

Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье «Матричный светодиодный излучатель
для фотодинамической терапии»

2 2012

МАРТ — АПРЕЛЬ

ТРИНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

4 — 8 июня 2012 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

*С текущей информацией
можно ознакомиться на сайте
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)

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

- В Украине** Отделения связи. «Каталог видань України». Индекс 23785.
Подписное агентство «Идея», www.idea.com.ua. Индекс 11146.
Подписное агентство «KSS», www.kss.kiev.ua. Индекс 20363.
- В России** Отделения связи. Каталог «Газеты и журналы». Индекс 71141.
- В Белоруссии** Отделения связи. Каталог «Издания стран СНГ». Индекс 71141.
- В редакции «ТКЭА»** можно подписаться с любого номера.



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

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. Корецкая.

Компьютерное обеспечение: П. В. Назаров.

Подписано к печати 28.02.2012. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.

Печ. л. 6,5+1,0. Уч.-изд. л. 9,0. Тираж 250 экз. Заказ № 147.

Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).

Отпечатано в типографии издательства «ART-V»
(65091, г. Одесса, ул. Комитетская, 24а).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2012

№ 2

Год издания 36-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмилё

СОДЕРЖАНИЕ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)
Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)
К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)
Н. В. Кончиц (г. Киев)
Д.ф.-м.н. В. Ф. Мачулин (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. гл. редактора (г. Киев)
Д.т.н. В. В. Данилов (г. Донецк)
К.т.н. И. Н. Еримичой,
зам. гл. 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. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)
Д.т.н. В. П. Малахов (г. Одесса)
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)
Д.т.н. В. М. Шокало (г. Харьков)
Д.ф.-м.н. О. И. Шпотюк (г. Львов)

УЧРЕДИТЕЛИ

Министерство промышленной полити-
ки Украины
Институт физики полупроводников
им. В. Е. Лашкарёва
Научно-производственное
предприятие «Сатурн»
Одесский национальный
политехнический университет
Издательство "Политехпериодика"

Одобрено к печати Ученым советом
ОНПУ
(Протокол № 6 от 28.02 2012 г.)

Электронные средства: исследования, разработки

Полуактивный радиочастотный датчик контроля расхода элект-
роэнергии. *Лищинская Л. Б., Лазарев А. А., Барабан М. В.,*
Филинюк Н. А.

3

Подавление синхронной помехи в ЯКР с модуляцией Зеема-
на. *Политанский Л. Ф., Самила А. П., Хандожко В. А.*

8

Системы передачи и обработки сигналов

Безындуктивные генераторы хаотических колебаний по схе-
ме Чуа. *Элияшвили О. М., Политанский Л. Ф.*

12

Энергетическая электроника

Оптимизация структуры многоячейкового транзисторного
преобразователя. *Бондаренко Ю. В., Бондаренко А. Ф., Са-
фронов П. С., Сидорец В. Н.*

16

Биомедицинская электроника

Матричный светодиодный излучатель для фотодинамической
терапии. *Денисов Н. А., Редчук А. А.*

22

Функциональная микро- и наноэлектроника

Свойства двойных гетеропереходов $p^+-InP/n-InGaAsP/n-InP$,
изготовленных методом жидкофазной эпитаксии. *Вакив Н. М.,*
Круковский С. И., Сукач А. В., Тетёркин В. В., Мрыхин
И. А., Михащук Ю. С., Круковский Р. С.

27

Обеспечение тепловых режимов

Пассивная испарительно-конденсационная система охлаждения
лазера. *Гершуни А. Н., Нищик А. П.*

31

Технологические процессы и оборудование

Кинетика процессов осаждения пленок поликремния, легиро-
ванного кислородом в процессе роста. *Наливайко О. Ю.,*
Турицевич А. С.

37

Материалы электроники

Повышение эффективности кремниевых солнечных элемен-
тов посредством нанопористого покрытия. *Джафаров Т. Д.,*
Асланов Ш. С., Рагимов Ш. Х., Садыгов М. С., Набиева
А. Ф., Айдин Юксел С. (на английском языке)

42

Фотолюминесцентный метод исследования пластической дефор-
мации на границе раздела «SiO₂—Si». *Кулинич О. А., Яцунский*
И. Р., Ештокина Т. Ю., Брусенская Г. И., Марчук И. А.

47

Список рецензентов номера

51

Новые книги

7, 15, 21, 36

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Напіваактивний радіочастотний датчик контролю витрати електроенергії. *Ліщинська Л. Б., Лазарєв О. О., Барабан М. В., Філінюк М. А.* (3)

Заглушення синхронної завади в ЯКР з модуляцією Зеємана. *Політанський Л. Ф., Саміла А. П., Хандожко В. О.* (8)

Системи передачі та обробки сигналів

Безіндуктивні генератори хаотичних коливань по схемі Чуа. *Еліяшів О. М., Політанський Л. Ф.* (12)

Енергетична електроніка

Оптимізація структури багатокоміркового транзисторного перетворювача. *Бондаренко Ю. В., Бондаренко О. Ф., Сафронов П. С., Сидорець В. М.* (16)

Біомедична електроніка

Матричний світлодіодний випромінювач для фотодинамічної терапії. *Денисов М. О., Редчук О. О.* (22)

Функціональна мікро- та наноелектроніка

Властивості подвійних гетеропереходів p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, виготовлених методом рідкофазної епітаксії. *Ваків Н. М., Круковський С. І., Сукач А. В., Тетюркін В. В., Мрихін І. О., Міхашчук Ю. С., Круковський Р. С.* (27)

Забезпечення теплових режимів

Пасивна випаровувально-конденсаційна система охолодження лазера. *Гершуні О. Н., Ніщук О. П.* (31)

Технологічні процеси та обладнання

Кінетика процесів осадження плівок полікремнію, легованого киснем в процесі росту. *Наливайко О. Ю., Турцевич А. С.* (37)

Матеріали електроніки

Підвищення ефективності кремнієвих сонячних елементів за допомогою нанопористого покриття. *Джафаров Т. Д., Асланов Ш. С., Рагімов Ш. Х., Садігов М. С., Набієва А. Ф., Айдин Юксел С.* (42)
Фотолюмінесцентний метод дослідження пластичної деформації на границі поділу «SiO₂—Si». *Кулініч О. А., Яцунський І. Р., Єштокіна Т. Ю., Брусенська Г. І., Марчук І. А.* (47)

CONTENTS

Electronic facilities: investigations, development

Semi-active radiofrequency power consumption sensor. *Lishchinskaya L. B., Lazarev A. A., Baraban M. V., Filinyuk N. A.* (3)

The suppression of synchronous interference NQR with Zeeman modulation. *Politans'kii L. F., Samila A. P., Khandozhko V. A.*

Systems of signals transfer and processing

Non-inductive generator of chaotic oscillations of Chua circuit. *Eliyashiv O. M., Politanskii L. F.* (12)

Power electronics

Optimization of structure of multicell-type transistor converter. *Bondarenko Yu. V., Bondarenko A. F., Safronov P. S., Sydorets V. N.* (16)

Biomedical electronics

Matrix LED illuminator for photodynamic therapy. *Denysov M. O., Redchuk O. O.* (22)

Functional micro- and nanoelectronics

Properties of double p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP heterojunctions obtained by LPE method. *Vakiv N. M., Krukovskii S. I., Sukach A. V., Tetyorkin V. V., Mrykhin I. A., Mikhashchuk Yu. S., Krukovskii R. S.* (27)

Ensuring of thermal modes

Passive evaporation-condensation system for laser cooling. *Gershuni A. N., Nishchik A. P.* (31)

Technological processes and equipment

Deposition kinetics of in-situ oxygen doped polysilicon film. *Nalivaiko O. Yu., Turtsevich A. S.* (37)

Materials of electronics

Performance improvement of silicon solar cells by nanoporous silicon coating. *Dzhafarov T. D., Aslanov S. S., Ragimov S. H., Sadigov M. S., Nabiyeva A. F., Aydin Yuksel S.* (42)

Photoluminescent method for studying the plastic deformation at the boundary of «SiO₂—Si». *Kulinich O. A., Yatsunskiy I. P., Eshtokina T. Yu., Brusenskaya G. I., Marchuk I. A.* (47)

УДК 621.308.38

К. т. н. Л. Б. ЛИЩИНСКАЯ, к. т. н. А. А. ЛАЗАРЕВ,
М. В. БАРАБАН, д. т. н. Н. А. ФИЛИНЮК

Украина, Винницкий национальный технический университет
E-mail: L_Fil1@mail.ru

ПОЛУАКТИВНЫЙ РАДИОЧАСТОТНЫЙ ДАТЧИК КОНТРОЛЯ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Разработан и исследован датчик расхода электроэнергии на базе транзисторного динамического негатрона. В датчике отсутствуют механические части и электрический контакт с электрической сетью, он позволяет осуществлять контроль дистанционно, благодаря чему его можно встраивать в элементы конструкций здания.

Ключевые слова: датчик расхода электрической энергии, динамический негатрон, преобразователь потребляемой электрической энергии, преобразователь высокочастотного сигнала.

Частотные датчики дистанционного контроля состояния объекта получили широкое применение вследствие их высокой помехозащищенности, простоты согласования с устройствами цифровой обработки сигналов и высокой точности [1–3]. Использование достижений негатроники [4, 5] позволяет в ряде случаев улучшить технико-экономические показатели электронной аппаратуры и создать качественно новые электронные устройства. В частности, использование полупроводниковых приборов с отрицательным активным сопротивлением — R -негатронов — позволяет создавать схемотехнически простые микросистемные частотные датчики различных физических величин [6–8], в которых функции преобразования и генерации совмещены и выполняются R -негатронами. Недостатком большинства генераторных датчиков является зависимость их работы от источника питания, что ограничивает время и зону их работы. Целью настоящей работы является построение и исследование

радиочастотных датчиков (**РЧД**) на базе транзисторных динамических негатронов, не имеющих “жесткой” привязки к источнику питания.

Построение РЧД

Для высокоэффективных РЧД дистанционного контроля целесообразно использовать комбинированный динамический негатрон, который обеспечивает возможность построения генераторных схем СВЧ-диапазона. Они могут быть реализованы как со встроенным источником питания (активные РЧД), так и без него (полуактивные РЧД), и работать в режиме непрерывного измерения или в режиме контроля (в дискретном режиме) [2].

Полуактивные РЧД в своем составе имеют генератор электромагнитных колебаний, но не имеют встроенного источника питания. Возбуждение схемы осуществляется периодическим воздействием на антенну РЧД электромагнитных колебаний внешнего возбуждающего генератора, частота которых f_0 отличается от частоты сигнала генератора f_r и входит в стандартную сетку частот.

Концептуальным примером построения полуактивного РЧД является схема бесконтактного радиочастотного датчика учета расхода электрической энергии, представленная на **рис. 1** [9]. Он состоит из LC -генератора, образованного резонирующей емкостью $C3$ и комбинированным динамическим негатроном, реализованным на полевом транзисторе $VT1$ с индуктивным преобразуемым им-

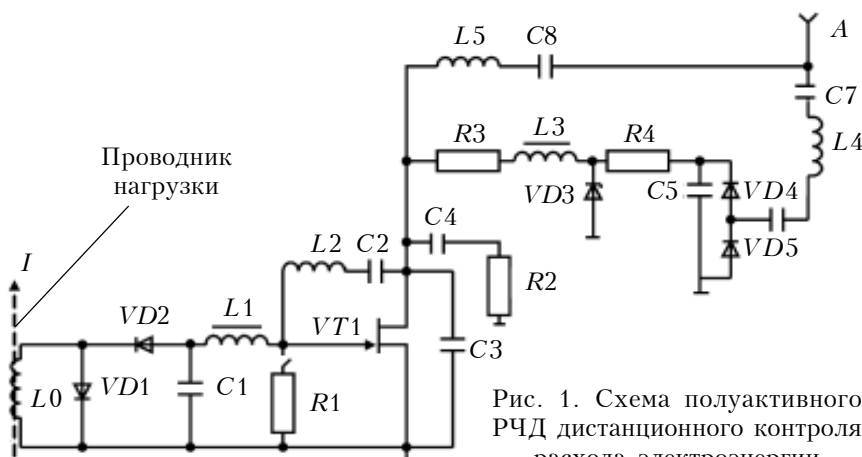


Рис. 1. Схема полуактивного РЧД дистанционного контроля расхода электроэнергии

митансом индуктивности $L2$. Напряжение между затвором и истоком снимается с конденсатора $C1$. Его величина определяется током и временем заряда конденсатора $C1$ через выпрямительный диод $VD2$. Величина тока заряда пропорциональна току, который протекает по проводнику нагрузки. Таким образом, частота генерации, определяемая величиной тока и временем заряда конденсатора $C1$, пропорциональна электрической энергии переменного тока, который прошел через проводник нагрузки.

Устройство начинает генерировать сигналы после того как на антенну РЧД начинают поступать возбуждающие электромагнитные колебания от ридера. Эти сигналы выпрямляются схемой удвоения напряжения на диодах $VD4$ и $VD5$ и обеспечивают необходимое напряжение между истоком и стоком транзистора $VT1$, стабилизируемое стабилитроном $VD3$. Считывание информации происходит с некоторой задержкой, по окончании переходных процессов и после установления напряжения питания.

Такой счетчик электрической энергии позволяет осуществлять контроль дистанционно, в нем нет механических частей, отсутствует электрический контакт с электрической сетью, и он может быть встроен в элементы конструкции здания. Если ввести в схему элемент памяти, то датчик можно будет идентифицировать, но это увеличит его себестоимость.

Необходимыми условиями самовозбуждения рассмотренного датчика являются [10]

$$K_{у\text{вн}} < 1; |Y_{12}Y_{21}| / (2\text{Re}Y_{11}) > 0,$$

где $K_{у\text{вн}}$, Y_{11} , Y_{12} , Y_{21} — соответственно, внутренний инвариантный коэффициент устойчивости полевого транзистора и его Y -параметры в схеме с общим стоком.

Для обеспечения генерации на частоте f_c необходимо выполнение условия

$$\text{Im} Y_h + \text{Im} Y_{\text{вых}} = 0,$$

где Y_h — проводимость нагрузки в плоскости «исток — сток» полевого транзистора $VT1$;

$$Y_{\text{вых}} = \text{Re} Y_{\text{вых}} + j\text{Im} Y_{\text{вых}}.$$

Здесь

$$\begin{aligned} \text{Re} Y_{\text{вых}} = \text{Re} Y_{22} - \\ - \frac{\text{Re}(Y_{12}Y_{21}) + \sigma_r \text{Im}(Y_{12}Y_{21})}{(1 + \sigma_r) \text{Re}(Y_{11} + Y_r)}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Im} Y_{\text{вых}} = \text{Im} Y_{22} - \\ - \frac{\text{Im}(Y_{12}Y_{21}) + \sigma_r \text{Re}(Y_{12}Y_{21})}{(1 + \sigma_r^2) \text{Re}(Y_{11} + Y_r)}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{где } \sigma_r = \text{Im}(Y_r + Y_{11}) / \text{Re}(Y_r + Y_{11}).$$

Решая уравнение $\partial \text{Re} Y_{\text{вых}} / \partial \sigma_r = 0$ относительно σ_r при $\text{Re} Y_r = 0$, находим условие, при котором $\text{Re} Y_{\text{вых}}$ имеет минимальное значение:

$$\sigma_{r_{\text{опт}}} = \frac{|Y_{12}Y_{21}| - \text{Re}(Y_{12}Y_{21})}{\text{Im}(Y_{12}Y_{21})}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и решая его относительно $\text{Im} Y_r$, находим величину преобразуемой проводимости (в данном случае — проводимость катушки индуктивности $L1$)

$$\text{Im} Y_{r_0} = \frac{1}{2\pi f_r L1} = \sigma_{r_{\text{опт}}} \text{Re} Y_{11} - \text{Im} Y_{11}$$

и значение резонирующей емкости

$$C3 = \frac{\text{Im} Y_{\text{вых}}}{2\pi f_r} = \frac{\text{Im}(Y_{12}Y_{21})}{2 \text{Re} Y_{11}} - \text{Im} Y_{22}.$$

Приведенная методика расчета может быть применена и для других видов транзисторов (биполярных, однопереходных), используемых в качестве основы комбинированного динамического негатрона.

Экспериментальные исследования

При исследовании работы РЧД учитывалось, что его структурная схема состоит из трех частей: входного преобразователя потребляемой электрической энергии в постоянное напряжение на затворе полевого транзистора; преобразователя высокочастотного сигнала с антенны в напряжение питания схемы; LC -генератора на базе динамического негатрона на полевом транзисторе.

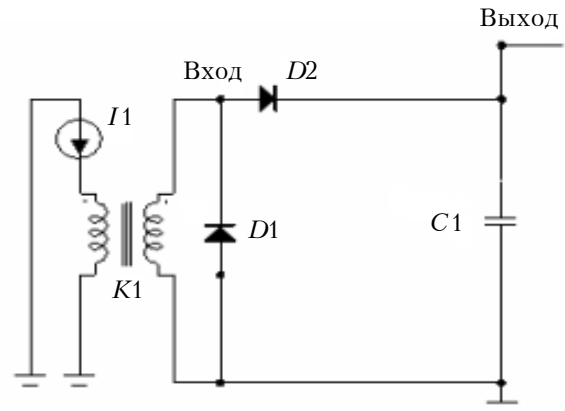


Рис. 2. Схема входного преобразователя количества потребляемой электрической энергии в постоянное напряжение

Схема для моделирования входного преобразователя показана на рис. 2. Трансформатор тока $K1$ создает ток заряда накопительного конденсатора $C1$, который значительно меньше тока потребления и прямо пропорционален ему. Ток заряда выпрямляется диодом Шоттки $D1$. Напряжение на конденсаторе $C1$, таким образом, будет пропорционально потребленной электрической энергии.

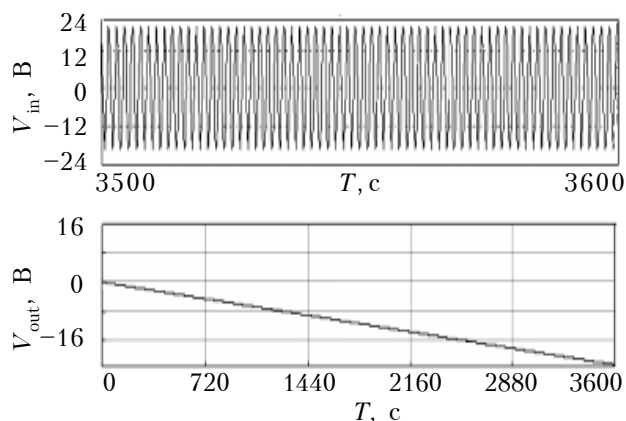


Рис. 3. Результаты моделирования выходного напряжения входного преобразователя

На рис. 3 представлены результаты моделирования напряжения на выходе схемы V_{out} при входном напряжении V_{in} . Действующее значение силы тока $I_1=4,55$ А соответствует мощности потребления электроэнергии 1 кВт при напряжении в сети 220 В. Из графиков следует, что напряжение на выходе преобразователя растет линейно во времени пропорционально потребленной энергии и через 3600 с достигает $-22,6$ мВ. Катушка индуктивности $L1$ обеспечивает развязку по переменному току с остальной частью схемы.

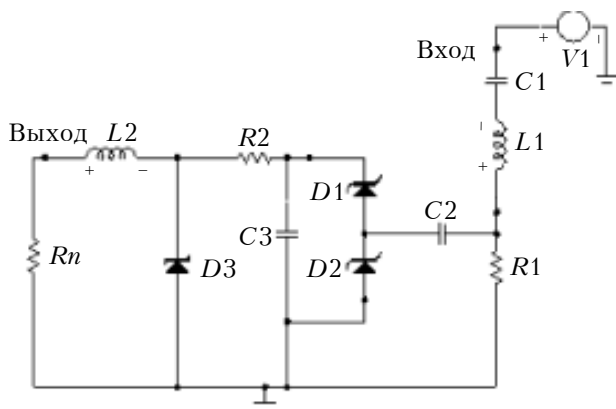


Рис. 4. Схема преобразователя ВЧ-сигнала с антенны в напряжение питания датчика

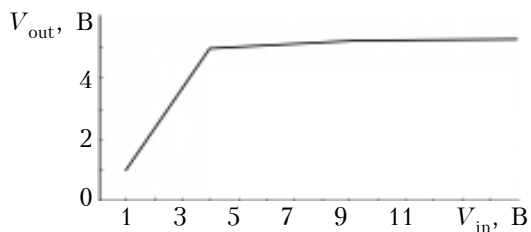


Рис. 5. Зависимость напряжения на выходе ВЧ-преобразователя от значения амплитуды входного напряжения, которое наводится в антенне

Схема для моделирования преобразователя высокочастотного сигнала с антенны в напряжение питания устройства показана на рис. 4. Напряжение, которое наводится в приемной антенне от ридера, поступает на вход и через входной полосно-пропускающий фильтр $C1, L1$, настроенный на частоту сигнала опроса 125 кГц, подается на удвоитель напряжения на элементах $C2, C3, D1, D3$. На элементах $R2, D3$ собран параметрический стабилизатор напряжения. Дроссель $L2$ обеспечивает развязку по переменному току.

На рис. 5 показаны результаты моделирования зависимости напряжения V_{out} на выходе преобразователя (рис. 4) от напряжения входа V_{in} , которое наводится в антенне. В диапазоне амплитуд входного напряжения 4–15 В частотой 125 кГц, значение постоянного напряжения на выходе составляет 5,0–5,2 В при токе нагрузки 1,75 мА. Этим обеспечивается стабильная работа датчика на различных расстояниях от ридера.

Схема для моделирования основной части датчика — автогенератора гармонических колебаний на базе динамического негатрона на полевом транзисторе Шоттки — показана на рис. 6, а зависимость частоты его генерации f_r от напря-

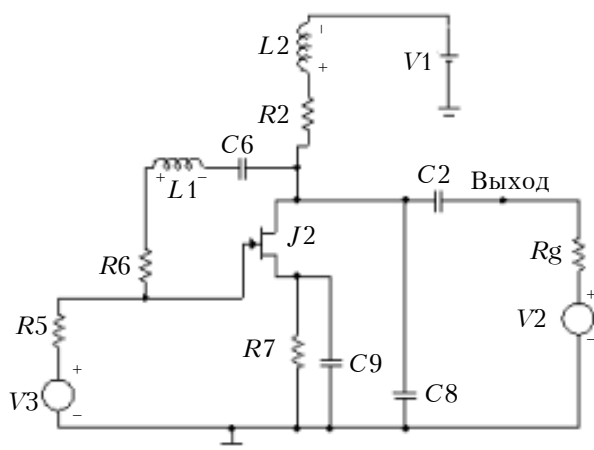


Рис. 6. Схема генератора на динамическом негатроне

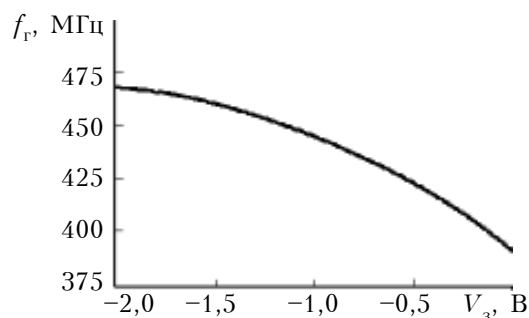


Рис. 7. Зависимость частоты генератора (см. схему на рис. 6) от напряжения на затворе полевого транзистора

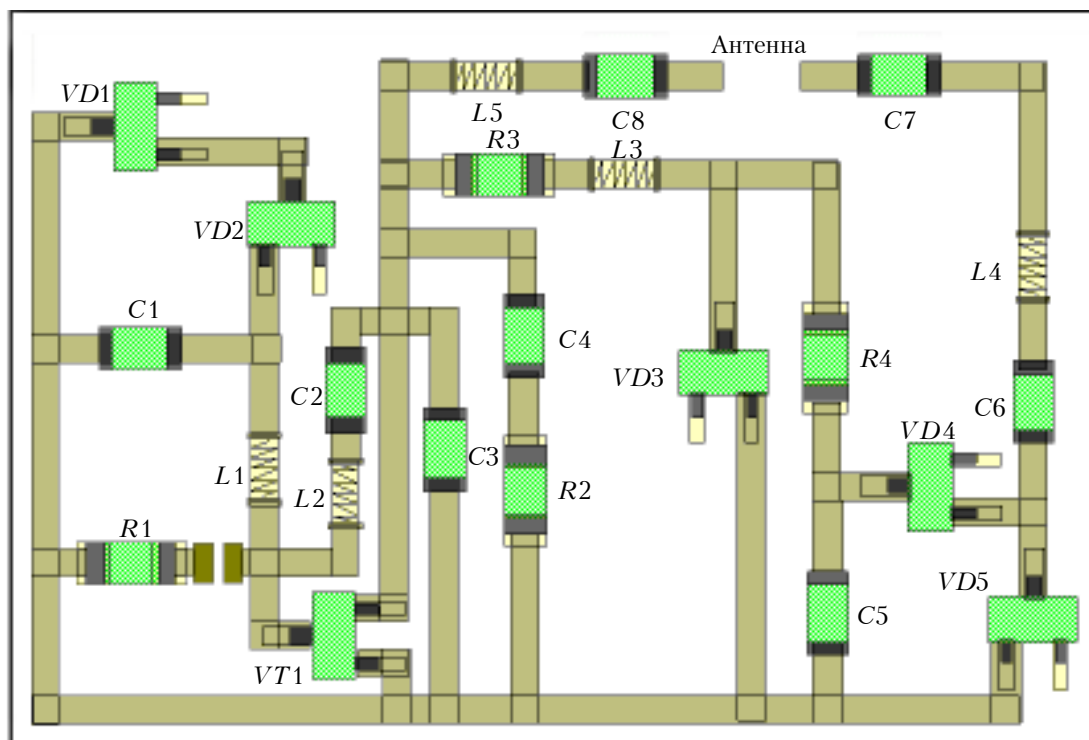


Рис. 8. Плата РЧД дистанционного контроля расхода электроэнергии

жения на затворе V_3 полевого транзистора — на рис. 7.

При нулевом напряжении на затворе частота генерации составляет 390,3 МГц. С увеличением отрицательного напряжения на затворе транзистора частота увеличивается и при напряжении -2 В составляет 467,8 МГц. Изменение частоты составляет 77,5 МГц. Для того чтобы V_3 составило -2 В необходимо, чтобы количество энергии, потребленной пользователем, составило 88,5 кВт·ч. Таким образом, крутизна преобразования датчика составляет в среднем 0,876 МГц/(кВт·час).

Для реализации РЧД расхода электрической энергии была разработана гибридная микросхема, плата которой размером 18,5×12 мм с установленными компонентами показана на рис. 8.

В качестве основания платы использовали керамическую подложку RO3010 фирмы Rogers Corporation, в качестве компонентной базы — керамические высокочастотные конденсаторы GQM SMD 0603 фирмы Murata, толстопленочные резисторы ERJ3G SMD 0603 фирмы Panasonic, высокочастотные монолитные катушки индуктивности LQG SMD 0603 фирмы Murat, высокочастотные диоды Шоттки фирмы NXP, транзистор BF862 фирмы NXP.

Таким образом, предложен радиочастотный датчик контроля расхода электроэнергии, который работает без встроенного источника питания

— необходимое напряжение питания создается за счет преобразования высокочастотного сигнала, поступающего от ридера на датчик. Высокочастотный сигнал на выходе РЧД пропорционален измеряемому параметру. Разработанный датчик контроля расхода электроэнергии работает в диапазоне частот 390,3 — 467,8 МГц.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Виглеб Г. Датчики. — М.: Мир, 1989. [Vigleb G. Datchiki. Moscow. Mir. 1989]
2. Ліщинська Л. Б. Радіочастотні датчики дистанційного контролю стану об'єкту // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2010. — Vol. 1(7). — N 4. — P. 27–36. [Lishchins'ka L. B. Radiochastotn i datchiki distantsiinogo kontrolyu stanu ob'ektu // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. 2010. Vol. 1(7). N 4. P. 27]
3. Арш Э. И. Автогенераторные методы и средства измерений. — М.: Машиностроение, 1979. [Arsh E. I. Avtogenetatornye metody i sredstva izmerenii. — Moscow. Mashinostroenie. 1979]
4. Филинчук Н. А. Краткий исторический обзор развития научного направления “Негатроника” // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1999. — № 3. — С. 38–43. [Filinyuk N. A. Kratkii istoricheskii obzor razvitiya nauchnogo napravleniya “Negatronika” // Vimiryuvai'na ta obchislyuvai'na tekhnika v tekhnologichnikh protsesakh. 1999. N 3. P. 38]
5. Серьезнов А. Н., Степанова Л. Н., Гаряинов С. А. и др. Негатроника. — Новосибирск: Наука, 1995. [Ser'eznov A. N., Stepanova L. N., Garyainov S. A. i dr. Negatronika. Novosibirsk. Nauka. 1995]

6. Негоденко О. Н., Мардамшин Ю. П. Микроэлектронные датчики с частотным выходом на основе аналогов негatronов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2000. — № 5—6. — С. 19—22. [Negodenko O. N., Mardamshin Yu. P. Mikroelektronnye datchiki s chastotnym vykhodom na osnove analogov negatronov // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature. 2000. N 5—6. P. 19]

7. Касимов Ф. Д., Гусейнов Я. Ю., Негоденко О. Н., Румянцев К. Е. Микроэлектронные преобразователи на основе негatronных элементов и устройств. — Баку: ЭЛМ, 2001. [Kasimov F. D., Guseinov YA. Yu., Negodenko O. N., Rumyantsev K. E. Mikroelektronnye preobrazovateli na osnove negatronnykh elementov i ustroystv. Baku. ELM. 2001]

8. Ліщинська Л. Б., Рожкова Я. С., Фурса С. Є., Філінюк М. А. Оптико-електронний генераторний сенсор на базі двохпараметричного УПІ // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. — 2010. — № 2(20). — С. 219—224. [Lishchins'ka L. B., Rozhkova YA. S., Fursa S. E., Filinyuk M. A. Optiko-elektronniy generatorni sensor na bazi dvokhparametrichnogo UPI // Optiko-elektronni informatsiino-energetichni tekhnologiyi. 2010. N 2(20). P. 219]

9. Патент 54733 України. Дистанційний лічильник витрат електричної енергії / Л. Б. Ліщинська, М. В. Барабан, О. О. Лазарев, М. А. Філінюк. — Бюл. № 22. [Patent 54733 Ukrayini. Distantsiynii lichil'nik vitrat elektrichnoyi energiyi / L. B. Lishchins'ka, M. V. Baraban, O. O. Lazarev, M. A. Filinyuk. Bull. N 22]

10. Філінюк М. А., Войцеховська О. В. Элементы та пристрої автоматики на основі нелінійних властивостей динамічних негatronів. — Вінниця: Універсум-Вінниця, 2008. [Filinyuk M. A., Voitsekhoys'ka O. V. Elementi ta pristroyi avtomatiki na osnovi nelineinikh vlastivostei dinamichnikh negatroniv. Vinnitsya. Universum-Vinnitsya. 2008]

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.09 2011 г.

Lishchinskaya L. B., Lazarev A. A., Baraban M. V., Filinyuk N. A. **Semi-active radiofrequency power consumption sensor.**

Keywords: power consumption sensor, dynamical negatron, electrical energy consumption converter, converter of high-frequency signal.

A semi-active RF sensor of power consumption based on the transistor dynamic negatron was developed and investigated. The designed sensor has no mechanical parts and there is no electrical contact between the sensor and electrical grid, it can be monitored distantly, whereupon the sensor can be embedded in structural elements of the building.

Ukraine, Vinnytsia National Technical University.

Ліщинська Л. Б., Лазарев О. О., Барабан М. В., Філінюк М. А. **Напівактивний радіочастотний датчик контролю витрати електроенергії.**

Ключові слова: датчик витрати електричної енергії, динамічний негatron, перетворювач споживаної електричної енергії, перетворювач високочастотного сигналу.

Розроблено та досліджено напівактивний радіочастотний датчик витрати електроенергії на базі транзисторного динамічного негatrona. У розробленому датчику відсутні механічні частини та електричний контакт з електричною мережею, він дозволяє проводити контроль дистанційно, завдяки чому його можна вбудувати в елементи конструкції будівлі.

