсивности дифрагированного света I к интенсивности I_0 падающего на ячейку монохроматического излучения с длиной волны λ , соответствующей условию Брегга. Эффективность зависит от мощности акустической волны, размеров области акустического взаимодействия, а также от коэффициента акустооптического качества M_2 среды, в которой это взаимодействие происходит.

Зависимость эффективности акустооптической дифракции света на продольной УЗ-волне в стеклах $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ от мощности высокочастотного электрического сигнала, подаваемого на пьезопреобразователь АО-ячейки, приведена на рис. 2. Из этого рисунка видно, что в зависимости от состава стекол, для достижения одного и того же значения эффективности дифракции требуется различная электрическая мощность. Так, для стекла состава $\text{Ge}_{34}\text{S}_{66}$ при $P_{\text{эл}}=40$ мВт эффективность дифракции составляет 40%, а для достижения этого же значения η для стекол с большей молярной долей серы требуется большая $P_{\text{эл}}$.

Как видно из приведенной на рис. 3 амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) модулирующего устройства, построенного на основе стекла $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, при постоянном уровне входной мощности 40 Вт максимальная дифракционная эффективность достигается на частоте модуляции около 80 МГц (кривая 1). При согласо-

нии акустических импедансов материалов светозвукопровода и пьезопреобразователя обеспечивается симметричность амплитудно-частотной характеристики (кривая 2).

Заключение

Акустооптические исследования стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ показали, что они являются перспективным материалом для изготовления светозвукопроводов акустооптических устройств управления лазерным излучением в видимой области спектра.

Исходя из технологических особенностей получения стекол высокого оптического качества, предложено для создания АО-модуляторов использовать стекла двух составов — $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ и $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$, обладающих высоким оптическим совершенством и пропусканием в спектральной области 0,4–11 мкм, умеренным акустическим поглощением (2–3 дБ/см). Коэффициент акустооптического качества M_2 стекол таких составов примерно в 100 раз больше, чем у плавленного кварца.

Параметры акустооптического модулятора видимого диапазона на основе стекол указанного состава следующие: рабочая частота ультразвука 80 МГц, максимальная полоса модулирующих частот 10 МГц, дифракционная эффективность 40%, быстродействие примерно 80 нс. При этом немаловажным является и то, что для получения эффективной модуляции требуется малая мощность управляемого электрического сигнала — 40 мВт, что облегчает тепловой режим модулятора и позволяет обойтись без принудительного охлаждения модуляционного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acoustooptic materials // IEEE J. of Quantum Electronics. — 1970. — Vol. 6, N 4. — P. 223–228. — DOI: 10.1109/JQE.1970.1076441
2. Uchida N., Niidzaki N. Acousto-optic deflection materials and techniques // Proceedings of the IEEE. — 1973. — Vol. 61, N 8. — P. 1073–1092. — DOI: 10.1109/PROC.1973.9212
3. Пат. 77305 України. Застосування монокристала напівпровідникового твердого розчину селеніду галію-індію ($\text{Ga}_{0,3}\text{In}_{0,7}$) $_2\text{Se}_3$ як матеріалу для акустооптичного модулятора лазерного випромінювання / І. П. Студеньак, М. Краньчеч, В. І. Феделеш. — 2006. — Бюл. № 11.
4. Пат. 2476916 России. Акустооптический модулятор / М. М. Мазур, В. Э. Пожар, А. А. Павлюк, В. И. Пустовойт, Л. И. Мазур, В. Н. Шорин. — 27.02.2013.
5. Поляков Ю.В., Маковская З.Г., Дембовский С.А., Дерюгин И.А., Талалаев М.А. Критерии отбора стеклообразных халькогенидных материалов для использования в акустооптических устройствах // Изв. АН СССР Неорганические материалы. — 1981. — Т. 17, № 7. — С. 1166–1171.
6. Laine M., Seddon A. B. Chalcogenide glasses for acousto-optic devices // J. Non-Cryst. Solids. — 1995. — Vol. 184, N 30–35. — P. 30–35. — DOI: 10.1016/0022-3093(94)00687-3
7. Kulakova L. A., Melekh B. T., Bakharev V. I., Kudoyarova V. Kh. Synthesis and physical properties of

$\text{Si}(\text{Ge})-\text{Se}-\text{Te}$ glasses // J. Non-Cryst. Solids. — 2006. — Vol. 352, N 9–20. — P. 1555–1559. — DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2006.01.030

8. Кулакова Л.А., Мелех Б.Т., Грудинкин С.А., Данилов А.П. $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}$ и $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}-\text{S}$ -сплавы — новые материалы для акустооптических устройств ближнего, среднего и дальнего инфракрасных диапазонов // ФТП. — 2013. — Т. 47, № 10. — С. 1435–1439.

9. Адрианова И.И., Айю Л.Г., Аснис Л.Н., Кислицкая Е.А., Кокорина В.Ф. Акустооптические свойства стекол систем $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}$ и $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}-\text{Sb}$ // Акустический журнал. — 1976. — Т. 22, № 3. — С. 449–451.

10. Балакший В.И., Парыгин В.Н., Чирков Л.Е. Физические основы акустооптики. — Москва: Радио и связь, 1985.

11. Блецкан Д. И. Край фундаментального оптического поглощения стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$ // Физика и химия стекла. — 1986. — Т. 12, № 3. — С. 368–370.

12. Voigt B. Über Glasbildung und Eigenschaften von Chalkogenidsystemen. XVII. Zur Glaschemie des Germaniumdisulfides // Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie. — 1978. — Bd 447, N 1. — S. 153–160. — DOI: 10.1002/zaac.19784470117

13. Блецкан Д. И. Кристаллические и стеклообразные халькогениды Si, Ge, Sn и сплавы на их основе. — Ужгород: Закарпаття, 2004.

14. Тягай В. А., Растрененко Н. О., Попов В. Б., Блецкан Д. И., Січка М. Ю. Еліпсометрія склоподібних халькогенидів германію змінного хімічного складу // Український фізичний журнал. — 1976. — Т. 21, № 8. — С. 1265–1269.

15. Богданов С.В. Акустооптические методы измерения скорости звука. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013.

16. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate // Applied Physics Letters. — 1966. — Vol. 8, N 8. — P. 205–207. — DOI: 10.1063/1.1754556

17. Зусман М.И., Манешин Н.К., Парыгин В.Н. Модуляция 10 мкм излучения с помощью ультразвука // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика-Астрономия. — 1972. — Т. 13, № 2. — С. 190–194. [Modulation of 10 μm radiation using ultrasonics] (in Russian)

18. Smith T.M., Korpel A. Measurement of light-sound interaction efficiencies in solids // IEEE J. of Quantum Electronics (Correspondence). — 1965. — Vol. QE-1, N 6. — P. 283–284. — DOI: 10.1109/JQE.1965.1072224

19. Gordon E.I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices // Applied Optics. — 1966. — Vol. 5, N 10. — P. 1629–1639. — DOI: 10.1364/AO.5.001629

20. Korpel A. Acousto-optics — a review of fundamentals // Proceedings of the IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 48–53. — DOI: 10.1109/PROC.1981.11919

21. Yang E.H., Shikay YAO. Design considerations for acousto-optic devices // Proceedings of the IEEE. — 1981. — Vol. 69, N 1. — P. 54–64. — DOI: 10.1109/PROC.1981.11920

22. Klein W.R., Cook B.D. Unified approach to ultrasonic light diffraction // Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on. — 1967. Vol. 14, N 3. — P. 123–134. — DOI: 10.1109/T-SU.1967.29423

23. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применение. — Москва: Сов. радио, 1978.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.07 2014 г.

Д. І. БЛЕЦКАН, В. В. ВАКУЛЬЧАК, В. І. ФЕДЕЛЕШ

Україна, Ужгородський національний університет

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

АКУСТООПТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТЕКОЛ $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ ТА АКУСТООПТИЧНИЙ МОДУЛЯТОР НА ЇХ ОСНОВІ

Проведено комплексні дослідження акустичних та акустооптичних властивостей стекол $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$. Визначено їх основні параметри, а саме показник заломлення, густину, швидкість позожджньої та поперечної ультразвукових хвиль, пружнооптичні коефіцієнти, коефіцієнти акустооптичної якості. Показано можливість використання склоподібних сульфідів германію $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$, $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ як середовища світлозвукпроводу акустооптичного модулятора і наведено його основні параметри. У режимі дифракції Брегга модулятор на довжині хвилі 0,633 нм He—Ne-лазера характеризується наступними параметрами: робоча частота ультразвуку 80 МГц, максимальна смуга моделюючих частот 10 МГц, дифракційна ефективність 40%, швидкодія близько 80 нс.

Ключові слова: халькогенідні стекла, коефіцієнт акустооптичної якості, акустооптичний модулятор.

DOI: 10.15222/TKEA2014.5-6.24

D. I. BLETSKAN, V. V. VAKULCHAK, V. I. FEDELESH

UDC 534.2:535.323

Ukraine, Uzhgorod National University

E-mail: crystal_lab457@yahoo.com

ACOUSTO-OPTIC PROPERTIES OF $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ GLASSES AND ACOUSTO-OPTIC MODULATOR ON THEIR BASIS

The investigation of acousto-optic properties of $\text{Ge}_x\text{S}_{100-x}$ glasses, which had shown that they are perspective light-sound material for manufacturing of acousto-optic devices for controlling the laser radiation in the visible spectral region was performed. Taking into account the technological conditions for synthesis of glasses with optical quality the two optimal compositions, $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ and $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$, were proposed for fabrication of optical-acoustic modulator. These compositions possess the high optical perfection and transmission in the spectral range of 0.4–11 μm , the moderate optical absorption of 2–3 dB/cm, their acoustic quality factor ~100 times exceeds those of quartz. The construction and main parameters of the acousto-optic modulator based on $\text{Ge}_{30}\text{S}_{70}$ and $\text{Ge}_{25}\text{S}_{75}$ glasses as light-sound material and the converter is a plate of lithium niobate single crystal were described. In Bragg diversion mode the modulator has the maximum bandwidth of the modulating frequencies – 10 MHz, the diffraction efficiency – 40%, the speed – near 80 nanoseconds.

It is also important to note that the effective modulation is obtained with the low power (40 mW) controlled electrical signal, which facilitates a thermal mode of the modulator and allows working without the forced cooling of the modulation element.

Keywords: chalcogenide glass, acousto-optical quality factor, acousto-optic modulator.

REFERENCES

1. Pinnow D. A. Guide lines for the selection of acousto-optic materials. *IEEE J. of Quantum Electronics*, 1970, vol. 6, no 4, pp. 223-228. DOI: 10.1109/JQE.1970.1076441
2. Uchida N., Niidzaki N. Acoustooptic deflection materials and techniques. *Proceedings of the IEEE*, 1973, vol. 61, no 8, pp. 1073-1092. DOI: 10.1109/PROC.1973.9212
3. *Pat. 77305 UA*. [Use of monocrystals of semiconductor solid gallium and indium selenide solution as material for optoacoustic modulators of laser radiation]. I. P. Studeniak, M. Krancec, V. I. Fedeleish. 2006, bul. 11.
4. *Pat. 2476916 RU*. [Acousto-optic modulator]. M.M. Mazur, V.E. Pozhar, A.A. Pavlyuk, V.I. Pustovoyt, L.I. Mazur, V.N. Shorin. 27.02.2013.
5. Polyakov Yu.V., Makovskaya Z.G., Dembovskii S.A., Deryugin I.A., Talalaev M.A. [Criteria for the selection of glassy chalcogenide materials for use in acousto-optic devices]. *Izvestiya AN SSSR Neorganicheskie materialy*, 1981, vol. 17, no 7, pp. 1166–1171. (in Russian)
6. Laine M., Seddon A. B. Chalcogenide glasses for acousto-optic devices. *J. Non-Cryst. Solids*, 1995, vol. 184, no 30-35, pp. 30-35. DOI: 10.1016/0022-3093(94)00687-3
7. Kulakova L. A., Melekh B. T., Bakharev V. I., Kudoyarova V. Kh. Synthesis and physical properties of $\text{Si}(\text{Ge})-\text{Se}-\text{Te}$ glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, vol. 352, no 9-20, pp. 1555-1559. DOI: 10.1016/j.jnoncrsol.2006.01.030
8. Kulakova L.A., Melekh B. T., Grudinkin S.A., Danilov A.P. $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}$ and $\text{Ge}-\text{Te}-\text{Se}-\text{S}$ alloys as new materials for acousto-optic devices of the near-, mid-, and far-infrared spectral region. *Semiconductors*, 2013, vol. 47, iss. 10, pp. 1426-1431. doi:10.1134/S1063782613100199
9. Adrianova I.I., Aio L.G., Asnis L.N., Kislytskaya E.A., Kokorina V.F. Acousto-optical properties of glasses of systems $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}$ and $\text{As}-\text{Ge}-\text{Se}-\text{Sb}$. *Acoustic journal*, 1976, vol. 22, no 3, pp. 449-451. (in Russian)
10. Balakshii V.I., Parygin V.N., Chirkov L.E. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical basis of acousto-optics]. Moscow, Radio i svyaz', 1985, 280 p. (in Russian)

11. Bletskan D. I. The fundamental optical absorption edge glass $\text{Ge}_x\text{S}_{1-x}$. *Glass Physics and Chemistry*, 1986, vol. 12, no 3, pp. 368-370.
12. Voigt B. Über Glasbildung und Eigenschaften von Chalkogenidsystemen. XVII. Zur Glaschemie des Germaniumdisulfides. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 1978, Bd 447, no 1, pp. 153-160. DOI: 10.1002/zaac.19784470117
13. Bletskan D. I. *Kristallicheskie i stekloobraznye khal'kogenidy Si, Ge, Sn i splavy na ikh osnove* [Crystalline and glassy chalcogenides of Si, Ge, Sn and alloys based on them: Monograph]. Uzhgorod, Zakarpattya, 2004, 292 p. (in Russian)
14. Tyagai V. A., Rastrenenko N. O., Popov V. B., Bletskan D. I., Sichka M. Yu. Ellipsometry glassy chalcogenides germanium variable chemical composition. *Ukr. J. Phys.*, 1976, vol. 21, no 8, pp. 1265-1269. (in Ukrainian)
15. Bogdanov S.V. *Akustoopticheskie metody izmereniya skorosti zvuka*. [Acousto-optic methods for measuring the speed of sound] Novosibirsk, Publishing House SB RAS, 2013, 142 p. (in Russian)
16. Dixon R. W., Cohen M. G. A new technique for measuring magnitudes of photoelastic tensors and its application to lithium niobate. *Applied Physics Letters*, 1966, vol. 8, no 8, pp. 205-207. DOI: 10.1063/1.1754556
17. Zusman M.I., Maneshin N.K., Parygin V.N. [Modulation of 10 μm radiation using ultrasonics]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3. Fizika-Astronomiya*, 1972, vol. 13, no 2, pp. 190-194. (in Russian)
18. Smith T.M., Korpel A. Measurement of light-sound interaction efficiencies in solid. *IEEE J. of Quantum Electronics (Correspondence)*, 1965, vol. QE-1, no 6, pp. 283-284. DOI: 10.1109/JQE.1965.1072224
19. Gordon E.I. A review of acoustooptical deflection and modulation devices. *Applied Optics.*, 1966, vol. 5, no 10, pp. 1629-1639. DOI: 10.1364/AO.5.001629
20. Korpel A. Acousto-optics — a review of fundamentals. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no 1, pp. 48-53. DOI: 10.1109/PROC.1981.11919
21. Yang E.H., Shikay YAO. Design considerations for acousto-optic devices. *Proceedings of the IEEE*, 1981, vol. 69, no 1, pp. 54-64. DOI: 10.1109/PROC.1981.11920
22. Klein W.R., Cook B.D. Unified approach to ultrasonic light diffraction. *Sonics and Ultrasonics, IEEE Transactions on*, 1967, vol. 14, no 3, pp. 123-134. DOI: 10.1109/T-SU.1967.29423
23. Magdich L.N., Molchanov V.Y. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acousto-optical devices and their application]. Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 112 p. (in Russian)

НОВЫЕ КНИГИ

Сукачев Э. А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами.— Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2013.

Приведены принципы построения и функционирования сетей связи с подвижными объектами при использовании сотовой структуры зоны покрытия; основы организации многостанционного доступа с различными видами разделения сигналов; технические характеристики цифровых стандартов систем подвижной радиосвязи, получивших широкое признание в мировой практике. Исследуются различные модели распространения радиоволн вблизи поверхности земли, которые используются для расчетов уровня сигнала на входе приемников базовых и мобильных станций. Большое внимание уделяется вопросам анализа внутрисистемных помех и методам их уменьшения. Приводятся расчетные формулы для определения отношения сигнал/помеха в любой точке соты, а также для контроля степени изменения этого отношения при перемещении мобильной станции в пределах соты. Впервые в систематизированном виде изложены основы геометрии сотовых структур. С позиции теории массового обслуживания рассмотрены элементы проектирования сотовых сетей подвижной радиосвязи. Теоретический материал иллюстрируется большим количеством числовых примеров. При подготовке данного пособия основное внимание было направлено на доступность представления разнообразного и сложного материала. Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов, аспирантов и специалистов в области проектирования, разработки и тестирования сотовых сетей радиосвязи с подвижными объектами.



М. А. ЛОЗОВОЙ, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО,
к. т. н. Б. М. РАССАМАКИН, к. т. н. С. М. ХАЙРНАСОВ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Приведены результаты экспериментального исследования рабочих характеристик аммиачных алюминиевых тепловых труб (ТТ) с канавчатой капиллярной структурой, предназначенных для использования в качестве теплопередающих элементов в конструкции мощного светодиодного осветительного прибора с принудительным воздушным охлаждением. В диапазоне значений подводимого теплового потока от 50 до 100 Вт и скорости набегающего воздушного потока от 0,8 до 2,1 м/с температура в зоне нагрева ТТ в зависимости от угла их наклона к горизонту находилась в пределах от 31,0 до 52,5°C, при этом перепад температуры по ТТ составлял от 0,9 до 3,1°C. Значения теплового сопротивления ТТ находились в диапазоне от 0,012 до 0,044°C/Вт.

Ключевые слова: светодиод, осветительный прибор, система охлаждения, тепловая труба, тепловые характеристики.

Проблема энергосбережения на сегодняшний день является актуальной во всех странах. По данным Международного энергетического агентства, около 19% всей вырабатываемой в мире энергии затрачивается на освещение [1], а в Украине на освещение расходуется еще больше — около 30% от всей производимой в стране электроэнергии [2]. В связи с этим, разработка и внедрение новых энергосберегающих технологий в сфере освещения является перспективным направлением развития светотехники. С этой целью в последнее десятилетие активно разрабатываются и внедряются осветительные приборы с высокоэффективными полупроводниковыми источниками света — светодиодами (СД) и светодиодными модулями (СДМ), которые при излучении одинакового светового потока потребляют значительно меньше электроэнергии, чем лампы накаливания.

Так, современные мощные светодиодные модули американской компании Cree серии CXA имеют световую отдачу до 125 лм/Вт [3], в то время как для ламп накаливания она составляет 8—13 лм/Вт [4]. В апреле 2014 года появилось сообщение о том, что эта компания создала белые светодиоды с рекордной светоотдачей, равной 303 лм/Вт, что в 30 раз экономичней ламп накаливания и в 6 раз — люминесцентных ламп [5]. Вместе с тем, по мере увеличения мощности СД растет и количество теплоты, выделяемой в активной области полупроводникового кристалла, и в случае недостаточно эффективного ее отвода может произойти перегрев кристалла и, как следствие, ухудшение световых и цветовых характеристик, снижение срока службы и надежности СД и осветительного прибора в целом.

Очевидно, что охлаждение светодиодов в осветительном приборе является одной из основных задач, от решения которой зависит обеспечение надежной работы осветительного прибора [6].

Для обеспечения заданного температурного режима СД в ряде работ предлагается использовать воздушные системы охлаждения с применением высокотеплопроводных подложек [7], различного вида радиаторов [8], вентиляторов [9], а также жидкостные системы с замкнутым водяным контуром [10]. Наиболее распространенными являются воздушные системы охлаждения с применением радиаторов в условиях естественной или вынужденной конвекции воздуха. Необходимость увеличения площади поверхности радиатора в условиях естественной конвекции приводит к возрастанию его геометрических размеров, снижению эффективности ребер и увеличению теплового сопротивления. Более эффективными являются воздушные системы охлаждения с вынужденной конвекцией воздуха, в которых в качестве основания радиатора используется паровая камера, эффективно передающая теплоту от СДМ к ребрам радиатора независимо от их удаленности от СДМ, при этом ребра радиатора дополнительно обдуваются вентилятором [11]. Однако совмещение в одном узле СДМ, паровой камеры, радиатора и вентилятора не всегда может быть оправданно с конструктивной точки зрения, в частности, при построении осветительных приборов с большим количеством рассредоточенных в пространстве СДМ.

В [12, 13] впервые предложено использовать тепловые трубы (ТТ) в качестве элементов каркаса осветительного прибора с большим количеством рассредоточенных в пространстве СДМ, что по-

звolyет значительно увеличить отводимую от него тепловую мощность. В [14] описана теплоотводящая система для СДМ мощностью 35–100 Вт, которые устанавливаются в зоне нагрева плоской алюминиевой ТТ термосифонного типа длиной 400 мм на ее продольном ребре шириной 30 мм [15]. Зона охлаждения ТТ снабжена ребристым радиатором с поверхностью охлаждения 1200–2400 см². Как и в [12, 13], эта конструкция позволяет вынести зону отвода теплоты ТТ за пределы зоны нагрева с установленными здесь СДМ, что удобно с конструктивной точки зрения при создании осветительных приборов с рассредоточенными в пространстве СДМ. Вместе с тем, в [14] не приведены основные рабочие характеристики ТТ и системы теплоотвода на ее основе, такие как, например, зависимость температуры в зоне нагрева ТТ от подводимого теплового потока, значения термического сопротивления ТТ, влияние ориентации ТТ в поле силы гравитации на ее рабочие характеристики, параметры потока охлаждающего воздуха и т. п. Это не позволяет использовать опубликованные результаты для практического применения при создании других аналогичных конструкций мощных светодиодных осветительных приборов на основе алюминиевых ТТ.

Задачей данной работы является исследование рабочих характеристик конструкций алюминиевых ТТ, подобных [14], которые предназначены для использования в качестве теплопередающих элементов мощного светодиодного осветительного прибора с целью обеспечения заданного температурного режима СДМ.

Конструкция мощного светодиодного осветительного прибора с ТТ

Особенностью конструкций осветительных приборов, в которых в качестве теплопередающих элементов предусматривается использование алюминиевых тепловых труб с капиллярной структурой в виде канавок, является расположение ТТ в пространстве таким образом, чтобы ее

зона конденсации находилась выше зоны испарения или на одном уровне с ней. В этом случае силы гравитации не будут препятствовать возврату сконденсировавшегося теплоносителя по канавкам капиллярной структуры из зоны конденсации в зону испарения ТТ и не будут нарушать работу ТТ. В качестве примера такой конструкции на **рис. 1** показана схема светодиодного осветительного прибора с мощными осветительными модулями, смонтированными на пяти алюминиевых тепловых трубах с Ω -образными канавками.

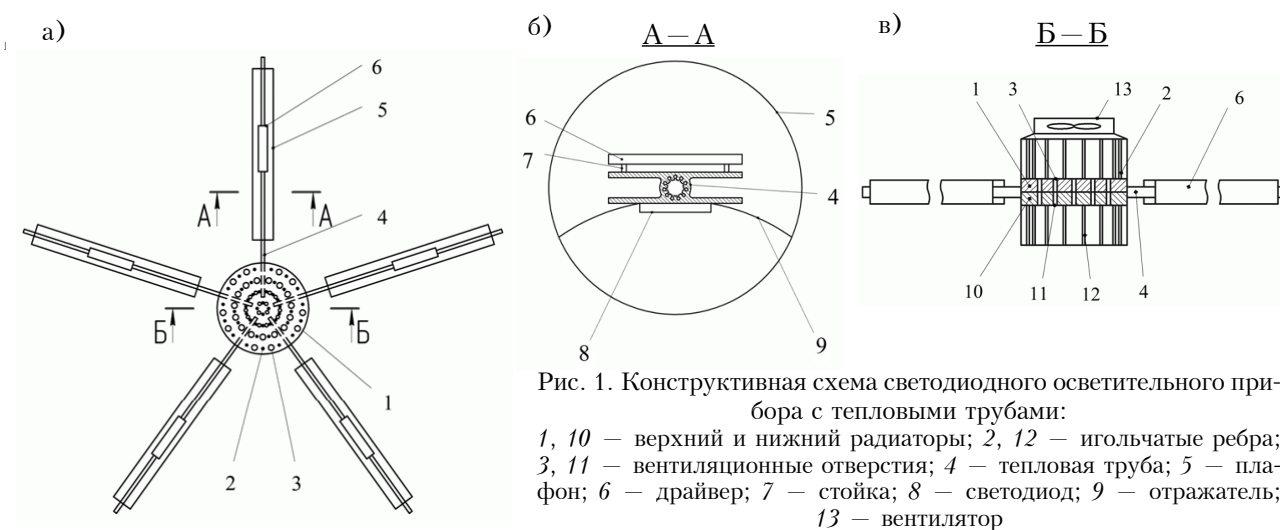
Зона охлаждения ТТ расположена между верхним и нижним радиаторами с игольчатыми ребрами с обеспечением теплового контакта. В основании радиаторов между игольчатыми ребрами выполнены сквозные вентиляционные отверстия. Для создания вынужденной конвекции охлаждающего воздуха в конструкции осветительного прибора предусмотрен вентилятор.

Макет теплоотводящей системы

Для экспериментального исследования рабочих характеристик алюминиевых тепловых труб в составе теплоотводящей системы осветительного прибора был изготовлен тепловой макет, включающий две ТТ (**рис. 2**).

