

Технология и конструирование в электронной аппаратуре



К статье
«Радиометрический приемный
комплекс и пути снижения
системной погрешности
измерений»



5—6 2015

СЕНТЯБРЬ — ДЕКАБРЬ

СЕМНАДЦАТАЯ
МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

23 – 27 мая 2016 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 технологии
- Системы защиты информации
- Радиотехнические, телекоммуникационные и телевизионные системы
- Проектирование, конструирование, производство и контроль электронных средств
- Функциональная электроника. Микро- и нанотехнологии



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «ТЕХНОЛОГИЯ И КОНСТРУИРОВАНИЕ В ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ» ISSN 2225-5818

Выходит один раз в 2 месяца

Регистрационный номер КВ 13418-2302ПР

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

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

Включен в международную справочную систему по периодическим и продолжающимся изданиям "Ulrich's Periodicals Directory" (США), в международную систему библиографических ссылок CrossRef, в наукометрическую базу РИНЦ научной электронной библиотеки России, в базу данных DOAJ, в Google Scholar.



ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

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

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

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

Редакция: Е. А. Тихонова, А. А. Ефименко,
А. А. Алексеева, М. Г. Глава, Н. М. Колганова.
Техническая редакция, дизайн: Е. И. Корецкая.

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

Подписано к печати 10.12.2015. Формат 60×84 1/8. Печать офсетная.
Печ. л. 9,0+1,0. Уч.-изд. л. 9,3. Тираж 150 экз. Заказ № 199.
Издательство «Политехперіодика»
(65044, г. Одесса-44, а/я 17).
Отпечатано в типографии РА «ART-V»
(65026, г. Одесса, ул. Гаванная, 3).

**ТЕХНОЛОГИЯ
И
КОНСТРУИРОВАНИЕ
В
ЭЛЕКТРОННОЙ
АППАРАТУРЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2015 № 5-6

Год издания 39-й

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

К.т.н. В. М. Чмиль

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Чл.-корр. НАНУ,

д.ф.-м.н. А. Е. Беляев (г. Киев)

Д.т.н. Н. М. Вакив (г. Львов)

Д.т.н. В. Н. Годованюк (г. Черновцы)

К.т.н. А. А. Дашковский (г. Киев)

Д.т.н. Г. А. Оборский (г. Одесса)

Е. А. Тихонова (г. Одесса)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Д.т.н. С. Г. Антошук (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ащеулов (г. Черновцы)

Д.т.н. В. В. Баранов (г. Минск)

Д.т.н. А. П. Бондарев (г. Львов)

К.т.н. Э. Н. Глушеченко,
зам. главного редактора (г. Киев)

Д.ф.-м.н. В. В. Должиков (г. Харьков)

К.т.н. И. Н. Еримичой (г. Одесса)

Д.т.н. А. А. Ефименко,

зам. главного редактора (г. Одесса)

Д.ф.-м.н. Д. В. Корбутяк (г. Киев)

Д.т.н. С. И. Круковский (г. Львов)

Д.т.н. С. Ю. Лузин (г. С.-Петербург)

К.т.н. И. Л. Михеева (г. Киев)

Д.т.н. И. Ш. Невлюдов (г. Харьков)

Д.т.н. Ю. Е. Николаенко (г. Киев)

Д.ф.-м.н. С. В. Плаксин

(г. Днепропетровск)

К.ф.-м.н. А. В. Рыбка (г. Харьков)

К.т.н. В. В. Рюхтин (г. Черновцы)

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

Д.т.н. В. С. Ситников (г. Одесса)

Д. т. н. Я. Стеванович (г. Белград)

Д. т. н. З. Стевич (г. Белград)

Д.х.н. В. Н. Томашик (г. Киев)

К.т.н. В. Е. Трофимов (г. Одесса)

УЧРЕДИТЕЛИ

МПП Украины

Институт физики полупроводников

им. В. Е. Лашкарёва

Научно-производственное

предприятие «Сатурн»

Одесский национальный

политехнический университет

Издательство «Политехперіодика»

Одобрено к печати

Ученым советом ОНПУ

(Протокол № 3 от 8.12 2015 г.)

Отв. за выпуск: Е. А. Тихонова

СОДЕРЖАНИЕ

Электронные средства: исследования, разработки

Оптимизация комплексного показателя надежности радио-
технических устройств путем изменения их топологии.

Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зиньковский

3

Анализ несущих конструкций 19-дюймовой и метрической
систем для электронных средств. *А. А. Ефименко, А. П.*
Карлангач

9

СВЧ-техника

Радиометрический приемный комплекс и пути снижения
вносимой им погрешности в радиометрические измерения.

А. М. Пилипенко, И. К. Сундучков, В. В. Чмиль, В. М.
Чмиль, П. А. Яцык

14

Системы передачи и обработки сигналов

Исследование объемных акустических волн СВЧ-диапазона,
возбужденных встречно-штыревым преобразователем. *А. Г.*
Решотка, В. Г. Гайдучок, Н. М. Вакив

22

Энергетическая электроника

Моделирование характеристик тандемного монолитного
солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $Si_{1-x}Ge_x$.

А. Б. Гниленко, Ю. Н. Лаврич, С. В. Плаксин

28

Обеспечение тепловых режимов

Охлаждение светодиодного модуля с помощью различных
теплоотводов. *А. Н. Наумова, Ю. Е. Николаенко, В. Ю.*
Кравец, В. М. Сорокин, А. С. Олейник

35

Технологические процессы и оборудование

Формирование нанопленок Cu, Ag, Au под воздействием
атомов водорода. *Е. Л. Жавжаров, В. М. Матюшин*

41

Материалы электроники

Исследование кристаллов $Cu_2ZnSnTe_4$ и гетеропереходов
на их основе. *Т. Т. Ковалюк, М. Н. Солован, А. И.*
Мостовой, Э. В. Майструк, Г. П. Пархоменко, П. Д.
Марьянчук

45

Влияние отжига на вах гетероперехода $n-ZnO-p-InSe$.
З. Д. Ковалюк, В. Н. Катеринчук, З. Р. Кудринский,
Б. В. Кушнир, В. В. Нетьяга, В. В. Хомяк

46

Метрология. Стандартизация

Расчет характеристик рентгеновских установок. *А. Н.*
Оробинский

55

Способ аналитического определения координат источника
излучения в однородной среде. *Е. В. Величко*

64

Список рецензентов номера

68

Новые книги

21, 27, 34

Выставки

54

ЗМІСТ

Електронні засоби: дослідження, розробки

Оптимізація комплексного показника надійності радіотехнічних пристроїв шляхом зміни їх топології. *Б. М. Уваров, Ю. Ф. Зінковський* (3)

Аналіз несучих конструкцій 19-дюймової та метричної систем для електронних засобів. *А. А. Єфіменко, О. П. Карлангач* (9)

СВЧ-техніка

Радіометричний приймальний комплекс та шляхи зниження вносимої ним похибки у радіометричні вимірювання. *О. М. Пилипенко, І. К. Сундучков, В. В. Чміль, В. М. Чміль, П. О. Яцик* (14)

Системи передачі та обробки сигналів

Дослідження об'ємних акустичних хвиль НВЧ-діапазону, збуджених зустрічно-штирковим перетворювачем. *О. Г. Решотка, В. Г. Гайдучок, М. М. Ваків* (22)

Енергетична електроніка

Моделювання характеристик тандемного монолітного сонячного елемента Si/Ge з буферним шаром $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. *О. Б. Гніленко, Ю. М. Лавріч, С. В. Плаксін* (28)

Забезпечення теплових режимів

Охолодження світлодіодного модуля за допомогою різних тепловідводів. *А. М. Наумова, Ю. Є. Ніколаєнко, В. Ю. Кравець, В. М. Сорокін, О. С. Олійник* (35)

Технологічні процеси та обладнання

Формування наноплівки Cu, Ag, Au під дією атомів водню. *Є. Л. Жавжаров, В. М. Матюшин* (41)

Матеріали електроніки

Дослідження кристалів $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ та гетеропереходів на їх основі. *Т. Т. Ковалюк, М. М. Солован, А. І. Мостовий, Е. В. Майструк, Г. П. Пархоменко, П. Д. Мар'янчук* (45)

Вплив відпалу на вах гетеропереходу $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$. *З. Д. Ковалюк, В. М. Катеринчук, З. Р. Кудринський, Б. В. Кушнір, В. В. Нетяга, В. В. Хомяк* (50)

Метрологія. Стандартизація

Розрахунок характеристик рентгенівських установок. *А. М. Оробінський* (55)

Спосіб аналітичного визначення координат джерела випромінювання в однорідному середовищі. *О. В. Величко* (64)

CONTENTS

Electronic devices: research, development

Optimization of complex reliability indicator of wireless devices by changing their topology. *B. M. Uvarov, Yu. F. Zin'kovskii* (3)

Analysis of 19-inch and metric mechanical structures for electronic equipment. *A. A. Yefimenko, A. P. Karlangach* (9)

Microwave engineering

Radiometric receiving complex and ways to reduce the radiometric measurements error. *A. M. Pylypenko, I. K. Sunduchkov, V. V. Chmil, V. M. Chmil, P. O. Yatsyk* (14)

Signals transfer and processing systems

Investigation of bulk acoustic microwaves excited by an interdigital transducer. *O. G. Reshotka, V. G. Hayduchok, N. M. Vakiv* (22)

Power electronics

Simulating characteristics of SI/GE tandem monolithic solar cell with $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ buffer layer. *A. B. Gnilenko, Ju. N. Lavrich, S. V. Plaksin* (28)

Thermal management

Cooling of led module by various radiators. *A. M. Naumova, Yu. E. Nikolaenko, V. Yu. Kravets, V. M. Sorokin, O. S. Oliynyk* (35)

Production technology and equipment

Formation of Cu, Ag and Au nanofilms under the influence of hydrogen atoms. *E. L. Zhavzharov, V. M. Matyushin* (41)

Materials of electronics

Research on $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ crystals and heterojunctions based on such crystals. *T. T. Kovaliuk, M. N. Solovan, A. I. Mostovyi, E. V. Maistruk, G. P. Parkhomenko, P. D. Maryanchuk* (45)

Annealing effect on I-V characteristic of $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ heterojunction. *Z. D. Kovalyuk, V. M. Katerynychuk, Z. R. Kudrynskyi, B. V. Kushnir, V. V. Netyaga, V. V. Khomyak* (50)

Metrology. Standardization

Calculation of characteristics of X-ray devices. *A. N. Orobinskyi* (55)

Analytical method for determining coordinates of the radiation source in a homogeneous medium. *H. V. Velichko* (64)

Д. т. н. Б. М. УВАРОВ, д. т. н. Ю. Ф. ЗИНЬКОВСКИЙ

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ТОПОЛОГИИ

Рассмотрены проблемы определения параметров надежности конструкций радиотехнических устройств в условиях воздействия механических и термических (внешних и внутренних) факторов, предложены методы расчета этих параметров для блоков, ячеек, микросборок. Предложены методы достижения максимальных значений показателей надежности с помощью топологической оптимизации конструкции.

Ключевые слова: радиотехническое устройство, механические воздействия, тепловой режим, параметрическая оптимизация, надежность, компьютерные программы.

Большинство радиотехнических устройств (РТУ) в процессе эксплуатации подвержены различного рода воздействиям. Анализ влияния на показатели надежности внешних дестабилизирующих факторов, таких как механическое воздействие, температура, влажность, ионизирующее излучение и другие, показывает, что в процессе эксплуатации РТУ число отказов, вызванных механическим и тепловым воздействием, составляет 70–80%. Поэтому для оценки надежности РТУ необходимы комплексные показатели, учитывающие влияние обоих этих факторов (внешних и внутренних), и проектирование оптимального РТУ должно проводиться таким образом, чтобы в реальном устройстве эти комплексные показатели были наивысшими.

Влияние внешних механических факторов — линейных ускорений, вибраций, ударов — приводит к возникновению в элементах конструкции РТУ, выводах элементов электронной структуры, паяных соединениях этих выводов усталостных механических напряжений и, в конечном счете, к нарушениям электрических контактов и отказам аппаратуры [1].

Показатели надежности, связанные с механическими напряжениями, определяются в соответствии со стандартами [2].

Внешние тепловые воздействия и внутренние тепловыделения в элементах электронной структуры РТУ приводят к повышению температуры этих элементов, вследствие чего снижается не только их надежность, но и устройства в целом. Методы определения температуры электрорадиоэлементов (ЭРЭ) рассмотрены в [3], а показателей их надежности, связанных с температурой — в [2].

Как показывает анализ, компоновка РТУ (блока, ячейки, микросборки) существенно

влияет на показатели как «механической», так и «тепловой» надежности [1, 3]. Поэтому при проектировании возникает проблема оптимальной компоновки РТУ, при которой могут быть обеспечены наилучшие показатели надежности всего устройства.

В настоящей работе предложены методы определения комплексных показателей надежности РТУ, а также методы оптимизации компоновки ячеек и микросборок, обеспечивающие наивысшие показатели надежности устройств при их эксплуатации.

Надежность ячейки при механических воздействиях

Основными причинами отказов ячеек РТУ при циклических воздействиях (вибрациях и ударах) являются нарушения целостности выводов микросхем (МС), микросборок (МСБ), функциональных узлов (ФУ), ЭРЭ и их паяных соединений вследствие усталостных напряжений [1].

Напряжения в выводах возникают в основном от изгиба платы-основы под действием механических воздействий. Эти деформации зависят от способа закрепления вершин или сторон платы. В паяных соединениях выводов появляются касательные напряжения сдвига, которые могут привести к нарушению электрического контакта в соединении.

В [1] приведены методы расчета деформаций плат, напряжений в выводах и паяных соединениях, а также расчетные соотношения для определения показателей выносливости и надежности этих элементов.

При вибрационных и ударных воздействиях на плату концы выводов, например, установленной на ней МС, которые соединены с проводниками печатного монтажа (рис. 1), смещаются от-

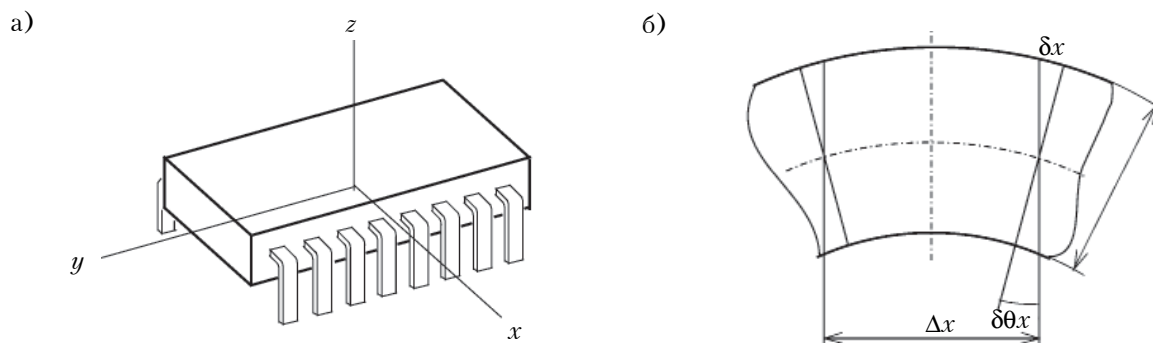


Рис. 1. Ориентация корпуса МС на плате (а) и деформации платы в плоскости X0Z (б)

носителю корпуса МС, причем такие смещения могут быть как линейными, так и угловыми.

Схема определения линейной (δx) и угловой ($\delta \theta_x$) деформации платы в плоскости X0Z для двух ее сечений, находящихся на расстоянии Δx друг от друга (например, для двух соседних выводов МС), приведена на рис. 1, б. Аналогично можно получить соответствующие деформации δy и $\delta \theta_y$ в плоскости Y0Z для сечений, находящихся на расстоянии Δy .

Прогиб платы $w(x, y)$, вызванный, например, смещением зон крепления при кинематическом возбуждении, можно найти по формуле [1]

$$w(x, y) = \sum_i \sum_k z_0 K R_z w_i(x) w_k(y), \quad (1)$$

где z_0 — расстояние, на которое смещается зона крепления;

K — коэффициент, учитывающий характер закрепления сторон платы;

R_z — коэффициент передачи ускорений при кинематическом возбуждении;

i, k — номера гармоник.

Входящие в формулу (1) величины $w_i(x)$, $w_k(y)$ — это так называемые базисные функции прогибов в продольном и поперечном направлениях (функции А. Н. Крылова).

Выражения для угловых смещений сечений платы (и концов выводов МС) в точке с координатами (x, y) можно записать как

$$\delta \theta_x = \frac{\partial w(x, y)}{\partial x};$$

$$\delta \theta_y = \frac{\partial w(x, y)}{\partial y}.$$

Линейные деформации описываются формулами

$$\delta x = 0,5d\delta \theta_x; \delta y = 0,5d\delta \theta_y,$$

где d — толщина платы (см. рис. 1, б).

Значения деформаций позволяют рассчитать в соответствии с методикой, изложенной в [1], напряжения в выводах в продольном (σ_x) и в поперечном (σ_y) направлениях, а затем и эквивалентное напряжение

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y}.$$

Такие напряжения возникают в выводах всех элементов электронной структуры РТУ.

Вероятность разрушения вывода (как и любого элемента конструкции) при циклических нагрузках увеличивается с ростом возникающих в нем напряжений и числа циклов нагружений. Число циклов N_p , соответствующее напряжению σ , определяют из уравнения усталости материала

$$N_p = N_0 \left[\frac{\sigma_{-1}}{\sigma} \right]^m,$$

где N_0 — базовое число циклов (абсцисса точки излома кривой усталости), при котором определен предел выносливости σ_{-1} ;

m — показатель кривой усталости.

Относительный параметр χ (безразмерное время), используемый для определения показателей надежности, должен учитывать число циклов нагружения в единицу времени N_E , общее число циклов нагружения N_c , коэффициент режима нагружения элемента конструкции K_p [2]:

$$\chi = K_p \frac{N_c}{N_E} = K_p \frac{N_c}{N_0} \left[\frac{\sigma}{\sigma_{-1}} \right]^m.$$

Для процессов, связанных с усталостными напряжениями в материале, вероятность безотказной работы при воздействии механических факторов $P_m(\chi)$ необходимо вычислять в соответствии с моделью ДМ-распределения (диффузионного монотонного) по формуле [2]

$$P_m(\chi) = \Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\chi} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du,$$

где $\Phi(u)$ — функция нормального распределения;

u — параметр интегрирования, $u = \frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}$;

v — коэффициент вариации (рассеяния) процесса деградации при действии механических факторов.

Для конструкции, состоящей из нескольких структурно-конструктивных уровней n , в каж-

дый из которых входят k элементов, а отказ любого из них приводит к выходу из строя всего РТУ, общую вероятность безотказной работы следует рассчитывать по формуле

$$P_m(\chi) = \prod_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^k P_i(\chi) \right]_j. \quad (2)$$

Вследствие достаточной сложности таких расчетов, а главное — большого количества элементов РТУ (в современных устройствах оно может исчисляться сотнями и тысячами), в которых необходимо определять механические напряжения и показатели надежности, такие вычисления реально можно проводить только с помощью программ автоматизированного проектирования. Комплекс таких программных модулей описан в [1].

Надежность ячейки при тепловых воздействиях

Ячейка блока обычно представляет собой прямоугольную пластину из диэлектрика или металла, на которой закреплены МСб, МС, ФУ или ЭРЭ, причем каждый из элементов электронной структуры следует рассматривать как тепловыделяющий элемент (ТВЭ). Внешние тепловые воздействия определяют средний уровень температуры T_0 внутри блока РТУ, а внутренние — дополнительный перегрев каждого ТВЭ.

Отвод теплоты от ТВЭ осуществляется конвекцией теплоносителя внутри блока, радиацией к стенкам блока или к окружающим элементам, кондукцией к основанию ячейки.

Тепловой моделью ячейки может быть двухмерная пластина размерами $a \times b \times d$ с дискретными источниками теплоты Q_i с центрами в координатах (x_i, y_i) и размером оснований $\Delta x_i \times \Delta y_i$. Для пластин из металла или керамики с хорошей теплопроводностью целесообразно учитывать теплоотвод через их торцы с коэффициентами теплоотдачи α_x, α_y .

Расчетное уравнение для температуры ТВЭ ячейки, полученное в [3] методом конечных интегральных преобразований, можно представить в следующем виде:

$$T(x, y) = \sum_{i=1}^k \frac{Q_i}{\Delta x_i \Delta y_i} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} C_{in} C_{im} \varphi_{in}(x) \varphi_{im}(y), \quad (3)$$

где C_{in}, C_{im} — коэффициенты, определяющие характер тепловых потоков от ТВЭ в продольном и поперечном направлениях;

$\varphi_{in}(x), \varphi_{im}(y)$ — функции изменения температуры в направлениях координатных осей $0x, 0y$ соответственно.

По уравнению (3) можно рассчитать параметры теплового поля (температуру) в любой точке с координатами (x, y) и температуру самих элементов.

Надежность отдельных ЭРЭ рассчитывают в соответствии с математической моделью [4, 5]

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p \prod_{i=1}^n K_i, \quad (4)$$

где λ_p — рабочая (эксплуатационная) интенсивность отказов элемента;

λ_0 — исходная (базовая) интенсивность отказов при номинальной электрической нагрузке и нормальной температуре окружающей среды $t_{oc} = 25^\circ\text{C}$;

K_p — коэффициент режима, являющийся функцией температуры T и коэффициента нагрузки β ;

K_i — коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов как функции различных факторов.

Выражение для коэффициента режима в математических моделях, например, для интегральных схем (ИС) имеет такой вид:

$$K_p = A \cdot \exp[B(T + 273)],$$

где A, B — константы, соответствующие группам ИС.

Другие особенности конкретных ИС (напряжение питания, тип корпуса, степень жесткости условий эксплуатации и т. п.) учитываются в модели (4) коэффициентами K_i .

Более сложны и детализированы выражения для K_p в моделях дискретных полупроводниковых приборов — транзисторов, диодов [4].

Отрезок времени, полностью соответствующий функциональной пригодности ТВЭ, принимают в качестве базового и обозначают μ . Если реальное время работы отличается от μ , вводят относительное время работы $\chi = \tau/\mu$.

Для каждого ТВЭ можно рассчитать показатели надежности (вероятность безотказной работы, технический ресурс и др.) элементов электронной структуры РТУ в соответствии со стандартом [2] по модели DN -распределения (диффузионного немоного). Так, вероятность безотказной работы при воздействии температур вычисляется как

$$P_T(\chi) = \Phi(u_1) + \exp(2/v^2) \cdot \Phi(u_2),$$

где $\Phi(u_i)$ — функция нормального распределения;

u_1, u_2 — параметры интегрирования,

$$u_1 = \frac{1-\chi}{v\sqrt{\chi}}, \quad u_2 = -\frac{1+\chi}{v\sqrt{\chi}};$$

v — коэффициент вариации процессов деградации при тепловом воздействии.

Общую вероятность безотказной работы всей электронной структуры РТУ, определяемую тепловыми режимами, следует рассчитывать по формуле, аналогичной (2).

Комплекс объектно-ориентированных программных модулей, которые позволяют проводить вычисления показателей надежности, определяемых температурой электронных элементов современных РТУ, описан в [3].

Комплексные показатели надежности РТУ

Комплексным показателем надежности РТУ, учитывающим воздействие механических и тепловых факторов, может быть вероятность безотказной работы, полученная как произведение двух независимых частных показателей, отображающих влияние механических напряжений — $P_m(\chi_m)$ и температуры — $P_t(\chi_t)$:

$$P(\chi) = P_m(\chi_m) P_t(\chi_t). \quad (5)$$

Особенность определения частных показателей заключается в том, что для каждого из них следует задавать свои значения относительных ресурсов χ_m или χ_t . В нормативных документах время воздействия механических нагрузок обычно задается небольшим (продолжительность вибраций 0,5–1,0 ч; число ударов 12000–13000, что соответствует времени их воздействия не более 3 ч). Время же воздействия температуры на элементы электронной структуры для РТУ может достигать десятков тысяч часов, т. е. соответствовать техническому ресурсу.

Оптимизация показателей надежности РТУ

Анализ показывает, что при проектировании РТУ надежность ячеек и МСб, а следовательно и устройства в целом, может быть повышена топологической оптимизацией — рациональным размещением электрорадиоэлементов и функциональных узлов на плате ячейки или подложки микросборки [1, 3].

Координаты положения ЭРЭ, МС, ФУ с сосредоточенными массами m_i на основании ячейки или микросборки входят в выражение для так называемой приведенной массы [1]

$$m = m_{\text{п}} + m_{\text{э}} + \sum_{i,k} \frac{m_i \omega_i^2(x) \omega_k^2(y)}{ab \int_a^b \omega_i^2(x) dx \int_a^b \omega_k^2(y) dy},$$

где $m_{\text{п}}$ — масса самой платы;

$m_{\text{э}}$ — суммарная масса равномерно распределенных на плате ЭРЭ (без m_i).

Приведенная масса определяет механическую частоту платы

$$\omega_0 = \frac{\varphi(\beta)}{a^2} \sqrt{\frac{D}{m}},$$

где $\varphi(\beta)$ — частотная постоянная платы (является функцией способа закрепления ее сторон);

D — цилиндрическая жесткость платы.

Таким образом, изменяя топологию, можно:

- изменить собственную частоту платы, т. е. вывести конструкцию из резонансной зоны;
- уменьшить механические напряжения, возникающие в материале платы;
- уменьшить линейную и угловую деформации платы, определяющие напряжения в выводах ЭРЭ, МС, ФУ, а также в их паяных соединениях.

Все это повышает показатели надежности РТУ при действии механических нагрузок,

т. е. показатель $P_m(\chi_m)$ и время безотказной работы [1].

Анализ уравнения (3) показывает, что тепловой режим ячейки или МСб, т. е. значения температуры ЭРЭ, МС, ФУ, также определяется координатами расположения этих элементов на основании ячейки, поэтому оптимальные показатели надежности РТУ при тепловых воздействиях также могут быть достигнуты оптимальной компоновкой.

Оптимизация теплового режима — это достижение минимальных (в условиях применения РТУ) температур элементов электронной структуры, а значит и повышение их надежности, т. е. достижение максимального значения показателя $P_t(\chi_t)$ и времени безотказной работы [3].

Комплексная оптимизация конструкции ячейки — это достижение такой ее топологии, при которой обеспечивается максимальное значение комплексного показателя (5). В этом случае одновременно будут обеспечены минимальные значения как механических напряжений в выводах ЭРЭ и в их паяных соединениях, так и температуры самих ЭРЭ, а в конечном счете — максимальная надежность конструкции.

Методы оптимизации

Оптимизация комплексного показателя надежности (5) сложна не только как математическая задача (аналитически определить координаты (x_i, y_i) , обеспечивающие максимум надежности, невозможно), но и как вычислительная процедура (расчеты деформации, напряжения, температуры, показателей надежности для сотен и тысяч элементов РТУ).

Как уже указывалось выше, соответствующие программы параметрической оптимизации описаны в [1, 3]. Они разработаны в интегрированной среде C++Builder. В алгоритмах оптимизации использованы методы СПУИП (случайного поиска с уменьшением интервала поиска) и ОАПП (обобщенного алгоритма переменного порядка) [5].

Целевая функция оптимизации — комплексный показатель надежности $P(\chi)$, описываемый выражением (5). Его максимум находят методом СПУИП при проведении последовательных итераций с генерированием векторов параметров x_{ik} как случайных чисел:

$$x_{ik} = x_{i\min k} + (x_{i\max k} - x_{i\min k}) \eta_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где η_{ik} — множитель, создаваемый генератором равномерно распределенных случайных чисел;

k — номер итерации;

n — последовательность чисел натурального ряда.

Начальные значения параметров $x_{i\min}$, $x_{i\max}$ определяются размерами зоны платы, где устанавливаются элементы электронной структуры, и изменяются до тех пор, пока не будет получен максимум $P(\chi)$. Отметим, что реализуемая оптимизация является условной, поскольку

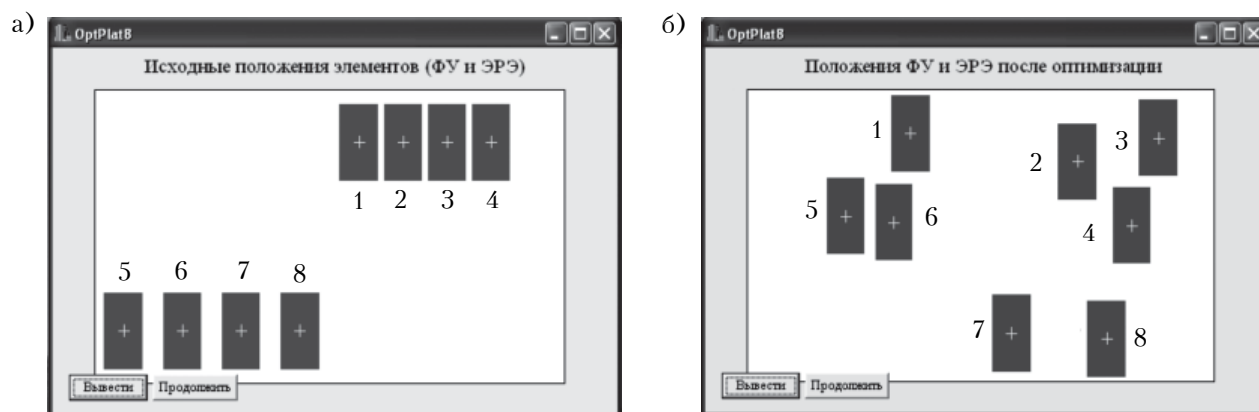


Рис. 2. Топологическая оптимизация ячейки (1–8 — номера корпусов МС):
а — исходная топология ячейки; б — топология после оптимизации

значения параметров x_{ik} ограничены размерами основания платы.

Для надежного удержания целевой функции в заданных границах число сгенерированных комплектов x_{ik} (и соответствующих значений $P_k(\chi)$) должно быть достаточно велико: 30–80. Указанный алгоритм обеспечивает нахождение для функции $P(\chi)$ глобального максимума.

Метод ОАПП при расчете координат новой рабочей точки x_{ik+1} использует информацию не только о значениях самой целевой функции и ограничений значений x_{ik} , но и их производных до четвертого порядка включительно, а также различные итерационные формулы в процессе одномерной оптимизации x_{ik} . Скорость сходимости алгоритма может быть сверхквадратичной и определяется порядком используемых для расчетов производных.

В [1, 3] основным методом оптимизации является СПУИП, в случае же когда процесс «расходится», программа переходит на более сложный метод — ОАПП или комбинированные методы [5].

Имитационное моделирование процесса оптимизации конструкций ячеек и микросборок с помощью разработанного комплекса программ показало, что показатели надежности указанных конструкций могут быть существенно повышены.

Приведем результаты комплексной оптимизации на примере ячейки, на плате которой установлены восемь микросхем, а их выводы припаяны к проводникам печатного монтажа. Размеры платы 160×100×2 мм, корпуса МС 26×13×4 мм, число выводов 40.

На ячейку действуют вибрации с частотой $f = 50$ Гц и удары с перегрузкой $3g$. Охлаждаются плата и МС воздухом температурой 30°C.

Для топологической оптимизации разработанная программа OptPlat8, а результаты ее использования представлены на рис. 2. Результаты компьютерного моделирования для различных ячеек и микросборок показали, что в результате топологической оптимизации выносимость вы-

водов ЭРЭ и их паяных соединений может быть повышена на 45–50% по сравнению с первоначальной произвольной компоновкой. Тепловую надежность структурно-конструктивных модулей РТУ в большинстве случаев можно повысить как минимум на 20–25%.

Выводы

Таким образом, использование при проектировании радиотехнических устройств предложенного метода оптимизации комплексного показателя надежности, учитывающего влияние механических и тепловых воздействий, позволяет существенно повысить надежность устройств путем поиска оптимальной топологии ячеек (рациональным размещением электрорадиоэлементов). Оптимизация конструкции по предложенному комплексному критерию наиболее эффективна для радиотехнических устройств с максимальным техническим ресурсом, а факторами, определяющими показатели надежности, являются вибрационные и ударные нагрузки, в особенности для периода эксплуатации $T_p \leq 3 \cdot 10^4$ ч.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Проективання та оптимізація механостійких конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками. — Київ: Корнійчук, 2011.
2. ДСТУ 2992-96. Вироби електронної техніки. Методи розрахунку надійності.
3. Уваров Б.М., Зиньковский Ю.Ф. Оптимізація теплових режимів та надійності конструкцій радіоелектронних засобів з імовірнісними характеристиками. — Київ: Корнійчук, 2011.
4. Прытков С.Ф., Горбачева В.М., Мартынова М.Н., Петров Г.А. Надежность электрорадиоизделий: Справочник. — Москва: МО РФ и НИИ «Электронстандарт», 2004 — 620 с. (Rus)
5. Петренко А.И., Ладогубец В.В., Чкалов В.В. Оптимальное схемотехническое проектирование в машиностроении. — Киев: УМК ВО, 1989.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.10.2015 г.

Б. М. УВАРОВ, Ю. Ф. ЗИНЬКОВСЬКИЙ

Україна, НТУУ «Київський політехнічний інститут»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА НАДІЙНОСТІ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ ШЛЯХОМ ЗМІНИ ЇХ ТОПОЛОГІЇ

Розглянуто проблеми визначення параметрів надійності конструкцій радіотехнічних пристроїв в умовах впливу механічних і термічних (зовнішніх і внутрішніх) чинників, запропоновано методи розрахунку цих параметрів для блоків, комірок, мікроскладань. Запропоновано методи досягнення максимальних значень показників надійності за допомогою топологічної оптимізації конструкції.

Ключові слова: радіотехнічний пристрій, механічні дії, тепловий режим, параметрична оптимізація, надійність, комп'ютерні програми

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.03
UDC 621.396.67.095

B. M. UVAROV, Yu. F. ZIN'KOVSKII

Ukraine, Kiev, NTUU «Kiev Polytechnic Institute»

E-mail: kyivbmu@ukr.net

OPTIMIZATION OF COMPLEX RELIABILITY INDICATOR OF WIRELESS DEVICES BY CHANGING THEIR TOPOLOGY

The authors consider problems of determination of reliability parameters for designs of radio engineering devices (RED) under the influence of mechanical and thermal (external and internal) factors. Mechanical factors (linear acceleration, vibration, impact) cause mechanical effect on the outputs of elements of electronic structure (EES) and soldered connections, which can result in decrease of reliability. External thermal effects and internal heat release in the elements of the electronic structure of radioelectronic devices raises the temperature of these elements, thereby reducing the reliability not only of the elements, but of the device as a whole. The paper presents the methods for determination of versatility indicators of reliability depending on mechanical and thermal effects on REDs. Optimization of configuration of the cell (topology) using computer programs allows reducing mechanical and thermal effect on the outputs of EESs and to obtain maximum parameters of reliability of a design. The optimum topology of a cell obtained by such program is illustrated. As a result of optimization, reliability of cells has increased.

Keywords: wireless devices, mechanical stress, thermal regime, parametric optimization, reliability, software.

REFERENCES

1. Uvarov B.M., Zin'kovs'kyi Yu.F. *Proektuvannya ta optimizatsiya mekhanostiikikh konstruksii radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnimi kharakteristikami*. Kiev, Korniiichuk, 2011, 248 p. (Ukr)
2. DSTU 2992-96. *Vyrobny elektronnoi tekhniki. Metody rozrakhunku nadiinosti* [State Standard of Ukraine 2992-96. Electronic product. Methods of reliability] (Ukr)
3. Uvarov B.M., Zin'kovs'kyj Ju.F. *Optymizacija teplovykh rezhymiv ta nadiijnosti konstrukcij radioelektronnykh zasobiv z imovirnisnymi kharakterystykamy* [Optimization of thermal conditions and reliability of electronic means of stochastic characteristics]. Kiev, Kornijichuk, 2011, 201 p. (Ukr)
4. Prytkov S.F., Gorbacheva V.M., Martynova M.N., Petrov G.A. *Nadezhnost' elektroradioizdelij: Spravochnik* [The reliability of electric articles: Handbook]. Moscow, Elektronstandart, 2004, 620 p. (Rus)
5. Petrenko A.I., Ladogubec V.V., Chkalov V.V. *Optimal'noe skhemotekhnicheskoe proektirovanie v mashinostroenii* [Optimal schematic design in mechanical engineering]. Kiev, UMK VO, 1989, 164 p. (Rus)

Д. т. н. А. А. ЕФИМЕНКО, А. П. КАРЛАНГАЧ

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: sasha7725@i.ua

АНАЛИЗ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ 19-ДЮЙМОВОЙ И МЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Проведено исследование и анализ различных показателей качества несущих конструкций двух конструктивных систем для определения их характеристик и сравнения между собой, а также прогнозирования перспектив их дальнейшего использования.

Ключевые слова: несущие конструкции, показатели качества, 19-дюймовая конструктивная система, метрическая конструктивная система, механические структуры для электронного оборудования.

Разработка и выпуск электронной аппаратуры (ЭА) в условиях конкуренции и быстрой сменяемости ее поколений требует от разработчиков внедрения современных достижений науки и техники в различных их областях. Среди прочих составляющих ЭА несущие конструкции (по международной терминологии — механические структуры) занимают ключевые позиции, т. к. многие показатели ЭА, в том числе и экономические, зависят от используемых в них несущих конструкций (НК). В условиях глобализации мировой экономики и широкого развития стандартизации перед разработчиками в большинстве случаев ставится задача не разработки новых НК, а выбора оптимальных стандартных НК, разрабатываемых и производимых специализированными предприятиями.

В настоящее время существуют две системы и, соответственно, две группы стандартов Международной электротехнической комиссии (МЭК), на основе которых разрабатываются НК: 19-дюймовая — соответствует группе публикаций МЭК 60297; метрическая — соответствует группе публикаций МЭК 60917. Первая существует более 40 лет и является в большей степени востребованной и используемой в мире. Метрическая система начала разрабатываться в 80-х годах прошлого столетия и предполагалась для замены 19-дюймовой. При разработке метрической системы была сохранена некоторая преемственность от 19-дюймового стандарта по принципам и структуре построения и, в то же время, были приняты перспективные решения, в первую очередь модульный принцип построения. Однако если судить по нынешней ситуации, на практике эта замена не произошла — метрический стандарт пока еще не получил достаточно широкого распространения, и фирмами-производителями НК выпускается со-

всем немного конструктивов, соответствующих этому стандарту.

Возникает вопрос — почему метрическая система не получила должного развития, хотя в ней заложены перспективные решения и, самое главное, удобная для использования в большинстве стран мира метрическая размерная система? Кроме этого, актуальным является и вопрос, на какое направление разработчикам ЭА нужно ориентироваться с точки зрения использования той или иной системы.

Анализ исследований и публикаций, посвященных этой проблеме, однозначного ответа не дает. В них в основном рассматривается возможность совместимости конструктивов этих двух систем [1].

Целью данной работы является исследование и анализ различных показателей качества несущих конструкций 19-дюймовой и метрической систем для определения их характеристик, сравнения и прогнозирования перспектив их дальнейшего использования.