Україна, Вінницький національний технічний університет.

Красников Г. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов.— Москва: Техносфера, 2011.— 800 с.

В книге рассмотрены особенности работы субмикронных МОП-транзисторов, описаны направления развития и ограничения применения методов масштабирования транзисторов, представлены требования к подзатворным диэлектрикам, технологии их формирования, различные конструкции сток-истоковых областей МОПТ и технологические процессы создания мелкозалегающих легированных слоев. Рассмотрены проблемы влияния масштабирования размеров элементов в субмикронную область и особенностей технологических процессов на надежность и долговечность субмикронных МОП-транзисторов. Представлены данные о влиянии технологических процессов изготовления субмикронных СБИС (процессов плазменной обработки, ионного легирования и технологических операций переноса изображения) на деградацию подзатворного диэлектрика, а значит — на уровень выхода, надежность и долговечность годных готовых изделий.

Книга предназначена для специалистов в области проектирования и разработки технологии изготовления КМОП СБИС, а также для студентов старших курсов, аспирантов и преподавателей технических вузов.



УДК 539.184.28; 621.375.4

Д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ, к. т. н. А. П. САМИЛА, В. А. ХАНДОЖКО

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: asound@ukr.net

ПОДАВЛЕНИЕ СИНХРОННОЙ ПОМЕХИ В ЯКР С МОДУЛЯЦИЕЙ ЗЕЕМАНА

Рассмотрены принципы частотной модуляции и модуляции Зеемана в ядерном квадрупольном резонансе и показаны преимущества последней. Предложен метод устранения синхронной помехи, вызываемой переключением магнитного поля. Приведены результаты наблюдения резонансной линии ^{14}N с достоверной формой в образце гексаметилентетрамина массой 2 г.

Ключевые слова: ЯКР, модуляция Зеемана, синхронная помеха, гексаметилентетрамин.

При непрерывном методе наблюдения спектров ядерного квадрупольного резонанса (ЯКР) обычно используется модуляционная техника. В этом случае в структуру спектрометра чаще всего входят регенеративный спин-детектор (автодин), синхронный интегратор и синхронный детектор (рис. 1). Так как уровень резонансных сигналов обычно мал и спин-детектор вносит существенный шум, здесь применяется синхронное детектирование.

Для сканирования частоты в области резонанса может применяться как частотная модуляция, так и модуляция Зеемана. При этом наблюдается модуляция высокочастотного (ВЧ) напряжения на колебательном контуре автодина сигналом резонанса. Рассмотрим оба эти вида модуляции.

Частотная модуляция ВЧ-напряжения на колебательном контуре регенераторного спин-детектора обычно обеспечивается посредством варикапов. Однако ввиду нелинейности их вольт-

фарадной характеристики, а также частотной зависимости добротности колебательного контура и параметров цепи обратной связи в спектрометре имеют место низкочастотные шумы и дрейф базовой линии. Применение модуляции Зеемана, т. е. переменного магнитного поля, позволяет свести к минимуму влияние этих эффектов в случае исследования кристаллических веществ с малым значением параметра асимметрии градиента электрического поля. В этом случае отсутствует паразитная модуляция ВЧ-напряжения, обусловленная нелинейностью элементов спин-детектора. В [1] показано, что наиболее подходящей формой изменения магнитного поля в случае ЯКР является биполярная прямоугольная волна (рис. 2). При такой форме модулирующего поля отсутствуют наводки на частоте модуляции f_m , поскольку полный период таких колебаний составляет $2f_m$ (длительность T) и из-за асимметрии они не имеют четных гармоник.

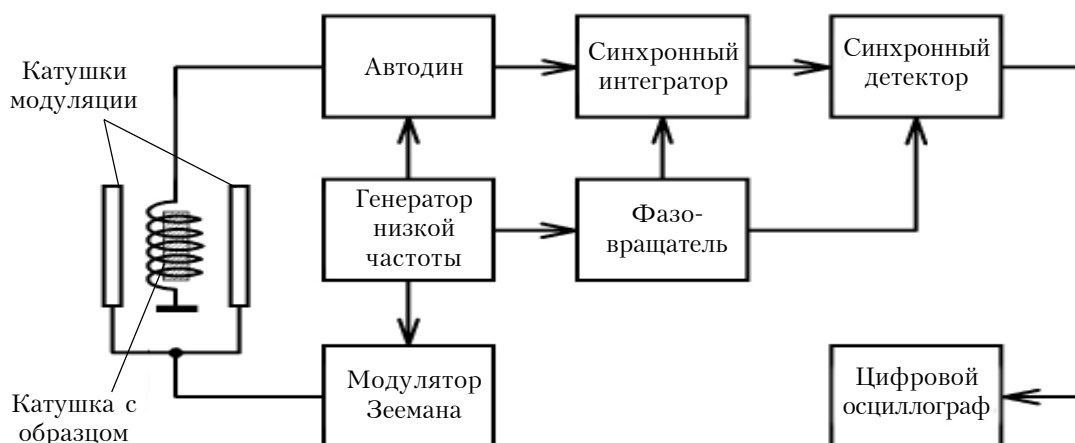


Рис. 1. Структурная схема спектрометра ЯКР с функцией частотного сканирования спектров

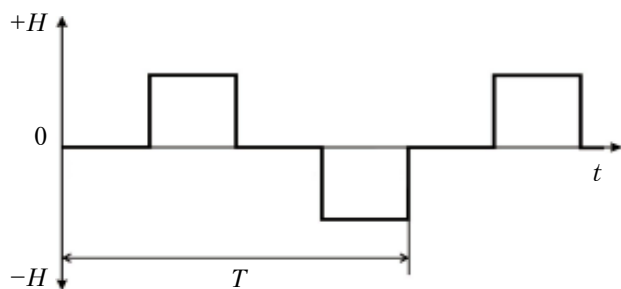


Рис. 2. Форма импульсов магнитного поля в виде биполярной прямоугольной волны при модуляции Зеемана ЯКР

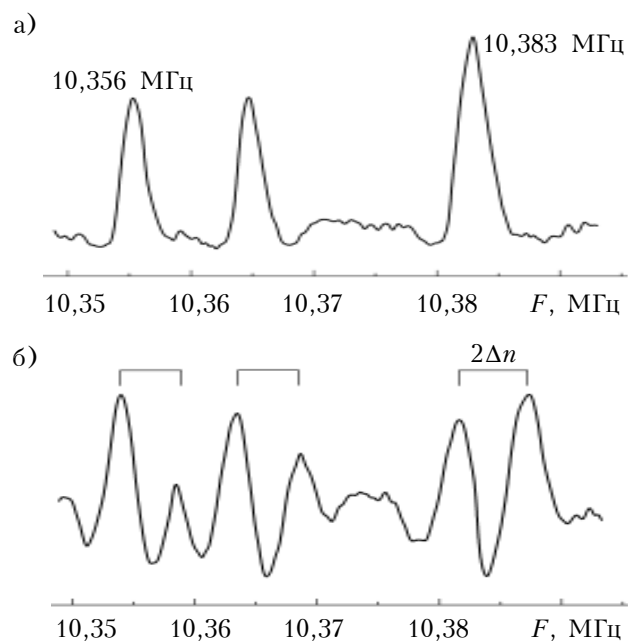


Рис. 3. Нормированные по интенсивности линии ЯКР при отсутствии магнитного поля (а) и при его наложении (б) в полупроводниковом соединении InSe

Для воспроизведения четкой формы линий необходимо обеспечение нулевого значения остаточного модулирующего поля во избежание уширения линий. Положительные и отрицательные импульсы $+H$ и $-H$ должны быть равными по длительности и амплитуде и иметь крутые фронты. Принцип модуляции состоит в смещении резонансной линии ЯКР под действием маг-

нитного поля. Благодаря расщеплению Зеемана квадрупольных уровней частотный сдвиг линии симметричен относительно ЯКР в нулевом магнитном поле и составляет

$$\pm \Delta\nu = \frac{\gamma}{2\pi} \Delta H,$$

где $\Delta\nu$ — частотное смещение;

γ — гиромагнитное отношение для резонирующего ядра;

ΔH — амплитуда импульса магнитного поля.

Пример расщепления резонансных линий ЯКР ^{115}In в InSe приведен на рис. 3 для перехода $\pm 1/2 \leftrightarrow \pm 3/2$ в случае наложения слабого магнитного поля (5 Гс) в направлении $H_0 \parallel c$, где c — главная оптическая ось кристалла. Для каждой линии расщепление за счет эффекта Зеемана приблизительно одинаковое и составляет $2\Delta\nu$. Имеется в виду, что параметр асимметрии $\eta=0$.

При прямоугольной форме модулирующего магнитного поля существует неизбежная импульсная наводка на катушку с образцом при переключении магнитного поля от нулевого значения до максимальной амплитуды. Ее не удается полностью устранить, поворачивая модулирующие катушки Гельмгольца вокруг оси приемной катушки, т. к. источником помех могут быть также радиоэлементы самого спин-детектора. Влияние паразитной помехи особенно ощутимо при малых уровнях сигнала. В этом случае наблюдается быстрое насыщение синхронного интегратора более сильным сигналом синхронной импульсной помехи, после чего, как правило, наступает перегрузка синхронного детектора. Избежать этого можно с помощью кратковременного подавления информационного сигнала в момент переключения магнитного поля.

В настоящей работе предложен метод устранения синхронной помехи, вызываемой переключением магнитного поля.

Для устранения импульсной синхронной помехи в структурную схему спектрометра ЯКР введен блок гашения синхронной помехи, включенный между выходом автодинного спин-детектора и входом синхронного интегратора (рис. 4).

Схема предложенного блока функционально представляет собой ключ, управляемый опор-

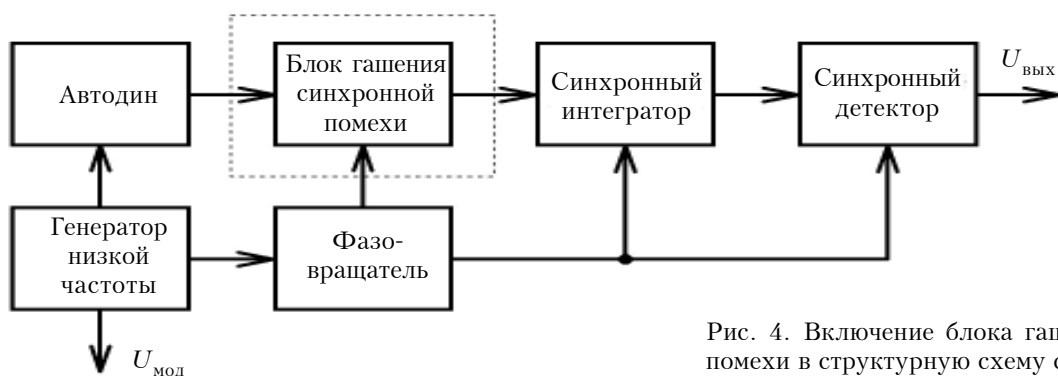


Рис. 4. Включение блока гашения синхронной помехи в структурную схему спектрометра ЯКР

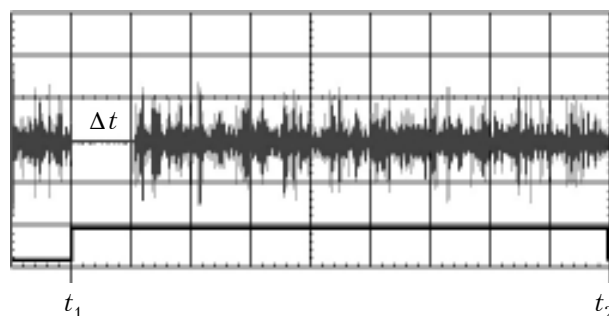


Рис. 5. Осциллограмма в момент обнуления информационного сигнала синхронной помехи, наведенной магнитным полем модуляции, и фрагмент опорного напряжения (внизу)

ным напряжением модуляции $U_{\text{мод}}$, поступающим из фазовращателя, который заземляет канал сигнала во время прохождения импульсной помехи. На рис. 5 приведена осциллограмма сигнала $U_{\text{вых}}$ на выходе схемы гашения в момент обнуления синхронной помехи. Обнуление информационного сигнала должно происходить в моменты включения и выключения магнитного поля (см. рис. 2). С этой целью формируются импульсы из опорного напряжения, которое также управляет синхронным интегратором и синхронным детектором. Экспериментально установлено, что длительность этих импульсов, соответствующая длительности обнуления информационного сигнала Δt , должна регулироваться в пределах 5–300 мкс.

Рассмотрим принцип работы изображенной на рис. 6 электрической схемы предложенного блока для устранения синхронной помехи. Прямоугольные импульсы с частотой $2f_m$ подаются на Вход 1 схемы гашения и далее проходят через узел на микросхеме DD1.1, который формирует

ет короткие однополярные импульсы по положительным и отрицательным фронтам сигнала синхронизации, запускающие одновибратор на микросхеме DD2.1 (74HC74).

Длительность формируемого импульса, который определяет время гашения сигнала Δt , устанавливается параметрами цепи R7 (50 кОм), R6 (100 Ом) и C5 (10 нФ).

Сформированный одновибратором импульс подается на микросхему DD3 (74HC4053) [2], которая представляет собой двунаправленный ключ, замыкающий сигнал на землю во время прохождения импульсной помехи. Каскады на операционных усилителях DA1 и DA2 выполняют роль входного и выходного повторителей. Частичное сужение полосы на выходе ключевой схемы осуществляется цепочкой R10 (10 кОм), C12 (1 нФ), обеспечивающей ограничение спектра сигнала со стороны высших частот. На осциллограмме (рис. 7) показано формирование сигнала гашения. Схема питается от двухполярного источника напряжением ± 12 В.

Для проверки спектрометра с описанной схемой компенсации синхронной помехи исследовался уротропин (гексаметилентетрамин $C_6H_{12}N_4$). Данное вещество часто применяется для определения чувствительности спектрометров ЯКР как импульсного, так и стационарного типов [3, 4]. В соединениях с участием азота энергия квадрупольных переходов мала при низкой резонансной частоте ЯКР ($\approx 3,3$ МГц) изотопов ^{14}N . Поэтому уже само наблюдение резонанса со слабой интенсивностью от ядер азота может свидетельствовать о достаточной чувствительности спектрометра.

Измерения проведены на радиоспектрометре ЯКР с использованием спин-детектора автодинамического типа, выполненного по симметричной схе-

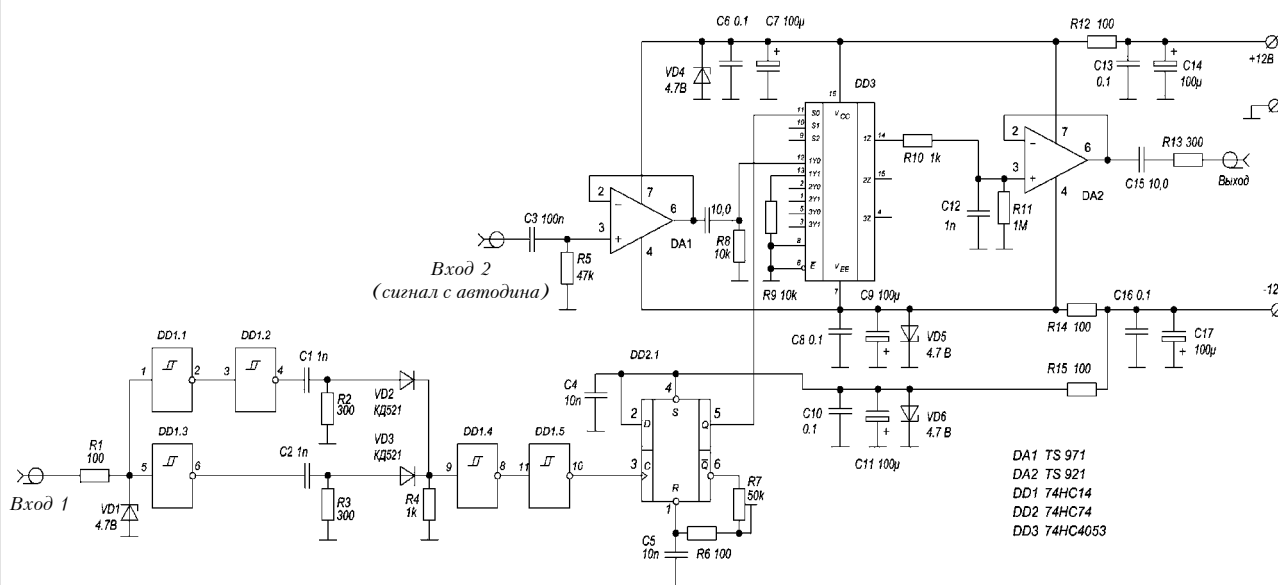


Рис. 6. Принципиальная схема блока для устранения импульсной синхронной помехи в низкочастотном радиоканале спектрометра

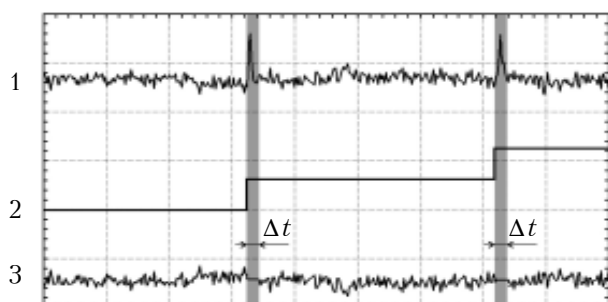


Рис. 7. Формирование сигнала гашения (в условном масштабе времени):

1 — текущий сигнал с паразитными выбросами; 2 — соответствующие перепады магнитного поля на катушке с образцом; 3 — выходной сигнал с площадками обнуления после гашения (Δt)

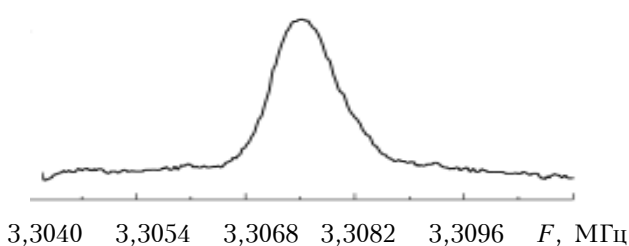


Рис. 8. Нормированная по интенсивности спектральная линия ЯКР ^{14}N в уротропине, полученная непрерывным сканированием частоты спин-детектора

ме [5]. При наблюдении резонанса применялась модуляция Зеемана, а для регистрации спектра использовались синхронный интегратор и затем фазовый детектор. При записи резонансной линии ^{14}N при непрерывном частотном сканировании получено качество спектра, сопоставимое с откликом на импульсное возбуждение [6]. На рис. 8 приведена спектральная линия ЯКР ^{14}N в $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$, записываемая в течение 10 мин. В качестве образца использовалась таблетка из прессованного порошка уротропина массой 2 г. При этом, амплитуда импульсного магнитного поля составила 5 Гс, а частота модуляции — 122 Гц, эффективная полоса пропускания усилительно-го тракта «синхронный интегратор — фазовый детектор» составила около 1 Гц.

Исследования сигнальных характеристик усилительного тракта показали, что устранение синхронной помехи предложенным методом привело к резкому ослаблению паразитной модуляции и расширению динамического диапазона тракта с 60 до 90 дБ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Mao D., Petersen G. L., Bray P. J. A bi-symmetric square wave Zeeman modulator for nuclear quadrupole resonance // Solid State Nucl. Magn. Reson. — 1992. — Vol. 1, Iss. 4. — P. 227 — 230.

2. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT4053.pdf

3. Jongmin Lee and Sung Ho Choh. Robinson-type nuclear quadrupole resonance spectrometer adapted to field-effect transistors // Review of Scientific Instruments. — 1982. — Vol. 53, Iss. 2. — P. 232 — 236.

4. Браиловский В. В. Импульсный спектрометр ядерного квадрупольного резонанса // Приборы и техника эксперимента. — 2010. — № 2. — С. 138 — 141. [Brailovskii V. V. // Pribory i tekhnika eksperimenta. 2010. N 2. P. 138]

5. Самила А.П., Хандожко В.А. Шумовые характеристики автодинного спин-детектора // Матер. міжнар. наук.-техн. конфер. «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2011». — Украина, г. Севастополь. — 2011. — С. 378. [Samila A.P., Khandozhko V.A. Shumovye kharakteristiki avtoddinnogo spin-detektora // Mater. mizhnar. nauk.-tekhn. konfer. «Sovremennye problemy radiotekhniki i telekommunikatsii RT-2011». Ukraine, Sevastopol. 2011. P. 378]

6. Harding J.C., Wade D.A., Marino R.A. et al. A pulsed NQR-FFT spectrometer for nitrogen-14 // Journal of Magnetic Resonance. — 1979. — Vol. 36, Iss. 1. — P. 21 — 33.

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.01 2012 г.

Politans'kii L. F., Samila A. P., Khandozhko V. A.
The suppression of synchronous interference NQR with Zeeman modulation.

Keywords: NQR, Zeeman modulation, synchronous interference, hexamethylenetetramine.

The principles of frequency and Zeeman modulation in nuclear quadrupole resonance were considered, and the advantages of the latter were shown. The authors propose a method to eliminate the synchronous noise caused by switching of the magnetic field. Results of observations of the resonance line with ^{14}N in the hexamethylenetetramine sample weighing 2 g were given.

Ukraine, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University

Політанський Л. Ф., Саміла А. П., Хандожко В. О.
Заглушення синхронної завади в ЯКР з модуляцією Зеемана.

Ключові слова: ЯКР, модуляція Зеемана, синхронна перешкода, гексаметилентетрамін.

Розглянуто принципи частотної модуляції та модуляції Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі та показано переваги останньої. Запропоновано метод усунення синхронної завади, спричиненої перемиканням магнітного поля. Наведено результат спостереження резонансної лінії ^{14}N з достовірною формою у зразку гексаметилентетраміну масою 2 г.

Україна, м. Чернівці, ЧНУ ім. Юрія Федьковича

УДК 621.391.01

О. М. ЭЛИЯШИВ, д. т. н. Л. Ф. ПОЛИТАНСКИЙ

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: melyart111@ukr.net

БЕЗЫНДУКТИВНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПО СХЕМЕ ЧУА

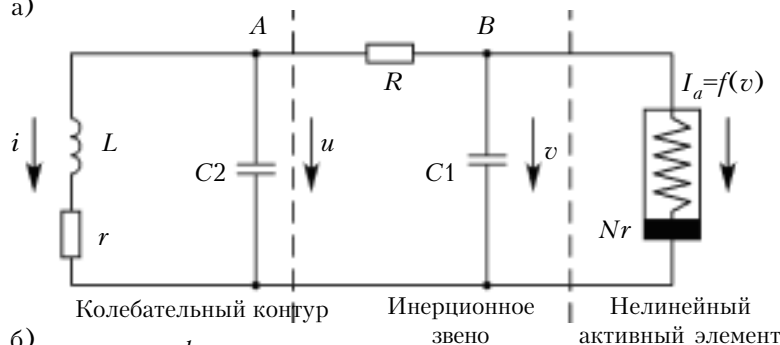
Предложены два альтернативных варианта реализации колебательного звена, которые обеспечивают замену индуктивности в генераторах хаоса. Показано, что использование безындуктивных топологий позволяет избежать влияния разброса значений внутреннего сопротивления катушек индуктивности и позволяет упростить методику синхронизации хаотических генераторов.

Ключевые слова: хаос, безындуктивное колебательное звено, схема Чуа.

На протяжении последних трех десятилетий явлениям детерминированного хаоса уделяется значительное внимание с точки зрения его использования в защищенных системах связи, основными элементами которых являются генераторы хаоса. Благодаря простоте реализации и возможности генерирования различных хаотических сигналов схема генератора Чуа интенсивно исследуется и совершенствуется.

Схемотехнические реализации генератора Чуа [1–3] можно условно разделить на две основные категории. К первой категории относятся схемные реализации нелинейного резистора, ко второй — реализации безындуктивной схемы.

а)



б)

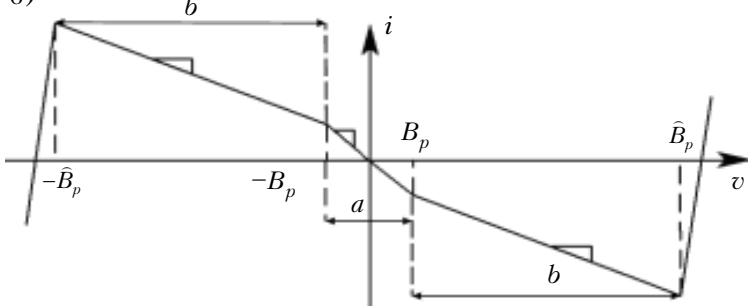


Рис. 1. Схема генератора Чуа (а) и кусочно-линейная ВАХ нелинейного элемента

Существует несколько схемных решений, обеспечивающих замену колебательного звена, построенных на операционных усилителях. Компьютерному моделированию и экспериментальным исследованиям хаотического поведения альтернативных реализаций генератора Чуа и посвящена настоящая работа.

Аналитическая модель хаотического генератора Чуа

Рассмотрим работу генератора Чуа, который является одной из самых простых систем с хаотическим поведением и представляет собой автоколебательную систему с 1,5 степенями свободы [4]. Его схема представлена на рис. 1, а. Она состоит из колебательного контура с потерями, инерционного звена и активного нелинейного элемента. Генерирующий резонансный колебательный контур $rLC2$ связан с активным нелинейным элементом через инерционное звено $RC1$. Поведение системы определяется влиянием нелинейного элемента (на рисунке показан в виде нелинейной проводимости), который играет роль источника питания системы. Следует отметить, что наличие нелинейного элемента является необходимым, но не достаточным условием для возникновения хаоса в системе.

Ограниченный характер хаотических фазовых траекторий системы, обусловленный рассеянием энергии на пассивных элементах R и r , ограничивает ее возрастание в колебательном контуре. Энергетический баланс системы является весьма неустойчивым, непрерывно изменяется во времени и не повторяется как периодическое явление.

Если выбрать в качестве составляющих компонентов вектора состояния системы ток i в колебательном контуре, напряжение u на конденсаторе $C2$ колебательного контура и напряжение v на нелинейном элементе, то согласно первому и второму законам Кирхгофа, можно записать систему трех дифференциальных уравнений, которая описывает поведение генератора [4]:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} = -ri - u; \\ C2 \frac{du}{dt} = i + \frac{v - u}{R}; \\ C1 = \frac{u - v}{R} - f(v). \end{cases} \quad (1)$$

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) нелинейного элемента (рис. 1, б) описывается кусочно-линейной функцией

$$f(v) = m_b v + 0,5(m_b - m_a)[|v + B_p| - |v - B_p|], \quad (2)$$

где m_a , m_b — крутизна линейных участков a и b соответственно (см. рис. 1, б); $+B_p$, $-B_p$ — напряжение в точках перегиба кусочно-нелинейной характеристики.

Первое уравнение системы (1) представляет собой сумму падений напряжения при круговом обходе резонансного колебательного контура, а второе и третье дают, соответственно, сумму токов для узловых точек A и B схемы.

Компьютерное моделирование альтернативных вариантов схемы Чуа

Схему Чуа можно реализовать с использованием эквивалента катушки индуктивности, например, на операционных усилителях [5]. Схема эквивалента индуктивности приведена на **рис. 2**, значение эквивалентной индуктивности равно

$$L_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_3 R_4 C_3}{R_2}. \quad (3)$$

При выбранных значениях номиналов элементов эквивалентной схемы $R1=R2=R3=R4=1$ кОм и $C3=22$ нФ значение эквивалентной индуктивности составляло 22 мГн. Такое схемотехниче-

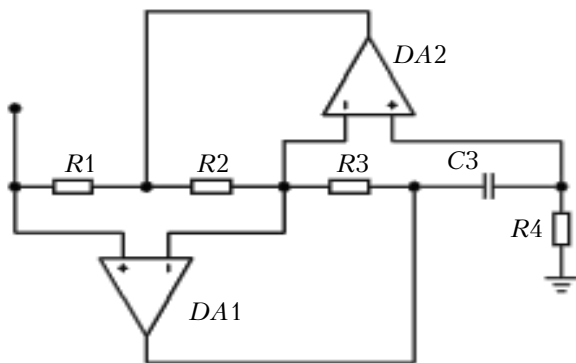


Рис. 2. Схема эквивалентной индуктивности на операционных усилителях

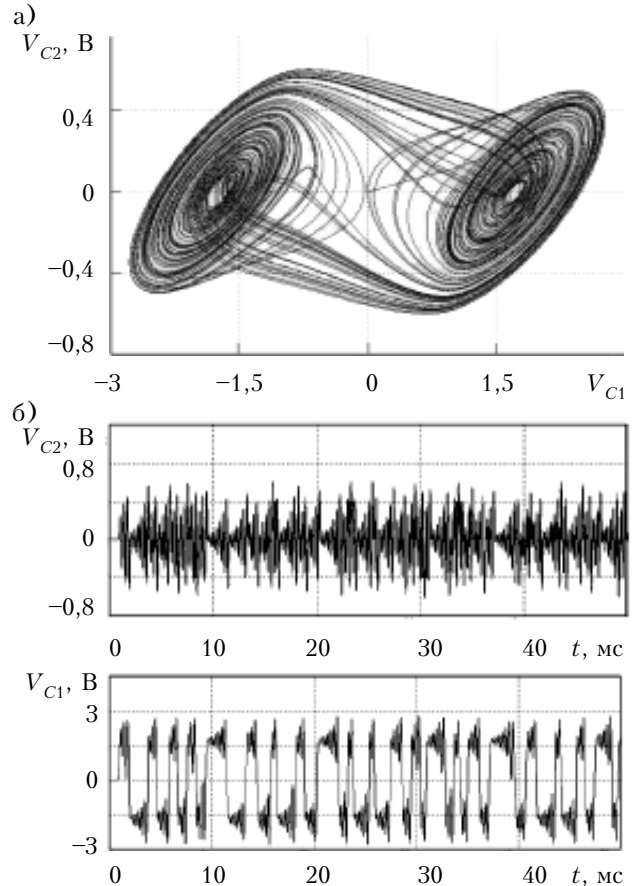


Рис. 3. Модели хаотического двухспирального аттрактора (фазовой траектории системы на плоскости V_{C2} , V_{C1}) (а) и временных зависимостей сигналов V_{C2} и V_{C1} (б) генератора Чуа с колебательным звеном на операционных усилителях

ское решение приводит к ограничению частотного диапазона, которое обусловлено неидеальностью операционных усилителей. При этом в процессе экспериментальных исследований обнаружены искажения сигналов. Колебательное звено на базе операционных усилителей может быть использовано только в схеме Чуа с заземлением.

Результаты компьютерного моделирования в среде Micro-Cap работы генератора Чуа с эквивалентной индуктивностью, построенной на операционных усилителях, приведены на **рис. 3**.

Второй альтернативой колебательного звена является схемная реализация на основе операционных усилителей с обратной связью по току (**рис. 4**) [6]. При этом подходе значение эквивалентной индуктивности равно

$$L_{\text{экв}} = C_1 R_1 R_2. \quad (4)$$

Результаты компьютерного моделирования работы генератора Чуа с таким колебательным звеном приведены на **рис. 5**.

Значение эквивалентной индуктивности 22 мГн соответствует выбранным значениям номиналов элементов, использованных для замены индуктивности $R1=R2=1$ кОм, $C1=22$ нФ.