В состав макета теплоотводящей системы входят следующие компоненты:

- две аммиачные алюминиевые тепловые трубы (ТТ1 и ТТ2) длиной 1018 мм каждая с одинадцатью Ω -образными канавками на внутренней поверхности корпуса ТТ, изготовленные из алюминиевого профиля АС-КРА 3,5-Р2 (ширина полка 30 мм, внешний диаметр и расстояние между опорными поверхностями полков 7,5 мм);
- имитаторы теплового потока, выполненные на основе омических электронагревателей, расположенных в зоне нагрева тепловых труб (по 3 шт. на каждой), с максимальной электрической мощностью 100 Вт на одной ТТ;
- два радиатора размерами 122×38×330 мм на основе алюминиевого профиля БПО-1909,



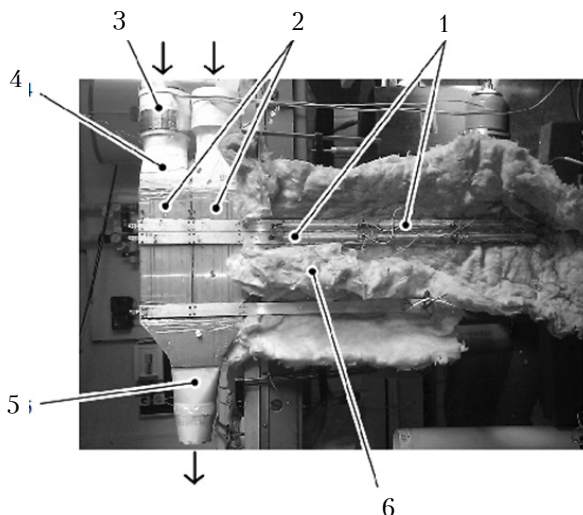


Рис. 2. Общий вид макета теплоотводящей системы: 1 — тепловые трубы с нагревателями; 2 — радиаторы; 3 — нагнетающий вентилятор; 4 — входной патрубок; 5 — выходной патрубок; 6 — базальтовая теплоизоляция

установленные рядом друг с другом на поверхностях зон охлаждения ТТ, с суммарной площадью теплоотдающей поверхности каналов внутри радиаторов 5828 см^2 (всего 26 ребер размерами $32 \times 330 \text{ мм}$, толщиной 3 мм у основания, 2 мм у вершины, с расстоянием между осями 10 мм);

— два вентилятора «Вентс 125 ВКО пресс», обеспечивающие подачу набегающего потока охлаждающего воздуха.

К вершинам охлаждающих ребер радиаторов плотно прилегает изоляционная пластина, при этом внутри радиаторов образуется 24 сквозных воздушных канала трапециевидного сечения площадью $240 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ каждый. Для того чтобы обеспечить равномерное поле значений скорости охлаждающего воздуха в этих каналах и минимальные гидравлические потери в воздушном тракте, были установлены два патрубка на входе в каналы и один на выходе.

С целью снижения контактного теплового сопротивления между контактирующими поверхностями электронагревателей и зоны нагрева ТТ, а также между зоной охлаждения ТТ и радиаторами была нанесена теплопроводная паста КПТ-8. Длина зоны нагрева ТТ составляла 676 мм , зоны охлаждения — 244 мм . Для уменьшения потерь в окружающую среду с нагретых поверхностей нагревателей, зоны нагрева и транспорта ТТ покрывались слоем теплоизолирующего материала на основе базальтового волокна.

Габаритные размеры теплового макета — $1018 \times 330 \times 38 \text{ мм}$.

Экспериментальная установка и методика исследований

В экспериментальную установку для исследования тепловых характеристик ТТ и теплоотводящей системы на их основе (рис. 3) входят: рабо-

чий участок (описанный выше макет теплоотводящей системы); система подвода, измерения и регулирования электрической мощности; автоматизированная система измерения температуры и обработки результатов измерений на основе персонального компьютера (ПК).

Электрическая мощность нагревателей на каждой ТТ регулировалась с помощью отдельного лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) и контролировалась с помощью индивидуального ваттметра W типа Д502 класса точности 0,1. В ходе проведения экспериментов подводимая к каждой ТТ мощность (за вычетом утечек теплоты через теплоизоляцию) изменялась в пределах от 50 до 100 Вт .



Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Отвод теплоты с поверхности радиаторов осуществлялся воздухом, который подавался нагнетающими вентиляторами в их сквозные каналы. Скорость набегающего потока охлаждающего воздуха регулировалась с помощью ЛАТР и контролировалась анемометром типа MetermanTMA 10.

Температурное поле теплового макета и окружающего воздуха измерялось девятью медь-константановыми термопарами с диаметром электродов $0,16 \text{ мм}$. Схема установки термопар приведена на рис. 4 (термопара 7, предназначенная для измерения температуры окружающего воздуха, не показана). Термопары подключались к автоматизированной системе измерения температуры на основе персонального компьютера, имеющей 24 измерительных канала и обеспечивающей время опроса всех термопар 5 с .

Управляющие сигналы для опроса датчиков температуры (термопар) передавались от ПК по последовательному интерфейсу RS232. Основными составляющими элементами системы, кроме ПК, являются также два модуля аналогового ввода MBA8 и адаптер сигналов AC4. Аналоговые сигналы с модуля MBA8 передавались на адаптер сигналов AC4 по интерфейсу RS485.

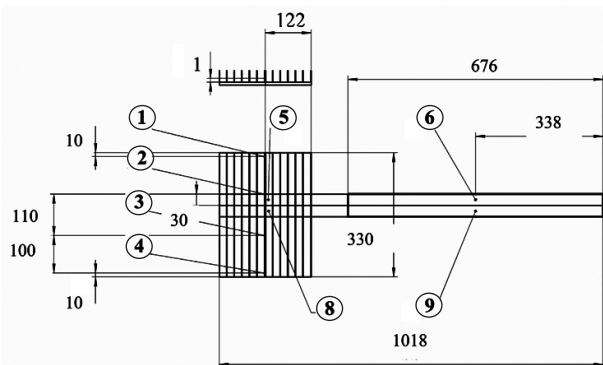


Рис. 4. Схема установки термодатчиков 1–9

Погрешность измерения температуры составляла $\pm 0,5^\circ\text{C}$, погрешность определения перепада температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$, термического сопротивления $\pm 0,01^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем. Рабочий участок экспериментальной установки устанавливался так, чтобы ТТ находилась под наклоном относительно горизонта, включались все системы установки и задавалась определенная скорость набегающего потока охлаждающего воздуха. Затем с помощью ЛАТР устанавливалось начальное значение мощности электронагревателей — по 55 Вт на каждой ТТ.

Показания термодатчиков снимали с периодичностью в 2 мин, контролируя при этом скорость воздуха до достижения стационарного состояния набегающего потока. Через 5–7 мин после

выхода установки на стационарный температурный режим фиксировали показания термодатчиков и скорость воздушного потока. Далее мощность нагревателей повышали до следующего значения и эксперимент повторялся.

Экспериментальные исследования были проведены для трех углов наклона ТТ — 15° , 45° и 90° при двух значениях скорости набегающего потока воздуха — 0,8 и 2,1 м/с.

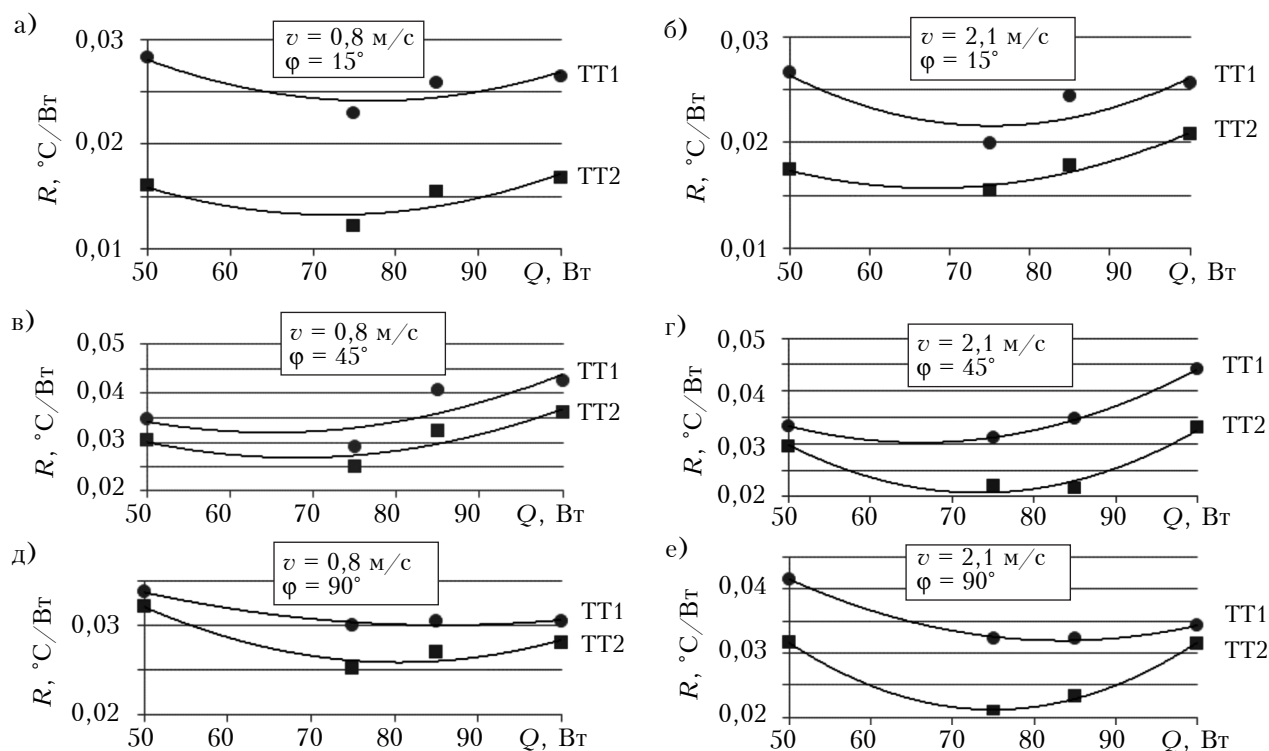
По результатам измерений были определены следующие основные рабочие характеристики ТТ и теплоотводящей системы на их основе: зависимость температуры T в зоне нагрева каждой ТТ от подводимого теплового потока Q ; термическое сопротивление тепловых труб R ; влияние ориентации ТТ в поле силы гравитации на ее рабочие характеристики.

За величину подводимого теплового потока Q принималась электрическая мощность нагревателей на каждой ТТ, определяемая по ваттметру, за вычетом теплопотерь, оцениваемых в 5 Вт на основании опыта предыдущих теплофизических исследований.

Термическое сопротивление каждой тепловой трубы R определялось как отношение перепада температуры ΔT между зонами нагрева и охлаждения ТТ к подводимому тепловому потоку Q .

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Из рис. 5, где приведена зависимость термического сопротивления R двух тепловых труб от подводимого теплового потока Q при различных


 Рис. 5. Зависимость теплового сопротивления тепловых труб от подводимого теплового потока при различных углах наклона φ и значениях скорости воздуха v

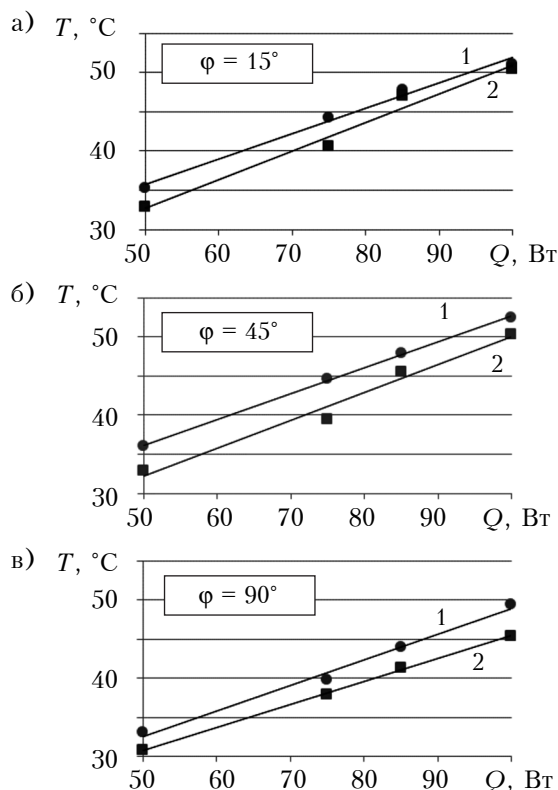


Рис. 6. Зависимость температуры в зоне нагрева ТТ1 от подводимого теплового потока при различных углах ее наклона и скорости охлаждающего воздуха: 1 — 0,8 м/с; 2 — 2,1 м/с

углах их наклона φ и значениях скорости охлаждающего воздуха v , видно, что во всех исследованных режимах минимум термического сопротивления достигался в области значений теплового потока 75 Вт. Отличие значений термического сопротивления ТТ1 и ТТ2 обусловлено различным объемом заправленного теплоносителя: в ТТ1 он был большим, вследствие чего ее зона испарения была больше затоплена теплоносителем, что приводило к снижению коэффициента теплоотдачи в зоне испарения и, соответственно, к росту термического сопротивления ТТ. Вместе с тем, полученные абсолютные значения термического сопротивления обеих ТТ (от 0,012 до 0,044 °С/Вт) находятся в пределах, характерных для мелкосерийных аммиачных алюминиевых тепловых труб, изготавливаемых в лаборатории тепловых труб НТУУ «КПИ».

Как следует из рис. 5, термическое сопротивление ТТ практически не зависит от скорости охлаждающего воздуха, т. е. изменение условий внешнего теплообмена при прочих неизменных параметрах не влияет на термическое сопротивление тепловых труб, но зависит от ориентации ТТ в пространстве. Так, при максимальном передаваемом тепловом потоке ($Q = 100$ Вт) наименьшее значение термического сопротивления обеих ТТ наблюдалось при $\varphi = 15^\circ$, а наибольшее — при $\varphi = 45^\circ$. Это можно объяснить тем,

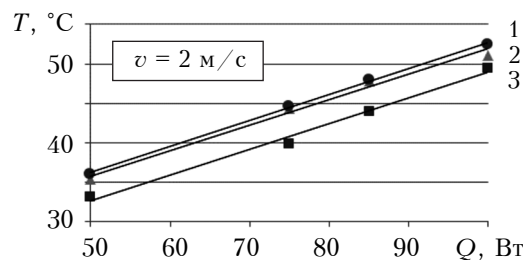


Рис. 7. Зависимость температуры в зоне нагрева ТТ1 от подводимого теплового потока при различных углах ее наклона: 1 — 45°; 2 — 15°; 3 — 90°

что ориентация ТТ влияет на условия стекания конденсата по стенке и его взаимодействия со встречным потоком пара, соответственно, она влияет и на величину коэффициента теплоотдачи в зоне конденсации.

Наименьшее значение термического сопротивления (0,012 °С/Вт) имела ТТ2 при $\varphi = 15^\circ$, наибольшее (0,044 °С/Вт) — ТТ1 при $\varphi = 45^\circ$.

Влияние определяющих факторов (подводимого теплового потока, скорости охлаждающего воздуха и угла наклона ТТ к горизонту) на температуру в зоне нагрева для одной из ТТ (ТТ1) приведено на рис. 6 и 7. Как видно из рис. 6, температура в зоне нагрева ТТ растет линейно с увеличением подводимого теплового потока и изменяется в пределах от 31,0 до 52,5 °С при изменении Q в диапазоне от 50 до 100 Вт. С увеличением скорости охлаждающего воздуха с 0,8 до 2,1 м/с температура ТТ в зоне нагрева снижается на 2–4 °С (т. е. на 6–8%), что обусловлено улучшением теплообмена между радиатором и охлаждающим воздухом и снижением теплового сопротивления в зоне теплоотвода. Из рис. 6 и 7 видно характерное влияние угла наклона на температуру в зоне нагрева ТТ: она снижается на 2–5 °С (6–9%) при вертикальной ориентации ТТ по сравнению с углами наклона 15° и 45° .

Важной рабочей характеристикой ТТ является перепад температуры по ее длине ΔT , определяемый как разность температур в зонах нагрева и охлаждения. В результате исследований двух ТТ установлено, что при минимальном значении подводимого теплового потока (50 Вт)

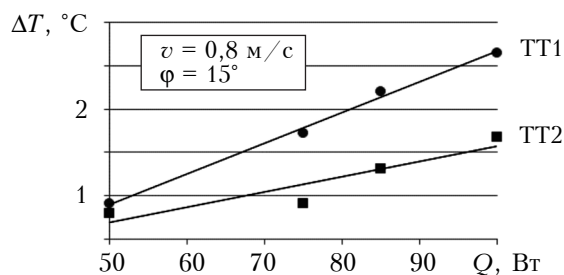


Рис. 8. Зависимость перепада температуры ΔT между зонами нагрева и охлаждения от подводимого теплового потока для ТТ1 и ТТ2

$\Delta T = 0,9 - 1,7^\circ\text{C}$, а при его максимальном значении (100 Вт) $\Delta T = 1,7 - 3,1^\circ\text{C}$. На рис. 8 можно увидеть, что перепад температуры по ТТ растет линейно с увеличением подводимого теплового потока.

Выводы

1. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности практического применения аммиачных алюминиевых тепловых труб в качестве теплопередающих элементов каркаса мощных энергоэффективных осветительных приборов на основе светодиодных модулей.

2. При максимальном значении подводимого теплового потока от светодиодных модулей, установленных на одной тепловой трубе, равном 100 Вт, в исследованном диапазоне определяющих параметров (геометрических размеров зон ТТ, теплоотдающей поверхности радиаторов, скоростей набегающего потока охлаждающего воздуха, углов наклона ТТ к горизонту) температура на поверхности тепловой трубы в зоне установки светодиодных модулей не превышала $52,5^\circ\text{C}$, что вполне приемлемо для условий охлаждения светодиодных источников света.

3. Использование в каркасе осветительного прибора пяти исследованных тепловых труб (см. рис. 1) позволит отвести от светодиодных модулей суммарный тепловой поток до 500 Вт. При коэффициенте полезного действия мощных светодиодов в среднем 75% это эквивалентно потребляемой электрической мощности осветительного прибора 665 Вт. С учетом того, что световая отдача современных светодиодов приблизительно в десять раз выше, чем у ламп накаливания, световой поток от предложенного осветительного прибора будет эквивалентен потоку в 6650 Вт от светильника с лампами накаливания, что подтверждает перспективность использования предложенной конструкции с целью экономии энергоресурсов.

4. При условии обеспечения нормального теплового режима мощность (500 Вт) светодиодного осветительного прибора предложенной конструкции значительно превышает мощность известных светодиодных светильников промышленного назначения с радиаторной системой теплоотвода без ТТ и вентилятора, например светильника ДСП27У-150 (Корпорация «Ватра», г. Тернополь), мощность которого составляет 150 Вт.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Светодиоды: перспективы и барьеры // Современная светотехника. — 2012. — № 5. — С. 3–6.
2. Морозов А. А., Клименко В. П., Корбут В. Б., Иевлев Н. Г., Бутко В. Г. Опыт разработки и внедрения систем светодиодного освещения // Промелектро. — 2014. — № 2(86). — С. 30–36.
3. Дорожкин Ю., Матешев И., Туркин А. Светодиодные модули серии СХА компании Cree: характеристики и применение // Полупроводниковая светотехника. — 2012. — № 5. — С. 50–53.
4. Полищук А., Туркин А. Дegradaция полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов // Компоненты и технологии. — 2008. — № 2. — С. 25–28.
5. Новости. Созданы светодиоды, обладающие светоотдачей выше 300 лм/Вт. 02.04.2014 / Режим доступа: www.engelhg.com/page/8281
6. Сорокин В. М. Организационно-экономические механизмы внедрения светодиодных осветительных систем в масштабах национальной экономики // Світло люкс. — 2012. — № 1. — С. 8–16.
7. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes // Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM), 28th Annual IEEE. — 2012. — P. 319–324. — DOI : 10.1109/STHERM.2012.6188867
8. Староверов К. Системы охлаждения для светодиодов // Новости электроники. — 2008. — № 17. — С. 21–23.
9. Пат. 72606 України. Світлодіодне джерело світла для вуличних світильників / М. І. Носанов, В. І. Тимченко, Т. І. Романова, Ю. О. Некрашенко, В. І. Шаталов. — 2012. — Бюл. № 16.
10. Sorensen H. Water cooling of high power light Emitting Diode // Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Itherm), 13th IEEE Intersociety Conferenc. — 2012. — P. 968–974. — DOI : 10.1109/ITHERM.2012.6231531.
11. Wang J.-C., Wang R.-T., Chang T.-Li, Hwang D.-S. Development of 30 Watt high-power LEDs vapor chamber-based plate // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2010. — Vol. 53, iss.19–20. — P. 3990–4001. — Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.018>
12. Николаенко Ю. Е. Решение тепловой проблемы мощных светодиодных светильников с помощью тепловых труб // Труды XIII МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 203.
13. Пат. 68831 України. Люстра / Ю. Є. Ніколаєнко, Т. Ю. Ніколаєнко. — 2012. — Бюл. № 7.
14. Гвоздев С. М., Митрофанов А. В., Сафонов С. А., Холодилов В. И. Об использовании тепловых труб в проектировании мощных светильников со светодиодами // Светотехника. — 2012. — № 2. — С. 19–21.
15. Хайрмасов С. М., Рассамкин Б. М., Рассамкин А. Б. Применение алюминиевых тепловых труб в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Труды XV МНПК «Современные информационные и электронные технологии». Том II. — Украина, г. Одесса. — 2014. — С. 8–11.

Дата поступления рукописи
в редакцию 14.06 2014 г.

М. О. ЛОЗОВИЙ, Ю. Є. НІКОЛАЄНКО, Б. М. РАССАМАКІН, С. М. ХАЙРНАСОВ

Україна, Київ, НТУУ «КПІ»
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ СВІТЛОДІОДНИХ ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

Приведено результати експериментального моделювання теплових характеристик двох алюмінієвих аміачних теплових труб (ТТ) з канавчатою капілярною структурою, призначених для використання як

теплопередавальні елементи в конструкції потужного світлодіодного освітлювального приладу з вимушеним повітряним охолодженням. В діапазоні значень теплового потоку, що підводиться, від 50 до 100 Вт і швидкості повітряного потоку, що набігає, від 0,8 до 2,1 м/с температура в зоні нагрівання ТТ в залежності від кута її нахилу до горизонту знаходилася в межах від 31,0 до 52,5°C, при цьому перепад температури по ТТ складав від 0,9 до 3,1°C. Значення теплового опору ТТ знаходилася в діапазоні від 0,012 до 0,044°C/Вт.

Ключові слова: світлодіод, освітлювальний прилад, система охолодження, тепла труба, теплові характеристики.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.32
UDC 536.248.2; 628.941.8

M. A. LOZOVOI, Yu. E. NIKOLAENKO,
B. M. RASSAMAKIN, C. M. KHAIRNASOV

Ukraine, Kiev, NTUU "KPI"
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

RESEARCH ON THERMAL CHARACTERISTICS OF HEAT PIPES FOR LED LIGHTNING DEVICES

New energy-saving technologies for lighting is a promising trend in lighting technology. To this end, during the recent decade, have been actively developed and implemented lighting units based on LED modules. Reliability of such devices is largely dependent on the ensuring of cooling of the LEDs. Heat pipes are being used with ever increasing frequency for increasing an efficiency of cooling of powerful LEDs within a lightning device. Results of experimental modeling of thermal characteristics of two aluminum heat pipes with grooved capillary structure and ammonia used as a heat transfer agent, designed for application as a heat transfer elements in designs of powerful LED lightening device with forced air cooling are presented in this paper. It is shown that for the heat flux range of 50 to 100 W and for incident flow speed in the range of 0.8 to 2.1 m/s the temperature in the heating zone of the heat pipe falls into the range of 31.0 to 52.5 °C. In this case the temperature difference along the heat pipe is between 0.9...1.7 °C, when a minimal value of the fed heat flux is 50 W, and 1.7...3.1°C, when a maximum value of the heat flux is 100 W. The value of heat transfer resistance of the heat pipes was in the range of 0.012 to 0.044 °C/W. The key factors influencing the thermal characteristics of the heat pipes are: the value of the fed heat flux, the speed of cooling air flux, heat pipe inclination angle with respect to the horizon. By using five such heat pipes within the powerful LED lightning device it is possible to achieve an elimination of the total heat flux from LED modules up to 500 W. At an efficiency factor of LEDs of about 75% this is equivalent to intake power 665 W. Taking into account that luminous efficiency of modern LEDs is about 10 times as high as those of incandescent lamps, proposed lightning device will produce a luminous flux which is equivalent to the luminous flux of a lightning device with incandescent lamps with a power of 6650 W, so that this will allow reducing an input power of the lightning device by 5985 W.

Key words: LED, lightning device, cooling system, heat pipe, thermal characteristics.