Для сравнения двух указанных систем выбраны следующие показатели, которые позволяют провести количественную оценку и могут быть рассчитаны на основании данных, приведенных в стандартах на эти механические структуры:

- компоновочные характеристики конструктивных систем, зависящие от количества типовых размеров составных частей;

- компоновочные характеристики, которые выражаются коэффициентом заполнения электронными компонентами (ЭК) коммутационных (печатных) плат вставных модулей первого уровня;

- коэффициент заполнения объема кассет, модулей второго уровня, коммутационными платами (КП);

- коэффициент заполнения объема шкафов, модулей третьего уровня, коммутационными платами в составе кассет;
- коэффициент, равный количеству контактов выходных электрических соединителей, приходящихся на единицу площади КП.

Рассмотрим эти показатели.

1. По количеству типоразмеров составных частей метрическая система имеет гораздо больше компоновочных решений, чем 19-дюймовая — более 10^{16} вариантов компоновки в шкафах для метрической системы против 738 146 337 вариантов для 19-дюймовой [2].

2. Для расчета коэффициента заполнения коммутационных плат электронными компонентами использованы следующие типоразмеры КП [3, 4]:

- для 19-дюймовой системы:
 - а) высота: 100; 233,35; 366,7; 500,05 мм;
 - б) глубина: 100; 160; 220; 280 мм;
- для метрической системы:
 - а) высота: 115; 265; 415; 565 мм;
 - б) глубина: 110; 160; 235; 285 мм.

С помощью метода и реализующей его программы, приведенных в [5], рассчитаны коэффициенты заполнения K_3 КП всех шестнадцати типоразмеров для каждой размерной системы.

Зависимости значений K_3 от размеров КП представлены на **рис. 1**, где видно, что по коэффициенту заполнения КП электронными компонентами ни метрическая, ни 19-дюймовая система не имеет явных преимуществ.

3. Коэффициент заполнения кассет коммутационными платами рассчитывается по формуле

$$K_{3K} = \Sigma S_{KP} / V_K, \quad (1)$$

где ΣS_{KP} — суммарная площадь размещаемых КП;
 V_K — объем кассеты.

Размеры КП и кассет для расчета K_{3K} взяты из таблиц, приведенных в стандартах МЭК 60297 и МЭК 60917 [3, 4]. Типоразмеры коммутационных плат метрической системы — такие же, как и в предыдущем случае. Типоразмеры КП 19-дюймовой системы по глубине также взяты те же, что в предыдущем случае, а по высоте этот ряд расширен до десяти (см. **таблицу**).

Размеры кассет выбирались для каждого типоразмера КП из соображений максимального заполнения их объема.

При расчетах предполагалось, что вся монтажная зона заполнена КП с минимально воз-

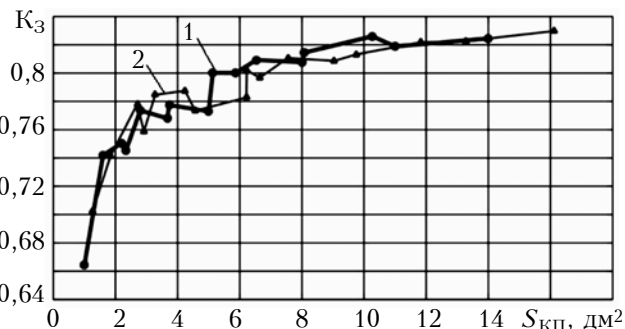


Рис. 1. Зависимость коэффициента заполнения КП электронными компонентами от их площади S_{KP} для 19-дюймовой (1) и для метрической (2) систем

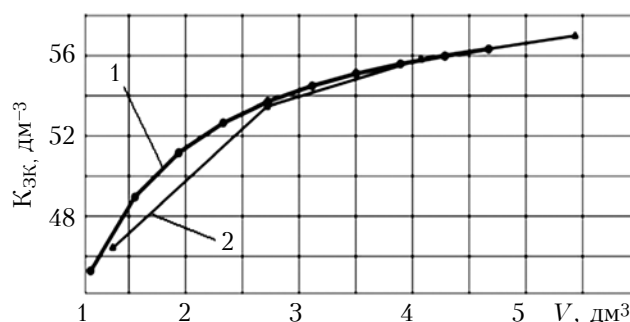


Рис. 2. Зависимость коэффициента заполнения кассет коммутационными платами от их объема для 19-дюймовой (1) и для метрической (2) систем

можным шагом. С учетом ширины электрического соединителя возможна установка 28 коммутационных плат как для одной, так и для другой системы.

Графики зависимости коэффициента заполнения K_{3K} от объема для кассет V_K рассматриваемых систем представлены на **рис. 2**. Здесь видно, что K_{3K} 19-дюймовой системы немного больше, чем метрической для всех значений V_K . При этом следует отметить, что максимальный коэффициент заполнения позволяет получить метрическая система, благодаря наличию такого типоразмера, который отсутствует в 19-дюймовой. Средние значения коэффициента заполнения объема конструктива коммутационными платами имеют следующие значения:

- для 19-дюймовой системы $K_{3K}=0,0529$;
- для метрической системы $K_{3K}=0,0532$.

4. Коэффициент заполнения шкафов объемом V_{III} коммутационными платами вычисляется по формуле, аналогичной предыдущей:

$$K_{3III} = \Sigma S_{KP} / V_{III}. \quad (2)$$

Высота коммутационных плат

Количество U^*	$3U$	$4U$	$5U$	$6U$	$7U$	$8U$	$9U$	$10U$	$11U$	$12U$
Высота КП, мм	100	144,45	188,9	233,35	277,8	322,25	366,7	411,15	455,6	500,05

* U — дискретность размера оборудования по высоте ($U=44,45$ мм)

Размеры шкафов, для которых проводились расчеты, для обеих систем были следующими:

- глубина 300 мм, ширина 550 мм [6, 7];
- высота 800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 мм.

Использовалась комбинация следующих типоразмеров [6, 7]:

- для 19-дюймовой системы:
 - а) по глубине КП: 100, 160, 220 мм;
 - б) по высоте КП и кассет: 3U, 6U, 9U;
- для метрической системы:
 - а) по глубине КП: 110, 160, 235 мм;
 - б) по высоте КП и кассет: 6SU, 12SU, 18SU (SU — монтажный шаг, равный 25 мм).

Приведенные размеры являются частью множества имеющихся в стандартах размеров. Для корректности процедуры сравнения значений показателей они выбраны близкими по величине для обеих систем. Такое ограничение, не приводя к существенному искажению результатов анализа, значительно уменьшает объем вычислений, что немаловажно ввиду очень большого количества типоразмеров конструктивов и всевозможных вариантов компоновки шкафов кассетами и кассет печатными платами.

По результатам расчетов были построены приведенные на **рис. 3** графики зависимости коэффициента заполнения объема шкафов коммутационными платами от высоты шкафов $H_{ШК}$, которая при постоянных значениях ширины и глубины шкафов отражает изменение их объема. Значение коэффициента $K_{ЗШ}$ для каждого типоразмера шкафа по высоте определено как среднеарифметическое значений этих коэффициентов, полученных для различных комбинаций их компоновки кассетами различных типоразмеров по высоте.

Анализируя полученные графики, можно сделать вывод, что по коэффициенту заполнения объема шкафов коммутационными платами ни 19-дюймовая, ни метрическая система не имеет явных преимуществ для большинства типоразмеров по высоте.

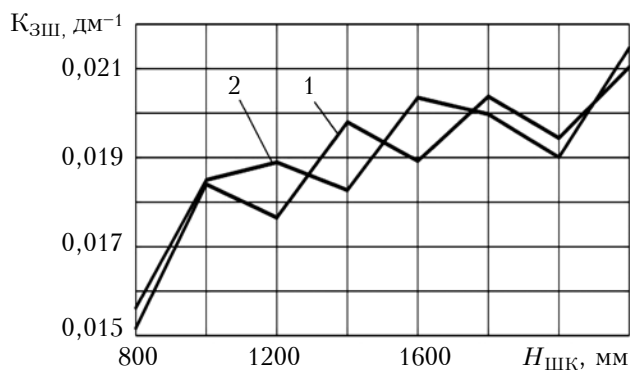


Рис. 3. Зависимость коэффициента заполнения объема шкафов коммутационными платами от их высоты для 19-дюймовой (1) и для метрической (2) систем

5. Для расчета коэффициента плотности контактов выходных электрических соединителей была использована следующая формула:

$$K_{КК} = N / S_{КП}, \quad (3)$$

где N — общее количество контактов электрических соединителей, монтируемых на КП.

Типоразмеры КП для расчета коэффициента $K_{КК}$ приведены в п. 2 и взяты из [3, 4].

Предполагалось, что на КП определенной высоты можно установить наибольший по высоте, с максимальным количеством контактов, один или несколько электрических соединителей в зависимости от высоты КП [8, 9].

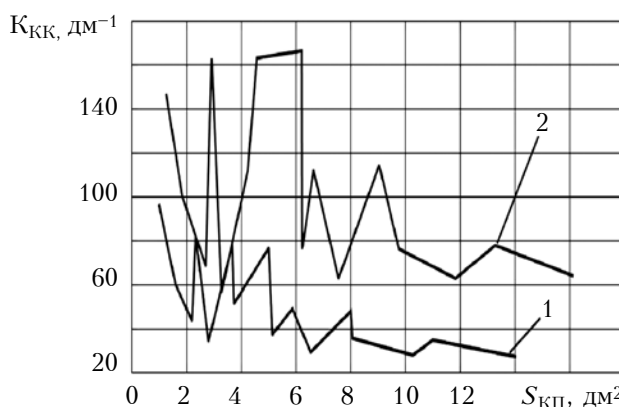


Рис. 4. Зависимость коэффициента плотности контактов от размеров КП для 19-дюймовой (1) и для метрической (2) систем

Анализ приведенных на **рис. 4** зависимостей показал, что плотность контактов выходных электрических соединителей для метрической системы гораздо больше, чем для 19-дюймовой, что, несомненно, является ее серьезным преимуществом.

Выводы

Из полученных результатов видно, что абсолютного преимущества по рассмотренным показателям не имеет ни 19-дюймовая система, ни метрическая. По коэффициентам заполнения коммутационных плат электронными компонентами, заполнения объема кассет коммутационными платами и заполнения объема шкафов коммутационными платами эти системы мало отличаются между собой. По количеству типоразмеров составных частей, т. е. вариантов компоновки плат в шкафах, метрическая система имеет существенные преимущества, однако этот показатель не является определяющим при выборе конструкционной системы. И только по коэффициенту плотности контактов выходных электрических соединителей метрическая система имеет реальные преимущества. Однако тут следует иметь в виду, что в настоящее время разработчиками предпринимаются определенные меры

для совершенствования 19-дюймовой конструкционной системы. Так, созданы новые электрические соединители с шагом 2 мм, большим количеством рядов и, соответственно, значительно увеличенным количеством контактов [10] по сравнению с электрическими соединителями [8, 9] для использования в условиях магистрально-модульного метода конструирования (стандарты VME, CPIC и др.). Этим можно, в определенной степени, объяснить тот факт, что 19-дюймовая система находит более широкое применение, чем метрическая, и продолжает развиваться.

По другим показателям, по которым трудно дать количественную оценку, преимущество на стороне метрической системы, которая более удобна, например, при использовании модульного принципа конструирования, заключающегося в установлении взаимосвязи между координирующими размерами и базисным, кратными и монтажными шагами.

В то же время, по степени технической подготовленности производства и адаптации к предыдущим разработкам 19-дюймовая система вне конкуренции, что на сегодняшний день является определяющим при выборе конструкционной системы разработчиками электронного оборудования. В свою очередь, это не стимулирует производителей механических структур к расширению номенклатуры своей продукции, соответствующей стандартам метрической размерной системы.

На основании проведенного анализа можно и на ближайший период прогнозировать приоритетное использование 19-дюймовой размерной системы для механических структур электронного оборудования.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. IEC 60297-3-106. Mechanical structures for electronic equipment. Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series. Part 3-106: Adaptation dimensions for subracks and chassis applicable with metric cabinets or racks in accordance with IEC 60917-2-1.

2. Анисимов О. Ю., Токаренко Л. Д. Оценка компоновочных характеристик конструкционных систем электронного оборудования // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 1997. — № 1. — С. 15—19.

3. ГОСТ Р МЭК 60297-3-101-2006. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Блочные каркасы и связанные с ними вставные блоки. Размеры конструкций серии 482,6 мм (19 дюймов).

4. ГОСТ Р МЭК 60917-2-2-2013. Модульный принцип построения механических конструкций для радиоэлектронных средств. Часть 2. Секционный стандарт. Координационные размеры интерфейса для несущих конструкций с шагом 25 мм. Раздел 2. Детальный стандарт. Размеры блочных каркасов, шасси, объединительных плат, передних панелей и вставных блоков

5. Ефименко А. А., Карлангач А. П., Лазарев С. Н. Поиск оптимальных размеров печатных плат для перспективных стандартных несущих конструкций электронных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 5—6. — С. 3—9.

6. IEC 60297-3-100:2008. Mechanical structures for electronic equipment. Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series. Part 3-100: Basic dimensions of front panels, subracks, chassis, racks and cabinets.

7. ГОСТ Р МЭК 60917-1-2011 Модульный принцип построения базовых несущих конструкций для электронного оборудования. Часть 1. Общий стандарт.

8. IEC 60603-2:1995. Connectors for frequencies below 3 MHz for use with printed boards. Part 2: Detail specification for two-part connectors with assessed quality, for printed boards, for basic grid of 2,54 mm (0,1 in) with common mounting features.

9. IEC 61076-4-100:2001. Connectors for electronic equipment. Part 4-100. Printed board connectors with assessed quality. Detail specification for two-part connector modules having a grid of 2,5 mm for printed boards and backplanes.

10. IEC 61076-4-101:2001. Connectors for electronic equipment. Part 4-101: Printed board connectors with assessed quality. Detail specification for two-part connector modules, having a basic grid of 2,0 mm for printed boards and backplanes in accordance with IEC 60917.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 20.08 2015 г.*

А. А. ЄФІМЕНКО, О. П. КАРЛАНГАЧ

Україна, Одеський національний політехнічний університет
E-mail: sasha7725@i.ua

АНАЛІЗ НЕСУЧИХ КОНСТРУКЦІЙ 19-ДЮЙМОВОЇ ТА МЕТРИЧНОЇ СИСТЕМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Проведено дослідження і аналіз різних показників якості несучих конструкцій двох конструкційних систем для визначення їх характеристик та порівняння між собою, а також прогнозування перспектив їх подальшого використання.

Ключові слова: несучі конструкції, показники якості, 19-дюймова конструкційна система, метрична конструкційна система, механічні структури для електронного обладнання.

ANALYSIS OF 19-INCH AND METRIC MECHANICAL STRUCTURES FOR ELECTRONIC EQUIPMENT

The paper deals with the research and analysis of various quality indicators of the standard mechanical structures of two constructional systems in order to define and compare their characteristics, and to predict prospects for their use.

To compare these two systems we have selected parameters which make it possible to make a quantitative assessment and can be calculated on the basis of the data from standards for such mechanical structures.

Research has shown that, according to considered indicators, neither 19-inch system, nor the metric system has the absolute advantage. And only in the density ratio of contacts of output electrical connectors, the metric system has real advantages. Although, it should be noted, that certain measures are taken by the developers to improve the 19-inch constructional system. This may, to some extent, explain the fact that the 19-inch system is more widely used than the metric one, and continues to evolve and develop.

For other indicators, which are more difficult to be assessed quantitatively, the metric system is more preferable, because it is more convenient in unit design consisting in establishment of interrelation between the coordinating sizes and basic, multiple and mounting steps. At the same time, the 19-inch system has no rival in technical readiness of the industry and in adaptation to the previous designs. The latter is the defining factor for choosing a constructional system by developers of electronic equipment. This, in turn, does not stimulate producers of mechanical structures to extend their production range in accordance with the standards of the metric system.

On the basis of the analysis we can predict that in immediate future the 19-inch dimensional system will retain priority for the mechanical structures of electronic equipment. This project deals with the problem of determination of optimum sizes of printed circuit boards for standard mechanical structures for various electronic devices.

Keywords: standard mechanical structures, quality factor, 19-inch constructional system, metric constructional system, mechanical structures for electronic equipment.

REFERENCES

1. IEC 60297-3-106. Mechanical structures for electronic equipment — Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series — Part 3-106: Adaptation dimensions for subracks and chassis applicable with metric cabinets or racks in accordance with IEC 60917-2-1.
2. Anisimov O.Yu., Tokarenko L.D. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 1997, no. 1, pp. 15-19. (Rus)
3. IEC 60297-3-101(2004) Mechanical structures for electronic equipment - Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series — Part 3-101: Subracks and associated plug-in units.
4. IEC 60917-2-2(1994). Modular order for the development of mechanical structures for electronic equipment practices — Part 2: Sectional specification; interface co-ordination dimensions for the 25 mm equipment practice; section 2: Detail specification; dimensions for subracks, chassis, backplanes, front panels and plug-in units.
5. Yefimenko A.A., Karlangach A.P., Lazarev S. N. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*, 2014, no. 5-6, pp. 3-9. (Rus)
6. IEC 60297-3-100:2008. Mechanical structures for electronic equipment. Dimensions of mechanical structures of the 482,6 mm (19 in) series. Part 3-100: Basic dimensions of front panels, subracks, chassis, racks and cabinets.
7. IEC 60917-1:1998. Modular order for the development of mechanical structures for electronic equipment practices. Part 1: Generic standard.
8. IEC 60603-2:1995, Connectors for frequencies below 3 MHz for use with printed boards — Part 2: Detail specification for two-part connectors with assessed quality, for printed boards, for basic grid of 2,54 mm (0,1 in) with common mounting features.
9. IEC 61076-4-100:2001. Connectors for electronic equipment. Part 4-100. Printed board connectors with assessed quality. Detail specification for two-part connector modules having a grid of 2,5 mm for printed boards and backplanes.
10. IEC 61076-4-101:2001. Connectors for electronic equipment. Part 4-101: Printed board connectors with assessed quality. Detail specification for two-part connector modules, having a basic grid of 2,0 mm for printed boards and backplanes in accordance with IEC 60917.

А. М. ПИЛИПЕНКО, к. т. н. И. К. СУНДУЧКОВ, В. В. ЧМИЛЬ,
к. т. н. В. М. ЧМИЛЬ, П. А. ЯЦЫК

Украина, г. Киев, НПП «Сатурн»
Email: chmil@nbi.com

РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРИЕМНЫЙ КОМПЛЕКС И ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВНОСИМОЙ ИМ ПОГРЕШНОСТИ В РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сформированы и обоснованы критерии построения структурной схемы и конструкторско-технологических решений при проектировании приемного комплекса для компенсационного радиометра полной мощности. Представлены результаты разработки приемного комплекса в рамках оснащения малых радиотелескопов, создаваемых по программе VLBI2010.

Ключевые слова: радиотелескоп, приемный комплекс, радиометр полной мощности, флуктуационная чувствительность, ошибка измерительного тракта.

Задачи навигации в современном мире являются актуальными в разных сферах деятельности — от глобального изучения Земли до практических жизненных потребностей человека и задач специального назначения. Радиометрия играет в решении этих задач большую роль как с точки зрения обеспечения необходимой точности ориентирования в пространстве, так и с точки зрения достижения максимально возможного разрешения идентификации объектов на земной поверхности.

Такие преимущества радиометрических методов, как всепогодность, возможность аппаратурной реализации в приемлемых весогабаритных характеристиках, разнообразие методов обработки радиометрических данных и развитой сети радиоинтерферометрических исследований, определили широкое применение таких устройств.

Институтом прикладной астрономии РАН на базе радиометрических приемных устройств создан радиоинтерферометр со сверхдлинной базой (РСДБ) «Квазар-КВО», который наряду с целым комплексом задач должен осуществлять:

- установление земной системы координат и ее реализацию в виде каталога координат опорных станций;

- установление динамической системы координат и ее реализацию в виде теории движения искусственных спутников Земли и, прежде всего, навигационных спутников [1].

Наблюдения, выполненные на этом интерферометре, позволяют определить параметры вращения Земли и координаты опорных станций на миллиметровом уровне точности.

Международное сообщество GGOS (Global Geodetic Observing System) разработало рекомендацию по поддержанию и развитию аппаратно-программных средств опорных станций глобальной геодезической сети [2]. Опорные

станции со своей инфраструктурой должны предоставлять количественную информацию для определения и мониторинга координат опорных источников небесной системы координат и координат опорных станций земной системы координат, а также информацию о параметрах вращения Земли, уровне моря, круговороте воды, климате и об угрозе стихийных бедствий.

Международная РСДБ-служба (International VLBI Service), в свою очередь, разработала проект VLBI2010, направленный на кардинальное повышение точности получаемых данных [3]. Сформулированы требования, которым должны удовлетворять перспективные станции IVS. Рекомендуемые технические характеристики радиотелескопов нового поколения в сравнении с характеристиками радиотелескопов ныне действующей РСДБ-сети приведены в **таблице**.

Реализация программы VLBI2010 проводится с подключением радиотелескопов по мере их строительства и на сегодняшний день в мире из этой серии функционируют радиотелескопы Wettzell (Германия) [4] и RAEGE (Испания, Португалия) [5] с частотными диапазонами $S(2,2-2,6\text{ ГГц})$; $X(7,0-9,5\text{ ГГц})$ и $Ka(28-34\text{ ГГц})$, совместимыми с диапазонами комплекса «Квазар-КВО». Исходя из этого, представляется целесообразным при проектировании приемных комплексов для аналогичных радиотелескопов в Зеленчуке и Бадахасе (РФ) остановиться на тех же диапазонах [6].

В настоящей статье представлены результаты разработки НПП «Сатурн» приемного комплекса, удовлетворяющего требованиям к радиотелескопам программы VLBI2010, описаны нестандартные подходы к оптимизации структуры и конструкторско-технологических решений как изделия в целом, так и его составных частей.

Технические характеристики РСДБ-радиотелескопов

Параметр	Текущее состояние	VLBI2010
Время работы	24 ч, один раз в неделю	Круглосуточно
Время восстановления	До нескольких месяцев	Менее 24 ч
Диаметр антенны	5 – 100 м	10 – 12 м
Скорость движения	2 – 2000 /мин	Более 3600 /мин
Частоты приема	S/X диапазоны	2 – 14(18) ГГц
Скорость записи	128,256 Мбит/с	8 – 16 Гбит/с
Передача данных	Транспортировка дисков, в отдельных случаях e-РСДБ*	e-РСДБ*, в отдельных случаях транспортировка дисков
Число станций	40 (распределены случайным образом)	40 (распределены случайным образом)

*e-РСДБ (e-VLBI) — так называемая электронная РСДБ или РСДБ в реальном времени.

Принцип и критерии построения приемного комплекса

Для работы с объектами дальнего космоса требуется максимальная чувствительность, что определяет в целом построение радиоинтерферометрического комплекса как компенсационного радиометра полной мощности. Таким образом, наиболее важными параметрами радиометрических приемных устройств являются потенциальная флуктуационная чувствительность и минимальная погрешность измерений.

Стабильность работы радиометра определяется степенью постоянства коэффициента шума, полосы пропускания приемного устройства и коэффициента усиления.

В общем виде выражение флуктуационной чувствительности [7, с. 60] можно представить как

$$\delta T_{\text{фп}} = T_{\text{ш}} \sqrt{\frac{2\Delta F}{\Delta f}} + \left(\frac{\Delta G_y}{G_y} \right)^2, \quad (1)$$

где $T_{\text{ш}}$ — шумовая температура приемника;

ΔF — эквивалентная ширина полосы пропускания низкочастотной части приемника, включая интегратор;

Δf — эффективная ширина полосы пропускания высокочастотной части приемника до детектора;

ΔG_y — эффективное значение изменений коэффициента высокочастотного усиления по мощности;

G_y — среднее значение коэффициента усиления.

Важное значение в работе радиометрического канала имеет также погрешность измерения сигнала, определяемая как структурой приемного комплекса, так и конкретными схемотехническими и конструкторско-технологическими решениями.

При сложной структуре приемного тракта каждый из параметров можно представить как

$$G_y = G_1 + G_2 + \dots + G_i + G_n; \quad (2)$$

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш1}} + \frac{T_{\text{ш2}}}{G_1} + \frac{T_{\text{ш3}}}{G_1 + G_2} + \dots + \frac{T_{\text{ши}}}{G_1 + \dots + G_{i-1}}, \quad (3)$$

где G_i и $T_{\text{ши}}$ — параметры отдельных структурных единиц приемного тракта

Функционально более сложным является параметр ΔG_y , который в общем виде можно записать как

$$\Delta G_y = G_y - G_{\text{ном}},$$

где $G_{\text{ном}}$ — номинальное значение коэффициента усиления.

Поскольку ΔG_y , как и G_y , зависит от многих параметров, таких как частоты рабочего диапазона ω , температура окружающей среды $T_{\text{ок}}$, колебания питающих напряжений $U_{\text{пит}}$ и др., запишем $\Delta G_y = f(\omega, T_{\text{ок}}, U_{\text{пит}}, \dots)$.

Получать информацию о ΔG_y непрерывно во всем диапазоне частот, диапазоне температур окружающей среды достаточно проблематично.

В упрощенном виде ΔG_y можно представить в виде матрицы дискретных значений:

$$\Delta G_y = \begin{bmatrix} \Delta G_{11} & \Delta G_{12} & \Delta G_{1i} & \dots & \Delta G_{1n} \\ \Delta G_{21} & \Delta G_{22} & \Delta G_{2i} & \dots & \Delta G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta G_{j1} & \Delta G_{j2} & \Delta G_{ji} & \dots & \Delta G_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta G_{m1} & \Delta G_{m2} & \Delta G_{mi} & \dots & \Delta G_{mn} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где строки дают представление о значениях ΔG_y по составляющим неравномерности G_y по структурным единицам приемного тракта, а столбцы — значение этих коэффициентов в зависимости от частоты рабочего диапазона (ω_n, ω_b). Здесь G_{11} соответствует частоте $\omega_1 \leq \omega_n$, а G_{m1} — частоте $\omega_m \leq \omega_b$.

Аналогично можно представить зависимости от температуры окружающей среды, от колебания питающих напряжений и т. д.

Как видим, флуктуационная чувствительность радиометра является функцией многих параметров.

При проектировании изделия необходимо стремиться к минимизации вносимых аппаратно-погрешностей за счет приемного комплекса.

В общем виде максимальную суммарную погрешность измерительного тракта радиометра [7, с. 124] можно представить в виде

$$\Delta_{\text{рад}} = \Delta_{\text{п}} + \Delta_{\text{бл}} + \Delta_{\text{аф}} + \Delta_{\text{нк}} + \Delta_{\text{т}} + \Delta_{\text{ик}} + \Delta_{\text{и}} + \Delta_{\text{ачп}} + \dots \quad (5)$$

Входящие сюда погрешности связаны со следующими факторами:

- $\Delta_{\text{п}}$ — с собственными шумами приемника;
- $\Delta_{\text{бл}}$ — с приемом сигнала боковым лепестком;
- $\Delta_{\text{аф}}$ — с относительной шумовой температурой антенно-фидерного тракта;
- $\Delta_{\text{нк}}$ — с нелинейностью измерительного тракта;
- $\Delta_{\text{т}}$ — с неточностью значения шумовой температуры эталонов, по которым производится калибровка;
- $\Delta_{\text{ик}}$ — с изменениями в течение цикла между калибровками;
- $\Delta_{\text{и}}$ — прочие ошибки (температурные, погодные и др.).

Разработчиков приемного комплекса наиболее интересует $\Delta_{\text{п}}$, которую можно представить как $\Delta_{\text{п}} = \Delta_{\text{п1}} + \Delta_{\text{п2}} + \dots + \Delta_{\text{пi}}$, то есть как сумму погрешностей каждого из блоков, входящих в тракт приемника, а также $\Delta_{\text{т}}$, поскольку в состав приемного комплекса входят и калибровочные генераторы шума.

Таким образом, исходя из того, что точность измерений радиометрического сигнала является функцией многих составляющих, определим ряд критериев, которых нужно придерживаться при проектировании комплекса.

1. Исходя из выражения (3), можно заключить, что наиболее весомый вклад в величину $T_{\text{ш}}$ вносит первый конструктивный элемент (входной усилитель), а также второй, вкладом же третьего и последующих составляющих можно пренебречь. Таким образом, необходимо стремиться к созданию входных усилительных устройств с минимальными собственными шумами и максимально возможным коэффициентом усиления. Таким требованиям наиболее полно отвечают входные усилительные устройства с криогенным уровнем охлаждения.

2. Поскольку в суммарную погрешность измерительного тракта (5) входит $\Delta_{\text{аф}}$, необходимо рассмотреть вопрос включения в конструкцию входного устройства максимального количества элементов антенно-фидерного тракта, стабилизируя его температурный режим.

3. Исходя из выражения (4), для исключения влияния фактора температуры окружающей среды необходима стабилизация температуры критических узлов блоков, входящих в приемный тракт.

4. Исходя из выражений (2) и (4), необходимо стремиться к минимизации неравномерности коэффициента усиления по диапазону частот во всех составляющих элементах приемного тракта.

5. При формировании функциональных задач для составляющих приемного комплекса необходимо выделить функции, влияющие непосредственно на флуктуационную чувствительность и погрешность измерений, и сосредоточить их в отдельных конструкторско-технологических решениях, оптимизировав с точки зрения возможности минимизации энергопотребления, весовых характеристик, количества соединительных переходных элементов.

6. Учтя, что в выражение (5) входит $\Delta_{\text{т}}$, целесообразно стабилизировать критические элементы калибровочных генераторов шума по температуре и предпринять меры по минимизации количества и размеров соединительных трактов.

7. Для обеспечения эксплуатационных характеристик требуется система управления режимами работы, обеспечение питающим напряжением, регулирование температурной стабилизации критических узлов. Хотя составляющие структурной схемы, выполняющей данные функции, не входят непосредственно в тракт приемной системы и потому не требуются дополнительные меры по стабилизации их характеристик, однако требуется минимизация вносимых ими искажений в принимаемый сигнал, что является основным требованием при создании входящих в комплекс узлов и блоков.

Структурные и конструкторско-технологические решения

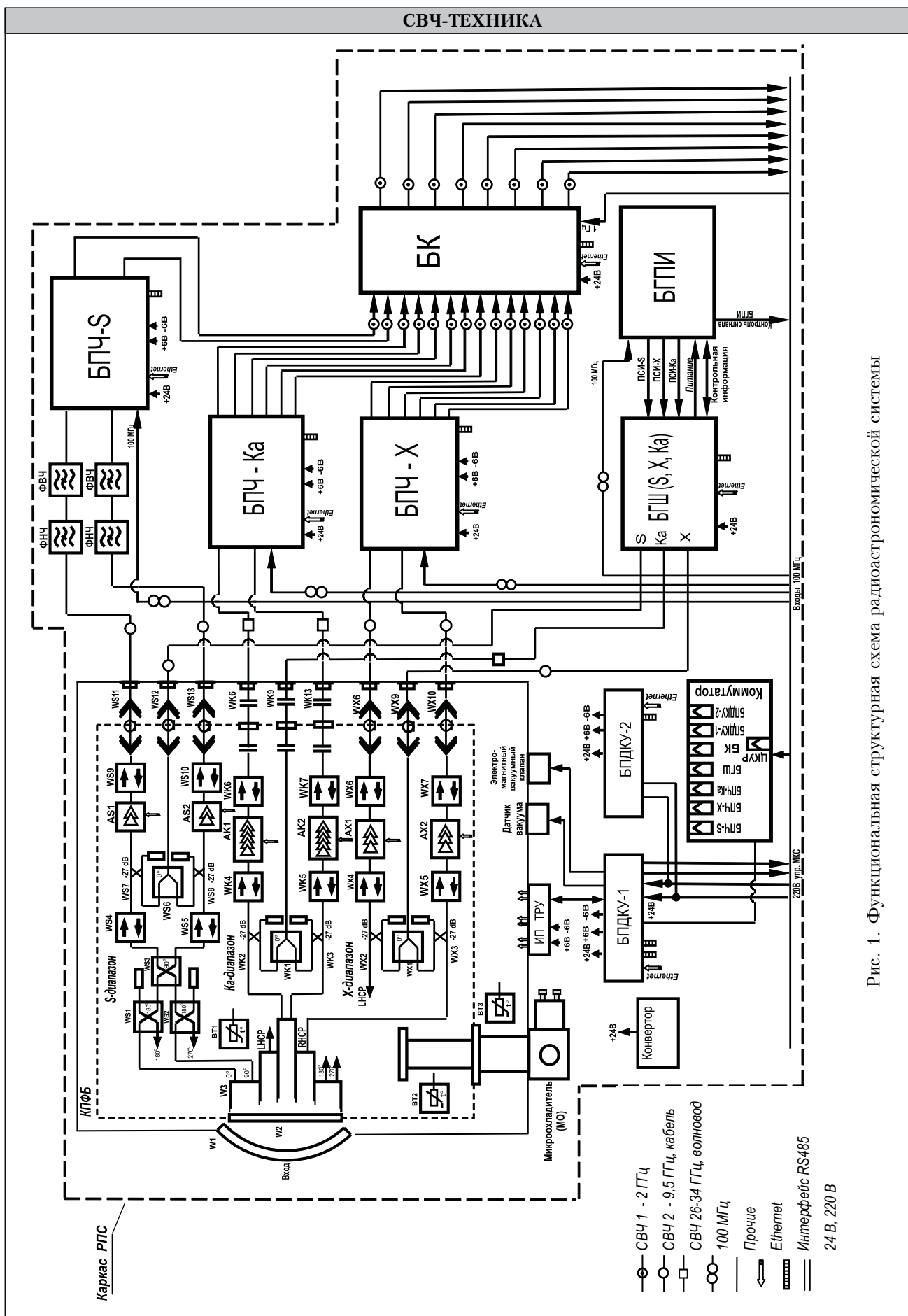
Исходя из вышесказанного, разработана структура и конструкция приемного комплекса (системы) (см. рис. 1).

Радиоастрономическая приемная система (РПС) состоит из криогенного приемного фокального (КПФБ) блока и блоков преобразования частоты S-диапазона (БПЧ-S), X-диапазона (БПЧ-X) и Ka-диапазона (БПЧ-Ka). Кроме того, в состав РПС входят:

- генераторы шума (БГШ);
- блоки коммутации (БК);
- блок питания, дистанционного контроля и управления 1 (БПДКУ-1);
- блок питания, дистанционного контроля и управления 2 (БПДКУ-2);
- блок питания (БП) AC/DC TXL 750-24S;
- коммутатор 112105-5004;
- режекторные фильтры (РФ) (4 шт.);
- микроохладитель RDK-40852;
- каркас РПС;
- комплект СВЧ- и НЧ-кабелей, гелиепроводов, вакуумопроводов;
- ЗИП одиночный (ЗИП-0).

Описание и принципы работы РПС

Конструктивно РПС выполнена в виде самостоятельных функциональных блоков, механически закрепленных на каркасе (рис. 2).



Соединение между СВЧ-блоками РПС выполнено жесткими коаксиальными кабелями сечением 3,5/1,52 мм с применением малогабаритных разъемов SMA-типа (*S*- и *X*-диапазоны) и прямоугольными волноводами стандартного сечения 7,2×3,4 мм (*Ka*-диапазон).

К блокам, функционально влияющим на относительную погрешность СВЧ-тракта радиометра, следует отнести КПФБ, БПЧ-*S*, БПЧ-*X*, БПЧ-*Ka*, БК, БГШ (см. **рис. 3**).

Учитывая многоканальность приемного устройства, для каждого канала существует своя последовательность блоков, непосредственно влияющих на флуктуационную чувствительность и на погрешность измерений:

- для *S* диапазона: КПФБ — БПЧ-*S* — БК;
- для *X* диапазона: КПФБ — БПЧ-*X* — БК;
- для *Ka* диапазона: КПФБ — БПЧ-*Ka* — БК.

Радиоастрономические сигналы от антенны радиотелескопа поступают через радиопрозрачное окно криостата КПФБ на охлаждаемый трехдиапазонный антенный облучатель, который обеспечивает выделение полос приема радиоастрономических сигналов от зеркальной параболической антенны, а также формирование и разделение круговых (левой и правой) поляризаций вектора напряженности электрического поля.

Выделенные и сформированные радиоастрономические сигналы поступают на вход охлаждаемых маломощных усилителей, выполненных на бескорпусных GaAs-транзисторах с высокой

подвижностью электронов НЕМТ (high electron mobility transistor) фирмы NEC.

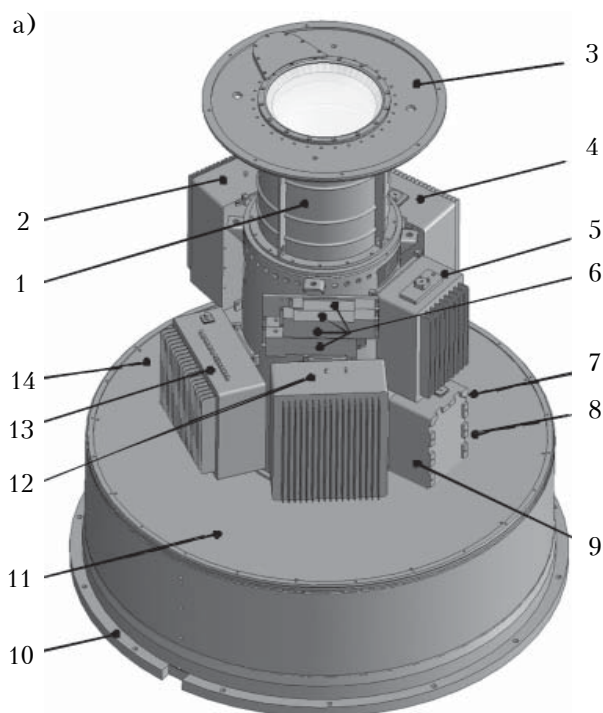
В каждом рабочем диапазоне КПФБ имеется по два приемно-усилительных канала, соответствующих левой и правой круговым поляризациям, и по одному каналу для ввода калибровочных сигналов (Вх. ГШ-*S*, Вх. ГШ-*X*, Вх. ГШ-*Ka*) от блока генераторов шума в *S*, *X* и *Ka*-диапазонах.

Охлаждение до криогенной температуры и термостатирование узлов обеспечивается микрокриогенной системой RDK-408S2-CNA-61D производства фирмы Sumitomo.

В блоках преобразования частоты (БПЧ-*S*, БПЧ-*X*, БПЧ-*Ka*) выполняется дополнительное усиление, селекция по зеркальному каналу и частотное преобразование радиоастрономических сигналов (предварительно усиленных КПФБ) трех частотных диапазонов правой и левой круговых поляризаций в сигналы промежуточной частоты (ПЧ).

БПЧ-*S* предназначен для усиления и преобразования сигналов диапазона частот 2,2–2,6 ГГц в сигналы ПЧ диапазона 1,05–1,45 ГГц. Подавление паразитных сигналов, поступающих на вход БПЧ-*S*, обеспечивается двумя режекторными фильтрами, установленными в каждом канале *S*-диапазона между выходом КПФБ и входом БПЧ-*S*.