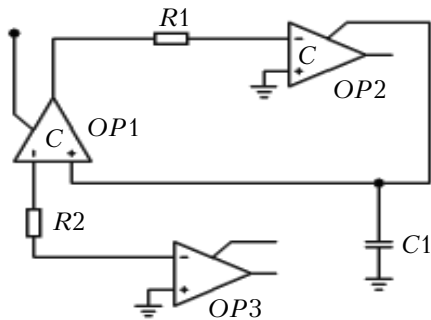


Рис. 4. Схема эквивалентной индуктивности на операционных усилителях с обратной связью по току

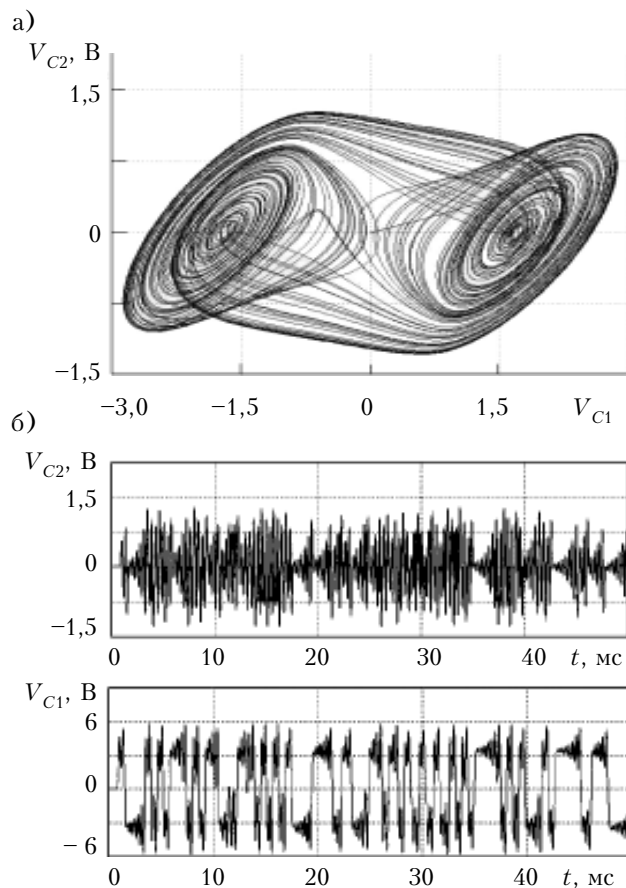


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для схемы на операционных усилителях с обратной связью по току

Следует отметить, что схемотехническая реализация индуктивности на операционных усилителях с обратной связью по току обеспечивает минимальное количество пассивных элементов схемы.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные образцы генераторов хаотических колебаний обоих предложенных вариантов были реализованы с использованием результатов моделирования. Для реализации колебательного звена на операционных усилителях TL082 выбирали следующие номиналы компонентов: $R1=R2=R3=R4=1$ кОм, $C3=22$ нФ, а при реализации колебательного звена на операционных усилителях AD844 с обратной связью

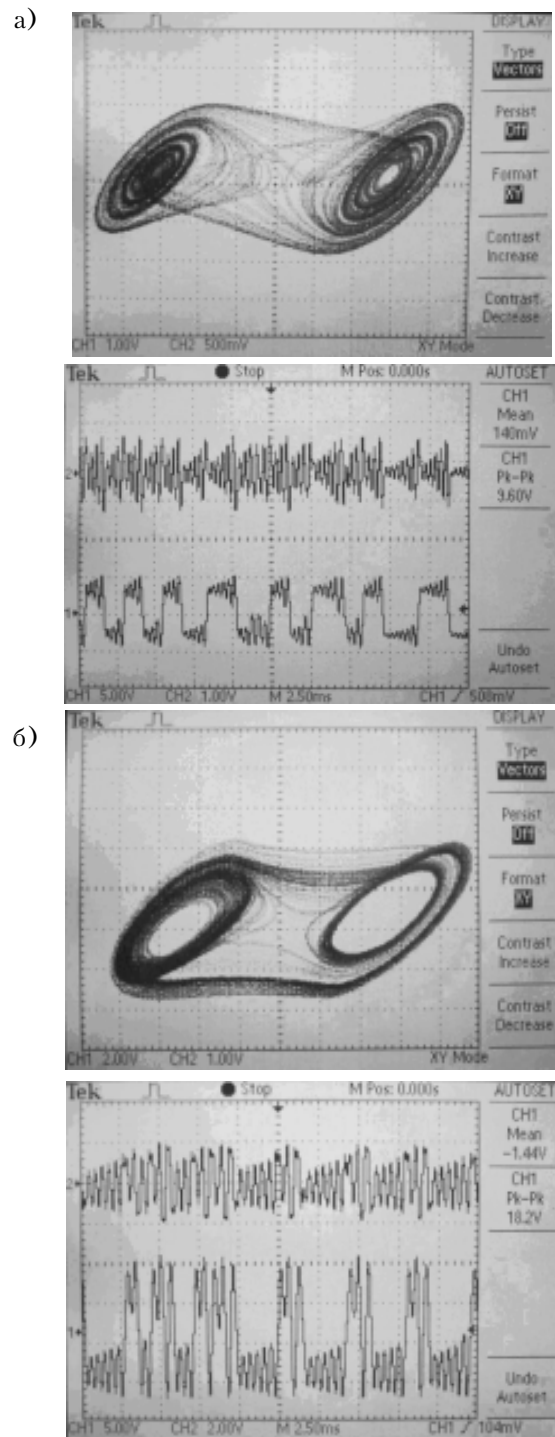


Рис. 6. Аттракторы и колебания напряжения на конденсаторах $C1$ и $C2$ генераторов Чуа с реализацией колебательного звена на операционных усилителях (а) и на операционных усилителях с обратной связью по току (б)

по току значения номиналов компонентов составляли $R1=R2=1$ кОм, $C1=32$ нФ. Нелинейный элемент схемы был построен по классическому варианту реализации, предложенному в [7].

На рис. 6 приведены результаты экспериментальных исследований аттракторов обоих образ-

цов генераторов. Здесь видно, что генератор, который реализован на эквиваленте индуктивности с использованием операционных усилителей, имеет более выраженное хаотическое поведение, чем генератор на операционных усилителях с обратной связью по току. Управление режимами хаотических колебаний генераторов осуществляется изменением значения сопротивления R (см. рис. 1).

Выводы

Проведенные исследования двух модифицированных генераторов на основе схемы Чуа показали, что при безындукционной реализации удается избежать влияния разброса внутреннего сопротивления катушек индуктивности на работу генераторов и упростить процесс синхронизации работы хаотических генераторов. Полученные результаты также позволяют утверждать, что предложенные альтернативные реализации генераторов хаотических колебаний полностью повторяют оригинальное хаотическое поведение схемы Чуа.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Albuel'matti M. T., Aiyad M. K. Chaos in an autonomous active-R circuit // IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. — 1995. — Vol. 42. — P. 1—5.
2. Elwakil A. S., Kennedy M. P. Construction of classes of circuit-independent chaotic oscillators using passive-only nonlinear devices // IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. — 2001. — Vol. 48. — P. 289—306.
3. Elwakil A. S., Soliman A. M. A family of wien-type chaotic oscillators modified for chaos // International Journal Circuit Theory & Applications. — 1997. — Vol. 25. — P. 561—579.
4. Шахтарин Б. И., Кобылкина П. И., Сидоркина Ю. А. и др. Анализ генератора Чуа // В кн.: Генераторы хаотических колебаний. — Москва: Гелиос АРВ, 2007. — С. 150—162. [Shakhtarin B. I., Kobylkina P. I., Sidorkina Yu. A. i dr. // V kn.: Generatory khaoticheskikh kolebanii. Moskva. Gelios ARV. 2007. P. 150]
5. Torres L. A. B., Aguirre L. A. Inductorless Chua's circuit // Electronics Letters. — 2000. — Vol. 36, N 23. — P. 1915—1916.
6. Senani R., Grupta S. S. Implementation of Chua's chaotic circuit using current feedback op-amps // Electronics Letters. — 1998. — Vol. 34, N 9. — P. 892—830.
7. Kennedy M. P. Three steps to chaos — part II: A Chua's circuit primer // IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. — 1993. — Vol. 40, N 10. — P. 657—674.

Дата поступления рукописи
в редакцию 17.10 2011 г.

Eliyashiv O. M., Politanskii L. F. **Non-inductive generator of chaotic oscillations of Chua circuit.**

Keywords: chaos, non-inductive vibrational element, Chua circuit.

Two alternatives for the implementation of the vibrational level, which provide a replacement of inductor in the generators of chaos. It is shown that the use of non-inductive topologies allows to avoid the influence of internal resistance coils variation, and to simplify the method of chaotic generators synchronization.

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University.

Еліяшів О. М., Політанський Л. Ф. **Безіндуктивні генератори хаотичних коливань по схемі Чуа.**

Ключові слова: хаос, безіндуктивна коливальна ланка, схема Чуа.

Запропоновано два альтернативних варіанти реалізації коливальної ланки, які забезпечують заміну індуктивності в генераторах хаосу. Показано, що використання безіндуктивних топологій дозволяє уникнути впливу розкиду значень внутрішнього опору навію індуктивності та дозволяє спростити методу синхронізації хаотичних генераторів.

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Справочник по вакуумной электронике. Компоненты и устройства / Под ред. Дж. Айхмайера, М. К. Тамма.— Москва: Техносфера, 2011.— 504 с.

Тридцать шесть экспертов электронной промышленности, научно-исследовательских институтов и университетов объединили свои усилия в подготовке этого издания. В книге рассмотрены электрофизические основы, современное состояние и применение, а также перспективы использования СВЧ-устройств и систем, оптоэлектронных вакуумных устройств, электронных и ионных пучков, световых и рентгеновских эмиттеров, ускорителей частиц и вакуумных прерывателей. Эти темы дополнены полезной информацией о материалах и технологиях вакуумной электроники и вакуумной техники.



Ю. В. БОНДАРЕНКО, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО,
к. т. н. П. С. САФРОНОВ, д. т. н. В. Н. СИДОРЦЬ¹

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет,

¹Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОЯЧЕЙКОВОГО ТРАНЗИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для оптимизации структуры многоячейкового транзисторного преобразователя с комбинированным управлением предложено использовать аддитивный критерий, учитывающий такие частные критерии, как энергоэффективность, стоимость и объем конструкции преобразователя.

Ключевые слова: транзисторный преобразователь, многоячейковая структура, комбинированное управление, оптимизация структуры, аддитивный критерий.

Для регулирования тока в различных электротехнических установках широко используются транзисторные преобразователи (ТП). Перспективным направлением в развитии преобразовательной техники является построение ТП по модульному принципу, согласно которому ток (напряжение) формируется параллельно (последовательно) соединенными унифицированными транзисторными модулями (ячейками). На сегодняшний день модульный принцип успешно применяется при построении ТП различных типов, в том числе многоуровневых инверторов [1–4], выпрямителей [5], импульсных преобразователей постоянного напряжения [3, 4, 6] и др.

Каждая унифицированная ячейка ТП с модульной структурой может содержать один или несколько силовых транзисторов, защитные и токовыравнивающие элементы, а также элементы управления. Любые, сколь угодно большие, токи и напряжения в многоячейковых преобразователях могут быть получены путем объединения идентичных ячеек сравнительно небольшой мощности. При этом достигается улучшение формы напряжения и тока, повышается гибкость перестройки структуры преобразователя, обеспечивается высокая степень унификации конструкции, повышается надежность работы за счет резервирования ячеек [3, 4].

Следует отметить, что при проектировании преобразователей со сложной структурой разработчики часто сталкиваются с проблемами оптимизации их конструкции. В частности, при проектировании многоячейковых преобразователей необходимо решить, какое количество унифицированных ячеек способно обеспечить требуемые выходные параметры и характеристики. Как правило, для того чтобы выбрать количество ячеек, оптимальное с точки зрения максимального

учета всех требований, предъявляемых к преобразователю, необходимо провести серьезный предварительный анализ исходных данных, выполнить довольно сложные расчеты.

В данной работе исследуется изменение основных характеристик многоячейкового преобразователя при изменении количества и мощности ячеек. Анализ проводится на примере многоячейкового ТП с комбинированным (непрерывно-импульсным) управлением, предложенным в [7] для регулирования тока в установках контактной микросварки с целью получения качественных сварных соединений. Благодаря унифицированной модульной структуре и использованию режима комбинированного управления транзисторами ячеек преобразователь способен обеспечить высокую точность регулирования тока и эффективное энергопотребление.

Выбор критериев оптимизации структуры преобразователя

Преобразователь представляет собой модульную структуру, состоящую из N идентичных транзисторных ячеек (**рис. 1**). Каждая ячейка включает в себя элементарный преобразователь с непрерывным управлением (НеП) и элементарный преобразователь с импульсным управлением (ИмП), соединенные параллельно.

Ток i_n в нагрузке преобразователя формируется как сумма N токов, каждый из которых регулируется отдельной транзисторной ячейкой в пределах от нуля до заданного максимального значения I_{\max} (**рис. 2**). Нарастание тока в нагрузке по заданному закону [8] обеспечивается постепенным введением ячеек в работу. При этом до момента достижения значения I_{\max} током каждой подключаемой ячейки его регулирование осуществляется с высокой точностью в непрерывном режиме, а после достижения I_{\max} это значе-

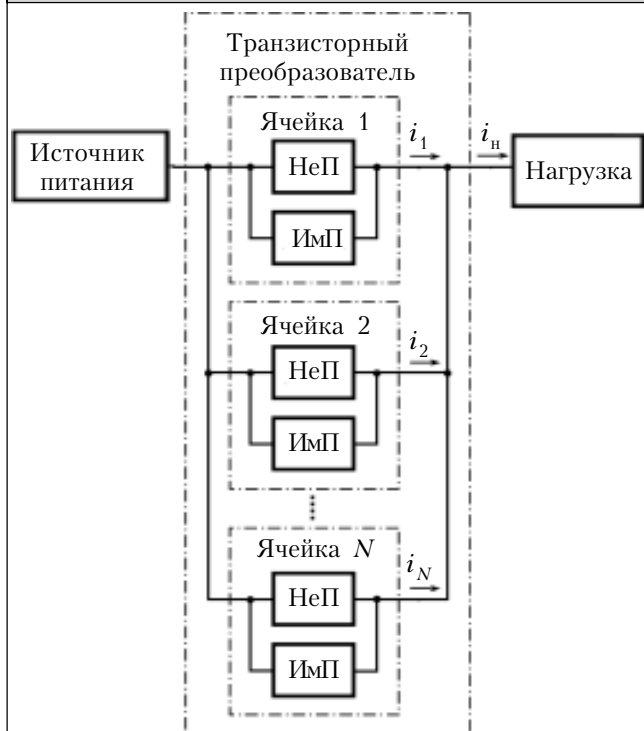


Рис. 1. Упрощенная структура многоячейкового ТП с комбинированным управлением

ние тока продолжает поддерживаться в импульсном режиме до окончания сварки.

Таким образом, в каждый момент времени t ток в нагрузке регулируется определенным количеством ячеек, работающих в импульсном режиме, и одной ячейкой, работающей в непрерывном режиме. При этом последняя компенсирует пульсации, вносимые остальными ячейками, что обеспечивает высокую точность поддержания заданного закона изменения тока [9].

Поскольку в каждый момент времени непрерывно регулируется только часть общего тока нагрузки (от 0 до I_{\max}), мощность потерь на транзисторах существенно ниже, чем при регулировании всего тока нагрузки в непрерывном режиме [10].

Характеристики такого преобразователя в значительной степени определяются количеством унифицированных модулей (ячеек), входящих в его состав, а также их мощностью, причем одни и те же значения его выходных параметров могут быть получены при объединении разного количества ячеек, рассчитанных на большую или меньшую мощность. При этом такие характеристики, как энергоэффективность, стоимость, масса и габариты преобразователя могут существенно изменяться. Например, ток 500 А в нагрузке можно получить путем суммирования токов пяти ячеек, каждая из которых рассчитана на 100 А, или десяти ячеек — на 50 А, но естественно, что структуры преобразователя из пяти более мощных и десяти менее мощных ячеек не являются тождественными. Для рас-

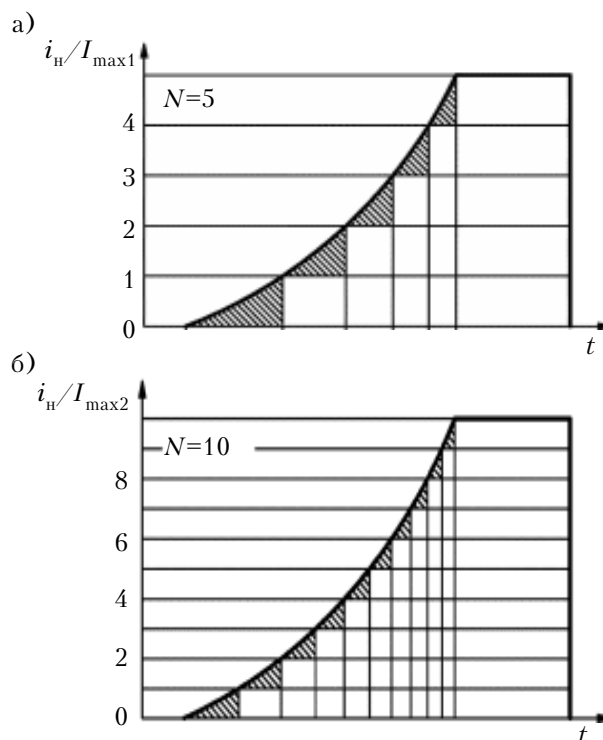


Рис. 2. Кривая тока, сформированная пятью (а) и десятью (б) унифицированными ячейками

считываемого многоячейкового преобразователя увеличение количества ячеек с одновременным снижением их мощности обеспечит повышение энергоэффективности, но с другой стороны может привести к ухудшению массогабаритных и стоимостных показателей.

Таким образом, необходимость нахождения оптимального количества ячеек преобразователя соответствующей мощности очевидна, и для оптимизации структуры должны быть выделены основные критерии.

Для исследуемого многоячейкового ТП с комбинированным управлением в качестве основных критериев выделим его энергоэффективность, стоимость и объем конструкции. Проведем анализ их зависимости от количества (мощности) ячеек в преобразователе для типовых значений выходных параметров, используемых при микросварке.

Энергоэффективность преобразователя

Различие в мощности потерь в ТП при формировании одинаковой кривой тока различным количеством ячеек N (5 и 10), рассчитанных, соответственно, на больший ($I_{\max1}$) и меньший ($I_{\max2}=0,5I_{\max1}$) максимальный ток, можно увидеть на рис. 2. Заштрихованные области здесь соответствуют интервалам использования режима непрерывного управления транзисторами, а их площадь пропорциональна мощности потерь. Как видно, суммарная площадь заштрихованных областей на рис. 2, б заметно меньше, чем на рис. 2, а. Это значит, что энергоэффектив-

ность преобразователя с большим количеством ячеек, рассчитанных на меньший ток, выше.

Среднюю рассеиваемую на транзисторах преобразователя мощность $P_{\text{ср}}$, состоящую из потерь на интервалах работы в непрерывном и импульсном режимах, можно рассчитать по формуле [10]

$$P_{\text{ср}} = \sum_{k=1}^N \left[\int_{t_k}^{t_{k+1}} (i_n(t) - I_{\text{max}}(k-1)) \times (U_{\text{н}} - u_n(t)) dt + (k-1) P_{\text{ср}k}^{\text{имп}} \times (t_{k+1} - t_k) \right] / (t_{\text{кон}} - t_{\text{нач}}), \quad (1)$$

где $P_{\text{ср}k}^{\text{имп}}$ — средняя мощность потерь на элементах k -й ячейки в импульсном режиме;

$U_{\text{н}}$ — напряжение питания преобразователя;

$u_n(t)$ — мгновенное значение напряжения нагрузки преобразователя;

I_{max} — максимальный ток ячейки;

$t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}$ — моменты начала и окончания этапа нарастания тока по степенному закону.

Представленные далее результаты расчетов были получены для условий формирования заданной кривой тока различным количеством ячеек (от 2 до 20) при следующих значениях основных параметров:

- предельный уровень тока в нагрузке 500 А;
- длительность интервала нарастания тока в нагрузке 1 мс;
- закон изменения тока на интервале нарастания $i_n(t) = at^2$, где a — коэффициент, зависящий от параметров сварочного импульса;
- частота переключения транзисторов при импульсном управлении 50 кГц.

Как видно из **рис. 3**, формирование кривой тока большим количеством ячеек меньшей мощности однозначно позволяет повысить энергоэффективность преобразователя. Однако существенная нелинейность приведенной зависимости свидетельствует о том, что увеличение N на

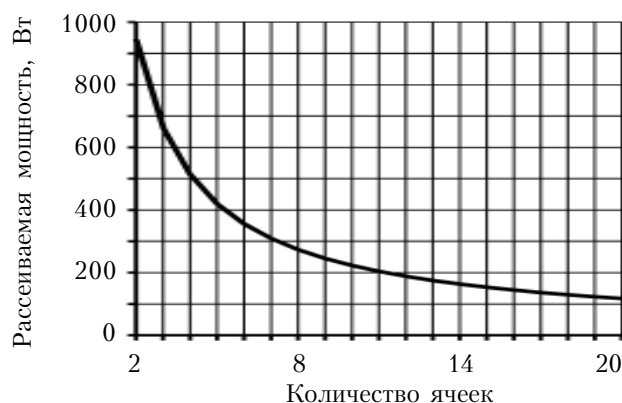


Рис. 3. Зависимость рассеиваемой мощности от количества ячеек в преобразователе

разных участках исследуемого интервала дает разный эффект. Так, при увеличении количества ячеек, например, с трех до четырех мощность потерь снижается на 150 Вт, а при увеличении N с тринадцати до четырнадцати — всего на 15 Вт. Это необходимо учитывать при разработке структуры преобразователя, чтобы избежать неоправданного, с точки зрения повышения энергоэффективности, увеличения количества ячеек.

Стоимость преобразователя

Оценку изменения стоимости ТП в зависимости от количества ячеек в нем сведем к оценке изменения стоимости основных элементов, входящих в состав силового блока преобразователя, поскольку она составляет основную часть стоимости всего устройства. Для расчета воспользуемся формулой

$$C_{\Sigma} = N \sum_{n=1}^p q_n C_n, \quad (2)$$

где C_{Σ} — суммарная стоимость элементов;

p — количество наименований элементов;

q_n, C_n — количество и стоимость элементов n -го наименования соответственно.

Основными элементами силового блока преобразователя являются транзисторы, обратные диоды, измерительные шунты и дроссели фильтра. Их тип определяется значением максимального тока ячейки, которое вычисляется по формуле $I_{\text{max}} = I_{\text{пр}} / N$ ($I_{\text{пр}}$ — заданный предельный уровень тока в нагрузке).

Для подбора типа дросселя необходимо рассчитать индуктивность L , исходя из необходимости обеспечения среднего значения сглаженного тока, равного максимальному току ячейки [11]. Амплитуда пульсации ΔI_L в расчетах была принята равной 10% от среднего значения сглаженного тока, а расчет проводился по формуле

$$L = 0,5 U_{\text{н}} \gamma (1 - \gamma) T / (\Delta I_L), \quad (3)$$

где γ — коэффициент заполнения импульсов;

T — период импульсов управления транзистором.

При вычислении стоимости элементов ТП необходимо также иметь в виду, что значительные токи, протекающие в силовых цепях преобразователя, вызывают нежелательный нагрев транзисторов. Это избыточное тепло должно быть отведено от транзисторов для обеспечения их надежного функционирования. Поэтому в преобразователях с небольшим количеством ячеек, рассчитанных на большие токи, на силовых транзисторах должны быть установлены охлаждающие радиаторы, стоимость которых также нужно учитывать при вычислении общей стоимости элементов.

Выбрать радиаторы охлаждения для транзисторов ячеек можно из каталогов фирм-произво-

Типы и стоимость элементов силового блока преобразователя, обеспечивающего предельный ток 500 А [12–16]

N	I_{\max} , А	Транзистор		Диод		Шунт		Дроссель	
		Тип	Цена, грн.	Тип	Цена, грн.	Тип	Цена, грн.	Индуктивность, мкГн	Цена, грн.
2	250	IRLS3036	48,48	300CNQ045	430,16	ЕК-75ШИП-300А	184,21	0,26	0,98
5	100	IRFP3306	15,72	120NQ045	176,00	ЕК-75ШИП-150А	141,37	0,64	0,49
10	50	IRLU8721	2,48	MBR6045	22,40	ЕК-75ШИП-60А	84,25	1,28	0,29
20	25	IRLU7807	2,24	STPS30L45	5,68	ЕК-75ШИП-30А	82,82	2,55	0,17

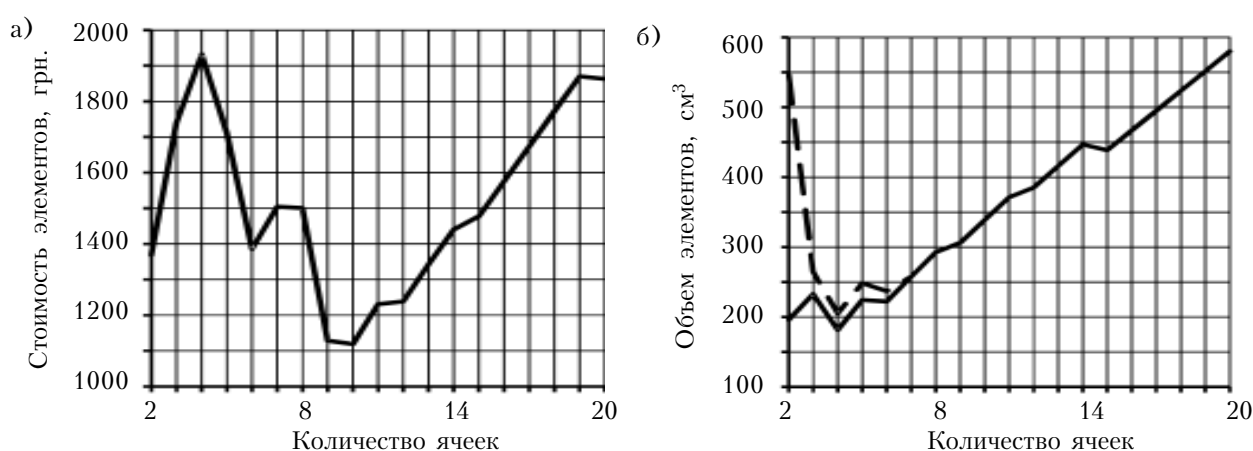


Рис. 4. Зависимость стоимости (а) и объема (б) элементов силового блока от количества ячеек в преобразователе при $I_{\max}=500$ А

дителей по значениям теплового сопротивления R_{θ} , которое рассчитывается согласно формуле

$$R_{\theta} = (T_{\text{пр}} - T_{\text{норм}}) / P_{\text{ср}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пр}}$, $T_{\text{норм}}$ — соответственно, предельная и нормальная (25°) температура транзистора.

Проведенные расчеты показали, что при количестве ячеек больше шести протекающий ток не вызывает опасного перегрева силовых транзисторов и поэтому необходимости в установке радиаторов нет.

В таблице для примера приведены типы и стоимость основных элементов силового блока, выбранных в соответствии с рассчитанными значениями максимального тока ячейки при некоторых N . Стоимость радиаторов охлаждения включена в стоимость транзисторов для количества ячеек $N < 7$.

Представленный на рис. 4, а график изменения стоимости элементов силового блока в зависимости от количества ячеек в преобразователе имеет выраженный минимум. Минимальная суммарная стоимость элементов преобразователя получена при количестве ячеек, равном десяти,

а наибольшая — четырём. Высокая суммарная стоимость при небольшом количестве ячеек обусловлена значительно большей ценой элементов, рассчитанных на большие значения тока. Разница в цене особенно велика для диодов. Например, цена диода, рассчитанного на 180 А в четырнадцать раз больше, чем рассчитанного на 60 А. Поэтому из-за существенной разницы в цене на элементы с высоким и низким предельным значением тока суммарная стоимость элементов в начале и в конце рассматриваемого диапазона N примерно одинакова.

Объем конструкции преобразователя

Аналогично оценке стоимости, изменение объема конструкции ТП в зависимости от количества ячеек в нем рассмотрим только для силового блока преобразователя.

Для расчета воспользуемся формулой

$$V_{\Sigma} = N \sum_{n=1}^p q_n V_n, \quad (5)$$

где V_{Σ} — суммарный объем элементов в преобразователе;

V_n — объем элементов определенного наименования.

Линейные размеры элементов для расчета их объема выбирались из [12, 14, 16, 17]. Линейные размеры дросселей рассчитывались исходя из их диаметра и количества витков, а также диаметра провода, из которого они изготавливаются.

Результаты расчетов представлены на рис. 4, б, где сплошная линия соответствует изменению объема конструкции ТП без радиаторов, штриховая — с учетом радиаторов ($N < 7$).

Как видно из графиков, максимальный суммарный объем (при $N=20$) превышает минимальный (при $N=4$) в 3,2 раза. За исключением начального интервала, график изменения объема основных элементов преобразователя является возрастающим, однако содержит участки, на которых увеличение количества ячеек в преобразователе не приводит к существенному увеличению объема его конструкции либо, напротив, приводит к его уменьшению. Это обусловлено переходом к более компактным типам корпусов элементов, которые рассчитаны на меньший предельный ток.

Разумеется, простое арифметическое сложение объемов элементов преобразователя не дает точной информации об объеме конечного устройства, который определяется также способом размещения элементов на печатной плате. Однако такой расчет вполне пригоден для предварительной оценки.

Определение оптимальной структуры многоячейкового преобразователя

Как показали расчеты, зависимости основных технико-экономических показателей преобразователя от количества (мощности) ячеек имеют различный и довольно сложный характер, поэтому сведем выделенные показатели к аддитивному критерию, учитывающему частные критерии с соответствующими весовыми коэффициентами, и получим целевую функцию

$$F(N) = \sum_{i=1}^m k_i \frac{F_i(N)}{F_{i0}(N)}, \quad (7)$$

где $F_i(N)$ — значение i -го критерия;

$F_{i0}(N)$ — нормирующий делитель (желаемое значение i -го критерия);

k_i — весовой коэффициент i -го критерия ($\sum k_i = 1$);

m — количество критериев ($m=3$).

В качестве нормирующих делителей будем использовать лучшие значения частных критериев, т. е. наименьшие значения мощности потерь, стоимости и объема конструкции преобразователя.

Весовые коэффициенты выбираются в каждом конкретном случае в зависимости от приоритетов. В нашем случае значимость их примерно одинакова, поэтому весовой коэффици-

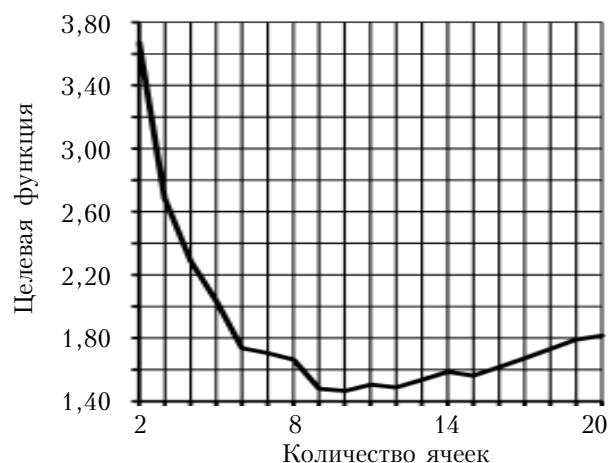


Рис. 5. График целевой функции

ент мощности потерь примем равным 0,3, стоимости — 0,4, объема конструкции — 0,3.

Оптимальной структуре многоячейкового преобразователя соответствует минимум целевой функции $F(N)$. Как видно из рис. 5, для заданных условий он достигается при $N=10$. Таким образом, для рассматриваемого транзисторного преобразователя, обеспечивающего предельный ток 500 А, при заданных значениях весовых коэффициентов основных выделенных критериев оптимальной является структура, состоящая из десяти ячеек, рассчитанных на максимальное значение тока 50 А.

Таким образом, полученная целевая функция для многоячейкового транзисторного преобразователя с комбинированным управлением установки контактной микросварки позволяет для заданных условий сварки определить оптимальные с точки зрения энергоэффективности, стоимости и объема конструкции количество и мощность ячеек.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зиновьев Г.С., Зотов Л.Г., Темлякова З.С. Пути эволюции многоуровневых инверторов напряжения // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 6. — 2008. — С. 58–69. [Zinov'ev G.S., Zotov L.G., Temlyakova Z.S. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotekhniki. Part 6. 2008. P. 58]
2. Khomfoi S., Tolbert L.M. Multilevel Power Converters. Power Electronics Handbook. — Elsevier, 2007.
3. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986. [Moin V.S. Stabilizirovannye tranzistornye preobrazovateli. Moscow. Energoatomizdat. 1986]
4. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи. — М.: Радио и связь, 1988. [Romash E.M., Drabovich Yu.I., Yurchenko N.N., Shevchenko P.N. Vysokochastotnye tranzistornye preobrazovateli. Moscow. Radio i svyaz'. 1988]
5. А.с. 744933 СССР. Устройство для заряда емкостного накопителя энергии / Д.И. Панфилов, В.С. Иванов, В.Н.