REFERENCES

- [LEDs: prospects and barriers]. *Sovremennaja svetotekhnika*, 2012, no 5, pp. 3–6. (in Russian)
- Morozov A. A., Klimenko V. P., Korbut V. B., Iyevlev N. G., Butko V. G. [An experience of development and inoculation of LED lightning systems]. *Promelektro*, 2014, no 2(86), pp. 30–36. (in Russian)
- Dorozhkin Yu., Mateshev I., Turkin A. [LED modules of the CXA series from CREE: characteristics and application]. *Poluprovodnikovaja svetotekhnika*, 2012, no 5, pp. 50–53. (in Russian)
- Polishchuk A., Turkin A. [The degradation of the semiconductor LEDs based on gallium nitride and its solid solutions]. *Komponenty i tekhnologii*, 2008, no 2, pp. 25–28. (in Russian)
- [News. LEDs with luminous efficiency over 300 lm/W have been created]. 02.04.2014: www.engelihg.com/page/8281. (in Russian)
- Sorokin V. M. [Organizational and economical mechanisms of inoculation of LED lightning systems on the scale of a national economics]. *Switlo luks*, 2012, no 1, pp. 8–16. (in Russian)
- Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2012, 28th Annual IEEE, Date 18–22 March 2012, pp. 319-324. DOI : 10.1109/STHERM.2012.6188867
- Staroverov K. [Cooling systems for LEDs]. *Novosti elektroniki*, 2008, no 17, pp. 21–23. (in Russian)
- Pat. 72606 Ukraine. [LED light source for street lamps]. Nosanov M. I., Tymchenko V. I., Romanova T. I., Nekrashenko Y. O., Shatalov V. I. 2012, byul. no 16.
- Sorensen H. Water cooling of high power light emitting diode. *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Itherm)*, 2012 13th IEEE Intersociety Conference on May 30 2012–June 1 2012, pp. 968–974. DOI: 10.1109/ITHERM.2012.6231531.
- Wang J.-C., Wang R.-T., Chang T.-Li, Hwang D.-S. Development of 30 Watt high-power LEDs vapor chamber-based plate. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, is. 19-20, pp. 3990–4001. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.018>
- Nikolaenko Yu. E. [Solution of the heat problem of high power LED lamps with heat pipes]. *Proc. of 13th International scientific-practical conf. "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2012, pp. 203. (in Russian)
- Pat. 68831 Ukraine. [Luster]. Yu. E. Nikolaenko, T. Yu. Nikolaenko. 2012, byul. no 7.
- Gvozdev S. M., Mitrofanov A. V., Safonov S. A., Kholodilov V. I. [On the application of heat pipes in designing powerful lightning devices with LEDs]. *Svetotekhnika*, 2012, no 2, pp. 19–21. (in Russian)
- Khairnasov S. M., Rassamakin B. M., Rassamakin A. B. [Aluminium heat pipes application to electronic cooling systems]. *Proc. of 15th International scientific-practical conf. "Modern information and electronic technologies"*, Vol. II. Ukraine, Odessa, 2014, pp. 8–11. (in Russian)

В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, Е. Г. КОСТИН, Б. П. ПОЛОЗОВ, к. ф.-м. н. О. А. ФЕДОРОВИЧ,
к. ф.-м. н. В. А. ПЕТРЯКОВ

Украина, г. Киев, Институт ядерных исследований НАН Украины

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЧ-РАЗРЯДА И ПАРАМЕТРОВ НАГРЕВАТЕЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДЛОЖКИ В ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ «АЛМАЗ» ДЛЯ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПЛЕНОК

Представлены результаты исследований влияния на температуру подложки параметров высокочастотного разряда в плазмохимическом реакторе «Алмаз», разработанном и изготовленном в Институте ядерных исследований. Определено время выхода на равновесную температуру подложки при различных параметрах ВЧ-разряда и параметрах основного нагревателя. Установлено, что в условиях данного исследования при температурах подложки выше 600°C влияние ВЧ-разряда на повышение ее температуры практически отсутствует.

Ключевые слова: углеродные алмазоподобные пленки, плазмохимический реактор, подложка, температура нагрева.

Под алмазными и алмазоподобными пленками (АП и АПП) понимают такие структуры, которые состоят из атомов углерода как с алмазными (sp^3), так и с графитоподобными (sp^2) связями. Как известно, алмаз сочетает в себе уникальные свойства: высокую атомную плотность; большую ширину запрещенной зоны; низкую диэлектрическую проницаемость; высокую химическую стойкость; низкий коэффициент трения; высокую износостойкость; коррозионную устойчивость и т. п. Оптические свойства являются одними из самых интересных физических свойств данных структур: это и широкий спектральный диапазон оптического пропускания излучений, и необычно высокий показатель преломления (2,419 при длине волны 589 нм). Такие характеристики в сочетании с экстремальными свойствами АП и АПП (твердость, высокой теплопроводностью и химической стойкостью) представляют несомненный интерес для их использования [1]. Высокая устойчивость алмаза при тепловых нагрузках до 800–1000°C обуславливается величиной коэффициента линейного расширения в 5–10 раз меньшей, чем у других материалов [2].

Уникальное сочетание указанных физико-химических свойств АП и АПП стимулировало их широкое использование в различных областях науки и техники, в том числе и в области электроники, где АП и АПП используются для создания газовых сенсоров, диодов и транзисторов [3], детекторов частиц и датчиков излучений [4].

Интерес к использованию АП и АПП послужил стимулом к развитию целого ряда плазменных технологий их получения, которые описаны в [5–10]. Каждая из них имеет свои преимущества и недостатки. Для создания четкой

теории механизма роста АП и АПП продолжают развиваться не только новые методы и технологии их получения, но и методики анализа.

Структура и характеристики осаждаемых материалов определяются следующими параметрами: энергией осаждаемых частиц; химическим составом плазмы; температурой подложки; состоянием ее поверхности; давлениями рабочих газов и их соотношением [11]. Структура таких пленок и соотношение в них (sp^3)- и (sp^2)-связей определяются температурой подложки [12].

Снижение температуры подложки приводит к уменьшению размеров осаждаемых кристаллов и способствует образованию аморфного углерода или графита, массовая доля которого может значительно превышать долю алмазной фракции [13]. При 1400°C в вакууме или инертной атмосфере начинается заметная поверхностная графитизация, что недопустимо при нанесении алмазных пленок [14, с. 40]. Поэтому для получения АПП температура поверхности подложки, как правило, поддерживается в диапазоне от 400 до 1100°C в зависимости от видов и параметров разрядов. Для получения алмазных пленок наиболее типичными значениями температуры являются 700–1000°C [15, 16]. В указанном температурном диапазоне на поверхности подложки происходят явления, приводящие к росту на ней алмазных наноструктур [7, 17]. При температурах выше этого диапазона происходит графитизация с последующим разрушением структур. Таким образом, как показано в [15–19], получение алмазных структур возможно в достаточно узком диапазоне температуры подложки.

В [19] представлены данные по зависимости скорости роста алмазных пленок от температуры для разных значений тока разряда. Для каждого из выделенных интервалов тока разряда ско-

рость роста алмаза имеет свою зависимость от температуры подложки. Для достижения максимальной скорости синтеза алмазных покрытий и определения оптимальных условий ведения процесса необходимо учитывать как электрические параметры разряда, так и температуру подложки.

Несмотря на то, что плазменные технологии получения АП успешно развиваются, все же остается много неясных технологических моментов. При этом одним из важнейших вопросов является влияние параметров и условий разряда на температуру нагрева подложки в плазмохимическом реакторе (ПХР) для синтеза алмазных пленок в процессе его работы.

Целью данной работы является изучение влияния параметров плазмы высокочастотного разряда в управляемом магнитном поле, а также конструкции нагревателя на температуру подложки в ПХР.

Методика эксперимента

Исследования проводились на плазмохимическом реакторе «Алмаз» (рис. 1), который был разработан, сконструирован и изготовлен в Отделе физики плазменных технологий Института ядерных исследований НАН Украины.

Реактор состоит из прямоугольного корпуса 1, изготовленного из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Плазма «зажигается» в газовой смеси между активным 4 и заземленным 3 электродами высокочастотным (ВЧ) напряжением частотой 13,56 МГц. Смесь газов поступает в камеру реактора из системы напуска газа 9. Плазма находится в управляемом магнитном поле, которое образуется четырьмя магнитными катуш-

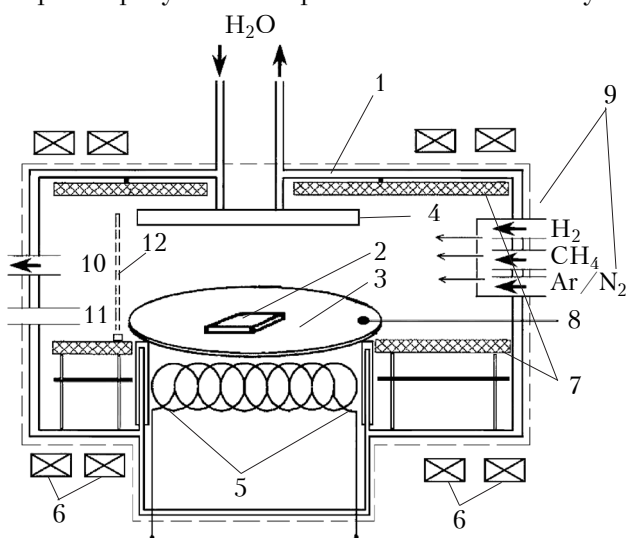


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — корпус; 2 — подложка; 3 — держатель подложки (заземленный электрод); 4 — активный электрод; 5 — нагреватель; 6 — магнитные катушки; 7 — плавающие электроды; 8 — измеритель температуры (термопара); 9 — системы напуска газа; 10 — система откачки; 11 — вакуумметр; 12 — плазмогаситель

ками 6 и направлено перпендикулярно электрическому полю ВЧ-разряда. Для предотвращения пробоя ВЧ-разряда на корпус реактора и получения нужной полярности потенциала смещения на подложкодержателе используются два металлических плавающих электрода 7, которые изолированы как от заземленного электрода, так и один от другого. Неиспользованные газы и продукты плазмохимических реакций удаляются из камеры ПХР через систему откачки газов 10. Необходимая температура подложки 2 обеспечивается путем подогрева ее держателя 3 диаметром 110 мм с помощью специального нагревателя 5, который представляет собой молибденовую спираль, подключенную к регулируемому источнику питания переменного тока. С помощью регулятора напряжения и разделительного трансформатора получали ток нагрева до 21 А при напряжении питания до 40 В. Спираль изолирована как от держателя подложки, так и от корпуса теплового отражателя. Держатель подложки нагревается за счет инфракрасного излучения и частичной термоэлектронной эмиссии с поверхности молибденовой спирали.

Контроль температуры обеспечивается хромель-алюмелевой термопарой 8. Для предотвращения попадания плазмы в систему откачки используется плазмогаситель 12, изготовленный в виде жалюзи из немагнитной нержавеющей стали. Контроль вакуума в разрядной камере проводится с помощью ионизационно-термопарного вакуумметра ВИТ-3 11. Температура держателя подложки измеряется также с помощью оптического пирометра ОППИР-09, хотя при наличии разряда в камере ПХР это весьма затруднительно из-за интенсивного излучения из объема плазмы, образующейся при ВЧ-разряде в управляемом магнитном поле.

В ходе выполнения исследований были решены проблемы, отмеченные в [6], а именно: нагрев термопары как за счет скинирования ВЧ-тока по ее поверхности, так и за счет электромагнитных наводок; запыление токопроводящим углеродом торцов изоляции. Первая проблема была решена путем экранирования поверхности термопары металлической пластинкой в точке измерения и расположением подводов в изоляции из фарфоровой полый трубки под плавающими электродами. Использование двойной внешней изоляции термопары позволило устранить запыление торцов. ВЧ-наводки на измеритель термо-ЭДС устранялись благодаря последовательному подключению с термопарой индуктивностей к каждому проводу термопары и параллельному подключению к миллиамперметру керамического конденсатора.

Более подробно режимы работы установки представлены в [20]. Результаты физических исследований алмазных пленок, полученных на приведенной установке, описаны в [20, 21].

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование температуры держателя подложки проводилось в следующих режимах: без разряда, когда температура менялась за счет регулирования тока молибденовой спирали нагревателя, и при наличии разряда, с подогревом и без подогрева держателя подложки.

Известно, что при нагреве держателя подложки при постоянном значении тока в нагревательной спирали существует время установления равновесной температуры. На **рис. 2, а** представлены результаты исследований процесса установления равновесной температуры держателя подложки для нашей конструкции ПХР при токе в молибденовой спирали нагревателя $I_n=10$ А при давлении $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. Отсюда видно, что в условиях отсутствия разряда для достижения равновесной температуры держателя необходимо не менее 40 мин. Причинами такой инерционности процесса прогрева могут быть низкий коэффициент теплопроводности материала, из которого изготовлен держатель подложки (нержавеющая сталь); слабая эффективность передачи тепла в вакууме от молибденовой спирали (в основном — за счет лучистого

прогрева); большая масса держателя подложки. Нагрев происходит за счет инфракрасного излучения, и определенные потери тепла при передаче от спирали к держателю все же происходят, несмотря на наличие двух коаксиальных теплоотражателей из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

На **рис. 2, б** представлены результаты исследований времени выхода на равновесную температуру при нагреве держателя только за счет разряда (без использования нагревателя). Ток разряда I_p составлял 7 А, напряженность магнитного поля 400 А/м, мощность ВЧ-генератора 1 кВт. Как видно из рисунка, время установления равновесной температуры в этом случае возрастает до 70 мин.

Также было проведено исследование зависимости температуры держателя от тока накала нагревателя с целью построения эталонной кривой для сравнения с температурой держателя при наличии разряда. При измерениях рабочее давление в ПХР составляло $6 \cdot 10^{-2}$ Торр. Из представленной на **рис. 3, а** зависимости (кривая 1) видно, что температура держателя подложки возрастает практически линейно с увеличением тока и при $I_n=16$ А достигает 630°C .

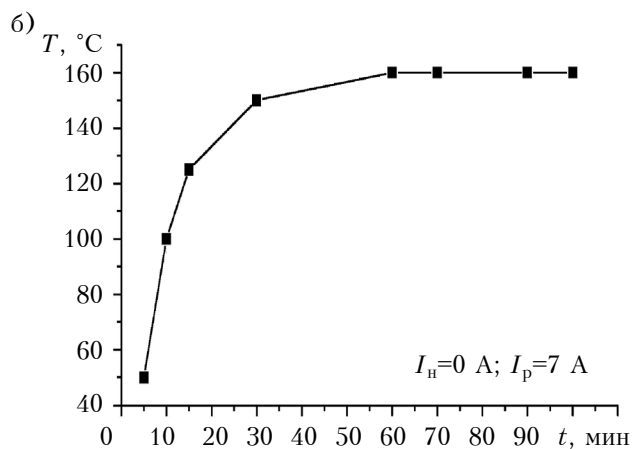
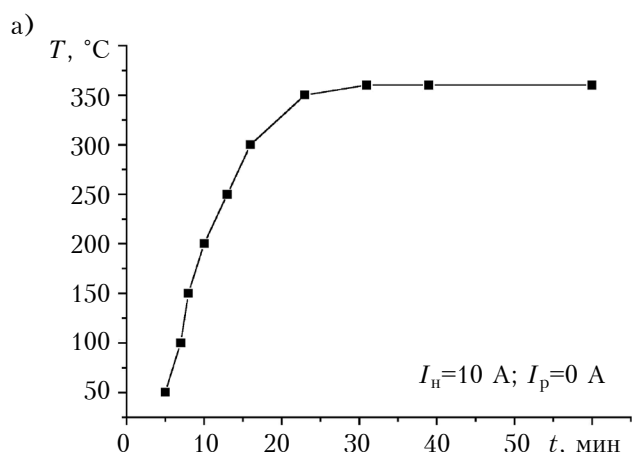


Рис. 2. Временная характеристика установления равновесной температуры держателя подложки при его нагреве только за счет накала спирали (а) или ВЧ-разряда (б)

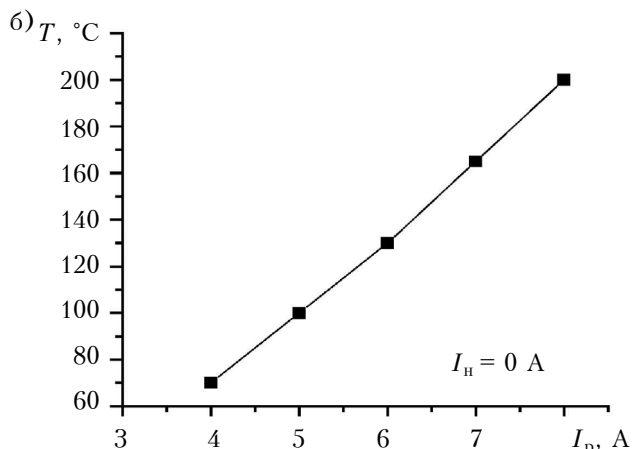
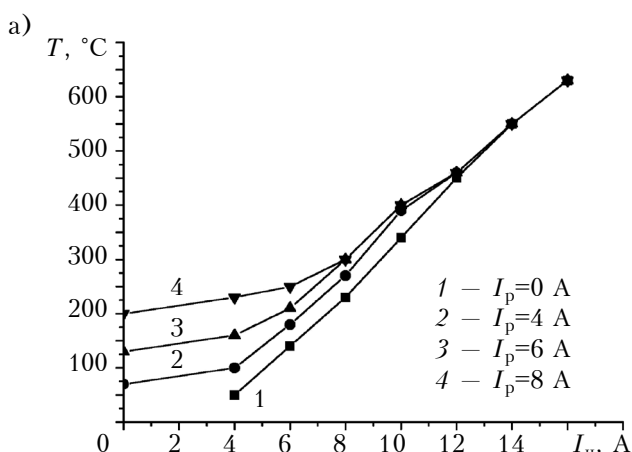


Рис. 3. Зависимость температуры держателя подложки от тока накала нагревателя при разном токе разряда (а) и от тока разряда в отсутствие тока накала (б)

Результаты исследований нагрева держателя подложки за счет плазмы ВЧ-разряда представлены на рис. 3, б. Полученная зависимость так же, как и кривая 1 на рис. 3, а, практически линейная, однако температура держателя достигает всего 200°C при $I_p=8$ А и мощности ВЧ-генератора 1 кВт.

Зависимости температуры держателя от тока накала нагревателя при наличии ВЧ-разряда представлены на рис. 3, а (кривые 2–4) вместе с полученными в условиях нагрева без разряда (кривая 1). Здесь видно, что при малых значениях тока нагревателя I_n температура держателя подложки низкая и пропускание разряда приводит к достаточно сильному его нагреву. С увеличением I_n кривые сближаются, т. е. преобладающим становится влияние мощности спирали. При достижении I_n значения примерно 10 А вклад разряда плазмы в повышение температуры держателя становится незначительным, а далее — уже практически незаметным.

Следует отметить, что держатель подложки все-таки можно нагреть до 1000°C с помощью молибденовой спирали большей длины. Это, однако, сопровождается рядом существенных проблем. Во-первых, ток в спирали при этом достигает 21 А (рис. 4, кривая 1). Кроме того, увеличение длины спирали приводит к росту падения напряжения на ней (соответственно, к большей вероятности пробоя при низком давлении в реакторе) и к увеличению ее сопротивления, т. е. растет мощность, выделяемая спиралью, а значит, и поток тепла на держатель подложки. В то же время, при больших значениях тока весьма затруднительно в течение длительного времени проводить охлаждение подводящих электродов, что вызывает еще одну проблему: несмотря на то, что молибден является одним из наиболее стойких в водородной среде материалов, открытая молибденовая спираль, взаимодействуя с водородом при высокой температуре, постепенно

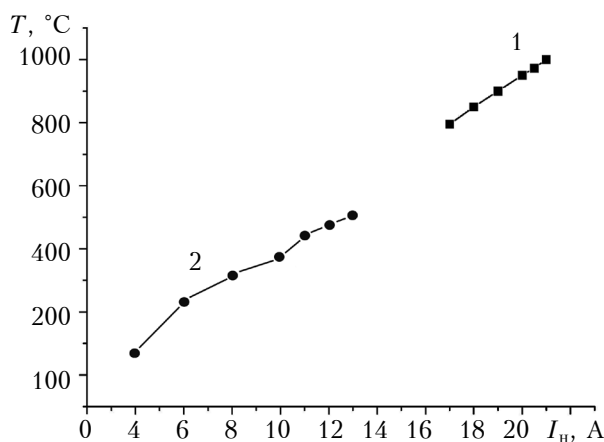


Рис. 4. Зависимости температуры держателя подложки от тока нагревателя из молибденовой спирали увеличенной длины (1) и плоского нагревателя из фехрелевой фольги (2)

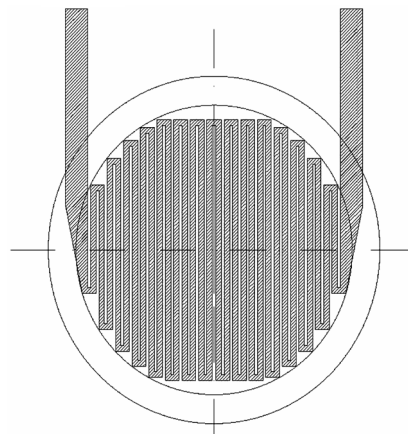


Рис. 5. Конструкция держателя подложки с плоским нагревателем из фехрелевой фольги

утончается, меняются ее параметры, и в результате она выходит из строя. Срок службы молибденовой спирали при температурах около 1000°C составляет всего несколько месяцев.

В связи с указанными проблемами была предпринята попытка создать новый нагреватель с достаточно большим сроком службы, который позволил бы свести к минимуму тепловые потери и получить температуру в пределах 700–1000°C [18]. В разработанной конструкции (рис. 5) нагревательный элемент, изготовленный из фехрелевой фольги толщиной 50 мкм, находится в контакте с держателем подложки из немагнитной нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т через высокотемпературную керамику марки 22ХС (ВК94-1). Предполагалось, что это позволит уменьшить количество потерь на тепловое излучение и уменьшить время выхода температуры держателя подложки на равновесное значение.

Во избежание пробоя с нагревателя на заземленные участки установки при напряжении выше 50 В он был выполнен с сопротивлением 3 Ом. Максимальная температура поверхности держателя, которую удалось получить с помощью такого нагревателя при токе нагрева 15 А и падении напряжения на нем 45 В, составила 550°C (см. рис. 4, кривая 2). При дальнейшем увеличении тока произошло расслоение фольги и ее перегорание. Следует отметить, что использование нихромовой фольги вместо фехрелевой также не даст необходимой для получения алмазных пленок температуры подложкодержателя, поскольку максимальные значения рабочих температур нихрома и фехраля не столь значительно отличаются между собой — 1100 и 1000°C, соответственно [22]. Заменить фехрелевую фольгу на молибденовую не представляется возможным, т. к. удельное сопротивление молибдена в 20 раз ниже удельного сопротивления фехраля и нихрома [22]. В таком случае для нагрева подложкодержателя до высоких температур необходим ток более 300 А, что достаточно тяжело обеспечить технически из-за необходимости охлаждения подводящих проводов и, особенно, высокоточных вакуумных вводов.

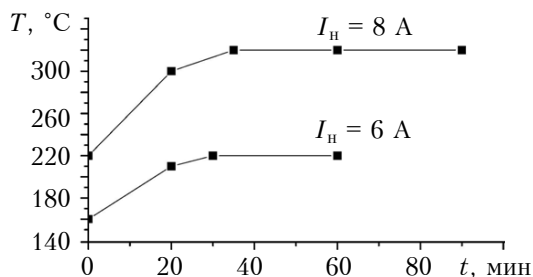


Рис. 6. Временная характеристика установления равновесной температуры держателя подложки для нагревателя из фехральной фольги при разных токах нагрева

Существенно увеличить скорость прогрева держателя подложки с помощью разработанного нагревателя также не удалось (рис. 6) — его равновесную температуру можно достичь не менее чем за 25–30 мин, что, по-видимому, связано с низкой теплопроводностью материала держателя подложки.

Однако, несмотря на сказанное, фехральные нагреватели предложенной конструкции могут быть использованы для получения более низких температур, необходимых, например, для получения пористого кремния, нитрида титана и других соединений [23].

Заключение

Представленные результаты исследований позволяют заключить следующее.

1. При температуре 600 °C и более прогрев подложки под действием плазмы в сравнении с нагревом от подложкодержателя незначителен и им можно пренебречь.

2. Для предотвращения формирования не алмазных, а алмазоподобных углеродсодержащих образований необходимо учитывать инерционность нагрева держателя подложки; процесс нанесения алмазных пленок следует проводить только после достижения стабильного значения необходимой температуры подложки.

3. Нагреватель из фехральной фольги позволяет получить температуру подложки не выше 550 °C.

4. При использовании молибденовой проволоки можно нагреть держатель подложки до 1000 °C, однако в водородной среде длительность службы такого нагревателя небольшая и при максимальной температуре составляет несколько месяцев при ежедневной работе.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Cline B.L., Olson J.M. CVD diamond solutions for machining and other mechanical applications // *Diamond films handbook* / Ed. by J. Asmussen, D. Reinhard. — New York: Marcel Dekker, 2002. — P. 403–490.
2. Справочник: Физические свойства алмаза / Под. ред. Н.В. Новикова. — Киев: Наукова думка, 1987.
3. Kobashi K., Yokota Y. R&D of diamond films in kobe steel // *Proc. of the Sixth Applied Diamond Conf. / Second Frontier Carbon Technology Joint Conf. (ADC/FCT 2001)*. — Auburn, Alabama USA. — 2001. — P. 24–30.

4. Han S.K., McClure M.T., Wolden C.A. et. al. Fabrication and testing of a microstrip particle detector based on highly oriented diamond films // *Diamond&Related Materials*. — 2000. — Vol. 9. — P. 1008–1012.

5. Довгань А.Н., Колесник В.П. Формирование алмазоподобных покрытий импульсными потоками плазмы // *Авиационно-космическая техника и технология*. — № 8. — Харьков, ХАИ. — 2008. — С. 21–25.

6. Костін Є.Г., Полозов Б.П., Федорович О.А. та ін. Плазмохімічний синтез та фізичні дослідження нанорозмірних алмазоподібних плівок // *36. анотацій Української конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу*. — Україна, м. Київ. — 2011. — С. 37.

7. Калданов В.А. Исследование источников неравновесной плазмы на основе СВЧ разрядов, предназначенных для осаждения алмазных пленок / Дис. ...канд. физ.-мат. наук. — Россия, г. Нижний Новгород. — 2006.

8. Кускова Н.И., Бакларь В.Ю. Процессы получения углеродных наноматериалов электроразрядными методами // *Матер. 14-й междунар. конф. «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах»*. — Украина, г. Николаев. — 2009. — С. 73–75.

9. Пашнев В.К., Стрельницкий В.Е., Опалев О.А. и др. Осаждение алмазных покрытий с использованием тлеющего разряда, стабилизированного магнитным полем // *Физическая инженерия поверхности*. — 2003. — Т. 1, №1. — С. 49–55.

10. Yacaman M. J., Yoshida, M. M., Rendon, R., Santiesteban J. G. Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure // *Applied Physics Letters*. — 1993. — Vol. 62. — P. 202–204.

11. Сыпченко И.А. О влиянии условий осаждения на структуру, фазовый состав и свойства алмазоподобных пленок углерода // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. — Харьков, ХАИ. — 2010. — Вып. 3. — С. 296–303.

12. Рудченко С.О., Пуха В.Е., Стариков В.В. Влияние условий синтеза на структуру и свойства алмазоподобных углеродных пленок для ФЭП // *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н.Каразіна*. № 1019, серія «Фізика». — 2012. — Вип. 16. — С. 89–93.

13. Черепанов В.А., Золкин А.С., Колесов Б.А., Мурзахметов К.Т., Семенов В.И. Алмазоподобные гранулированные пленки на кремнии, полученные при горении ацетилена [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://psj.nsu.ru/articles/paper5.html>

14. Физический энциклопедический словарь. Т. 1 / Под ред. Андреева Н.Н. и др. — Москва: Сов. энциклопедия, 1960.