БПЧ-*X* предназначен для усиления и преобразования сигналов в диапазоне частот 7,0–9,5 ГГц в сигналы ПЧ диапазона 1–2 ГГц.



б)

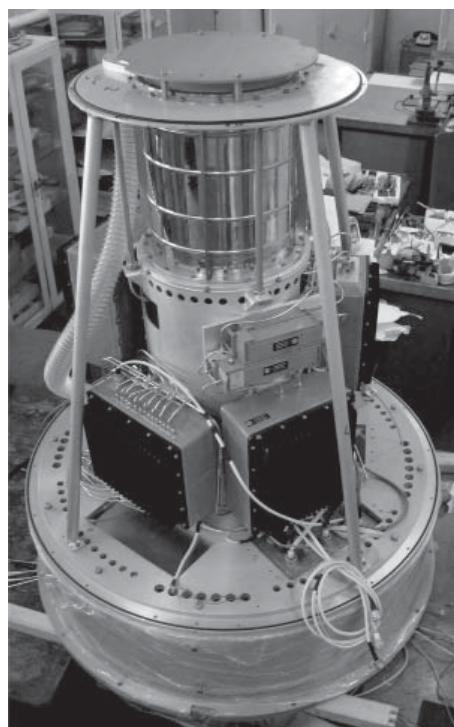


Рис. 2. Конструкция (а) и экспериментальный образец (б) радиоастрономической приемной системы: 1 — КПФБ; 2 — БПЧ-*X*; 3 — фланец КПФБ; 4 — БПЧ-*Ka*; 5 — БГШ; 6 — РФ-1, РФ-2; 7 — БПДКУ-1; 8 — коммутатор 112105-5004; 9 — БГПИ; 10 — фланец присоединительный; 11 — блок АС/DC TXL750-24С; 12 — БПЧ-*S*; 13 — БК4; 14 — БПДКУ-2 (устройства 7, 8, 11, 14 и защитный кожух РПС на схеме конструкции не показаны)

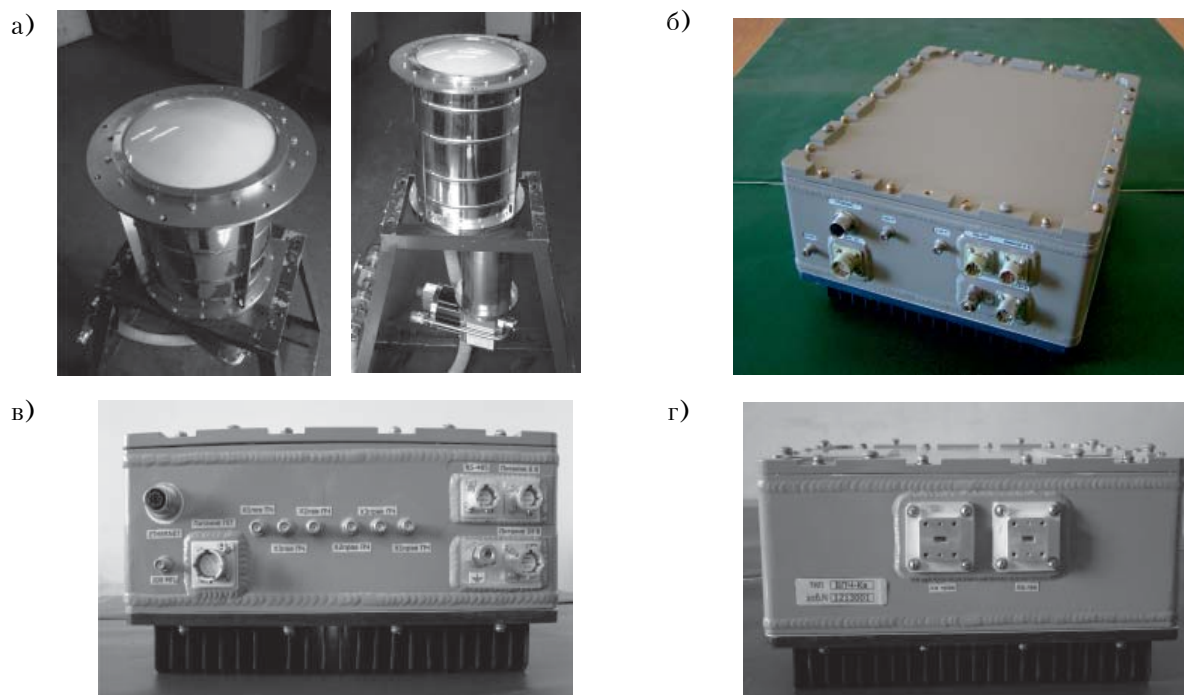


Рис. 3. Блоки, функционально влияющие на относительную погрешность СВЧ-тракта радиометра:
 а — КПФБ; б — БПЧ-*S*; в — БПЧ-*X*; г — БПЧ-*Ka*

БПЧ-*Ka* предназначен для усиления и преобразования сигналов диапазона частот 28—34 ГГц в сигналы ПЧ диапазона 1—2 ГГц.

В каждом БПЧ имеется по два входных приемно-усилительных канала, соответствующих левой и правой круговой поляризации. Количество выходных каналов: в БПЧ-*S* два канала (левой и правой поляризации); в БПЧ-*X* и БПЧ-*Ka* по шесть каналов (по три канала левой и правой поляризации). Частоты выходных сигналов ПЧ правого и левого каналов в каждом из блоков БПЧ в *S*-, *X*- и *Ka*-диапазонах совпадают.

БПЧ обеспечивают свои характеристики при подаче на их входы от внешнего источника сигналов опорной частоты 100 МГц, которые необходимы для формирования сигналов гетеродинов БПЧ.

Обеспечение стабильной работы БПЧ в температурном диапазоне 5—40°C достигается термостатированием приемно-преобразовательных модулей в *S*-, *X* и *Ka*-диапазонах.

В число блоков канала СВЧ, вносящих вклад в погрешность радиометрического канала, входит и блок коммутации, представленный на рис. 4. Он предназначен для коммутации сигналов, поступающих с выходов блоков преобразователей частоты БПЧ-*S*, БПЧ-*X*, БПЧ-*Ka*, их усиления, а также определения уровня мощности в субканалах радиометрического контроля.

Блок коммутации обеспечивает для каждой поляризации следующие режимы коммутации трактов:

— режим «*S*/3*X*», при котором входной сигнал *S*-канала обеих поляризаций и три сигнала

ла *X*-канала обеих поляризаций предаются на выходы БК;

— режим «*X*/3*Ka*», при котором входной сигнал *X*-канала обеих поляризаций и три сигнала *Ka*-канала обеих поляризаций передаются на выходы ПЧ БК.

БК имеет 14 входов для сигналов ПЧ, поступающих с выходов БПЧ (*S*, *X*, *Ka*) и восемь каналов сигналов выходных частот. Конструктивно БК выполнен в герметичном металлическом корпусе с термостатированием модуля коммутации и усиления.

Существенный вклад в суммарную погрешность измерительного тракта вносит блок генератора шума (БГШ), используемый как стандарт при калибровочных операциях, (рис. 5).

БГШ предназначен для генерирования и амплитудной регулировки сигналов в тракте ам-

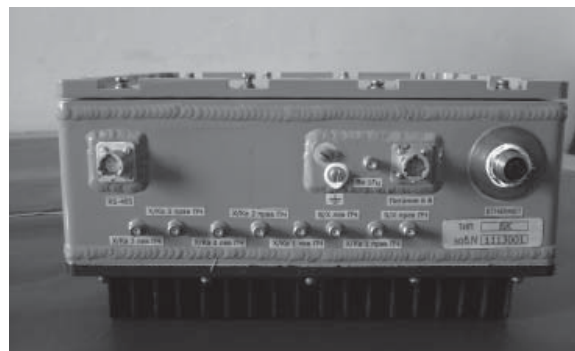


Рис. 4. Блок коммутации

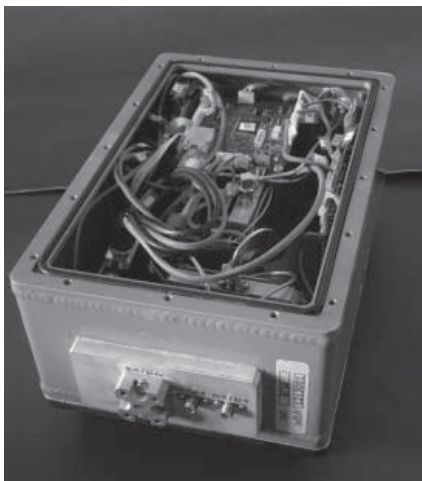


Рис. 5. Блок генераторов шума

плитудной калибровки радиоприемного тракта РПС, а также выполняет амплитудную регулировку сигналов фазовой калибровки радиоприемного тракта РПС, поступающих от генератора пикосекундных импульсов.

БГШ обеспечивает генерацию шумовых сигналов в рабочей полосе частот S -, X - и Ka -диапазонов. Конструктивно БГШ выполнен в отдельном герметичном корпусе. Стабильность работы БГШ достигается термостатированием модулей формирования шумовых сигналов во всех трех диапазонах.

Остальные блоки (РПС, БПДКУ1, БПДКУ2, БГПИ) предназначены для питания блоков СВЧ-тракта и организации управления работой блоков.

Система управления организована по распределенному двухуровневому принципу. Каждый блок оснащен контроллером, который по шине Ethernet либо RS485 взаимодействует с центральным пультом управления радиотелескопа.

Связь происходит через коммутатор Ethernet в виде самостоятельного блока.

Заключение

Радиоприемная система для малых радиотелескопов имеет несколько существенных преимуществ по сравнению с применявшимися ранее.

1. Решен вопрос создания трехдиапазонного облучателя для диапазонов частот 2,2–2,6 ГГц; 7,0–9,5 ГГц; 28,0–34,0 ГГц.

2. За счет глубокого охлаждения (до 10 К) антенного облучателя и входных транзисторных усилителей достигнута высокая чувствительность приемного комплекса: в Ka -диапазоне — 36 К (0,5 дБ), в X -диапазоне — 15 К (0,21 дБ), в S -диапазоне — 10 К (0,15 дБ).

3. Минимизированы погрешности измерения в тракте радиометра за счет температурной стабилизации основных узлов радиометрического канала.

4. Реализована возможность дистанционного контроля работоспособности РПС, определения работоспособности входящих в систему узлов и блоков. Реализована возможность дистанционного управления режимами работы приемной системы.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ипатов А. В. Радиointерферометр нового поколения для фундаментальных и прикладных исследований // Успехи физических наук. — 2013. — Т. 183, № 7. — С. 769–777.

2. The Global Geodetic Observing System: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020 / Ed. by H. P. Plag, M. Pearlman. — Berlin: Springer Verlag, 2009.

3. Hase H., Dassing R., Kronschnabl G. et al. Twin Telescope Wettzell — a VLBI2010 radio telescope project // Proc. of the fifth IVS General Meeting, Russia, St. Petersburg, 2008. — P.109–113.

4. Kronschnabl G., Neidhardt A., Pausch K. et al. The TWIN-Wettzell // IVS TecSpec Workshop. — Germany, Bad Kotzing, 2012.

5. López-Fernández J. A. The RAEGL VLBI radio telescope // IVS TecSpec Workshop. — Germany, Bad Kotzing, 2012.

6. Ипатов А. Б., Чмиль В. М., Скрасанов В. Н. и др. Криогенный приемный фокальный блок для телескопов радиointерферометрического комплекса нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия, 2014. — Т. 19, № 1. — С. 81–96.

7. Михайлов В.Ф., Брагин И.В., Брагин С.И. Микро-волновая спутниковая аппаратура дистанционного зондирования Земли. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2003.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.10 2015 г.

О. М. ПИЛИПЕНКО, І. К. СУНДУЧКОВ,
В. В. ЧМІЛЬ, В. М. ЧМІЛЬ, П. О. ЯЦИК

Україна, м.Київ, ПАТ «НВП «Сатурн»
Email: chmil@nbi.com

РАДІОМЕТРИЧНИЙ ПРИЙМАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВНОСИМОЇ НИМ ПОХИБКИ У РАДІОМЕТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

Сформульовано та обґрунтовано критерії побудови структурної схеми і конструкторсько-технологічних рішень при проектуванні приймального комплексу для компенсаційного радіометра повної потужності. Представлено результати розробки приймального комплексу в рамках оснащення малих радіотелескопів,

створюваних за програмою VLDI2010. Розглянуто спроектовану приймальну систему для малих радіотелескопів, побудованих в рамках виконання програми VLDI2010.

Ключові слова: радіотелескоп, приймальний комплекс, радіометр повної потужності, флуктуаційна чутливість, помилка вимірювального тракту.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.14
UDC 621.396.677:621.396.965

A. M. PYLYPENKO, I. K. SUNDUCHKOV,
V. V. CHMIL, V. M. CHMIL, P. O. YATSYK

Ukraine, Kyiv, "Saturn" Research and Development Company PJSC
E-mail: chmil@nbi.com

RADIOMETRIC RECEIVING COMPLEX AND WAYS TO REDUCE THE RADIOMETRIC MEASUREMENTS ERROR

The authors formulate criteria for building a structural scheme and developing design and technological solutions for a reception complex for full-power compensation radiometers. The paper presents the results of development of the reception complex within the framework of equipping small telescopes created according to the program VLDI2010.

Keywords: radio telescope, receiving complex, full power radiometer, fluctuation sensitivity, measuring path error.

REFERENCES

1. Ipatov A. V. [New generation radio interferometer for fundamental and applied investigations]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 7, pp. 769-777.

2. *The Global Geodetic Observing System: meeting the requirements of a Global Society on a changing planet in 2020*. Ed. by H. P. Plag, M. Pearlman. Berlin: Springer Verlag, 2009, 332 p.

3. Hase H., Dassing R., Kronschnabl G., Schluter W., Schwarz W., Kilger R., Lauber P., Neidhardt A., Pausch A., Gbldi W. Twin Telescope Wettzell – a VLBI2010 Radio Telescope Project. *Proc. of the fifth IVS General Meeting*, Russia, St. Petersburg, 2008, pp.109-113.

4. Kronschnabl G., Neidhardt A., Pausch K., Goldi W., Rayet R., Emrich A. The TWIN-Wettzell. *IVS TecSpec Workshop*, Germany, Bad Kotzting, 2012.

5. López-Fernández J. A. The RAEGE VLBI radio telescope. *IVS TecSpec Workshop*, Germany, Bad Kotzting, 2012.

6. Ipatov A. B., Chmil V. M., Skresanov V. N., Ivanov D. V., Mardyshkin V. V., Chernov V. K., Pilipenko A. M., Kirilenko A. A. [Cryogenic focalreceiving unit for telescopes of new-generation radio interferometric complex]. *Radiofizika i radioastronomiya*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 81-96.

7. Mikhailov V. F., Bragin I. V., Bragin S. I. *Mikrovolnovaya sputneykovaya apparatura dstantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Microwave satellite equipment for Earth remote sensing]. Saint-Petersburg: GUAP, 2003.

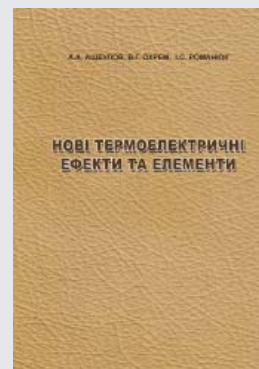
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Романюк И. С. Новые термоэлектрические эффекты и элементы (на украинском языке). — Черновцы: Издательский дом «Родовід», 2015.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований некоторых новых физических явлений и эффектов в термоэлектрически неоднородных и анизотропных средах. К ним относятся Umkehr-эффект, а также явления объемной термо-эдс и Бриджмена. Их использование позволило предложить и создать ряд оригинальных холодильных элементов. Рассмотрены также новые аспекты явления вихревых термоэлектрических токов, позволившие предложить оригинальный подход к проблеме термоэлектрического преобразования энергии. Полученные результаты обусловили появление ряда перспективных генераторных и холодильных элементов.

Для ученых, занимающихся термоэлектричеством, инженеров-разработчиков термоэлектрических приборов, а также для преподавателей, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.



А. Г. РЕШОТКА¹, В. Г. ГАЙДУЧОК², д. т. н. Н. М. ВАКИВ²

Украина, г. Львов, ¹Национальный университет «Львовская политехника»,

²Научно-производственное предприятие «Карат»

E-mail: amadey101@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН СВЧ-ДИАПАЗОНА, ВОЗБУЖДЕННЫХ ВСТРЕЧО-ШТЫРЕВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Исследована структура и направление распространения объемных акустических волн, возбужденных встречно-штыревым преобразователем (ВШП) в кристалле ниобата лития, с помощью их визуализации. Показано, что для расчета периода ВШП при конструировании акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона недостаточно использовать лишь подстройку под угол Брэгга. Для определения области распространения таких пучков волн нужно также учитывать параметр Френеля.

Ключевые слова: акустооптические устройства, объемные акустические волны, встречно-штыревой преобразователь, пьезоэлектрический преобразователь, дифракция световой волны.

В настоящее время акустооптические методы управления оптическим излучением находят широкое применение в науке и технике [1–3]. Характеристики акустооптических устройств зависят, главным образом, от двух факторов: от закономерностей акустооптического взаимодействия и от структуры акустического пучка, возбуждаемого пьезоэлектрическим преобразователем. Структура акустического пучка определяется, в первую очередь, пьезопреобразователем. Идеальным считается однородной пучок, во всех точках которого амплитуда распространяющейся волны одинакова, а волновые фронты являются плоскими. На практике всегда имеют место акустические пучки конечной ширины, которые можно представить в виде суперпозиции плоских волн, имеющих в общем случае разную амплитуду, фазу и направление распространения.

Одним из способов возбуждения акустических волн, как объемных, так и поверхностных, является возбуждение этих волн с поверхности пьезоэлектрических кристаллов с помощью встречно-штыревого преобразователя (ВШП) [4, 5], который широко используется в акустоэлектронике [5, 6]. Вместе с возбуждением поверхностных акустических волн с помощью ВШП в акустоэлектронных устройствах возбуждаются и объемные акустические волны, что приводит к возникновению паразитных сигналов в этих устройствах. С другой стороны, возбуждение объемных акустических волн с помощью ВШП с поверхности пьезокристалла, например LiNbO_3 , может использоваться для разработки акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона [7], что значительно удешевит технологический процесс изготовления СВЧ-дефлекторов.

Поэтому изучению генерации и распространения таких объемных акустических волн уделяется значительное внимание, в том числе и разработке методов моделирования их возбуждения и распространения [10, 11].

В [1, 3, 9] диаграмма направленности многоэлементного периодического преобразователя описывается как произведение диаграммы направленности входящего в его состав единичного элементарного излучателя на диаграмму направленности массива излучателей этого преобразователя. Этот результат используется при расчете параметров акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона.

В [12] нами было теоретически исследовано распространение объемных акустических волн, возбужденных ВШП с поверхности пьезоэлектрического кристалла, и показано, что приведенные в [1, 3, 9] результаты действительны только для зоны Фраунгофера (дальняя зона) многоэлементного преобразователя в целом.

Используя параметр Френеля $S = \Lambda z / L_{\max}^2$ (Λ — длина акустической волны; z — расстояние от преобразователя до дальней зоны; L_{\max} — максимальный размер излучающего многоэлементного преобразователя), нетрудно убедиться, что зона Фраунгофера многоэлементного преобразователя акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона лежит на расстояниях, значительно превышающих реальные размеры кристаллических акустооптических ячеек. Используемое для расчета периода такого преобразователя условие коррекции угла Брэгга [1, 3] учитывает распространение излучаемого акустического пучка в дальней зоне. Однако с помощью параметра Френеля можно показать, что для реальных образцов акустооптических дефлекторов это усло-

вие является необходимым, но не достаточным. Углы излучения объемных акустических волн, а также количество пучков [11], рассчитанные при моделировании излучения ВШП, противоречат результатам, приведенным в [1, 3, 9, 12].

Для экспериментальной проверки изложенных выше фактов в данной работе исследовалась структура и направление распространения объемных акустических волн, возбужденных ВШП в СВЧ-диапазоне с ХУ-поверхности кристалла ниобата лития прямого среза. Размеры кристаллической ячейки в направлениях OX , OY , OZ составляли, соответственно, $12 \times 8 \times 10$ мм.

Теоретический анализ

Расчет акустооптического дефлектора СВЧ-диапазона с многоэлементным преобразователем начинается с определения периода d многоэлементной структуры. Этот период рассчитывается из условия коррекции угла Брэгга для заданной частоты f_0 , которая является центральной частотой полосы рабочих частот СВЧ акустооптического дефлектора [1]:

$$f_0 = V \sqrt{\frac{n}{\lambda d}}, \quad (1)$$

где V — скорость объемной акустической волны;
 n — показатель преломления материала световозвопровода;
 λ — используемая длина волны оптического излучения.

Многоэлементный преобразователь, ВШП, период которого при заданной центральной частоте f_0 рассчитывается подобным образом, может работать в трех областях: $z \leq 4d^2/\Lambda$ — область Френеля; $z \geq 8d^2/\Lambda$ — область Фраунгофера для ближайших (соседних) элементарных излучателей; $z \geq 2(Nd)^2/\Lambda$ — область Фраунгофера для всего преобразователя в целом ($\Lambda = V/f_0$; N — количество элементарных излучателей) [12].

В таблице приведены результаты расчета частоты f_0 и нижней границы области Фраунгофера для элементарных излучателей ($z_{1\min}$) и ВШП в целом ($z_{2\min}$) для трех значений периода d . При расчетах учитывалось, что для кристалла LiNbO_3 $V = 3,57$ км/с, $n = 2,2$. Количество излучателей N принималось равным 50, а диапазон рабочих частот выбирался равным 30% от центральной рабочей частоты ВШП.

Как следует из полученных результатов, в реальных световозвопроводах, длина которых со-

Результаты расчета частоты и нижней границы области Фраунгофера

d , мкм	120	75	40
f_0 , МГц	609	770	1055
$z_{1\min}$, м	27,6	11,25	4,27
$z_{2\min}$, м	14	7,2	2,4

ставляет примерно 10 мм, для ВШП с $d = 120$ мкм и $d = 75$ мкм на частотах 700 МГц и выше никакого перекрытия (интерференции) акустических пучков даже соседних элементарных излучателей не происходит.

Экспериментальные результаты

Для определения направления распространения объемных акустических волн и структуры акустических пучков, возбужденных ВШП с ХУ-поверхности кристалла ниобата лития прямого среза, применялся теневой метод [13].

Акустооптическое взаимодействие светового луча, падающего на акустооптическую ячейку Брэгга, с объемной акустической волной, возбужденной в ней ВШП, можно представить в двух конфигурациях (рис. 1). В первом случае световой пучок падает на грань YOZ , параллельную электродам ВШП (рис. 1, а), и если угол Брэгга $\theta_B \rightarrow 0^\circ$, то световой пучок распространяется в перпендикулярном электродам направ-

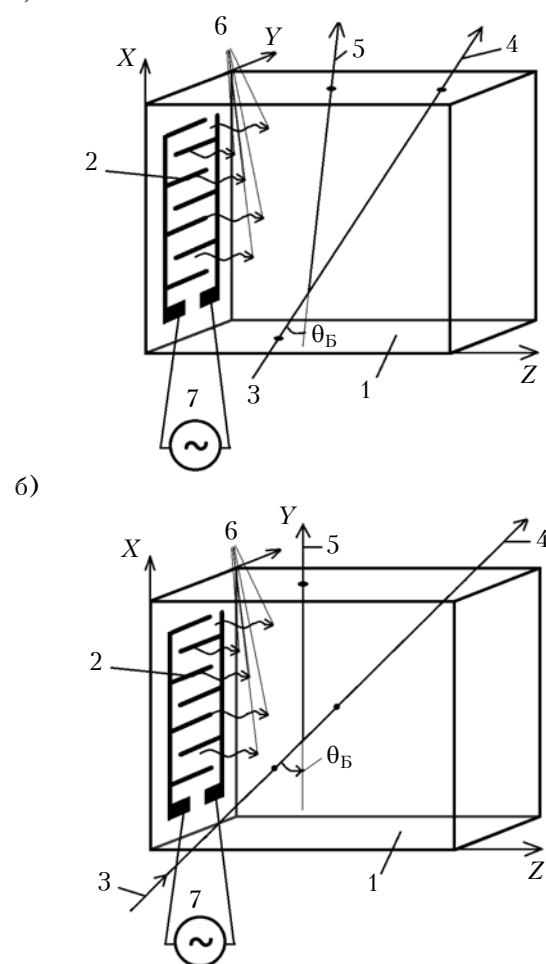


Рис. 1. Различные конфигурации акустооптического взаимодействия светового луча и акустических пучков, возбужденных ВШП:

1 — световозвопровод из LiNbO_3 ; 2 — ВШП; 3 — падающий световой пучок; 4 — световой пучок нулевого порядка; 5 — дифракционный световой пучок; 6 — акустическая волна; 7 — генератор Г4-76А

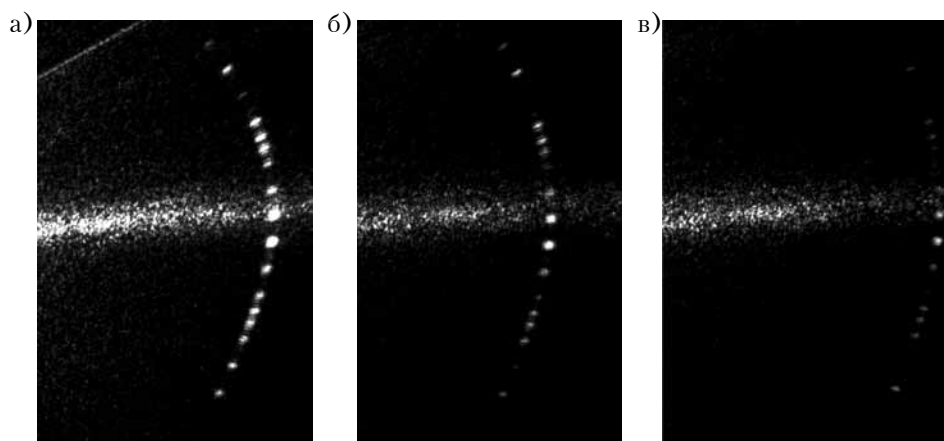


Рис. 2. Картина дифракции светового пучка на объемной акустической волне, возбужденной ВШП (находился слева), соответствующая конфигурации рис. 1, б, на частотах 900 (а), 950 (б) и 1000 МГц (в)

лении. Этот случай соответствует практической схеме использования акустооптического взаимодействия. Во втором случае световой поток падает на грань XOZ , перпендикулярную электродам ВШП (рис. 1, б), и если $\theta_B \rightarrow 0^\circ$, то оптический пучок распространяется параллельно им.

Для визуализации объемной акустической волны, возбужденной ВШП, была выбрана конфигурация акустооптического взаимодействия, представленная на рис. 1, б. Для конфигурации, изображенной на рис. 1, а, визуализировался только пучок шириной (высотой), которая соответствовала длине h перекрытия электродов ВШП.

На рис. 2 и 3 представлены картины дифракции лазерного пучка диаметром 2 мм для этих двух случаев, полученные при следующих параметрах ВШП: $N=50$, $h=0,2$ мм, $d=0,75$ мкм. При визуализации акустического пучка видеокамерой фиксировался центральный дифракционный порядок, изображенный на рис. 2.

Как видно из рис. 2, картина дифракции, соответствующей конфигурации рис. 1, б, в значительной степени зависит от рабочей частоты и от угла падения оптического луча.



Рис. 3. Картина дифракции светового пучка на объемной акустической волне, возбужденной ВШП, соответствующая конфигурации рис. 1, а (в центре — световой пучок нулевого порядка, справа — дифракционный луч)

Следует заметить, что картины дифракции в этих двух случаях взаимодействия световой и акустической волн подобны картине дифракции света на плоской дифракционной решетке, когда свет падает перпендикулярно к штрихам решетки, или скользит вдоль штрихов.

На рис. 4 представлены картины визуализации акустических волн, возбужденных ВШП с $h=0,2$ мм, $N=50$.

Из рис. 4, а видно, что акустическая волна, излучаемая ВШП с $d=120$ мкм на частоте $f=674$ МГц, состоит из отдельных пучков, т. е. она распространяется в зоне Френеля.

В случае, представленном на рис. 4, б, акустическая волна, возбужденная ВШП с $d=75$ мкм на частоте $f=850$ МГц, выглядит более однород-

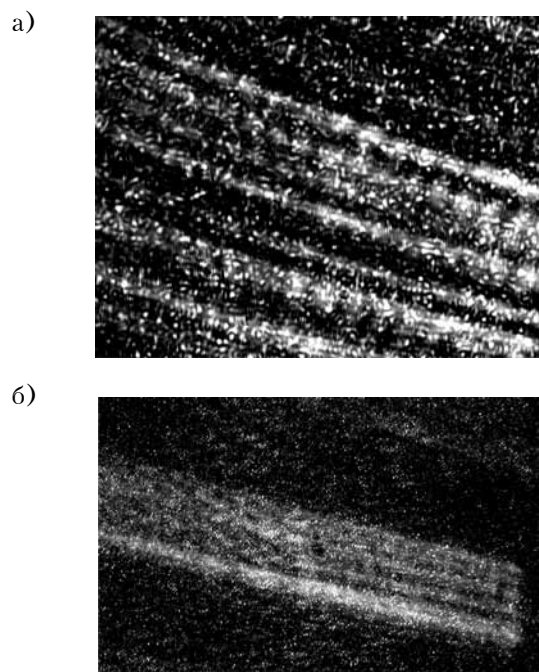


Рис. 4. Теневая картина акустической волны, возбужденной ВШП с периодом $d=120$ мкм на частоте $f=674$ МГц (а) и с периодом $d=75$ мкм на частоте $f=850$ МГц (б) (ВШП располагался вертикально справа)

ной, однако и в этом случае она распространяется в зоне Френеля. Таким образом, экспериментальные результаты подтверждают приведенные ранее оценки для ВШП с периодом $d=120$ мкм и $d=75$ мкм.

Очевидно, что возбуждаемые ВШП с периодом $d \geq 75$ мкм на частотах $f_0 \geq 650$ МГц объемные акустические волны распространяются в реальных акустооптических устройствах в области Френеля в виде отдельных пучков элементарных излучателей, поэтому никакой подстройки под угол Брэгга в таких устройствах не существует. Следовательно, следует признать ошибочными рассуждения, приведенные в [14, 15], где рассмотрены многоэлементные преобразователи с периодом $d \geq 80$ мкм и $d \geq 98$ мкм на частотах $f \geq 1,5$ ГГц. Так, при исследовании многоэлементного преобразователя с периодом $d=80$ мкм, который возбуждает волны в частотном диапазоне $\Delta f=1,6-2,6$ ГГц, проведенном в [14], было использовано представление об антенной звуковой решетке, а в [15] для многоэлементного преобразователя с $d \geq 98$ мкм, работающего в диапазоне частот $1-2,5$ ГГц, были использованы формулы для расчета количества электродов, которые следуют из теории антенной звуковой решетки.

На рис. 5 представлена теневая картина акустического поля ВШП с $d=40$ мкм. Здесь видны две области распространения акустической волны: L_1 — от ВШП до конца зоны Френеля, L_2 — область распространения в зоне Фраунгофера соседних акустических пучков.

Если предположить, что дифракция Фраунгофера наблюдается на расстояниях $z \geq 8d^2/\lambda$, то, поскольку источниками акустической волны являются отдельные излучатели, могут реализовываться случаи интерференции двух волн соседних излучателей, при которых [5, 12]

$$2d \sin \theta = \lambda. \quad (2)$$

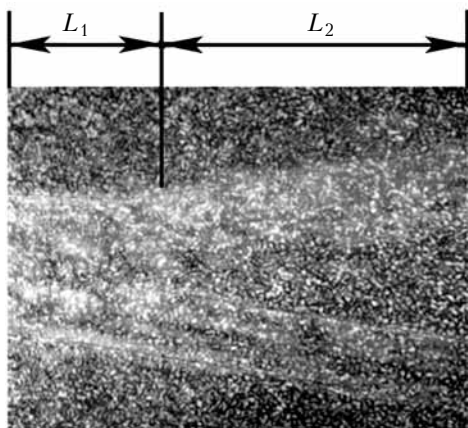


Рис. 5. Теневая картина акустической волны, возбужденной ВШП с периодом $d=40$ мкм на частоте $f=900$ МГц (ВШП располагался вертикально слева, колебания акустической волны распространялись слева направо)

Отсюда следует, что угол распространения перекрывающихся акустических лучей θ зависит от частоты, а следовательно, в этом случае можно осуществлять подстройку под угол Брэгга.

На теневой картине в области Фраунгофера наблюдается два акустических пучка, распространяющихся под углами, симметричными относительно нормали к плоскости, в которой находится многоэлементный преобразователь, что соответствует данным [3, 9, 12]. Результат, приведенный в [11], где количество углов излучения принималось равным трем, следует считать ошибочным.

Выводы

Приведенные в работе результаты показывают, что описание акустического поля в виде произведения диаграмм направленности в дальней зоне не имеет никакого смысла для акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона, в которых акустические волны возбуждаются многоэлементным преобразователем. Условие подстройки под угол Брэгга для расчета периода многоэлементных преобразователей при возбуждении объемных акустических волн в акустооптических дефлекторах СВЧ-диапазона следует дополнить учетом параметра Френеля. Определение области дальней зоны для перекрывающихся соседних акустических пучков, излучаемых элементарными излучателями, после расчета периода многоэлементного преобразователя позволит избежать ошибок при проектировании акустооптических дефлекторов СВЧ-диапазона.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. — Москва: Радио и связь, 1985.
2. Магдич Л. Н., Молчанов В. Я. Акустооптические устройства и их применение. — Москва: Сов. радио, 1978.
3. Goutzolis A. P., Pape D. R. Design and fabrication of acousto-optic devices. — New York: Dekker, 1994.
4. Milsom R. F., Reilly N. H. C., Redwood M. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers // IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics. — 1977. — Vol. 24, N 3. — P. 147–164. — <http://dx.doi.org/10.1109/T-SU.1977.30925>
5. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. — Москва: Радио и связь, 1990.
6. Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера. — Москва: Мир, 1981.
7. Волик Д. П., Роздобудько В. В. Анализ амплитудно-частотной характеристики акустооптического дефлектора с поверхностным аподизированным пьезопреобразователем // ЖТФ. — 2009. — Т. 70, № 6. — С. 124–128.
8. Honkanen K., Koskela J., Plessky V. P., Salomaa M. M. Parasitic BAW excitation in LSAW transducers // IEEE Ultrasonics Symposium. — 1998. — Vol. 1. — P. 949–952. — <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762299>.

9. Shcherbakov A. S., Hanessian de la Graza A. V., Chavushyan V., Nemov S. A. A multi-phonon light scattering and resolution of acousto-optic devices // Proc. SPIE 8240. — 2012. — <http://dx.doi.org/10.1117/12.910057>

10. Deng M. Simulation of generation of bulk acoustic waves by interdigital transducers // IEEE Ultrasonics Symposium. — 2001. — Vol. 1. — P. 855–858. — <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2001.991854>

11. Namdeo A. K., Nemade H. B., Ramakrishnan N. FEM simulation of generation of bulk acoustic waves and their effects in SAW devices // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, 2010, India.

12. Винник Д. М., Решотка А. Г., Сугак Д. Ю., Вакив Н.М. Возбуждение объемных акустических волн встречно-штыревым преобразователем в кристаллах // Вестник НУ «Львовская политехника». Электроника. — 2013. — № 764. — С. 23–29.

13. Винник Д. М., Вороняк Т. И. Распространение СВЧ ультразвуковых объемных волн в устройствах на кристаллах ниобата лития // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 2. — С. 17–20.

14. Белый В. Н., Войтенко И. Г., Горельский Н. Н., Кулак Г.В., Широкополосный акустооптический дефлектор на объемных акустических волнах // ЖТФ. — 1989. — Т. 59, № 5. — С. 82–85.

15. Григорьев М. А., Толстиков А. В., Навроцкая Ю. Н. Взаимодействие света с акустическими волнами, возбуждаемыми синфазным многоэлементным преобразователем в диапазоне 1,0–2,5 GHz // ЖТФ. — 2006. — Т. 76, № 5. — С. 88–93.

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.08 2015 г.

О. Г. РЕШОТКА¹, В. Г. ГАЙДУЧОК², М. М. ВАКИВ²

Україна, м. Львів, ¹Національний університет «Львівська політехніка»,

²Науково-виробниче підприємство «Карат»

E-mail: amadey101@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄМНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ НВЧ-ДІАПАЗОНУ, ЗБУДЖЕНИХ ЗУСТРІЧНО-ШТИРЬОВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

Досліджено структуру і напрямки розповсюдження об'ємних акустичних хвиль, збуджених зустрічно-штыревим перетворювачем (ЗШП) в кристалі ніобата літію, за допомогою їх візуалізації. Показано, що для розрахунку періоду ЗШП при конструюванні акустооптичних дефлекторів НВЧ-діапазону недостатньо використовувати лише підстройку під кут Бреґґа. Для визначення області розповсюдження таких акустичних хвиль потрібно також враховувати параметр Френеля.

Ключові слова: акустооптичні пристрої, об'ємні акустичні хвилі, зустрічно-штыревий перетворювач, п'єзoeлектричний перетворювач, дифракція світлової хвилі.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.22
UDC 535.42

О. Г. RESHOTKA¹, V. G. HAYDUCHOK², N. M. VAKIV²

Ukraine, Lviv, ¹National University «Lviv Polytechnic»,

²Scientific Research Company «Carat»

E-mail: amadey101@gmail.com

INVESTIGATION OF BULK ACOUSTIC MICROWAVES EXCITED BY AN INTERDIGITAL TRANSDUCER

Excitation of bulk and surface acoustic waves with the interdigital transducer (IDT), which is deposited on the surface of piezoelectric crystal, is widely used in the development of devices in acoustoelectronics and in the design of the microwave acousto-optic deflectors. Excitation of bulk acoustic waves by IDT in the devices on surface acoustic waves leads to the appearance of spurious signals. At the same time excitation of bulk acoustic waves with IDT from the surface of lithium niobate crystals allows creating high frequency acousto-optic deflectors, which makes possible to significantly simplify the technology of their production. Therefore, significant attention is paid to the task of excitation and distribution of bulk acoustic waves with IDT including recent times by the method of simulation of their excitation and distribution. The obtained theoretical results require experimental verification. This paper documents the visualization of acoustic beams excited with IDT from the XY-surface of lithium niobate crystals. The Bragg cells with LiNbO₃ crystals coated with IDT with a different period of electrodes were manufactured for the experimental research of excitation and distribution of bulk acoustic waves. Visualization results have shown that the acoustic waves excited with IDT distribute in both the Fresnel zone and the Fraunhofer zone. The length of these zones is caused by individual elementary emitters of which consists the IDT (by their size). At the same time the far

zone for IDT is located at distances much greater than the actual size of the LiNbO_3 crystals. This peculiarity is not always taken into account when calculating diffraction. The achieved results can be used to design high-frequency acousto-optic devices, as well as in the development of devices based on surface acoustic waves.