Сирик. — 30.06.1980. [A.s. 744933 SSSR. / D.I. Panfilov, V.S. Ivanov, V.N. Sirik. 30.06.1980]

6. Кадацкий А.Ф., Малявин И.П. Асимметрия электрических процессов в импульсных преобразователях постоянного напряжения модульной структуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — №3. — С. 7—14. [Kadatskii A.F., Malyavin I.P. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2008. N 3. P. 7]

7. Паэрланд Ю.Э., Бондаренко А.Ф., Бондаренко Ю.В. Транзисторный преобразователь постоянного тока с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 3. — 2010. — С. 104—107. [Paerland Yu.E., Bondarenko A.F., Bondarenko Yu.V. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotekhniki. Part 3. 2010. P. 104]

8. Паэрланд Ю.Э., Бондаренко А.Ф. Источник питания для контактной микросварки с программируемой формой сварочного импульса // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 4. — С. 51—54. [Paerland Yu.E., Bondarenko A.F. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2006. N 4. P. 51]

9. Paerland Y.E., Bondarenko O.F., Bondarenko I.V. Multicell-type Transistor Converter with Combined Control for Micro Resistance Welding // 7th International Conf. Compatibility and Power Electronics. — Tallinn, Estonia. — 2011. — P. 309—314.

10. Бондаренко Ю.В. Оценка энергоэффективности многоэлектродного транзисторного преобразователя с комбинированным управлением // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 1. — 2010. — С. 5—10. [Bondarenko Yu.V. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Silova elektronika ta energoeffektivnist'. Part 1. 2010. P. 5]

11. Головацкий В.А., Гулякович Г.Н., Конев Ю.И. и др. Источники вторичного электропитания. — М.: Радио и связь, 1990. [Golovatskii V.A., Gulyakovich G.N., Konev Yu.I. i dr. Istochniki vtorichnogo elektropitaniya. M. Radio i svyaz'. 1990]

12. International Rectifier <http://www.irf.com>.

13. US — Electronic Components Distributor Newark <http://www.newark.com>.

14. Интернет-магазин для радиолюбителей <http://www.ekits.ru>. [Internet-magazin dlya radiolyubitelei <http://www.ekits.ru>]

15. Электротехническое оборудование <http://www.voltus.com.ua>. [Elektrotekhnicheskoe oborudovanie <http://www.voltus.com.ua>]

16. Чип и Дип — электронные компоненты и приборы <http://www.chipdip.ru>. [Chip i Dip — elektronnyye komponenty i pribory <http://www.chipdip.ru>.]

17. Vishay — manufacturer of discrete semiconductors and passive components <http://www.vishay.com>.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.11 2011 г.

Bondarenko Yu. V., Bondarenko A. F., Safronov P. S., Sydorets V. N. **Optimization of structure of multicell-type transistor converter.**

Keywords: transistor converter, multicell-type structure, combined control, optimization of structure, additive criterion.

To optimize the structure of multicell-type transistor converter with combined control it is proposed to use an additive criterion, which would take into account such particular criteria as efficiency, cost and construction volume of the converter.

Ukraine, Alchevsk, Donbass State Technical University, Paton Electric Welding Institute of NASU.

Бондаренко Ю. В., Бондаренко О. Ф., Сафронов П. С., Сидорець В. М. **Оптимізація структури багатокіркового транзисторного перетворювача.**

Ключові слова: транзисторний перетворювач, багатокіркова структура, комбіноване управління, оптимізація структури, адитивний критерій.

Для оптимізації структури багатокіркового транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням запропоновано використовувати адитивний критерій, що враховує такі окремі критерії, як енергоефективність, вартість та об'єм конструкції перетворювача.

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет, Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ.

НОВЫЕ КНИГИ

Успехи нанотехнологий: электроника, материалы, структуры / Под ред. Дж. Дэвиса, М. Томпсона. — Москва: Техносфера, 2011. — 496 с.

Новейшие технологии включают в себя разработку, описание, а также производство и практическое использование самых разнообразных наноразмерных структур, устройств и систем. В междисциплинарном поле этой области исследований пересекаются экспериментальные и теоретические разработки химиков, физиков, инженеров-электронщиков, механиков, материаловедов, биохимиков, молекулярных биологов. Именно сочетание различных подходов и методов является характерной особенностью наиболее интересных и многообещающих разработок в нанотехнологиях. Книга представляет собой сборник последних результатов, полученных молодыми английскими учеными, многие из которых — стипендиаты Королевского общества или Исследовательского совета инженерных и физических наук Великобритании. Их работы ведутся на самых передовых рубежах познания, а в более широком контексте создают панораму современного состояния нанонауки и нанотехнологии вообще.



УДК 681.784.7:615.849.5

К. т. н. Н. А. ДЕНИСОВ, А. А. РЕДЧУК

Украина, НТУУ “Киевский политехнический институт”

E-mail: denysov@hotmail.com

МАТРИЧНЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

Предложен опытный образец излучателя для фотодинамической терапии с использованием фотосенсибилизатора Гиперфлав. Аппарат не имеет аналогов в Украине, по ожидаемым техническим характеристикам не уступает зарубежным образцам аналогичного назначения и может быть легко адаптирован к любому другому типу фотосенсибилизатора. В опытном образце излучателя комплексно решены проблемы обеспечения необходимого уровня фотодинамической дозы и управления значительными массивами светодиодов.

Ключевые слова: фотодинамическая терапия, фотосенсибилизатор Гиперфлав, матричный светодиодный излучатель.

Одним из приоритетных направлений развития современной клинической медицины является освоение минимально инвазивных технологий, в том числе с использованием оптического излучения, которые направлены на достижение максимального клинического эффекта при минимизации вреда, наносимого пациенту.

Одним из наиболее эффективных и наименее инвазивных современных методов лечения онкозаболеваний, особенно на ранних стадиях, является метод фотодинамической терапии (ФДТ). Он основан на применении специального вещества — фотосенсибилизатора, которое способно избирательно накапливаться в новообразованиях и под действием оптического излучения определенной длины волны, лежащей в эффективной полосе его поглощения, превращать обычный кислород, находящийся в опухоли, в активные формы кислорода, которые разрушают раковые клетки [1].

В соответствии с основными принципами реализации метода фотодинамической терапии источник излучения должен генерировать оптическое излучение в эффективной полосе поглощения используемого фотосенсибилизатора. При этом метод ФДТ может быть реализован при трех возможных режимах облучения биотканей [2]:

- однократный, с высоким уровнем интенсивности излучения (рФДТ);
- повторяемый, с последовательными порциями излучения достаточно высокоуровневой интенсивности (пФДТ);
- непрерывный, с низкоуровневой интенсивностью излучения (нФДТ).

Первые два режима обычно реализуются с использованием мощных лазерных источников излучения (постоянных или импульсных), последний (нФДТ) не требует формирования высокого уровня мгновенной облученности биоткани и может быть успешно реализован для ФДТ наружных органов с использованием матриц светоизлучающих диодов (СИД) [3].

Отечественный фотосенсибилизатор Гиперфлав (производства НПЦ «Борщаговский химико-фармацевтический завод», г. Киев) имеет максимум поглощения на длине волны 595 ± 3 нм, что не совпадает с длинами волн излучения существующих лазеров. Целью настоящей работы была разработка многоэлементного источника излучения на светодиодах, позволяющего реализовать метод нФДТ с использованием Гиперфлава. При этом также ставилась задача разработки схемы управления большими массивами светодиодов, включая регулирование их яркости для обеспечения необходимого уровня облученности биоткани в операционной зоне.

Поставленная задача решалась в три последовательных этапа:

- разработка принципиальной схемы построения аппарата для ФДТ наружных органов с использованием матрицы светоизлучающих диодов [4];
- создание лабораторного макета 126-элементной матрицы светодиодов [5] с отработкой электрической схемы управления их излучением;
- разработка опытного образца излучателя для ФДТ на базе многоэлементной матрицы из более чем 1200 светодиодов.

Конструкция и характеристики излучателя

Светодиодная матрица в виде сегмента сферической поверхности (диаметром 220 мм) в макетном образце включает 126 светодиодов, расположенных на пяти параллелях и объединенных в три конструктивных (с точки зрения электроники) кластера (рис. 1).

Задача обеспечения необходимого для ФДТ уровня облученности операционной зоны решается использованием в качестве оптического дистального инструмента зеркального усеченного конуса, обращенного своим большим основанием к светодиодной матрице. Конструктивные параметры зеркального конуса (угол конусности, высота, диаметры большего и меньшего оснований) рассчитывались из условия обеспечения прохождения через него излучения краевых светодиодов при отсутствии обратного отражения. При этом считалось, что операционная зона совпадает с выходным торцом зеркального конуса (рис. 2).

Светоизлучающими диодами, которые по своим спектрально-энергетическим характеристикам наиболее подходят для реализации метода нФДТ с использованием фотосенсибилизатора Гиперфлав, являются светодиоды типа 510MY8C (Hebei Ltd., Китай). Они имеют максимум излучательной способности на длине волны $\lambda_{\max} = 588 \pm 2$ нм, высокое значение силы света (у СИД старой моди-



Рис. 1. Макетный образец матричного светодиодного излучателя

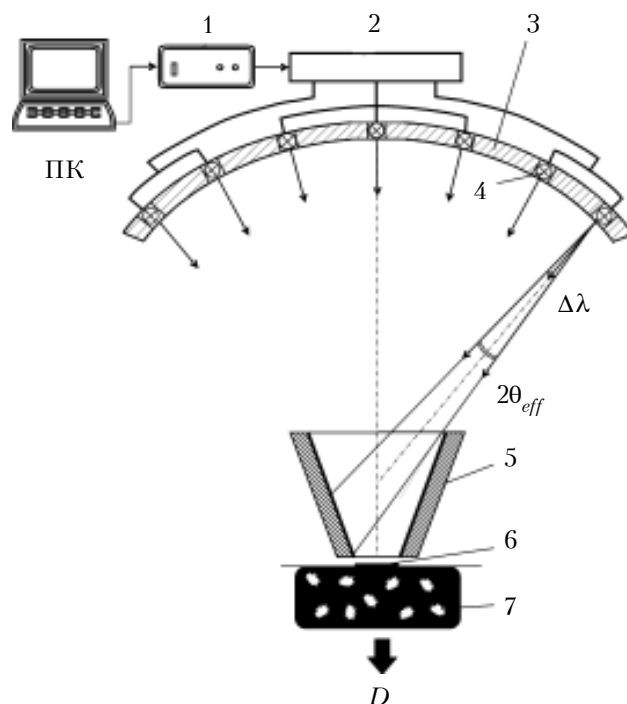


Рис. 2. Блок-схема матричного светодиодного излучателя для фотодинамической терапии:

1 — пульт управления; 2 — электронная схема управления кластерами светодиодов; 3 — матричный светодиодный излучатель; 4 — светоизлучающий диод; 5 — зеркальный конус; 6 — операционная зона на поверхности биоткани 7, накопившей фотосенсибилизатор в патологических клетках

фикации — 6000 мккд, новой модификации — 10000 мккд), достаточно узкие спектральную характеристику ($\Delta\lambda_{0,5} = 35 - 40$ нм) и диаграмму направленности ($2\theta = 46^\circ$). При этом эффективный угол диаграммы направленности излучения СИД типа 510MY8C, в котором содержится не менее 80% энергии, составляет $2\theta_{\text{eff}} = 18^\circ$ [6]. Расчеты показали, что для достижения эффективной фотодинамической дозы D (не менее 50 Дж/см^2) в операционной зоне диаметром 40–60 мм необходимо использование 1200–1400 светодиодов типа 510MY8C новой модификации.

Расчетные технические характеристики опытного образца матричного светодиодного излучателя с суммарным числом светодиодов 1344 приведены в **таблице**.

Испытания макета для нФДТ показали перспективность применения светодиодов малой мощности в терапевтических излучателях. Однако существенное увеличение количества светодиодов при переходе от лабораторного макета к опытному образцу вызвало необходимость разработки эффективной схемы управления излучением значительного количества светодиодов.

Следует отметить, что использование более мощных светодиодов практически не дает выигрыша при построении системы ФДТ. Светодиоды с рассеиваемой мощностью 0,5 Вт и выше

Технические характеристики матричного светодиодного излучателя	Зона излучателя		
	центральная	средняя	краевая
Количество СИД, шт.	192	384	768
Суммарная мощность светодиодов, мВт, более	300	600	1200
Плотность мощности в операционной зоне, мВт/см ² : — без зеркального конуса — с зеркальным конусом	3,01 3,80	4,52 7,01	6,39 12,68
Суммарная плотность мощности в операционной зоне, мВт/см ² : — без зеркального конуса — с зеркальным конусом	13,92 23,49		

имеют большие размеры и требуют дополнительных мер по отводу от них тепла. Увеличение же расстояния между светодиодами, несмотря на уменьшение их количества, приводит к тому, что размеры излучателя и зеркального конуса остаются теми же, что и при использовании СИД малой мощности. То есть с точки зрения уменьшения габаритов аппарата применение более мощных светодиодов не дает преимуществ. А поскольку необходимое количество таких светодиодов все равно измеряется сотнями, их применение не приводит к упрощению системы.

Повысить мощность светового потока с единицы площади излучателя можно только путем приближения рабочего тока светодиодов к границе допустимых значений. Таким образом, при разработке опытного образца матричного светодиодного излучателя возникают два взаимосвязанных и противоречивых требования:

- повысить мощность излучения до максимально возможного для данного типа светодиодов значения;
- обеспечить необходимый уровень надежности, увеличить время наработки на отказ и уменьшить время простоя при ремонте.

Пути решения задачи управления матричным излучателем

Совершенствование технологии изготовления светодиодов позволяет значительно повысить их выходные энергетические характеристики при сохранении размеров и электрических параметров, что открывает возможность последующей модернизации матричного светодиодного излучателя. Повышенная светоотдача каждого светодиода позволяет, в зависимости от требований к системе, либо уменьшить общее количество светодиодов, либо увеличить область облучения при неизменном их количестве.

Из соображений удобства производства и обслуживания (ремонта) системы принято решение разбить излучающее поле на кластеры с небольшим количеством светодиодов — от нескольких десятков до сотни. В опытном образце светодиодная матрица включает в себя 24 цен-

тральных кластера квадратной формы по 48 светодиодов и 8 краевых кластеров прямоугольной формы по 24 светодиода в каждом. При необходимости снижения плотности мощности облучения биоткани в операционной зоне можно снижать ток, проходящий через светодиоды, либо отключать часть светодиодов, осуществляя по-кластерное управление их включением.

Относительно большое тепловыделение в излучателе при максимальном токе через светодиоды наряду с изменением температуры окружающей среды приводит к значительному изменению температуры кристаллов светодиодов и, как следствие, к изменению их электрических характеристик. Требование повышения КПД системы питания светодиодов, вызванное как общими требованиями к экономии ресурсов окружающей среды, так и желанием снизить тепловыделение в излучателе, определяет организацию кластеров в виде набора цепочек из включенных последовательно светодиодов. Такое включение, однако, приводит к еще большему изменению напряжения в цепочке при изменении температуры, что вызывает необходимость стабилизации тока в схеме питания светодиодов.

Практически все современные осветительные приборы, содержащие большое количество светодиодов малой мощности, построены по одной из двух схем. В первом случае стабилизируется суммарный ток нескольких параллельно соединенных цепочек светодиодов. Во втором — путем стабилизации напряжения на токоизмерительном резисторе в одной из цепочек светодиодов кластера стабилизируется ток только в этой цепочке. В остальных цепочках размещаются выравнивающие резисторы того же номинала, в результате через них идет такой же ток. Как показали проведенные исследования, в пределах одной партии разброс значений параметров светодиодов очень мал, поэтому в обеих схемах ток между цепочками распределяется достаточно равномерно.

Однако существуют и недостатки предложенных схем. Так, от партии к партии наблюдается

значительный разброс значений электрических параметров светодиодов. При выходе из строя одного из светодиодов (и нарушении работы всей цепочки, в которую он включен) прибор подлежит ремонту. После замены вышедшего из строя светодиода на аналогичный, но из другой партии, изменятся электрические характеристики соответствующей параллельной цепочки, и ток в ней будет отличаться от остальных. Одним из решений этой проблемы может быть снабжение каждого излучателя комплектом запасных светодиодов из той же партии, что и светодиоды для монтажа кластеров. Учитывая относительную дешевизну светодиодов при их оптовой покупке, осуществить такую комплектацию совсем не сложно.

Другим недостатком является то, что в случае выхода из строя одного из светодиодов изменится ток в остальных цепочках. В зависимости от типа отказа (обрыв или короткое замыкание) и места размещения отказавшего светодиода в кластере, ток в некоторых цепочках увеличится. При эксплуатации излучателя вблизи максимальных токов это приведет к немедленному выходу из строя либо значительному сокращению срока службы других светодиодов кластера.

Поэтому для терапевтического излучателя нами была выбрана другая схема, имеющая несколько большую себестоимость, но избавляющая не только от необходимости комплектации запасными светодиодами, но и от контроля за принадлежностью светодиодов в кластерах к одной партии. В этом варианте для стабилизации тока через светодиоды используются специали-

зированные микросхемы драйверов светодиодов с поканальной стабилизацией тока (микросхемы TLC5917, TLC5928 и т.п. производства Texas Instruments, микросхемы MBI5029, MBI5171 и т.п. фирмы Macroblock, Тайвань). Эти микросхемы обеспечивают независимую стабилизацию тока в цепочках, поканальное управление и контроль состояния управляющим микроконтроллером через интерфейс SPI с возможностью каскадирования. Также они контролируют состояние цепочек светодиодов (наличие обрывов и короткого замыкания), что повышает эксплуатационные характеристики изделия, позволяя как откорректировать параметры сеанса при выходе из строя отдельных светодиодов, так и ускорить диагностику и ремонт изделия.

Таким образом, предлагаемый матричный излучатель представляет собой набор кластеров светодиодов с общим питанием. Из соображений безопасности для излучателя выбрано внешнее напряжение 20–27 В постоянного тока, которое можно получить от любого сертифицированного источника питания.

Кроме кластеров, внутри излучателя находятся два стабилизатора напряжения и плата управляющего микроконтроллера. Мощный стабилизатор напряжения 14–16 В предназначен для питания массива светодиодов. Напряжение питания подстраивается в зависимости от характеристик светодиодов и температуры внутри излучателя. Питание светодиодов разведено по кластерам радиально, чтобы избежать потерь напряжения на большом количестве контактов. Маломощный стабилизатор с выходным напря-

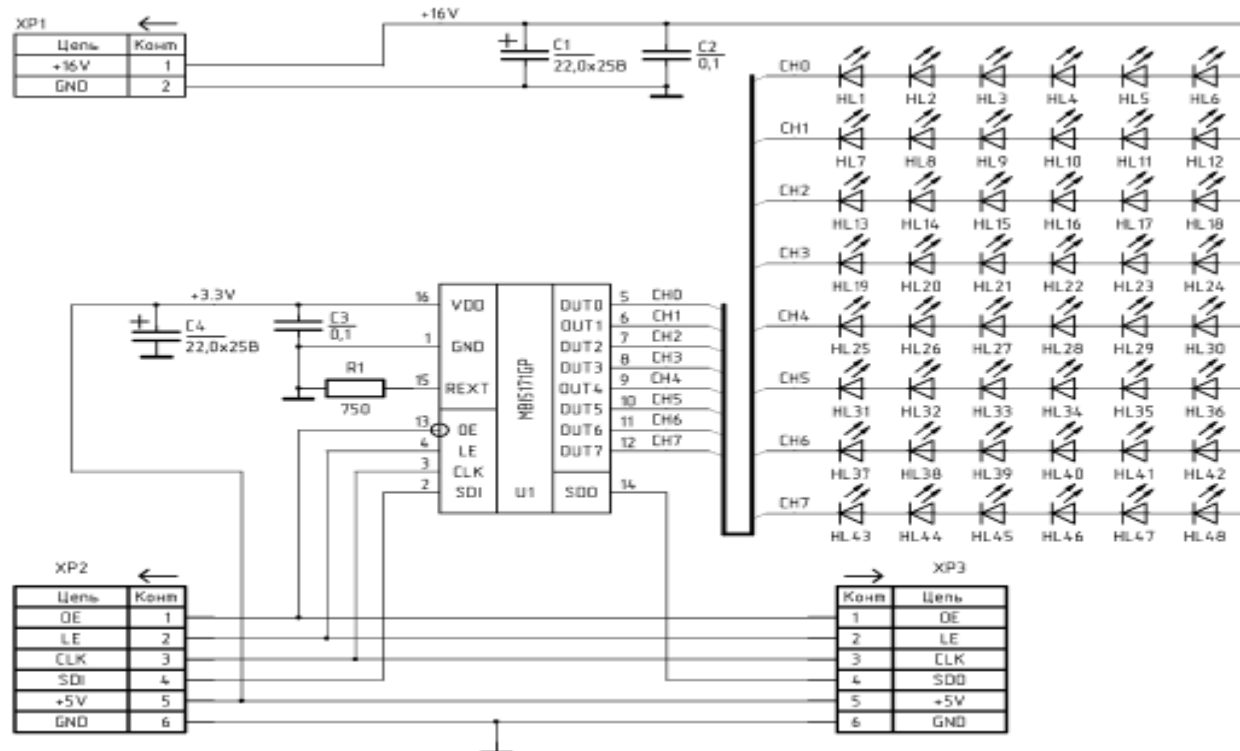


Рис. 3. Схема кластера матричного светодиодного излучателя с использованием интегрального драйвера

жением 3,3 В предназначен для питания цифровой части драйверов, управляющего микроконтроллера, элементов индикации и интерфейса с компьютером (рис. 3).

Плата управляющего микроконтроллера осуществляет общее управление системой и имеет интерфейс связи с персональным компьютером, с которого выдаются задания на терапевтические сеансы и на котором ведется их учет. Управление сеансом (начало, пауза, остановка) и индикация его прохождения (установленная интенсивность, заданное и оставшееся до конца сеанса время) осуществляется оператором с пульта управления излучателем. Микроконтроллер выдает команды на включение стабилизатора питания массива светодиодов, по интерфейсу SPI управляет драйверами светодиодов в составе кластера, обслуживает панель управления. Кроме того, плата микроконтроллера имеет интерфейс подключения выносных фотодатчиков, позволяющих замерять облученность в операционной зоне в зависимости от условий работы и при необходимости откорректировать время облучения для достижения необходимой фотодинамической дозы.

Заключение

Предложенный матричный светодиодный излучатель для фотодинамической терапии, будучи полностью отечественной разработкой, не имеет аналогов в Украине и по ожидаемым техническим характеристикам не уступает зарубежным образцам аналогичного назначения. В опытном образце излучателя комплексно решены проблемы обеспечения необходимого уровня фотодинамической дозы в операционной зоне и управления значительными массивами светодиодов.

Более того, матричный светодиодный излучатель для ФДТ может быть легко адаптирован к любому типу фотосенсибилизатора путем замены используемых светодиодов на другие, у которых максимум длины волны излучения соответствует максимуму поглощения нового фотосенсибилизатора.

На данный момент для опытного образца технически реализованы электронная схема управления кластерами светодиодов, пульт управления, источник питания на 24 В для запитывания электронной схемы. Техническая документация конструкции системы уже передана изготовителю (НПЦ "Борщаговский химико-фармацевтический завод", г. Киев), а завершение работ по технической реализации опытного образца многоэлементного светодиодного излучателя запланировано на середину 2012 г.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кац В. А., Литвин Г. Д., Назиров Ш. Б. и др. Фотодинамическая терапия (современное состояние, проблемы и перспективы) // Вопросы онкологии. — 1992. — Т. 10. — С. 1403—1412. [Kats V. A., Litvin G. D., Nazirov Sh. B. i dr. // Voprosy onkologii. 1992. Vol. 10. P. 1403]
2. Bisland S. Light-delivery and imaging technologies advance PDT knowledge // Biophotonic International, A Laurin Publication. — 2005. — N 4. — P. 44—48.

3. Loschenov V. B., Konov V. I., Prokhorov A. M. Photodynamic therapy and fluorescence diagnosis // Laser Physics. — 2000. — Vol. 10, N 6. — P. 1188—1207.

4. Денисов Н. А., Руденко Я. Ю. Устройство для фотодинамической терапии на базе светоизлучающих диодов // Тр. VIII Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2007». — Украина, Одесса. — 2007. — С. 396. [Denisov N. A., Rudenko Ya. Yu. Ustroistvo dlya fotodinamicheskoi terapii na baze svetoizluchayushchikh diodov // Tr. VIII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2007». Ukraina, Odessa. 2007. P. 396]

5. Денисов М. О., Редчук О. О., Корольова Т. В. Лабораторный макет системы лікування онкозахворювань за методом фотодинамічної терапії // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Приладобудування. — 2010. — № 40. — С. 125—129. [Denisov M. O., Redchuk O. O., Korol'ova T. V. // Visnyk NTUU «KPI». Ser. Pryladobuduvannya. 2010. N 40. P. 125]

6. Денисов Н. А., Кравченко И. В. Исследование характеристик сверхъярких светодиодов Hebei Ltd. (Китай) для использования в клинической спектроскопии // Тр. VIII Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2007». — Украина, г. Одесса. — 2007. — С. 397. [Denisov N. A., Kravchenko I. V. Issledovanie kharakteristik sverkh'yarkikh svetodiodov Hebei Ltd. (Kitai) dlya ispol'zovaniya v klinicheskoi spektroskopii // Tr. VIII Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «SIET-2007». Ukraina, Odessa. 2007. P. 397]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 17.10 2011 г.*

Denisov M. O., Redchuk O. O. **Matrix LED illuminator for photodynamic therapy.**

Keywords: photodynamic therapy, photosensitizer Hyperflav, matrix LED illuminator.

A prototype of the illuminator for photodynamic therapy with the use of Hyperflav photosensitizer is proposed. This device has no analogues in Ukraine, its expected technical characteristics are inferior to no foreign models of similar purpose and can be easily adapted to any other type of photosensitizer. A complex solution has been found for the problem of ensuring the necessary level of photodynamic dose and control of large arrays of LEDs in the prototype of the integrated illuminator.

Ukraine, NTUU «Kyiv politechnic institute».

Денисов М. О., Редчук О. О. **Матричний світлодіодний випромінювач для фотодинамічної терапії.**

Ключові слова: фотодинамічна терапія, фотосенсибілізатор Гіперфлав, матричний світлодіодний випромінювач.

Запропоновано дослідний зразок випромінювача для фотодинамічної терапії з використанням фотосенсибілізатора Гіперфлав. Апарат не має аналогів в Україні, за очікуваними технічними характеристиками не поступається закордонним зразкам аналогічного призначення і може бути легко адаптований до будь-якого іншого типу фотосенсибілізатора. У дослідному зразку випромінювача комплексно вирішено проблеми забезпечення необхідного рівня фотодинамічної дози і управління значними масивами світлодіодів.

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут».

УДК 621.315.592

Д. т. н. Н. М. ВАКИВ, д. т. н. С. И. КРУКОВСКИЙ, к. ф-м. н. А. В. СУКАЧ¹,
д. ф-м. н. В. В. ТЕТЬОРКИН¹, к. т. н. И. А. МРЫХИН, Ю. С. МИХАЩУК, Р. С. КРУКОВСКИЙ

Украина, г. Львов, НПП “Карат”; г. Киев, ¹ИФП им. В. Е. Лашкарёва НАНУ

E-mail: carat207@i.ua

СВОЙСТВА ДВОЙНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

Получены эпитаксиальные гетероструктуры p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, в которых металлургическая граница совпадает с электрической. Это достигается выращиванием дополнительного буферного слоя n -InP и уменьшением времени выращивания эмиттерного p^+ -InP-слоя, сильно легированного Zn. Спектры электролюминесценции таких структур имеют меньшую полуширину и более высокую мощность ИК-излучения, чем те, в которых формируется p - n -переход в InGaAsP-слое. Гетероструктуры предназначены для создания эффективных ИК-светодиодов с длиной волны в максимуме спектра 1,06 мкм.

Ключевые слова: эпитаксиальные гетероструктуры, жидкофазная эпитаксия, легирование, электролюминесценция, фоточувствительность.

Двойные гетеропереходы (ДГП) p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP применяются в инфракрасной (ИК) оптоэлектронике для изготовления на их основе инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов в спектральном диапазоне 1,0–1,7 мкм [1–4]. Наибольший интерес для прикладных разработок представляют длины волн 1,06; 1,3 и 1,6 мкм, на которых оптические потери сигнала в кварцевом волокне незначительны, что позволяет построить трехканальную линию связи на основе одного волоконно-оптического кабеля [4]. Одним из преимуществ гетеропереходов InP/InGaAsP является возможность изменения ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ от 0,73 до 1,35 эВ при достаточно хорошем согласовании параметров кристаллических решеток контактирующих материалов (относительное расхождение не более 0,1%) [5]. ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP представляют интерес также для разработчиков элементной базы ИК-оптоэлектроники, а именно сенсоров физических величин на основе волоконно-оптических датчиков [4].

Несмотря на существенный прогресс в технологии выращивания ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP и разработке приборов на их основе, по-прежнему актуальными остаются проблемы воспроизводимости состава и электрофизических параметров активной InGaAsP-области, уменьшения влияния фоновых примесей на концентрацию основных носителей заряда в ней, выяснения механизмов деградации и природы избыточных токов [6–10].

Важной технологической проблемой при выращивании структур InP/InGaAsP является неконтролируемое легирование цинком гетерограницы со стороны слоя n -InGaAsP при выращи-

вании верхнего эмиттерного p^+ -InP-слоя методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Такое легирование приводит к формированию p – n -перехода в активной InGaAsP-области, обуславливает дополнительные оптические потери ИК-излучения в p -слое, сдвиг максимума спектра электролюминесценции в более длинноволновую область с длиной волны $\lambda_{\text{max}}=1,08$ мкм вместо ожидаемой $\lambda_{\text{max}}=1,06$ мкм. Такая длина волны электролюминесценции соответствует соединению InGaAsP с шириной запрещенной зоны $E_g=1,17$ эВ при температуре $T=300$ К. Кроме того, легирование гетерограницы InP/InGaAsP цинком обуславливает формирование на границе p – n -перехода в InGaAsP компенсированной области, вследствие чего значение последовательного сопротивления ДГП возрастает почти на порядок по сравнению с ожидаемым расчетным [11].

Целью настоящего исследования было совершенствование технологии выращивания ДГП p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP методом ЖФЭ, предназначенной для изготовления на ее основе ИК-светодиодов с $\lambda_{\text{max}}=1,06$ мкм, в которых металлургическая гетерограница совпадала бы с электрической.