15. Jackman R. B., Beckman J., Foord J. S. The growth of nucleation layers for high-quality diamond CVD from an r.f. plasma // *Diamond and related materials*. — 1995. — Vol. 4, iss. 5–6. — P. 735–739.

16. Reineck I., Sjostrand M. E., Karner J., Pedrazzini M. Diamond coated cutting tools // *Int. J. of Refractory metals and Hard materials*. — 1996. — Vol. 14. — P. 187–193.

17. Grotjohn T. A., Asmussen J. Microwave plasma-assisted diamond film deposition. Chapt. 7 // *In book: Diamond films handbook* / Eds. J. Asmussen, D. Reinhard. — New York, USA: Marcel Dekker, Inc., 2002. — P. 211–300.

18. Выровец И.И., Грицына В.И., Дудник С.Ф. и др. Нанокристаллические алмазные пленки: структура, свойства и перспективы применения // *Физическая инженерия поверхности*. — 2010. — Т. 8, № 1. — С. 4–19.

19. Вережкин А.А., Выровец И.И., Грицына В.И. и др. Исследование влияния параметров синтеза алмазных покрытий на скорость их роста и величину удельного электрического сопротивления // *Вопросы атомной науки и техники*. — 2010. — № 1. — С. 104–107.

20. Максименко Л.С., Мищук О.Н., Матяш И.Е. и др. Модуляционная поляриметрия полного внутреннего отражения, нарушенного алмазоподобными пленками // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 3–8.

21. Костин Е.Г., Полозов Б.П., Федорович О.А. и др. Физические исследования наноразмерных алмазоподобных пленок // Труды 13-й МНПК «Современные информационные и электронные технологии». — Украина, г. Одесса. — 2012. — С. 247.

22. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. — Москва: Наука, 1966.

23. Khodin A., Lee Joong-Kee, Kim Chang-Sam, Kim Sang-Ok. Amorphous nanocrystalline silicon plasma enhanced CVD grown on porous alumina substrate // 9th IEEE Conference on Nanotechnology. — Italy, Genoa. 2009. — P. 540–542.

Дата поступления рукописи
в редакцию 4.04 2014 г.

В. В. ГЛАДКОВСКИЙ, Е. Г. КОСТИН, Б. П. ПОЛОЗОВ, О. А. ФЕДОРОВИЧ,
В. О. ПЕТРЯКОВ

Україна, м. Київ, Інститут ядерних досліджень НАНУ

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВЧ-РОЗРЯДУ І ПАРАМЕТРІВ НАГРІВАЧА НА ТЕМПЕРАТУРУ ПІДКЛАДКИ В ПЛАЗМОХІМІЧНОМУ РЕАКТОРІ «АЛМАЗ» ДЛЯ СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ АЛМАЗОПОДІБНИХ ПЛІВОК

Досліджено вплив на температуру підкладки параметрів ВЧ-розряду в плазмохімічному реакторі «Алмаз», розробленому і виготовленому в Інституті ядерних досліджень. Встановлено час виходу на рівноважне значення температури підкладки при різних параметрах ВЧ-розряду та параметрах основного нагрівача. Встановлено, що в умовах даного дослідження при температурах підкладки вище 600°C вплив ВЧ-розряду на підвищення її температури практично відсутній.

Ключові слова: вуглецеві алмазоподібні плівки, плазмохімічний реактор, підкладка, температура нагріву.

DOI: 10.15222/TKEA2014.5-6.39
UDC 535.5

V. V. HLADKOVSKIY, E. G. KOSTIN, B. P. POLOZOV,
O. A. FEDOROVICH, V. A. PETRIAKOV

Ukraine, Kiev, Institute for Nuclear Research of NASU

E-mail: oafedorovich@kinr.kiev.ua

THE INFLUENCE OF HF DISCHARGE PARAMETERS AND HEATER SETTINGS ON THE SUBSTRATE TEMPERATURE IN THE PLASMA-CHEMICAL REACTOR «ALMAZ» FOR THE SYNTHESIS OF DIAMOND-LIKE CARBON FILMS

The paper presents the research results on the device for obtaining diamond-like films from gas phase, constructed and tested in the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences.

The device is based on a high-frequency (HF) discharge (13,56 MHz) into controlled crossed magnetic and electric fields. The discharge is excited in H_2+CH_4 or H_2+CH_4+Ar mixtures in different proportions. Working pressure in the chamber is $10^{-1} - 10^{-2}$ Torr.

From the obtained results, the authors determine the time period for establishing of equilibrium substrate temperature at different HF discharge and main heater parameters. HF discharges, in the conditions of this study, at substrate temperatures above 600°C have virtually no influence on the temperature rise of the substrate. In addition, a new heater is proposed in order to increase the attainable temperature and reduce the time for establishing the equilibrium substrate temperature.

A fehral heater can not heat the substrate to temperatures above 650°C. A molybdenum wire as a material of the heater can ensure the substrate holder temperature above 1000°C in a hydrogen atmosphere, but it has a short lifespan of a few months at the maximum temperature under daily use.

Keywords: carbon diamond-like films, plasma chemical reactor, substrate, heating temperature.

REFERENCES

1. Cline B.L., Olson J.M. CVD diamond solutions for machining and other mechanical applications. *Diamond Films Handbook*, ed. by J. Asmussen, D. Reinhard, New York, Marcel Dekker, 2002, pp. 403-490.

2. *Spravochnik: Fizicheskie svoistva almaza* [Handbook: The physical properties of diamond]. Ed. by N.V. Novikov, Kiev, Naukova dumka, 1987, 187 p. (in Russian)

3. Kobashi K., Yokota Y. R&D of diamond films in kobe steel. *Proc of the Sixth Applied Diamond Conference/Second*

Frontier Carbon Technology Joint Conference (ADC/FCT 2001), 2001, pp. 24-30.

4. Han S.K., McClure M.T., Wolden C.A., Vlahovic B., Soldi A., Sitar S. Fabrication and testing of a microstrip particle detector based on highly oriented diamond films. *Diamond & Related Materials*, 2000, vol. 9, pp. 1008-1012.

5. Dovgan' A.N., Kolesnik V.P. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2008, iss. 8, pp. 21-25. (in Russian)

6. Kostin Ye.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Matyash I.Ye., Serdega B.K., Savinkov G.K., Burdin V.V. *Zbirnyk anotatsii "Ukrains'ka konferentsiya z fizyky plazmy i KTS-2011"*, Ukraine, Kyiv, 2011, p. 37. (in Ukrainian)

7. Kaldanov V.A. *Issledovanie istochnikov neravnovesnoi plazmy na osnove SVCh razryadov, prednaznachennykh dlya osazhdeniyaalmaznykh plenok*. Dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. [Investigation of non-equilibrium plasma sources based on microwave discharges intended for deposition of diamond films. Doct. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2006. (in Russian)

8. Kuskova N.I., Baklar' V.Yu. *Mater. of XIV intern. konfer. "Fizika impul'snykh razryadov v kondensirovanykh sredakh"*. Ukraine. Nikolaev, 2009, p. 73. (in Russian)

9. Pashnev V.K., Strel'nitskii V.E., Opalev. O.A., Gritsyna V.I., Vyrovets I.I., Bizyukov Yu.A., Bryk V.V., Kolupaeva Z.I. *Physical Surface Engineering*, 2003, vol. 1, no 1, pp. 49-55. (in Russian)

10. Yacaman M. J., Yoshida, M. M., Rendon, R., Santiesteban J. G. Catalytic growth of carbon microtubules with fullerene structure. *Applied Physics Letters*, 1993, vol. 62, pp. 202-204.

11. Sypchenko I.A. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktivnykh letatel'nykh apparatov*. Kharkov, KhAI, 2010, iss. 3, pp. 296-303. (in Russian)

12. Rudchenko S.O., Pukha V.E., Starykov V.V. *Visnyk V. N. Karazin Kharkiv National University*, N 1019, ser. "Fizika", 2012, iss. 16, pp. 89-93. (in Russian)

13. Cherepanov V.A., Zolkin A.S., Kolesov K.T., Murzakhmetov K.T., Semenov V.N. [Diamond-like film on the granular silicon produced by combustion of acetylene] Available at: <http://psj.nsu.ru/articles/paper5.html> (in Russian)

14. *Fizicheskii entsiklopedicheskii slovar'*. Tom. 1. [Physical encyclopedic dictionary Vol. 1]. Ed. by N. N. Andreeva et al. Moscow, 1960. (in Russian)

15. Jackman R. B., Beckman J., Foord J. S. The growth of nucleation layers for high-quality diamond CVD from an r.f. plasma. *Diamond and Related Materials*, 1995, vol. 4, iss. 5-6, pp. 735-739.

16. Reineck I., Sjostrand M. E., Karner J., Pedrazzini M. Diamond coated cutting tools. *Int. J. of Refractory metals and Hard materials*, 1996, vol. 14, pp. 187-193.

17. Grotjohn T. A., Asmussen J. Microwave plasma-assisted diamond film deposition. Ch. 7 in book *Diamond films handbook*. Ed. by J. Asmussen, D. Reinhard. New York, USA, Marcel Dekker, Inc., 2002, pp. 211-300.

18. Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Opalev. O.A., Reshetnyak E.N., Strel'nitskii V.E. *Physical Surface Engineering*, 2010, vol. 8, no 1, pp. 4-19. (in Russian)

19. Verevkin A.A., Vyrovets I.I., Gritsyna V.I., Dudnik S.F., Kutny V.E., Opalev O.A., Rybka A.S., Strel'nitskij V.E. *Problems of atomic science and technology*, 2010, no 1, pp. 104-107 (in Russian)

20. Maksymenko L.S., Mishchuk O.N., Matyash I.E., Serdega B.K., Kostin E.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Savinkov G.K. [Modulation polarimetry of full internal reflection, broken by diamond-like films]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi aparature*, 2013, no 1, pp. 3-8. (in Russian)

21. Kostin E.G., Polozov B.P., Fedorovich O.A., Matyash I.E., Serdega B.K., Savinkov G.K. *Proc. of the 13th International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2012, p. 247. (in Russian)

22. Koshkin N.I., Shirkevich M.G. *Spravochnik po elementarnoi fizike* [Handbook of elementary physics]. Moscow, Nauka, 1966, 248 p. (in Russian)

23. Khodin A., Lee Joong-Kee, Kim Chang-Sam, Kim Sang-Ok. Amorphous nanocrystalline silicon plasma enhanced CVD grown on porous alumina substrate. *Proc. of the 9th IEEE Conference on Nanotechnology*, Italy, Genoa, 2009, pp. 540-542.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматизації та автоматизації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014.

Книга присвячена основним принципам побудови систем автоматичного регулювання та керування. Висвітлено основні етапи розвитку техніки автоматизації. Розглянуто функційне призначення і наведено статичні та динамічні характеристики елементів систем автоматичного регулювання і керування. Наведено класифікацію регуляторів за законами регулювання. Описано будову і роботу регуляторів прямої дії та ізодромних регуляторів, основні властивості об'єктів регулювання та їхній вплив на характер процесу регулювання, а також вплив властивостей автоматичного регулятора на характер перехідного процесу в САР. Наведено спрощені інженерні методи вибору автоматичних регуляторів і розрахунку їхніх параметрів налаштування.

Призначена для студентів вищих технічних навчальних закладів. Буде корисним інженерно-технічним працівникам, які займаються розробкою та впровадженням систем автоматичного регулювання та керування.



Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, д. т. н. И. П. ОСТРОВСКИЙ,
к. т. н. Ю. Н. ХОВЕРКО, Р. Н. КОРЕЦКИЙ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЭЛЕМЕНТЫ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОСНОВЕ КНИ-СТРУКТУР И НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ Si ДЛЯ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Представлены результаты исследования электрофизических свойств поликристаллических пленок кремния в структурах «кремний-на-изоляторе» и нитевидных кристаллов кремния в температурном диапазоне 4,2–70 К, полученные с помощью импедансных измерений в интервале частот от 10 Гц до 250 кГц. Показана возможность их использования в качестве элементов твердотельной электроники, работоспособных при криогенных температурах.

Ключевые слова: поликремний, нитевидный кристалл, КНИ-структура, диаграмма Найквиста.

В настоящее время в аэрокосмической технике, криоэлектронике и др. широко применяются высокочувствительные, быстродействующие устройства и компоненты твердотельной электроники (резонаторы, фильтры, линии задержки и др.), работоспособные в сложных условиях эксплуатации [1, 2]. Однако необходимость работы в условиях глубокого охлаждения и связанные с этим технические трудности их реализации резко ограничивают использование таких устройств. Перспективной элементной базой для таких приборов являются, в первую очередь, структуры «кремний-на-изоляторе» (КНИ), использование которых может обеспечить серийноспособную технологию изготовления микроэлектронных схем различного назначения [3]. С другой стороны, известно, что использование полупроводниковых нитевидных кристаллов (НК) при разработке ряда устройств позволяет расширить область их применения и на криоэлектронику [4, 5]. Для решения указанной проблемы создания компонентов электронных схем твердотельной электроники необходимо проведение физических исследований и высокий уровень технологического создания их элементной базы.

Одним из известных методов исследования структуры материала является метод импедансной спектроскопии [6], использование которого в ряде случаев позволяет разделить и определить вклады различных элементов микроструктуры в полную проводимость образца. С помощью данного метода можно получить дополнительную информацию об электрофизических свойствах материала, качественно и количественно оценить, какой вклад в его проводимость вносят размеры структуры, поверхности и межзеренных границ.

Целью настоящей работы является исследование электрофизических свойств поликристаллических пленок кремния в КНИ-структурах и нитевидных кристаллов Si при температурах от 4,2 до 70 К в частотном диапазоне 10 Гц – 250 кГц на предмет возможности их использования при создании устройств, которые могут работать в условиях криогенных температур.

Образцы для исследований и методика эксперимента

Объектом исследований служили тестовые элементы *p*-типа проводимости, легированные бором с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и микрокристаллы кремния с удельным сопротивлением $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Поликремниевые резисторы в КНИ-структуре имели размеры $80 \times 8 \times 0,5 \text{ мкм}$. Известно, что в микроэлектронике широко используются слои поликристаллического кремния на поверхности окисленной кремниевой пластины. Такие слои формируются, как правило, химическим осаждением из газовой фазы методом LPCVD [7].

Нитевидные кристаллы Si выращивали методом химических транспортных реакций в закрытой бромидной системе с использованием примесей бора и золота. Температура зоны источника составляла 1370 К, температура зоны кристаллизации – от 1070 до 1150 К. Диаметр НК составлял 1–40 мкм. Исследовались кристаллы с концентрацией акцепторной примеси на диэлектрической стороне перехода «металл – диэлектрик» $N_a < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [5].

Согласно результатам Холловских измерений концентрация носителей заряда составляла $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в образцах поликремния и $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ в нитевидных кристаллах. Электрические контакты создавались методом

импульсного сваривания по методике, обеспечивающей необходимую омичность контактов и описанной в [5]. Омичность полученных контактов была подтверждена линейностью вольт-амперных характеристик образцов, полученных в интервале температур 4,2–300 К.

В исследованиях использовался метод импедансной спектроскопии, при котором образец возбуждается малым синусоидальным сигналом. На основе полученных экспериментально частотных зависимостей Z'' и Z' (реактивная и активная составляющие сопротивления соответственно) предложены эквивалентные электрические схемы для анализа структуры образцов. Графическим отображением экспериментальных данных была зависимость $Z''(Z')$ или, другими словами, годограф импеданса (диаграмма Найквиста).

Экспериментальные результаты

Экспериментальные результаты исследования низкотемпературной проводимости поликристаллических пленок в КНИ-структурах и нитевидных кристаллов кремния позволили обнаружить ряд особенностей.

На рис. 1 представлена диаграмма Найквиста для мелкозернистых образцов с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Поликристаллический материал состоит из отдельных монокристаллов или зерен, которые представляют собой разупорядоченные области толщиной порядка нескольких атомных слоев и которые соединены между собой так называемыми границами зерен. Наличие этих границ приводит к качественному различию между электрическими свойствами поли- и монокристаллического материалов, которым нельзя пренебрегать. Известно, например, что в отличие от монокристаллического кремния, в поликри-

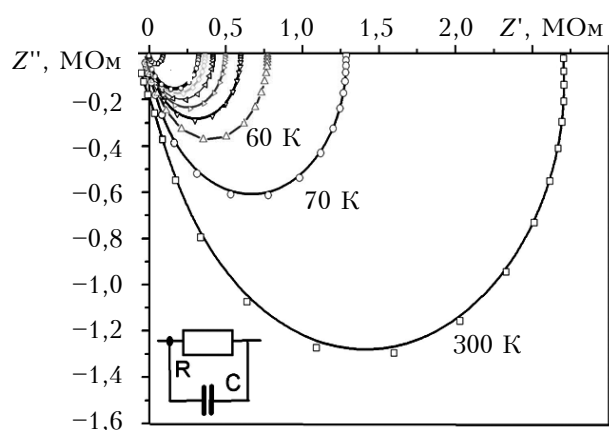


Рис. 1. Диаграмма Найквиста для нерекристаллизованных образцов поликремния в КНИ-структурах с концентрацией $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при различных значениях температуры — 300, 70, 60 К и ниже с шагом 10 К вплоть до 4,2 К (на вставке — эквивалентная схема проводимости такой структуры)

сталлических слоях подвижность электронов и дырок, а также время их жизни, малы. Это обусловлено наличием большого количества дефектов структуры, локализованных на межзеренных границах, которые являются центрами рассеяния и рекомбинации.

Анализ диаграмм Найквиста для мелкозернистых образцов указывает на емкостной характер их сопротивления [8]. Годограф импедансных зависимостей занимает отрицательную ветвь полуокружности [9, 10], что определяется наличием емкостей, которые обусловлены аккумуляцией заряда на дефектах межзеренных границ в поликремнии. Эти результаты согласуются с нашими предыдущими исследованиями, в которых было обнаружено проявление Моттовской проводимости ($\ln p \sim T^{-1/4}$) в низкотемпературной области [11]. Например, для мелкозернистых слоев поликремния с концентрацией носителей заряда $2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ наблюдалась характерная температурная зависимость, что с физической точки зрения можно объяснить наличием в образцах большого количества межзеренных границ.

Эквивалентная схема проводимости рассматриваемой структуры должна включать параллельное соединение конденсатора и резистора (рис. 1, вставка), в которой емкость замещает межзеренные границы, а сопротивление — объем зерна. Эти результаты хорошо анализировать на примере рассчитанных температурных зависимостей емкости. Как видно на рис. 2, в мелкозернистом образце емкость мала и возрастает вместе с температурой в интервале 4,2–300 К от 10 до 70 пФ, причем ее нарастание почти до 60 пФ происходит быстро — в интервале от 4,2 до 60 К с постепенным насыщением при дальнейшем нагревании. Мелкозернистые образцы содержат зерна малых размеров (порядка 30 нм), суммарное расстояние между которыми достаточно велико. Как следствие, межзеренная (барьерная) емкость относительно мала.

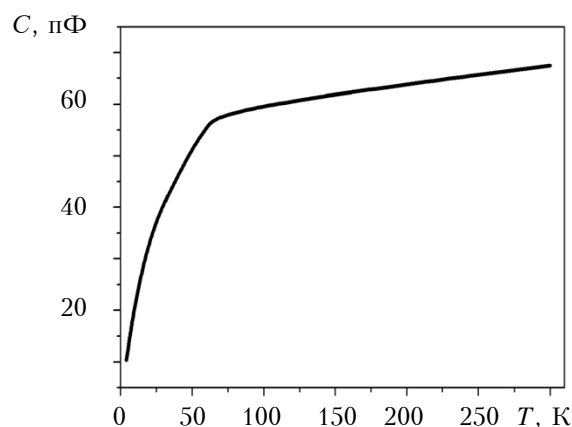


Рис. 2. Температурная зависимость емкости мелкозернистых образцов

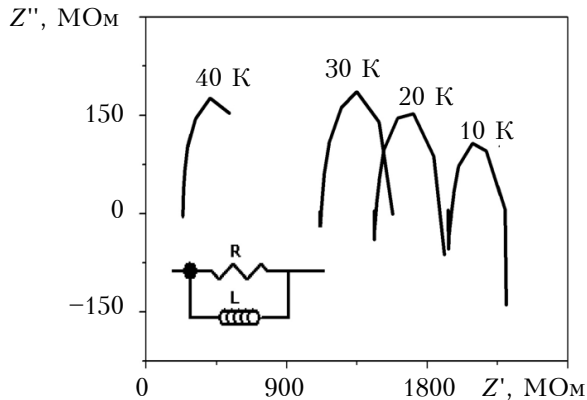


Рис. 3. Диаграмма Найквиста для нитевидных кристаллов Si ($\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $d = 30 \text{ мкм}$) при различных значениях температуры

Что касается полупроводниковых индуктивных элементов на основе нитевидных кристаллов Si p -типа проводимости, то они могут быть использованы в планарной технологии изготовления полупроводниковых аналогов катушек индуктивности в качестве элементов микросхем, которые изготавливаются в одном технологическом процессе. Представленные на рис. 3 диаграммы Найквиста для образцов с $\rho_{300\text{K}} = 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ указывают на индуктивный характер сопротивления в интервале температур 10–40 К (т. е. проявляется так называемый характер «отрицательной» емкости, что наблюдалось ранее при исследованиях [9, 10]). Это объясняется, вероятно, проявлением поверхностной проводимости при протекании переменного тока через нитевидный кристалл, вследствие чего наблюдается отставание тока относительно напряжения [12]. Следует отметить, что для таких образцов реактивная составляющая сопротивления имеет индуктивный характер и достигает наибольшего значения при 30 К. С повышением температуры такой характер Z'' проявляется в меньшей степени. Диапазон изменения индуктивности находится в пределах от 0,7 до 1,2 мГн.

Таким образом, полученные нами импедансные характеристики образцов позволяют прогнозировать возможность создания реактивных элементов твердотельной электроники определенных номиналов, работоспособных при низких температурах, на основе как поликристаллического, так и монокристаллического кремния.

Используя же комбинированный подход, можно реализовать на базе рассмотренных кремниевых элементов систему в виде колебательного контура (рис. 4, а). Для оценки параметров такой системы были выполнены расчеты на основе полученных экспериментальных данных.

Частота колебательного контура определяется следующим уравнением:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}},$$

где ω_0 — частота собственных колебаний;
 β — коэффициент затухания.

Комбинация элементов НК Si с легирующей примесью на диэлектрической стороне перехода «металл — диэлектрик», обеспечивающих индуктивность колебательного контура, с поликристаллическим кремнием в КНИ-структурах, который служит емкостным элементом такой системы, позволяет получить частотную зависимость выходного сигнала, которая показана на рис. 4, б. Резонансная частота колебательного контура равна 6,0 МГц; рассчитанная величина добротности данного контура составляет $Q=57,7$, что сопоставимо с добротностью известных LC-контуров.

Следует отметить, что характеристики разработанной системы зависят как от структуры образцов, так и от уровня их легирования, что позволяет изменять необходимые параметры элементов твердотельной электроники и систем на их основе в широких пределах.

Выводы

Результаты исследований электрофизических свойств поликристаллических пленок

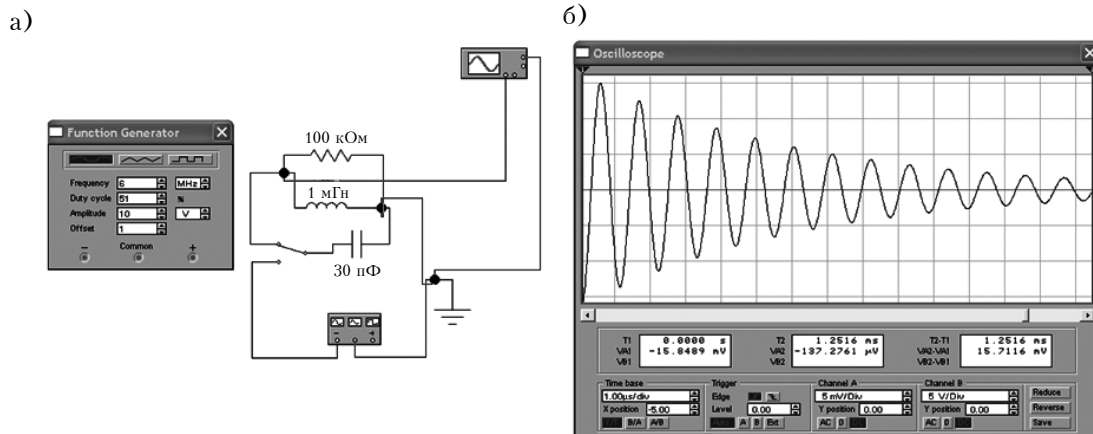


Рис. 4. Электрическая схема LC-контура (а) и его выходная характеристика (б) (слева от схемы — диалоговое окно изменения параметров задающего генератора)

кремнія в КНІ-структурах і нитевидних кристаллов Si при температурах от 4,2 до 70 К в частотном діапазоні 10 Гц — 250 кГц указывают на перспективність їх використання в качестве мікроелектронних компонентів інтегральних схем — как дискретних, например емкостей или индуктивностей, так и комбинированных, в частности колебательных контуров, работоспособных в условиях криогенных температур.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Claeys C., Simon E. Perspectives of silicon-on-insulator technologies for cryogenic electronics // In book: Perspectives, science and technologies for novel silicon on insulator devices. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2000. — Vol. 73. — P. 233–247.
2. Kamins T. Polycrystalline Silicon for Integrated Circuits and Displays. — Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1998.
3. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I. et al. Polysilicon-in-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields // In book: Science and technology of semiconductor-on-insulator structures and devices operating in a harsh environment. — Kluwer Academic Publ., Dordrecht. — Vol. 185. — 2005. — P. 297–302.
4. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M. et al. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing. — 2011. — Vol. 14, N 1. — P. 18–22. DOI: 10.1016/j.mssp.2010.12.012
5. Дружинін А.О., Островський І.П., Когут Ю.Р. Ниткоподібні кристали кремнію, германію та їх твер-

дих розчинів у сенсорній електроніці. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2010.

6. Григорчак І. І., Понеділок Г. В. Імпедансна спектроскопія. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2011.