Keywords: acousto-optic devices, bulk acoustic wave, transducer array, piezoelectric transducer, diffraction of light waves.

REFERENCES

1. Balakshii V. I., Parygin V. N., Chirkov L. E. *Fizicheskie osnovy akustooptiki* [Physical principles of acousto-optics]. Moscow, Radio i svyaz', 1985, 278 p.
2. Magdich L.N., Molchanov V.Ya. *Akustoopticheskie ustroystva i ikh primeneniye* [Acoustooptic devices and their applications]. Moscow, Sov. radio, 1978, 112 p.
3. Goutzolis A.P., Pape D.R. *Design and Fabrication of Acousto-optic Devices*. New York, Dekker, 1994, 318 p.
4. Robert F. Milsom, N. H. C. Reilly, Martin Redwood. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1977, vol. 24, no 3, pp. 147-164. <http://dx.doi.org/10.1109/T-SU.1977.30925>
5. Morgan D. *Ustroystva obrabotki signalov na poverkhnostnykh akusticheskikh volnakh* [The devices of the signal processing on surface acoustic waves]. Moscow, Radio i svyaz', 1990, 416 p.
6. *Poverkhnostnye akusticheskie volny* [Surface acoustic wave]. Ed. By A. Oliner, Moscow, Mir, 1981, 390 p.
7. Volik D.P., Rozdobud'ko V.V. [Analysis of amplitude-frequency characteristics of acousto-optic deflector with the surface apodized transducer]. *Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 70, no 6, pp. 124-128.
8. Honkanen K., Koskela J., Plessky V. P., Salomaa M. M. Parasitic BAW excitation in LSAW transducers. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 1998, vol. 1, pp. 949-952. <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.1998.762299>.
9. Alexandre S. Shcherbakov, Ana V. Hanessian de la Graza, Vahram Chavushyan, Sergey A. Nemov. A multi-phonon light scattering and resolution of acousto-optic devices. *Proc. SPIE 8240*, 2012. <http://dx.doi.org/10.1117/12.910057>
10. Mingxi Deng. Simulation of generation of bulk acoustic waves by interdigital transducers. *IEEE Ultrasonics Symposium*, 2001, vol. 1, pp. 855-858. <http://dx.doi.org/10.1109/ULTSYM.2001.991854>
11. Ashish Kumar Namdeo, Harshal B. Nemade and Ramakrishnan N. FEM Simulation of Generation of Bulk Acoustic Waves and Their Effects in SAW Devices. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference*, 2010, India.
12. Vynnyk D.M., Reshotka A.G., Sugak D.Yu., Vakyy M.M. [The excitation of the bulk acoustic wave by interdigital transducer in crystals]. *Proceedings of the National University "Lviv Polytechnic". Electronics*, 2013, no. 764, pp. 23-29.
13. Vynnyk D.M., Voronjak T.I. [Propagation of the microwave ultrasonic bulk waves in the devices on lithium niobate crystals]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2007, no 2, pp. 17-20.
14. Belyiy V.N., Voytenko I.G., Gorelyiy N.N., Kulak G.V., [Wideband acoustooptic deflector on the bulk acoustic waves]. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 59, no. 5, pp. 82-85.
15. Grigorev M.A., Tolstikov A.V., Navrotskaya Yu.N. [The interaction of light with acoustic waves excited by the multi-element in-phase transducer in the range of 1.0-2.5 GHz]. *Journal of Applied Physics*, 2006, vol. 76, no. 5, pp. 88-93.

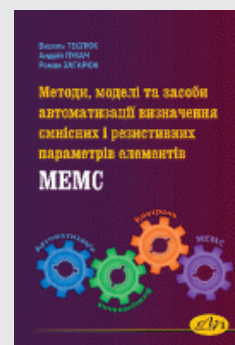
НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

В. М. Теслюк, А. І. Пукач, Р. В. Загарю Методи, моделі та засоби автоматизації визначення ємнісних і резистивних параметрів елементів МЕМС.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Проаналізовано методи, моделі та засоби визначення електричного опору резистивних параметрів електричних кіл, а також розглянуто резистивні та ємнісні параметри МЕМС та особливості автоматизації визначення їх значення. Наведено розроблені методи для автоматичного визначення електричного опору та ємності резистивних та ємнісних параметрів МЕМС, що враховують особливості та специфіку МЕМС-технологій. Здійснено моделювання роботи розроблених методів та аналіз отриманих результатів.

Для радіоінженерів, науковців і студентів, які спеціалізуються у сфері автоматизації вимірювання та контролю ємнісних і резистивних параметрів мікроелектронних пристроїв та систем.



К. ф.-м. н. А. Б. ГНИЛЕНКО², к. т. н. Ю. Н. ЛАВРИЧ¹, д. ф.-м. н. С. В. ПЛАКСИН¹

Украина, г. Днепропетровск, ¹Институт транспортных систем и технологий НАН Украины,

²Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

E-mail: svp@westa-inter.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТАНДЕМНОГО МОНОЛИТНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА Si/Ge С БУФЕРНЫМ СЛОЕМ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Проведено компьютерное моделирование тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, получены вольт-амперные характеристики, рассчитаны фотовольтаические параметры и найдено распределение основных физических величин. Показано, что добавление второго германиевого каскада позволяет существенно повысить коэффициент полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, тандемный солнечный элемент, буферный слой, Silvaco TCAD, диффузионно-дрейфовая модель, вольт-амперная характеристика, КПД.

Уже несколько десятилетий кремний является полупроводниковым материалом, наиболее широко используемым в солнечной энергетике. Однако, имея ширину запрещенной зоны приблизительно 1,1 эВ, кремний плохо поглощает фотоны, приходящиеся на «красную» и «инфракрасную» области солнечного спектра. Для эффективного использования длинноволновой части спектра желательно было бы дополнить кремний еще одним полупроводниковым материалом с меньшей шириной запрещенной зоны, применяя принцип разделения спектра, характерный для многопереходных солнечных элементов [1]. Очевидно, что наилучшим выбором здесь является германий. Обладая шириной запрещенной зоны примерно 0,66 эВ, германий способен эффективно поглощать низкоэнергетические фотоны. Коэффициент поглощения Ge больше, чем у Si, причем не только в длинноволновой части спектра. Германий, к тому же, известен как превосходный материал для подложки, на котором успешно выращиваются соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{BV}$ по хорошо отработанным технологиям.

Проблема соединения Si и Ge в одной тандемной структуре связана, прежде всего, со значительным отличием постоянных решетки этих полупроводниковых материалов — приблизительно 4,2%. При такой разнице процесс выращивания высококачественного слоя Si на подложке из Ge или наоборот является трудновыполнимым, поскольку при выращивании, например, слоя Si в него неизбежно будут внедряться дислокации, порождаемые несогласованностью кристаллических решеток материалов. Концентрация таких проникающих дислокаций может быть настолько высокой, что фотовольтаические свойства материала будут в значительной степени ухудшены. Например, сни-

зится подвижность носителей заряда, в особенности неосновных, и тем самым будет уменьшена эффективность фотоэлектрического преобразования [2].

Наиболее распространенным способом уменьшения концентрации проникающих дислокаций является выращивание промежуточных буферных слоев с постепенно изменяющейся постоянной решетки. Такие слои снимают напряжение решетки, препятствуя распространению дислокаций. Для тандемного солнечного элемента Si/Ge естественным материалом для буферного слоя является соединение $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющейся концентрацией компонентов. Технология выращивания, характеристики и особенности использования $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ буферных слоев достаточно хорошо изучены благодаря многочисленным попыткам создания каскадных солнечных элементов путем выращивания слоев $\text{A}^{\text{III}}\text{BV}$ на кремниевой подложке [2–4]. Еще одним подходом является использование сверхрешеток из тонких чередующихся слоев Si и Ge [5, 6]. В [5] исследована $n^+ - p - p^+$ -структура из кремния толщиной 1 мкм, в которую для использования «красной» и ближней «инфракрасной» части солнечного спектра встроена сверхрешетка из чередующихся наноразмерных слоев Si и Ge с собственной концентрацией носителей. Такой солнечный элемент показал при моделировании эффективность на уровне 10,16%. Тандемный солнечный элемент Si/Ge с расположенным между каскадами коммутирующим туннельным диодом, образующим гетеропереход Si—Ge, рассмотрен в [7]. При этом предполагалось, что дислокации, вызванные несогласованностью постоянных кристаллических решеток Si и Ge, локализованы только на гетеропереходе между слоями Si и Ge туннельного дио-

да и не проникают в толщу фотоактивных слоев, что, однако, не отражает реальных физических процессов в подобном устройстве.

В настоящей статье представлены результаты компьютерного исследования характеристик тандемного солнечного элемента Si/Ge, в конструкции которого используется буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, расположенный между кремниевым каскадом и германиевым туннельным диодом.

Метод моделирования

В настоящее время для математического моделирования в микроэлектронике используют программные системы приборно-технологического проектирования TCAD, при помощи которых можно проводить сквозное моделирование полупроводниковых устройств от процесса формирования устройства и до расчета полного набора его характеристик [8]. В данной работе была использована одна из таких систем — программный пакет Silvaco TCAD [9], ориентированный на решение всего комплекса конструкторско-технологических задач, связанных как с моделированием технологического маршрута формирования полупроводникового устройства, так и с анализом электрических характеристик уже готового устройства. Структура программного пакета Silvaco TCAD представлена на **рис. 1**.

Основой Silvaco TCAD являются два взаимно интегрированных программных компонента: программа для моделирования технологических процессов изготовления полупроводниковых устройств Athena и программа для расчета электрических характеристик Atlas. Совместное использование компонентов Athena и Atlas в едином процессе сквозного моделирования позволяет исследовать влияние параметров и условий технологических процессов формирования полупроводниковых устройств на их выходные электрические характеристики [10]. Поскольку объектами настоящего исследования являлись гото-

вые полупроводниковые устройства, при моделировании использовался только компонент Atlas.

Из возможных моделей переноса выбрана диффузионно-дрейфовая, адекватно описывающая физические процессы, проходящие в полупроводниковых устройствах, и успешно применявшаяся ранее в [11, 12]. Эта модель применима практически ко всем полупроводниковым устройствам, кроме, разве что, структур сверхмалого размера. Диффузионно-дрейфовая математическая модель представляет собой систему фундаментальных уравнений, связывающих электростатический потенциал и концентрацию носителей заряда внутри рассматриваемой области. К этим уравнениям относятся уравнение Пуассона, уравнения непрерывности и транспортные уравнения. Процессы рекомбинации описываются в рамках рекомбинационной модели Шокли — Рида — Холла, учитывающей уровни легирования. Также принимаются во внимание Оже-рекомбинация и уменьшение ширины запрещенной зоны. Модель подвижности носителей заряда, зависящей от концентрации примеси, основана на собственных эмпирических данных системы Atlas. Для монокристаллических многослойных структур с коммутирующими каскадами туннельными диодами учитываются физические процессы туннелирования на специально подобранных координатных сетках.

Уравнение Пуассона связывает электростатический потенциал Ψ с объемной плотностью заряда ρ :

$$\text{div}(\epsilon \nabla \Psi) = -\rho,$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость.

Электрическое поле определяется как градиент потенциала:

$$\vec{E} = -\nabla \Psi.$$

Уравнения непрерывности для электронов и дырок задаются выражениями

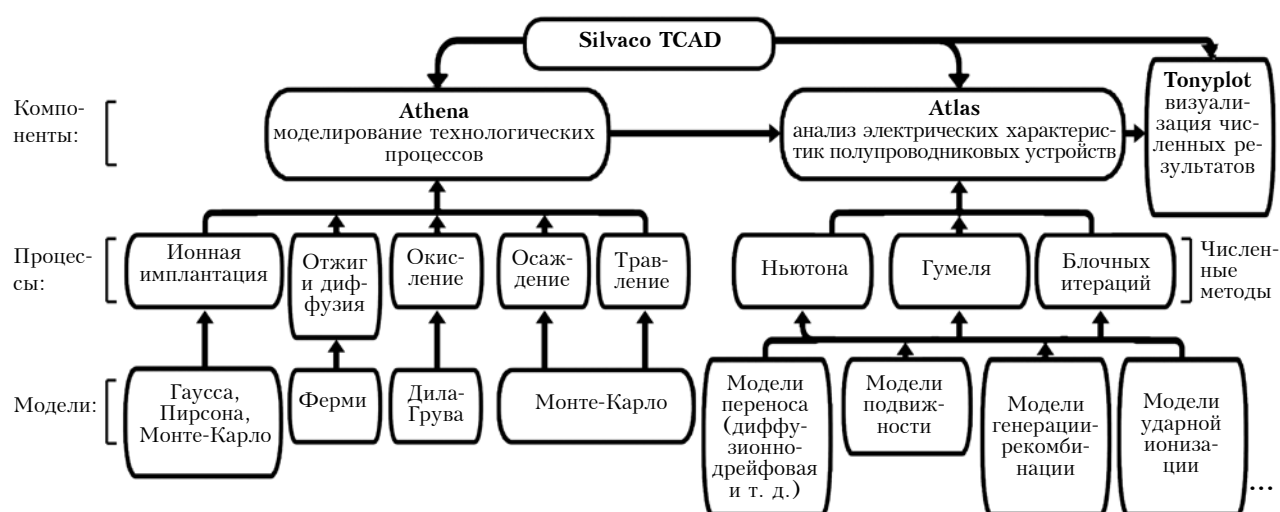


Рис. 1. Взаимосвязь компонентов интегрированной системы моделирования Silvaco TCAD

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + G_n - R_n;$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p + G_p - R_p,$$

где n, p — значения концентрации электронов и дырок, а также индексы в обозначении соответствующих им величин;

$\vec{J}_{n,p}$ — плотность тока;

$G_{n,p}$ — коэффициенты генерации;

$R_{n,p}$ — коэффициенты рекомбинации;

q — заряд электрона.

Вид транспортных уравнений, определяющих значения плотности электронного и дырочного токов, зависит от модели переноса. Преимуществом выбранной диффузионно-дрейфовой модели является то, что кроме Ψ , n и p в ней не используются никакие другие независимые величины. В рамках этой модели транспортные уравнения обычно формулируются в виде уже готовых решений для токов:

$$\vec{J}_n = qn \mu_n \vec{E}_n + qD_n \nabla n;$$

$$\vec{J}_p = qp \mu_p \vec{E}_p - qD_p \nabla p,$$

где $\mu_{n,p}$ — значения подвижности носителей заряда, определяемые в Atlas по эмпирическим данным;

$\vec{E}_{n,p}$ — эффективное электрическое поле;

$D_{n,p}$ — коэффициенты диффузии.

Значения $\vec{E}_{n,p}$ вычисляются по формулам

$$\vec{E}_n = -\nabla \left(\Psi + \frac{kT_L}{q} \ln n_{ie} \right);$$

$$\vec{E}_p = -\nabla \left(\Psi - \frac{kT_L}{q} \ln n_{ie} \right),$$

где T_L — абсолютная температура решетки;

n_{ie} — эффективная собственная концентрация носителей заряда (определяется из эмпирических формул).

Коэффициенты диффузии определяются из соотношений Эйнштейна в рамках статистики Больцмана в виде

$$D_n = \frac{kT_L}{q} \mu_n; \quad D_p = \frac{kT_L}{q} \mu_p.$$

Процессы рекомбинации описываются согласно рекомбинационной модели Шокли — Рида — Холла, учитывающей уровни легирования, как

$$R(p, n) = \frac{(pn - n_{ie}^2)(1 + N_\Sigma / N_0)}{\tau_p(p + n_{ie}) + \tau_n(n + n_{ie})},$$

где $\tau_{n,p}$ — время жизни носителей заряда;

N_Σ — суммарная концентрация доноров и акцепторов [13].

Результаты моделирования

В качестве объекта моделирования был выбран изображенный на **рис. 2** тандемный монолитный солнечный элемент Si/Ge, между каскадами которого расположен буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющимся соотношением компонентов. Солнечный элемент состоит из двух каскадов. Верхний каскад образован тонким слоем кремния с гомогенным p — n -переходом, толщина эмиттера и базы, соответственно, 1 и 6 мкм. Нижний каскад образован гомогенным p — n -переходом в слое германия, толщина эмиттера и базы, соответственно, 1 и 90 мкм. Каскады коммутируются туннельным диодом, образованным гомогенным p — n -переходом в высоколегированном слое германия толщиной 0,1 мкм. Между германиевым туннельным диодом и кремниевым верхним каскадом размещен буферный слой $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, предназначенный для уменьшения рассогласования значений постоянных решетки Si и Ge. Буферный слой состоит из десяти слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющимся от чистого кремния до чистого германия соотношением компонентов. При моделировании электроды считались бесконечно тонкими, фактор затенения контактной сеткой не учитывался.

Для моделирования данного солнечного элемента был составлен командный файл, задающий на языке операторов системы Atlas нерегулярную сетку метода конечных разностей, геометрические параметры областей, заполненных однородным материалом, уровни легирования полупроводников, свойства всех используемых материалов, включая их оптические данные, математические модели, выбранные для численного анализа, свойства источника излучения и т. д. Моделирование было выполнено для нормально

Эмиттер, p -типа Si, 1 мкм
База, n -типа Si, 6 мкм
10 буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ со ступенчато изменяющимся соотношением компонентов от $x=0$ до $x=1$, толщина каждого слоя 1 мкм
Туннельный диод n^+ -типа Ge, 0,05 мкм
Туннельный диод p^+ -типа Ge, 0,05 мкм
Эмиттер, p -типа Ge, 1 мкм
База, n -типа Ge, 90 мкм

Рис. 2. Схема поперечного сечения тандемного монолитного солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

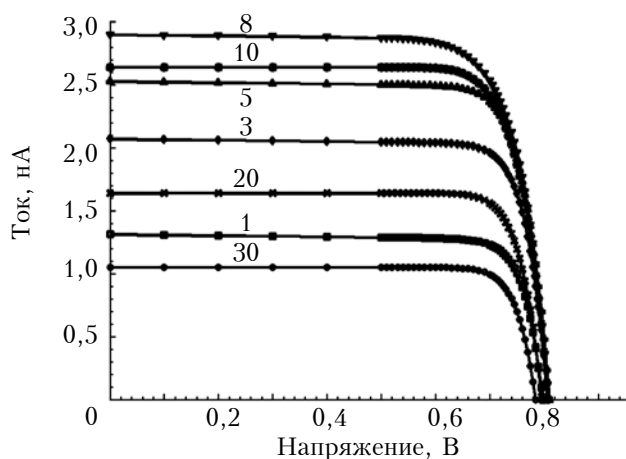


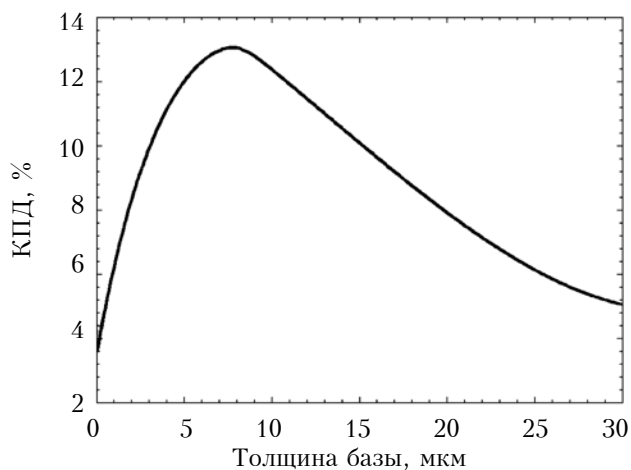
Рис. 3. ВАХ тандемного монокристаллического элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при различной толщине базового слоя верхнего Si каскада (указана в мкм возле кривых)

ориентированного солнечного освещения с интенсивностью 1 солнце при условиях освещенности AM0.

В данном исследовании проводился анализ поведения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и основных фотовольтаических параметров в зависимости от толщины верхнего кремниевого каскада и буферных слоев рассматриваемого солнечного элемента. Из приведенных на рис. 3 ВАХ видно, что изменение толщины этого слоя значительно влияет на ток короткого замыкания и несущественно сказывается на напряжении холостого хода. Ток короткого замыкания достигает наибольшего значения при толщине базового слоя верхнего каскада 8 мкм. Влияние толщины базового слоя верхнего каскада на значение коэффициента полезного действия солнечного элемента показано на рис. 4, а.

При исследовании влияния толщины буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на основные фотовольтаические

а)



б)

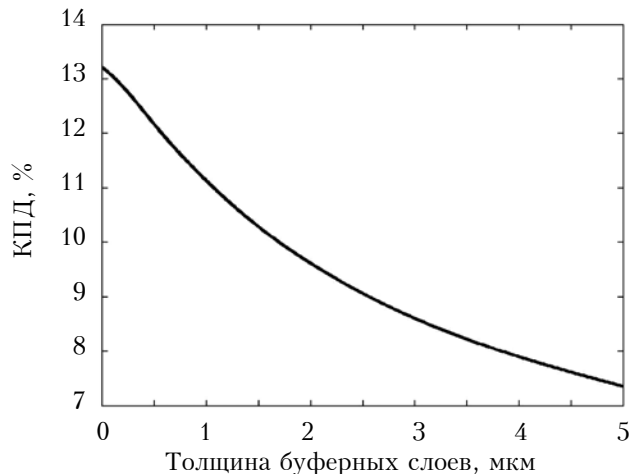
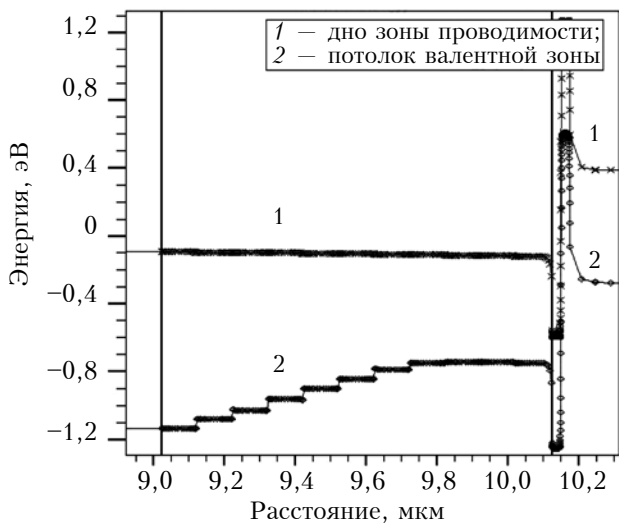


Рис. 4. Зависимость КПД элемента от толщины базового слоя верхнего Si каскада (а) и от толщины буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (б)

а)



б)

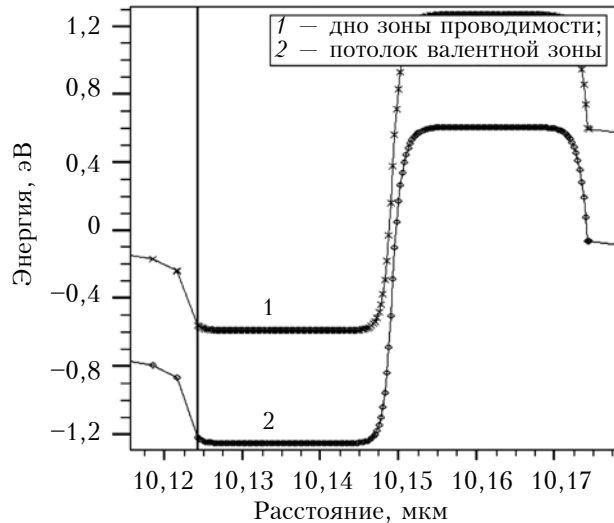


Рис. 5. Энергетическая зонная структура в области буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (а) и в области германиевого туннельного диода (б)

ские параметры солнечного элемента толщина одного слоя варьировалась в пределах от 0,01 до 5,0 мкм. Расчеты проводились для 10 слоев одинаковой толщины, но с разным соотношением входящих в соединение компонентов.

На основании приведенного на рис. 4, б графика можно сделать вывод о том, что уменьшение толщины буферных слоев приводит к увеличению эффективности солнечного элемента. Однако при этом следует заметить, что чем больше толщина буферных слоев, тем лучше снимается напряжение решетки и, соответственно, в большей степени уменьшается плотность дислокаций, отрицательно сказывающихся на фотовольтаических характеристиках. Поскольку плотность дислокаций в используемой модели не учитывается, изменение этого параметра не отражается на поведении фотовольтаических характеристик.

На рис. 5 показана энергетическая структура солнечного элемента, отображающая положение дна зоны проводимости и потолка валентной зоны в области размещения буферного слоя и туннельного диода. Вертикальные линии отмечают границы раздела между различными полупроводниковыми материалами. На рис. 5, а показан ступенчатый характер изменения ширины запрещенной зоны буферного слоя $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ при изменении долевого состава компонентов от чистого Si к чистому Ge. На рис. 5, б более детально показана энергетическая структура германиевого туннельного диода.

Результаты моделирования распределения скорости фотогенерации в тандемном солнечном элементе с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ приведены на рис. 6. Здесь видно, что скорость фотогенерации и в кремнии, и германии экспонен-

циально уменьшается по мере прохождения излучения вглубь материала. Легко заметить, что уменьшение скорости фотогенерации намного больше при прохождении излучения через нижний, германиевый каскад, чем через верхний, кремниевый (это объясняется различием значений коэффициентов поглощения). В буферном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ скорость фотогенерации оказывается меньшей, чем в каскадах тандемного солнечного элемента. По этой причине при увеличении толщины буферного слоя эффективность солнечного элемента снижается.

Выводы

На основании проведенного при помощи компьютерного пакета Silvaco TCAD моделирования тандемного монокристаллического солнечного элемента Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ было установлено, что его эффективность достигает 13%. Аналогичное моделирование «стандартного» однопереходного кремниевого солнечного элемента тех же размеров и структуры показало, что его эффективность не превышает 10–11%. Таким образом, переход к тандемному солнечному элементу Si/Ge позволяет повысить коэффициент полезного действия кремниевых фотоэлектрических преобразователей как минимум на четверть. При этом немаловажным является и то, что использование буферного слоя между каскадами позволяет снизить напряжение решетки при переходе от Ge к Si и тем самым уменьшить плотность дислокаций до приемлемого уровня, а следовательно, и их влияние на характеристики солнечного элемента.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Luque A., Hegedus S. Handbook of photovoltaic science and engineering. — John Wiley & Sons Ltd, 2003.
2. Ringel S.A., Carlin J.A., Andre C.L. et al. Single-junction InGaP/GaAs solar cells grown on Si substrates with SiGe buffer layers // Progress in photovoltaics: Research and applications. — 2002. — Vol. 10, iss. 6. — P. 417–426. — <http://dx.doi.org/10.1002/pip.448>
3. Пулято М.А., Семягин Б.Р., Емельянов Е.А. и др. Молекулярно-лучевая эпитаксия структур GaAs/Si(001) для высокоэффективных тандемных $\text{A}^{\text{III}}\text{BV}$ /Si-преобразователей солнечной энергии на активной кремниевой подложке // Изв. Вузов. Физика. — 2010. — № 9. — С. 26–33.
4. Fitzgerald E.A., Currie M.T., Samavedam S.B. et al. Dislocations in relaxed SiGe/Si heterostructures // Phys. Status Solidi (a). — 1999. — No. 171. — P. 227–238. — [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-396X\(199901\)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1521-396X(199901)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y)
5. Zulkefle A.A., Zainon M., Zakaria Z. et al. Numerical modeling of silicon/germanium (Si/Ge) superlattice solar cells // Proc. of the 7-th WSEAS Int. conf. on Renewable energy sources. — Kuala Lumpur, Malaysia. — 2013. — P. 233–237.
6. Varonides A.C. High efficiency solar cells via tuned superlattice structures: Beyond 42,2% // In book: Solar cells — new aspects and solutions / Ed. by L. Kosyachenko. — InTech, 2011. — Chapter 15. — <http://dx.doi.org/10.5772/23510>

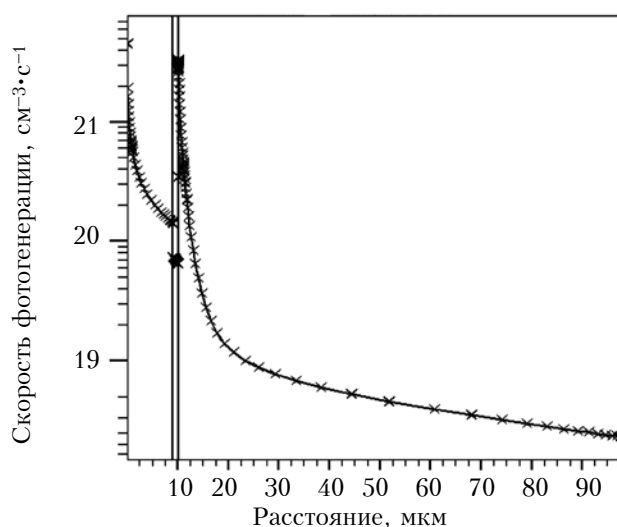


Рис. 6. Распределение скорости фотогенерации в тандемном монокристаллическом солнечном элементе Si/Ge с буферным слоем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

7. Sun G., Chang F., Soref R.A. High efficiency thin-film crystalline Si/Ge tandem solar cell // Optics express. — 2010. — Vol. 18, iss. 4. — P. 3746–3753. — <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.003746>

8. Глушко А.А., Родионов И. А., Макачук В. В. Моделирование технологии изготовления субмикронных КМОП СВИС с помощью систем TCAD // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2007. — № 4. — С. 32–34.

9. Simulation standard: Simulating solar cell devices using Silvaco TCAD. — 2008. — Vol. 18. — N 2.

10. ATLAS User's Manual. — Santa Clara, CA: Silvaco, 2004.

11. Гниленко А.Б., Дзензерский В.А., Плаксин С.В. и др. Влияние толщины кремниевых пластин на характери-

стики многослойных солнечных элементов с вертикальными р–п-переходами // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2012. — № 1. — С. 27–29.

12. Гниленко А.Б., Плаксин С.В., Погорелая Л.М., Дзензерский В.А. Моделирование кремниевого солнечного элемента с вертикальным р–п переходом // Відновлювана енергетика. — 2013. — № 2. — С. 37–44.

13. Польский Б.С. Численное моделирование полупроводниковых приборов. — Рига: Зинатне, 1986.

Дата поступления рукописи
в редакцию 07.07 2015 г.

О. Б. ГНИЛЕНКО, Ю. М. ЛАВРИЧ, С. В. ПЛАКСИН

Україна, м. Дніпропетровськ, Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: svp@westa-inter.com

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТАНДЕМНОГО МОНОЛІТНОГО СОНЯЧНОГО ЕЛЕМЕНТА Si/Ge З БУФЕРНИМ ШАРОМ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Проведено комп'ютерне моделювання тандемного монолітного сонячного елемента Si/Ge з буферним шаром $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, одержано вольт-амперні характеристики, розраховано фотовольтаїчні параметри і знайдено розподіл основних фізичних величин. Показано, що додатковий германієвий каскад дозволяє суттєво підвищити коефіцієнт корисної дії кремнієвих фотоелектричних перетворювачів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, тандемний сонячний елемент, буферний шар, Silvaco TCAD, дифузійно-дрейфова модель, вольт-амперна характеристика, ККД.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.28

UDC 621.383.51

A. B. GNILENKO², Ju. N. LAVRICH¹, S. V. PLAKSIN¹

Ukraine, Dnipropetrovsk, ¹Institute of Transport Systems
and Technologies of NAS of Ukraine,

²Oles Honchar Dnipropetrovsk National University

E-mail: svp@westa-inter.com

SIMULATING CHARACTERISTICS OF Si/Ge TANDEM MONOLITHIC SOLAR CELL WITH $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ BUFFER LAYER

In spite of many efforts to propose new semiconductor materials and sophisticated constructions of solar cells, crystalline silicon remains the main photovoltaic material widely used up to now. There are various methods to enhance the efficiency of silicon solar cells. One of them is to combine silicon with an additional semiconductor material with the different bandgap to form a tandem construction. For example, the germanium sub-cell used as the bottom cascade for the silicon sub-cell in the tandem monolithic solar cell makes it possible to utilize the “red” sub-band of solar spectra increasing overall solar cell efficiency. The problem of the 4.2% mismatch in lattice constant between Si and Ge can be resolved in such a case by the use of SiGe buffer layer. In the paper the results of the computer simulation for Si/Ge tandem monolithic solar cell with $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ buffer layer are presented. In the solar cell under consideration, the step graded $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ buffer layer is located between the top silicon and the bottom germanium cascades to reduce the threading dislocation density in mismatched materials. The cascades are commutated by the use of the germanium tunnel diode between the bottom sub-cell and the buffer layer. For the solar cell modeling, the physically-based device simulator ATLAS of Silvaco TCAD software is employed to predict the electrical behavior of the semiconductor structure and to provide a deep insight into the internal physical processes. The voltage-current characteristic, photovoltaic parameters and the distribution of basic physical values are obtained for the investigated tandem solar cell. The influence of layer thicknesses on the photovoltaic parameters is studied. The calculated efficiency of the tandem solar cell reaches 13% which is a quarter more than the efficiency of a simple silicon solar cell with the same constructive parameters and under the same illumination conditions.

Keywords: photovoltaic cell, tandem solar cell, buffer layer, Silvaco TCAD, drift-diffusion model, voltage-current characteristics, efficiency.

REFERENCES

1. Luque A., Hegedus S. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 1138 p.
2. Ringel S.A., Carlin J.A., Andre C.L., Hudait M.K., Gonzalez M., Wilt D.M., Clark E.B., Jenkins P., Scheiman D., Allerman A., Fitzgerald E.A., Leitz C.W. Single-junction InGaP/GaAs solar cells grown on Si substrates with SiGe buffer layers. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002, vol. 10, iss. 6, pp. 417-426. <http://dx.doi.org/10.1002/pip.448>
3. Putyato M.A., Semyagin B.R., Emel'yanov E.A., Pakhanov N.A., Preobrazhenskii V.V. [GaAs/Si(001) molecular beam epitaxy for high-performance tandem A^{III}BV/Si sun energy converters on active Si substrate]. *Izvestiya vuzov: Fizika*, 2010, no. 9, pp. 26-33. (Rus)
4. Fitzgerald E.A., Currie M.T., Samavedam S.B., Langdo T.A., Taraschi G., Yang V., Leitz C.W., Bulsara M.T. Dislocations in relaxed SiGe/Si heterostructures. *Phys. Status Solidi (a)*, 1999, no. 171, pp. 227-238. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-396X\(199901\)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1521-396X(199901)171:1<227::AID-PSSA227>3.0.CO;2-Y)
5. Zulkefle A.A., Zainon M., Zakaria Z., Sopian K., Amin N. Numerical modeling of silicon/germanium (Si/Ge) superlattice solar cells. *Proc. of the 7-th WSEAS Int. Conf. on Renewable energy sources*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013, pp. 233-237.
6. Varonides A.C. High Efficiency Solar Cells via Tuned Superlattice Structures: Beyond 42,2%. In book: *Solar cells – new aspects and solutions*, chapter 15, ed. by L. Kosyachenko, InTech, 2011. <http://dx.doi.org/10.5772/23510>
7. Sun G., Chang F., Soref R.A. High efficiency thin-film crystalline Si/Ge tandem solar cell. *Optics express*, 2010, vol. 18, iss. 4, pp. 3746-3753. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.003746>
8. Glushko A.A., Rodionov I.A., Makarchuk V.V. [Simulating submicron KMOP SBIS technology using TCAD]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2007, no. 4, pp. 32-34. (Rus)
9. *Simulation Standard: Simulating Solar Cell Devices Using Silvaco TCAD*. 2008, vol. 18, no.2, pp. 1-3.
10. *ATLAS User's Manual*. Santa Clara, CA, Silvaco, 2004.
11. Gnilenko A.B., Dzenzersky V.A., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M. [The investigation of silicon wafer thickness influence on characteristics of multijunction solar cells with vertical p–n junctions]. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2012, no. 1. pp. 27-29.
12. Gnilenko A.B., Dzenzersky V.A., Plaksin S.V., Pogorelaya L.M. [Simulating Si Solar Cell with vertical p–n junction]. *Vidnovlyuvana energetyka*, 2013, no. 2, pp. 37-44. (Rus)
13. Pol'skii B.C. *Chislennoe modelirovaniye poluprovodnikovyykh priborov* [Numerical simulating semiconductor devices]. Riga, Zinatne, 1986, 168 p. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ



Матвійків М. Д., Вус Б. С., Матвійків О. М. Елементи та компоненти електронних пристроїв.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Викладено основні відомості про сучасні та перспективні елементи і компоненти електронних пристроїв, зокрема наведено визначення різних видів елементів та компонентів, розглянуто їх призначення, класифікацію, умовні зображення і позначення, будову, роботу, властивості, застосування.

Для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом “Радіoeлектронні апарати”, та фахівців, які проектують, виготовляють або обслуговують різноманітні електронні апарати, зокрема аудіо- та відеотехніку, електронні обчислювальні машини, мікропроцесори та персональні комп’ютери, медичні апарати, засоби зв’язку, контрольно-вимірювальні прилади, робототехніку, автоматизовані системи проектування та управління тощо.

НОВЫЕ КНИГИ



Барішніков Г. В., Волинюк Д. Ю., Гельжинський І. І., Готра З. Ю., Мінаєв Б. П., Стахіра П. Й., Черпак В. В. Органічна електроніка.— Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015.

Наведено основні постулати квантової механіки для органічної електроніки. Описано базові структури та особливості функціонування нанорозмірних елементів, пристроїв електронної техніки: сонячних фотоелементів, світловопроміньовальних структур, транзисторних структур, сенсорів тощо. Розглянуто фізико-хімічні основи технології створення електронних структур органічної електроніки.

Для студентів та аспірантів, які навчаються за напрямом електроніки.

А. Н. НАУМОВА¹, д. т. н. Ю. Е. НИКОЛАЕНКО¹, к. т. н. В. Ю. КРАВЕЦ¹,
чл.-корр. НАНУ, д. т. н. В. М. СОРОКИН², А. С. ОЛЕЙНИК²

Украина, г. Киев. ¹НТУУ «Киевский политехнический институт»,

²Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарева НАНУ

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

ОХЛАЖДЕНИЕ СВЕТОДИОДНОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛООТВОДОВ

Приведены результаты экспериментального сравнения тепловых характеристик трех теплоотводов: штампованного из алюминиевого листа (базовый вариант), на основе медно-водяной пульсационной тепловой трубы и на основе медного проволочного радиатора, с помощью которых охлаждался светодиодный модуль мощностью 10,55 Вт. Установлено, что все исследованные теплоотводы обеспечивают температуру не выше 64°C в местах установки светодиодов в условиях естественной конвекции, при этом использование медного проволочного радиатора позволяет снизить температуру в центре печатной платы модуля на 3,9°C по сравнению с базовым вариантом, а использование теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы — на 7,1°C.

Ключевые слова: светодиодный модуль, теплоотвод, радиатор, пульсационная тепловая труба, температура.