Образцы и методика эксперимента

Эпитаксиальные слои InP и InGaAsP такого состава, которому соответствует $E_g=1,17$ эВ ($T=300$ К), выращивались методом ЖФЭ в графитовой слайдерной кассете из расплава индия чистотой 99,9999 на подложках n^+ -InP с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и кристаллографической ориентацией рабочей поверхности (100). Конечная толщина подложки после соответствующих предэпитаксиальных обработок составила 350–380 мкм. Температура начала

эпитаксии для слоев InP равна 680°C , а для слоев InGaAsP — 650°C . Кристаллизация слоев осуществлялась из переохлажденного раствора-расплава при скорости охлаждения $0,8^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Необходимые для очистки слоев от фоновых примесей элементы — алюминий и иттербий — добавлялись в шихту перед загрузкой в кассету по методике, предложенной в [7]. Расплавы насыщались фосфором с использованием поликристаллического InP с концентрацией электронов $(5-7) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($T=300 \text{ K}$). Гомогенизация раствора-расплава происходила на протяжении $1,5-2,0 \text{ ч}$ в атмосфере очищенного через палладиевый барьер водорода с точкой росы -70°C . Непосредственно перед началом наращивания слоя $n\text{-InP}$ поверхность подложки подрастворялась в недонасыщенном фосфором расплаве индия. Толщина автоэпитаксиальных слоев составляла $5-7 \text{ мкм}$, концентрация электронов $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, их подвижность около $1500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ при $T=300 \text{ K}$. На буферном автоэпитаксиальном InP-слое выращивался слой соединения $n\text{-InGaAsP}$ ($E_g=1,17 \text{ эВ}$) с концентрацией электронов $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщиной $3-4 \text{ мкм}$. В отличие от использовавшейся ранее [11] технологии изготовления (далее **ТИ1**) ДГП $p^+\text{-InP}/n\text{-InGaAsP}/n\text{-InP}$, в настоящей работе использовалась измененная технология (**ТИ2**). С целью уменьшения легирования цинком $n\text{-InGaAsP}$ -области из слоя $p^+\text{-InP}:\text{Zn}$, дополнительно формировался буферный слой $n\text{-InP}$ толщиной около $1,5 \text{ мкм}$ с концентрацией электронов $2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, время наращивания эмитерного $p^+\text{-InP}$ слоя было уменьшено с 25 до 10 мин , при этом его толщина составляла $1,5 \text{ мкм}$, а концентрация дырок в нем — $(2-3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве омического контакта к $p^+\text{-InP}$ использовался сплав $\text{In}-\text{Zn}$ с содержанием цинка 3% , а к $n\text{-InP}$ — чистый индий. Контактные площадки наносились термовакуумным методом с последующей термообработкой в атмосфере очищенного водорода при температуре около 400°C в течение $3-5 \text{ мин}$. Технология изготовления омического контакта в InP отрабатывалась предварительно на образцах n - и p -типа проводимости. Для изготовления мезоструктур использовался травитель, состоящий из соляной и уксусной кислот и перекиси водорода в соотношении $1:2:1$. Средняя активная площадь исследуемых образцов составляла $4,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, диаметр верхнего контакта $0,2 \text{ мм}$, а нижний покрывал всю поверхность. ИК-излучение выводилось из активной области структуры сквозь слой $p\text{-InP}$.

Темновые вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) измерялись при постоянном токе при температуре 295 K . Распределение основных носителей заряда на гетерогранице исследовалось на основе измеренных на частоте 1 МГц вольт-фарадных характеристик (**ВФХ**). Спектральное распределение ампер-ваттной чувствительности образцов измерялось при токе короткого замы-

кания, а ватт-амперные характеристики ИК-светодиодов — при постоянном токе, причем в качестве приемника ИК-излучения использовался калиброванный германиевый фотодиод.

Результаты эксперимента

Распределение основных носителей заряда на границе потенциального барьера определялось на основе высокочастотных (1 МГц) ВФХ при $T = 295 \text{ K}$ (рис. 1, а). Результаты эксперимента линеаризировались в координатах $C^{-2}-U$ для обратных напряжений смещения $0 < U \leq 1,5 \text{ В}$, причем емкостное напряжение отсечки составляло $U_C=1,3-1,8 \text{ В}$, что превышало ширину запрещенной зоны соединения InGaAsP ($E_g=1,17 \text{ эВ}$) при $T = 300 \text{ K}$ [12]. Большие значения U_C могут определяться влиянием как последовательного сопротивления, так и глубоких центров, локализованных в области пространственного заряда гетероструктуры [12, 13]. Последовательное сопротивление в исследованных структурах растет вследствие формирования компенсированного слоя на границе ДГП, на что указывают ВФХ гетеропереходов. Во-первых, при прямых смещениях ($U \geq 1,0 \text{ В}$) наблюдается тенденция зависимости $C^{-2}=f(U)$ к насыщению. Кроме того, по наклону линейного участка графика этой зависимости была проведена оценка эффективной концентрации основных носителей заряда в квазинейтральной области. Полученное значение $(2-3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ оказалось на порядок меньше концентрации носителей заряда в $n\text{-InGaAsP}$ -слое.

Типичная ВАХ ДГП показана на рис. 1, б. Как видно из рисунка, прямая ветвь удовлетворительно линеаризуется в координатах

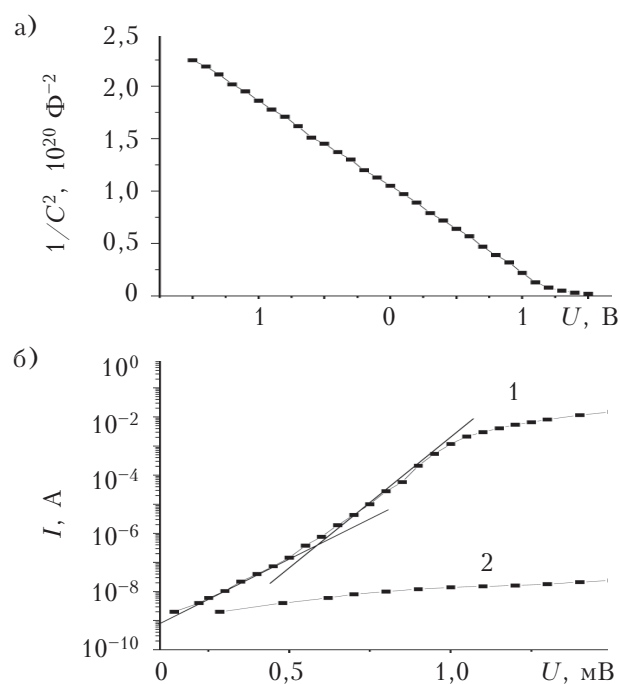


Рис. 1. ВФХ (а) и ВАХ (б) ДГП, изготовленного по ТИ2, при комнатной температуре

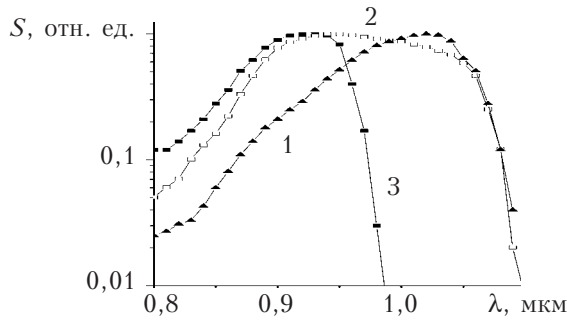


Рис. 2. Спектральное распределение чувствительности ДГП, изготовленных по ТИ1 (1), ТИ2 (2), а также p - n -перехода InP (3)

$\lg I - U$ в диапазоне напряжений $0,25 \leq U \leq 1,0$ В. При этом наличие на графике двух участков с различными углами наклона свидетельствует о возможной реализации различных механизмов прохождения тока. При более высоких напряжениях прямого смещения ВАХ определяется последовательным сопротивлением R_s . В исследованных ДГП оно составило около 7 Ом. Экспериментальные ВАХ удовлетворительно аппроксимируются выражением

$$I = I_{01} \exp(eU / E_0) + I_{02} \left(\frac{eU - IR_s}{\beta kT} \right), \quad (1)$$

где $I_{01} = 8 \cdot 10^{-10}$ А; $I_{02} = 5 \cdot 10^{-12}$ А;
 E_0 — характеристическая энергия, $E_0 = 73$ мэВ;
 β — коэффициент неидеальности, $\beta = 2,0$.

Первая составляющая в этом выражении описывает туннельный ток, а вторая — генерационно-рекомбинационный. Максимальные значения коэффициента выпрямления составляли $(0,5 - 1,0) \cdot 10^6$ при $U = 1,5$ В. Шунтирующее сопротивление, которое определялось по дифференциальному сопротивлению обратной ветви ВАХ при напряжении смещения 2 В, изменялось в пределах $(0,7 - 1,5) \cdot 10^7$ Ом.

На рис. 2 приведено спектральное распределение фоточувствительности S (ФЧ) ДГП, изготовленных по традиционной (ТИ1) и предлагаемой (ТИ2) технологиям, при их освещении со стороны p^+ -InP слоя. Важно отметить, что во всех структурах на слое p^+ -InP генерировался положительный сигнал фотоответа, что вместе с отсутствием изменения полярности фотоответа в ДГП свидетельствует о его формировании исключительно одним потенциальным барьером во всех исследованных структурах. В ДГП, изготовленных по ТИ2, этот барьер возникает на гетерогранице p^+ -InP / n -InGaAsP, причем спектральная зависимость фотоответа характерна для гетеропереходов, в которых наблюдается эффект «широкозонного окна» [14, 15]. В то же время, в ДГП, изготовленном по ТИ1, фотоответ определяется p - n -переходом в слое n -InGaAsP, что объясняет его более селективный характер по сравнению с ДГП, изготовленным по ТИ2. Совпадение длинноволновой границы спектров ФЧ

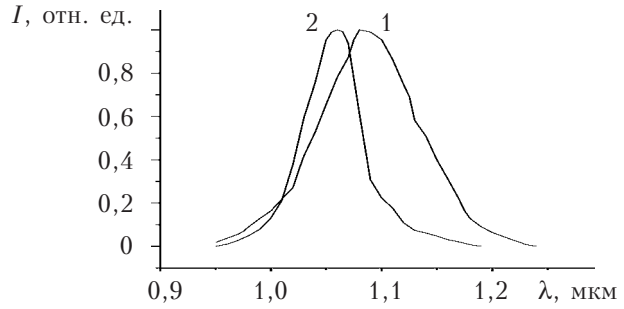


Рис. 3. Спектры электролюминесценции ДГП, изготовленных по ТИ1 (1) и ТИ2 (2), при комнатной температуре

в обоих ДГП свидетельствует о локализации активной области в слое InGaAsP. Очевидно, коротковолновая граница в ДГП, изготовленном по ТИ2, определяется оптической генерацией носителей в p -слое InP, который образовался в результате диффузии цинка из p^+ -слоя в буферный слой n -типа с образованием структуры p^+ - p -InP. Это подтверждается проведенными исследованиями, которые показали, что сильно легированный слой p^+ -InP не является фоточувствительным. В случае сильного легирования p -слоя коротковолновая граница ФЧ была бы сдвинута в область больших значений длины волны (около 0,92 мкм). К тому же, относительно широкий спектр ФЧ в InP- p - n -переходах можно объяснить только формированием на границе перехода компенсированной области. Ее наличие было подтверждено измеренной ВФХ. Эффективная концентрация носителей в этой области составила $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Спектры электролюминесценции ДГП приведены на рис. 3. Плотность постоянного тока составляла $14,1 \text{ А/см}^2$, мощность излучения — 0,37 и 0,85 мВт для структур, изготовленных по ТИ1 и ТИ2 соответственно. Спектр для ДГП, изготовленного по ТИ2, сдвинут в коротковолновую область ($\lambda_{\text{max}} = 1,06 \text{ мкм}$), характеризуется меньшей полушириной (около 60 мэВ) и имеет более симметричный характер по сравнению со спектром ДГП, изготовленного по ТИ1. Эти результаты объясняются участием в электролюминесценции «хвостов» плотности состояний в компенсированной области. В ДГП, изготовленном по ТИ1, степень компенсации выше, результатом чего является большая полуширина спектра (около 80 мэВ). Смещение максимума спектра в длинноволновую область при этом обусловлено формированием p - n -перехода в слое InGaAsP и оптическими потерями в этом слое.

Закключение

Усовершенствование технологии выращивания двойных гетеропереходов p^+ -InP / n -InGaAsP / n -InP позволило получить структуры, у которых гетерограница совпадает с электрической. Это достигается выращиванием дополнительного буферного слоя n -InP и уменьшением времени выращивания эмиттерного p^+ -InP-слоя, сильно ле-

гированного цинком. Спектры электролюминесценции таких структур имеют меньшую полуширину по сравнению со структурами, в которых формируется p - n -переход в InGaAsP-слое, а также более высокую мощность ИК-излучения.

Изготовленные структуры могут использоваться для создания эффективных ИК-светодиодов с $\lambda_{\max} = 1,06$ мкм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. — Москва: Физматлит, 2008. [Shubert F. E. Svetodiody. Moscow: Fizmatlit, 2008]
2. Лешко А. Ю., Лютецкий А. В., Пихтин Н. А. и др. Мощные одномодовые лазерные диоды на основе квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур ($\lambda = 1,3 - 1,6$ мкм) // ФТП. — 2002. — Т. 36, № 11. — С. 1393–1399. [Leshko A. Yu., Lyutetskii A. V., Pikhtin N. A. i dr. // FTP. 2002. Vol. 36, N 11. P. 1393]
3. Лютецкий А. В., Пихтин Н. А., Фетисова Н. В. и др. Мощные диодные лазеры ($\lambda = 1,7 - 1,8$ мкм) на основе асимметричных квантово-размерных InGaAsP/InP-гетероструктур раздельного ограничения // ФТП. — 2009. — Т. 43, № 12. — С. 1646–1649. [Lyutetskii A. V., Pikhtin N. A., Fetisova N. V. i dr. // FTP. 2009. Vol. 43, N 12. P. 1646]
4. Окоси Т., Окамото К., Оцу М. и др. Волоконно-оптические датчики. — Ленинград: Наука, 1990. [Okosi T., Okamoto K., Otsu M. i dr. Volokonno-opticheskie datchiki. Leningrad: Nauka, 1990]
5. Ангина Н. Р., Арбенина В. В., Малинина Т. М. Четырехкомпонентные твердые растворы в системе In-Ga-As-P — новый материал электронной техники // Зарубежная электронная техника. — 1983, № 8 (266). — С. 3–82. [Angina N. R., Arbenina V. V., Malinina T. M. // Zarubezhnaya elektronnaya tekhnika. 1983. Vol. 8 (266). P. 3]
6. Васильев Н. Г., Васильев А. М., Вилис Д. М. и др. Получение гетероструктур InP/InGaAsP/InP методом жидкофазной эпитаксии и раздельное приготовление растворов-расплавов // Изв. РАН. Неорган. матер. — 2007. — Т. 43, № 7. — С. 775–780. [Vasil'ev N. G., Vasil'ev A. M., Vilis D. M. i dr. // Izv. RAN. Neorgan. mater. 2007. Vol. 43, N 7. P. 775]
7. Круковский С. И. Комплексно-легированные эпитаксиальные структуры InP/InGaAsP для оптоэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2006. — № 2. — С. 27–31. [Krukovskii S. I. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2006. N 2. P. 27]
8. Prochazkova O., Oswald J., Zavadil J. et al. Characterization of InP and GaInAsP layers prepared by liquid-phase epitaxy using holmium doping and gettering // Material Science and Engineering, (B). — 1997. — Vol. 44, N 2. — P. 160–163.
9. Гореленок А. Т., Каманин А. В., Шмидт Н. М. Редкоземельные элементы в технологии A^3B^5 и приборов на их основе // ФТП. — 2003. — Т. 37, № 8. — С. 922–940. [Gorelenok A. T., Kamanin A. V., Shmidt N. M. // FTP. 2003. Vol. 37, N 8. P. 922]
10. Карачевцева М. В., Страхов В. А., Яременко Н. Г. Туннельно-рекомбинационные токи в неидеальных гетероструктурах InGaAsP/InP // ФТП. — 1994. — 28, № 6. — С. 1027–1031. [Karachevtseva M. V., Strakhov V. A., Yaremenko N. G. // FTP. 1994. Vol. 28, N 6. P. 1027]
11. Круковский С. И., Сукач А. В., Тет'оркин В. В. та ін. Властивості подвійних гетеропереходів p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, отриманих за різних технологічних режимів // Оптоелектроніка і напівпровідникова техніка. — 2011. — Вып. 46. — С. 71–77. [Krukovskii S. I., Sukach A. V., Tet'orkin V. V. ta in. // Optoelektronika i poluprovodnikovaya tekhnika. 2011. Iss. 46. P. 71]
12. Берман Л. С. Емкостные методы исследования полупроводников. — Л.: Наука, 1972. [Berman L. S. Emkostnyye metody issledovaniya poluprovodnikov. Leningrad: Nauka, 1972]
13. Константинов О. В., Мезрин О. А. Влияние последовательного сопротивления диода Шоттки на его эффектив-

ную емкость // ФТП. — 1983. — Т. 17, № 2. — С. 305–311. [Konstantinov O. V., Mezrin O. A. // FTP. 1983. Vol. 17, N 2. P. 305]

14. Милнс А., Фойхт Д. Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник. — Москва: Мир, 1975. [Milns A., Foikht D. Geteroperekhody i perekhody metall-poluprovodnik. Moscow: Mir, 1975]

15. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Советское радио, 1979. [Sharma B. L., Purokhit R. K. Poluprovodnikovyye geteroperekhody. Moscow: Sovetskoe radio, 1979]

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.03 2012 г.

Vakiv N.M., Krukovskii S.I., Sukach A.V., Tetyorkin V.V., Mrykhin I.A., Mikhaychuk Yu.S., Krukovskii R.S. **Properties of double p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP heterojunctions obtained by LPE method.**

Keywords: epitaxial heterostructures, liquid-phase epitaxy, doping, electroluminescence, photosensitivity.

The double epitaxial p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP heterostructures with coinciding electrical and metallurgical boundaries has been obtained. Such coincidence is achieved due to growing an additional buffer n -InP layer and decreasing the time for growing an emitter p^+ -InP layer heavily doped by zinc. Electroluminescence spectra of such structures have a smaller half-width and the infrared radiation of higher power than the structures in which the p - n -junction is formed in the InGaAsP layer. These heterostructures are designed to create efficient IR LEDs with wavelength of 1,06 μ m in spectrum maximum.

Ukraine, Lviv, SPE «Carat»; Kiev, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU.

Ваків Н. М., Круковський С. І., Сукач А. В., Тет'оркін В. В., Мрихін І. О., Міхашук Ю. С., Круковський Р. С. **Властивості подвійних гетеропереходів p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, виготовлених методом рідкофазної епітаксії.**

Ключові слова: епітаксіальні гетероструктури, рідкофазна епітаксія, легування, електролюмінесценція, фоточутливість.

Отримано епітаксіальні гетероструктури p^+ -InP/ n -InGaAsP/ n -InP, в яких металургійна та електрична границі збігаються. Це досягається вирощуванням додаткового буферного шару n -InP і зменшенням часу вирощування емітерного p^+ -InP-шару, сильно легованого цинком. Спектри електролюмінесценції таких структур мають меншу напівширину та більшу високу потужність ІЧ-випромінювання, ніж ті, в яких формується p - n -перехід в InGaAsP-шарі. Гетероструктури призначені для створення ефективних ІЧ-світлодіодів з довжиною хвилі в максимумі спектра 1,06 мкм.

Україна, м. Львів, НВП «Карат»; м Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ.

УДК 621.3.032.42:621.378.8.038.825

К. т. н. А. Н. ГЕРШУНИ, к. т. н. А. П. НИЩИК

Украина, г. Киев, НТУУ “Киевский политехнический институт”

E-mail: politekhins@gmail.com

ПАССИВНАЯ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОХЛАЖДЕНИЯ ЛАЗЕРА

Разработана специализированная тепловая труба для обеспечения теплового режима активного элемента оптического квантового генератора (лазера) в условиях теплоотвода излучением. Показано, что при мощности имитатора тепловыделяющего элемента 50 Вт температура стенки в зоне нагрева тепловой трубы не превышает 30°C, а аварийный обогрев позволяет предотвратить глубокое замораживание всей системы в условиях отсутствия тепловыделения объекта.

Ключевые слова: оптический квантовый генератор, система охлаждения, тепловая труба.

Характерной особенностью оптических квантовых генераторов (ОКГ), т. е. лазеров, является выделение значительной тепловой энергии в процессе их работы [1]. Перегрев оптических элементов (активного элемента, лампы накачки, фильтров и т. д.) приводит к ухудшению характеристик приборов и уменьшению ресурса их работы. Поэтому реализация требуемого теплового режима элементов лазера с помощью соответствующих систем охлаждения является одной из главных задач, которую необходимо решать при разработке приборов лазерной техники. Выбор эффективного способа отвода теплоты от тепловыделяющих элементов во многом способствует успешному внедрению лазерной аппаратуры различного назначения. При реализации систем обеспечения тепловых режимов (СОТР) для ОКГ обычно решаются три взаимосвязанные задачи:

- организация охлаждения элементов прибора;
- организация теплообмена между элементами прибора и системой теплоотвода;
- обеспечение теплообмена между СОТР и окружающей средой.

Для обеспечения необходимого теплового режима элементов в лазерах применяют конвективный (газовый, жидкостной) и контактный (кондуктивный) способы отвода выделяющейся теплоты, а также их комбинации [2].

Выбор того или иного способа охлаждения зависит от величины удельной тепловой нагрузки, особенностей оптической схемы прибора и требуемой температуры элементов. В случае применения газового охлаждения в качестве теплоносителя можно использовать воздух, азот, аргон, гелий и другие газы, которые в высокой степени прозрачны, фотостойки, имеют стабильные теплофизические параметры в широком ди-

апазоне температур. Этот способ охлаждения используется в основном в системах обеспечения теплового режима ОКГ с небольшой энергией излучения или малой частотой повторения импульсов накачки. К положительным особенностям газового охлаждения относятся фотостойкость и стабильность теплофизических параметров теплоносителей, автономность систем охлаждения, возможность питания контуров охлаждения из централизованных источников, возможность получить достаточно большие значения коэффициента теплоотдачи на поверхности активного элемента (порядка 500 Вт/(м²·К) в случае вихревого охлаждения). К недостаткам газового охлаждения ОКГ относятся: необходимость создания фильтров очистки от различных примесей в теплоносителях для проточных систем, зависимость состояния системы охлаждения (работе/неработе) от запаса теплоносителя, необходимость использования громоздкого дополнительного оборудования и источников энергии (компрессоры, вентиляторы и т. п.), а также промежуточных теплообменных устройств. Срок службы элементов ОКГ при использовании этого способа охлаждения мал.

Жидкостное охлаждение получило широкое распространение для обеспечения тепловых режимов лазеров с высокой удельной тепловой нагрузкой и большой частотой повторения импульсов накачки. Значения коэффициентов теплоотдачи при жидкостном охлаждении могут достигать 10000 Вт/(м²·К). Однако наряду со способностью отводить значительные тепловые потоки от элементов ОКГ, жидкостное охлаждение имеет ряд следующих недостатков: требуется создавать герметичные контуры, устранять паразитные притоки теплоты от двигателей насосов, предотвращать кипение и наличие газовых пузырей. При этом сложен и выбор тепло-

носителя, поскольку он должен обладать приемлемыми теплотехническими характеристиками и одновременно быть прозрачным и фотостойким.

Контактное охлаждение элементов лазера осуществляется с помощью стержней и пластин различной конфигурации, выполненных из теплопроводных материалов и находящихся в контакте с активной средой. От качества теплового контакта стержня с источником теплоты существенно зависят рабочие характеристики активного элемента лазера. При контактном теплоотводе допустимая площадь теплового контакта не должна превышать 25% площади боковой поверхности активного тела, т. к. в противном случае снижается эффективность осветительной системы на 10–15% и резко возрастает пороговая энергия накачки. Для уменьшения термического сопротивления контакта между активной средой и охлаждающим устройством пространство между ними заполняют веществом с высокой теплопроводностью.

Развитие лазерной техники связано с возрастанием потребляемой и, соответственно, выделяемой мощности, часть из которой необходимо отвести в виде теплоты. Применение при этом традиционных систем охлаждения приводит к существенному увеличению массы и габаритов приборов. К тому же в некоторых случаях эти системы не могут обеспечить отвод больших тепловых потоков.

Одним из эффективных способов усовершенствования систем охлаждения элементов ОКГ, в частности контактных, является применение тепловых труб, которые позволяют в отличие от вышеописанных способов превратить систему охлаждения в полностью пассивную; значительно увеличить отводимые тепловые потоки при малых перепадах температуры, что дает возможность существенно повысить энергию излучения и частоту повторения импульсов; значительно уменьшить массу и габариты системы охлаждения; повысить надежность работы ОКГ благодаря отсутствию жидкости в рабочей зоне и подвижных деталей и разъемных соединений в системе охлаждения.

В статье описана оригинальная конструкция пассивной СОТР ОКГ на базе разработанной специализированной тепловой трубы (ТТ).

Конструкция пассивной испарительно-конденсационной системы охлаждения

Разработанная система охлаждения представляет собой коаксиальную цилиндрическую зону испарения (теплоподвод), переходящую в плоскую зону конденсации (теплоотвод). Общий вид специализированной тепловой трубы в сборе представлен на рис. 1. Наружная цилиндрическая поверхность и плоская тыльная сторона грибовидного тепловоспринимающего элемента 1, а также внутренняя поверхность плиты 6, снабженная выступающими штырями, покрыты ка-

пиллярно-пористыми фитилями. Фитили гидравлически связаны между собой, обеспечивая надежную подачу теплоносителя из зоны конденсации в зону испарения. Боковая поверхность стакана 2 снабжена трубкой со штуцером 4 для вакуумирования и заполнения системы теплоносителем.

Все перечисленные детали неразъемно соединены между собой, образуя замкнутую герметичную полость тепловой трубы. В собранной специализированной ТТ по оси симметрии имеется сквозное отверстие диаметром 3 мм, в котором размещается тепловыделяющий элемент или его имитатор при испытаниях системы охлаждения. Полость, образованная в элементе 1, служит для установки аварийного нагревателя.

Независимо от ориентации ТТ в пространстве фитиль должен обеспечить подъем теплоносителя на высоту не менее 80 мм. При этом плотность подводимого теплового потока составляет около 10 Вт/см². Обеспечить такие условия работы при использовании органического теплоносителя достаточно сложно, поэтому в качестве теплоносителя использовалась дистиллированная вода.

Рабочее давление внутри тепловой трубы соответствует давлению насыщенного водяного пара на уровне температур 20–30°C, что составляет 2–4 кПа. Перед заполнением теплоносителем труба вакуумировалась до остаточного давления 10⁻²–10⁻³ мм рт. ст. При проектировании необходимо было обеспечить достаточную жесткость корпуса, особенно излучателя. С целью обеспечения сохранения формы оболочки ТТ плита излучателя снабжена многочисленными штырями жесткости.

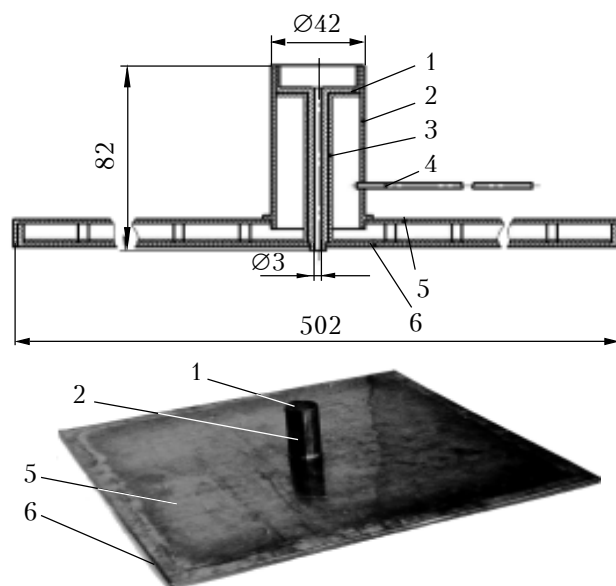


Рис. 1. Конструкция и фото специализированной тепловой трубы:

1 — тепловоспринимающий элемент; 2 — цилиндрический стакан; 3 — капиллярно-пористый металловолокнистый фитиль; 4 — медная трубка; 5 — крышка; 6 — плита-излучатель

Диаметр стакана, определяющий площадь поперечного сечения парового канала $F_{\text{п}}$, определялся из условий обеспечения допустимой скорости парового потока, при которой не происходит срыв и унос жидкости. Допустимая скорость $W_{\text{п}}$ водяного пара принималась равной 1 м/с.

Расчет проводился с использованием формулы

$$F_{\text{п}} = Q / (W_{\text{п}} r_{\text{п}}),$$

где Q — передаваемый тепловой поток;

r , $\rho_{\text{п}}$ — скрытая теплота парообразования и плотность пара при рабочей температуре соответственно.

Площадь поперечного сечения парового канала рассчитывалась для $Q = 50$ Вт, внутренний диаметр стакана при этом составил 40 мм. Рассчитанная площадь излучающей поверхности плиты-излучателя составила 0,224 м². Формой излучающей поверхности был выбран квадрат, длина стороны которого согласно расчету составила 475 мм, а с учетом запаса была принята 500 мм.

Технология изготовления специализированной тепловой трубы включала следующие этапы: изготовление отдельных деталей, частичную сборку, создание фитильной структуры на вышеуказанных поверхностях, окончательную сборку, проверку на герметичность и вакуумную дегазацию, вакуумирование, заполнение и герметизацию. Тепловоспринимающий элемент грибовидной формы с отверстием был выполнен с помощью операций точения, сверления и развертывания. На его тепловоспринимающей поверхности выфрезерованы три радиальных канавки, расположенные под углом 120° одна по отношению к другой, для размещения термопара при испытании системы охлаждения с аварийным нагревателем. Плита-излучатель изготовлена из медного листа толщиной 6,5 мм. Ее поверхность с выступающими штырями (484 шт.) получена фрезерованием. Частично собранная тепловая труба представляла собой неразъемное соединение грибовидного элемента с плитой с помощью электронно-лучевой сварки.

Фитиль формировался из медных волокон диаметром 50 мкм и длиной 3 мм с последующим спеканием, его толщина составила 0,8 мм. При создании фитильной структуры особое внимание обращалось на обеспечение надежной гидравлической связи между фитилями на отдельных поверхностях. При окончательной сборке вначале устанавливалась крышка, а затем стакан. Соединение стакана с тепловоспринимающим элементом производилось с помощью пайки твердым припоем ПСр 45. В боковой поверхности стакана выполнено отверстие и впаяна твердым припоем медная трубка диаметром 3 мм со штуцером, предназначенная для вакуумирования и заполнения тепловой трубы теплоносителем.

Заключительная операция состояла из вакуумирования, заполнения и герметизации системы охлаждения на специальном стенде. Давление в тепловой трубе перед заполнением было на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. Герметизация тепловой трубы осуществлялась пережимом медного штенгеля и проваркой места пережима с помощью микроплазменного источника.

Экспериментальные исследования и анализ их результатов

Главной задачей экспериментального исследования являлось изучение теплопередающих характеристик тепловой трубы для определения возможностей системы охлаждения с точки зрения функционирования в заданных условиях без наступления кризисных явлений. Данная ТТ предназначена для работы в условиях теплосброса излучением, но при выполнении экспериментального исследования использовался конвективный теплоотвод к воздуху и к воде с обеспечением при этом такой же температуры в зоне охлаждения, как и в условиях теплосброса излучением.

При эксплуатации системы охлаждения источником теплоты является либо тепловыделяющий элемент ОКГ, либо аварийный нагреватель, который поддерживает температуру теплоносителя такой, чтобы тот находился в жидком состоянии (система предназначена для работы в условиях невесомости и, соответственно, низких температур). Под действием подводимого теплового потока происходит процесс испарения (кипения) теплоносителя в пористой структуре фитиля в зоне нагрева. Паровая фаза теплоносителя под действием градиента давления перемещается в зону охлаждения и конденсируется на пористой поверхности фитиля, нанесенного на внутреннюю поверхность плиты-излучателя. Конденсат под действием капиллярного давления возвращается в зону нагрева.

Для исследования рабочих характеристик тепловой трубы был изготовлен имитатор тепловыделяющего элемента в виде цилиндра из фторопласта длиной 56 мм с нанесенной на его внешнюю поверхность резьбой М3 на длине 50 мм. По резьбе была уложена нихромовая проволока диаметром 0,1 мм длиной 0,94 м. Имитатор аварийного нагревателя представлял собой керамическую пластинку с уложенной в пазах спиралью из нихрома.

На каждом уровне подводимой мощности по достижении стационарного режима определялось температурное поле тепловой трубы. Мощность нагревателей изменялась ступенчато в диапазоне 10 — 90 Вт для аварийного нагревателя и 10 — 50 Вт для основного.