7. Дружинін А. О., Когут І. Т., Ховерко Ю. М. Структури кремній-на-ізоляторі для сенсорної електроніки. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013.

8. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures // Physica Status Solidi (C). Vol. 11, N 1. — 2014. — P. 156–159.

9. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F. et al. Implications of the negative capacitance observed at forward bias in nanocomposite and polycrystalline solar cells // Nano Letters. — 2006. — Vol. 6, iss. 4. — P. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q

10. Impedance spectroscopy: theory, experiment and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. — New Jersey: Wiley-Interscience, 2005.

11. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors // Advanced Materials Research. — 2014. — Vol. 854. — P. 49–55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49

12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu. et al. Variable-range hopping conductance in Si whiskers // Phys. Status Solidi (A). — 2014. — Vol. 211, iss. 2. — P. 504–508. DOI: 10.1002/pssa.201300162

*Дата поступления рукописи
в редакцию 11.06 2013 г.*

А. О. ДРУЖИНІН, І. П. ОСТРОВСЬКИЙ, Ю. М. ХОВЕРКО, Р. М. КОРЕЦЬКИЙ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЕЛЕМЕНТИ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ КНІ-СТРУКТУР ТА НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ Si ДЛЯ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУР

Представлено результати дослідження електрофізичних властивостей полікристалічних плівок кремнію в структурах «кремній-на-ізоляторі» та ниткоподібних кристалів Si в температурному діапазоні 4,2–70 К, отримані за допомогою імпедансних вимірювань в діапазоні частот від 10 Гц до 250 кГц. Показано можливість їх використання як елементів твердотіЛЬНОЇ електроніки, працездатних при криогенних температурах. Отримані імпедансні характеристики зразків вказують на можливість створення реактивних елементів твердотіЛЬНОЇ електроніки певних номіналів, придатних для роботи в умовах низьких температур, на основі полікристалічного і монокристалічного кремнію. На основі встановлених залежностей запропоновано окремі елементи твердотіЛЬНОЇ електроніки у вигляді ємнісних і індуктивних елементів та комплексну систему у вигляді коливального контуру, які працездатні при криогенних температурах. Характеристики розробленої системи залежать як від структури зразків, так і від рівня їх легування, що дозволяє змінювати при необхідності параметри елементів в широких межах.

Ключові слова: полікремній, ниткоподібний кристал, КНІ-структура, діаграма Найквіста.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.46
UDC 625.315.592

A. A. DRUZHININ, I. P. OSROVSKII,
Yu. M. KHOVERKO, R. N. KORETSKY

Ukraine, National University «Lviv Polytechnic»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ELEMENTS OF SOLID STATE ELECTRONICS BASED ON SOI-STRUCTURES AND SI WHISKERS FOR CRYOGENIC TEMPERATURES

The paper presents the study results of electrical properties of polycrystalline silicon films in silicon-on-insulator structures and Si whiskers in the temperature range of 4.2–70 K obtained by impedance measurements in the frequency range from 10 Hz to 250 kHz and the possibility of their use in solid-state electronics, functioning at cryogenic temperatures. Characteristics of samples obtained with impedance measurements allow to predict certain specifications of reactive elements of solid state electronics based on polycrystalline and single crystalline silicon, operable at low temperatures. Using the established dependencies, separate elements in the form of solid-state electronics capacitive and inductive elements as well as a combined system in an oscillatory circuit, operable at cryogenic temperatures, have been suggested. The features of developed system depend on the structure of samples and their doping level, which allows to change the required parameters of the elements of solid state electronics in a wide range.

Keywords: polysilicon, whisker, SOI-structure, Nyquist diagram.

REFERENCES

1. Claeys C., Simon E. *Perspectives of silicon-on-insulator technologies for cryogenic electronics. In book: Perspectives, science and technologies for novel silicon on insulator devices* (Ed. by P.L.F. Hemment, V.S.Lysenko, A.N.Nazarov), Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 2000, vol. 73, pp.233-247.
2. Kamins T. *Polycrystalline silicon for integrated circuits and displays*. Dordrecht, Kluwer Academic Publ., 1998, p. 378.
3. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I., Pankov Yu., Khoverko Yu., Palewski T. *Polysilicon-in-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields. In book: Science and technology of semiconductor-on-insulator structures and devices operating in a harsh environment* (Ed. by D.Flandre, A.N. Nazarov, P.L.F.Hemment), Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, vol. 185, 2005, pp. 297-302.
4. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Khoverko Yu.M., Liakh-Kaguj N.S., Kogut Iu.R. Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures. *Materials science in semiconductor processing*, 2011, vol. 14, no 1, pp. 18-22. DOI: 10.1016/j.mssp.2010.12.012
5. Druzhinin A.A., Ostrovskii I.P., Kogut Iu.R. [Whiskers of silicon, germanium, and their solid solutions in the sensor electronics]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2010, 200 p. (in Ukrainian)
6. Grigorchak I.I., Ponedilok G.V. [Impedance spectroscopy]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2011, 352 p. (in Ukrainian)
7. Druzhinin A.A., Kogut Iu.R., Khoverko Yu.M. [Structure of silicon-on-insulator electronics for the sensor]. Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2013, 236 p. (in Ukrainian)
8. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Kogut Iu. Impedance spectroscopy of polysilicon in SOI structures. *Physica Status Solidi (C)*, 2014, vol. 11, no 1, pp. 156-159.
9. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F. et al. Implications of the negative capacitance observed at forward bias in nanocomposite and polycrystalline solar cells. *Nano Letters*, 2006, vol. 6, iss. 4, pp. 640-650. DOI: 10.1021/nl052295q
10. *Impedance spectroscopy: theory, experiment and applications* (Ed. by E.Barsoukov, J.R. Macdonald). New Jersey, Wiley-Interscience, 2005, 606 p.
11. Druzhinin A., Khoverko Yu., Kogut I., Koretskii R. Properties of low-dimensional polysilicon in SOI structures for low temperature sensors. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 854, pp. 49-55. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.854.49
12. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretskyy R., Kogut Iu. Variable-range hopping conductance in Si whiskers. *Phys. Status Solidi (A)*, 2014, vol. 211, iss. 2, pp. 504-508. DOI: 10.1002/pssa.201300162

Д. ф.-м. н. А. С. ГАРКАВЕНКО¹, д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ²,
к. т. н. О. В. БАНЗАК³, к. т. н. В. А. ЗАВАДСКИЙ⁴

¹Германия, г. Корнвестхайм, Фирма «Гайстескрафт»;

Украина, ²Одесский национальный политехнический университет; ³Одесская национальная академия связи имени А.С. Попова; ⁴Одесская национальная морская академия

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ИОНИЗАЦИОННЫЙ ОТЖИГ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛОВ. ЧАСТЬ ВТОРАЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ

При облучении полупроводниковых кристаллов мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий обнаружен новый вид отжига, названный авторами ионизационным. В данной статье описаны экспериментальные исследования, подтверждающие сделанное ранее теоретическое обоснование.

Ключевые слова: лазер, отжиг, электронный пучок.

До проведения исследований [1–3] существовало общепринятое представление, что облучение полупроводниковых кристаллов электронами высоких энергий (более 300 кэВ) приводит к значительному и необратимому ухудшению их электрофизических, оптических и структурных свойств [4, 5]. Действительно, в результате такого облучения в структуре полупроводниковых кристаллов возникают дефекты, которые в запрещенной зоне образуют ряд новых глубоких уровней и в свою очередь захватывают равновесные и неравновесные носители заряда. Вследствие этого концентрация и подвижность носителей уменьшаются, увеличивается сопротивление материала, уменьшается квантовый выход излучательной рекомбинации. Для облучения полупроводников обычно используются слаботочные ускорители электронов с непрерывным потоком, плотность тока в которых составляет $10^{-5}–10^{-6}$ А/см², энергия 0,3–1 МэВ. Все изменения свойств после такого облучения сохраняются при комнатной температуре, а заметное восстановление свойств до исходных значений наблюдается только после длительного нагревания кристаллов до высокой температуры. Например, в случае GaAs температура отжига дефектов составляет около 400°C [6].

В отличие от этого, в [1–3] наблюдалось улучшение структурных свойств полупроводниковых кристаллов (отжиг дефектов) при их облучении мощными (сильноточными) импульсными электронными пучками высоких энергий, и в [7] нами было приведено теоретическое обоснование этого эффекта. Настоящая статья посвящена описанию экспериментальных исследований влияния сильноточных импульсных электронных пучков на оптическую однородность полупроводниковых кристаллов GaAs и CdS, подтверждающих выдвинутую в [7] теорию.

Условия эксперимента

Исследовали массивные монокристаллы сульфида кадмия *n*-типа проводимости, выращенные методом сублимации в равновесных условиях или в условиях избытка паров серы или кадмия. Образцы арсенида галлия *n*- и *p*-типа получали методом жидкофазной эпитаксии в поле гамма-излучения или вырезали из массивных слитков вдоль оси их роста в виде плоскопараллельных пластин и полировали с обеих сторон (клиновидность пластин была не хуже 10''–20''). После этого поверхность образцов очищалась бомбардировкой ионами аргона с энергией около 20 кэВ в вакууме 10^{-8} Торр при температуре 200°C.

Толщину пластин (около 1 мм) выбирали с учетом того, что при ее увеличении уменьшается пропускание образца за счет увеличения поглощения и увеличиваются углы рассеяния лазерного излучения, обусловленного оптическими неоднородностями. Толщину образцов измеряли с помощью вертикального интерферометрического оптиметра (типа ИКВ) с набором оптических измерительных головок, обеспечивающих погрешность измерения не хуже 0,1–0,2 мкм.

В табл. 1 приведены параметры исследуемых образцов (N — равновесная концентрация носителей заряда, μ — подвижность, ρ — удельное сопротивление, Δn — разница между значениями показателя преломления образца и оптически однородного кристалла, N_d — плотность дислокаций, τ — время жизни излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда, его измеряли по методике, описанной в [8]).

Для облучения образцов использовался ускоритель ЭЛИТ-2 в импульсном режиме со следующими параметрами: энергия электронов $E_0 = 0,3–1$ МэВ, длительность импульса тока $t = 0,1–10$ нс, частота повторения импульсов $\Omega = 1–10$ Гц, плотность тока пучка $j = 20–300$ А/см² при его диаметре 8 мм.

Таблица 1

Электрофизические и оптические свойства образцов до облучения

№ образца	Материал образца	Δn	ρ , Ом·см	N , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	N_d , см ⁻²	τ , с
1	<i>n</i> -GaAs	$6,52 \cdot 10^{-4}$	$2,20 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{18}$	6351	$1,5 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^{-9}$
2	<i>n</i> -GaAs	$5,74 \cdot 10^{-4}$	$1,51 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{19}$	5523	$2,3 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
3	<i>p</i> -GaAs	$8,41 \cdot 10^{-5}$	$4,55 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{17}$	7634	$2,1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^{-9}$
4	<i>n</i> -CdS	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$3,70 \cdot 10^4$	$5,3 \cdot 10^{13}$	928	$7,3 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^{-9}$
5	<i>n</i> -CdS	$1,42 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^{15}$	419	$6,6 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^{-9}$
6	<i>n</i> -CdS	$3,53 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^{14}$	521	$4,3 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-9}$
7	<i>n</i> -CdS	$5,33 \cdot 10^{-5}$	$2,47 \cdot 10^3$	$2,08 \cdot 10^{14}$	532	$3,5 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^{-9}$

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Образцы GaAs были подвергнуты облучению при комнатной температуре ($T = 300$ К) импульсным электронным пучком с $j = 200 - 300$ А/см², $E_0 = 1$ МэВ, $t = 0,1 - 10$ нс и $\Omega = 10$ Гц. После этого проводились их электрофизические и оптические исследования, результаты которых приведены в табл. 2.

В кристаллах, обладающих проводимостью *n*-типа, изменение концентрации и подвижности носителей заряда было незначительным. Глубоких уровней, наблюдаемых обычно в арсениде галлия после таких больших доз облучения, выявлено не было. Скорость удаления электронов K была на два-три порядка меньше, чем в ранее известных случаях [4], и составляла $10^{-1} - 10^{-2}$ см⁻¹ ($K = \Delta N / \Phi$, где ΔN — концентрация неравновесных носителей заряда, возникающих при облучении образца возбуждающим

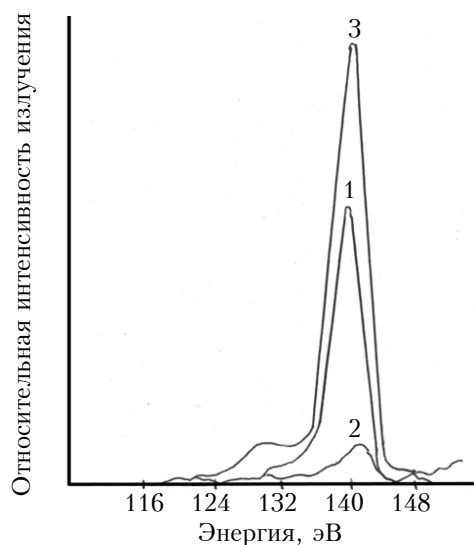
электронным пучком; Φ — интегральный поток (доза), флюенс электронов). Свойства кристаллов *p*-типа также изменялись слабо, однако скорость удаления дырок в них была больше — $0,3$ см⁻¹, что обусловлено различным уровнем легирования образцов *n*- и *p*-типа. Незначительное изменение электрофизических свойств исследованных образцов обоих типов проводимости, очевидно, связано с тем, что большая часть радиационных дефектов, которые возникают в кристаллах в процессе облучения, успевает отжечься за время импульса.

Наряду с этим оказалось, что после интенсивного облучения импульсным электронным пучком малой длительности существенно улучшились параметры катодолюминесценции (см. рисунок) и уменьшилось время жизни τ излучательной рекомбинации неравновесных носителей. Также улучшились структурные свойства исследуемого материала, что подтверждается исследовани-

Таблица 2

Электрофизические и оптические свойства образцов после их облучения импульсным электронным пучком

№ образца	Материал образца	Δn	ΔK	ΔN , см ⁻³	N , см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	τ , с	$\Delta N / N$, %
1	<i>n</i> -GaAs	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$0,1 \cdot 10^{18}$	$1,1 \cdot 10^{18}$	6532	$2,3 \cdot 10^{-9}$	0,09
2	<i>n</i> -GaAs	$2,10 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-2}$	$0,2 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{19}$	5727	$3,8 \cdot 10^{-9}$	0,15
3	<i>p</i> -GaAs	$7,50 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{17}$	$1,2 \cdot 10^{17}$	7841	$1,5 \cdot 10^{-9}$	0,08
4	<i>n</i> -CdS	$2,95 \cdot 10^{-6}$	$0,4 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{13}$	$5,1 \cdot 10^{13}$	1000	$3,3 \cdot 10^{-9}$	0,01
5	<i>n</i> -CdS	$0,24 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	$6,4 \cdot 10^{15}$	449	$2,1 \cdot 10^{-9}$	0,23
6	<i>n</i> -CdS	$2,80 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$0,6 \cdot 10^{14}$	$1,3 \cdot 10^{14}$	553	$4,7 \cdot 10^{-9}$	0,46
7	<i>n</i> -CdS	$2,45 \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{15}$	$4,2 \cdot 10^{15}$	500	$3,1 \cdot 10^{-9}$	0,30



Спектры катодолуминесценции, полученные при $T = 300$ К, для образцов n -GaAs с $N = 1,2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ до (1) и после (2, 3) облучения:

2 — непрерывное облучение ($\Phi = 1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, $j = 10^{-6} \text{ А/см}^2$, $E_0 = 800 \text{ кэВ}$); 3 — импульсное облучение ($\Phi = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, $j = 50 \text{ А/см}^2$, $E_0 = 800 \text{ кэВ}$)

ем оптической неоднородности, связанной с рассеянием и поглощением излучения на дефектах структуры (изменение показателей преломления Δn и поглощения ΔK). Измерения проводились по методике, приведенной в [8].

Поскольку полученные экспериментальные результаты отличались от данных других работ [3, 9, 10], согласно которым облучение GaAs электронами высоких энергий приводит к существенным необратимым изменениям электрофизических и оптических свойств, были проведены контрольные исследования: кристаллы GaAs облучали пучком электронов с плотностью тока $j = 1 \text{ мкА/см}^2$ и энергией $E = 1 \text{ МэВ}$ на слаботочном ускорителе «Электроника ЭЛУ-4» при комнатной температуре. Образцы были вырезаны из тех же слитков и приготовлены тем же самым образом, что и для облучения на ускорителе ЭЛИТ-2. После облучения дозой $10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, что на порядок меньше, чем на ускорителе ЭЛИТ-2, подвижность и концентрация носителей заряда резко уменьшились как у нелегированных, так и у легированных кристаллов. Скорость удаления носителей была велика и при дозе $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ составляла $3,5 \text{ см}^{-1}$ у легированных образцов. Были обнаружены глубокие уровни $E_c = 0,02 \text{ эВ}$ и $E_c = 0,09 \text{ эВ}$, наблюдаемые обычно при облучении таких структур. Подобно кристаллам с большим количеством дефектов, резко уменьшилась интенсивность катодолуминесценции (кривая 2 на рисунке). Хранение облученных образцов при комнатной температуре в течение нескольких дней не привело к каким-либо заметным изменениям их электрофизических и люминесцентных свойств.

Результаты контрольного исследования свидетельствуют о достоверности результатов облуче-

ния образцов сильноточными импульсными пучками, поскольку при слаботочном облучении таких же кристаллов их характеристики изменялись так, как и в других известных работах.

Обнаруженное улучшение свойств GaAs после облучения мощным импульсным потоком электронов высоких энергий можно, вероятно, объяснить следующим образом. В результате такого облучения резко возрастает плотность электронно-дырочной плазмы ($10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$), что обуславливает такие коллективные явления в кристалле, как экранирование электронно-дырочным облаком пар Френкеля (исходных и возникающих в процессе облучения) и экранирование валентных связей. Это, в свою очередь, приводит к резкому увеличению подвижности атомов решетки и к «залечиванию» точечных дефектов, т. е. к эффективному отжигу, что значительно улучшает структуру и оптическую однородность кристалла и находится в хорошем соответствии с теоретическим обоснованием процесса [1].

При облучении кристалла контролировалось его нагревание на протяжении импульса (по сдвигу длины волны катодолуминесценции, а также по фазовому сдвигу лазерного излучения, отраженного от исследуемого образца [11, 12]). Было установлено, что кристалл нагревается незначительно: на $80 - 100^\circ\text{C}$ при длительности импульса 10 нс и на $8 - 10^\circ\text{C}$ при длительности 1 нс . То есть, обнаруженный вид отжига является нетермическим и поэтому назван ионизационным.

В тех же условиях изучали кристаллы CdS. В них также было обнаружено улучшение электрофизических и оптических свойств (см. табл. 2). При этом, однако, механизм импульсного отжига в них, по-видимому, не такой, как в GaAs. Дело в том, что прочность кристаллической решетки CdS меньше, чем у GaAs, и это облегчает полиморфные превращения при невысоких сдвиговых напряжениях. Фазовый переход из основной гексагональной модификации с решеткой типа вюрцит в кубическую типа сфалерит ($\alpha\text{-CdS} \rightarrow \beta\text{-CdS}$) может быть стимулирован термоупругими напряжениями, которые при кратковременном воздействии мощных электронных пучков ($\Delta N = 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$) достигают значений $(1 - 2) \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, достаточных для начала процесса полиморфного превращения [13]. Результаты экспериментов показали, что в кристаллах CdS, толщина которых сравнима с глубиной проникновения электронов, произошли указанные фазовые переходы из α - в β -модификацию [13], что свидетельствует об ионизационном механизме отжига [3].

Теоретические оценки влияния интенсивного облучения на полупроводниковые материалы, описанные в [3, 7, 14, 15], хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными и позволяют допустить, что обнаруженные свойства кристаллов GaAs и CdS, облученных пучками быстрых электронов большой плотности, связаны собственно с высокой интенсив-

ностью электронного пучка. Так, при комнатной температуре при энергии возбуждающих электронов $E_0 = 700$ кэВ и плотности тока $j = 50$ А/см² скорость генерации электронно-дырочных пар в единице объема исследованных образцов составляет около 10^{28} см⁻³·с⁻¹, $\Delta N = 10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, $\tau \approx 10^{-9}$, что на 8 порядков больше, чем при облучении на слаботочном ускорителе при $j = 10^{-6}$ А/см². Также после такого облучения на 10 порядков становится выше скорость введения радиационных дефектов Френкеля, а их мгновенная плотность за время одного импульса составляет около 10^{17} см⁻³. При облучении на слаботочном ускорителе за то же время плотность возникающих дефектов составляет примерно 10^7 см⁻³.

В случае облучения образцов электронами с энергией $E_0 = 1$ МэВ и током $j = 100$ А/см² в течение 1 нс первичными дефектами в них являются неравновесные пары Френкеля. Вероятность протекания реакций аннигиляции или диссоциации такой пары зависит от энергии и импульса возникающей в процессе облучения неравновесной электронно-дырочной плазмы. Высокий уровень ионизации может изменить скорость такой реакции вследствие взаимодействия электронов и дырок не только друг с другом, но и с неравновесными дефектами [7]. При этом, как подтвердили представленные выше результаты экспериментов, происходит их эффективный отжиг. Вероятность возникновения устойчивого дефекта, обычно наблюдаемого при облучении на слаботочном ускорителе, при интенсивном облучении уменьшается до нуля. Высокий уровень ионизации может изменить зарядовое состояние не только радиационных дефектов, но и других несовершенств кристаллической решетки. Вследствие этого возможно изменение скорости различных реакций, которые протекают в облученном кристалле между радиационными дефектами и исходными нарушениями или примесями, поскольку сечение захвата дефекта этими нарушениями зависит от их зарядового состояния.

То обстоятельство, что наблюдаемые изменения свойств GaAs слабо зависят от типа проводимости, подчеркивает, что эти изменения определяются не исходной равновесной концентрацией носителей, а высоким уровнем возбуждения электронно-дырочных пар. Улучшение однородности материала в результате влияния радиации говорит о том, что в условиях облучения импульсным электронным пучком высокой интенсивности примесные атомы или более сложные комплексы (примесный атом + радиационный дефект) способны перемещаться по кристаллу. Сегодня существует ряд убедительных доказательств того, что изменение зарядового состояния примесных атомов увеличивает скорость их диффузии. Это приводит к заметному перемещению примесных атомов по кристаллу [6]. Поскольку диффузионная длина неравновесных носителей составляет 0,2–1 мкм и они могут перемещаться на рассто-

яния в сотни постоянных решетки, а расстояние между примесями и дефектами при их концентрации $10^{18} - 10^{19}$ см⁻³ составляет 10–15 постоянных решетки, экранирование химических связей значительно увеличивает подвижность этих несовершенств и приводит к «залечиванию» дефектов кристаллической решетки, увеличивая ее оптическую однородность.

Следует отметить, что обнаруженное явление было использовано для создания мощных полупроводниковых лазеров [16, 17]. Так, например, у лазеров на основе образцов *n*-GaAs с концентрацией электронов $(1-3) \cdot 10^{20}$ см⁻³ минимальная пороговая плотность тока составляла 3 А/см² при 300 К и 0,8–1 А/см² при 80 К, при этом КПД был вблизи своих предельных значений: 11–15% при 300 К и 25–30% при 80 К. Мощность излучения достигала 300–400 Вт.

Закключение

Проведенные исследования указывают на то, что предложенная авторами модель качественно объясняет новые и неожиданные физические результаты, полученные при облучении кристаллов GaAs и CdS мощным импульсным пучком электронов высоких энергий. Исследования в данном направлении целесообразно продолжить с точки зрения более детального понимания сложных механизмов взаимодействия мощного импульсного потока электронов высоких энергий с веществом, а также использования обнаруженных эффектов для создания мощных полупроводниковых лазеров.

Обнаруженное значительное улучшение свойств полупроводниковых соединений GaAs и CdS после облучения интенсивным импульсным пучком быстрых электронов является принципиально новым явлением. Оно расширяет существующие представления о взаимодействии потоков заряженных частиц высокой плотности и энергии с твердыми телами, в корне изменяет ранее установившиеся представления о том, что это взаимодействие необратимо ухудшает свойства полупроводниковых кристаллов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гаркавенко О. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Пашков А. С. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням. Т. 1. Механізм генерації. Властивості випромінювання. — Одеса: Поліграф, 2006.
2. Гаркавенко О. С., Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Відолоб В. В. Напівпровідникові лазери з електронним накачуванням. Т. 2. Активні середовища. Розробка приладів. — Одеса: Поліграф, 2006.
3. Гаркавенко А. С. Радиационная модификация физических свойств широкозонных полупроводников и создание на их основе лазеров большой мощности. — Львов: ЗУКЦ, 2012.
4. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — Москва: Наука, 1988.
5. Оцуки Ё.-Х. Взаимодействие заряженных частиц с твердыми телами. — Москва: Мир, 1985.

6. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. — Москва: Мир, 1974.

7. Гаркавенко А. С., Мокрицкий В. А., Банзак О. В., Завадский В. А. Ионизационный отжиг полупроводниковых кристаллов. Часть первая: Теоретические предпосылки // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 4. — С. 50–55. — DOI: 10.15222/TKEA2014.4.50

8. Гаркавенко А. С., Зубарев В. В., Ленков С. В. и др. Новые лазерные методы, средства и технологии. — Одесса: Астропринт, 2002.

9. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Перегудов Д. А., Тариелашвили Г. Т. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2002.

10. Ленков С. В., Мокрицкий В. А., Гаркавенко А. С. и др. Радиационное управление свойствами материалов и изделий опто- и микроэлектроники. — Одесса: Друк, 2003.

11. Гаркавенко А. С., Календин В. В., Мокрицкий В. А. Измерение температуры по фазовому сдвигу лазерного излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — № 4'1992–№ 1'1993. — С. 50–51.

12. Гаркавенко А. С. Лазерный интерференционный метод контроля температуры твердых тел // Матер. науч.-технич. конф. «Леотест-98»: Физические методы и средства контроля материалов и изделий. — Киев-Львов. — 1998. — С. 114–117.

13. Мокрицкий В. А., Ленков С. В., Гаркавенко О. С. та ін. Аналіз механізмів відпаду лазерних кристалів CdS // Зб. наук. праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. — 2011. — Вип. 33. — С. 96–98.