Стремительное развитие технологий в области светодиодных источников света привело к значительному расширению сферы применения светодиодов: от простых световых индикаторов до светодиодных ламп прямой замены и мощных осветительных приборов самого различного назначения. Светодиодные источники света отличаются высокой световой отдачей (120–150 Лм/Вт против 10–15 Лм/Вт у ламп накаливания), низким потреблением электроэнергии, малой чувствительностью к низкой температуре и агрессивной окружающей среде, экологичностью, высокой степенью управляемости параметрами освещения. Все это делает их привлекательными для решения одной из важнейших проблем современной светотехники — проблемы энергосбережения [1, 2]. К достоинствам светодиодов стоит отнести также высокую механическую прочность, длительный срок службы, не зависящий от количества циклов включения и выключения (свыше 30 тыс. ч против 1 тыс. ч для ламп накаливания), безопасность использования и малую инерционность (мгновенное включение по сравнению с люминесцентной лампой, время включения которой составляет от 1 с до 1 мин плюс несколько минут на стабилизацию яркости). В то же время, светодиоды не лишены и недостатков, основным из которых является их высокая стоимость. Помимо этого, светодиоды очень чувствительны к воздействию высокой температуры: длительное функционирование при высокой температуре и/или недостаточно эффективный отвод выделяемой теплоты приводят к деградации полупроводникового кристалла светодиода, что негативно сказыва-

ется на сроке службы, световых характеристиках и цветовых параметрах устройства [3–5].

Во время работы светодиода около 75% потребляемой электроэнергии выделяется в виде теплоты, что приводит к его нагреву. В связи с этим обеспечение заданного теплового режима является одной из основных проблем при разработке светодиодных осветительных приборов, а качество теплоотвода является ключевым фактором, определяющим основные характеристики светодиодов и осветительного прибора в целом.

Как правило, в осветительных приборах светодиоды используются в составе светодиодных модулей (СДМ). Известны различные способы отвода теплоты от СДМ: от традиционного использования кондуктивных теплоотводов и оребрения элементов корпуса прибора с отводом теплоты естественной или вынужденной конвекцией воздуха [6–9] до использования термоэлектрических охладителей [10], жидкостного охлаждения [11–13], тепловых труб [14–16]. При этом в каждом конкретном случае важно подобрать такую конструкцию теплоотвода, которая бы максимально эффективно справлялась с задачей охлаждения СДМ и не снижала ценовую конкурентоспособность осветительного прибора. Из указанных систем теплоотвода самыми дешевыми являются оребренные поверхности (ребристые и проволочные радиаторы). Вместе с тем, они и менее эффективны, чем, например, жидкостное охлаждение. Привлекательным выглядит использование пульсационных тепловых труб (ПТТ), отличающихся достаточно высокими теплопередающими характеристиками при простоте кон-

струкции (не содержат капиллярно-пористой структуры) [17, 18].

В данном исследовании было проведено экспериментальное сравнение эффективности охлаждения светодиодного модуля с помощью трех наиболее дешевых теплоотводов: штампованного алюминиевого радиатора, теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы и теплоотвода на основе медного проволочного радиатора.

Конструкция теплоотводов, экспериментальная установка и методика исследований

В качестве объекта охлаждения, использованного во всех экспериментах, был выбран светодиодный модуль, представляющий собой теплопроводное основание в виде плоской алюминиевой печатной платы диаметром 52 мм с распаянными на ней 30 светодиодами в корпусах 2835 (рис. 1). Светодиоды электрически соединены

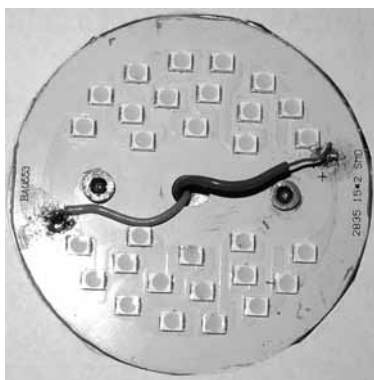


Рис. 1. Внешний вид светодиодного модуля

в две параллельные цепочки по 15 включенных последовательно светодиодов в каждой и подключены к общему драйверу питания. При этом, потребляемая всеми светодиодами мощность составила 10,55 Вт (измеренные значения тока и напряжения на входе СДМ составили 120 мА и 87,9 В соответственно).

Для охлаждения СДМ использовалось три конструктивных варианта теплоотводов (рис. 2):

1) Радиатор сложной формы (см. рис. 2, а), изготовленный штамповкой из алюминиевого листа толщиной 0,5 мм, диаметром 150 мм, с радиально-гофрированными ребрами с общей площадью теплоотдающей поверхности $306 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, изготовленный в НПП «Газотрон-лайт» (базовый вариант);

2) Пульсационная тепловая труба (ПТТ) [19] с 24 петлями высотой 40 мм, изготовленная из медной трубки с наружным и внутренним диаметрами 2 и 1 мм соответственно. Участки зоны нагрева (ЗН) запаяны в медное основание размером $50 \cdot 50 \cdot 3 \text{ мм}$. Высота участков зоны конденсации — 39 мм, общая площадь теплоотдающей поверхности — $143 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. В качестве теплоносителя используется вода (см. рис. 2, б);

3) Проволочный радиатор (см. рис. 2, в), выполненный из медной проволоки диаметром 2 мм. Его геометрия совпадает с геометрией ПТТ, поэтому площадь теплоотдающей поверхности такая же ($143 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$).

Для исследования тепловых характеристик теплоотводов была собрана экспериментальная установка, структурная схема которой приведена на рис. 3. Основным рабочим участком установки являлся светодиодный модуль 1, на котором

поочередно с помощью двух винтов М3 закреплялись исследуемые теплоотводящие конструкции 2. С целью минимизации термического сопротивления между СДМ и теплоотводом на контактирующие поверхности был нанесен слой теплопроводной пасты КПТ-8. Температурное поле теплоотводов и СДМ измерялось с помощью компьютеризированной измерительной системы на основе аналого-цифрового преобразователя 3 и соответствующего программного продукта, которые позволяют преобразовывать аналоговые значения сигналов термопар в цифровые значения температуры и отображать их на экране монитора персонального компьютера 4 в виде графиков зависимости температуры от времени и в виде таблицы в формате Excel.

Для измерений использовались тарированные медь-константановые термопары с диаметром электродов 0,2 и 0,16 мм соответственно. Крепление термопар к твердым поверхностям производилось с помощью клейкой алюминиевой фольги и пайки. Их спаи размещались в пяти

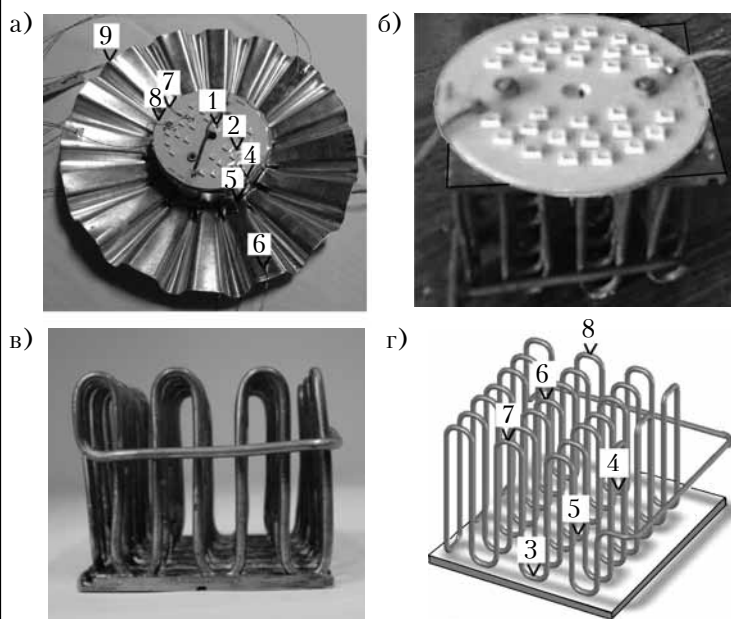


Рис. 2. Внешний вид теплоотводов:

а — штампованный алюминиевый радиатор (показаны места установки термопар); б — теплоотвод на основе медно-водяной ПТТ; в — радиатор из медной проволоки; г — схема размещения термопар на ПТТ и проволочном радиаторе

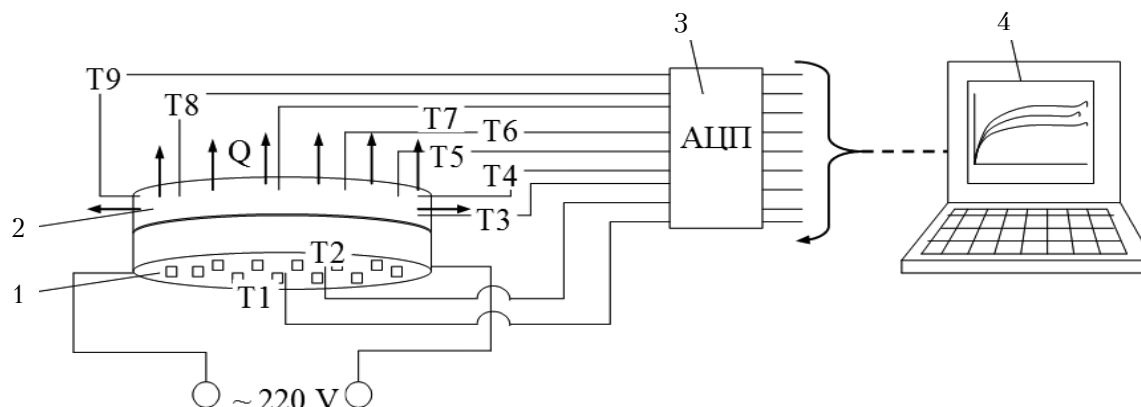


Рис. 3. Схема экспериментальной установки:
1 — СДМ; 2 — теплоотвод; 3 — АЦП; 4 — персональный компьютер; T1...T9 — термопары

характерных тепловых зонах, а именно: I — в центре печатной платы СДМ; II — между светодиодами на поверхности печатной платы СДМ; III — у основания ребер штампованного радиатора или у основания петель ПТТ и проволочного радиатора; IV — на крайней части ребер или петель теплоотводов; V — в окружающем воздухе. Номера термопар, установленных в этих зонах, приведены в таблице.

Как видно из **таблицы**, термопары с одним и тем же номером размещались при исследовании разных теплоотводов в разных тепловых зонах. Так, термопара T9 при исследовании алюминиевого штампованного радиатора размещалась не в окружающем воздухе (тепловая зона V), а на периферийной части радиатора (зона IV), как и термопара T6, что хорошо видно на рис. 2, а. Температура воздуха в этом случае измерялась не термопарой, а ртутным термометром и на экран монитора ее значения не выводились. В двух других случаях спай термопары T9 был размещен в окружающем воздухе (зона V), и ее показания через АЦП выводились на ПК и отображались на экране монитора.

Для имитации реальных условий эксплуатации осветительного прибора СДМ с прикрепленным теплоотводом располагался в пространстве так, чтобы своей светоизлучающей поверхностью светодиоды были направлены вниз, а теплоотвод находился сверху СДМ. При таком расположении зона нагрева ПТТ находилась ниже зоны конденсации.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем. После сборки СДМ с соответствующим теплоотводом и установки термопар эта конструкция крепилась на штативе. Затем СДМ через источник питания (драйвер) подключалась к электрической сети 220 В. Охлаждение СДМ с теплоотводом осуществлялось с помощью естественной конвекции окружающего воздуха. О температурном поле всей системы охлаждения судили по показаниям термопар T1...T9, которые в реальном времени выводились через АЦП на монитор ПК. По показаниям термопар следили за выходом системы охлаждения в стационарный тепловой режим, после чего снимали показания термопар. Файл с полученными результатами записывался в память ПК. Затем СДМ отключался от сети питания, и аналогичные эксперименты повторялись с другим теплоотводом.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В результате проведения экспериментов были получены зависимости температуры в контрольных точках рабочего участка — как СДМ, так и теплоотвода — от времени при выходе системы в стационарный тепловой режим (**рис. 4**).

Как следует из рис. 4, дольше всего на стационарный тепловой режим выходит СДМ с алюминиевым штампованным радиатором — примерно 13 мин, тогда как с теплоотводом на основе ПТТ и медным проволочным радиатором время выхода на стационарный режим составило 10 мин.

Размещение термопар в характерных тепловых зонах при использовании различных вариантов теплоотвода

Вариант теплоотвода	Номера термопар, установленных в характерной тепловой зоне				
	I	II	III	IV	V
Алюминиевый штампованный радиатор (рис. 2, а)	T1	T2	T4, T5, T7, T8	T6, T9	—
Пульсационная тепловая труба (рис. 2, б)	T1	T2	T3, T4, T5	T6, T7, T8	T9
Проволочный радиатор (рис. 2, в)	T1	T2	T3, T4, T5	T6, T7, T8	T9

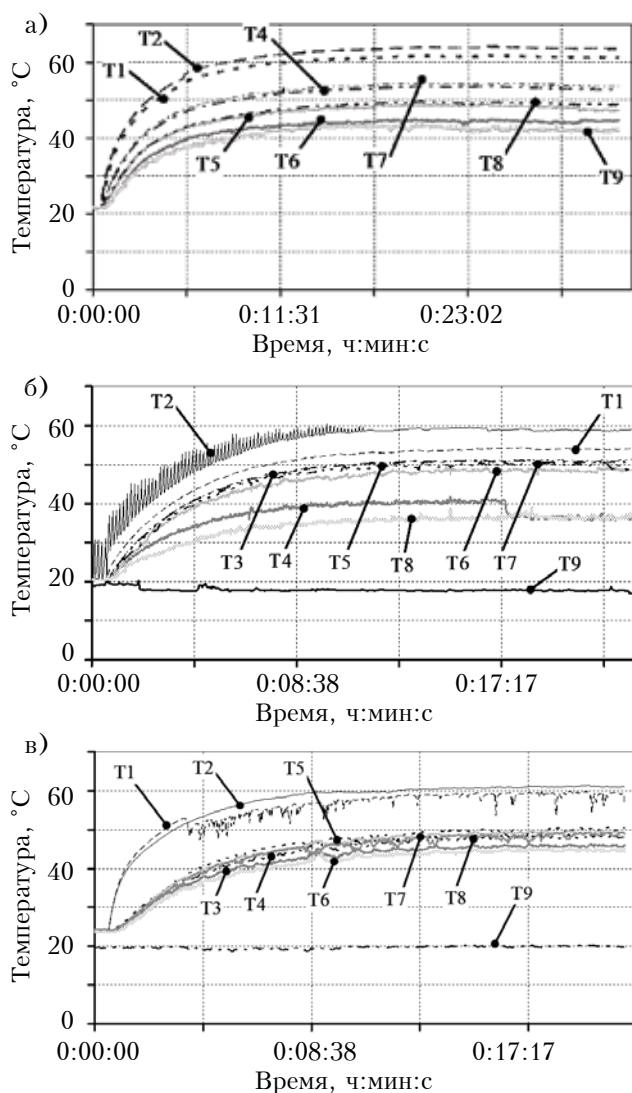


Рис. 4. Изменение во времени температуры в контрольных точках СДМ с различными теплоотводами: а — со штампованным алюминиевым радиатором; б — с теплоотводом на основе медно-водяной ПТТ; в — с радиатором из медной проволоки

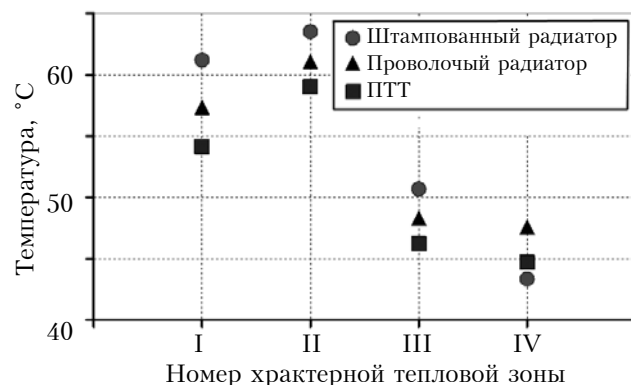


Рис. 5. Температура в характерных тепловых зонах рабочего участка: I — в центре платы СДМ; II — на СДМ между светодиодами; III — у основания радиатора или петель (для ПТТ и проволочного радиатора); IV — на краю радиатора или петель (для ПТТ и проволочного радиатора)

Во время проведения всех экспериментов температура окружающего воздуха составляла $19,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

На рис. 5 приведены средние значения температуры, определенные в установившемся тепловом режиме в характерных тепловых зонах I — IV рабочего участка по показаниям соответствующих термопар (их номера указаны в таблице для каждой зоны и для каждого типа теплоотвода).

Как видно из рис. 5, наименьшую температуру СДМ в местах установки светодиодов обеспечивает теплоотвод в виде пульсационной тепловой трубы. Так, по сравнению со штампованным алюминиевым радиатором (базовый вариант) ПТТ позволяет снизить температуру на $7,1^\circ\text{C}$ в центре печатной платы СДМ (зона I) и на $4,5^\circ\text{C}$ на поверхности между светодиодами (зона II), а медный проволочный радиатор — соответственно, на $3,9$ и $2,5^\circ\text{C}$.

В целом, можно констатировать, что каждый из теплоотводов справляется с поставленной задачей охлаждения и обеспечивает светодиодам необходимый уровень температуры, не превышающий 64°C в исследованных характерных тепловых зонах СДМ.

Следует также отметить, что мощности $10,55$ Вт данной конструкции СДМ недостаточно для того, чтобы вызвать процесс активного кипения и пульсаций теплоносителя в ПТТ, т. е. такой режим, в котором теплопередача будет максимальной [19, 20]. Поэтому с увеличением мощности СДМ до 30 – 40 Вт и выше будет расти и эффективность теплоотводов на основе ПТТ, в то время как штампованного алюминиевого радиатора — уменьшаться в связи с необходимостью увеличения диаметра радиатора и снижения при этом эффективности его ребер. При высоких мощностях светодиодных модулей можно рекомендовать использование комбинированного теплоотвода [21], в котором пульсационная тепловая труба объединена с плоским штампованным радиатором, что позволяет обеспечить высокую эффективность его ребер, снизить его термическое сопротивление, а следовательно, и температуру светодиодов.

Выводы

В результате проведенных сравнительных экспериментов установлено, что все исследованные теплоотводы позволяют обеспечить уровень температуры светодиодного модуля в пределах заданного рабочего диапазона (не выше 64°C). При этом, наиболее эффективное охлаждение светодиодного модуля обеспечивается при использовании теплоотвода на основе пульсационной тепловой трубы, а наименее эффективное — при его охлаждении с помощью алюминиевого штампованного радиатора.

Поскольку теплопередача ПТТ максимально эффективна после начала активного кипения теплоносителя, т. е. при больших тепловых пото-

ках, для охлаждения мощных светодиодных модулей (свыше 30–40 Вт) можно рекомендовать теплоотводы на основе ПТТ. При более низких мощностях использование теплоотвода на основе ПТТ может оказаться экономически менее выгодным по сравнению со штампованным алюминиевым радиатором, стоимость изготовления которого намного ниже, а снижение температуры на 7,1°C не всегда может оказаться определяющим фактором. Разумной альтернативой ПТТ является медный проволочный радиатор, который также обеспечивают меньшую температуру светодиодного модуля по сравнению с алюминиевым штампованным.

Таким образом, при выборе типа теплоотвода и материала для его изготовления в каждом конкретном случае применения следует комплексно рассматривать вопросы стоимости его изготовления, массы, габаритных размеров и ожидаемой эффективности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Айзенберг Ю.Б. Энергосбережение — одна из важнейших проблем современной светотехники // Светотехника. — 2007. — № 6. — С. 6–10.
2. Сорокин В.М. Светодиодное освещение. Проблемы. Решения. Перспективы // Промислова електроенергетика та електротехніка. — 2014. — № 5(89). — С. 28–38.
3. Полищук А., Туркин А. Деградація напівпровідникових світодіодів на основі нітрида галію і його твердих розчинів // Компоненти і технології. — 2008. — № 2. — С. 25–28.
4. Никифоров С. Температура в жизни и работе светодиодов. Часть 2 // Компоненты и технологии. — 2006. — № 1. — С. 42–47.
5. Елисеев Н.П., Решенов С.П. О предельных световых и цветовых характеристиках белых светодиодов // Светотехника. — 2012. — № 4. — С. 12–18.
6. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes // Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM). — 2012. — P. 319–324. — <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188867>
7. Ключник А., Абалов А. Проектирование теплоотвода под заданные условия эксплуатации // CHIP NEWS Украина. — 2015. — № 6(146). — С. 18–21.
8. Лишик С. И., Паутино А. А., Поседейко В. С. и др. Конструктивно-технологические решения светодиодных ламп прямой замены // Светотехника. — 2010. — № 2. — С. 7–12.
9. Ruishan Wang, Junhui Li. A cooling system with a fan for thermal management of high-power LEDs // J. Mod. Phys. — 2010. — V. 1, No 3. — P.196–199. — <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2010.13029>.
10. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs // Microelectronics Reliability. — 2011. — V. 51. — P. 2210–2215. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2011.05.006>.
11. Sorensen H. Water cooling of high power light emitting diode // 13th IEEE Intersociety Conference «Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems» (Itherm). — P. 968–974. — <http://dx.doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231531>.
12. Xin Zhang, Ru-Chun Li, Qi Zheng. Analysis and simulation of high-power LED array with microchannel heat sink // Advances in Manufacturing. — 2013. — Vol. 1(2). — P. 191–195. — <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0027-0>
13. Shou-Shing Hsieh, Yu-Fan Hsu, Meng-Lin Wang. A microspray-based cooling system for high powered LEDs // Energy Conversion and Management. — 2014. — Vol. 78. — P. 338–346. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.066>.
14. Гвоздев С.М., Митрофанов А.В., Сафонов С.А., Холодилов В.И. Об использовании тепловых труб в проектировании мощных светильников со светодиодами // Светотехника. — 2012. — № 2. — С. 19–21.
15. Nikolaenko T. Yu., Nikolaenko Yu. E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with light emitting diodes // Light & Engineering. — 2015. — Vol. 23, N 3. — P. 85–88. ISSN 0236-2945.
16. Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang, Moo Whan Shin. Thermal analysis of LED array system with heat pipe // Thermochimica Acta. — 2007. — V. 455(1). — P. 21–25. — <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.031>.
17. Алексеев Е.С., Кравец В.Ю. Система отвода теплоты от теплонагруженных элементов РЭА на основе пульсационной тепловой трубы // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2013. — № 1. — С. 19–24.
18. Смирнов Г.Ф., Бурдо О.Г. Моделирование процессов в тепловых трубах и термосифонах. — Одесса: Полиграф, 2012.
19. Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2010. — № 1. — С. 39–43.
20. Наумова А.Н., Кравец В.Ю., Николаенко Ю.Е. Физическое представление и расчет начала кипения в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2014. — № 2–3. — С. 42–47. — <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2014.2-3.42>.
21. Пат. 94136 України. Світлодіодна лампа-світильник / А.М. Наумова, Ю.Є. Ніколаєнко, В.Ю. Кравець та ін. — 2014. — Бюл. № 20.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 23.10.2015 г.*

**А. М. НАУМОВА, Ю. Є. НИКОЛАЄНКО,
В. Ю. КРАВЕЦЬ, В. М. СОРОКІН, О. С. ОЛІЙНИК**

Україна, м. Київ, НТУУ «КПІ», ІФН ім. В. Є. Лашкарьова НАНУ
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

ОХОЛОЖДЕНИЯ СВИТЛОДИОДНОГО МОДУЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ РІЗНИХ ТЕПЛОВІДВОДІВ

Наведено результати експериментального порівняння теплових характеристик трьох тепловідводів: штампованого з алюмінієвого листа (базовий варіант), на основі мідно-водяної пульсаційної теплової

труби та на основі мідного дротового радіатора, за допомогою яких відводилося тепло від світлодіодного модуля потужністю 10,55 Вт. Встановлено, що в умовах природної конвекції всі три тепловідводи забезпечують рівень температури світлодіодного модуля в місцях установки світлодіодів, що не перевищує 64°C. Використання мідного дротового радіатора дозволяє в порівнянні з базовим варіантом знизити температуру в центрі друкованої плати модуля на 3,9°C, а використання тепловідводу на основі пульсуючої теплової труби – на 7,1°C.

Ключові слова: світлодіодний модуль, тепловідвід, радіатор, пульсуюча тепла труба, температура.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.35
UDC 536.248.2; 628.941.8

A. M. NAUMOVA, Yu. E. NIKOLAENKO,
V. Yu. KRAVETS, V. M. SOROKIN, O. S. OLIINYK
Ukraine, Kiev, NTUU "KPI", V. Lashkaryov ISP NASU
E-mail: yunikola@ukr.net, nirtef@kpi.ua

COOLING OF LED MODULE BY VARIOUS RADIATORS

Given article presents the results of an experimental comparison of three radiators which are: pressed radiator made of aluminum plate (basic variant), radiator made of copper wire, and copper/water pulsating heat pipe. The radiators are intended to take off heat from the LED module with the power capacity of 10,55 W. It is established that under natural convection all three radiators can keep temperature level of the circuit board module less than 64 °C that lies within the operating range. In comparison with basic variant the use of the copper wire radiator allows lowering of the temperature in the LED module center on 3.9 °C, and the same value for the pulsating heat pipe is 7.1°C.

Keywords: LED module, heat sink, radiator, pulsating heat pipe, temperature

REFERENCES

1. Eisenberg Yu.B. [Energy conservation is one of the most important problems of modern lighting.] *Svetotekhnika*, 2007, no 6, pp. 6-10. (Rus)
2. Sorokin V.M. [Led lighting. Problems. Solutions. Prospects.] *Promyslova elektroenergetika ta elektrotehnika*, 2014, no 5(89), pp. 28-38. (Rus)
3. Polishchuk A., Turkin A. [Degradation of semiconductor light-emitting diodes based on gallium nitride and its solid solutions.] *Komponenty i tehnologii*, 2008, no 2, pp. 25-28. (Rus)
4. Nikiforov C. [The temperature in the life and work of the LEDs. Part 2.] *Komponenty i tehnologii*, 2006, no 1, pp. 42-47. (Rus)
5. Yeliseyev N.P., Reshenov S.P. [About the limit of light and color characteristics of white LEDs.] *Svetotekhnika*, 2012, no 4, pp. 12-18. (Rus)
6. Fan A., Bonner R., Sharratt S., Ju Y. S. An innovative passive cooling method for high performance light-emitting diodes. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, 2012, pp. 319-324. <http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2012.6188867>
7. Kluchnik A., Abalov A. [Designing the heat sink under the specified operating conditions.] *CHIP News Ukraine*, 2015, no 6 (146), pp. 18-21. (Rus)
8. Lishik S.I., Pautino A.A., Posed'ko V.S., Trofimov Yu.V., Tsvirko V.I. [Design and technological solutions for the direct replacement LED lamps.] *Svetotekhnika*, 2010, no 2, pp. 7-12. (Rus)
9. Ruishan Wang, Junhui Li. A Cooling System with a Fan for Thermal Management of High-Power LEDs. *J. Mod. Phys.*, 2010, vol. 1, no 3, pp.196-199. <http://dx.doi.org/10.4236/jmp.2010.13029>
10. Junhui Li, Bangke Ma, Ruishan Wang, Lei Han. Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs. *Microelectronics Reliability*, 2011, vol. 51, pp. 2210-2215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2011.05.006>
11. Sorensen H. Water cooling of high power Light Emitting Diode. *13th IEEE Intersociety Conference "Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems" (Itherm)*, 2012 pp. 968-974. <http://dx.doi.org/10.1109/ITHERM.2012.6231531>
12. Xin Zhang, Ru-Chun Li, Qi Zheng. Analysis and simulation of high-power LED array with microchannel heat sink. *Advances in Manufacturing*, 2013, vol. 1(2), pp. 191-195. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-013-0027-0>
13. Shou-Shing Hsieh, Yu-Fan Hsu, Meng-Lin Wang. A microspray-based cooling system for high powered LEDs. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 78, pp. 338-346. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.066>
14. Gvozdev S.M., Mitrofanov A.V., Safonov S.A., Holodilov V.I. [On the use of heat pipes in the design of high-power lamps with LEDs.] *Svetotekhnika*, 2012, no 2, pp. 19-21. (Rus)
15. Nikolaenko T. Yu., Nikolaenko Yu. E. New circuit solutions for the thermal design of chandeliers with Light Emitting Diodes. *Light & Engineering*, 2015, vol. 23, no 3, pp. 85-88.
16. Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang, Moo Whan Shin. Thermal analysis of LED array system with heat pipe. *Thermochimica Acta*, 2007, vol. 455(1), pp. 21-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.031>
17. Alekseik E.S., Kravets V.Yu. [Oscillating heat pipe cooler for heat-generating elements of electronics.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2013, no 1, pp.19-24. (Rus)
18. Smirnov G.F., Burdo O.G. [Modeling of processes in the heat pipes and thermosyphons.] Odessa: Polygraph, 2012, 294 p.
19. Kravets V.Yu., Naumova A.N., Vovkogon A.N. [Research of heat transfer modes of the pulsating heat pipe.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2010, no 1(85), pp. 39-43. (Rus)
20. Naumova A.N., Kravets V.Yu., Nikolaenko Yu.E. [Physical concept and calculation of boiling point in a pulsating heat pipe.] *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2014, no 2-3, pp.42-47. (Rus)
21. Naumova A.N., Nikolaenko Yu.E., Kravets V.Yu., Sorokin V.M., Kopnin V.P., Seriy A.F. [LED-lamp.] Pat. UA no 94136. (Ukr)

К. ф.-м. н. Е. Л. ЖАВЖАРОВ, д. ф.-м. н. В. М. МАТЮШИН

Украина, Запорожский национальный технический университет

E-mail: jin@zntu.edu.ua

ФОРМИРОВАНИЕ НАНОПЛЕНОК Cu, Ag, Au ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ АТОМОВ ВОДОРОДА

Приведены результаты экспериментального исследования процесса получения металлических нанопленок Ag, Cu, Au в среде атомарного водорода. Предложено два метода, позволяющих контролируемо получать пленки металлов толщиной 1–20 нм при вакууме в камере порядка 20 Па. В основе этих методов лежит процесс распыления атомов поверхности твердого тела, возникающий под действием энергии рекомбинации атомарного водорода в молекулярный.

Ключевые слова: нанопленки Ag, Cu, Au, атомарный водород, рекомбинация, распыление.

Электрофизические свойства и широкий спектр эффектов, свойственных только тонким металлическим пленкам, обуславливают их применение во многих устройствах современной микро- и нанoeлектроники, оптоэлектроники, техники СВЧ, а также позволяют получать ценную информацию для решения фундаментальных проблем физики поверхности и твердого тела.

При выборе метода получения тонких пленок обращают особое внимание на такие его характеристики, как воспроизводимость параметров, степень воздействия твердого тела на поверхность подложки, чистоту, стабильность, экономичность.

Большинство современных методов получения нанопленок требуют применения довольно сложного оборудования, что связано с необходимостью получения высокого вакуума или проведением многостадийных процессов [1]. Альтернативой им может служить процесс с участием атомарного водорода. При воздействии атомарного водорода на поверхность твердого тела протекает экзотермическая реакция рекомбинации атомов в молекулы (примерно 4,5 эВ/акт рекомбинации) [2], а высвобождающаяся энергия может не только возбуждать электронную подсистему твердого тела [2], но и стимулировать ряд физических процессов — локальный разогрев, распыление [3], перенос и диффузию поверхностных атомов [4]. Кроме того, атомарный водород является активным восстановителем, что предотвращает образование оксида металла в процессе обработки пленки в реакционной камере, увеличивает чистоту обработки, что способствует воспроизводимости параметров пленок и увеличивает их адгезию.

Целью данной работы было выявить закономерности образования нанопленок металлов Cu, Ag, Au при воздействии атомарного водорода.

Данные металлы относятся к первой группе периодической системы и имеют одинаковый тип кристаллической решетки (ГЦК), они широко применяются в микроэлектронике при создании проводящих слоев современных чипов.

Атомарный водород получали диссоциацией молекулярного водорода в плазме ВЧ-разряда, молекулярный водород — электролизом из 20%-ного раствора КОН в дистиллированной воде. Далее водород пропусклся через форбаллон для улавливания капель КОН, осушительную колонку, заполненную силикагелем, после чего поступал в реакционную камеру. Концентрация водорода в рабочем объеме измерялась колориметрическим методом [2] и достигала примерно $5 \cdot 10^{-14}$ см⁻³ при давлении в рабочей камере 15–25 Па.

Толщина пленок контролировалась на рентгеновском микроанализаторе MAP-2, Оже-спектрометре LAS-2000, спектрофотометре СФ-16, а также путем измерения поверхностного сопротивления образцов (ρ_s).

Образцы закреплялись на держателе, отделенном на 25 см от области разряда, что позволяло исключить попадание на образец радикалов гидроксила и других ионов, образующихся в водородной плазме. Температура образцов измерялась хромель-копелевой термопарой, закрепленной на их поверхности. При обработке в водороде образцы нагревались только за счет энергии, выделяющейся при рекомбинации. В качестве материала подложки использовался монокристаллический германий типа *p*-Ge(111) (0,2 Ом·см) и ситалловые подложки СТ-51.

Был исследован процесс распыления металлических пленок Cu, Ag, Au толщиной 100 нм, полученных термическим испарением в вакууме. При получении всех пленок были выдержаны следующие режимы: температура подложки 50°C, остаточный вакуум

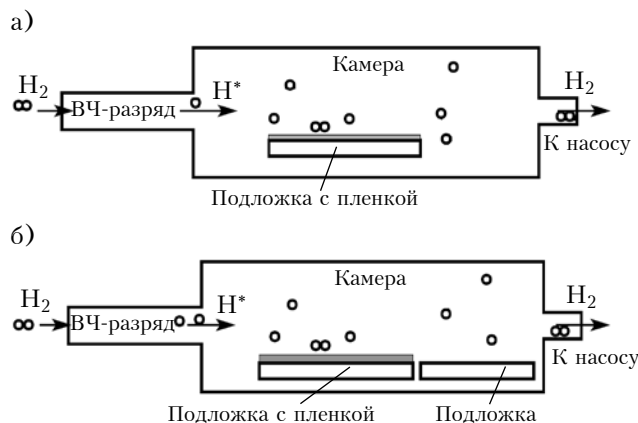


Рис. 1. Схема проведения исследования процессов распыления (а) и переноса (б)

в камере не хуже 10^{-3} Па, скорость осаждения 15–20 нм/мин.

Обработка тонкопленочных образцов проводилась при максимально возможной в условиях эксперимента концентрации H ($C_H \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в течение различного времени (от 1 до 60 мин).

Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.

В процессе обработки атомарным водородом происходит его адсорбция на поверхности и последующая рекомбинация. Под действием энергии рекомбинации происходит поверхностный локальный разогрев и распыление атомов с поверхности образцов, вследствие чего уменьшается толщина пленки.

Экспериментально установлено, что в процессе обработки металлических пленок в атомарном водороде происходит уменьшение их толщины вплоть до полного исчезновения, сопровождающееся увеличением поверхностного сопротивления ρ_s до сопротивления подложки (рис. 2).

Исходя из кинетики изменения поверхностного сопротивления (рис. 2), был выбран начальный этап измерения толщины пленки (когда она еще сплошная) и рассчитана скорость рас-

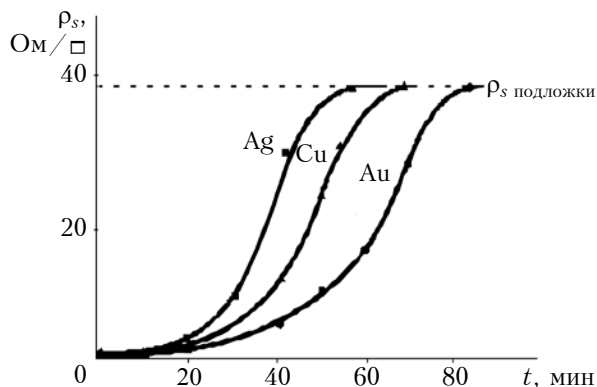


Рис. 2. Зависимости усредненных значений ρ_s пленок от времени их обработки t атомарным водородом ($C_H \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$)

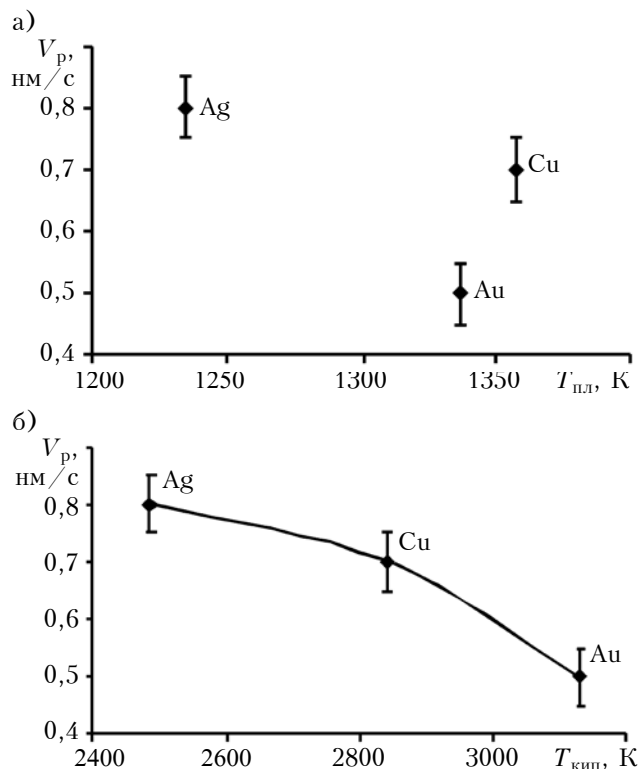


Рис. 3. Взаимосвязь скорости распыления металлических пленок под воздействием атомарного водорода ($C_H \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) с температурой их плавления $T_{пл}$ (а) и температурой кипения $T_{кип}$ (б)

пыления пленок V_p (см. таблицу). В процессе исследований была замечена корреляция между V_p и температурой плавления/кипения распыляемого металла (рис. 3).

Наибольшая скорость распыления пленки наблюдается у серебра, которое имеет более низкую, чем Cu и Au, температуру плавления и, как следствие, меньшую энергию связи атомов в кристаллической решетке. Для золота скорость распыления наименьшая, поскольку его атомная масса наибольшая, а значит, для отрыва атома Au от пленки требуется больший импульс. Таким образом, вероятность распыления поверхностного атома золота под воздействием энергии, выделяемой в результате рекомбинации атомарного водорода, наименьшая.

Поскольку медь, серебро и золото не имеют летучих соединений с водородом, механизм распыления представляется чисто физическим — за

Параметры металлов и скорость их распыления под воздействием H при $C_H \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

Материал пленки	Атомный радиус, нм	Масса атома, а. е.	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	V_p , нм/с
Cu	0,127	63,5	1356,6	2840,2	0,7
Ag	0,144	107,9	1235	2485	0,8
Au	0,144	196,9	1337	3129	0,5

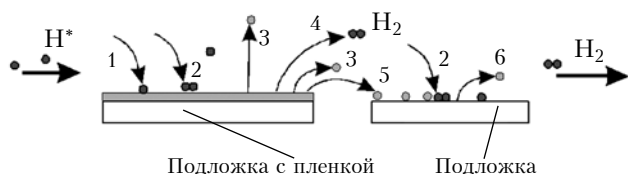


Рис. 4. Процессы, сопровождающие взаимодействие атомарного водорода с поверхностью тонкой пленки: 1 — адсорбция атомарного водорода; 2 — рекомбинация атомарного водорода в молекулярный; 3 — распыление атомов пленки; 4 — десорбция молекулярного водорода; 5 — осаждение атома на чистую подложку; 6 — реиспарение атома металла

счет передачи поверхностному атому энергии, достаточной для его отрыва от пленки, и импульса, направленного от поверхности образца в газовую фазу.