Вначале ТТ испытывалась при нагреве аварийным нагревателем в условиях теплоотвода свободной конвекцией воздуха с обращенной вниз и вверх плитой-излучателем, расположенной под углом 10° к горизонтальной плоскости

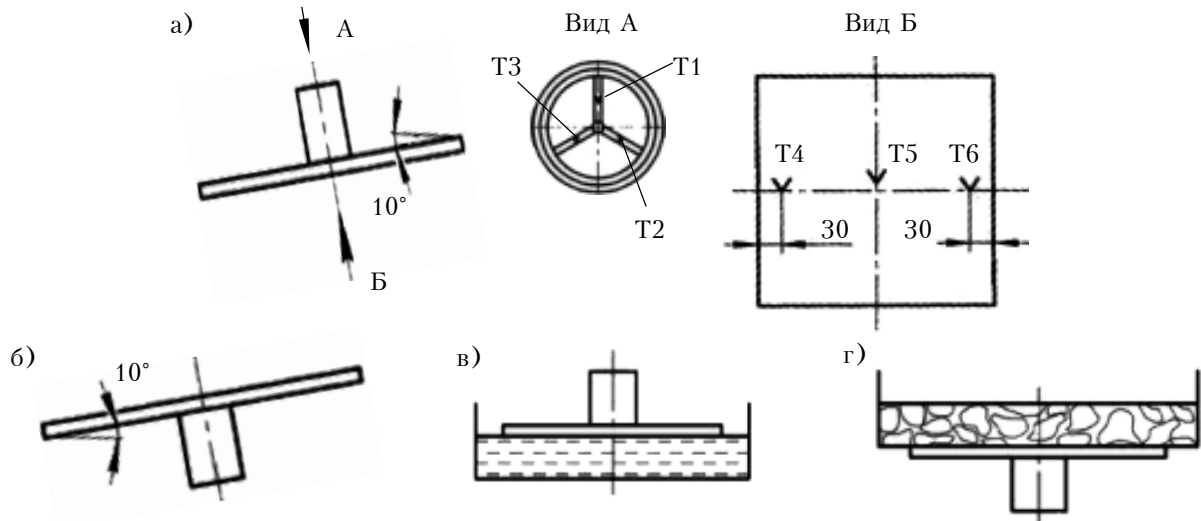


Рис. 2. Ориентация тепловой трубы в экспериментах с аварийным нагревателем

(рис. 2, а, б). Затем испытания ТТ проводились при отводе теплоты свободной конвекцией воды. Для этого расположенную горизонтально и обращенную вниз теплоотдающую поверхность трубы приводили в соприкосновение с водой (рис. 2, в), имеющей температуру 19–20°C. В последней серии опытов ТТ ориентировалась плитой вверх. На поверхности плиты размещалась емкость с тающим льдом (рис. 2, г). В этом случае температура холодного источника была значительно ниже, чем в предыдущем, что компенсировало дополнительное термическое сопротивление контакта емкости с плитой. Схема размещения термодатчиков (Т1...Т6) представлена на рис. 2, а: три термодатчика были закреплены в канавках теплопринимающей поверхности (Вид А) и три на теплоотдающей поверхности

плиты (Вид Б). Термодатчики изготавливались из медной и константановой проволоки диаметром 0,16 мм.

Из данных, представленных на рис. 3, а, видно, что при фиксированной тепловой нагрузке температурный уровень работы тепловой трубы зависит от условий теплообмена с окружающей средой: наиболее высок он при естественной воздушной конвекции, когда теплоотдающая поверхность плиты обращена вниз, а самый низкий — в условиях теплоотвода к тающему льду, когда теплоотдающая поверхность плиты обращена вверх. Линейный характер приведенных на рис. 3, б зависимостей свидетельствует о нормальном функционировании системы охлаждения.

Таким образом, в исследованном диапазоне тепловых потоков нарушений нормального функ-

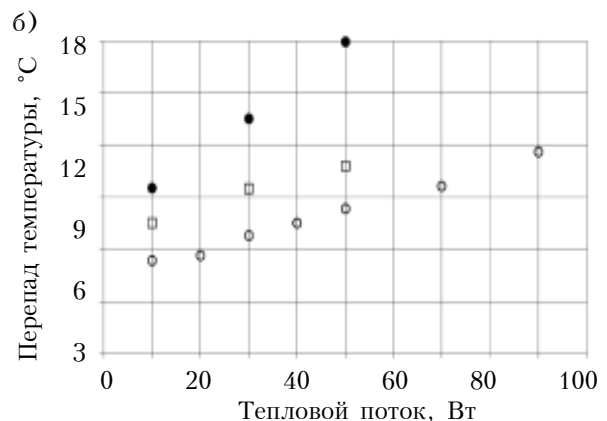
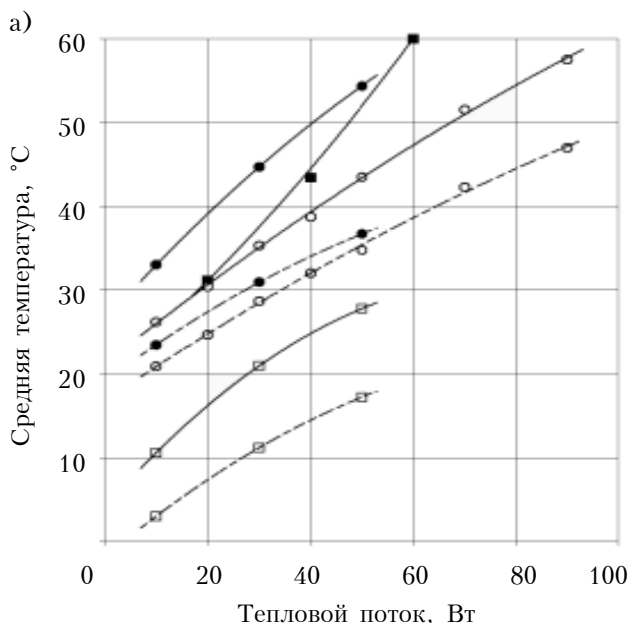


Рис. 3. Зависимость средней температуры теплопринимающей (сплошные линии) и теплоотдающей (штриховые) поверхности (а) и перепада температуры по ТТ (б) от теплового потока аварийного нагревателя при расположении ТТ согласно рис.2:

● — а; ○ — б; ■ — в; □ — г

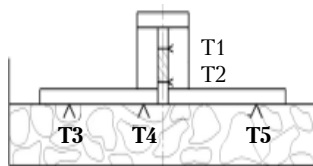


Рис. 4. Схема размещения термопар при испытаниях с основным нагревателем

ционирования тепловой трубы не наблюдалось. Аварийный обогрев ТТ предотвращает замораживание системы охлаждения при мощности аварийного нагревателя около 10 Вт.

В опытах с основным нагревателем (имитатором тепловыделяющего элемента) теплоотдающая поверхность плиты приводилась в соприкосновение с тающим снегом, который находился в металлической емкости. Термопары T1 и T2 (рис. 4) измеряли температуру обогреваемой стенки цилиндра в сечениях, граничащих с торцами основного нагревателя, T3, T4 и T5 — температуру поверхности плиты (они размещались в тех же точках, что и термопары T4, T5 и T6 в опытах с аварийным нагревателем).

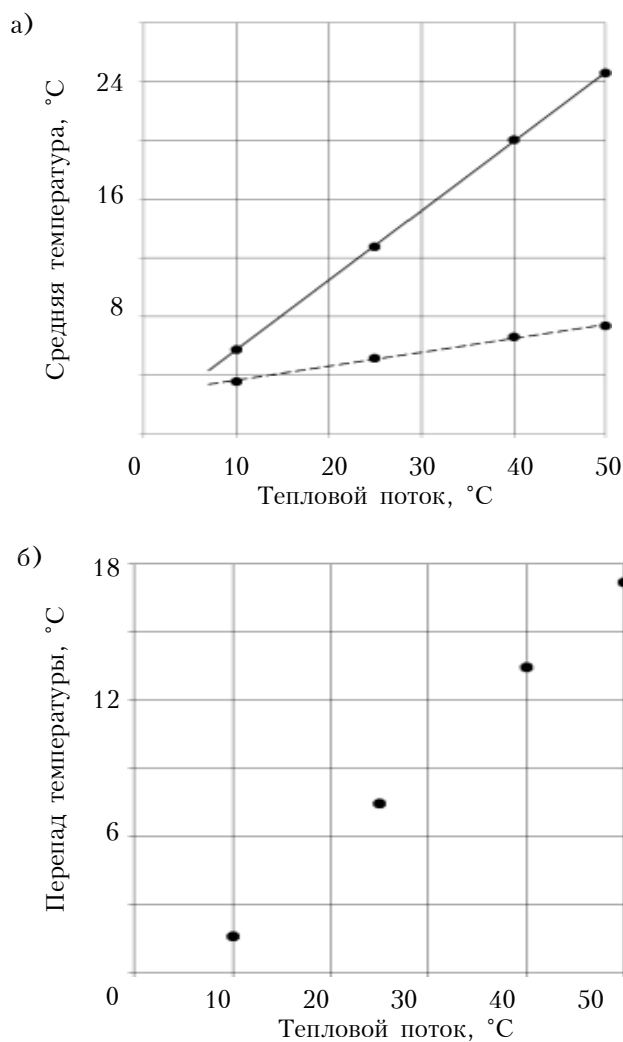


Рис. 5. То же самое, что и на рис. 3, для испытаний с основным нагревателем

Результаты исследований тепловой трубы с основным нагревателем (имитатором тепловыделяющего элемента) представлены на рис. 5. Линейный характер полученных зависимостей свидетельствует о нормальном функционировании ТТ.

При заданной номинальной мощности 50 Вт перепад температуры по тепловой трубе составил $\Delta T_T = 17,3^\circ\text{C}$, что несколько превышает полученную в процессе предварительной оценки величину. Это связано с тем, что предварительные расчеты ΔT_T были выполнены для условий отсутствия гравитационного поля. В проведенных же экспериментах ориентация тепловой трубы в гравитационном поле была наименее выгодная с точки зрения достижения максимальной эффективности и низкого термического сопротивления. В проведенных опытах (см. рис. 4) зона нагрева находилась выше зоны конденсации, и тепловая труба работала против сил тяжести. Кроме того, рабочее давление внутри тепловой трубы при заданной номинальной нагрузке составило около 2 кПа. Известно [3], что для тепловых труб, работающих против сил гравитации при очень низких давлениях пара (до 5–6 Па), реализовать потенциальное капиллярное давление невозможно, и максимальный движущий напор становится равным давлению насыщения, соответствующему предельному тепловому потоку. Поэтому в проведенных опытах имело место ухудшение снабжения жидкостью поверхности нагрева вследствие снижения движущего напора по сравнению с потенциально возможным капиллярным давлением. При ориентации тепловой трубы, когда плита-излучатель обращена вверх, перепад ΔT_T должен существенно уменьшиться, т. к. при этом намного улучшаются условия пропитки фитиля в зоне нагрева. Хотя опыты при такой ориентации ТТ с основным нагревателем не проводились, результаты экспериментов с аварийным нагревателем свидетельствуют о снижении ΔT_T на 10°C при изменении ориентации.

Заключение

Проведенные исследования разработанной специализированной тепловой трубы показали эффективность ее использования для обеспечения теплового режима активного элемента твердотельного лазера в условиях теплоотвода излучением. При мощности имитатора тепловыделяющего элемента 50 Вт температура стенки в зоне нагрева тепловой трубы не превышала 30°C . Аварийный обогрев специализированной тепловой трубы позволяет предотвратить глубокое замораживание всей системы в условиях отсутствия тепловыделения объекта.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Белостоцкий Б.Р., Губанов А.С. Тепловой режим твердотельных оптических квантовых генераторов. — Москва: Энергия, 1973. [Belostotskii B.R., Gubanov A.S. Teplovoi rezhim tverdotel'nykh opticheskikh kvantovykh generatorov. Moskva: Energiya, 1973]

2. Волохов В.А., Хрычиков Э.Е., Киселев В.И. Системы охлаждения теплонагруженных радиоэлектронных приборов. — Москва: Сов. радио, 1975. [Volokhov V.A., Khrychikov E.E., Kiselev V.I. Sistemy okhlazhdeniya teplonagruzhennykh radioelektronnykh priborov. Moskva: Sov. radio, 1975]

3. Гершуни А. Н. Исследование основных характеристик процессов тепломассообмена в низкотемпературных тепловых трубах с металловолокнистыми фитилями / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1977. [Gershuni A. N. / Avtoref. dis. ... kand. tekhn.nauk. Kiev, 1977]

Дата поступления рукописи
в редакцию 03.10 2011 г.

Gershuni A. N., Nishchik A. P. **Passive evaporation-condensation cooling system of a laser.**

Keywords: quantum generator, cooling system, heat pipes.

A special heat pipe for ensuring the thermal regime of the active element of an optical quantum generator (laser) under heat sink by radiation has been developed. It is shown that under the simulated fuel element

power of 50 W wall temperature in the heat pipe heating zone does not exceed 30°C, and the emergency heating prevents deep freezing of the entire system in the absence of heat generation of the object itself.

Ukraine, Kiev, NTUU "Kiev Polytechnic Institute".

Гершуни О. Н., Ніщик О. П. **Пасивна випаровувально-конденсаційна система охолодження лазера.**

Ключові слова: оптичний квантовий генератор, система охолодження, теплова труба.

Розроблено спеціалізовану теплову трубу для забезпечення теплового режиму активного елемента оптичного квантового генератора (лазера) в умовах тепловідводу випромінюванням. Показано, що при потужності імітатора тепловідляючого елемента 50 Вт температура стінки в зоні нагріву теплової труби не перевищує 30°C, а аварійний обігрів дозволяє запобігти глибокому заморозуванню всієї системи в умовах відсутності тепловиділення об'єкта.

Україна, м. Київ, НТУУ "Київський політехнічний інститут".

І І АУ А Е І Е АЕ

Промышленное применение аккумуляторных батарей. От автомобилей до авиакосмической промышленности и накопителей энергии / Под ред. М. Бруссели, Дж. Пистойя.— Москва: Техносфера, 2011.— 784 с.

Представлен аналитический обзор многочисленных электрохимических систем, а также обсуждаются вопросы дальнейшего совершенствования конструкции батарей, технологии их изготовления, разработки новых материалов и повышения их надежности. Издание содержит многочисленные примеры применения аккумуляторов: резервное питание, вспомогательное автомобильное оборудование, автоматическое оповещение о катастрофах, охранный, аварийный и пожарная сигнализации, спасательные системы, портативное медицинское оборудование, источники бесперебойного электропитания, аварийное освещение, измерительные системы, системы контроля и слежения, электроинструменты. Большое внимание уделено применению аккумуляторных систем в космонавтике — на спутниках, ракетах-носителях, летательных аппаратах для исследований планет и космоса. В книге также показано, как новые области применения стимулируют создание новых или усовершенствование существующих аккумуляторных батарей.

Авторский коллектив книги — это ученые и специалисты университетов и научных институтов Англии, США, Франции, Бельгии, Израиля, Японии, Италии. Книга предназначена для широкого круга специалистов, работающих в области электроники, может быть полезна для инженеров и преподавателей высшей школы, студентов и аспирантов, бакалавров и магистров.



І І АУ А Е І Е АЕ



УДК 621.382.002

О. Ю. НАЛИВАЙКО, д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «Интеграл»

E-mail: onalivaiko@integral.by

КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ ПЛЕНОК ПОЛИКРЕМНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО КИСЛОРОДОМ В ПРОЦЕССЕ РОСТА

Исследовано влияние условий осаждения на состав пленок поликристаллического кремния, легированного в процессе роста кислородом (ПКЛК). Разработана адсорбционно-кинетическая модель процесса осаждения ПКЛК с использованием концентрированного моносилана и закиси азота. Определена область оптимальных соотношений их расходов и температуры осаждения, при которых обеспечиваются приемлемая скорость и однородность осаждения, а также управляемость по содержанию кислорода в пленках и конформное осаждение пленок ПКЛК.

Ключевые слова: поликристаллический кремний, адсорбционно-кинетическая модель, процесс осаждения пленок.

Пленки поликристаллического кремния (ПК), получаемые при пониженном давлении, широко используются в технологии изготовления активных и пассивных элементов интегральных схем. Большой интерес вызывает процесс осаждения пленок ПК с одновременным его легированием.

Использование пленок полуизолирующего кремния (поликристаллического кремния, легированного кислородом — ПКЛК) позволяет повысить стабильность зарядовых состояний пассивирующих покрытий, исключить образование паразитных каналов и повысить пробивные напряжения дискретных высоковольтных приборов [1–6], т. к. в них полностью отсутствует характерный для пленок диоксида кремния эффект захвата инжектированных в процессе лавинного пробоя горячих носителей, который вызывает деградацию вольт-амперных и шумовых характеристик приборов. Кроме того, пленки полуизолирующего кремния могут использоваться для формирования высокоомных резисторов вместо поликремниевых резисторов, которые имеют большой разброс значений сопротивления и высокий температурный коэффициент [5–7].

Пленки полуизолирующего кремния получают окислением моносилана SiH_4 закисью азота N_2O [5, 6]. Несмотря на большое количество публикаций о процессе осаждения и свойствах пленок ПКЛК, сведения о кинетике осаждения ПКЛК при пониженном давлении являются недостаточно полными. Полученные в ряде работ аналитические выражения на основе предположений о гетерогенности реакции и адсорбции Ленгмюра не позволяют количественно описать зависимости скорости осаждения ПКЛК от парциальных давлений моносилана и закиси азота [8]. С другой стороны, как показано в [9], мо-

дель Ленгмюра непригодна для описания адсорбции большинства газов на реальной поверхности твердого тела.

В настоящей работе исследовалась кинетика процессов осаждения пленок ПКЛК в системе «концентрированный моносилан — закись азота» в горизонтальном реакторе пониженного давления с горячими стенками с предварительным рассмотрением кинетики роста нелегированных пленок поликристаллического кремния.

Методика проведения эксперимента

В качестве подложек использовали пластины кремния, легированного бором, диаметром 100 мм с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 12 Ом·см, на которых предварительно выращивался термический оксид кремния толщиной $42,5 \pm 2,5$ нм. В качестве реагентов использовали концентрат моносилана и закись азота электронного класса чистоты.

Температуру осаждения $T_{\text{ос}}$ изменяли от 650 до 750°C. Температурный профиль поддерживали с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$. Рабочее давление P_{Σ} изменялось в диапазоне 24–53 Па. При осаждении пленок ПК без легирования парциальное давление моносилана P_{SiH_4} изменяли путем добавления в газовую смесь азота.

При осаждении ПКЛК соотношение расходов N_2O и SiH_4 (γ) изменяли от 0,05 до 1,0 путем изменения расхода закиси азота.

Загрузка-выгрузка подложек — бесконтактная, с использованием консоли из карбида кремния.

Толщину осажденных пленок определяли при помощи спектрофотометра MPV-SP «Leitz». Определение содержания кислорода в пленках ПКЛК проводили при помощи Оже-спектрометрии на установке PHI-660.

Кинетика роста пленок нелегированного ПК

Для описания кинетики роста пленок нелегированного ПК, полученных пиролизом концентрированного моносилана (при расходе закиси азота, равном нулю), использовали адсорбционно-кинетическую модель, предложенную в [10, 11]. Согласно этой модели, химическая реакция осаждения пленок поликристаллического кремния является гетерогенной реакцией 1-го порядка, и характеристиками процесса осаждения являются:

- константа K скорости протекания реакции при фиксированной температуре;
- константа $\beta = K\gamma\tau S_0$ (τ — среднее время пребывания молекул моносилана на поверхности, S_0 — начальное значение вероятности их «прилипания» к поверхности);
- произведение τS_0 ;
- коэффициент K_1 , учитывающий константы скорости десорбции и адсорбции на хемосорбционных центрах и коэффициент конденсации;

Для исследования кинетики процесса были получены экспериментальные зависимости скорости осаждения пленки V от парциального давления моносилана (рис. 1) и использована методика, изложенная в [11]. Результаты, полученные при различных значениях давления и температуры процесса осаждения, приведены в табл. 1 и на рис. 2.

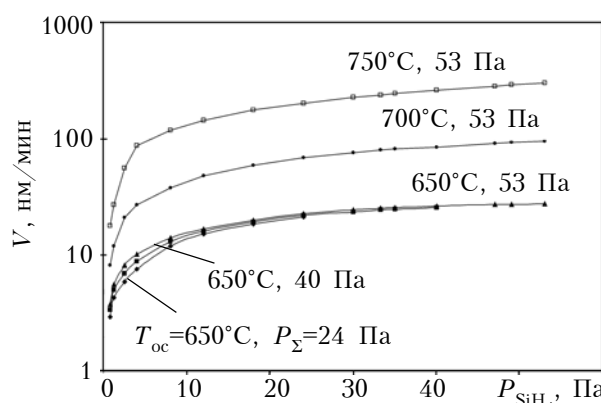


Рис. 1. Зависимость скорости осаждения пленок нелегированного ПК от парциального давления моносилана для различных значений $T_{ос}$ и P_{Σ}

Таблица 1

Значения констант, характеризующих процесс осаждения пленок ПК

P_{Σ} , Па	$T_{ос}$, °C	K , с ⁻¹	K_1	τS_0 , 10 ⁻¹⁵ с	β , 10 ²³ н ⁻¹ с ⁻¹
24	650	4,21	0,994	4,768	3,073
33,25		4,29	1,01	5,070	3,330
40		4,36	1,01	5,291	3,531
49		4,33	1,06	5,736	3,802
		4,35	0,99	5,882	3,917
53	700	16,7	1,0	3,418	8,510
	750	61,4	1,0	2,096	18,70

Из табл. 1 видно, что при увеличении температуры осаждения значения K и β возрастают, а τS_0 уменьшается. С увеличением общего давления в реакторе наблюдается возрастание K , β и τS_0 . В то же время, для величины K_1 не было обнаружено систематических изменений.

Поскольку $K = \text{const}$ при фиксированной $T_{ос}$, из рис. 2, а можно увидеть, как изменяется вероятность прилипания S молекул моносилана к поверхности осаждения по мере роста степени заполнения адсорбционных центров θ : увеличение температуры осаждения приводит к смещению кривых в сторону увеличения $K\theta$ и к тому, что нисходящий участок становится более пологим. Эти зависимости свидетельствуют о том, что при более низких температурах с увеличением P_{SiH_4} степень насыщения изменяется быстрее, чем при высоких, при этом вероятность прилипания уменьшается тоже быстрее. В то же время, как видно из рис. 2, б, изменение суммарного давления в реакторе не оказывает существенного влияния на величину S .

Кинетика роста пленок ПКЛК

Как отмечалось, например, в [12], введение легирующих добавок приводит к уменьшению скорости осаждения и существенно изменяет кинетику осаждения пленок поликристаллического кремния. Рассмотрим приведенные на рис. 3 экспериментальные зависимости, которые были

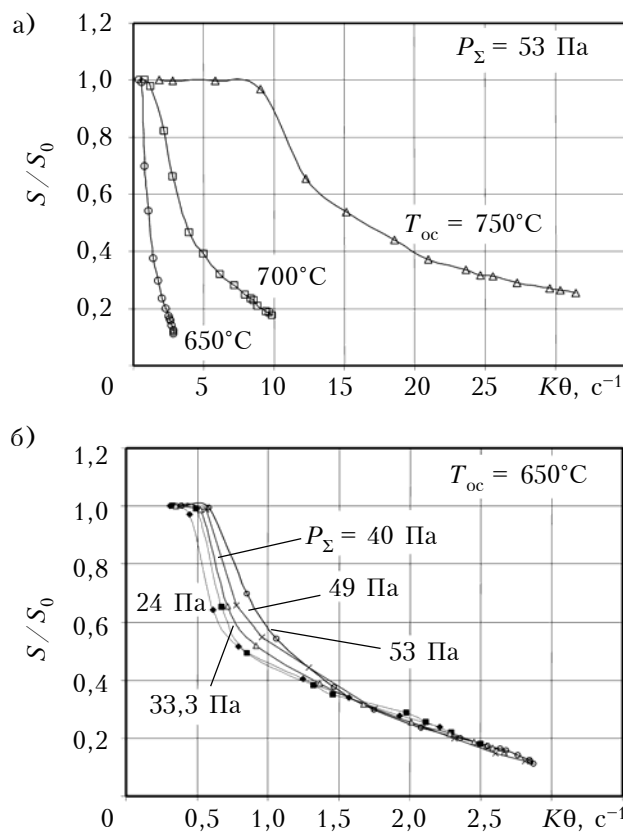


Рис. 2. Зависимость отношения S/S_0 от $K\theta$ при осаждении пленок нелегированного ПК для различных значений $T_{ос}$ (а) и P_{Σ} (б)

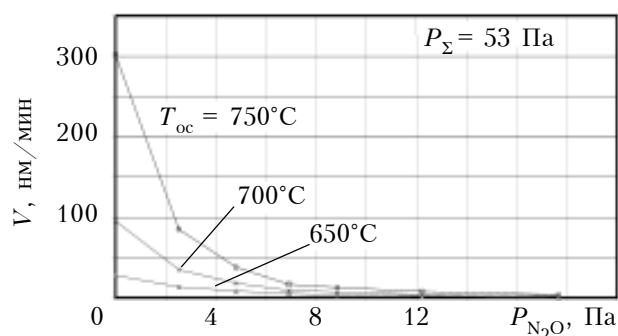


Рис. 3. Зависимости скорости осаждения пленок ПКЛК от парциального давления закиси азота для различных значений T_{oc}

использованы для изучения кинетики процесса по методике, приведенной в [11].

В отличие от плавной зависимости скорости осаждения от парциального давления закиси азота P_{N_2O} при $T_{oc}=650^\circ\text{C}$, при температуре осаждения 700 и 750°C наблюдается резкое уменьшение V при увеличении P_{N_2O} до $2-3$ Па. Однако в области высоких давлений скорость осаждения перестает зависеть от температуры (графики всех трех зависимостей практически совпадают), что свидетельствует о конкурентном характере адсорбции моносилана и закиси азота одними и теми же центрами адсорбции [12].

При осаждении пленок ПКЛК в системе «концентрированный моносилан — закись азота» соотношение S/S_0 будет зависеть от суммарной степени заполнения поверхности θ_Σ молекулами SiH_4 и N_2O . Значения θ_Σ были определены согласно [11] с использованием экспериментальных зависимостей рис. 3 и соответствующих значений K , K_1 и β (табл. 1). Степень заполнения поверхности закисью азота θ_{N_2O} равна разности между θ_Σ и θ_{SiH_4} . Типичные зависимости θ_Σ , θ_{SiH_4} и θ_{N_2O} от парциального давления N_2O представлены на рис. 4. Расчеты показывают, что уже при P_{N_2O} более 2 Па значение суммарной степени заполнения адсорбционных центров определяется в основном адсорбцией закиси азота.

Таблица 2

Значения констант, характеризующих процесс осаждения пленок ПКЛК

$T, ^\circ\text{C}$	$P_\Sigma, \text{Па}$	$P_{N_2O}, \text{Па}$	K_1'	β'	$\tau S_0', 10^{-4} \text{с}$
650	24	0–12,0	0–0,023	0,189374	1,1584
	40	0–13,3	0–0,0237	0,188868	1,1553
	53	0–17,7	0–0,0127	0,173761	1,0629
700	53	0–17,7	0–0,156	0,208966	1,3124
750	53	0–4,8	0,13–0,15	0,233162	1,5015

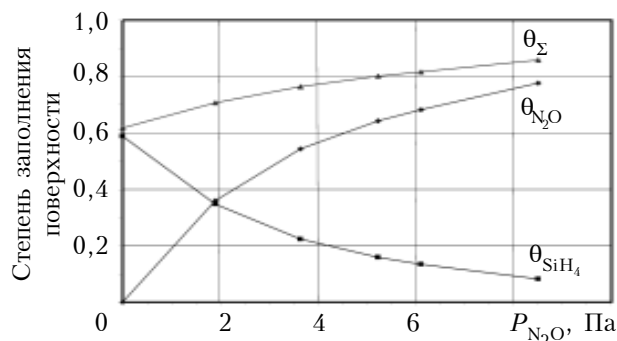


Рис. 4. Зависимости θ_Σ , а также степени заполнения поверхности молекулами SiH_4 (θ_{SiH_4}) и N_2O (θ_{N_2O}) от P_{N_2O} при $T_{oc} = 650^\circ\text{C}$ и $P_\Sigma = 40$ Па

Контакты, характеризующие процесс осаждения пленок ПКЛК, были получены в соответствии с [11] и приведены в табл. 2 (обозначения те же, что и в табл. 1, штрих указывает на отношение к пленкам ПКЛК).

Для оценки механизма адсорбции закиси азота для каждого из исследованных значений температуры и суммарного давления были построены зависимости вспомогательной функции z (см. [11]) от $1-\theta_\Sigma$ с использованием соответствующих значений β' и расчетных зависимостей θ_Σ и θ_{N_2O} от P_{N_2O} . В отличие от процесса осаждения пленок поликристаллического кремния, легированных в процессе роста фосфором, эти зависимости имеют линейный характер (рис. 5), что свидетельствует о недиссоциативном характере адсорбции молекул закиси азота.

Как видно из табл. 2, значения K_1' немного меньше 1, следовательно, для закиси азота коэффициент адсорбции намного больше коэффициента десорбции.

Теоретические зависимости скорости осаждения от парциального давления P_{N_2O} , полученные при помощи разработанной модели, хорошо аппроксимируют экспериментальные результаты и согласуются с результатами [14–16], основанными на многомаршрутности процесса осаждения пленок в системе $\text{SiH}_4-\text{N}_2\text{O}$. Необходимо отметить, что газофазное разложение закиси азота может с заметной скоростью протекать лишь при температурах выше 1000°C [8].

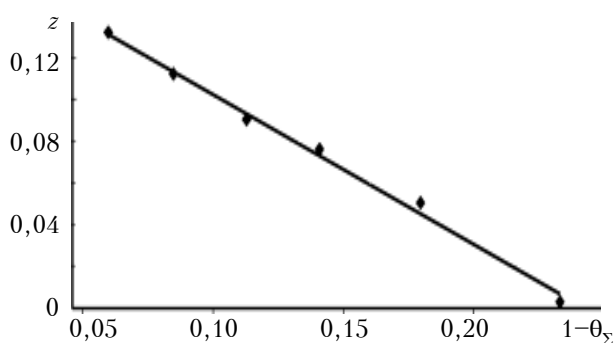


Рис. 5. Типичная зависимость z от $1-\theta_\Sigma$

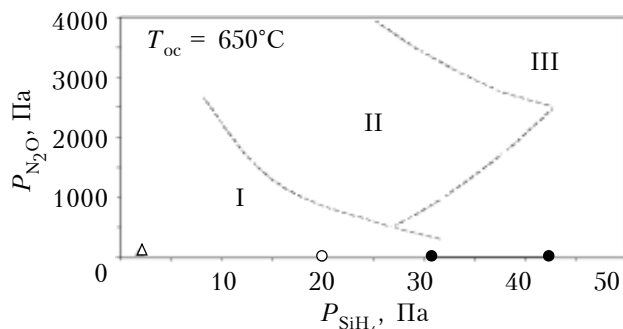


Рис. 6. Области формирования продуктов реакции SiH_4 и N_2O при температуре осаждения 650°C (Δ — условия получения SiO_2 в [18]; \circ — пленок ПКЛК в настоящей работе; \bullet — пленок ПКЛК в [12])

По мере увеличения отношения расходов N_2O и SiH_4 стимулируется протекание газофазных процессов полимеризации силана с образованием силилена, а также более высоких силанов и силиленов, которые тоже окисляются закисью азота и встраиваются в растущую пленку [16].

Известно, что на плоской поверхности вклад моносилана в рост пленки уменьшается при возрастании процентного содержания закиси азота [17]. Это приводит к большему вкладу в процесс осаждения радикалов силилена и к уменьшению общей скорости осаждения. При пиролизе моносилана (коэффициент прилипания 10^{-3} [17]) будет происходить однородное осаждение в любом месте топологического рельефа. С другой стороны, силилен, коэффициент прилипания которого близок к единице, будет быстро вступать в реакцию на плоской поверхности и сильно обедняться на вертикальной ступеньке (или стенке канавки). Поэтому основной вклад в рост пленки ПКЛК на поверхности вносит силилен, а на боковых стенках топологического рельефа — моносилан. Очевидно, что уменьшение соотношения расходов N_2O и SiH_4 позволяет повысить конформность воспроизведения топологического рельефа.