14. Гаркавенко А. С., Дмитриев А. И., Календин В. В., Левинский Б. Н. О возможности измерения времени релаксации за счет электронно-дырочного рассеяния в полупроводниках при высоком уровне возбуждения // Квантовая электроника. — Киев: Наукова думка, 1989. — № 36. — С. 58–60.

15. Гаркавенко А. С., Гатало М. С., Левинский Б. Н. Расчет времени релаксации за счет электронно-дырочного рассеяния в сильно возбужденной плазме полупроводников // Физическая электроника. — 1990. — Вып. 41. — С. 46–48.

16. Гаркавенко А. С. Смена механизмов излучения в лазерах с электронной накачкой на основе оптически однородных, радиационно легированных кристаллов GaAs // Зб. наук. праць Військового інституту КНУ ім. Т. Шевченка. — 2011. — Вип. 32. — С. 15–21.

17. Гаркавенко А. С. Тонкая структура спектров лазерного излучения при электронной накачке радиационно модифицированных оптически однородных нелегированных кристаллов GaAs // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 5. — С. 27–30.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 15.12.2013 г.*

О. С. ГАРКАВЕНКО¹, В. А. МОКРИЦЬКИЙ²,
О. В. БАНЗАК³, В. О. ЗАВАДСЬКИЙ⁴

¹Німеччина, м. Корнвестхайм, Фірма «Гайстескрафт»;

²Україна, Одеський національний політехнічний університет;

³Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова;

⁴Одеська національна морська академія

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

ІОНІЗАЦІЙНИЙ ВІДПАЛ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КРИСТАЛІВ. ЧАСТИНА ДРУГА: ЕКСПЕРИМЕНТ

При опроміненні напівпровідникових кристалів потужними (сильнострумовими) імпульсними електронними пучками високих енергій виявлено новий вид відпаду, названий авторами іонізаційним. У цій статті наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують зроблене раніше теоретичне обґрунтування.

Ключові слова: лазер, відпал, електронний пучок.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.51
UDC 535.14:621.365.826

A. S. GARKAVENKO¹, V. A. MOKRITSKIY²,
O. V. BANZAK³, V. A. ZAVADSKIY⁴

¹Germany, Kornwestheim, Wissenschaftliche Vereinigung «Geisteskraft»;

²Ukraine, Odessa National Polytechnic University;

³A. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications;

⁴Odessa National Maritime Academy

E-mail: garks@arcor.de; mokrickiy@mail.ru

IONIZATION ANNEALING OF SEMICONDUCTOR CRYSTALS. PART TWO: THE EXPERIMENT

There is a conception that irradiation of semiconductor crystals with high energy electrons (300 keV) results in a significant and irreversible deterioration of their electrical, optical and structural properties.

Semiconductors are typically irradiated by low voltage electron accelerators with a continuous flow, the current density in such accelerators is $10^{-5} - 10^{-6}$ A/cm², the energy – 0,3–1 MeV. All changes in the properties after such irradiation are resistant at room temperature, and marked properties recovery to baseline values is observed only after prolonged heating of the crystals to a high temperature. In contrast, the authors in their studies observe an improvement of the structural properties of semiconductor crystals (annealing of defects) under irradiation with powerful (high current) pulsed electron beams of high energy ($E_0 = 0,3^{-1}$ MeV, $t = 0,1 - 10$ ns, $\Omega = 1 - 10$ Hz, $j = 20 - 300$ A/cm²). In their previous paper, the authors presented theoretical basis of this effect. This article describes an experimental study on the influence of high-current pulsed electron beams on the optical homogeneity of semiconductor GaAs and CdS crystals, confirming the theory put forward earlier.

Keywords: laser, annealing, electron beam.

REFERENCES

1. Garkavenko O. S., Lyenkov S. V., Mokritskii V. A., Pashkov A. S. *Napivprovidnikovi lazeri z elektronnim nakachuvannyam. Vol. 1. Mekhanizm generatsiyi. Vlastivosti viprominyuvannya* [Semiconductor laser with electronic pumping. Volume 1. The mechanism of generation. Properties of radiation]. Odesa, Poligraf, 2006, 434 p. (in Ukrainian)
2. Garkavenko O. S., Lyenkov S. V., Mokritskii V. A., Vidolob V. V. *Napivprovidnikovi lazeri z elektronnim nakachuvannyam. Vol. 2. Aktivni seredovishcha. Rozrobka priladiv* [Semiconductor laser with electronic pumping. Vol. 2. The active environment. Development of devices]. Odesa, Poligraf, 2006, 434 p. (in Ukrainian)
3. Garkavenko A. S. *Radiatsionnaya modifikatsiya fizicheskikh svoystv shirokopolosnykh poluprovodnikov i sozdanie na ikh osnove lazerov bol'shoi moshchnosti* [Radiation modification of the physical properties of wide bandgap semiconductors and creation on their basis of high-power lasers]. Lvov, ZUKTs, 2012, 258 p. (in Russian)
4. Vavilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. *Deistvie izlucheniya na poluprovodniki* [Effect of radiation on semiconductors]. Moscow, Nauka, 1988, 173 p. (in Russian)
5. Ohtsuki Yoshi-Hiko. *Charged beam interaction with solids*. USA, Canada, Taylor & Francis, 1983, 248 p.
6. Matore H. F. *Defect electronics in semiconductors*. John Wiley & Sons Inc., 1971, 627 p.
7. Garkavenko A. S., Mokritskii V. A., Banzak O. V., Zavadskii V. A. Ionization annealing of semiconductor crystals. Part one: theoretical background. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no 4, pp. 50-55. DOI: 10.15222/TKEA2014.4.50 (in Russian)
8. Garkavenko A. S., Zubarev V. V., Lenkov S. V. et al. *Novye lazernye metody, sredstva i tekhnologii* [New laser techniques, equipment and technologies]. Odessa, Astroprint, 2002, 280 p. (in Russian)
9. Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Peregodov D. A., Tarelashvili G. T. *Fiziko-tekhicheskie osnovy radiatsionnoi tekhnologii poluprovodnikov* [Physical and technical bases of semiconductor radiation technology]. Odessa, Astroprint, 2002, 296 p. (in Russian)
10. Lenkov S. V., Mokritskii V. A., Garkavenko A. S. et al. *Radiatsionnoye upravleniye svoystvami materialov i izdeliy opto- i mikroelektroniki* [Radiation properties control of materials and products of opto- and microelectronics]. Odessa, Druk, 2003, 345 p. (in Russian)
11. Garkavenko A. S., Kalendin V. V., Mokritskii V. A. [Temperature measurement via phase shift of laser radiation] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, no 4'1992 – 1'1993, pp. 50-51 (in Russian)
12. Garkavenko A. S. [The laser interference method of temperature control of solids] *Mater. of scientific-tech. conf. "Leotest-98": Physical methods and control of materials and products*. Kiev, Lvov, 1998, pp. 114-117. (in Russian)
13. Mokritskii V.A., Lenkov S.V., Garkavenko O.S., Zavadskii V.A., Banzak O.V. [Analysis of the mechanisms of laser annealing CdS crystals] *Collection of Scientific Papers of the Military Institute*, Ukraine, Kiev, 2011, iss. 33, pp. 96-98. (in Ukrainian)
14. Garkavenko A. S., Dmitriev A. I., Kalendin V. V., Levinskii B. N. [About possibility of measuring the relaxation time due to electron-hole scattering in semiconductors at high excitation level] *Kvantovaya elektronika*, Kiev, Naukova dumka, 1989, iss. 36, pp. 58-60. (in Russian)
15. Garkavenko A. S., Gatalo M. S., Levinskii B. N. [Calculation of the relaxation time due to electron-hole scattering in highly excited plasma in semiconductors]. *Fizicheskaya elektronika*, 1990, iss. 41, pp. 46-48. (in Russian)
16. Garkavenko A. S. [Change of emission mechanisms in e-pumped lasers based on optically homogeneous, radiation-doped GaAs crystals]. *Collection of Scientific Papers of the Military Institute*, Ukraine, Kiev, iss. 32, pp. 15-21. (in Russian)
17. Garkavenko A. S. [Fine structure of laser spectrum at electron-beam pumping based on radiation-modified optically homogeneous crystals of undoped GaAs]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2011, no 5, pp. 27- 30. (in Russian)

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШЕВ¹, д. ф.-м. н. О. А. КУЛИНИЧ²,
Г. И. БРУСЕНСКАЯ², А. В. ВЕРЕМЬЕВА¹

Украина, ¹Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова,

²Одесский национальный экономический университет

E-mail: kurmash12@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ КРЕМНИЕВЫХ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ

Исследована возможность повышения радиационной устойчивости кремниевых эпитаксиальных слоев за счет создания стоков радиационных дефектов в виде дислокационных сеток плотностью $10^9 - 10^{12} \text{ м}^{-2}$. Такие сетки создаются перед нанесением эпитаксиального слоя на фронтальной поверхности кремниевой подложки путем предварительного ее окисления и последующего травливания слоя оксида. Показано, что в структурах, содержащих дислокационные сетки, в результате облучения уменьшаются в 5–8 раз обратные токи и в 5–10 раз плотность дефектов, а подвижность носителей заряда увеличивается в 1,2 раза. Выход годных для работы в условиях радиационного воздействия полупроводниковых структур, сформированных в оптимальном режиме, увеличивается на 7–10% в партии по сравнению со структурами без дислокационных сеток. Полученные результаты могут быть использованы в технологии изготовления радиационно стойких интегральных схем (биполярных, КМОП, Би-КМОП и др.).

Ключевые слова: эпитаксиальный кремний, дислокации, радиационные дефекты, сток дефектов, радиационная устойчивость.

При переходе от элементов электронной техники микронных и субмикронных размеров к наноразмерным структурам предъявляются повышенные требования к стабильности их параметров. Реализация современных требований к большинству классов радиоэлектронной аппаратуры может быть обеспечена только на основе применения радиационно стойкой элементной базы. В настоящее время основой для создания дискретных приборов и интегральных микросхем служат эпитаксиальные слои полупроводников. Часто при изготовлении полупроводниковых структур в качестве технологического средства для придания эпитаксиальным слоям необходимых свойств их подвергают радиационному облучению или ионизационному воздействию при ионной имплантации [1]. Радиационное воздействие и ионизирующее излучение также влияют на характеристики и параметры готовых полупроводниковых элементов в процессе их эксплуатации [2].

В зависимости от вида излучения в кристаллах формируются отдельные точечные дефекты или их конгломераты — области разупорядочения [3]. Обычно с целью устранения радиационных дефектов пластины кремния после облучения подвергают отжигу [4], во время которого происходит перемещение (сток) дефектов из объема кристалла в приповерхностную область [5]. Радиационная стойкость полупроводниковых приборов может быть повышена путем формирования в полупроводниковом кремниевом

эпитаксиальном слое стоков радиационных дефектов. В частности, это могут быть дислокации, наследуемые от подложки [6]. Однако полупроводниковые приборы, изготовленные этим методом, имеют значительное число остаточных радиационных дефектов в объеме и на поверхности эпитаксиального слоя, которые ухудшают электрические характеристики и параметры устройств. Стоками могут быть также геттерирующие покрытия [7].

Из известных способов повышения радиационной стойкости эпитаксиальных слоев кремния следует отметить метод, описанный в [8]. Он заключается в том, что на фронтальной поверхности полупроводниковой подложки, на которой затем выращивается эпитаксиальный слой, путем механической обработки создаются дислокации. Дислокации, имеющиеся в переходной области «слой — подложка», являются стоками радиационных дефектов, на которых аннигилируют диффундирующие из объема эпитаксиального слоя радиационные дефекты. Недостатками этого метода являются плохая технологическая воспроизводимость, нарушение структуры поверхности подложки и переходной области, а также ухудшение статистических параметров приборов (разброс параметров) и появление избыточных токов утечки.

Целью настоящей работы является изучение возможности повышения радиационной стойкости кремниевых эпитаксиальных слоев за счет создания на фронтальной поверхности кремни-

евои подложки стоков радиационных дефектов в виде дислокационных сеток до нанесения эпитаксиального слоя.

В основу метода положен механизм возникновения дислокационных сеток в приповерхностной области кремниевой подложки при ее термическом оксидировании [9]: на границе «Si — SiO₂» возникают деформации вследствие различия таких параметров контактирующих материалов, как постоянная кристаллической решетки и термический коэффициент расширения. В процессе формирования оксидных слоев в приповерхностных областях Si образуется сложная структура, состоящая из слоя разупорядоченного кремния с областями проникающего в него оксида, образованного при ускоренной диффузии кислорода вдоль структурных дефектов, и слоя кристаллического кремния, содержащего сетки дислокаций, период которых зависит от глубины залегания [10].

Методика эксперимента и технология

Для выявления структурных дефектов производилась обработка пластин кремния химическими избирательными дефект-контрастными травителями. Для травления пластин кремния с ориентацией (111) использовался травитель Сиртля состава HF:CrO₃ = 1:1. Для травления пластин и структур с ориентацией (100) использовался травитель Секко состава HF:K₂Cr₂O₇ = 2:1. Время травления составляло от 2 до 15 минут.

Изучение поверхности кремниевой подложки после химической обработки проводилось различными методами. Для оптических методов исследования использовали металлографический микроскоп ММР-2Р. Для электронной сканирующей микроскопии применяли микроскоп-анализатор Cam-Scan-4D с системой энергетического дисперсионного анализатора Link-860 и программой Zaf. Для Ожэ-спектроскопии использовали спектрометр LAS-3000.

Облучение образцов электронами проводилось в оптимальном режиме работы отечественного ускорителя «Электроника» (ЭЛУ-4), обеспечивающего энергию частиц от 2,3 до 3,0 МэВ дозами от 10¹⁵ до 10²⁰ м⁻².

Удельное сопротивление по глубине измеряли четырехзондовым методом при послойном химическом травлении слоев. Концентрация и подвижность носителей заряда измерялись по методу Ван-дер-Пау [11]. Электрофизические характеристики (обратные токи и др.) измеряли на характериографе TR-4805.

Технология получения образцов заключается в следующем. На фронтальной поверхности кремниевой подложки перед нанесением эпитаксиального слоя путем предварительного окисления поверхности подложки и последующего травления слоя оксида создавали область дислокационных сеток. Далее выращивали эпитаксиальный монокристаллический слой и соз-

давали полупроводниковые структуры по стандартной технологии.

В качестве подложек служили пластины монокристаллического кремния КЭФ-4.5 (111) и КДБ-10(100), выращенные методом Чохральского. Основными видами дефектов в исходной кремниевой пластине-подложке являются дислокации, дефекты слоистой неоднородности, кластерные скопления кислорода или избыточного кремния, дендриты металлов и двойниковые ламели [12].

Структуры SiO₂—Si изготавливали методом термического выращивания диоксида кремния в атмосфере влажного и сухого кислорода. Температурный диапазон оксидирования составлял 1000—1150°C. Толщина пленок SiO₂, которую определяли по времени выращивания (оксидирования) и эллипсометрическим методом, составляла 0,1—1,5 мкм. Далее слой диоксида кремния удаляли травлением в плавиковой кислоте.

Эпитаксиальные слои кремния на подложках получали методом жидкофазной эпитаксии путем кристаллизации в оптимальных условиях для раствора-расплава «полубесконечного» объема (метод принудительного охлаждения). В качестве металла-растворителя использовали олово. Эти слои подвергались облучению различными дозами электронов — от 5,0·10¹¹ до 5,0·10¹⁶ см⁻². Для контрольных экспериментов использовались также системы «слой — подложка» *n*—*p*-типа (характеристики подложки: проводимость *p*-типа, примесь — бор, толщина 250 мкм, удельное сопротивление около 10 Ом·см; эпитаксиального слоя: проводимость *n*-типа, примесь — фосфор, толщина около 16 мкм, удельное сопротивление 0,3 Ом·см; плотность дислокаций в слоях на уровне 10⁴—10⁵ см⁻²).

В эпитаксиальном кремнии имеется большое количество атомов примеси и структурных нарушений, затрудняющих исследование радиационных дефектов [13]. Образование дислокаций в эпитаксиальных слоях до облучения обусловлено, главным образом, наследованием аналогичных дефектов из подложки, несоответствием параметров кристаллических решеток слоя и подложки, термическими и механическими напряжениями, возникающими в процессе роста [14]. Степень наследования дислокаций слоем определяется их плотностью в подложке и условиями роста.

Для сравнения исследовались также структуры, изготовленные по стандартной технологии, т. е. без предварительного оксидирования кремниевой подложки. Изучали структуры на основе эпитаксиальных слоев кремния, образующих с монокристаллической подложкой *p*—*n*-переход. Использовали серийно выпускаемые структуры с эпитаксиальными слоями кремния 25-КЭФ-0.1 на подложке 400-КДБ-10.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что в структурах SiO_2 —Si имеется сильно разупорядоченный слой, близкий к мелкоблочному поликристаллическому кремнию, который находится непосредственно под диоксидом кремния. Толщина этого слоя пропорциональна толщине выращенного слоя SiO_2 , что объясняется возрастанием механических напряжений на границе раздела SiO_2 —Si при увеличении толщины диоксида кремния [15, 16].

При послойном сравнении слоев SiO_2 был обнаружен переход от разупорядоченного кремния к кристаллическому, границей которого служат дислокационные сетки. Они состоят из 60-градусных и частичных дислокаций, декорированных кислородом (рис. 1).

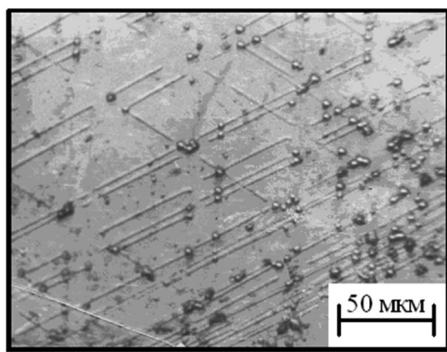


Рис. 1. Изображение дислокационной сетки в приповерхностной области Si в структуре SiO_2 —Si (КЭФ-4,5)

Слой дислокационных сеток образуется на границе системы «разупорядоченный кремний — кристаллический кремний». Глубину залегания дислокационных сеток оценивали с учетом того, что скорость избирательного травления составляет около 3 мкм/мин. При толщине диоксида кремния 1 мкм толщина слоя разупорядоченного кремния составляет примерно 20 мкм. За ним следует слой кремния с дислокационными сетками толщиной около 10 мкм. При дальнейшем травлении дислокационные сетки исчезали, трансформируясь в единичные дислокации или линии скольжения. Средний период дислокационной сетки составляет около 10^{-6} м; плотность дислокаций в сетках достигает 10^{12} м $^{-2}$.

Воздействие радиации на эпитаксиальные слои оценивали по изменению их электропроводности, концентрации и подвижности носителей заряда. Изучали вид, характер распределения и плотность радиационных дефектов, состояние переходной области в слоях. Исследовали эпитаксиальные слои с концентрацией носителей заряда до облучения $3 \cdot 10^{22}$ м $^{-3}$ (удельное сопротивление $\rho \approx 0,3$ Ом·см) при их однородном распределении по толщине. Облучение проводилось потоком электронов с энергией 2,3 МэВ. Толщина термически выращенного слоя SiO_2

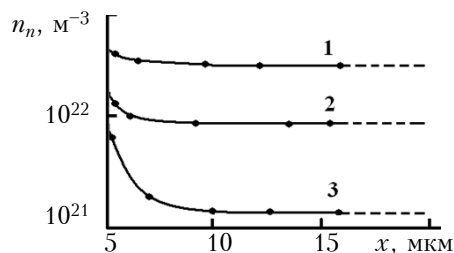


Рис. 2. Распределение основных носителей заряда по глубине эпитаксиального слоя кремния n -типа до облучения (1) и после облучения электронами с энергией 2,3 МэВ при дозе $1 \cdot 10^{20}$ м $^{-2}$ (2) и $5 \cdot 10^{20}$ м $^{-2}$ (3)

составляла 0,5 мкм, толщина эпитаксиального слоя кремния 16 мкм, площадь структур 1 мм 2 .

На рис. 2 приведено распределение основных носителей заряда по глубине эпитаксиального слоя n -типа при различных дозах облучения, где видно, что при возрастании дозы с $1 \cdot 10^{20}$ до $5 \cdot 10^{20}$ м $^{-2}$ концентрация электронов n_n в слое уменьшается (x — расстояние от границы раздела «подложка — эпитаксиальный слой»). Из приведенных зависимостей также можно заключить, что наличие дислокационных сеток приводит к неравномерному распределению носителей заряда по глубине эпитаксиального слоя и к уменьшению плотности радиационных дефектов в объеме эпитаксиальных слоев кремния. (Горизонтальные участки на этих графиках соответствуют тем областям, на которые дислокационные сетки практически не влияют, поэтому их можно рассматривать как распределение носителей заряда в структурах без дислокационных сеток.)

На рис. 3 представлена зависимость подвижности μ носителей заряда в эпитаксиальном слое кремния от дозы облучения Φ . Удельное сопротивление исходного образца составляло около 0,3 Ом·см, концентрация основных носителей заряда $n_n \approx 2,5 \cdot 10^{22}$ м $^{-3}$, подвижность элек-

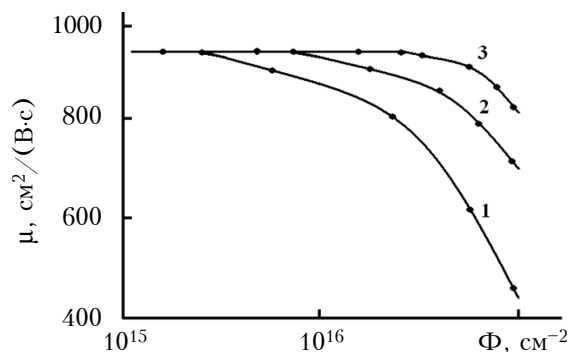


Рис. 3. Зависимость подвижности носителей заряда в эпитаксиальном слое кремния толщиной 16 мкм от дозы облучения электронами с энергий 2,3 МэВ для образцов с различной толщиной слоя SiO_2 (в мкм): 1 — 0,3; 2 — 0,6; 3 — 1,0

*Параметры структур, изготовленных по стандартной технологии
и с предварительным термическим окислением подложек
после облучения электронами с энергией 2,3 МэВ дозой 10^{20} м⁻²*

Технология изготовления структур	Параметры структур		
	Обратный ток, 10^8 А	Плотность дефектов, 10^5 см ⁻²	Подвижность (холловская), см ² /(В·с)
Стандартная	12,8	95	450
	4,5	8	634
	7,5	44	531
	6,9	33	592
	4,9	9	624
С предварительным окислением подложек	1,8	4,8	645
	0,5	0,4	824
	1,2	4,5	701
	0,54	0,5	803
	0,9	3,8	727

тронов $\mu \approx 990$ см²/(В·с). Здесь видно, что для структур с большей толщиной слоя SiO₂ начало спада подвижности приходится на большие дозы облучения.

Из приведенных в **таблице** данных видно, что при наличии в структурах стоков в виде дислокационных сеток в 5–8 раз уменьшается обратный ток, обусловленный наличием радиационных дефектов и дефектно-примесных комплексов в эпитаксиальном слое кремния, подвергнутом радиационному облучению. Такое снижение обратного тока свидетельствует о снижении активности генерационно-рекомбинационных процессов. Наблюдается также уменьшение разброса значений обратных токов. Предварительное окисление кремниевых подложек способствует также уменьшению в 5–10 раз плотности дефектов и увеличению в среднем в 1,2 раза подвижности носителей заряда.

Радиационные дефекты, взаимодействуя с атомами примеси, создают комплексы, уменьшающие концентрацию основных носителей заряда. Поскольку это равносильно снижению содержания легирующей примеси в эпитаксиальном слое, можно сказать, что радиационные центры компенсируют основную примесь. Благодаря этому и уменьшению подвижности основных носителей (см. рис. 2 и 3) увеличивается удельное сопротивление полупроводника. Изменение концентрации носителей заряда существенно зависит не только от исходного значения концентрации, но и от дозы облучения.

Установлено, что если в подложке созданы сетки дислокаций, то снижение концентрации носителей заряда в эпитаксиальном слое в результате облучения тормозится. Из рис. 2 следует, что описанный выше эффект компенсации вблизи границы «эпитаксиальный слой — подложка» проявляется слабо. Это, очевидно, свя-

зано с тем, что именно граничные слои с дислокационными сетками служат стоками для радиационных дефектов. Следует отметить, что создание дополнительных стоков в переходной области «слой — подложка» в виде дислокационных сеток позволяет управлять формой и положением профиля распределения носителей заряда в эпитаксиальных слоях кремния [8].

Отдельного рассмотрения требует определение оптимальной плотности дислокационных сеток. С одной стороны, чтобы стоки радиационных дефектов работали эффективно, необходима достаточная плотность дислокаций в сетке в исходной подложке. Однако при слишком большой их плотности большой будет и плотность собственных дефектов в эпитаксиальном слое (в результате наследования дефектов от подложки), что приводит к высокой степени отбраковки при изготовлении интегральных схем. Малая плотность дислокационных сеток (из-за малой плотности дислокаций в исходной подложке) приводит к снижению эффективности стоков для радиационных дефектов. Установлено, что оптимальная плотность дислокационных сеток лежит в пределах 10^9 – 10^{12} м⁻².

Плотность дислокационных сеток связана обратной зависимостью с их периодом, который зависит от величины механических напряжений и деформаций в данной области кристалла. То есть, параметры дислокационных сеток определяются условиями высокотемпературной диффузии кислорода, электрофизическими и упругими свойствами оксида кремния и самого кремния. Экспериментальные исследования показали, что при формировании полупроводниковых структур в оптимальном режиме выход годных для работы в условиях радиационного воздействия пластин в партии увеличивается на 7–10% по сравнению со структурами, изготовленными без сеток.