Время выделения энергии химического взаимодействия атомов водорода (время обменного взаимодействия) $\tau \approx 10^{-10}$ с [2], поэтому механизм выделения и диссипации энергии укладывается в представление о Θ -вспышке [5]. Поскольку температура в области Θ -вспышки достаточно велика (порядка температуры плавления материала), механизм распыления атомов можно представить как процесс испускания поверхностного атома при кипении жидкости. Данное представление хорошо подтверждают приведенные на рис. 3, б взаимозависимости скорости распыления металлов и температуры их кипения.

Также был исследован процесс массопереноса через газовую фазу. В этом случае в камере на некотором расстоянии от подложки с пленкой металла располагали чистую ситалловую подложку (см. рис. 1, б). В процессе обработки водородом атомы металла образца с пленкой распылялись, переходили в газовую фазу и мигрировали к чистой подложке (рис. 4). Сталкиваясь с поверхностью твердого тела, атомы металла переходили в локализованное состояние, в результате чего происходила конденсация и рост пленки металла на подложке.

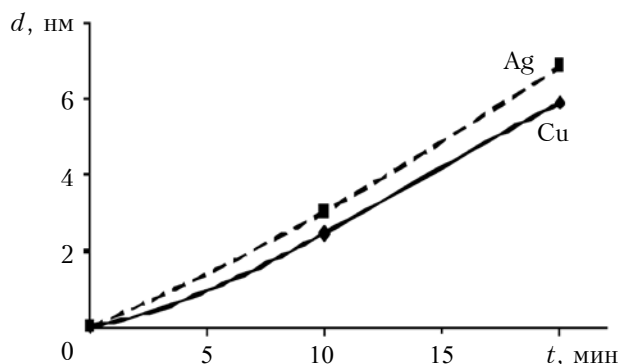


Рис. 5. Зависимости усредненных значений толщины осаждаемых пленок Ag и Cu от времени обработки тонкопленочных структур атомарным водородом

Исследования спектров пропускания ситалловых подложек с осажденными в процессе обработки атомарным водородом пленками позволили получить зависимости толщины d осажденных пленок от времени их обработки t (рис. 5).

Оценка скорости роста пленки показала для пленок Ag $V_p = 0,0058$ нм/с и для пленок Cu $V_p = 0,0049$ нм/с. Следует отметить, что для данного механизма нанесения пленки скорость ее образования значительно меньше скорости распыления вследствие реиспарения атомов с уже осажденной пленки (процесс 6 на рис. 4).

Заключение

Проведенные исследования показали, что при использовании атомарного водорода возможны два метода получения нанопленок: путем распыления и путем газофазного переноса.

В первом случае пленка образуется в результате уменьшения толщины за счет контролируемого распыления более толстой пленки, полученной стандартным способом. При этом скорость распыления зависит от концентрации атомарного водорода в газовой фазе, структуры пленок, давления в рабочей камере и условий теплоотвода от подложки в условиях эксперимента (она составляла 0,5–0,8 нм/с). Данный метод позволяет получать нанопленки толщиной вплоть до монослоя.

Во втором случае пленка образуется в результате осаждения атомов металлов из газовой фазы при распылении источника металла атомарным водородом. При этом можно получать пленки толщиной от монослоя до 10 нм (скорость осаждения порядка 0,005 нм/с).

Таким образом, рассмотренные методы использования обработки структур «металл — полупроводник» или «металл — диэлектрик» атомарным водородом при давлении в рабочей камере порядка 20 Па позволяют создавать контролируемые по параметрам и толщине, технологически чистые, с хорошей адгезией металлические нанопленки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Борисенко В. Е., Воробьева А. И., Уткина Е. А. Нанoeлектроника. — Москва: Бином, 2009.
2. Лавренко В. А. Рекомбинация атомов водорода на поверхности твердых тел. — Киев: Наукова думка, 1973.
3. Жавжаров Є. Л. Модифікація тонких металевих плівок Ag, Cu, Ni під дією атомарного водню // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. — 2010. — Т. 8, № 3. — С. 1001–1014.
4. Матюшин В. М., Жавжаров Є. Л. Радикалорекомбінаційна обробка мікроструктур. — Запоріжжя: ЗНТУ, 2011.
5. Могилевский В. М., Чудновский А. Ф. Теплопроводность полупроводника. — Москва: Наука, 1972.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.07 2015 г.

ФОРМУВАННЯ НАНОПЛІВОК Cu, Ag, Au ПІД ДІЄЮ АТОМІВ ВОДНЮ

Наведено результати експериментального дослідження процесу отримання металевих наноплівки Ag, Cu, Au в середовищі атомарного водню. Запропоновано два методи обробки, що дозволяють контролювати отримувати плівки металів товщиною 1–20 нм при вакуумі в камері близько 20 Па. В основі цих методів лежить процес розпилення атомів поверхні твердого тіла, що виникає під дією енергії рекомбінації атомарного водню в молекулярний.

Ключові слова: наноплівки Ag, Cu, Au, атомарний водень, рекомбінація, розпилення.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.41

UDC 539.23

V. M. MATYUSHIN, E. L. ZHAVZHAROV

Ukraine, Zaporozhye National Technical University

E-mail: jin@zntu.edu.ua

FORMATION OF Cu, Ag AND Au NANOFILMS UNDER THE INFLUENCE OF HYDROGEN ATOMS

Due to their electrical properties, thin metallic films are widely used in modern micro- and nanoelectronics. These properties allow solving fundamental problems of surface and solid state physics. Up-to-date methods of producing thin films involve high vacuum or multi-stage processes, which calls for complicated equipment.

The authors propose an alternative method of producing thin metallic films using atomic hydrogen. Exothermal reaction of atoms recombination in a molecule (about 4.5 eV / recombination act) initiated on the solid surface by atomic hydrogen may stimulate local heating, spraying and surface atoms transfer.

We investigated the process of atomic hydrogen treatment of Cu, Ag and Au metal films, obtained by thermal vacuum evaporation. There are two methods of obtaining nanofilms using atomic hydrogen treatment: sputtering and vapor-phase epitaxy. In the first method, a film is formed by reducing the thickness of the starting film. This method allows obtaining a film as thick as the monolayer. In the second method, a nanofilm is formed by deposition of metal atoms from the vapor phase. This method allows obtaining a film thickness from monolayer to ~10 nm. These methods allow creating nanofilms with controlled parameters and metal thickness. Such films would be technologically pure and have good adhesion.

Keywords: nanofilms, Ag, Cu, Au, atomic hydrogen, recombination, sputtering.

REFERENCES

1. Borisenko V.E., Vorob'eva A.I., Utkina E.A. *Nanoelektronika* [Nanoelectronics]. Moscow, Binom, 2009, 223 p. (Rus)
2. Lavrenko V.A. *Rekombinatsiya atomov vodoroda na poverkhnosti tverdykh tel* [The recombination of hydrogen atoms on the solids surface]. Kiev, Naukova dumka, 1973, 204 p. (Rus)
3. Zhavzharov Ye.L. [Modification of thin metal films Ag, Cu, Ni under atomic hydrogen]. *Nanosistemi, nanomateriali, nanotekhnologiyi*, 2010, vol. 8, no. 3, pp. 1001-1014. (Ukr)
4. Matyushin V.M., Zhavzharov Ye.L. *Radikalo-rekombinatsiina obrobka mikrostruktur* [Radical recombination processing microstructures]. Zaporizhzhya, ZNTU, 2011, 196 p. (Ukr)
5. Mogilevskii V. M., Chudnovskii A.F. *Teploprovodnost' poluprovodnika* [The thermal conductivity of the semiconductor]. Moscow, Nauka, 1972, 536 pp. (Rus).

К. ф.-м. н. Т. Т. КОВАЛЮК, к. т. н. М. Н. СОЛОВАН, к. т. н. А. И. МОСТОВОЙ,
к. ф.-м. н. Э. В. МАЙСТРУК, Г. П. ПАРХОМЕНКО, д. ф.-м. н. П. Д. МАРЬЯНЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

E-mail: tarik-1006@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ И ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Представлены результаты исследований магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Методом магнетронного осаждения тонких пленок TiN , TiO_2 и MoO_x на подложки из кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ изготовлены анизотипные гетеропереходы $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$. Исследованы их электрические свойства и установлены доминирующие механизмы токопереноса при прямом и обратном смещениях.

Ключевые слова: кристалл, магнитная восприимчивость, гетеропереход, тонкая пленка.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в направлении создания полупроводниковых материалов на основе сульфидов Cu, Zn и Sn (CZTS) [1, 2], альтернативным традиционным высокоэффективным соединениям CuInSe_2 (CIS), $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) и CdTe . Это обусловлено такими характеристиками CZTS, как близкая к оптимальной для преобразования солнечной энергии ширина запрещенной зоны ($E_g \approx 1,5$ эВ), высокий коэффициент поглощения света (около 10^5 см^{-1}), большое время жизни носителей заряда, а также достаточно высокая их подвижность. В отличие от других полупроводников, это соединение не содержит редких и экологически опасных материалов, элементы, входящие в его состав, широко распространены в земной коре, а стоимость их добычи невысока. Именно это вызвало интерес к исследованию физических свойств новых соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, поскольку замена серы теллуром позволяет изменить ширину запрещенной зоны, а также снизить температуру плавления при получении объемных кристаллов.

Также неуклонно растет интерес к полупроводниковым гетеропереходам благодаря ряду их преимуществ по сравнению с гомопереходами. Сейчас гетеропереходы активно используются в электронике, лазерах, фотовольтаике [3, 4]. В то же время, существует значительный интерес к созданию гетеропереходов, в которых в качестве окна используются широкозонные проводящие прозрачные оксиды (например, TiO_2) или нитриды (TiN). Это перспективные широкозонные материалы, обладающие удачной совокупностью физико-химических параметров, таких как низкое удельное сопротивление, достаточно высокий коэффициент пропускания в видимой части спектра, высокая твердость, высокая износостойкость, хорошая химическая инертность и

стойкость к коррозии [3]. Диоксид титана широко применяется в солнечных элементах в качестве просветляющего покрытия, фронтального проводящего контакта, диэлектрического слоя, материала для формирования гетеропереходов [4], нитрид титана используется в оптических фильтрах, тонкопленочных резисторах, защитных и декоративных покрытиях.

Целью данной работы является исследование магнитных, кинетических и оптических свойств кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и определение их параметров, а также создание гетеропереходов на их основе.

Методика эксперимента

Кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ были получены нами методом синтеза — путем непосредственного сплавления компонентов. В качестве исходных веществ для синтеза сплавов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ использовали элементарные (ОСЧ) вещества. Температуру синтеза и выращивания кристаллов подбирали экспериментально.

Ампулы изготавливали из толстостенного кварца с вытянутым конусообразным концом. Для того чтобы предотвратить взаимодействие загружаемого материала с кварцем, ампулы графитизировали, после чего они сушились в вакуумном шкафу и находились в вакууме до загрузки в ампулу шихты.

Для изготовления гетероструктур использовали кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ p -типа проводимости. Концентрация носителей заряда при температуре 295 К составляла $p = 2,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Структуры изготавливали нанесением пленок TiN , TiO_2 , MoO_x на предварительно обработанную (шлифовкой, полировкой) поверхность кристаллов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (типоразмером примерно $7 \times 7 \times 1$ мм) в универсальной вакуумной установке Leybold-Heraeus L560 с помощью реактив-

ного магнетронного распыления мишени чистого титана в атмосфере смеси аргона и азота для TiN, аргона и кислорода для TiO₂, а также распыления мишени чистого молибдена в атмосфере смеси аргона и кислорода для MoO_x при постоянном напряжении.

Подложки размещались над магнетроном на вращающемся столике (для обеспечения однородности пленок по толщине). Перед началом процесса напыления вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

В течение процесса напыления газовая смесь формировалась в необходимой пропорции из двух независимых источников. Для удаления неконтролируемого загрязнения поверхности мишени и подложек использовали кратковременное протравливание бомбардирующими ионами аргона.

Технологические параметры процесса напыления, такие как парциальные давления газов P_{Ar} , P_{N_2} , P_{O_2} в вакуумной камере, мощность магнетрона P_m , продолжительность процесса напыления t и температура подложек $T_{п}$, приведены в **таблице**.

Технологические параметры процесса напыления

Пленки	$T_{п}$, К	t , мин	P_m , Вт	P_{Ar} , Па	P_{N_2} , Па	P_{O_2} , Па
TiN	570	15	120	0,35	0,7	—
TiO ₂	570	20	300	0,7	—	0,02
MoO _x	570	10	120	0,24	—	0,034

Исследование магнитных свойств кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ проводилось методом Фарадея в интервале температур $T=290-330$ К и магнитных полей $H=0,25-4$ кЭ. Измерения магнитной восприимчивости χ проводились относительно эталона с известным ее значением, исследуемые образцы (массой около 200 мг) размещались в тех точках магнитного поля, где находился эталонный образец при градуировке установки. Для регистрации взаимодействия исследуемого образца с магнитным полем использовались электронные весы ЭМ-И-ЗМ с чувствительностью 1 мкг.

Регистрация измеряемого сигнала проводилась с помощью универсального цифрового вольтметра Picotest M3500A с погрешностью $\pm(0,004...0,008)\%$ в зависимости от предела измерений, поэтому случайная погрешность была незначительной. Проведенные оценки показывают, что суммарная погрешность при измерении магнитной восприимчивости, состоящая в основном из систематической погрешности, связанной с определением массы образца и эталона, а также с неточностью расположения образца в магнитном поле, и случайной погрешности, обусловленной неточностью измерения величины сигнала, не превысила 1%.

Исследования кинетических коэффициентов проводились на образцах размером $8 \times 2 \times 1,5$ мм

при $T=290-340$ К и $H=0,5-5$ кЭ, суммарная погрешность при определении электропроводности составляла примерно 2%, коэффициента Холла 6%, при измерении коэффициента термо-эдс не превышала 6%.

Измерения коэффициента отражения R выполняли на спектрометре Nicolet 6700 с использованием приставки Pike [5] в интервале длин волн $\lambda=0,9-26,6$ мкм. Угол падения луча в приставке Pike можно изменять от 30 до 80°.

Вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) гетероструктур измеряли по стандартной методике с использованием источника постоянного тока BVP Electronics, в качестве амперметра использовался точный мультиметр Fluke 5545A, а в качестве вольтметра — Picotest M3500A.

Физические свойства кристаллов Cu₂ZnSnTe₄

Из проведенных исследований магнитной восприимчивости установлено, что образцы кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ диамагнитны, т. е. их магнитная восприимчивость почти не зависит от магнитного поля и температуры и равна $\chi_{об}=-0,25 \cdot 10^{-6}$ см³/г.

Как видно из **рис. 1**, полученные температурные зависимости электропроводности для исследованных образцов Cu₂ZnSnTe₄ имеют такой же характер, что и для металлов, т. е. значение уменьшается с ростом температуры, что обусловлено уменьшением подвижности носителей заряда при росте T .

Коэффициент Холла $R_H=1/(ep)$, где e — заряд электрона, для кристаллов Cu₂ZnSnTe₄ практически не зависит от температуры (см. вставку на рис. 1), что указывает на вырожденный газ носителей заряда в полупроводнике.

Коэффициент термо-эдс для всех образцов имеет положительное значение, что также указывает на преобладание p -типа проводимости.

Проведенные исследования коэффициента отражения R показали, что его величина остается

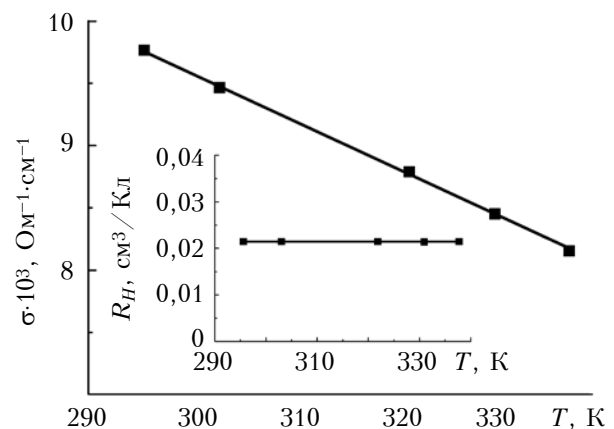


Рис. 1. Температурные зависимости удельной электропроводности и коэффициента Холла (*вставка*) кристаллов Cu₂ZnSnTe₄

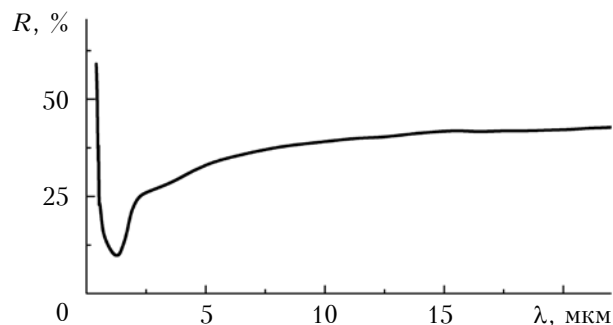


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента отражения образцов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ от длины волны электромагнитного излучения при угле его падения 30°

ся практически постоянной при изменении угла падения электромагнитного излучения, поэтому можно принять $R=R(0^\circ)=R(30^\circ)$ в области собственного поглощения.

Исследования спектральной зависимости коэффициента отражения образцов $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ от длины волны электромагнитного излучения показали наличие его плазменного минимума в коротковолновой части спектра (рис. 2).

Электрические свойства и механизмы токопереноса анизотипных гетероструктур $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$

Вольт-амперные характеристики трех анизотипных гетеропереходов, измеренные при комнатной температуре, представлены на рис. 3. Для первых двух были определены коэффициенты выпрямления k при внешнем смещении 0,6 В, высота потенциального барьера ϕ_0 (путем экстраполяции прямолинейного участка ВАХ при прямом смещении до пересечения с осью напряжений) и последовательное сопротивление (по формуле $R_S = \Delta U / \Delta I$):

- $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 1):
 $k=50$, $\phi_0=0,42$ В, $R_S=39$ Ом;
- $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 2):
 $k=27$, $\phi_0=0,23$ В, $R_S=8$ Ом.

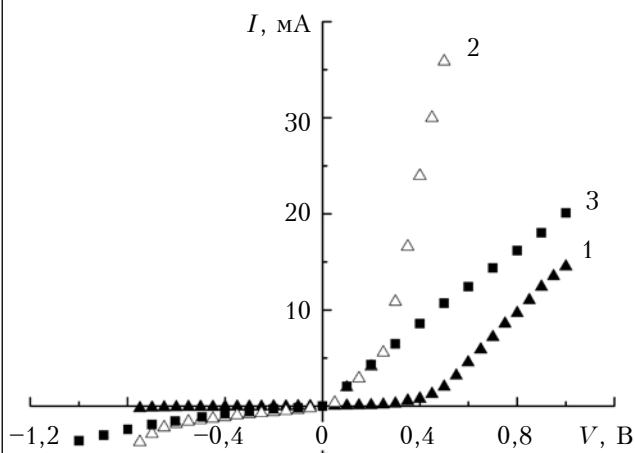


Рис. 3. ВАХ гетеропереходов при 295 К:
 1 — $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$; 2 — $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$;
 3 — $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$

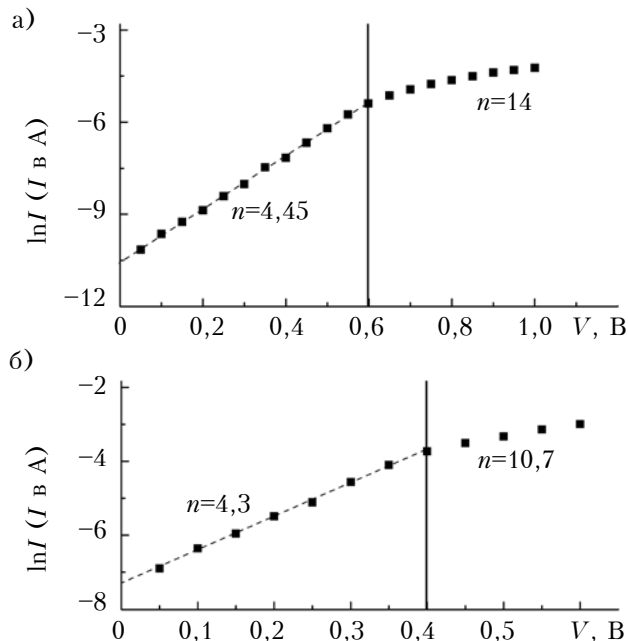


Рис. 4. Прямые ветви ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (а) и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (б)

Анализ ВАХ структур $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (кривая 3) не проводился, поскольку их коэффициент выпрямления очень мал: $k \approx 5$.

На рис. 4 представлены прямые ветви ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ в полулогарифмических координатах для удобства анализа доминирующих механизмов токопереноса при прямом смещении. Анализ показал, что графики зависимости $\ln I = f(V)$ исследуемых гетеропереходов состоят из двух прямолинейных участков, что свидетельствует об экспоненциальной зависимости тока от напряжения и наличии двух доминирующих механизмов токопереноса в исследуемом интервале напряжений.

Из формулы $\Delta \ln I / \Delta V = e / (nkT)$ были определены значения коэффициента неидеальности n гетеропереходов для обоих участков напряжений:

- $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$:
 $n=4,45$ при $0 < V < 0,6$ В, $n=14$ при $0,6 < V < 1,0$ В;
- $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$:
 $n=4,3$ при $0 < V < 0,4$ В, $n=10,7$ при $0,4 < V < 0,6$ В.

Таким образом, при небольших прямых смещениях для исследуемых гетеропереходов значение n превышает 2, что свидетельствует о доминировании туннельной модели токопереноса. При этом, поскольку при очень малых прямых смещениях область пространственного заряда еще недостаточно тонка для прямого туннелирования, единственным физически обоснованным механизмом токопереноса является многоступенчатый туннельно-рекомбинационный с участием поверхностных состояний на границах раздела $\text{TiN}/\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, образованных из-за несовпадения периодов кристаллических решеток материалов компонентов исследуемых гетеропереходов [6].

Ток при прямом смещении определяется следующим выражением [7]:

$$I = B \exp(-\alpha(\phi_0(T) - eV)), \quad (1)$$

где B — величина, которая слабо зависит от температуры и напряжения;

α — характеристика материала.

Выражение (1) можно переписать в другом виде:

$$I = B \exp(-\alpha\phi_0(T)) \exp \alpha e V.$$

С учетом того, что $I_0 = B \exp(-\alpha\phi_0(T))$ — ток отсечки, который не зависит от приложенного напряжения, получим

$$I = I_0 \exp \alpha e V. \quad (2)$$

Из этого выражения следует, что наклон начальных участков прямых ветвей ВАХ ($\Delta \ln I / \Delta V$) определяется коэффициентом α , который равен $8,8 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $9,2 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

Прологарифмировав выражение для тока отсечки I_0 , получим

$$\ln I_0 = \ln B - \alpha\phi_0(T). \quad (3)$$

Если значение высоты потенциального барьера и коэффициента α известны, тогда B можно легко вычислить из уравнения (3):

$$B = \exp(\alpha\phi_0(T) - \ln I_0).$$

Получено: $B = 1,07 \cdot 10^{-3} \text{ А}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $B = 5,9 \cdot 10^3 \text{ А}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

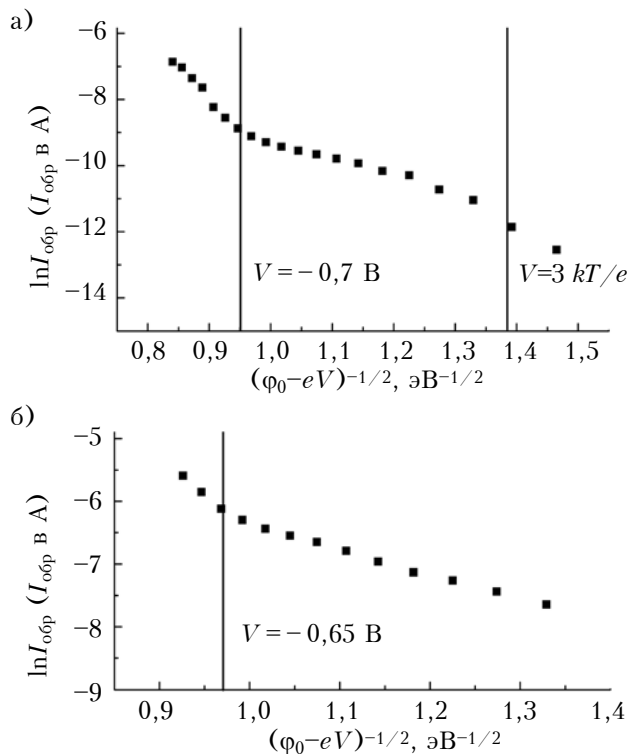


Рис. 5. Обратная ветвь ВАХ гетеропереходов $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (а) и $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (б)

При $V > 0,6 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и при $V > 0,4 \text{ В}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ область пространственного заряда достаточно тонка, и тут уже становится возможным прямое туннелирование, которое описывается формулой Ньюмена для туннельного механизма токопереноса [7]:

$$I = I_t \exp \gamma V, \quad (4)$$

где $I_t = I_t^0 \exp \beta T$ — ток отсечки; β, γ — константы.

Из последнего выражения видно, что наклон прямых ветвей ВАХ определяется коэффициентом γ , который равен $2,8 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и $3,6 \text{ эВ}^{-1}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$.

Обратный ток через исследуемые гетеропереходы в области смещений от $V = 3kT/e$ до $0,7 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и до $0,65 \text{ В}$ для $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ (рис. 5) описывается соотношением $I_{\text{обр}} \sim \exp[(\phi_0 - qV)^{-1/2}]$, что свидетельствует о доминировании туннельного механизма токопереноса при приложении внешнего напряжения в обратном направлении. В области смещений $V > 0,7 \text{ В}$ для $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ отклонение экспериментальных точек от прямой обусловлено лавинным размножением носителей заряда в результате ударной ионизации.

Выводы

Проведенные исследования показали, что кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ обладают p -типом проводимости, их коэффициент Холла практически не зависит от температуры, а электропроводность уменьшается с ее ростом. В гетероструктурах $n\text{-TiN}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, $n\text{-TiO}_2/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, полученных методом магнетронного осаждения тонких пленок TiN , TiO_2 на кристаллы $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$, доминирующими механизмами токопереноса являются туннельно-рекомбинационный и туннелирование Ньюмена при прямом смещении и туннелирование при обратном. Анализ механизмов токопереноса в гетероструктурах $n\text{-MoO}/p\text{-Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ не проводился, поскольку их коэффициент выпрямления очень мал ($k \approx 5$).

Результаты данных исследований могут быть использованы для лучшего понимания процессов, протекающих в материалах $\text{Cu}_2\text{ZnSnTe}_4$ и в структурах, созданных на их основе, для дальнейшего улучшения их свойств и параметров.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Wang W., Winkler M. T., Gunawan O. et al. Device characteristics of CZTS thin-film solar cells with 12.6% efficiency // Advanced energy materials. — 2014. — Vol. 4. — P. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>.
2. Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Win Shwe Maw et al. Development of CZTS-based thin film solar cells // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 517, N 7. — P. 2455–2460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>.
3. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. — 1998. — № 32/1. — С. 3–18.
4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.

5. Ковалюк Т. Т., Марьянчук П. Д., Майструк Э. В., Козьярский Д. П. Оптические свойства кристаллов $Hg_{1-x-y}Cd_xDy_ySe$ Изв. Вузов. Физика. — 2013. Т. 56, № 7. — С. 98 — 103.

6. Solovan M. N., Brus V. V., Maryanchuk P. D. et al. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions $n-TiN/p-CdTe$ // Semiconductor science and technology

gy. — 2014. — Vol. 29, N 015007. — <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.

7. Шарма Б. Л., Пурохит Р. К. Полупроводниковые гетеропереходы. — Москва: Сов. Радио, 1979.

Дата поступления рукописи
в редакцию 23.06 2015 г.

Т. Т. КОВАЛЮК, М. М. СОЛОВАН, А. І. МОСТОВИЙ,
Е. В. МАЙСТРУК, Г. П. ПАРХОМЕНКО, П. Д. МАР'ЯНЧУК

Україна, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

E-mail: tarik-1006@mail.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ КРИСТАЛІВ $Cu_2ZnSnTe_4$ ТА ГЕТЕРОПЕРЕХОДІВ НА ЇХ ОСНОВІ

Представлено результати досліджень магнітних, кінетичних і оптичних властивостей кристалів $Cu_2ZnSnTe_4$. Методом магнетронного напилення тонких плівок TiN , TiO_2 та MoO_x на підкладки з кристалів $Cu_2ZnSnTe_4$ виготовлено анізотипні гетеропереходи $n-TiN/p-Cu_2ZnSnTe_4$, $n-TiO_2/p-Cu_2ZnSnTe_4$ і $n-MoO/p-Cu_2ZnSnTe_4$. Досліджено їх електричні властивості і встановлено домінуючі механізми струмопереносу при прямих і зворотних зміщеннях.

Ключові слова: кристал, магнітна сприйнятливості, гетероперехід, тонка плівка.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.49
UDC 621.315.592

T. T. KOVALIUK, M. N. SOLOVAN, A. I. MOSTOVYI,
E. V. MAISTRUK, G. P. PARKHOMENKO, P. D. MARYANCHUK

Ukraine, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

E-mail: tarik-1006@mail.ru

RESEARCH ON $Cu_2ZnSnTe_4$ CRYSTALS AND HETEROJUNCTIONS BASED ON SUCH CRYSTALS

The paper reports on the results of the studies of magnetic, kinetic and optical properties of $Cu_2ZnSnTe_4$ crystals. The $Cu_2ZnSnTe_4$ crystals showed diamagnetic properties (the magnetic susceptibility almost independent of the magnetic field and temperature). The $Cu_2ZnSnTe_4$ crystals possessed p-type of conductivity and the Hall coefficient was independent on temperature. The temperature dependence of the electrical conductivity of the $Cu_2ZnSnTe_4$ crystal shows metallic character, i. e. decreases with the increase of temperature, that is caused by the lower charge carrier mobility at higher temperature. Thermoelectric power of the samples is positive that also indicates on the prevalence of p-type conductivity.

Heterojunctions $n-TiN/p-Cu_2ZnSnTe_4$, $n-TiO_2/p-Cu_2ZnSnTe_4$ and $n-MoO/p-Cu_2ZnSnTe_4$ were fabricated by the reactive magnetron sputtering of TiN , TiO_2 and MoO_x thin films, respectively, onto the substrates made of the $Cu_2ZnSnTe_4$ crystals. The dominating current transport mechanisms in the $n-TiN/p-Cu_2ZnSnTe_4$ and $n-TiO_2/p-Cu_2ZnSnTe_4$ heterojunctions were established to be the tunnel-recombination mechanism at forward bias and tunneling at reverse bias.

Keywords: crystal, magnetic susceptibility, heterojunctions, thin film.

REFERENCES

1. Wang W., Winkler M. T., Gunawan O., Gokmen T., Todorov T. K., Zhu Y., Mitzi D. B. Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 2014, vol. 4, pp. 1-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301465>.

2. Hironori Katagiri, Kazuo Jimbo, Win Shwe Maw, Koichiro Oishi, Makoto Yamazaki, Hideaki Araki, Akiko Takeuchi. Development of CZTS-based thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 517, no. 7, pp. 2455-2460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2008.11.002>.

3. Alferov Zh. I. The history and future of semiconductor heterostructures. *Semiconductors*, 1998, vol. 32, is. 1, pp. 1-14.

4. Fahrenbruch A.L., Bube R.H. Fundamentals of solar cells. *Photovoltaic solar energy conversion*. New York, 1983.

5. Kovaliuk T. T., Maryanchuk P. D., Maistruk E. V., Kozziarskyi D. P. Optical properties of $Hg_{1-x-y}Cd_xDy_ySe$ crystals. *Russian Physics Journal*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 831-836. <http://dx.doi.org/10.1007/s11182-013-0106-5>.

6. Solovan M.N., Brus V.V., Maryanchuk P.D., Ilashchuk M.I., Rappich J., Nickel N., Abashin S.L. Fabrication and characterization of anisotype heterojunctions $n-TiN/p-CdTe$. *Semiconductor Science and Technology*, 2014, vol. 29, no. 015007. <http://dx.doi.org/10.1088/0268-1242/29/1/015007>.

7. Sharma B.L., Purohit R.K. *Semiconductor heterojunctions*. Pergamon Press, 1974.

Д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК¹, д. ф.-м. н. В. Н. КАТЕРИНЧУК¹, З. Р. КУДРИНСКИЙ¹,
Б. В. КУШНИР¹, к. ф.-м. н. В. В. НЕТЯГА¹, к. ф.-м. н. В. В. ХОМЯК²

Украина, ¹Черновицкое отделение Института проблем материаловедения им. И. М. Францевича
НАН Украины, ²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА ВАХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДА $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$

Методом высокочастотного магнетронного напыления сформирована тонкая оксидная пленка ZnO на ван-дер-ваальсовой поверхности моноселенида индия. Исследовано влияние вакуумного низкотемпературного отжига на электрические и фотоэлектрические характеристики гетероперехода $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$. Приведены температурные зависимости ВАХ гетероперехода до и после отжига. Установлена область спектральной фоточувствительности гетероструктуры $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$.

Ключевые слова: селенид индия, оксид цинка, тонкая пленка, гетеропереход, ВАХ, спектральная фоточувствительность.

Широкозонные проводящие пленки оксидов металлов часто используются для формирования «окон» при создании гетеропереходов, поскольку они пропускают оптическое излучение широкого спектрального диапазона. К тому же, низкое поверхностное сопротивление пленок обеспечивает образование обедненной области преимущественно в объеме полупроводниковой подложки. Сочетание указанных факторов способствует эффективному преобразованию световой энергии в электрическую [1, 2].

Известно, что любое различие кристаллических решеток материалов гетероперехода (по типу, параметрам, коэффициенту термического линейного расширения) обычно приводит к образованию на гетерогранице n - и p -типа большой концентрации дефектов [6], что делает невозможным изготовление качественных гетеропереходов. В свою очередь, в научной литературе представлены данные по различным типам гетеропереходов на основе слоистых кристаллов и показано, что в таком случае несогласованность решеток не является преградой для получения качественных диодных структур [7, 8]. Среди полупроводниковых материалов, которые относятся к слоистым кристаллическим структурам и могут быть использованы при изготовлении гетеропереходов, определенный интерес представляют оксид цинка ZnO и кристаллы InSe [3–5]. Поверхность естественного скола слоистых кристаллов InSe является идеальной подложкой для изготовления гетеропереходов, поскольку химические связи на ней замкнуты и какая-либо дополнительная обработка не требуется.

Целью данной работы было изготовление новых гетеропереходов $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$ и исследования фотоэлектрических свойств сформированного $p - n$ -перехода.

Образцы и методика исследования

Монокристаллы селенида индия, которые выращивали методом Бриджмена из компонентов нестехиометрического состава, обладали n -типом проводимости. Для получения p -типа проводимости их легировали кадмием (0,1% по массе). Подвижность (μ_c) и концентрация (n_p) свободных носителей заряда полученных кристаллов были определены из холловских измерений: $\mu_c = 100 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $n_p = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре.

Гетеропереходы $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$ формировали напылением тонкой оксидной пленки ZnO на ван-дер-ваальсову поверхность InSe методом высокочастотного магнетронного распыления [9].

Спектры фоточувствительности изготовленных гетеропереходов исследовали при помощи монохроматора МДР-3 с разрешающей способностью 2,6 нм/мм. Спектры нормировали на количество падающих фотонов.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 1, где приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) гетероперехода $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$ до и после отжига, видно, что зависимости носят нелинейный характер, что присуще диодным структурам (ВАХ построены в полулогарифмических и логарифмических координатах для возможности выявления отдельных изменений в функциональной зависимости тока от напряжения).

В общем случае экспериментальные результаты можно описать следующим выражением:

$$J = \exp(qU/(nkT)),$$

где J — плотность тока.

Величина входящего в эту формулу диодного коэффициента n указывает на механизм проте-

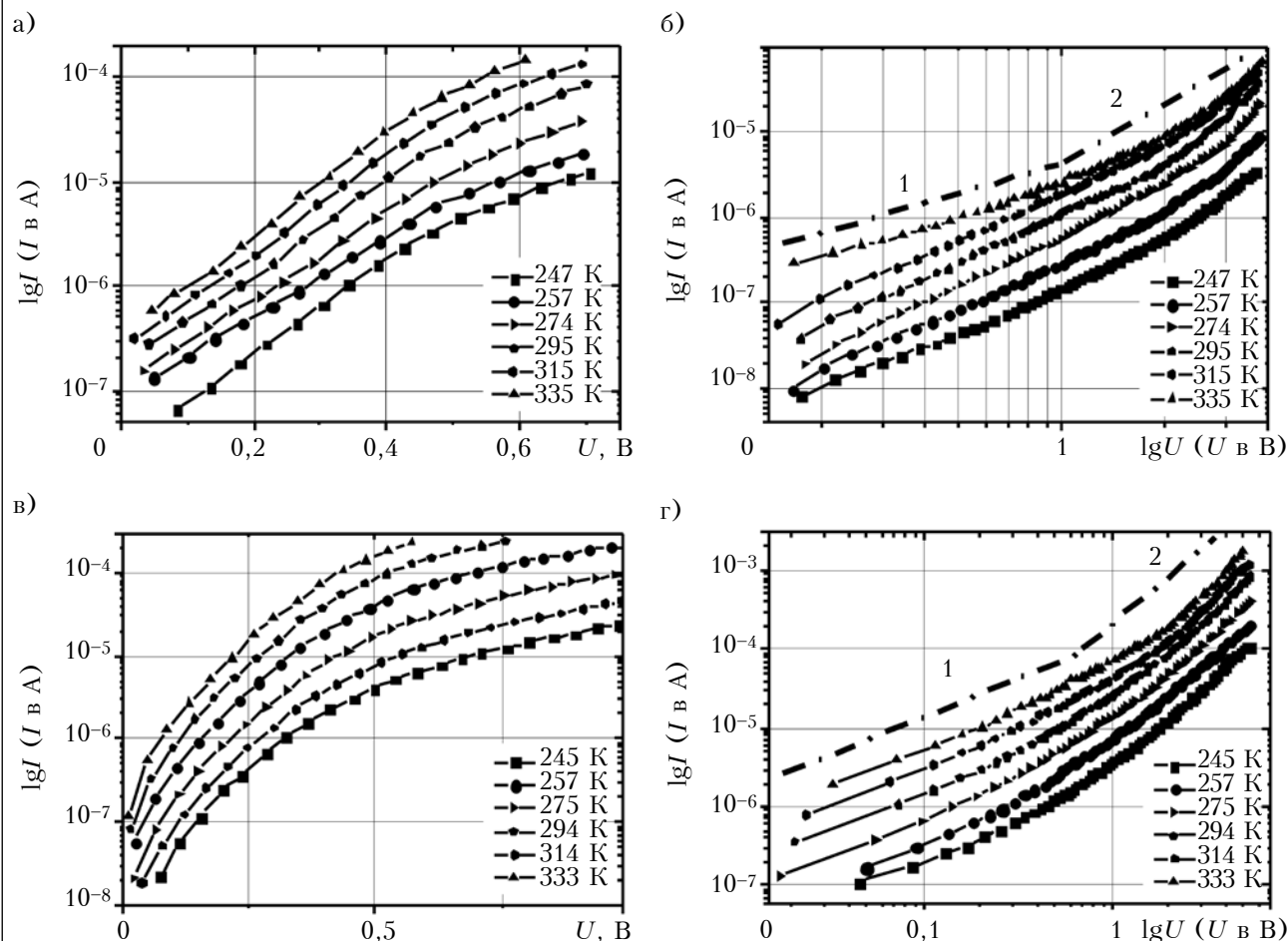


Рис. 1. ВАХ гетероперехода $n\text{-ZnO-p-InSe}$, полученные при различных температурах до (а, б) и после (в, г) отжига образцов и представленные в полулогарифмическом (а, в) и логарифмическом (б, г) масштабе (пунктир на б, г — рассчитанная ВАХ, подчиняющаяся линейной (1) и квадратической (2) закономерностям)

кания тока через гетеропереход. Например, при $n=1$ преобладает диффузионный ток, при $n=2$ — рекомбинационный, при $1 < n < 2$ — оба тока сопоставимы по величине. В нашем случае при малых смещениях гетероперехода наклон ВАХ практически не зависит от температуры и $n > 2$ ($n \approx 3,7$), что присуще туннельному или туннельно-рекомбинационному механизму протекания тока. С другой стороны, квантово-механическое туннелирование возможно лишь тогда, когда толщина потенциальных барьеров меньше, чем длина волны де-Бройля для электрона ($< 100 \text{ \AA}$). Такая ситуация реализуема в сильнолегированных и вырожденных полупроводниках, к которым не относится InSe , поэтому указанные механизмы протекания тока в гетеропереходе $n\text{-ZnO-p-InSe}$ не являются возможными.