На рис. 6 показаны области формирования продуктов реакции SiH_4 и N_2O при температуре 650°C [14]. В области I происходит рост тонкого бездефектного слоя диоксида кремния [18], в области II на поверхности слоя проявляются видимые через оптический микроскоп частицы, в области III происходит массовое образование частиц в газовой фазе и появление микронизированного порошка SiO_2 (аэросила). Видно, что при парциальных давлениях моносилана более 20 Па заметен вклад газофазных реакций.

В [12] было показано, что при температуре 650°C в диапазоне значений γ от 0,05 до 1,0 происходит образование пленок ПКЛК, а при $\gamma > 1,0$ — пленок переходного состава SiO_x , близких к SiO_2 . По мере увеличения температуры осаждения до 750°C область, в которой происходит образование ПКЛК, сужается, поэтому при температуре 650°C процесс осаждения ПКЛК является более управляемым по содержанию кислорода.

Заключение

Адсорбционно-кинетическая модель осаждения пленки, предложенная в [11] и уточненная для системы «концентрированный моносилан — закись азота», позволила установить, что для достижения приемлемых скоростей и однородности осаждения пленок ПКЛК нужно обеспечить максимально возможную степень заполнения адсорбционных центров молекулами моносилана. Проведенные исследования показали, что на практике целесообразным режимом осаждения пленок ПКЛК является температура 650°C , суммарное давление порядка 24–40 Па и соотношение расходов N_2O и SiH_4 $\gamma = 0,1–0,25$. При таких условиях еще не происходит блокирования адсорбции моносилана молекулами закиси азота и обеспечивается хорошая управляемость процесса по содержанию кислорода в пленке при приемлемых скоростях осаждения, а также конформное осаждение пленок ПКЛК. При $\gamma > 0,25$ и при суммарном давлении выше 50 Па возрастает вклад газофазных процессов полимеризации силана с образованием силилена, а также более высоких силанов и силиленов, которые также окисляются закисью азота и встраиваются в растущую пленку, однако при этом ухудшается конформность осаждения.

Отметим, что установленные закономерности роста пленок ПКЛК могут быть использованы при разработке процессов осаждения пленки с заданными свойствами на пластинах диаметром до 200 мм как в горизонтальных, так и в вертикальных реакторах пониженного давления, а также для получения слоев оксида кремния с нанокристаллами кремния.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Y., Lesnikova V. P. et al. The effect of pressure and $\text{N}_2\text{O}/\text{SiH}_4$ ratio on the properties of SIPOS films // Books of Abstracts, International Conference “Micro- and Nanoelectronics 2005”. — 2005. — Russia, Moscow, Zvenigorod. — P. 31.
2. Mimura A., Oohayashi M., Furakami S., Momma N. High-voltage planar structure using SiO_2 -SIPOS- SiO_2 film // IEEE Electron. Device Lett. — 1985. — Vol. EDL-6. — P. 189–191.
3. Блихер А. Физика силовых биполярных и полевых транзисторов / Под ред. И. В. Грехова. — Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. [Blikher A. Fizika silovykh bipolyarnykh i polevykh tranzistorov / Pod red. I. V. Grekhova. Leningrad: Energoatomizdat, 1986.]
4. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Ануфриев Л. П. и др. Структурно-морфологические и электрофизические свойства пленок полуизолирующего кремния // Вакуумная техника и технология. — 2006. — Т. 16. — № 4. — С. 259–266. [Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Yu., Anufriev L. P. i dr. // Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. 2006. Vol. 16. N 4. P. 259]
5. Kamins T. Polycrystalline silicon for integrated circuits and displays. — Kluwer Academic Publishers. — 1998. — P. 1–86, 245–313.
6. Турцевич А. С., Ануфриев Л. П. Пленки поликристаллического кремния в технологии производства интегральных схем и полупроводниковых приборов. — Минск: Белорусская наука, 2006. — С. 99–106. [Turtsevich A. S., Anufriev L. P. Plenki polikristallichesкого kremniya v tekhnologii

производства integral'nykh skhem i poluprovodnikovyykh priborov. Minsk: Belorusskaya nauka, 2006. P. 99]

7. Патент №5751043 США. СЗУПВ с резистором из SIPOS, H01L 27/11/Чу-Сан Ю. — 12.05 1998. [Patent №5751043 SShA./Chu-San Yu. 12.05 1998.]

8. Репинский С. М. Химическая кинетика роста слоев диэлектриков в сб. «Современные проблемы физической химии». — Н.: Наука. — Сибирское отделение. — 1988. — С. 118—124. [Repinskii S. M. V sb. «Sovremennyye problemy fizicheskoi khimii». N.: Nauka. — Sibirskoe otdelenie. 1988. P. 118]

9. Робертс М., Макки Ч. Химия поверхности раздела металл — газ. — Москва: Мир. — 1981. [Roberts M., Makki Ch. Khimiya poverkhnosti razdela metall — gaz. Moscow: Mir. 1981]

10. Наливайко О. Ю., Турцевич А. С., Адсорбционно-кинетическая модель осаждения пленок поликристаллического кремния, легированного фосфором в процессе роста // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2009. — № 6. — С. 50—55. [Nalivaiko O. Yu., Turtsevich A. S. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2009. N 6. P. 50]

11. Турцевич А. С., Румак Н. В., Наливайко О. Ю., Макаревич И. И. Кинетика роста пленок поликристаллического кремния, полученных пиролизом концентрированного моносилана при пониженном давлении // Электронная техника. Сер. 7. — 1993. — Вып. 4 (179)—5 (180). — С. 35—39. [Turtsevich A. S., Rumak N. V., Nalivaiko O. Yu., Makarevich I. I. // Elektronnaya tekhnika. Ser. 7. 1993. Iss. 4 (179)5 (180). P. 35]

12. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Макаревич И. И. и др. Кинетика процесса осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{—N}_2\text{O}$ в реакторе пониженного давления. Часть 1. Поликристаллический кремний, легированный кислородом // Поверхность. — 1996. — № 8. — С. 10—18. [Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Yu., Makarevich I. I. i dr. // Poverkhnost'. 1996. N 8. P. 10]

13. Сухов М. С. Механизм пиролиза моносилана при пониженном давлении // Известия АН СССР, сер. Неорганические материалы. — 1982. — Т. 18, № 7. — С. 1077—1082. [Sukhov M. S. // Izvestiya AN SSSR, ser. Neorganicheskie materialy. 1982. Vol. 18, N 7. P. 1077]

14. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Гайдук П. И. Начальная стадия роста слоев поликристаллического кремния, легированного в процессе роста кислородом // Вакуумная техника и технология. — 2009. — Т. 19, № 1. — С. 25—30. [Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Yu., Gaiduk P. I. // Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya. 2009. Vol. 19, N 1. P. 25]

15. Турцевич А. С., Емельянов В. А. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем. — Минск: Интегралполиграф, 2007. — С. 26—49. [Turtsevich A. S., Emel'yanov V. A. Formirovanie iz gazovoi fazy funktsional'nykh sloev integral'nykh mikroskhem. Minsk: Integralpoligraf, 2007. P. 26]

16. Турцевич А. С. Получение полуизолирующего кремния для высоковольтных приборов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 1. — С. 35—41. [Turtsevich A. S. // Tekhnologiya i Konstruirovanie v Elektronnoi Apparature. 2008. N 1. P. 35]

17. Gris H., Caussat B., Cot D. et al. LPCVD silicon-Based Film Formation in Submicrometer Trenches in Industrial Equipment: Experiments and Simulation // Chem. Vap. Deposition. — 2002. — Vol. 8. — № 5. — P. 213—219.

18. Турцевич А. С., Наливайко О. Ю., Зайцев Д. А. и др. Кинетика процесса осаждения слоев в системе $\text{SiH}_4\text{—N}_2\text{O}$ в реакторе пониженного давления. Часть 2. Высокотемпературный окисел кремния // Поверхность. — 1996. — № 9. — С. 14—18. [Turtsevich A. S., Nalivaiko O. Yu., Zaitsev D. A. i dr. // Poverkhnost'. 1996. N 9. P. 14]

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.09 2011 г.

Nalivaiko O. Yu., Turtsevich A. S. Deposition kinetics of in-situ oxygen doped polysilicon films.

Keywords: polysilicon, adsorptive-kinetic model, film deposition.

The influence of deposition conditions on composition of in-situ oxygen doped polysilicon films has been investigated. A kinetic model of adsorption-deposition process using concentrated silane and nitrous oxide has been developed. The range of optimal ratios of silane and nitrous oxide flows and deposition temperature, which provide the acceptable deposition rate, thickness uniformity, controllability of oxygen content in films and conformal deposition, have been determined.

Republic of Belarus, Minsk, «Integral».

Наливайко О. Ю., Турцевич А. С. Кінетика процесів осадження плівок полікремнію, легованого киснем в процесі росту.

Ключові слова: полікристалічний кремній, адсорбційно-кінетична модель, процес осадження плівок.

Досліджено вплив умов осадження на склад плівок полікристалічного кремнію, легованого в процесі росту киснем (ПКЛК). Розроблено адсорбційно-кінетичну модель процесу осадження ПКЛК з використанням концентрованого моносилану і закису азоту. Визначено область оптимальних співвідношень їх витрат та температур осадження, при яких забезпечуються прийнятна швидкість і однорідність осадження, а також керованість за вмістом кисню у плівках ПКЛК і конформне осадження плівок ПКЛК.

Республіка Білорусь, м. Мінськ, ВАТ «Інтеграл».

UDC 621.315

*Dr.Sc. T. D. DZHAFAROV, Ph.D. S. S. ASLANOV, Ph.D. S. H. RAGIMOV,
M. S. SADIGOV, A. F. NABIYEVA, Ph.D. S. AYDIN YUKSEL¹*

Azerbaijan, Baku, Institute of Physics of ANAS; Turkey, ¹University of Kocaeli
E-mail: caferov@physics.ab.az

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF SILICON SOLAR CELLS BY NANOPOROUS SILICON COATING

In the present paper the method is shown to improve the photovoltaic parameters of screen-printed silicon solar cells by nanoporous silicon film formation on the frontal surface of the cell using the electrochemical etching. The possible mechanisms responsible for observed improvement of silicon solar cell performance are discussed.

Keywords: silicon, solar cell, efficiency, nanoporous silicon.

The surface modification can be used to reduce the surface reflectance and thereby improve the conversion efficiency of silicon solar cells. The technique widely used for this purpose in industrial applications is anisotropic chemical texturization, using an alkaline solution, NaOH solution, etc [1]. However, the reflectance of the textured structures is usually over 10% in the range of wavelength from 300 to 1200 nm. Moreover, the pyramid texturing has a few disadvantages. Firstly, the results are not always reproducible, secondly, it is difficult to apply the standard industrial process due to its high cost. In recent years, tetramethylammonium hydroxide solution has been used for random pyramid texturization [2].

In order to achieve a lower reflectance, antireflection coating (**ARC**) is widely used for silicon solar cell technology. ARC presents thin film of transparent material with refractive index (n) between those of air ($n=1$) and Si ($n=3,84$). ARCs are generally fabricated by plasma-enhanced chemical vapor deposition, which increases in the cost of solar cells [3].

The solar radiation spectrum expands from ultraviolet and visible to infrared wavelengths. A single-layer antireflection coating allows a reduction in reflectance only in a narrow wavelength region of the solar spectrum. Moreover, the effective reflectance of such coatings still represents about 11% of the incident photon flux [4]. Single-layer LARCs include SiN_x , Ta_2O_3 , ZnS , Al_2O_3 , etc. A wider spectral range (450–700 nm) and lower effective reflectance may be obtained by increasing the number of layers, i. e. a double-layers antireflection coating [5]. The most efficient systems are currently the ZnS/MgF_2 , $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ double-layer coatings. However, these layers are deposited in vacuum by PECVD method which is a major drawback for low-cost industrial applications.

A promising technique is the formation of porous silicon (**PS**) on the frontal surface of silicon solar cell [6]. The crystalline structure of PS presents a network of silicon in nano(micro)-sized regions surrounded by void space with a very high surface-to-volume ratio (up to $10^3 \text{ m}^2/\text{cm}^3$). In the spongy-form porous silicon structure quantum effects play the fundamental role (quantum sponge) [7]. The pore surfaces are covered with silicon hydrides and silicon oxides and therefore are chemically very active. These features of PS (a quantum system, a sponge structure and extremely large pore surfaces) ensure many possible applications, such as light emitting diode, antireflection coating for solar cells, hydrogen fuel cell, gas sensor and other applications [8].

A very important advantage of using PS for solar cells is that the surface roughness can reduce the reflectance to very low values. Moreover, adjusting the band gap of nanoporous silicon during fabrication process is also possible [9]. These peculiarities of PS together with economy of fabrication process make this material very attractive for the industry of solar cells fabrication industry.

The effective refractive index of PS ($n=2-3$) is lower than that of bulk silicon ($n=3,84$) and it can be altered by changing the porosity and therefore be used as ARC for silicon solar cells [10].

The potential advantages of nanoporous silicon layer for silicon solar cells consist in reducing of surface reflectance, broadening of band gap and absorption spectrum, surface passivation and removal of the dead diffusion region, possibility to convert ultraviolet energy of solar radiation into visible light, which is absorbed more efficiently in silicon [11–13].

The purpose of this paper is to improve the photovoltaic parameters of the screen-printed silicon solar cells by a nanoporous silicon layer formation

on the frontal surface of the cell. For that, the structural properties, luminescence and integrated reflection spectra of PS layer have been investigated. The photovoltaic characteristics and the photosensitivity spectra of ($n^+ - p$)Si solar cells with and without PS layer on the frontal surface of the cell have been measured and compared.

Formation of experimental samples

Monocrystalline p -type silicon wafers with orientation of (100), resistivity of about $3 \Omega\text{-cm}$ and thickness of $250 - 380 \mu\text{m}$ were used for fabrication of solar cells by screen-printed process [14]. The wafers were cleaned in $\text{NaOH:H}_2\text{O}$ (1:4 in volume) at 80°C for 10 min, in HCl at room temperature for 10 min and then etched in $\text{HF:H}_2\text{O}$ (1:1 in volume) for 1 min. Then the samples were washed with deionized water. Cleaned surface of wafer was coated with phosphorus spin-on dopant (KFK-50-10T type) at room temperature by 2000 rpm for 10 s. Then the coated samples were baked at 600°C for 2 min for destruction of the coating.

The $n^+ - p$ junction was formed by phosphorus diffusion from spin-on dopant into p -type silicon substrate at 950°C for 25 min in a tube furnace. The phosphosilicate glass layer was removed from the silicon surface with hydrofluoric acid solution ($\text{HF:H}_2\text{O}$, 1:9). As a result of phosphorus diffusion, n^+ emitter layer with $0,5 - 1,0 \mu\text{m}$ thickness and $15 - 20 \Omega/\square$ sheet resistance was formed. The electrical contacts were made by screen-printed process with a Du Ponte photovoltaic silver paste for front contact and silver with 3% aluminum paste for the back contact. Samples with silver contacts were baked at 200°C for 10 min and then metallization was done at 800°C for 10 min in the conventional annealing furnace. The structure of the PS/($n^+ - p$)Si is given on **fig. 1**. Antireflection coating, texturization and surface passivation were not carried out in this work.

Choice of optimal thickness of porous silicon layer as ARC on surface of $n^+ - p$ silicon solar cell and the refractive index which strongly depends on porosity [15] was defined from conditions presented below.

The optimization of parameters of ARC (the refractive index and thickness) was based on the

stratified medium theory and the Bruggeman effective medium approximation [16].

The zero-reflection for normal incidence of light on ARC/Si system is given in [17]

$$n_{\text{ARC}} = \sqrt{n_0 n_s} \quad (1)$$

where n_{ARC} , n_{Si} and n_0 are the refractive indexes of antireflection coating, silicon and the ambient medium respectively.

The optimal single layer thickness (d_{ARC}) for minimum reflection for wavelength λ is defined by equation [18]

$$d_{\text{ARC}} = \frac{\lambda}{4n_{\text{ARC}}} \quad (2)$$

If conditions (1) and (2) for air/ARC/Si system are to be satisfied ($n_0=1$ for air and $n_{\text{Si}}=3,84$ for Si), then the optimal values of refractive index and thickness (a quarter of wavelength) of porous silicon layer serving as ARC must be (for $\lambda=650 \text{ nm}$) $n_{\text{ARC}}=1,96$ and $d_{\text{ARC}}=83 \text{ nm}$ respectively. For glass/PS/Si system with encapsulating glass refractive index of $n_g=1,55$, optimal values for n_{ARC} and d_{ARC} of PS are 2,45 and 65 nm respectively.

Taking into account the refractive index, depending on porosity of porous silicon given in [15], one may conclude that the porous silicon layer of $80 - 90 \text{ nm}$ thickness and about of 55% porosity ($n=2$) can act as ARC having minimum reflectance, which will improve the photovoltaic parameters of PS/($n^+ - p$)Si solar cells.

Formation of porous silicon layer on n^+ -surface of device was performed on the final step of the solar cell fabrication sequence. Fabrication of PS layer on $n^+ - p$ junction was carried out at constant current under illumination, using the teflon electrochemical cell, which design presupposes that there is an ohmic contact to the back surface of silicon cell. The $n^+ - p$ junction was placed in an electrolyte solution HF:ethanol:water (1:1:1 in volume). A platinum wire electrode was used as a cathode at a distance of 3 cm from n^+ Si surface which acted as the anode. For obtaining PS layers with different thicknesses, a set of runs was performed by using a constant current density for different anodization time. The growth rate of porous silicon on Si substrate, measured for current density of 60 mA/cm^2 , was about 8 nm/s , which is similar to the data presented in [19]. Therefore, the time of electrochemical etching under a constant current of 40, 50 or 60 mA/cm^2 was 8 – 15 s. As a result, blue colored PS layer between the grid fingers on the surface of n^+ -emitter silicon solar cell have been obtained (**fig. 1**).

Moreover, the porous silicon layers were formed also on silicon wafers. The electrical contact on back surface of n -type silicon wafers with resistivity of $\rho=8 \cdot 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ was made by screen-printed process with Ag/Al paste. Electrochemical etching

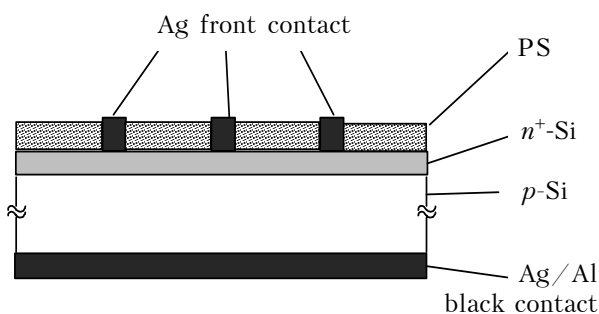


Fig. 1. The structure of the PS/($n^+ - p$) Si solar cell

of silicon wafers was carried out under the same conditions as those for $n^+ - p$ junction, but only the silicon wafers were etched longer than the ready solar cells. The anodization time ranged from 10 seconds to 30 minute. For some measurements, the PS layers were then detached from Si substrate by electro polishing process [20]. Free-standing PS layers were characterized by porosity, thickness, resistivity, luminescence and reflectance measurements. Resistivity measuring, carried out by Van der Pauw technique on the free-standing porous silicon layer of 60% porosity, gave $3 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$.

Experimental technique

The average porosity (P) and thickness (d) of porous layer was obtained by gravimetric technique [20, 21]. The fabricated solar cells (without and with porous silicon layers) were characterized by current-voltage measurements under simulated solar illumination (AM 1,5 G), using Solar Analyzer ("Prova 200"), and in the dark. The spectral distribution of photosensitivity (the short-circuit current) of cells was analyzed in the wavelength range 300 – 1100 nm at 300 K.

The surface morphology and structural properties of prepared samples were obtained by using scanning electron microscopy (JSM-5410LV). The photoluminescence spectrum was performed using SDL spectrometer. A beam of 337,1 nm from nitrogen laser was used for excitation. An examination of photoluminescence peak intensity (at 580 nm) distribution along PS layer thickness was performed by successive removal of thin films from PS (using KOH solution) and measuring photoluminescence intensity. The integrated reflectance of porous Si was measured at room temperature by UV-Vis spectrometer "Specord-250" in the wavelength range 300 – 1000 nm. The spectral response of solar cells was analyzed in the wavelength range 300 – 1100 nm at 300 K.

Discussion of the experiment results

The gravimetric measuring of the average porosity for PF layers fabricated at current density of 40 – 60 mA/cm² showed that it varies from 50 to 70%. Cross cut representation of nanoporous silicon layer showed that the pores have a conical form.

Fig. 2 shows the photoluminescence spectrum of PS layer (60% porosity) on Si substrate. One can see that the spectrum illustrates the peak at $\lambda = 580$ nm (the orange region of solar spectrum). Measurements of distribution of photoluminescence intensity along the thickness of PS layer (of thickness 10 μm) showed that the intensity approximately linearly decreases from the surface into film thickness. These similar results were also obtained on investigations of samples with PS layers of different thickness. Observation of photoluminescence in PS at visible region of the spectrum can be interpreted by quantum confinement effect causing

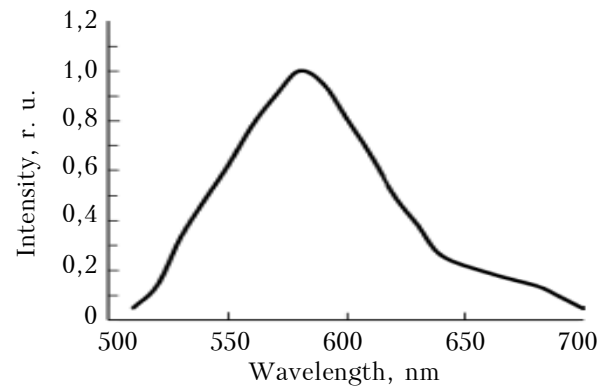


Fig. 2. The photoluminescence spectra for porous silicon layer

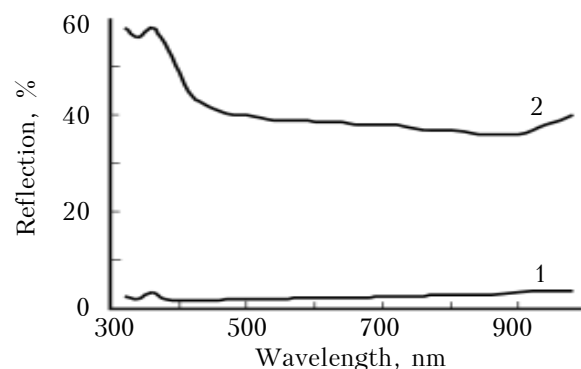


Fig. 3. The reflection spectra of porous silicon (1) and silicon substrate (2)

the confinement of the charge carriers in nanocrystalline silicon wall separating the pore [22].

The integrated reflectance spectra of the polished silicon surface before and after porous silicon layer (of 60% porosity) formation are plotted in **fig. 3**. The figure shows that the significant lowering of reflectance is observed in the PS layer (about 4% in the range of 400 – 1000 nm wavelength) as compared to polished silicon (about 38 – 45%). These data show that PS on $n^+ - p$ silicon solar cell can be used as effective antireflection coating.

The current-voltage characteristic of PS/ $n^+ \text{Si}$ structure (without $n^+ - p$ junction) displays the ohmic behavior. The current-voltage characteristics of $n^+ - p$ silicon solar cells without and with porous silicon layer ($n^+ - p \text{Si}$ and PS/($n^+ - p$)Si structures respectively), measured under AM 1,5 illumination, are presented in **fig. 4**. As a result of the PS coating, the increase of the short-circuit current density (J_{sc}) from 23,1 to 34,2 mA/cm², the open-circuit voltage (V_{oc}) increase from 500 to 520 mV and the conversion efficiency increase from 12,1 to 14,5%. Thus, the experimental results of the photovoltaic parameters for thirty solar cells before and after formation of PS layer on n^+ -emitter surface showed that the mean increment of photocurrent density is about 48%. At the same

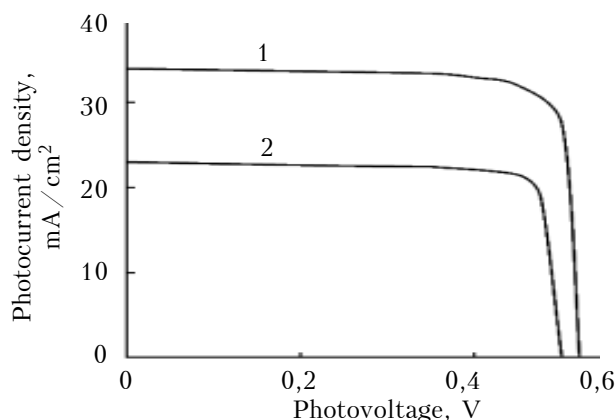


Fig. 4. Photocurrent density-voltage characteristics of $n^+ - p$ silicon solar cell with (1) and without (2) PS layer

time, the open-circuit voltage increase is about 4%. The fill factor remains approximately the same for cells with porous layer ($ff=0,75$) as compared to the solar cells without porous layer ($ff=0,74$). The mean efficiency of photovoltaic conversion for solar cells with PS layer increased from 12 to 14,5%, which equals a relative increment of about 20%.

Analysis of the current-voltage characteristics of solar cells without and with PS layer showed that the series resistance of the cell changes weakly (from 3,09 to 2,94 Ω) and the parallel resistance increases (from 274 to 315 Ω) in the cells with 90 nm PS layer. The small decrease of the series resistance of PS/($n^+ - p$)Si cell can be caused by decreasing of Ag/Si contact resistivity during the short-term etching for PS layer formation [23]. The increase in the parallel resistance of cell, which defines the resistance of junction, can be attributed to gathering of non-controlled impurities by both PS due to the gradient diffusion and electrodiffusion of impurities in PS/($n^+ - p$)Si cell under electrical field, applied during PS fabrication in electrochemical setting [23].

Fig. 5 shows the value of photosensitivity for PS/($n^+ - p$)Si cell is larger (by about 25%) and the spectral photosensitivity region is considerably wider than that for ($n^+ - p$)Si cell.

Thus, the presence of porous silicon layer on surface of n^+ -emitter allows to improve significantly the photovoltaic characteristics of a PS/($n^+ - p$)Si solar cell.

The porous silicon layer performs two functions. On the one hand, it works as an antireflection coating, increasing the incident photon flow on $p^+ - n$ junction, and on the other hand, it creates a wide-band gap optical window (about of 1,8–2,0 eV for PS of 60% porosity [21, 25]), broadening the spectral region of photosensitivity of the cell to ultraviolet part of solar spectrum.

Change of porosity along with the thickness of PS layer can also stimulate the improvement of the photovoltaic parameters of solar cells.

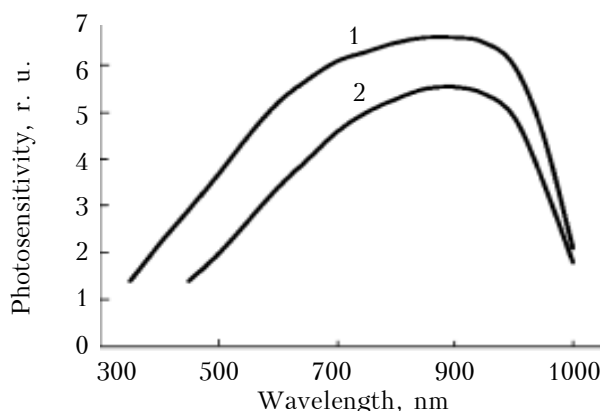


Fig. 5. The photosensitivity spectra of $n^+ - p$ silicon solar cell with (1) and without (2) PS layer

Experimentally observed decrease of intensity of the photoluminescence peak at 580 nm along thickness of PS layer, containing pores of conical form, can be circumstantial evidence for decrease of porosity with thickness. Taking into account the fact that the band gap energy of nanoporous silicon increases with increment of porosity due to quantum confinement of carrier charges [21, 22, 25, 26], one can suppose that the porous silicon layer on ($n^+ - p$)Si cell is semiconductor with variable band gap width (changing from about 1,8–2,0 eV on front PS surface to 1,1 eV on PS/ n^+ Si interface). As a result, the internal electrical field of the porous layer can also increase the photocurrent, generated in solar cell.

It is well known that the photovoltaic parameters of solar cell depend on the series resistance, resulting in performance degradation. Our estimations showed that contribution of additional resistance of the PS layer (thickness of 90 nm, surface area of 10 cm² and resistivity of 3·10⁴ $\Omega \cdot \text{cm}$) is negligibly low (about 3·10⁻² Ω) if compared to series resistance of ($n^+ - p$)Si solar cell (of about 2 Ω).

Thereby, the comparative analysis of PS/Si and Si solar cells showed that the formation of nanoporous silicon layer onto the frontal surface of cell greatly improves its performance. The simplicity and cheapness of the electrochemical fabrication of PS on Si surface make it a suitable technique for high efficiently silicon solar cell manufacturing.

REFERENCES

1. Green M. A. Limiting efficiency of bulk and thin-film silicon solar cells in the presence of surface recombination, Progr. Photovoltaic. — 1999. — Vol. 7. — P. 327–338
2. Papet P., Nichiporik O., Kaminski A. et al. Pyramid textured of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching, Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2006. — Vol. 90. — 2319–2325.
3. Chen Z. Z., Sana P., Salami J. et al. A novel and effective PECVD SiO₂/SiN antireflection coating for Si solar cells, IEE Trans Electron Devices. — 1993. — Vol. 40, N 6. — P. 1161–1168.

4. Bouhafs D., Moussi A., Chikouche A., Ruiz J. M. Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: application to silicon solar cells // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. — 1998. — Vol. 52. — P. 79–93.
5. Zhao J., Wang A., Alternatt P., Green M. A. 24% efficient Si solar cells, M.A. // Appl. Phys. Lett. — 1995. — Vol. 66, N 26. — P. 3636–3641.
6. Menna P., Di Francia G., La Ferrara V. Porous silicon in solar cell: A review and a description of its application as an AR coating // Solar Energy Mater. Solar Cells. — 1997. — Vol. 37. — P. 13–24.
7. Bisi O., Ossicini S., Pavesi L. Porous silicon: a quantum sponge structure for silicon based applications // Science reports. — 2000. — Vol. 38. — P. 1–126.
8. Dzhaфаров Т. Д., Aydin Yuksel S. Nano-porous silicon for gas sensor and fuel cell applications // Journal of Gafgaz University. — 2009. — N 25. — P. 20–35.
9. Green M. A. Thin film solar cells: review of materials, technologies and commercial status // J. Mater. Sci: Mater. Electron. — 2007. — 18. — P. S15–S28.
10. Krotkus A., Grigoros K., Pacebutas V. Efficiency improvement by porous silicon coating of multicrystalline solar cells // Solar Energy Mater. Solar Cells. — 1997. — Vol. 45, N 3. — P. 267–273.
11. Yerokhov V. Y., Melnik I. I. Porous silicon in solar cell structures: a review of achievements and modern directions of further use // Renewable and Sustainable Energy. — 1999. — Vol. 3, N 4. — P. 291–322.
12. Bastide S., Strehlke S., Cuniot M. et al. Porous silicon emitter for silicon solar cells // Proceed. of 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference. — France, Nice, 1995. — P. 1280–1283.
13. Ramizy A., Hassan Z., Omar K., Al-Douri Y., Mahdi M. A. New optical features to enhance solar cell performance based on porous silicon // Appl. Surf. Science. — 2011. — Vol. 257. — P. 6112–6117.
14. Neuhaus D., Munzer A. Industrial silicon wafer solar cells // Advances in Electronics. — 2007. — N 4. — P. 1–15.
15. Kim J. Formation of porous silicon anti-reflection layer for a silicon solar cell // Journal of the Korean Physical Society. — 2007. — Vol. 50, N 4. — P. 1168–1171.
16. Born M., Wolf E. Principles of Optics. — London: Pergamon Press, 1970.
17. Goodman A. M. Optical interference method for measuring of refractive index and thickness of a transparent layer // Appl. Optics. — 1978. — Vol. 17. — P. 2779–2785.
18. Sopori B. L., Pryor R. A. Design of antireflection coatings for textured silicon solar cells // Solar Cells. — 1983. — Vol. 8. — P. 249–254.
19. Ramache L., Mahdjoub A., Fourmond E. et al. Design of porous silicon/PECVD SiO_x antireflection coating for silicon solar cells // Proceed. of Inter. Conf. on Renewable Energies and Power Quality «ICRE PQ-10». — Spain, Granada, March 2010.
20. Dzhaфаров Т. Д., Oruc C., Aydin S. Humidity-voltaic characteristics of Au-porous silicon interfaces // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2004. — Vol. 37. — P. 404–409.
21. Dzhaфаров Т. Д., Aydin Yuksel S. Nano-porous silicon-based mini hydrogen fuel cells // In book: Alternative Fuel. — Rijeka: Intech, 2011. — P. 309–346.
22. Canham L. T. Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. — 1990. — Vol. 57. — P. 1046–1054.
23. Firor K., Hogan S. Effect of processing parameters of thick film inks for solar cell metalization // Solar Cells. — 1981–1982. Vol. 5. — P. 87–100.
24. Abdullaev G. B., Dzhaфаров Т. Д. Atomic Diffusion in Semiconductor Structures. — New York: Harwood Academic Publisher, 1987.
25. Pickering C., Beale M. I. J., Robbins D. J., Pearson P. J., Greef R. Optical studies of the structure of porous silicon films formed in p-type degenerate and non-degenerate silicon // J. Phys. — 1984. — Vol. C17. — P. 6535–6552.
26. Sagnes I., Halimaoui G., Vincent G., Badoz P. A. Optical absorption evidence of a quantum size effect in porous silicon // Appl. Phys. Lett. — 1993. — Vol. 62. — P. 1155–1161.