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что снижения плотности радиационных дефектов в эпитаксиальных слоях кремния можно добиться путем формирования стоков для них в виде дислокационных сеток на границе «эпитаксиальный слой — кремниевая подложка». Полученные результаты могут быть использованы в технологии изготовления радиационно стойких интегральных схем (биполярных, КМОП, Би-КМОП и др.).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ленков С.В., Мокрицкий В.А., Перегудова Д.А., Тариелашвили Г.Т. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников. — Одесса: Астропринт, 2002.
2. Челябинский А.Р., Комаров Ф.Ф. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии // Успехи физических наук. — 2003. — Т. 173, вып. 8. — С. 813–845. DOI: 10.3367/UFNr.0173.200308b.0813
3. Белоус А.И., Пилипенко В.А., Турцевич А.С., Шведов С.В. Мировые тенденции развития микроэлектроники и место республики Беларусь в этом процессе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 4. — С. 3–8.
4. Никифоров А.Ю., Телец В.А. Радиационная стойкость электронной компонентной базы систем специальной техники и связи // Спецтехника и связь. — 2011. — №4–5. — С. 1–4.
5. Talanin V.I., Talanin I.E.. Mechanism of formation and physical classification of the grown-in microdefects in semiconductor silicon // Defects and Diffusion. — 2004. — Vol. 230–232. — P. 177–198.

6. Гадияк Г.В. Диффузия бора и фосфора в кремнии при высокотемпературной ионной имплантации // ФТП. — 1997. — Т. 31, вып. 4. — С. 385–389.

7. Joao Justo. Dislocation in semiconductor: core structure and mobility // Defect and diffusion forum. — 2002. — Vol. 200–202. — P. 97–106.

8. Теория и практика жидкофазной эпитаксии и радиационной технологии полупроводников / Под ред. В.А. Мокрицкого. — Одесса: Астропринт, 2013.

9. Broudy R.M. The electrical Properties of Dislocation in Semiconductor // J. Adv. Phys. — 1983. — Vol. 16, iss. 46. — P. 135–184.

10. Сминтина В.А., Кулініч О.А., Глауберман М.А. та ін. Вплив дефектів на розподіл концентрації легуючої домішки та дефектоутворення при легуванні кремнію // Фізика і хімія твердого тіла. — 2007. — Т. 8, вып. 4. — С. 698–702.

11. Кулинич О.А. Механизм возникновения и свойства дефектов слоистой неоднородности в кремнии // Известия ВУЗов. Физика. — 2006. — Вып. 3. — С. 3–7.

12. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. — Москва: Радиоисвья, 1985.

13. Смытына В.А., Кулинич О.А., Яцунский И.Р., Марчук И.А. Роль пластической деформации в получении нанокремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — №. 1–2. — С. 22–24.

14. Pasquarello A. A., Hybertsen M., Car R. Structurally relaxed models of the Si(001) — SiO₂ interface // Appl. Phys. Lett. — 1996. — Vol. 68. — P. 625–631.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.04 2014 г.

Ш. Д. КУРМАШЕВ, О. А. КУЛІНІЧ, Г. І. БРУСЕНСЬКА, А. В. ВЕРЕМ'ЄВА

Україна, Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,
Одеський національний економічний університет

E-mail: kurmash12@gmail.com

ПІДВИЩЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ КРЕМНІЄВИХ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ ЕПІТАКСІЙНИХ ШАРІВ

Досліджено можливість підвищення радіаційної стійкості кремнієвих епітаксієвих шарів за рахунок створення стоків радіаційних дефектів у вигляді дислокаційних сіток щільністю 10^9 – 10^{12} м⁻². Такі сітки створюються на фронтальній поверхні кремнієвої підкладки перед нанесенням епітаксіального шару шляхом попереднього її окислення і подальшого травлювання шару оксиду. Показано, що в структурах з дислокаційними сітками після опромінення зменшуються в 5–8 разів зворотні струми та в 5–10 разів щільність дефектів, а рухливість носіїв заряду збільшується в 1,2 рази. Вихід придатних для роботи в умовах радіаційного впливу напівпровідникових структур, сформованих в оптимальному режимі, збільшується на 7–10% в партії порівняно зі структурами без дислокаційних сіток. Отримані результати можуть бути використані в технології виготовлення радіаційно стійких інтегральних схем (біполярних, КМОП, Бі-КМОП і ін.).

Ключові слова: епітаксієвий кремній, дислокації, радіаційні дефекти, сітка дефектів, радіаційна стійкість.

Ukraine, A. S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
Odessa national university of economics
E-mail: kurmask12@gmail.com

INCREASING THE RADIATION RESISTANCE OF SINGLE-CRYSTAL SILICON EPITAXIAL LAYERS

The authors investigate the possibility of increasing the radiation resistance of silicon epitaxial layers by creating radiation defects sinks in the form of dislocation networks of the density of $10^9 - 10^{12} \text{ m}^{-2}$. Such networks are created before the epitaxial layer is applied on the front surface of the silicon substrate by its preliminary oxidation and subsequent etching of the oxide layer. The substrates were silicon wafers KEF-4.5 and KDB-10 with a diameter of about 40 mm, grown by the Czochralski method. Irradiation of the samples was carried out using electron linear accelerator "Electronics" (ЭЛН-4). Energy of the particles was 2,3–3,0 MeV, radiation dose $10^{15} - 10^{20} \text{ m}^{-2}$, electron beam current 2 mA/m². It is shown that in structures containing dislocation networks, irradiation results in reduction of the reverse currents by 5–8 times and of the density of defects by 5–10 times, while the mobility of the charge carriers is increased by 1,2 times. Wafer yield for operation under radiation exposure, when the semiconductor structures are formed in the optimal mode, is increased by 7–10% compared to the structures without dislocation networks. The results obtained can be used in manufacturing technology for radiation-resistant integrated circuits (bipolar, CMOS, BiCMOS, etc.).

Keywords: epitaxial silicon, dislocation, radiation defects, defect sink, radiation resistance.

REFERENCES

1. Lenkov S.V., Mokritskii V.A., Perehudova D.A., Tarielashvili G.T. *Fiziko-tehnicheskie osnovy radiatsionnoi tekhnologii poluprovodnikov* [Physical and technical basics of radiation semiconductor technology]. Odessa, Astroprint, 2002, 300 p. (in Russian)
2. Chelyadinskii A. R., Komarov F. F. Defect-impurity engineering in implanted silicon. *Physics-USpekhi*, 2003, vol. 46, iss. 8, pp. 789-920. DOI: 10.1070/PU2003v046n08ABEH001371
3. Belous A. I., Pilipenko V. A., Turtsevich A. S., Shvedov S. V. [Global trends in microelectronics and place of Belarus in this process]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2012, no 4. pp. 3-8. (in Russian)
4. Nikiforov A.Yu., Telets V.A. [Electronic components radiation resistance systems of special equipment and communications]. *Spetsstekhnika i svyaz'*, 2011, no 4-5, pp. 1-4. (in Russian)
5. Talanin V.I., Talanin I.E.. Mechanism of formation and physical classification of the grown-in microdefects in semiconductor silicon. *Defects and Diffusion*, 2004, vol. 230-232, pp. 177-198.
6. Gadiyak G.V. Diffusion of boron and phosphorus in silicon at high temperature ion implantation. *Semiconductors*, 1997, vol. 31, iss. 4, pp. 385-389.
7. Joao Justo. Dislocation in semiconductor: Core Structure and mobility. *Defect and Diffusion Forum*, 2002, vol. 200-202, pp. 97-106.
8. *Teoriya i praktika zhidkofaznoi epitaksii i radiatsionnoi tekhnologii poluprovodnikov* [Theory and practice of liquid-phase epitaxy and radiation semiconductor technology]. Ed. by V.A. Mokritskii, Odessa: Astroprint, 2013, 320 p. (in Russian)
9. Broudy R.M. The electrical Properties of Dislocation in Semiconductor. *J. Adv. Phys.*, 1983, vol. 16, iss. 46, pp. 135–184.
10. Smintina V.A., Kulinich O.A., Glauberman M.A., Chemeresyuk G.G., Rogovs'ka E.T., Yatsuns'kii I.R. [Influence of defects on dopant concentration distribution and defect formation by doping silicon]. *Fizika i khimiya tverdogo tila*, 2007, vol. 8, iss. 4, pp. 698-702. (in Ukrainian)
11. Kulinich O.A. [The mechanism of occurrence and properties of defects in silicon layered inhomogeneity]. *Izvestiya VUZov. Fizika*, 2006, iss. 3, pp. 3-7. (in Russian)
12. Batavin V.V., Kontsevoi Yu.A., Fedorovich Yu.V. *Izmerenie parametrov poluprovodnikovykh materialov i struktur* [Measurement parameters of semiconductor materials and structures]. Moscow, Radioisv'az', 1985, 264 p. (in Russian)
13. Smyntyna V. A., Kulinich O. A., Yatsunkiy I. R., Marchuk I. A. [Plastic deformation in nanostructure silicon formation]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2011, iss. 1-2, pp 22-24. (in Russian)
14. Pasquarello A. A., Hybertsen M., Car R. Structurally relaxed models of the Si(001)–SiO₂ interface. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 68, pp. 625–631.

Д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ, д. т. н. О. В. МАСЛОВ, к. т. н. О. В. БАНЗАК

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: maslov.v.oleg@gmail.com

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Анализ опыта авторов в создании системы контроля состояния отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а именно глубины выгорания, начального обогащения и времени выдержки, проведен на основании измерений спектров собственного гамма-излучения ОЯТ. Система базируется на CdZnTe-детекторах, в которых реализованы условия однозарядового сбора. Предложена методика контроля выгорания ОЯТ в реальном времени при проведении технологических операций.

Ключевые слова: система контроля, глубина выгорания, ядерное топливо, гамма-излучение, CdZnTe, детектор.

Методам определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива (**ЯТ**) на основе измерения характеристик его собственного излучения посвящено большое количество работ, но в них, как правило, не учитывается, что при эксплуатации используется ядерное топливо с разной степенью начального обогащения и новые виды топлива [1–4]. Кроме того, известные методы зачастую плохо вписываются в существующую технологию транспортно-технологических операций перегрузки ЯТ и не пригодны для оперативного контроля [1].

Задача, которую поставили перед собой авторы в настоящей работе, заключается в том, чтобы описать все ключевые элементы разработанной системы определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива (**ОЯТ**) в одной статье, собрав в ней полученные ранее результаты, а также данные из технической документации на систему. Кроме этого, в настоящей статье проведен анализ различных видов обеспечения автоматизированных систем, отражающих специфику разработанной системы в соответствии с РД 50-34.698-90 «Автоматизированные системы. Требования к содержанию документов», а именно математического, методического, метрологического и обеспечения техническими средствами [5].

В качестве основного принципа построения системы контроля состояния ЯТ, в том числе системы определения глубины выгорания, в данной работе выбрано измерение спектров собственного гамма-излучения отработавшей тепловыделяющей сборки (**ТВС**). Оптимальным с точки зрения минимизации временных затрат является измерение гамма-спектров отработавшей **ТВС** (**ОТВС**) непосредственно в процессе перегрузки ЯТ, продолжительность которой регла-

ментирована достаточно жестко. В связи с этим операции по определению глубины выгорания ЯТ должны быть согласованы с временным графиком процесса перегрузки. Поэтому основным критерием при построении структуры системы определения глубины выгорания должна быть выбрана ее работоспособность в режиме реального времени [6]. Структурная схема системы, построенная в соответствии с этими требованиями, приведена на **рис. 1**.

Основным элементом системы, регистрирующим собственное гамма-излучение **ТВС**, является устройство, состоящее из ряда соответствующих детекторов. Собственно детектор является определяющим элементом при построении системы в целом, т. к. от него зависит выполнение таких требований, как качество измерений, массогабаритные параметры и надежность эксплуатации в реальных условиях на АЭС. Опыт авторов в разработке макета системы и применении детекторов позволил сделать вывод о том, что система должна базироваться на CdZnTe-детекторах, в которых реализованы условия однозарядового сбора [7, 8].

Основными измерительными параметрами детекторов, по которым оценивают их применимость в различных системах анализа и контроля, являются энергетическое разрешение, эффективность регистрации и аппаратный спектр в целом. Преимущества применения CdZnTe-детекторов определяются следующим [9]:

- большая плотность и высокий эффективный атомный номер материала детектора позволяют обеспечить эффективность регистрации;
- массогабаритные характеристики CdZnTe-детекторов таковы, что возможно высокоэффективное термоэлектрическое их охлаждение, а диапазон допустимых значений температуры позво-

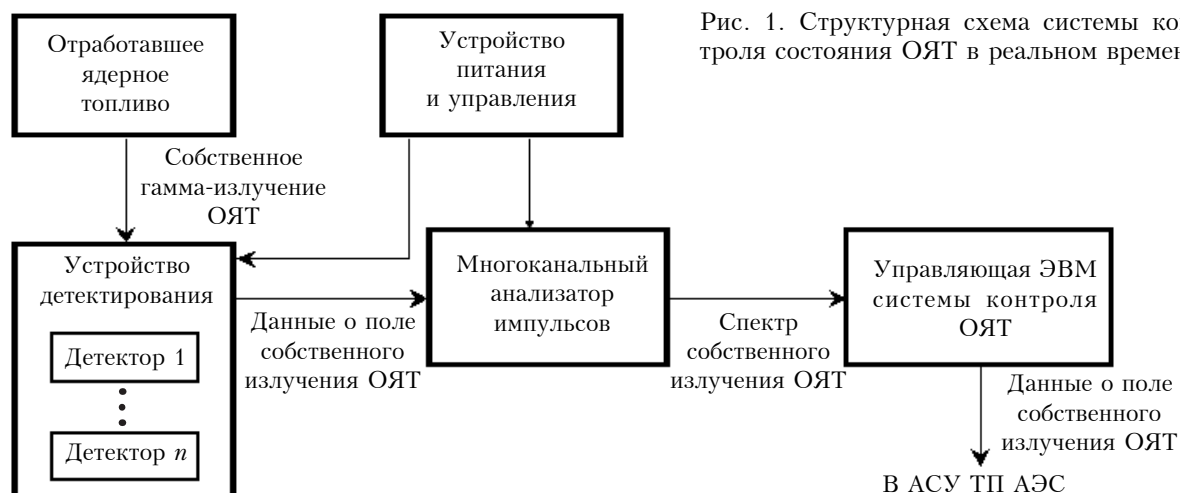


Рис. 1. Структурная схема системы контроля состояния ОЯТ в реальном времени

ляет обойтись без дополнительного охлаждения в отличие от традиционных детекторов;

— массогабаритные характеристики CdZnTe-детекторов позволяют найти эффективное решение по размещению их вблизи контролируемых объектов.

Кроме сказанного, немаловажным фактом в пользу применения CdZnTe-детекторов является также накопленный положительный опыт их использования.

Рассмотрим особенности CdZnTe-детекторов, связанные со значительными различиями в подвижности и времени жизни электронов и дырок. За счет низкой подвижности и малого времени жизни дырки захватываются очень быстро и поэтому никак не влияют на формирование полноэнергетического сигнала. В спектре гамма-излучения соответствующие импульсы вносят свой вклад только в бесполезный континуум ниже фотопика либо в «хвост» импульса низкой энергии, ухудшая энергетическое разрешение детектора. Для устранения этого недостатка используются различные способы. Один из них заключается в создании детекторов специальной геометрии, в которых реализуются условия однозарядового сбора. Например, в полусферических детекторах возможна компенсация сбора дырок путем такого изменения внутреннего поля, которое направлено на сбор электронов. Расширение катода за пределы вертикального края детектора вместе с одной из главных горизонтальных поверхностей и использование анода малой площади обеспечивает концентрацию линий электрического поля в области анода. Это дает соответствующее увеличение взвешенного потенциала данного объема. Электроны, генерированные во всем объеме детектора, благодаря своему относительно большому времени жизни могут переходить в области высокой напряженности электрического поля. Величина наведенного этим движением сигнала мала, однако когда электрон приближается к аноду, она возрастает пропорционально увеличивающейся напряженности электрического поля.

Дырки мигрируют в обратном направлении, но вносят гораздо меньший вклад в спектр. За счет слабой подвижности и небольшого времени жизни они быстрее захватываются. Кроме того, они движутся в периферической области детектора, где взвешенный потенциал мал, а значит, и наведенный сигнал тоже низок. Благодаря этому отношение пик/комpton для таких детекторов значительно выше, чем у плоскостных.

Другой важной особенностью всех CdZnTe-детекторов, обусловленной различием в подвижности носителей заряда, является форма импульса: фронт импульса на выходе CdZnTe-детектора существенно короче, чем, например, детектора на основе германия и, тем более, чем сцинтилляционного детектора. Эта особенность предопределяет особые требования к многоканальному амплитудному анализатору как на уровне встроенных в него аналоговых входных цепей, так и на уровне производительности АЦП [9].

Система из n детекторов, образующая устройство детектирования, должна регистрировать собственное излучение ОЯТ в процессе проведения транспортно-технологических операций с ТВС и преобразовывать его в электрические сигналы для последующей передачи на амплитудный анализатор. Многоканальный амплитудный анализатор осуществляет такие функции, как накопление, обработка и последующая передача на вычислительный и управляющий компьютер информации о распределении импульсов счета от детекторов по амплитудам, т. е. первичного (необработанного) гамма-спектра [1, 10].

Для построения системы контроля глубины выгорания ОЯТ в реальном времени были использованы следующие основные средства и принципы [11]:

- распределенные многодетекторные измерения с возможностью выделения групп измерительных каналов для резервирования;
- распределенный вычислительный комплекс с дублированием результатов измерения;
- отказоустойчивые средства вычислительной техники на основе промышленных компьютеров;

- объединение подсистем через локальную сеть на базе HDSL-технологии, позволяющей получать высокоскоростной цифровой доступ по витой паре;

- диагностика технических и программных средств;

- системность, открытость, совместимость, стандартизация, унификация и эффективность.

Разработанная система контроля глубины выгорания отработавшего ядерного топлива представляет собой программно-технический комплекс, состоящий из технических средств (рис. 2, 3), которые предназначены для решения следующих задач:

- определение характеристик собственно-го гамма-излучения ОЯТ (детекторы, анализаторы, ЭВМ);

- измерения при проведении транспортно-технологических операций с ядерным топливом на блоке АЭС (конструкции для детекторов, шкафы и крейты с оборудованием, блоки питания, кабели);

- обработка полученной информации о характеристиках полей излучения ядерного топлива (ЭВМ в пультовой перегрузочной машине и, частично, ЭВМ на перегрузочной машине);

- управление анализаторами, обработка спектров, определение глубины выгорания, организация связи между ЭВМ, представление полученной информации (программное обеспечение).

Функционирование разработанной системы обеспечено следующими основными ее блоками.

Устройство детектирования предназначено для регистрации гамма-излучения и преобразования его в электрические сигналы с последующей передачей в амплитудный анализатор. Оно включает в свой состав шесть CdZnTe-блоков детектирования (CdZnTe-детекторы).

Детектор размерами 100×Ø8 мм содержит кристалл CdZnTe и зарядочувствительный предварительный усилитель и представляет собой малогабаритное устройство, измеряющее гамма-излучение в диапазоне от 100 до 2500 кэВ. Водонепроницаемый корпус размерами 400×25×25 мм соединен с водонепроницаемым кабелем.

Многоканальный амплитудный анализатор импульсов (МАИ) dMCArgo предназначен для накопления, обработки и передачи в персональный компьютер информации о распределении по амплитудам импульсов, поступающих от блока детектирования. В состав анализатора входят модули питания предварительного усилителя и блок высоковольтного питания детектора. Анализатор выполнен в виде отдельной стандартной PCI-платы половинной длины. Для обеспечения выполнения требований к электромагнитной совместимости отдельные элементы защищены дополнительными металлическими экранами.

Связь с персональным компьютером для передачи накопленных спектров и приема команд

осуществляется по протоколу шины PCI, которая также используется для питания анализатора (5 В, 600 мА) и реализована на пассивной объединительной плате PCA-6114P10-B.

Анализатор импульсов dMCArgo состоит из аналоговых (электронные усилители) и цифровых (логические устройства, сигнальные процессоры и др.) элементов. Он проводит обработку сигнала, поступающего с предварительного усилителя, накопление спектра и его дальнейшую передачу в ЭВМ (по шине PCI). Особенность анализатора dMCArgo заключается в одновременном использовании трех сигнальных процессоров, что существенно повышает его загрузочную способность. Благодаря применению сигнальных процессоров, в анализаторе имеется возможность работы в режиме цифрового осциллографа. Также в анализатор встроены генератор импульсов, который может быть использован при проведении диагностики измерительных каналов системы. Анализатор обеспечивает выдачу питающего напряжения предусилителя (+12 В, 12 мА, -12 В) и высокого напряжения смещения детектора (до +600 В).

Измеренные спектры (без обработки) записываются на жесткий магнитный диск промышленного компьютера IPC-610.

Принцип действия, конструкция и параметры CdZnTe-датчиков для предлагаемой системы контроля разработаны авторами и подробно описаны в [9].

На основании проведенных авторами исследований предложена методика контроля глубины выгорания ОЯТ в реальном времени при проведении транспортно-технологических операций. Ее особенность заключается в том, что для проведения расчета не требуется величина начального обогащения и время выдержки топлива [1]. В соответствии с разработанной методикой, для расчета глубины выгорания ОЯТ необходимо последовательно провести ряд операций, связанных с измерениями и обработкой полученных результатов, а именно [13, 14]:

- определение времени выдержки с использованием отношения измеренной интенсивности гамма-излучения изотопов ^{137}Cs ($I(^{137}\text{Cs})$) к интегральной интенсивности гамма-излучения ($I(\text{ОЯТ})$);

- оценочный расчет глубины выгорания (BU) контролируемой ОТВС по изотопу ^{137}Cs и определение погрешности расчета ΔBU ;

- определение отношения интенсивностей гамма-излучения изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs к моменту остановки реактора на основании полученного значения времени выдержки;

- оценка начального обогащения ТВС на основании результатов оценочного расчета BU и отношения интенсивности гамма-излучения изотопов ^{134}Cs и ^{137}Cs , т. е. $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$, на момент остановки реактора;