Альтернативным механизмом протекания тока через гетеропереход являются шунтирующие токи, которые накладываются на другие токи и искажают истинную картину электронных процессов. Обычно они преобладают при малых значениях напряжения. Когда напряжение возрастает, диффузионный ток преобладает над шунтирующим из-за различной экспоненциальной за-

висимости. Величина шунтирующих токов зависит от качества $p-n$ -перехода. Дефекты возникают при формировании гетероперехода и создании омических контактов, когда изменение температуры на гетерогранице вызывает возникновение механических напряжений из-за различия свойств контактирующих веществ. Для уменьшения количества дефектов и, соответственно, шунтирующих токов применяя термический отжиг образцов в вакууме. Следует отметить, что при уменьшении шунтирующих токов коэффициент n также уменьшается.

При изменении полярности напряжения смещения на гетеропереходе ВАХ приобретает иной характер. Растяжение $p-n$ -перехода приводит к подавлению инжекционных токов и к появлению токов, ограниченных пространственным зарядом, что является следствием протекания тока через диэлектрик. Согласно [10], при небольших напряженностях электрического поля

$$I = \varepsilon \mu U / L,$$

где ε — статическая диэлектрическая проницаемость среды;

μ — подвижность электронов;

L — толщина $p-n$ -перехода.

Поскольку в протекании тока через $p-n$ -переход ловушки не участвуют, зависимость $I(U)$ строго следует линейному (при малых напряжениях) или квадратическому (при больших смещениях) закону.

Поскольку для токов, ограниченных пространственным зарядом, ВАХ описывается степенной зависимостью, для исследуемого гетероперехода при обратных смещениях на рис. 1 она приведена в логарифмическом масштабе. Здесь хорошо видно, что в исследуемом диапазоне температур ВАХ подчиняется квадратичному закону. Следует отметить, что при высоких температурах ($61,7^\circ\text{C}$) ему предшествует омическая зависимость.

Итак, при формировании гетероперехода $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ действительно образуется обедненная область. При прямых смещениях ее наличие приводит к инжекции электронов в полупроводник, а при обратных — к возникновению токов, ограниченных пространственным зарядом. В первом случае прямые токи накладываются на шунтирующие, что приводит к завышенным значениям диодного коэффициента ВАХ. Одним из путей повышения качества гетеропереходов является вакуумный термический отжиг образцов, поскольку он влияет на величину шунтирующих токов.

Из рис. 1, а, з видно, что после отжига поведение прямых ветвей ВАХ при изменении температуры не изменилось — так же, как и до отжига, они смещаются в вертикальном направлении, не изменяя угол наклона. При этом, однако, диодный коэффициент ВАХ n уменьшился до 2,7 по сравнению с 3,7 у неотожженных образцов. Это свидетельствует о том, что шунтирующие токи гетероперехода после отжига уменьшились и его диодные свойства улучшились при сохранении инжекционных свойств. Такое изменение может происходить за счет уменьшения механических напряжений на гетерогранице, устранения каналов замыканий и других дефектов.

На рис. 1, з четко видно, что при всех температурах графики характеризуются двумя наклонами: с показателем степени 1 при малых напряжениях и с показателем степени 2 при больших. Как отмечается в [10, с. 101–130], такая ситуация реализуется в модели, которая представляет собой обедненную область с равновесными свободными носителями и без ловушек. Поведение ВАХ в соответствии с омическим законом при малых значениях напряжения можно объяснить, предположив существование некой концентрации термически активированных электронов, источником которых могут быть мелкие доноры с относительно малой энергией связи. Заметных отклонений от такого закона не возникает до тех пор, пока средняя концентрация инжектированных неравновесных свободных носителей не становится сравнимой с концентра-

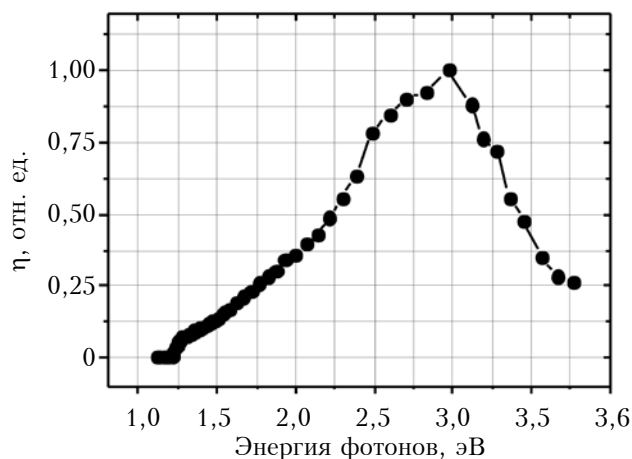


Рис. 2. Спектр фотоотклика гетероперехода $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ при комнатной температуре

цией термически высвобожденных носителей. В этом случае при больших обратных напряжениях происходит переход к квадратичному безловушечному закону, т. е. начало возникновения токов, ограниченных пространственным зарядом, хорошо иллюстрируют рис. 1, б, з.

Спектры относительной квантовой эффективности η гетероперехода $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что спектральная fotocувствительность ограничена с двух сторон и соответствует поглощению света в узкозонном InSe ($\approx 1,25$ эВ) и широкозонном ZnO ($\approx 3,20$ эВ), что характерно для формы спектров гетеропереходов. Резкий край фотоотклика в высокоэнергетической области спектра указывает на удовлетворительное качество сформированной пленки ZnO и ее полупроводниковые свойства. Данный гетеропереход отличается тем, что благодаря низкоомной пленке оксида цинка вся обедненная область находится в InSe и область поглощения света совмещена с $p-n$ -переходом, в котором генерируемые фотоносители непосредственно разделяются электрическим полем. Также следует отметить и то, что качественные гетеропереходы $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ на основе слоистых кристаллов InSe получают даже при неблагоприятных условиях согласования типа и параметров кристаллических решеток контактирующих полупроводников: ZnO и InSe.

Выводы

Исследования сформированных методом высокочастотного магнетронного напыления гетеропереходов $n\text{-ZnO}-p\text{-InSe}$ показали, что их ВАХ носят диодный характер. Предположение о влиянии шунтирующих токов на ВАХ подтверждено снижением диодного коэффициента с 3,7 до 2,7 после вакуумного низкотемпературного отжига образцов, поскольку известно, что он позволяет уменьшить шунтирующие токи.

Спектральная fotocувствительность полученных гетеропереходов находится в области энергий 1,2 — 3,7 эВ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ellmer K., Klein A., Rech B. Transparent conductive zinc oxide: Basics and applications in thin film solar cells. — Springer, 2008.
2. Song D., Aberle A., Xia I. Optimisation of ZnO:Al films by change of sputter gas pressure for solar cell application // Appl. Surf. Sci. — 2003. — Vol. 195, N 3. — P. 291–296.
3. Штеплюк І. І., Лашкарьов Г. В., Лазоренко В. Й., Євтушенко А. І. Технологічні та матеріалознавчі аспекти створення світлодіодів на основі ZnO // ФХТТ. — 2010. — Т. 11, № 2. — С. 277–287.
4. Jagadish C., Pearton S. J. (Eds.) Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications. — Amsterdam: Elsevier, 2006.
5. Ковалюк З. Д. Особенности физических свойств слоистых кристаллов // В кн.: Физические основы полупроводникового материаловедения. — Киев: Наукова думка, 1986. — С. 7–9.
6. Milnes A. G., Feucht D. L. Heterojunction and metal-semiconductor junction. — New York: Academic Press, 1972.
7. Катеринчук В. М., Кудринський З. Р., Хомяк В. В. та ін. Властивості анізотипних гетеропереходів $n\text{-CdO}$ – $p\text{-InSe}$. // ФХТТ. — 2013. — Т. 14, № 1. — С. 218–221.
8. Катеринчук В. Н., Кудринський З. Р., Ковалюк З. Д. Коэффициент фотоплекроизма и его температурная динамика в гетеропереходах собственный оксид– $p\text{-InSe}$ // ФТП. — 2014. — Т. 48, № 6. — С. 797–800.
9. Брус В. В., Илащук М. И., Хомяк В. В., Ковалюк З. Д., Марьянчук П. Д., Ульяницкий К. С. Электрические свойства анизотипных гетеропереходов $n\text{-CdZnO}/p\text{-CdTe}$ // ФТП. — 2012. — Т. 46, № 9. — С. 1175–1180.
10. Lampert M. A., Mark P. Current injection in solids. — New York: Academic Press, 1970.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.04 2015 г.

З. Д. КОВАЛЮК¹, В. М. КАТЕРИНЧУК¹, З. Р. КУДРИНСЬКИЙ¹, Б. В. КУШНИР¹,
В. В. НЕТЯГА¹, В. В. ХОМЯК²

Україна, ¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ВПЛИВ ВІДПАЛУ НА ВАХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДУ $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$

Методом високочастотного магнетронного напылення була сформована тонка оксидна плівка ZnO на ван-дер-ваальсовій поверхні моноселеніда індію. Досліджено вплив вакуумного низькотемпературного відпалу на електричні та фотоелектричні характеристики гетеропереходу $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$. Наведено температурні залежності ВАХ гетеропереходу до і після відпалу. Встановлена область спектральної фоточутливості гетероструктури $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$.

Ключові слова: селенід індію, ZnO, тонка плівка, гетероперехід, ВАХ, спектральна фоточутливість.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.50
UDC 544.225.2, 621.315.592

Z. D. KOVALYUK¹, V. M. KATERYNCHUK¹,
Z. R. KUDRYNSKYI¹, B. V. KUSHNIR¹,
V. V. NETYAGA, V. V. KHOMEYAK²

Ukraine, ¹Frantsevich Institute for Problems of Materials Science
of National Academy of Sciences of Ukraine,
²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University
E-mail: chimsp@ukrpost.ua

ANNEALING EFFECT ON I – V CHARACTERISTIC OF $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$ HETEROJUNCTION

The article is devoted to studying of influence of vacuum low-temperature annealing on the electrical and photoelectric characteristics of $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$ heterostructure.

Indium monoselenide (InSe) is a semiconductor of the A^3B^6 group of layered compounds. The basic unit consists of two planes of metal atoms sandwiched between two planes of chalcogen atoms (Se-In-In-Se). The absence of dangling bonds on InSe cleaved surface makes it possible to use this semiconductor as a substrate for fabrication of heterostructures based on semiconductor materials with different symmetries and lattice spacings. Zinc oxide (ZnO) is the most suitable material for window materials and solar cells buffer layers application due to its marvelous transparency in the range of visible region.

InSe single crystals were grown by the Bridgman technique from a nonstoichiometric melt and characterized by a pronounced layered structure along the whole length of a sample. ZnO thin oxide film was formed on freshly cleaved van der Waals surface of InSe layered crystal. $n\text{-ZnO}$ – $p\text{-InSe}$ heterostructure was prepared

by the method of high-frequency magnetron sputtering. Sensitivity spectral areas were identified by MDR-3 monochromator with a resolution of 2.6 nm/mm.

The current-voltage characteristics of the $n\text{-ZnO} - p\text{-InSe}$ heterostructures showed a clearly pronounced diode character. In the forward bias of the initial samples, the diode factor had the value 3.7 at room temperature. It is shown that vacuum low-temperature annealing reduces shunt currents of the heterojunction, which is reflected in the decrease in the values of n from 3.7 to 2.7.

Keywords: indium selenide, ZnO, thin film, heterojunction, CVC, spectral photosensitivity.

REFERENCES

1. Ellmer K., Klein A., Rech B. *Transparent conductive zinc oxide: Basics and applications in thin film solar cells*. Springer, 2008, 446 p.
2. Song D., Aberle A., Xia I. Optimisation of ZnO:Al films by change of sputter gas pressure for solar cell application. *Appl. Surf. Sci.*, 2003, vol. 195, no. 3, pp. 291-296.
3. Shteplyuk I., Lashkarev G., Lazorenko V., Ievtushenko A. [Technological and material science aspects of obtaining light-emitting devices based on ZnO]. *Physics and chemistry of solid state*, 2010, vol. 11, no. 2, pp. 277-287. (Ukr)
4. Jagadish C., Pearton S.J. (Eds.) *Zinc oxide bulk, thin films and nanostructures: processing, properties, and applications*. Amsterdam, Elsevier, 2006, 600 p.
5. Kovalyuk Z.D. [Features of physical properties of layered crystals]. In book: *Physical basis of semiconductor material*. Kiev, Naukova dumka, 1986, pp. 7-9. (Rus)
6. Milnes A.G., Feucht D.L. *Heterojunction and metal-semiconductor junction*. New York, Academic Press, 1972, 408 p.
7. Katerynychuk V.M., Kudrynskyi Z.R., Khomyak V.V., Orletsky I.G., Netyaga V.V. [Properties of anisotype $n\text{-CdO} - p\text{-InSe}$ heterojunctions]. *Physics and chemistry of solid state*, 2013, vol. 14, no. 1, pp. 218-221. (Ukr)
8. Katerynychuk V.M., Kudrynskyi Z.R., Kovalyuk Z.D. Photopleochroism coefficient and its temperature dynamics in natural oxide $p\text{-InSe}$ heterojunctions. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, iss. 6, pp. 776-778. <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782614060153>.
9. Brus V.V., Ilashchuk M.I., Khomyak V.V., Kovalyuk Z.D., Maryanchuk P.D., Ulyanytsky K.S. Electrical properties of anisotype heterojunctions $n\text{-CdZnTe}/p\text{-CdTe}$. *Semiconductors*, 2012. vol. 46, iss. 9, pp. 1152-1157. [10.1134/S1063782612090059](http://dx.doi.org/10.1134/S1063782612090059).
10. Lampert M.A., Mark P. *Current injection in solids*. New York, Academic Press. 1970, 351 p.

ВЫСТАВКИ



Выставочный центр КиевЭкспоПлаза
Украина, Киев ул. Салютная, 2-Б
Тел.: + 380 44 461-95-85



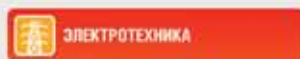
- ЭНЕРГЕТИКА
- ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
- ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

20-я международная выставка
elcomUkraine 2016

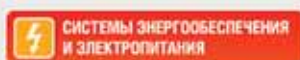
19 – 22 апреля 2016

www.elcom.ua

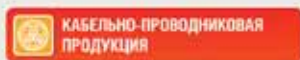
Тематические направления



Высоковольтная аппаратура, низковольтная аппаратура, энергосбережение, охрана труда в электроэнергетике.



Когенерационные установки, электростанции, стабилизаторы, преобразователи, инверторы, выпрямители, аккумуляторы, источники бесперебойного питания, электроощитовое оборудование, системы электропитания, электроприборы и преобразователи, системы заземления и молниезащиты.



Кабели, провода, кабеленесущие системы, электромонтажные изделия, оборудование для монтажа и прокладки.



Техническое освещение, декоративное освещение, LED-освещение, источники света.

А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, Национальный научный центр «Институт метрологии»
E-mail: orobin@mail.ru

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКИХ УСТАНОВОК

Установлена взаимозависимость основных характеристик рентгеновских установок: средней энергии, напряжения на аноде, тока анода рентгеновской трубки, спектрального разрешения, толщины фильтров и их материалов. Разработан алгоритм расчета этих характеристик при известных значениях средней энергии и мощности кермы в воздухе с учетом спектрального разрешения с целью получения рентгеновского излучения заданного качества.

Ключевые слова: рентгеновская установка, рентгеновская трубка, рентгеновское излучение, напряжение на аноде, ток анода, спектральное разрешение, средняя энергия, мощность кермы в воздухе.

В медицине применяют терапевтические (для лечения заболеваний), диагностические (для выявления заболеваний, определения диагноза, при различных травмах и т. д.) и метрологические (для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения) рентгеновские установки (**РУ**), которые имеют строго заданные характеристики в зависимости от области применения [1]. Качество рентгеновского излучения (средняя энергия \bar{E} и мощность кермы в воздухе K) определяются назначением РУ [2–4].

Поскольку процесс разработки и изготовления рентгеновской установки связан с радиационной опасностью для людей, время, необходимое для ее настройки и регулировки, а значит,

и доза облучения при их проведении зависят от точности расчетов РУ.

При разработке РУ с учетом области ее применения необходимо выбрать рентгеновскую трубку (**РТ**) и дополнительные фильтры (далее по тексту — фильтры), исходя из напряжения (U_a) и тока (I_a) анода РТ, материала фильтров и их толщины (d_i), т. е. рассчитать эти характеристики при заданном качестве рентгеновского излучения. В известной автору литературе решение данной задачи отсутствует.

В [5–7] выполнен расчет характеристик рентгеновского излучения: \bar{E} , коэффициента гомогенности (h), первого слоя половинного ослабления СПО1, второго слоя половинного

Таблица 1
Параметры излучения, применяемого в терапевтических и диагностических РУ [2–4]

Код качества излучения	Назначение	\bar{E} , кэВ	\dot{K} , мГр/ч*	Материал мишени РТ
RQR2 ... RQR10 [2]	Излучение на пациента при флюорографии	28,4–64,5	57,5–720,0	W
RQA2 ... RQR10 [2]	Излучение, ослабленное пациентом, при флюорографии	31,5–88,6	7,0–26,5	W
RQT8 ... RQT10 [2]	Излучение при томографии	58,2–74,3	136–295	W
RQR-M1 ... RQR-M4 [2]	Излучение на пациента при маммографии	16,1–18,1	108–266	Mo
RQA-M1 ... RQA-M4 [2]	Излучение, ослабленное пациентом, при маммографии	18,8–23,2	4,35–18,0	Mo
T7,5 ... T100 [3]	Излучение при рентгеновской терапии с низкой энергией	6,13–51,9	1410–4900	W
T120 ... T280 [4]	Излучение при рентгеновской терапии со средней энергией	59,5–147,7	295–495	W

* Значения \dot{K} приведены для расстояния 1 м от фокуса РТ при токе анода 1 мА.

Таблица 2
Характеристики различных серий стандартного рентгеновского излучения метрологических РУ (мишень РТ – вольфрамовая) [8, табл. 2]

Серия	R_E , %	h	\dot{K} , мГр/ч**
L (с низким содержанием кермы в воздухе)	18–20	$h \rightarrow 1$	0,3
N (с узким спектром)	27–37	0,75–1,0	1–10
W (с широким спектром)	48–57	0,67–0,98	10–100
H (с высоким содержанием кермы в воздухе)	(57–115)*	0,64–0,86	10–5000

* Рассчитано в [5] (R_E не нормируется для серии H).

** Значения \dot{K} приведены для расстояния 1 м от фокуса РТ при токе анода 1 мА.

ослабления СПО2 и спектрального разрешения (R_E) при заданных значениях U_a и d_i ; радиационного выхода H и \dot{K} при заданном значении I_a .

Целью настоящей работы было установление взаимозависимости между основными характеристиками РУ, такими как средняя энергия, напряжение и ток анода рентгеновской трубки, спектральное разрешение, толщина и материал фильтров, для решения обратной задачи – расчета напряжения и тока анода РТ, а также толщины фильтров (выбрав их материал) при заданных значениях средней энергии и мощности кермы в воздухе на выходе РУ с учетом спектрального разрешения.

Параметры рентгеновского излучения в наиболее распространенных терапевтических и диагностических РУ приведены в табл. 1.

По классификации [8, табл. 3–7] стандартное рентгеновское излучение, которое применяется в метрологических РУ, подразделяется на серии в зависимости от содержания кермы в воздухе и ширины спектра (табл. 2).

Расчет напряжения на аноде рентгеновской трубки

Анализ характеристик стандартных спектров тормозного рентгеновского излучения, приведенных в [5, рис. 1–4], позволяет сделать вывод о том, что их форма близка к симметричной, т. е. коэффициент гомогенности $h \rightarrow 1$. Поэтому для расчета РУ представим спектр рентгеновского излучения при заданном значении R_E в виде параболы (рис. 1), описываемой выражением

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -k(E - E_0)^2 + 1, \quad (1)$$

где E – энергия рентгеновского излучения;
 $\Phi_{\Sigma N}(E)$ – нормированный флюэнс рентгеновского излучения, $\Phi_{\Sigma N}(E) = \Phi(E) / \Phi(E_0)$;
 k – коэффициент параболы.

Как видно из рис. 1, $\Phi_{\Sigma N}(E) = 1$ при $E = E_0$; $\Phi_{\Sigma N}(E) = 0,5$ при $E = E_1$ и $E = E_2$.

Спектральное разрешение [5] представим в виде

$$R_E = (E_2 - E_1) / E_0,$$

откуда с учетом того, что $\Delta E = E_2 - E_1$ и $E_2 = E_0 + \Delta E / 2$ (см. рис. 1), найдем

$$E_1 = E_0(1 - 0,5R_E).$$

Таким образом, формула (1) при $E = E_1$ будет выглядеть следующим образом:

$$0,5 = -k(E_0(1 - 0,5R_E) - E_0)^2 + 1.$$

Отсюда, учитывая что $E_0 \approx \bar{E}$ [5, рис. 2, кривая при $U_a = 150$ кВ и табл. 2 (\bar{E} при $U_a = 150$ кВ)], найдем

$$k = \frac{2}{(R_E \bar{E})^2}.$$

Теперь с учетом некоторых преобразований выражение (1) можем записать как

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -2 \left(\frac{E - \bar{E}}{R_E \bar{E}} \right)^2 + 1. \quad (2)$$

При $\Phi_{\Sigma N}(E) = 0$ получим формулу для максимального и минимального значений энергии:

$$E_{\max}^{\min} = (1 \pm 0,7R_E) \bar{E}.$$

Поскольку $E_0 \approx \bar{E}$, а максимальная энергия рентгеновского излучения в кэВ численно равна напряжению на аноде РТ в кВ [9, с. 12] (т. е. $E_{\max, \text{кэВ}} = U_{a, \text{кВ}}$), можем из формулы для E_{\max} найти среднюю энергию:

$$\bar{E} = \frac{U_a}{1 + 0,7R_E}. \quad (3)$$

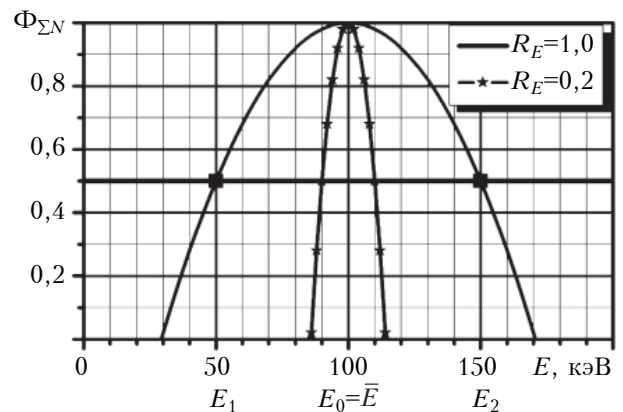


Рис. 1. Спектр рентгеновского излучения при различных значениях R_E

При изменении R_E от 0,18 до 1,15 (табл. 2) \bar{E} находится в диапазоне $(0,90 - 0,55)U_a$.

Подставив формулу (3) в (2), окончательно получим

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -2 \left(\frac{E(1 + 0,7R_E) - U_a}{R_E U_a} \right)^2 + 1,$$

откуда найдем

$$E_1 = \frac{1 \mp 0,5R_E}{1 + 0,7R_E} U_a. \quad (4)$$

Форма спектра тормозного рентгеновского излучения и его средняя энергия определяют-

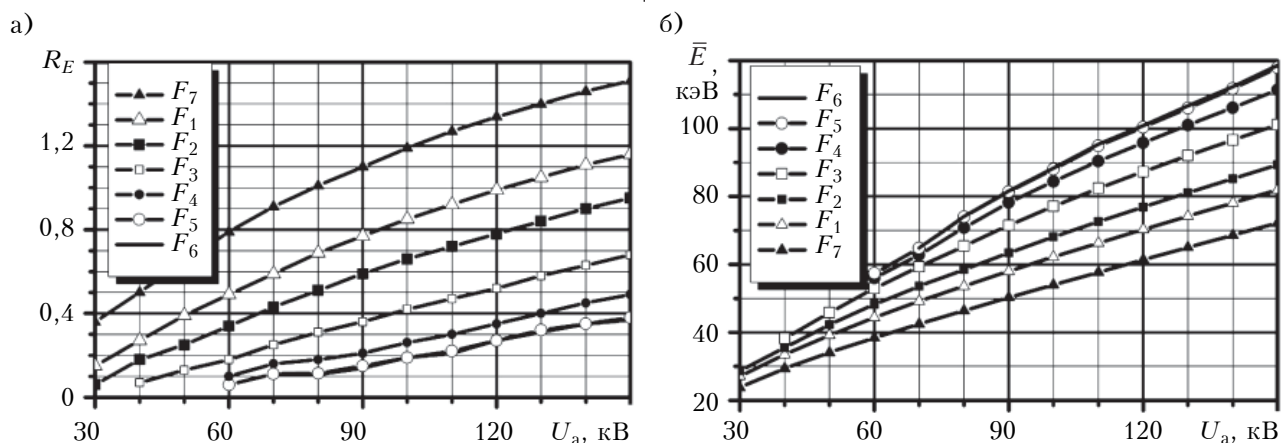


Рис. 2. Зависимости спектрального разрешения (а) и средней энергии (б) от напряжения на аноде, полученные для различных фильтров $F_1 \dots F_7$ (см. табл. 3)

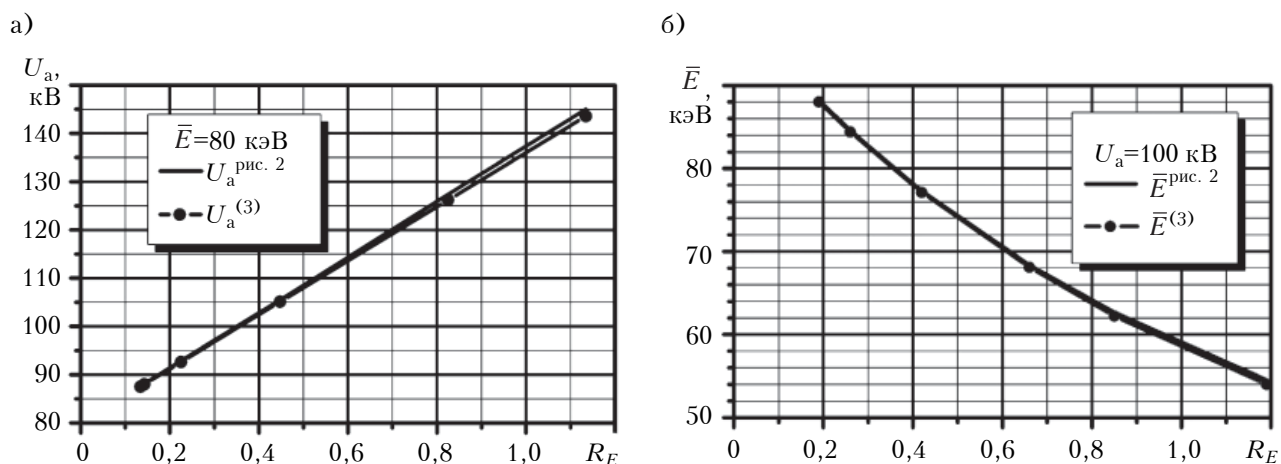


Рис. 3. Зависимости напряжения на аноде при $\bar{E} = 80$ кэВ (а) и средней энергии при $U_a = 100$ кВ (б) от спектрального разрешения, построенные по формуле (3) ($U_a^{(3)}$, $\bar{E}^{(3)}$) и на основании данных рис. 2 ($U_{a \text{ рис. 2}}$, $\bar{E}_{\text{рис. 2}}$)

Таблица 3

Значения энергии и напряжения на аноде РУ PANTAK HF160

Режим работы*	Фильтр (F)	\bar{E} , кэВ [8]	R_E [8]	E_1 , кэВ	E_2 , кэВ	U_{a0} , кВ [8]	U_{ap} , кВ	δU_{ap} , %
Q_7	3,0Al (F_7)	24	0,32	20,6	28,3	30	29,4	2,0
Q_1	0,21Cu+4,0Al** (F_1)	33	0,30	28,1	38,0	40	39,9	0,3
Q_2	0,6Cu+4,0Al** (F_2)	48	0,36	39,3	56,6	60	60,1	0,2
Q_3	2,0Cu+4,0Al** (F_3)	65	0,32	54,9	75,8	80	79,6	0,5
Q_4	5,0Cu+4,0Al** (F_4)	83	0,28	71,9	95,3	100	99,3	0,7
Q_5	1,0Sn+5,0Cu+4,0Al** (F_5)	100	0,27	87,3	114,6	120	118,9	0,9
Q_6	2,5Sn+4,0Al** (F_6)	118	0,37	97,1	141,2	150	148,6	0,9

* Режим работы РУ определяется напряжением на аноде РТ и фильтрами [1, табл. 2].

** Здесь и далее указана толщина фильтра в мм.

*** 4,0Al — собственная фильтрация.

ся напряжением на аноде РТ и спектральным разрешением.

В табл. 3 приведены значения E_1 и E_2 , рассчитанные по формуле (4), значения напряжения на аноде U_{ap} , рассчитанные из (3), а также данные из [8, табл. 1] для рентгеновской установки PANTAK HF160 (серия N).

Из табл. 3 видно, что отклонение δU_{ap} рассчитанных значений напряжения на аноде U_{ap} от значений U_{a0} , приведенных в [8], не превышает 2%.

Для оценки взаимовлияния U_a , \bar{E} и R_E на рис. 2 приведены рассчитанные методом, описанным в [5], зависимости спектрального разрешения и средней энергии от напряжения на аноде РТ для различных фильтров для установки PANTAK HF160.

На рис. 3 приведены зависимости напряжения на аноде и средней энергии от спектрального разрешения, построенные по формуле (3) — $U_a^{(3)}$, $\bar{E}^{(3)}$ и по данным рис. 2 — $U_a^{\text{рис.2}}$, $\bar{E}^{\text{рис.2}}$. Здесь видно, что значения искомых величин, полученные двумя этими способами, отличаются между собой не более чем на 1%, а значит, определять напряжение на аноде РТ и спектральное разрешение можно из формулы (3), что намного проще, чем рассчитывать методом, приведенным в [5].

Радиационный выход

Одной из характеристик РУ является радиационный выход [7]

$$H(U_a) = \dot{K}(U_a) R^2 / I_a,$$

где R — расстояние между фокусом РТ и точкой, в которой измерена \dot{K} .

Из этой формулы следует, что \dot{K} линейно зависит от тока анода РТ при заданном фильтре и постоянных значениях U_a и R , поскольку в таком случае $H = \text{const}$.

Экспериментальные зависимости мощности кермы от тока анода РУ PANTAK HF160 (серия N) приведены на рис. 4.

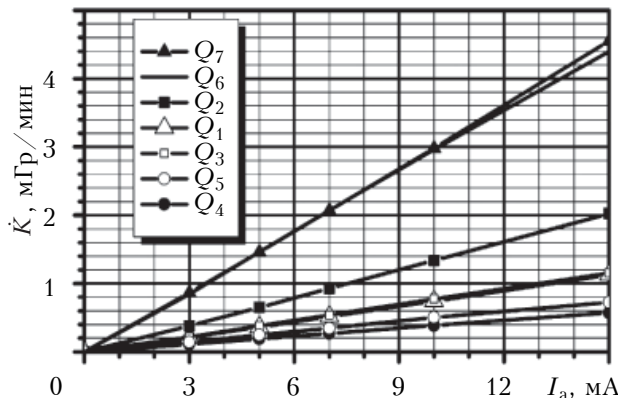


Рис. 4. Зависимости мощности кермы воздуха от тока анода при различных режимах работы РУ $Q_1 \dots Q_7$ (см. табл. 3)

Мощность кермы в воздухе рентгеновского излучения представим в виде

$$\dot{K}(E) = E \mu_{km}^{\text{возд}}(E) \frac{\Phi(E)}{t}, \quad (5)$$

где $\mu_{km}^{\text{возд}}(E)$ — массовый коэффициент ослабления излучения воздухом, $\mu_{km}^{\text{возд}}(E) = \frac{\mu_k^{\text{возд}}(E)}{\rho^{\text{возд}}}$;

$\mu_k^{\text{возд}}(E)$ — линейный коэффициент ослабления излучения воздухом;

$\rho^{\text{возд}}$ — плотность воздуха;

t — время.

В [5] получено выражение для определения суммарного нормированного флюэнса рентгеновского излучения при $E \geq 12$ кэВ

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = \frac{U_a - E}{300} \exp\left(-\sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E)\right) \times \exp\left(-\sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E)\right),$$

где d — толщина фильтра;

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления излучения материалом фильтра;

n, m — количество фильтров.

Первый экспоненциальный множитель в этой формуле учитывает ослабление рентгеновского излучения при прохождении через n дополнительных фильтров, второй — при прохождении через m фильтров собственной фильтрации РУ. Обозначим их произведение как K_{np} — коэффициент пропускания фильтров и перепишем формулу для флюэнса в виде

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = K_{np} \frac{U_a - E}{300}. \quad (6)$$

Подставив формулу (6) в (5), получим

$$\dot{K}_{\Sigma N}(E) = K_{np} \frac{E \mu_{km}^{\text{возд}}(E)}{t} \frac{U_a - E}{300}.$$

С учетом этого выражения и формулы (6) нормированное значение радиационного выхода представим в виде

$$H_N = \frac{1}{E_{\max}} \int_0^{E_{\max}} \dot{K}_{\Sigma N}(E) dE = \frac{1}{U_a} \int_0^{U_a} K_{np} E \mu_{km}^{\text{возд}}(E) (U_a - E) dE. \quad (7)$$

С использованием этой формулы и методики расчета, предложенной в [5], с учетом выражения $U_a = (1 + 0,7 R_E) \bar{E}$ (следует из формулы (3)), были построены зависимости H_N от \bar{E} спектрального разрешения, полученные при $\bar{E} = \text{const}$ и при $U_a = \text{const}$, при этом I_a, R были постоянными.

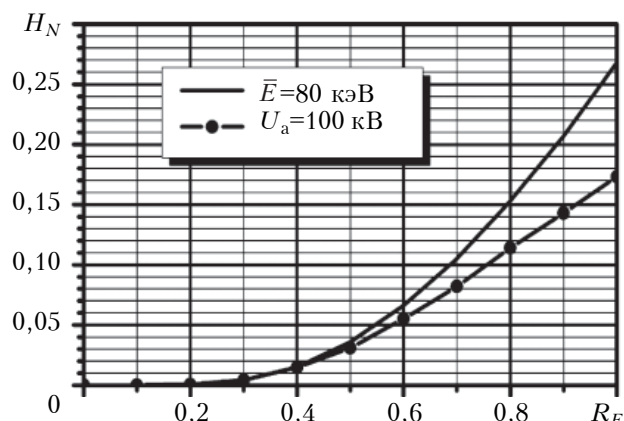


Рис. 5. Зависимости нормированного значения радиационного выхода от спектрального разрешения, полученные для $\bar{E}=80$ кэВ и для $U_a=100$ кВ

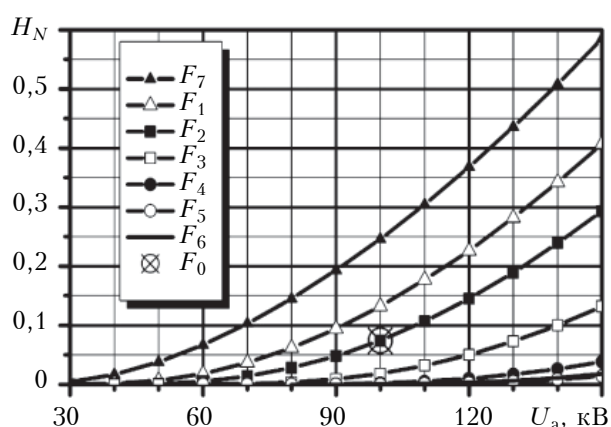


Рис. 6. Зависимости нормированного значения радиационного выхода от напряжения на аноде, полученные для различных фильтров

Как видно из **рис. 5**, с увеличением R_E значение H_N увеличивается, при этом растет и мощность кермы в воздухе. Это связано с тем, что с ростом R_E увеличивается U_a при $\bar{E}=\text{const}$ (рис. 3, а), а средняя энергия уменьшается при $U_a=\text{const}$ (рис. 3, б), что приводит к уменьшению толщины фильтра и в результате — к росту коэффициента пропускания.

В [7] было показано, что по нормированному значению радиационного выхода, можно рассчитать мощность дозы РУ при заданных значениях напряжения на аноде в диапазоне изменения тока анода РТ.