Received 20.02 2012

Джафаров Т. Д., Асланов Ш. С., Рагимов Ш. Х., Садыгов М. С., Набиева А. Ф., Айдин Юксел С. **Повышение эффективности кремниевых солнечных элементов посредством нанопористого покрытия.**

Ключевые слова: солнечный элемент, монокристаллический кремний, нанопористый кремний, эффективность преобразования

Исследовано улучшение фотоэлектрических параметров кремниевых солнечных элементов, полученных методом трафаретной печати, за счет образования слоя пористого кремния на фронтальной поверхности элемента. Рассмотрены возможные механизмы, ответственные за улучшение производительности кремниевой солнечной ячейки.

Азербайджан, Баку, Институт физики НАНА; Турция, Университет Коджаели.

Джафаров Т. Д., Асланов Ш. С., Рагимов Ш. Х., Садыгов М. С., Набиева А. Ф., Айдин Юксел С. **Підвищення ефективності кремнієвих сонячних елементів за допомогою нанопористого покриття.**

Ключові слова: сонячний елемент, монокристалічний кремній, нанопористого кремній, ефективність перетворення.

Досліджено поліпшення фотоелектричних параметрів кремнієвих сонячних елементів, отриманих методом трафаретного друку, за рахунок утворення шару пористого кремнію на фронтальній поверхні елемента. Розглянуто можливі механізми, відповідальні за поліпшення продуктивності кремнієвого сонячного елемента.

Азербайджан, Баку, Інститут фізики НАНА; Туреччина, Університет Коджаелі.

УДК 537.311.33:622.382.33

Д. ф.-м. н. О. А. КУЛИНИЧ, к. ф.-м. н. И. Р. ЯЦУНСКИЙ¹,
Т. Ю. ЕШТОКИНА, Г. И. БРУСЕНСКАЯ, И. А. МАРЧУК¹

Украина, Одесский национальный экономический университет,
¹Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова

E-mail: koeltech@i.ua

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА «SiO₂—Si»

Показана возможность использования метода фотолюминесценции для изучения механизмов пластической деформации на границе «оксид кремния — кремний» в процессе получения слоев наноструктурированного кремния деформационным методом.

Ключевые слова: фотолюминесценция, пластическая деформация, дефекты, дислокации, напряжения.

Форма, фотоэлектрические и механические свойства наноструктурированного кремния зависят не только от свойств исходного материала, но и от метода его формирования [1]. Известно, что все основные современные методы получения наноструктурированного кремния — литографический, эпитаксиальный, коллоидный — основаны на получении мезаструктуры, при химической обработке которой можно сформировать наноразмерные частицы как на поверхности пластин, так и в объеме [2]. Все эти методы объединяет то, что основными механизмами получения мезаструктур являются деформационные механизмы, при которых на границе раздела контактирующих материалов релаксируют механические напряжения, что ведет к возникновению пластической деформации. И хотя все основные механизмы пластической деформации известны, остаются вопросы, связанные с конкретными механизмами, действующими при разных методах формирования наноструктурированного кремния.

Известно, что слои пористого или наноструктурированного кремния можно формировать с помощью электрохимического и/или химического избирательного травления с предварительной обработкой мощным лазерным излучением (лазерной модификацией поверхности с целью получения развитой дефектной структуры) [3]. В связи с этим, представляют интерес дальнейшие исследования по поиску новых способов получения наноструктурированного кремния с заданной структурой. В [4] для получения развитой периодической структуры наноструктурированного кремния предложен метод, основанный на выращивании слоя термического оксида различной толщины с последующим его травлением и обработкой химическими избирательными травителями (ИТ). В основу метода положена идея использования термического окисле-

ния при различной температуре и в разных средах для получения оксидов кремния различной толщины, что приводит к возникновению в переходной области дислокационных сеток с различным периодом и — при дальнейшей обработке ИТ — к образованию островков различных размеров бездефектного наноструктурированного кремния.

Целью настоящей работы является определение возможности применения метода фотолюминесценции (ФЛ) для изучения механизмов пластической деформации при формировании плотных массивов наноструктурированного кремния на примере деформационного метода его получения. Этот метод основан на выращивании оксида кремния различной толщины с последующим его удалением и обработкой периодической мезаструктуры на поверхности кремния химическими избирательными травителями.

Объектами исследований являлись пластины монокристаллического кремния марок КЭФ-4,5 (111) и КДБ-10 (100). Пластины кремния окислялись в атмосфере сухого кислорода при температуре 1150°C (толщина оксида составляла от 0,1 до 1,5 мкм) и затем травились в растворе HF. Поверхность кремния предварительно обрабатывалась смесью Каро и перекисноаммиачным раствором [5], а далее — химическими ИТ Сэкко (поверхность 100) и Сиртля (поверхность 111) [6, 7]. Применение такой предварительной обработки позволило повысить эффективность избирательного травления, т. к. дополнительное окисление поверхности кремния способствует ослаблению связей Si—Si.

Поверхность кремния после химической обработки исследовали методами электронной сканирующей микроскопии (микроскоп-анализатор Cam Scan-4 D с системой энергетического дисперсионного анализатора Link-860) и Оже-электронной спектроскопии (ЭОС) использовали

спектрометр LAS-3000 фирмы Ribet. Оптические исследования проводили с помощью металлографического микроскопа ММР-2Р. Спектр ФЛ измеряли с помощью спектрометра ДФС с фотумножителем ФЭУ в режиме стробирования и счета фотонов после послойного химического избирательного травления пластин при облучении лазером с длиной волны 337 нм, длительностью импульсов 10 нс, частотой повторения 50 Гц и средней мощностью 10 мВт.

Величина возникающих на границе раздела «оксид кремния — кремний» деформаций зависит не только от параметров оксида и кремния, но и от наличия дефектов в исходном кремнии. На **рис. 1** представлено электронное изображение дендритных дефектов, имеющих примесную природу, полученное при исследовании поверхности кремния после обработки смесью Каро и перекисноаммиачным раствором с последующей обработкой химическим ИТ в те-



Рис. 1. Дендриты на поверхности пластины кремния КДБ-10 (100)

чение трех минут. В некоторых случаях наблюдалось появление дефектов слоистой неоднородности с преципитированными примесью дефектами упаковки в центре (**рис. 2**). Рентгеновский и Оже-электронный анализ показал, что этой примесью являются соли калия.

Анализ результатов исследования структуры слоев кремния непосредственно под оксидом позволил установить наличие слоев с сильно разупорядоченной поликристаллической структурой [8]. После обработки этой поверхности смесью Каро и перекисноаммиачным раствором, а затем и химическим ИТ Сиртля в течение пяти минут, наблюдалось появление мезоструктуры в виде дислокационных сеток с периодом, зависящим от толщины выращенного оксида. Дислокационные сетки декорированы кислородом и нестехиометрическими оксидами кремния типа SiO_x . Для их удаления пластины кремния с дислокационными сетками протравливали в избира-

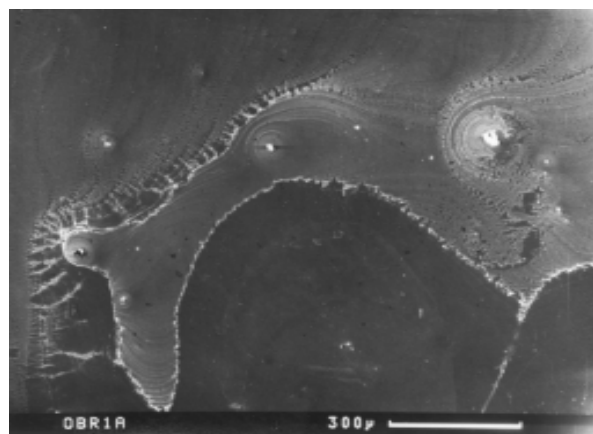


Рис. 2. Дефекты слоистой неоднородности на поверхности кремниевой пластины КЭФ-4,5 (111), полученные после травления ИТ Сиртля в течение 2 мин

тельном травителе Сиртля еще в течение двух минут. После этого было отмечено появление периодической островковой структуры (см. **рис. 3**), состоящей из областей наноструктурированного бездефектного кремния размерами порядка 6—20 нм. Разброс размеров этих островков можно объяснить тем, что в различных областях пластины наблюдается разброс значений напряжения и деформации, связанных с наличием различных исходных дефектов.

Для выяснения механизмов пластической деформации, которые действуют при различной толщине оксида кремния, проводили измерения спектров ФЛ наноструктурированного кремния

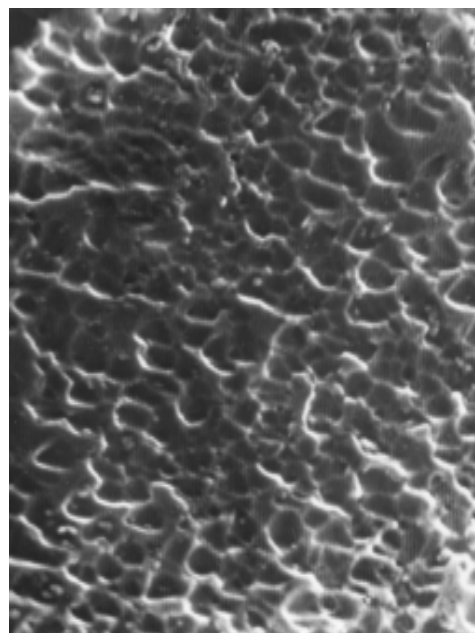


Рис. 3. Периодическая островковая структура, состоящая из областей наноструктурированного бездефектного кремния на поверхности пластины кремния КЭФ-4,5 (111)

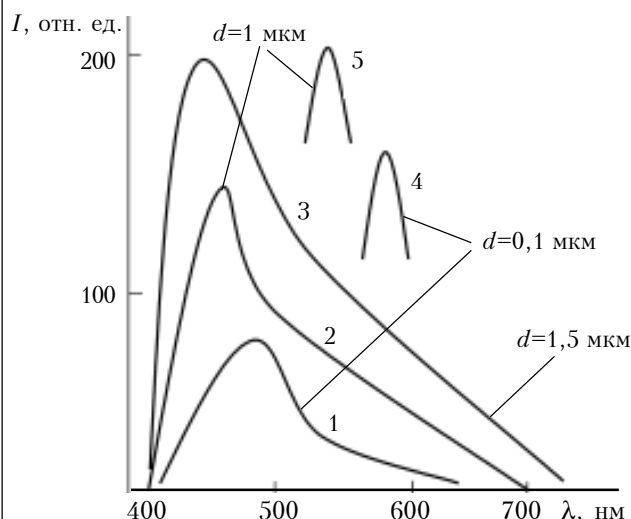


Рис. 4. Амплитудные (1–3) и релаксационные (4–5) ФЛ-спектры, полученные после освещения областей наноструктурированного кремния с различной толщиной оксида

в режиме детектирования максимальных значений интенсивности фотолюминисценции и регистрирования ее релаксационных спектров. На **рис. 4** хорошо видно возрастание интенсивности и смещение максимума спектра в более коротковолновую область при увеличении толщины d оксида до 1,5 мкм. (Отметим, что при дальнейшем увеличении d такого смещения в спектрах не наблюдалось. Это свидетельствует о том, что размеры островков наноструктурированного кремния не уменьшались.) Наблюдаемые релаксационные спектры характеризуются примерно одинаковым временем релаксации (около 18 нс), причем это время характерно для большей части спектрального диапазона и не зависит от интенсивности лазерного облучения в широком диапазоне энергий.

Если сравнивать спектры ФЛ для рассматриваемого случая получения наноструктурированного кремния со спектрами кремния, полученного с помощью электрохимического травления, можно отметить, что в первом случае максимум спектра сдвинут в более коротковолновую область (около 0,4 мкм), а отношение амплитуд «фиолетовой» и «красной» полос более чем в 2,5 раза превышает приведенное в [9]. Это можно объяснить тем, что в процессе окисления с увеличением толщины оксида величина пластической деформации в переходной области увеличивается, что приводит к смещению максимума распределения размеров областей бездефектного кремния в сторону уменьшения их размеров и к увеличению эффективной площади поверхности. В соответствии с квантово-размерной моделью, уменьшение размеров островков наноструктурированного кремния приводит к увеличению квантового зазора между кванто-

выми уровнями и к смещению «фиолетовой» полосы в более коротковолновую область. Возможно, механизмы обнаруженного эффекта связаны с внутрицентральной рекомбинацией (но не экситонной, т. к. для нее характерно время более 100 пс [10]) в области сильного искажения кристаллической решетки в присутствии сильных встроенных электрических полей. Акт излучательной рекомбинации в кристаллах размером порядка 6–20 нм должен происходить менее чем за 10^{-12} с, т. е. практически мгновенно, если учесть, что длина свободного пробега в кремнии при температуре 293 К достигает 130 нм. Очевидно, наиболее вероятным является механизм рекомбинации фотоносителей на расстояниях, равных борновскому радиусу.

Появление пластической деформации на границе раздела «оксид кремния — кремний» в процессе окисления можно представить следующим образом. При малой толщине оксида кремния (порядка нанометров) относительная пластическая деформация возникает вследствие различия постоянных решетки и термических коэффициентов кремния и оксида кремния и достигает значений 0,01–0,02 отн. единиц. Этот процесс сопровождается образованием на границе раздела поликристаллической структуры и области, содержащей дислокационные сетки. С увеличением толщины оксида кремния возрастает вклад в величину деформации составляющей, зависящей от толщины оксида кремния, а вклад составляющей, зависящей от параметров кремния и оксида кремния, остается постоянным. При этом с увеличением толщины оксида кремния увеличивается пластическая деформация и осуществляется переход от транскристаллитного механизма пластической деформации к интеркристаллитному, что и приводит к уменьшению размеров островков наноструктурированного кремния. Когда толщина оксида кремния достигает значений порядка 1,5 мкм, накопленные напряжения релаксируют с образованием дополнительной пластической деформации, которая не приводит к дальнейшему уменьшению размеров островков наноструктурированного кремния. Это говорит о том, что механизм пластической деформации изменился от интеркристаллитного к ротационному, т. е. энергия напряжений расходуется на вращательное движение островков кремния. Размеры островков при дальнейшем увеличении толщины оксида кремния не изменяются вследствие того, что порог пластичности наноструктурированного кремния уже достиг предельно высокого значения (порядка 0,1 от модуля Юнга [11]), а величина напряжения на границе раздела остается меньше этого порога.

Таким образом, метод фотолюминесценции позволил изучить механизмы пластической деформации, действующие при различной толщине

не выращенного оксида кремния при формировании плотных массивов наноструктурированного кремния. Следует отметить, что предложенный деформационный метод формирования наноструктурированного кремния позволяет получать пористый нанокремний с заданной топологией при варьировании таких параметров, как толщина выращенного оксида кремния и время химической обработки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kumar P., Kiran M. Nanomechanical properties of silicon surfaces nanostructured by excimer laser // Sci. Technol. Adv. Mater. — 2010. — Vol. 11. — P. 025003–025011.
2. Алешин А. Н. Квантовые точки // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, № 11. — 2007. — С. 19–21. [Aleshin A. N. // Fizika tverdogo tela. 2007. Vol. 49, N 11. 2007. P. 19]
3. Венгер Е. Ф., Голиней Р. Ю., Матвеева Л. О. Методы получения пористого кремния // Оптоэлектронная и полупроводниковая техника. — 2001. — Вып. 36. — С. 199–203. [Venger E. F., Golinei R. Yu., Matveeva L. O. // Optoelektronnaya i poluprovodnikovaya tekhnika. 2001. Iss. 36. P. 199]
4. Кулинич О. А., Глауберман М. А., Садова Н. Н. О связи фотолюминесцентных свойств пористого кремния с его реальной структурой // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2004. — № 7. — С. 96–99. [Kulinich O. A., Glauberman M. A., Sadova N. N. // Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya. 2004. N 7. P. 96]
5. Кулинич О. А., Лисовская А. А., Садова Н. Н. О повышении выявляющей способности избирательного травления монокристаллов кремния // Украинский физический журнал. — 1990. — Т. 35, № 11. — С. 1691–1695. [Kulinich O. A., Lisovskaya A. A., Sadova N. N. // Ukrainskii fizicheskii zhurnal. 1990. Vol. 35, N 11. P. 1691]
6. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках. — М.: Мир, 1974 [Matara G. Elektronika defektov v poluprovodnikakh. Moscow. Mir, 1974]
7. Рэйви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. — М.: Мир, 1984. [Reivi K. Defekty i primesi v poluprovodnikovom kremnii. M. Mir. 1984]
8. Кулинич О. А., Глауберман М. А., Садова Н. Н. Исследование приповерхностных слоев кремния в структурах SiO₂—Si // Известия вузов. Физика. — 2003. — № 10. — С. 63–66. [Kulinich O. A., Glauberman M. A., Sadova N. N. // Izvestiya vuzov. Fizika. 2003. N 10. P. 63]
9. Беляков Л. В., Горячев Д. Н., Сресели О. М. Быстрая фотолюминесценция импульсно-анодированного кремния // Письма ЖТФ. — 1996. — Т. 22, вып. 3. — С. 14–18. [Belyakov L. V., Goryachev D. N., Sreseli O. M. // Pis'ma ZhTF. 1996. Vol. 22, iss. 3. P. 14]
10. Смытына В. А., Кулинич О. А., Яцунский И. Р. и др. Роль пластической деформации в получении нанокремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 1–2. — С. 22–24. [Smyntyna V. A., Kulinich O. A., Yatsunskii I. R. i dr. // Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature. 2011. N 1–2. P. 22]
11. Малыгин Г. А. Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. — 2007. — Т. 49, вып. 6. — С. 961–983. [Malygin G. A. // Fizika tverdogo tela. 2007. Vol. 49, iss. 6. P. 961]

Дата поступления рукописи
в редакцию 11.08 2011 г.

Kulinich O. A., Yatsunskiy I. P., Eshtokina T. Yu., Brusenskaya G. I., Marchuk I. A. **Photoluminescent method for studying the plastic deformation at the boudary of «SiO₂—Si».**

Keywords: photoluminescence, flowage, defects, dislocations, tensions.

The possibility of using the photoluminescence method for studying the mechanisms of plastic deformation at the boundary of "SiO₂—Si" in the process of obtaining nanostructured silicon layers by deformation.

Ukraine, Odessa state economic university, I. I. Mechnikov Odessa National university.

Кулініч О. А., Яцунський І. Р., Єштокін Т. Ю., Брусенська Г. І., Марчук І. А. **Фотолумінесцентний метод дослідження пластичної деформації на границі поділу «SiO₂—Si».**

Ключові слова: фотолумінесценція, пластична деформація, дефекти, дислокації, напруга.

Показано можливість використання методу фотолумінесценції для вивчення механізмів пластичної деформації на границі «оксид кремнію — кремній» в процесі отримання шарів наноструктурованого кремнію деформаційним методом.

Україна, Одеський національний економічний університет, Одеський національний університет ім. І. І. Мечнікова.

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

Добровольский Юрий Георгиевич, канд. техн. наук, начальник научно-аналитического отдела ООО «Научно-производственная фирма «Тензор», г. Черновцы

Клюй Николай Иванович, докт. физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев

Ковалюк Захарий Дмитриевич, докт. физ.-мат. наук, руководитель Черновицкого отделения Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАНУ

Конников Семен Григорьевич, член-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

Костиков Андрей Олегович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН, г. Харьков

Митягин Александр Юрьевич, докт. физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

Носков Владислав Яковлевич, докт. техн. наук, профессор, главный конструктор ООО «ОКО-НПЦ», Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Рюхтин Вячеслав Васильевич, канд. техн. наук, зам. председателя правления по научной работе ОАО "ЦКБ "Ритм", г. Черновцы

Ситников Валерий Степанович, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой компьютерных систем Одесского национального политехнического университета

Старжинский Николай Григорьевич, докт. техн. наук, ведущий научный сотрудник Института сцинтилляционных материалов НАНУ, г. Харьков

Старцев Владимир Ильич, канд. техн. наук, доцент Одесского национального политехнического университета

Сторож Владимир Георгиевич, старший научный сотрудник Национального университета «Львовская политехника»

Чечельницкий Виктор Яковлевич, канд. техн. наук, доцент Одесского национального политехнического университета

ПАМЯТКА АВТОРУ ЖУРНАЛА «ТКЭА»

1. Рукопись должна соответствовать тематике журнала и отличаться прикладной направленностью.

Если результаты получены в смежных областях знаний, необходимо показать их применимость в области интересов журнала.

2. При оценке рукописи редакцию будут интересовать следующие аспекты:

- актуальность темы;
- обоснованность постановки задачи;
- новизна информации (в сравнении с работами предшественников);
- убедительность доказательств;
- правомерность выводов;
- возможность практического применения;
- целесообразность (и адекватность тексту) таблиц, иллюстраций, списка использованных источников;
- строгость терминологии;
- композиция рукописи, в т. ч. оправданность объема.

3. Название рукописи должно быть конкретным и, в то же время, по возможности кратким.

4. Обозначьте разделы рукописи. Выделите выводы (резюме, заключение). Кстати, проверьте себя — насколько согласуются между собой поставленная задача, выводы и название статьи.

5. Единицы измерения всех величин должны отвечать современным требованиям, а использованные символы (и аббревиатуры) должны быть пояснены при первом их употреблении в тексте.

6. При ссылке в тексте на численные значения, формулы и иные фактические данные, заимствованные из книг, следует (для удобства поиска) указывать не только саму книгу, но и страницу (напр., [2, с. 418]).

7. Список «Использованные источники» формируется в порядке их упоминания в тексте. Желательно избегать ссылок на труднодоступные источники (напр., на материалы конференций) или на недолговечные (напр., Интернет). Принятое в журнале описание источников см. на сайте журнала.

8. Сопроводите рукопись библиографической карточкой на русском и английском языках с аннотацией до 500 печатных знаков. Укажите ключевые слова, а также индекс рукописи по Универсальной десятичной классификации (УДК).

9. Материалы статьи направляйте по e-mail tkea@optima.com.ua. Если Вы направляете рукопись по почте, приложите запись статьи на CD.

Текст статьи набирается на русском или английском языке в текстовом редакторе Microsoft Word размером 12, без переносов, с одним пробелом между словами, с междустрочным интервалом не менее 1,5. Правый край текста выравнивать не обязательно.

Допускается использование программы Equation только в тех случаях, когда Word бессилен, например при наборе специальных знаков над буквенными обозначениями, подкоренных выражений, пределов интегрирования, суммирования и т. п.

С точки зрения удобства верстки желательно, чтобы объем иллюстраций не превышал 40% от общего объема статьи. Иллюстрации должны быть представлены отдельными файлами. Графики и чертежи следует выполнять в черно-белом (битовом) режиме.

При подготовке цветных иллюстраций желательно фотографировать объекты на однотонном фоне цифровой камерой. Если проводится сканирование изображений, то его необходимо выполнять с разрешением 300 dpi.

10. Снабдите рукопись сведениями об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, должностное положение, дата рождения, служебный и домашний адреса с указанием почтового индекса, e-mail, телефон, телефакс).

11. Если считаете необходимым, сопроводите статью экспертным заключением о возможности ее публикации в открытой печати.

В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ФОРУМА
«РАДИОЭЛЕКТРОНИКА. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. АВТОМАТИЗАЦИЯ»



РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

XII МЕЖДУНАРОДНАЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ ВЫСТАВКА

24—26 октября 2012 г.

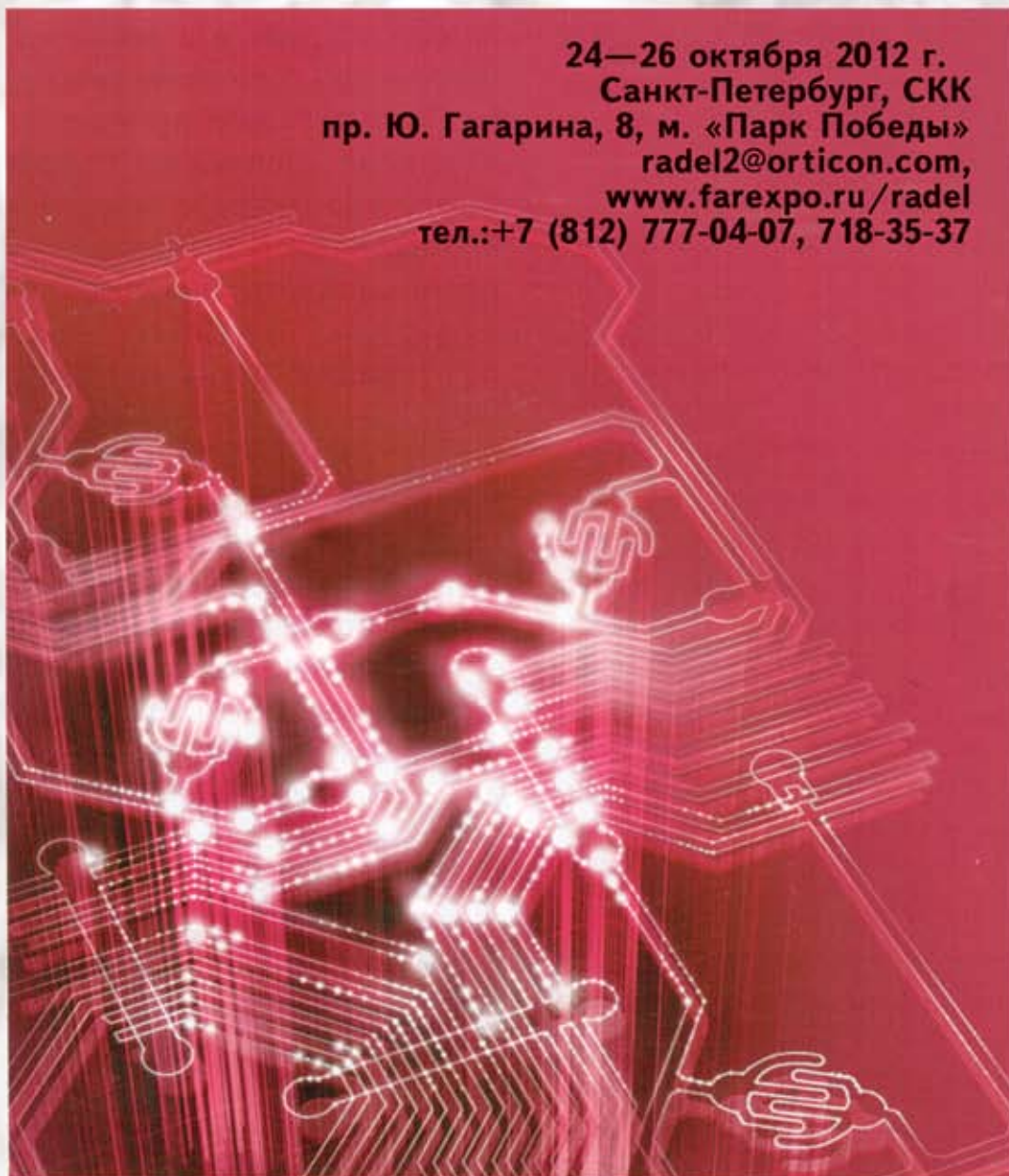
Санкт-Петербург, СКК

пр. Ю. Гагарина, 8, м. «Парк Победы»

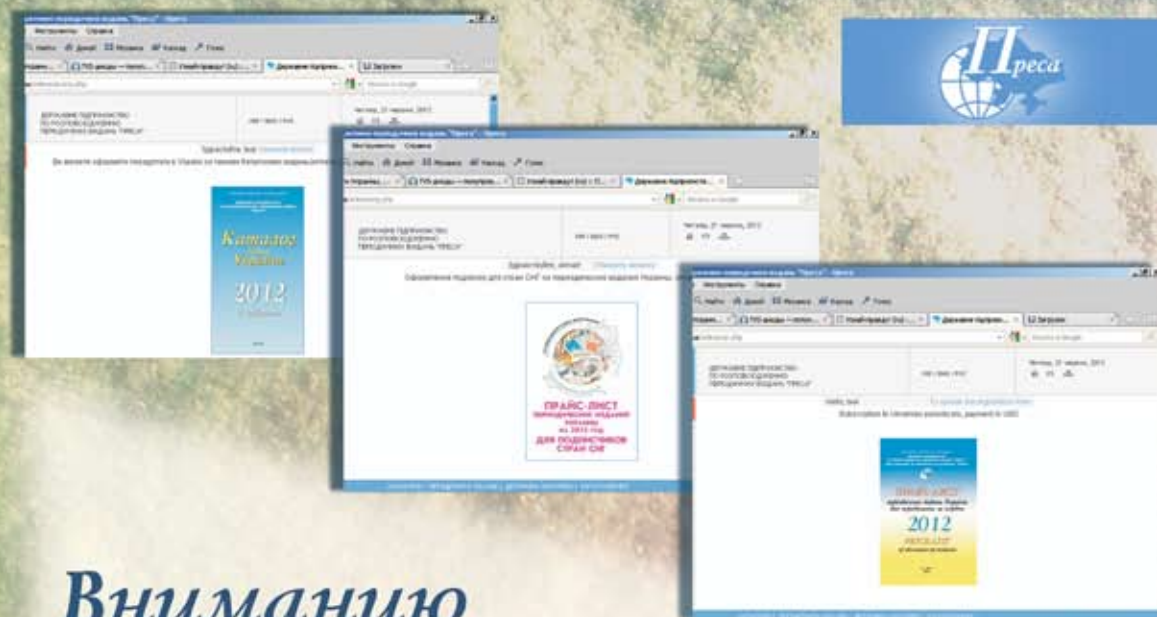
radel2@orticon.com,

www.farexpo.ru/radel

тел.: +7 (812) 777-04-07, 718-35-37



- Электронные компоненты
- Комплектующие
- Печатные платы
- Светотехника
- Материалы
- Конструктивы
- Технологии
- Промышленное оборудование и инструменты
- Контрольно-измерительные приборы и лабораторное оборудование



Вниманию подписчиков Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья

Теперь можно подписаться на журнал «ТКЭА»
через Интернет. ГП «Пресса» предоставляет такую
возможность на своем сайте
www.presa.ua.

Этой услугой могут воспользоваться подписчики
Украины, стран СНГ и дальнего зарубежья.

Подписной индекс журнала
«Технология и конструирование в электронной аппаратуре»
23785

Оплата производится платежными карточками
Visa или MasterCard

Номер готовили
Алчевск, Баку, Винница, Екатеринбург,
Киев, Львов, Минск, Одесса, С.-Петербург,
Харьков, Черновцы.



Пишите
Подписывайтесь
Читайте