- определение глубины выгорания контролируемой ОТВС с использованием отношения

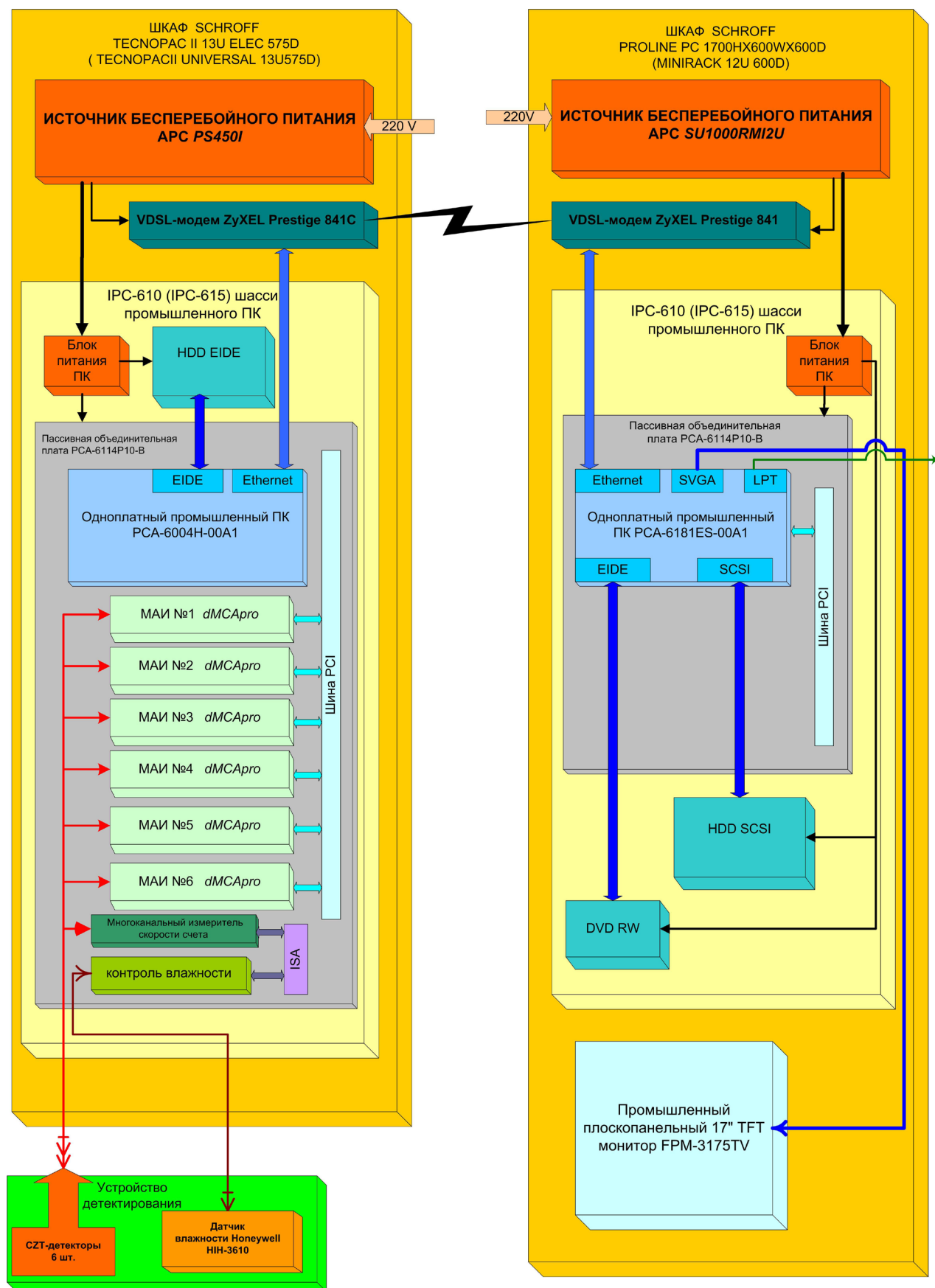


Рис. 2. Состав разработанной системы контроля глубины выгорания ОЯТ

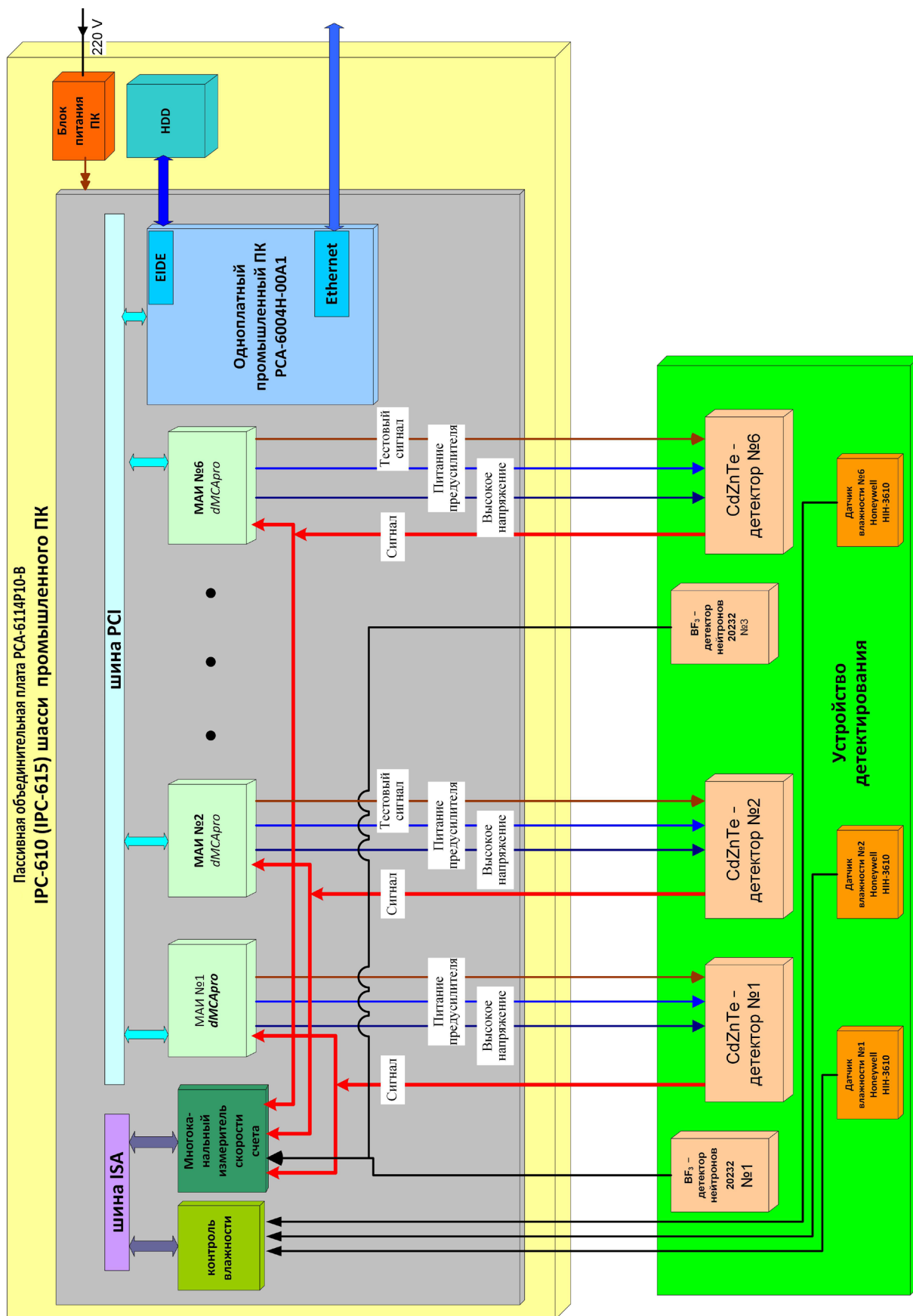


Рис. 3. Технические средства, устанавливаемые на перегрузочной машине

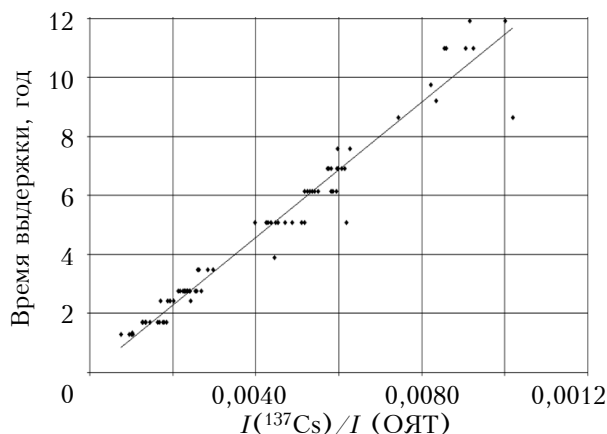


Рис. 4. Зависимость времени выдержки ОЯТ от отношения измеренной интенсивности γ -излучения изотопов ^{137}Cs к полной интенсивности собственного γ -излучения ОЯТ

$I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$ и значения начального обогащения;

— определение погрешности ΔBU полученного значения глубины выгорания контролируемой ОТВС.

На практике во всех известных методиках, в том числе и в описываемой, для определения глубины выгорания используются эмпирические зависимости, полученные на основании результатов измерений на АЭС. При этом часть ТВС принимается в качестве образцовых, а для построения градуировочной зависимости используются расчетные данные о глубине выгорания. Расчет может проводиться с применением более сложных программных средств, которые в практике эксплуатации АЭС не используются. Процедура проведения измерений для построения градуировочных зависимостей соответствует стандартной процедуре измерения собственного гамма-излучения ТВС при выполнении штатных транспортно-технологических операций с ядерным топливом.

В соответствии с вышесказанным, для контроля глубины выгорания ОЯТ в реальном времени были получены следующие зависимости:

— графическая зависимость времени выдержки ТВС от отношения измеренных интенсивностей гамма-излучения $I(^{137}\text{Cs})/I(\text{ОЯТ})$ (рис. 4);

— эмпирическая зависимость интенсивности гамма-излучения изотопа ^{137}Cs $I(^{137}\text{Cs})$ от глубины выгорания на момент остановки реактора для всех значений начального обогащения топлива: $I(^{137}\text{Cs})=(2,0917\pm0,167)BU$;

— набор однотипных эмпирических зависимостей отношения $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$ от глубины выгорания топлива на момент остановки реактора для различных значений начального обогащения (см. таблицу);

— спектр излучения ОТВС (рис. 5).

При таком подходе погрешность определения глубины выгорания определяется по сово-

Зависимость отношения $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$ от глубины выгорания топлива BU для различных значений его начального обогащения

Обогащение	Соотношение
1,6%; 2%	$I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})=(0,0608\pm0,0116)BU$
3%; 3,23%; 3,3%	$I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})=(0,0479\pm0,002)BU$
4,23%; 4,4%	$I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})=(0,0410\pm0,001)BU$

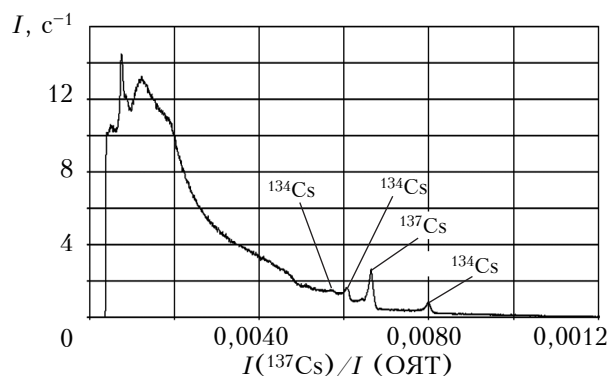


Рис. 5. Спектр излучения ОТВС с глубиной выгорания 43,41 МВт-сутки/кг, выдержкой 5,8 лет и обогащением 4,4%

купности оценок погрешностей, проведенных при градуировке системы в лаборатории, статистической погрешности измерений и погрешностей градуировочных зависимостей (оценка времени выдержки, обогащения и определение зависимости глубины выгорания от интенсивности $I(^{137}\text{Cs})$ и отношения $I(^{134}\text{Cs})/I(^{137}\text{Cs})$) [1, 13].

Погрешность градуировочных зависимостей определяется систематической погрешностью паспортного значения глубины выгорания используемых в качестве контрольных ОТВС и статистическими погрешностями измерений в процессе проведения градуировки. Погрешность градуировки (зависимости эффективности регистрации) не должна превышать 8%. При этом суммарная погрешность (статистическая, при градуировке) определения интенсивности в реальных условиях измерений на АЭС лежит в следующих пределах [11, 12]:

— от 8,78 до 17,3% (в основном 9,2%) для линии 661 кэВ ^{137}Cs ;

— от 10,6 до 36% (в основном 11,8%) для линии 604 кэВ ^{134}Cs ;

— от 9,2 до 36% (в основном 10,6%) для суммы линий 796 и 802 кэВ ^{134}Cs .

Суммарная погрешность отношения интенсивностей излучения изотопов цезия без учета снижения погрешности за счет уменьшения влияния погрешности эффективности регистрации может составлять от 13,24 до 29%, но в боль-

шинстве случаев это 14,5%. При учете указанного снижения погрешности (тогда компенсируются погрешности определения активности источника и времени) — от 7,94 до 29,0% и 9,91% в большинстве случаев.

Для статистической оценки предположения того, что совокупность экспериментальных данных незначительно отличается от полученных теоретически с использованием некоторого закона, необходимо провести исследование на такое соответствие. Это можно сделать при помощи, например, так называемого метода χ^2 , где в качестве меры отклонения экспериментальных точек от ожидаемых значений принимается сумма квадратов отклонений от предполагаемой зависимости [15].

Процедура использования метода χ^2 такова.

1. Выдвигается гипотеза о том, что зависимость глубины выгорания от отношения интенсивности гамма-излучения изотопов цезия для каждого значения обогащения определяется одним из выражений, приведенных в таблице.

2. Определяется значение χ^2 для каждой выборки исследуемых ТВС (выборка проводится для всех ТВС, имеющих одинаковое обогащение и загруженных в один энергоблок; таким образом, количество экспериментальных точек постоянно увеличивается). При этом для расчета χ^2 используется разность между ожидаемым (теоретическим) значением глубины выгорания и реальным.

3. Полученное значение χ^2 сравнивается с нормируемым табличным (обычно 0,95) для заданной доверительной вероятности. Если оно меньше нормируемого, то можно говорить о том, что при данном уровне доверительной вероятности принятая в качестве гипотезы зависимость хорошо описывает экспериментальные данные с погрешностью, не превышающей приведенные в таблице значения.

Вся указанная процедура может быть проведена повторно после удаления «промахов» (явных ошибок).

Значение параметра χ^2 определяется для различных значений обогащения и статистической погрешности измерения. Погрешность, согласно требований нормативных документов, должна быть не хуже 10%, и, соответственно, это значение используется в качестве основного. Реально достижимая погрешность измерений интенсивности гамма-излучения составляет 8%, поэтому статистическая проверка гипотезы о зависимости глубины выгорания от отношения интенсивности гамма-излучения изотопов цезия проводится и для этого значения погрешности.

Заключение

Приведенные выше результаты обобщают опыт, полученный при изготовлении макетного образца системы определения глубины выгорания ОЯТ и его апробации на Запорожской АЭС. При этом были выполнены измерения собствен-

ного гамма-излучения более 200 ТВС, а для более 70 из них измерения проводились повторно с интервалом около одного года.

При традиционной постановке задачи определения глубины выгорания отработавшего ядерного топлива спектрометрические измерения собственного гамма-излучения являются информационно избыточными, поскольку для решения задачи достаточно, например, измерений нейтронного потока. Однако при этом не учитывается то, что данные о времени выдержки и начальном обогащении ОЯТ предоставляются оператором реакторной установки. Таким образом, из трех характеристик, определяющих ядерную и радиационную безопасность, контролируется только одна. Описанная же в работе система позволяет определить все три указанные характеристики без использования дополнительной информации об эксплуатации контролируемого ядерного топлива. Построение такой системы стало возможным благодаря появлению новых детекторов на основе CdZnTe, созданию быстродействующих амплитудных анализаторов импульсов, ориентированных на применение CdZnTe-детекторов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Oleinik S.G., Maksimov M.V., Maslov O.V. Determination of the burnup of spent nuclear fuel during reloading // Atomic energy. — 2002. — Vol. 92, N 4. — P. 296–300. — DOI: 10.1023/A:1016593608146
2. Jansson P., Jacobsson S., Hekansson A., Bäcklin A. A device for nondestructive experimental determination of the power distribution in a nuclear fuel assembly // Nuclear Science and Engineering. — 2006. — Vol. 152, iss. 1. — P. 76–86
3. Croft S. A., Campbell L.W., Cheatham J.R. et al. Technical review of non-destructive assay research for the characterization of spent nuclear fuel assemblies being conducted under the US DOE NGSI // Waste Management Symposia WM2011. — Phoenix, Arizona, USA. — 2011. — LA-UR-10-08045, <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-10-08045>
4. Lebrun A., Merelli M., Szabo J.-L., Huver M., Arenas-Carrasco J. Smopy a new NDA tool for safeguards of LEU and MOX spent fuel // Symposium on international safeguards: Verification and nuclear material security, IAEA-SM-367. — Vienna, Austria. — 2001. — P. 280–281 (report IAEA-SM-367/14/03) http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/007/33007037.pdf
5. Федоров Ю.Н. Справочник инженера по АСУ ТП: Проектирование и разработка. — Москва: Инфра-Инженерия, 2008.
6. Маслов О.В., Максимов М.В., Олейник С.Г. Анализ возможностей применения однотипных технических средств и методического обеспечения для контроля состояния ядерного топлива и ядерных материалов в реальном времени // Известия Высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2004. — №1 — С. 87–97.
7. Мокрицкий В.А., Маслов О.В. Технико-экономические задачи эффективного контроля безопасности АЭС // Экономист. — 2011. — № 8. — С. 70–74.
8. Мокрицкий В.А., Ленков С.В., Маслов О.В., Савельев С.А. Обработка монокристаллов CdZnTe для применения в датчиках γ -излучения // Технология и кон-

струирование в электронной аппаратуре. — 2001. — №3. — С. 9—10.

9. Банзак О.В., Маслов О.В., Мокрицкий В.А. Полупроводниковые детекторы нового поколения для радиационного контроля и дозиметрии ионизирующих излучений. — Одесса: БМВ, 2013.

10. Oleinik S.G., Boltenev V.A., Maslov O.V. Passive computer tomography of nuclear fuel // Atomic Energy. — 2005. — Vol. 98, N 3. — P. 227—229. — DOI: 10.1007/s10512-005-0198-2

11. Маслов О.В. Технические средства и методическое обеспечение определения выгорания отработавшего ядерного топлива, распределения продуктов деления по сечению ТВС в процессе перегрузки // Тр. Одес. политехн. ун-та. — 2007. — Вып. 2 (28). — С. 65—71

12. Мокрицкий В.А., Маслов О.В., Банзак О.В. Методы определения выгорания на основе измерений характеристик собственного излучения отработавшего ядерного то-

плива // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. — 2013. — № 43. — С. 86—93.

13. Олейник С.Г., Сергеев С.В., Максимов М.В., Маслов О.В. Метрологическое обеспечение определения выгорания, времени выдержки и обогащения облученного ядерного топлива при проведении измерений в реальном времени // Ядерные измерительно-информационные технологии. — 2004. — № 3 (11). — С. 72—79.

14. Шараф М., Иллман Д.Л., Ковальски Б.Р. Хемомерика. — Ленинград: Химия, 1989.

15. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем: искусство и наука. — Москва: Мир, 1978.

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.05 2014 г.

Д. т. н. В. А. МОКРИЦЬКИЙ, д. т. н. О. В. МАСЛОВ, к. т. н. О. В. БАНЗАК
Україна, Одеський національний політехнічний університет
maslov.v.oleg@gmail.com

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ГЛИБИНИ ВИГОРЯННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Проведено аналіз досвіду авторів у створенні системи контролю стану відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), зокрема глибини вигорання, початкового збагачення і часу витримки, на основі вимірів спектрів власного гамма-випромінювання ВЯП. Основою такої системи є CdZnTe-детектори, у яких реалізовано умови однозарядового збору. Також запропоновано методику контролю вигорання ВЯП у реальному часі при проведенні технологічних операцій перевантаження ВЯП.

Ключові слова: система контролю, глибина вигорання, ядерне паливо, гамма-випромінювання, CdZnTe-детектор.

DOI: 10.15222/TKEA2014.2.63
UDC 531:535

V. A. MOKRITSKII, O. V. MASLOV, O. V. BANZAK
Ukraine, Odessa national polytechnic university
E-mail: maslov.v.oleg@gmail.com

AUTOMATED SYSTEM FOR DETERMINING THE BURNUP OF SPENT NUCLEAR FUEL

The authors analyze their experience in application of semi-conductor detectors and development of a breadboard model of the monitoring system for spent nuclear fuel (SNF). Such system should use CdZnTe-detectors in which one-charging gathering conditions are realized. The proposed technique of real time SNF control during reloading technological operations is based on the obtained research results.

Methods for determining the burnup of spent nuclear fuel based on measuring the characteristics of intrinsic radiation are covered in many papers, but those methods do not usually take into account that the nuclear fuel used during the operation has varying degrees of initial enrichment, or a new kind of fuel may be used.

Besides, the known methods often do not fit well into the existing technology of fuel loading operations and are not suitable for operational control.

Nuclear fuel monitoring (including burnup determination) system in this research is based on the measurement of the spectrum of natural gamma-radiation of irradiated fuel assemblies (IFA), as from the point of view of minimizing the time spent, the measurement of IFA gamma spectra directly during fuel loading is optimal.

It is the overload time that is regulated rather strictly, and burnup control operations should be coordinated with the schedule of the fuel loading. Therefore, the real time working capacity of the system should be chosen as the basic criterion when constructing the structure of such burnup control systems.

Keywords: monitoring system, burnup nuclear fuel, nuclear fuel, gamma-ray radiation, CdZnTe detector.

REFERENCES

1. Oleinik S.G., Maksimov M.V., Maslov O.V. Determination of the burnup of spent nuclear fuel during reloading. *Atomic Energy*, 2002, vol. 92, no 4, pp. 296-300. DOI: 10.1023/A:1016593608146
2. Jansson P., Jacobsson S., Hekansson A., Bäcklin A. A device for nondestructive experimental determination of the power distribution in a nuclear fuel assembly. *Nuclear Science and Engineering*, 2006, vol. 152, iss. 1, pp. 76-86.
3. Croft S. A., Campbell L.W., Cheatham J.R. et al. Technical review of non-destructive assay research for the characterization of spent nuclear fuel assemblies being conducted under the US DOE NGSF. *Waste Management Symposia WM2011*, Phoenix, Arizona, USA, 2011, LA-UR-10-08045, 29 p. <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-10-08045>
4. Lebrun A., Merelli M., Szabo J.-L., Huver M., Arenas-Carrasco J. Smopy a new NDA tool for safeguards of LEU and MOX spent fuel. In: *IAEA-SM-367, Symposium on international safeguards: Verification and nuclear material security*, Vienna, Austria, 2001, pp. 280-281 (report IAEA-SM-367/14/03).
5. Fedorov Yu.N. *Spravochnik inzhenera po ASU TP: Proektirovaniye i razrabotka* [Handbook of engineer APCS: Design and development]. Moscow, Infra-Inzheneriya, 2008, 928 p.
6. Maslov O.V., Maksimov M.V., Oleinik S.G. [Analysis of possibilities for the use of similar hardware and methodological support for the control of nuclear fuel and nuclear materials in real time]. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya energetika*, 2004, no 1, pp. 87-97. (in Russian)
7. Mokritskii V.A., Maslov O.V. [Technical and economic objectives of effective control of NPP safety]. *Ekonomist*, 2011, no 8, pp. 70-74. (in Russian)
8. Mokritskii V.A., Lenkov S.V., Maslov O.V., Savel'ev S.A. [Processing of CdZnTe single crystals for application in gamma-radiation sensors]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2001, no 3, pp. 9-10. (in Russian)
9. Banzak O.V. Maslov O.V., Mokritskii V.A. *Poluprovodnikovyye detektory novogo pokoleniya dlya radiatsionnogo kontrolya i dozimetrii ioniziruyushchikh izluchenii* [New generation semiconductor detectors for the radiation monitoring and ionizing radiation dosimetry]. Odessa, VMV, 2013, 220 p. (in Russian)
10. Oleinik S.G., Boltenev V.A., Maslov O.V. Passive computer tomography of nuclear fuel. *Atomic Energy*, 2005, vol. 98, no 3, pp. 227-229. — DOI: 10.1007/s10512-005-0198-2
11. Maslov O.V. [Technical devices and principles to determine the spent nuclear fuel burnup, the fission products distribution throughout the FA cross section during refueling]. *Works of the Odessa polytechnic university*, 2007, iss. 2(28), pp. 65-71. (in Russian)
12. Mokritskii V.A., Maslov O.V., Banzak O.V. [Methods for determination of burn-through on the base of the measurements of the self-radiation characteristics of the spent nuclear fuel]. *Collection of Scientific Papers of the Military Institute*, 2013, no 43, pp. 86-93. (in Russian)
13. Oleinik S.G., Sergeev S.V., Maksimov M.V., Maslov O.V. [Metrological assurance of determination of irradiated nuclear fuel burnout, exposure time and concentration during measurements in real time] *Yadernye izmeritel'no-informatsionnye tekhnologii*, 2004, no 3 (11), pp. 72-79. (in Russian)
14. Sharaf M.A., Illman D. L., Kowalski B. R. *Chemometrics*, Wiley, New York, 1986, 352 p.
15. Shannon R. E. *Systems Simulation: the art and science*. Prentice-Hall, 1975, 387 p.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Готра З. Ю., Волинюк Д. Ю. Органічні нанорозмірні світловипромінювальні структури на основі низькомолекулярних матеріалів. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013.

Розглянуто концептуальні рішення щодо створення нових органічних світловипромінювальних структур (ОСВС) на основі модифікованих матеріалів. Наведено науково-дослідні результати досліджень, отриманих при розробці електрофлуоресцентних, електрофосфоресцентних, електроексимерних ОСВС. Описано новий принцип створення ОСВС білого кольору свічення та високоефективних ОСВС (квантовий вихід 17%) синього кольору на основі триплет-синглетного переходу в світловипромінювальному шарі.

НОВЫЕ КНИГИ



Бобало Ю. Я. та ін. Осцилографи та методи вимірювання радіотехнічних величин. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014.

Описано основні напрями розвитку осцилографії — однієї з найважливіших ділянок сучасної метрології. Наведено параметри осцилографів, їх структурні схеми, пояснення принципу дії. Розглянуто наступні проблеми: вибір осцилографів для дослідження конкретних фізичних величин та методи їх вимірювання, практичне застосування цифрового осцилографа.

Для студентів напрямів підготовки “Радіотехніка”, “Телекомунікації” та “Радіоелектронні апарати”, а також для студентів інших технічних напрямів.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Алтухов Андрей Александрович*, канд. техн. наук, директор, ООО «УралАлмазИнвест», г. Москва
- Борисенко Анатолий Григорьевич*, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ядерных исследований НАНУ, г. Киев
- Вороняк Тарас Иванович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАНУ, г. Львов
- Данилов Владимир Васильевич*, докт. техн. наук, г. Донецк
- Должиков Владимир Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Дружинин Анатолий Александрович*, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Катеринчук Валерий Николаевич*, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ, г. Черновцы
- Кондрик Александр Иванович*, ведущий инженер-исследователь, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
- Корбутяк Дмитрий Васильевич*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Костиков Андрей Олегович*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАНУ, г. Харьков
- Костылёв Виталий Петрович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Круковский Семен Иванович*, докт. техн. наук, нач. сектора, НПП «Карат», г. Львов
- Лузин Сергей Юрьевич*, докт. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург
- Мартынов Василий Егорович*, начальник бюро, НПП «Хартрон-ЮКОМ», г. Запорожье
- Марьянчук Павел Дмитриевич*, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
- Садченко Андрей Валерьевич*, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Ховерко Юрий Николаевич*, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский центр «Кристалл», г. Львов
- Шило Галина Николаевна*, канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет
- Шинкаренко Владимир Викторович*, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

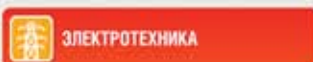


21 — 24 апреля 2015 г. МЕЖДУНАРОДНЫЕ ВЫСТАВКИ

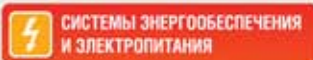


www.elcom.ua

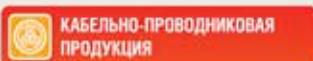
Тематические направления



Высоковольтная аппаратура, низковольтная аппаратура, энергосбережение, охрана труда в электроэнергетике.



Когенерационные установки, электростанции, стабилизаторы, преобразователи, инверторы, выпрямители, аккумуляторы, источники бесперебойного питания, электрощитовое оборудование, системы электропитания, электроприборы и преобразователи, системы заземления и молниезащиты.



Кабели, провода, кабеленесущие системы, электромонтажные изделия, оборудование для монтажа и прокладки.



Техническое освещение, декоративное освещение, LED-освещение, источники света.

www.asutp.euroindex.ua



Тематические направления

Электроника

микропроцессоры и микроконтроллеры, активные компоненты, пассивные компоненты, силовая электроника, источники питания, датчики, ВЧ- и СВЧ-компоненты, дисплеи и светодиодная продукция, печатные платы и контрактное производство, полупроводниковые компоненты и устройства, электромеханические компоненты и технологии соединений

Промышленная автоматизация

АСУП, АСУ ТП, АСДУ, АСКУЭ, АСПР, Системы контроля технологических параметров, САПР, SCADA-системы, MES-системы, промышленное программное обеспечение, промышленные компьютеры, интеграция и консалтинг

Контрольно-измерительные приборы

электроизмерительные приборы, радиоизмерительные приборы, генераторы сигналов, приборы контроля и управления, измерители, преобразователи, средства контроля технических параметров, метрологическое оборудование, делители, датчики, автоматика, блоки питания, уровнемеры, расходомеры



Электрика 2015

XI специализированная выставка

25—27 марта 2015 г.

Тематические разделы:

- производство, передача и распределение электроэнергии;
- коммутационные аппараты;
- кабели и провода;
- силовая электроника;
- контрольно-измерительная техника;
- устройства защиты и автоматики;
- освещение;
- электроинсталляция

Дворец спорта «Украина»
Львов, ул. Мельника, 18
elk.expolviv.ua/

**Expo
Lviv**

Организатор: Экспольвов
+38 032 244-18-88, +38 032 240-24-54,
+38 032 244-11-91, моб. +38 067 672-55-72
expolviv@gmail.com

Номер готовили
Днепропетровск, Донецк, Запорожье, Киев,
Корнвестхайм, Львов, Москва, Одесса,
Санкт-Петербург, Ужгород, Харьков,
Черновцы



Пишите
Подписывайтесь
Читайте