Рассчитать ток анода от минимального его значения до максимального: $I_{a \min}$, ..., $I_{a \max}$ при известных значениях \dot{K}_{\min} , ..., \dot{K}_{\max} можно по следующему алгоритму:

— построить для разрабатываемой РУ зависимости нормированного значения радиационного выхода от напряжения на аноде при его изменении от $U_{a \min}$ до $U_{a \max}$ для различных фильтров (**рис. 6**);

— для выбранной рентгеновской трубки рассчитать H_{N0} на основании приведенных в техни-

ческой документации данных: F_0 , U_{a0} , I_{a0} и \dot{K} (точка \otimes на рис. 6);

— рассчитать значения анодного тока для разрабатываемой РУ при различных значениях мощности кермы в воздухе от \dot{K}_{\min} до \dot{K}_{\max} по формуле

$$I_{ai} = I_{a0} \frac{H_{N0}}{H_{Ni}} \frac{\dot{K}_i}{\dot{K}_0}.$$

Выбор материала фильтра и расчет его толщины

Прежде чем перейти к рассмотрению данного вопроса, необходимо сделать три замечания.

1) Как правило, количество дополнительных фильтров — не более трех: $n \leq 3$ ($i=1, 2, 3$); фильтров собственной фильтрации — не более двух: $m \leq 2$ ($j=1, 2$) [8, табл. 3–6].

2) Количество фильтров собственной фильтрации, их материал и толщина известны априорно. Так, например, для РТ серии N собственная фильтрация составляет 1,0Ве.

С целью уменьшения флуоресцентного излучения фильтров при всех значениях энергии, за исключением 8, 12, 16, 20 и 24 кэВ, устанавливают фильтр 4,0Al (см. табл. 3), причем этот фильтр располагают после всех фильтров (далее от фокуса РТ) [8, п. 4.2.3].

3) Рекомендуемые материалы фильтров РУ приведены в **табл. 4, 5**.

Согласно рис. 1, $\Phi_{\Sigma N}(E_1)=\Phi_{\Sigma N}(E_2)$ или же $K_{np}(U_a-E_1)=K_{np}(U_a-E_2)$. С учетом того, что

$$K_{np} = \exp \left(- \sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E) \right) \times \exp \left(- \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E) \right), \quad (8)$$

найдем

$$\sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E_1) - \sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E_2) = \ln \frac{U_a - E_1}{U_a - E_2} - \Psi_j, \quad (9)$$

$$\text{где } \Psi_j = \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_1) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_2).$$

Таблица 4

Рекомендуемые материалы фильтров терапевтических и диагностических РУ [2–4]

Качество излучения	Материал фильтра
RQR	Al
RQA	Al
RQT	Al, Cu
RQR-M	0,03Mo
RQA-M	0,03Mo+2Al
T7,5 ... T100	Al
T120 ... T280	Al, Cu

Таблица 5
Рекомендуемые материалы фильтров метрологических РУ [8]

Серия излучения	Энергия, кэВ	Материал фильтра
L	10–20	Al
	20–70	Al, Cu
	70–125	Cu, Sn
	125–240	Cu, Sn, Pb
N	10–30	Al
	30–100	Cu
	100–150	Cu, Sn
	150–300	Cu, Sn, Pb
W	60–110	Cu
	110–300	Sn
H	10–60	Al
	70–125	Al, Cu

Подставив формулу (4) в (9) и выполнив математические преобразования, получим

$$d_1[\mu_1(E_1) - \mu_1(E_2)] + \dots + d_n[\mu_n(E_1) - \mu_n(E_2)] = 1,8 - \Psi_j. \quad (10)$$

В случае если применяется один фильтр, получим

$$d = \frac{1,8 - \Psi_j}{\mu(E_1) - \mu(E_2)}. \quad (11)$$

Далее найдем выражения для случая, когда применяют два фильтра.

Предположив, что $\Phi_{\Sigma N \max}(\bar{E}) = \text{const}$, представим выражение (6) в виде

$$K_{\text{пр}}(U_a - \bar{E}) = \text{const}.$$

Проведя математические преобразования с учетом (8), получим

$$\begin{aligned} d_1 \mu_1(\bar{E}) + \dots + d_n \mu_n(\bar{E}) = \\ = \ln(0,7R_E \bar{E}) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(\bar{E}). \end{aligned} \quad (12)$$

На основании выражений (10) и (12) запишем систему уравнений, из которой можно определить толщину каждого из двух фильтров:

$$\begin{cases} k_1 d_1 + k_2 d_2 = A, \\ k_3 d_1 + k_4 d_2 = B, \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \text{где } k_1 = \mu_1(\bar{E}); \quad k_2 = \mu_2(\bar{E}); \quad k_3 = \mu_1(E_1) - \mu_1(E_2); \\ k_4 = \mu_2(E_1) - \mu_2(E_2); \quad A = \ln(0,7R_E \bar{E}) - \sum_j d_j \mu_j(\bar{E}); \\ B = 1,8 - \Psi_j. \end{aligned}$$

Решение полученной системы уравнений представим в виде формул Крамера

$$d_1 = D_1/D; \quad d_2 = D_2/D, \quad (13)$$

где определители D, D_1, D_2 имеют следующий вид:

$$D = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} A & k_2 \\ B & k_4 \end{vmatrix}; \quad D_2 = \begin{vmatrix} k_1 & A \\ k_3 & B \end{vmatrix}.$$

Для случая когда применяют три фильтра, добавим условие $\Phi_{\Sigma N \max}(E_1) = 0,5 \Phi_{\Sigma N \max}(\bar{E})$, откуда с учетом формул (3) и (4) найдем

$$\begin{aligned} d_1[\mu_1(E_1) - \mu_1(\bar{E})] + \dots + \\ + d_n[\mu_n(E_1) - \mu_n(\bar{E})] = 1,2 - \tilde{\Psi}_j, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } \tilde{\Psi}_j = \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_1) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(\bar{E}).$$

Толщину каждого из трех фильтров определим из системы уравнений, полученной из выражений (10), (12) и (14):

$$\begin{cases} k_1 d_1 + k_2 d_2 + k_3 d_3 = A, \\ k_3 d_1 + k_4 d_2 + k_6 d_3 = B, \\ k_7 d_1 + k_8 d_2 + k_9 d_3 = C, \end{cases}$$

где $C = 1,2 - \Psi_j$; $k_5 = \mu_3(\bar{E})$;

$$k_6 = \mu_3(E_1) - \mu_3(E_2); \quad k_7 = \mu_1(E_1) - \mu_1(\bar{E});$$

$$k_8 = \mu_2(E_1) - \mu_2(\bar{E}); \quad k_9 = \mu_3(E_1) - \mu_3(\bar{E}).$$

Решение системы представим в виде формул Крамера

$$d_1 = D_1/D; \quad d_2 = D_2/D; \quad d_3 = D_3/D, \quad (15)$$

$$\text{где } D = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 & k_5 \\ k_3 & k_4 & k_6 \\ k_7 & k_8 & k_9 \end{vmatrix}; \quad D_1 = \begin{vmatrix} A & k_2 & k_5 \\ B & k_4 & k_6 \\ C & k_8 & k_9 \end{vmatrix};$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} k_1 & A & k_5 \\ k_3 & B & k_6 \\ k_7 & C & k_9 \end{vmatrix}; \quad D_3 = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 & A \\ k_3 & k_4 & B \\ k_7 & k_8 & C \end{vmatrix}.$$

В табл. 6 приведены значения толщины фильтра, рассчитанные по формуле (11) для всех режимов работы РУ PANTAK HF160 (см. табл. 3) при использовании одного фильтра. Кроме того, для режима Q5 расчеты проводились по формуле (13) для случая использования двух фильтров. Значения \bar{E} и h рассчитаны в соответствии с [5], $\mu(E_i)$ взяты из [10, с. 226, 234, 246].

Из табл. 6 видно, что:

– отклонение \bar{E} от \bar{E}_0 ($\delta E = (\bar{E} - \bar{E}_0)/\bar{E}_0$) при рассчитанной толщине фильтра не превышает 2%;

– коэффициент гомогенности находится в диапазоне $0,9 \leq h < 1$;

– при $R_E = \text{const}$ и $\bar{E} = \text{const}$ (режим Q5) при разных фильтрах значения H_N , а значит, и мощности кермы в воздухе различны, поскольку значения коэффициента пропускания $K_{\text{пр}}$ тоже разные.

На основании вышеизложенного можно установить, каким образом связаны между собой основные характеристики рентгеновских установок (рис. 7).

1. Назначение рентгеновских установок определяет качество рентгеновского излучения — среднюю энергию \bar{E} и мощность кермы в воздухе рентгеновского излучения \dot{K} (табл. 1).

2. Средняя энергия определяется напряжением на аноде рентгеновской трубки U_a и

спектральным разрешением R_E (см. формулу (3)).

3. Мощность кермы в воздухе определяется напряжением на аноде (см. рис. 6), током анода рентгеновской трубки (зависимость — линейная, см. рис. 4), спектральным разрешением (см. рис. 5), толщиной фильтров и их материалами. Фильтры определяют коэффициент пропускания. Меняя фильтры при постоянных R_E и \bar{E} , можно изменять \dot{K} .

Таблица 6

Толщина фильтров и характеристики РУ PANTAK HF160 для различных режимов работы

Режим работы	$\mu(E_1)$, см ⁻¹ [9]	$\mu(E_2)$, см ⁻¹ [9]	d , мм	$K_{пр}$	H_N , 10 ⁻⁴	\bar{E} , кэВ	h [5]	\bar{E}_0 , кэВ [8]	$\delta\bar{E}$, %
Q_7	8,81	3,97	3,63Al	—	4,820	24,2	0,91	24	0,8
Q_1	135,8	53,8	0,1Cu	—	9,052	32,4	0,94	33	-1,8
Q_2	46,95	17,31	0,5Cu	—	17,93	47,5	0,90	48	-1,0
Q_3	18,79	8,33	1,61Cu	—	13,79	64,1	0,93	65	-1,4
Q_4	9,78	4,7	3,42Cu	—	12,03	81,5	0,94	83	-1,8
Q_5	18,39	9,86	2,1Sn	0,079	8,601	99,4	0,96	100	-0,6
	—	—	1,37Sn+2,7Cu	0,064	6,93	99,5	0,97		-0,5
	5,79	3,45	7,55Cu	0,047	5,098	99,3	0,96		-0,7
Q_6	13,54	5,77	2,27Sn	—	33,6	117,4	0,95	118	-0,5

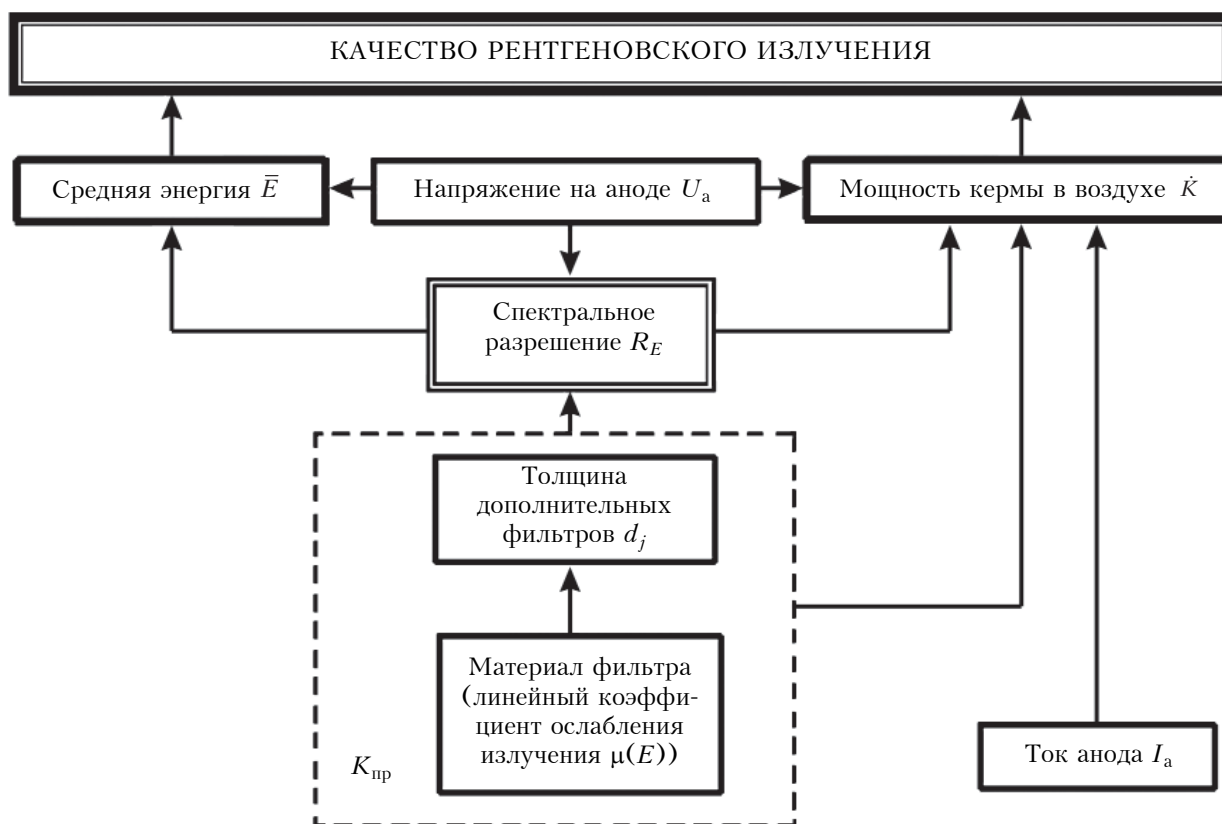


Рис. 7. Взаимозависимость между основными характеристиками рентгеновских установок

4. Спектральное разрешение определяется напряжением на аноде рентгеновской трубки, толщиной фильтров и их материалами.

5. Толщина фильтра определяется его материалом (линейным коэффициентом ослабления рентгеновского излучения).

Алгоритм расчета характеристик рентгеновских установок

1. В зависимости от назначения РУ определить:

- \bar{E} или диапазон \bar{E} : $\bar{E}_{\min}, \dots, \bar{E}_i, \dots, \bar{E}_{\max}$;
- \bar{K} или диапазон \bar{K} : $\bar{K}_{\min}, \dots, \bar{K}_i, \dots, \bar{K}_{\max}$.

2. В зависимости от \bar{K} определить R_E (табл. 2).

3. По формуле (3) рассчитать U_a или диапазон U_a : $U_{a\min}, \dots, U_{ai}, \dots, U_{a\max}$.

4. Выбрать материал фильтров. По формулам (11), (13) или (15) рассчитать их толщину.

5. Вычислить \bar{E} [5].

6. Вычислить h [5] и оценить погрешность расчета \bar{E} : если $0,9 \leq h < 1$, то $\delta \bar{E} < 3\%$ [1]; если $0,8 \leq h < 0,9$, то $\delta \bar{E} < 15\%$ [5].

7. Выбрать рентгеновскую трубку с требуемыми напряжением $U_{a\min}, \dots, U_{a\max}$ и материалом мишени, в технической документации на которую приведено: $I_{a0\min}, \dots, I_{a0\max}$; \bar{E} при U_{a0} и фильтре F_0 ; \bar{K} при I_{a0} .

Следует отметить, что основной характеристикой при выборе РТ является напряжение на аноде, поскольку мощность кермы в воздухе, как правило, приводится при токе $I_a = 1$ мА (табл. 1, 2), который обеспечивают рассматриваемые в статье РУ.

Ток анода можно рассчитать по алгоритму, приведенному выше в разделе «Радиационный выход».

В заключение необходимо отметить, что окончательно определить характеристики рентгеновских установок и их погрешность можно только экспериментальным путем при измерениях.

Выводы

Таким образом, установленная взаимозависимость между основными характеристиками рент-

геновских установок позволила при значениях коэффициента гомогенности от 0,8 до 1 разработать простой алгоритм их расчета, позволяющего выбрать рентгеновскую трубку и фильтры, обеспечивающие рентгеновское излучение заданного качества.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Душкин С. А., Иванский В. Б., Куров А. М. и др. Погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 3. — С. 44–49.

2. IEC 61267:2005-11. Medical diagnostic X-ray equipment. Radiation conditions for use in the determination of characteristics.

3. DIN 6809-4:1987-04. Clinical dosimetry. Applications of X-rays with peak voltages between 10 and 100 kV in radiotherapy and soft tissue diagnostics.

4. DIN 6809-5:1996-02. Clinical dosimetry. Part 5: Application of X-rays with peak voltages between 100 and 400 kV in radiotherapy.

5. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Расчет характеристик рентгеновского излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 6. — С. 60–64.

6. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Исследования метрологических характеристик установки рентгеновской типа PANTAK HF160 // Тр. VI Межд. научн.-техн. конф. «Метрология и измерительная техника». Т. II. — Харьков. — 2008. — С. 261–265.

7. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Радиационный выход рентгеновской установки // Тр. VII Межд. научн.-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка». Т. II. — Харьков. — 2010. — С. 253–257.

8. ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгенівські та гамма-випромінювання для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та для визначення їх чутливості в залежності від енергії фотонів. Ч. 1. Характеристики випромінень та методи, що їх створюють.

9. Рентгеновские лучи: справочник / Под ред. М.А. Блохина. — Москва: Изд-во иностранной литературы, 1960.

10. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. — Киев: Наукова думка, 1975.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.06 2015 г.

А. М. ОРОБІНСЬКИЙ

Україна, м. Харків, Національний науковий центр «Інститут метрології»

E-mail: orobin@mail.ru

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНІВСЬКИХ УСТАНОВОК

Встановлено взаємозалежність основних характеристик рентгенівських установок: середньої енергії, напруги на аноді, тока анода рентгенівської трубки, спектрального розподілення, товщини фільтрів та їх матеріалів. Розроблено алгоритм розрахунку цих характеристик за відомими значеннями середньої енергії та потужності керми у повітрі з урахуванням спектральні роздільної здатності для отримання рентгенівського випромінювання заданої якості.

Ключові слова: рентгенівська установка, рентгенівська трубка, рентгенівське випромінювання, напруга на аноді, струм анода, спектральна роздільна здатність, середня енергія, потужність керми у повітрі.

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF X-RAY DEVICES

Actuality of this work is related to human radiation safety during tuning and regulation of X-ray devices in the process of their development and production. The more precise the calculations for the device are, the less time is required for its tuning and regulation, and thus people are less exposed to radiation. When developing an X-ray device, it is necessary to choose an X-ray tube and filters taking into account the application domain of the device. In order to do this, one should know anode voltage, X-ray tube anode current, material and thickness of filters, i.e. to calculate these characteristics at the set quality of X-ray radiation. The known published studies do not give any solution to this problem.

The scientific novelty of this work is that it establishes the interdependence between main characteristics of the X-ray device: the function of the device defines the quality of X-ray radiation (mean photon energy and air kerma power); mean photon energy depends on the X-ray anode tube voltage and spectral resolution; air kerma power depends on anode tube voltage, current of X-ray tube anode, spectral resolution, thicknesses of the filters and their materials; spectral resolution depends on thicknesses of filters and their materials; thickness of filters depends on the material of the filter (the linear coefficient of weakening of X-ray radiation). Knowledge of interdependence of basic characteristics of the X-ray devices allows developing simple algorithm for their calculation at the values of homogeneity coefficient from 0,8 to 1, which makes it possible to choose an X-ray tube and filters with the purpose of obtaining X-ray radiation of the set quality.

Keywords: X-ray device, X-ray tube, X-ray radiation, anode voltage, anode current, spectral resolution, mean photon energy, air kerma power.

REFERENCES

1. Dushkin S.A., Ivanskyi V.B., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. The measurement errors of X-ray devices features. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2011, no. 3, pp. 44-46. (Rus)

2. IEC 61267:2005-11. Medical diagnostic X-ray equipment. Radiation conditions for use in the determination of characteristics.

3. DIN 6809-4:1987-04. Clinical dosimetry. Applications of X-rays with peak voltages between 10 and 100 kV in radiotherapy and soft tissue diagnostics.

4. DIN 6809-5:1996-02. Clinical dosimetry. Part 5: Application of X-rays with peak voltages between 100 and 400 kV in radiotherapy.

5. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. The calculation of features of X-ray radiation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no. 6, pp. 60-64. (Rus)

6. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. [Researches of metrology features of X-ray device type of PANTAK HF160]. *Proc. of the 6th Int. sc.-tech. conf. "Metrology and measuring technique"*, vol. II, Kharkov, 2008, pp. 261-265. (Rus)

7. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. [Radiation output of X-ray device]. *Proc. of the 7th Int. sc.-tech. conf. "Metrology and measuring technique"*, vol. II, Kharkov, 2010, pp. 253-257. (Rus)

8. DSTU ISO 4037-1:2006. Standartne rentgenivske ta gamma-vyprominennya dlya kalibruvannya dozymetriv i vymiryuvachiv potuzhnosti dozy ta dlya vyznachennya iikh chutlyvosti v zalezhnosti vid energiii fotoniv. Ch. 1. Kharakterystyky vyprominen' ta metody, shcho iikh stvo-ryuyut' [State Standard ISO 4037-1:2006, part 1]. (Rus)

9. [X-rays: Reference book]. Ed. by M.A. Blohin, Moscow, Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1960. (Rus)

10. Nemec O.F., Gofman Y.V. *Reference book on nuclear physics*. Kiev, Naukova dumka, 1975. (Rus)

К. ф.-м. н. Е. В. ВЕЛИЧКО

Украина, г. Мелитополь, Таврический государственный агротехнологический университет
E-mail: velichko_ev@i.ua

СПОСОБ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Рассмотрена задача определения положения в пространстве источника излучения, скорости волны и время начала излучения по данным датчиков, расположенных в одной плоскости. Задача сведена к поиску минимума нелинейной функции пяти переменных. Идея состоит в использовании новых пяти параметров, по которым однозначно определяются искомые неизвестные. Относительно новых параметров функция принимает вид, пригодный для применения метода наименьших квадратов. Приведены результаты численного эксперимента, проведенного в системе компьютерной алгебры Maple, которые иллюстрируют достаточно высокую точность предлагаемого метода решения поставленной задачи.

Ключевые слова: задача локации, обратная кинематическая задача, разностно-дальномерный метод, точечный источник излучения, однородная среда, функция невязки.

Задачам локации посвящены многие работы, среди которых, например, [1–4]. Определение места положения источника излучения по известному времени прохождения волны через точку, в которой находится датчик, появляется, например, при определении эпицентра землетрясения [5] и мест гидравлических разрывов пластов земной коры [6]. Для определения расстояния от датчика до объекта — источника излучения обычно необходима информация о разности фаз излученного и принятого сигналов, которая обрабатывается в специальном блоке прибора, принимающего сигнал. Однако существует методика, которая позволяет обойтись без фазового анализа и использовать только информацию о значениях времени фиксации сигнала системой датчиков. При этом, соответственно, не требуется сложного оборудования, что существенно снижает себестоимость соответствующих технологий.

Некоторые современные авторы классифицируют такую задачу как обратную кинематическую [7, 8] и строят функционал, который представляет собой сумму разностей значений расчетного и фактического времени поступления сигнала в каждой паре датчиков. Минимизировать такой функционал предлагается итерационными методами. В [9] с помощью аналогичных методов авторы исследуют точность определения искомым величин при наземном расположении датчиков и в вертикальной скважине.

Другие авторы рассматривают такой метод определения положения источника сигнала как разностно-дальномерный [10, 11]. Соответствующий функционал состоит из слагаемых, которые учитывают как время следо-

вания сигнала к датчику, так и разницу в показаниях нескольких датчиков, размещенных на разном расстоянии от источника. Предлагается численно находить корни нелинейной системы, которая появляется после вычисления частных производных. Как показано в [12], возможно также использование корреляционных методов при поиске источника разностно-дальномерным методом. Если датчик позволяет определять не только расстояния, но и углы, это значительно упрощает соответствующую задачу [13].

Отметим, что в рассматриваемых работах авторы формулируют задачу как поиск параметров, минимизирующих некоторый функционал, но нахождение самих параметров остается сложной вычислительной задачей. На данный момент отсутствуют формулы, позволяющие непосредственно определить искомые величины. Для этого, как правило, применяются итерационные методы поиска экстремума функций нескольких переменных, что требует аккуратного выбора начального приближения, подбора параметров, обеспечивающих сходимость метода и выбора точности, от которого зависит количество итераций. Естественно, что сокращение времени обработки результатов измерений за счет применения «прямого счета» вместо итерационных процедур является весьма важным в задачах локации, которые обычно решаются в режиме реального времени.

Для определения положения источника сигнала на плоскости автору ранее удалось построить эффективный алгоритм нахождения координат источника излучения, скорости распространения сигнала и времени его излучения [14]. Целью данной работы является разработка эффективного способа определения координат источни-

ка сигнала в пространстве, а также времени начала излучения с помощью датчиков, расположенных в одной плоскости, по данным о времени срабатывания каждого из датчиков.

Постановка задачи и метод решения

В однородной изотропной среде находится точечный источник сигнала, который срабатывает в некоторый момент времени. В результате распространяется сферическая волна с постоянной, но не известной заранее скоростью. В некоторой плоскости расположены датчики в количестве $n \geq 5$, каждый из которых срабатывает в момент прохождения сигнала через точку пространства, где находится этот датчик. Требуется определить координаты источника излучения, а также скорость волны на основании данных о времени срабатывания каждого из датчиков.

Для решения поставленной задачи введем прямоугольную декартову систему координат $Oxyz$ так, чтобы источник излучения находился в полупространстве $z \geq 0$, а датчики располагались в плоскости $z=0$. Будем считать, что источник излучения находится в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$ и включается в момент времени t_0 , i -й датчик — в точке $M_i(x_i, y_i, 0)$ и срабатывает в момент времени t_i . Скорость движения волны обозначим через v . Отметим, что по физическому смыслу v не может быть отрицательной величиной. Таким образом, необходимо по заданным значениям x_i , y_i и t_i , $i = 1, n$, найти x_0, y_0, z_0, t_0 и v .

Расстояние L_i между источником и i -м датчиком, с одной стороны, равно

$$L_i = M_i M_0 = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2},$$

а с другой, $L_i = vT_i$, где $T_i = t_i - t_0$ — время, которое проходит с момента излучения до момента срабатывания соответствующего датчика. Известные величины x_0, y_0, z_0, t_0, v можно определить из системы уравнений

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2} = v(t_i - t_0), \quad (1)$$

где $i = \overline{1, n}$.

Поскольку неизвестных величин пять, количество уравнений, а значит, и датчиков должно быть не меньше пяти. На практике для повышения точности локации количество датчиков берется с запасом, и в этом случае из-за погрешности измерений система уравнений (1) будет, скорее всего, несовместной. Тогда вместо системы (1) необходимо рассматривать функцию

$$F(x_0, y_0, z_0, t_0, v) = \sum_{i=1}^n \left(\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2} - v(t_i - t_0) \right)^2 \quad (2)$$

и решать задачу нахождения ее минимума:

$$F(x_0, y_0, z_0, t_0, v) \rightarrow 0. \quad (3)$$

Поскольку эта функция не является рациональной, нахождение аналитического решения задачи сопряжено с существенными трудностями.

Предлагается в качестве функции невязки выбрать выражение

$$\sum_{i=1}^n \left(v^2(t_i - t_0)^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2 - z_0^2 \right)^2.$$

Введя новые параметры $\alpha, \beta, \gamma, \eta, \delta$, получим функцию невязки в следующем виде:

$$G(\alpha, \beta, \gamma, \eta, \delta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left(\alpha t_i^2 + \beta t_i + \gamma x_i + \eta y_i + \delta - x_i^2 - y_i^2 \right)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где $\alpha = v^2$; $\beta = -2v^2 t_0$; $\gamma = 2x_0$; $\eta = 2y_0$;

$$\delta = v^2 t_0^2 - x_0^2 - y_0^2 - z_0^2.$$

Находя частные производные и приравнявая их к нулю, получаем систему линейных уравнений (5). После ее решения относительно $\alpha, \beta, \gamma, \eta, \delta$ искомые величины x_0, y_0, z_0, t_0, v найдем по формулам

$$v = \sqrt{\alpha}, \quad t_0 = -0,5\beta / \alpha; \quad x_0 = 0,5\gamma; \quad y_0 = 0,5\eta;$$

$$z_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta^2}{\alpha} - \gamma^2 - \eta^2 - 4\delta}. \quad (6)$$

$$\begin{cases} \alpha \sum_{i=1}^n t_i^4 + \beta \sum_{i=1}^n t_i^3 + \gamma \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i + \eta \sum_{i=1}^n t_i^2 y_i + \delta \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i^2 + \sum_{i=1}^n t_i^2 y_i^2, \\ \alpha \sum_{i=1}^n t_i^3 + \beta \sum_{i=1}^n t_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^n t_i x_i + \eta \sum_{i=1}^n t_i y_i + \delta \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i x_i^2 + \sum_{i=1}^n t_i y_i^2, \\ \alpha \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i + \beta \sum_{i=1}^n t_i x_i + \gamma \sum_{i=1}^n x_i^2 + \eta \sum_{i=1}^n x_i y_i + \delta \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i^3 + \sum_{i=1}^n x_i y_i^2, \\ \alpha \sum_{i=1}^n t_i^2 y_i + \beta \sum_{i=1}^n t_i y_i + \gamma \sum_{i=1}^n x_i y_i + \eta \sum_{i=1}^n y_i^2 + \delta \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i + \sum_{i=1}^n y_i^3, \\ \alpha \sum_{i=1}^n t_i^2 + \beta \sum_{i=1}^n t_i + \gamma \sum_{i=1}^n x_i + \eta \sum_{i=1}^n y_i + \delta n = \sum_{i=1}^n x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2. \end{cases} \quad (5)$$

Таким образом, задача решена. Если же хотя бы одно из подкоренных выражений в (6) окажется отрицательным, это будет означать, что при определении одного или нескольких значений x_i , y_i или t_i возникли существенные погрешности.

Численные эксперименты

Для проверки теоретических рассуждений были проведены численные эксперименты в системе компьютерной алгебры Maple. Решалась следующая модельная задача.

В момент времени $t_0=0$ источник излучения, который находится в точке с координатами $x_0=1$, $y_0=2,5$, $z_0=3$, генерирует волну, которая движется со скоростью $v=0,05$. На плоскости $z=0$ находится семь датчиков в точках с координатами $(1, 0, 0)$, $(2, 0, 0)$, $(3, 0, 0)$, $(3, 4, 0)$, $(2, 4, 0)$, $(1, 4, 0)$ и $(5, 7, 0)$. На рисунке изображено положение датчиков, а также проекция источника излучения на плоскость $0xy$.

Поскольку на практике результаты, полученные при помощи датчиков, имеют некоторую погрешность, будем добавлять к расчетному времени слагаемое $0,1i/(2i+1)$:

$$t_i = t_0 + \frac{1}{v} \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + z_0^2} + \frac{0,1i}{2i+1}, i = \overline{1, 7}.$$

Тогда значения времени срабатывания датчиков с указанными координатами будут следующими:

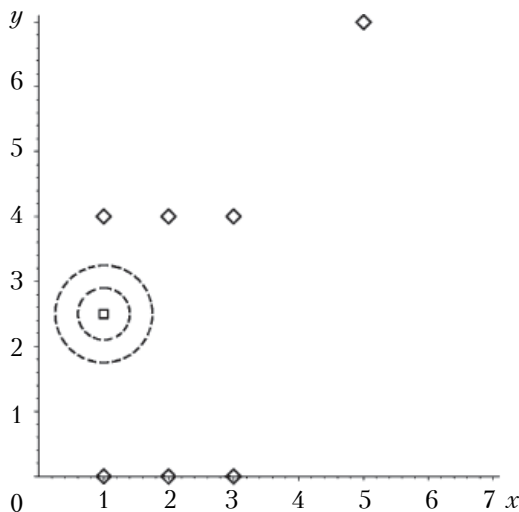
$t_1=78,1358$; $t_2=80,6626$; $t_3=87,7925$; $t_4=78,1469$; $t_5=70,0455$; $t_6=67,1282$; $t_7=134,5829$.

Решая систему уравнений (5) на основании имеющихся данных, получим:

$\alpha=0,0025$; $\beta=0,0015$; $\gamma=1,9966$; $\eta=5,0007$; $\delta=-16,3303$.

Теперь можем найти значения искоемых величин:

$v=0,0499$, $t_0=-0,3044$, $x_0=0,9983$, $y_0=2,5003$, $z_0=3,0136$.



Расположение объекта (квадрат) и датчиков (ромбы) в тестовой задаче

Сравнение этих значений с заданными при постановке модельной задачи ($v=0,05$; $t_0=0$; $x_0=1$; $y_0=2,5$; $z_0=3$) указывает на достаточно удовлетворительную точность расчетов, даже с учетом внесенной погрешности, имитирующей неидеальность датчиков. При исключении этой погрешности полученные результаты совпадают с точностью до пятого знака после запятой.

Отметим, что использование итерационных процедур для минимизации невязки, которые использовались в [7, 8, 10, 11], в лучшем случае позволят только повторить полученные результаты, т. к. предложенный в данной статье метод гарантированно находит минимум функции невязки.

Заключение

Таким образом, применение разработанного способа аналитического определения времени начала излучения, скорости волны и координат точечного источника излучения по данным, полученным от расположенных в одной плоскости датчиков, более эффективно, чем использование итерационных методов. Предложенный способ не подразумевает выбора начального приближения и является более быстрым, чем другие существующие, что важно при решении задачи локации в реальном времени. Численные эксперименты показали достоверность полученных результатов даже при наличии небольших погрешностей данных, полученных с датчиков.

Дальнейшие исследования будут направлены на обобщение предложенной методики на случай, когда датчики расположены не в одной плоскости, а произвольным образом в пространстве. Кроме этого, предполагается исследование устойчивости предложенного способа поиска минимума функции невязки к ошибкам исходных данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Аверьянов В. Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. — Москва: Наука и техника, 1978.
2. Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А. Ю. Гриневы. — Москва: Радиотехника, 2005.
3. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. — Москва: Сов. Радио, 1977.
4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. — Москва: Радио и связь, 1993.
5. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию. — Новосибирск: Сибирское отделение Российской академии наук, НИЦ ОИГМ, 1997.
6. Рабинович Е. В., Туркин А. С., Новаковский Ю. Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2012. — №1(25), часть 1. — С. 104—112.
7. Шмаков Ф. Д., Бортников П. Б. Решение обратной кинематической задачи локации источника сейсмического излучения для горизонтально-слоистой среды // Вестник Югорского государственного университета. — 2011. — Вып. 3(22). — С. 107—111.

8. Шмаков Ф. Д., Бортников П. Б., Кузьменко А. П. Моделирование параметров решения задачи локации в методе наземного микросейсмического мониторинга гидравлического разрыва пласта // Приволжский научный вестник. — 2013. — № 3 (19). — С. 28–39.

9. Яскевич С. В., Дучков А. А. Сравнение точности локации микросейсмических событий при использовании наземных и скважинных систем наблюдений // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 3. — С. 43–51.

10. Поздняков Е. К., Ткаченко В. Н., Коротков В. В. Повышение точности определения координат многопозиционными пассивными комплексами на основе разностно-дальномерного метода и решения задачи в условиях избыточности // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 2014. — Т. 57. — № 9. — С. 18–28. — <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272714090027>

11. Ткаченко В. Н., Коротков В. В., Поздняков Е. К. Применение избыточности входных данных в задаче определения координат цели пассивными многопозиционными

комплексами // Наука і техніка повітряних сил збройних сил України. — 2013. — № 4(13). — С. 64–67.

12. Саликов А. А., Дубыкин В. П., Матвеев Б. В. Определение координат источника радиоизлучения // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2011. — Т. 7. — № 11. — С. 28–30.

13. Борисов Е. Г., Машков Г. М., Турнецкий Л. С. Организация процессов обнаружения измерения в активно-пассивной многопозиционной радиолокационной системе с кооперативным приемом сигналов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. — 2013. — № 3 (140). — С. 130–139.

14. Величко О. В., Кривохата А. Г. Розв'язок задачі локації в області з прямолінійною частиною межі // Вісник Тернопільського національного технічного університету. — 2009. — Т. 14. — № 4. — С. 127–131.

Дата поступления рукописи
в редакцию 16.06 2015 г.

О. В. ВЕЛИЧКО

Україна, м. Мелітополь, Таврійський державний агротехнологічний університет
E-mail: velichko_ev@i.ua

СПОСІБ АНАЛІТИЧНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА ВИПРОМІНЮВАННЯ В ОДНОРІДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто задачу визначення положення в просторі джерела випромінювання, швидкості хвилі і часу початку випромінювання за даними датчиків, розташованих в одній площині. Задача зведена до пошуку мінімуму нелінійної функції п'яти змінних. Ідея полягає у використанні нових п'яти параметрів, через які однозначно визначаються шукані. Щодо нових параметрів функція приймає вигляд, придатний для застосування методу найменших квадратів. Наведено результати чисельного експерименту, який було проведено в системі комп'ютерної алгебри Maple, які ілюструють досить високу точність запропонованого методу вирішення поставленого завдання.

Ключові слова: задача локації, обернена кінематична задача, різницево-дальновимірний метод, точкове джерело випромінювання, однорідне середовище, функція нев'язки.

DOI: 10.15222/TKEA2015.5-6.64
UDC 519.6, 621.396.96

Н. В. ВЕЛИЧКО

Ukraine, Melitopol, Tavria State Agrotechnological University
E-mail: velichko_ev@i.ua

ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING COORDINATES OF THE RADIATION SOURCE IN A HOMOGENEOUS MEDIUM

The article considers the problem of determining the position of a radiation source in space, the wave speed and the start of radiation according to the sensors located in the same plane. Sensors (not less than five) detect the passage of the wave front and do not fix the phase of the transmitted wave. In the scientific literature, some authors approach such problem as the inverse kinematic problem, others use the range difference method.

The problem is reduced to finding the minimum of a nonlinear function of five variables. This function is the sum of the squares of the differences of the calculated and the actual time of the wave front passing through the sensor for each of the sensors. In contrast to the well-known works, where the values of parameters are found by iterative methods, in this article we obtain explicit formulas. The idea is to use the new five parameters, which explicitly determine the target value. Relatively to the new parameters, the function takes the form suitable for application of the method of least squares.

This new method for locating of a radiation source in the homogeneous isotropic environment is easier and more accurate than the existing one. It does not require specifying the initial approximation or iterating.

Keywords: task of location, inverse kinematic problem, range-difference method, the point source of radiation, the homogeneous medium, residual function.

REFERENCES

1. Aver'yanov V.Ya. *Raznesennye radiolokatsionnye stantsii i sistemy* [Spaced radar stations and systems]. Moscow, Nauka i tekhnika, 1978, 184 p. (Rus)
2. *Voprosy podpoverkhnostnoi radiolokatsii* [Questions subsurface radiolocation]. Ed. by A.Yu. Grinev. Moscow, Radiotekhnika, 2005, 408 p. (Rus)
3. Finkel'shtein M.I., Mendel'son V.L., Kutev V.A. *Radiolokatsiya sloistykh zemnykh pokrovov* [Radiolocation layered earth covers]. Moscow, Sov. Radio, 1977, 174 p. (Rus)
4. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya* [The multiposition radiolocation]. Moscow, Radio i svyaz', 1993, 416 p. (Rus)
5. Puzyrev N.N. *Metody i obyekty seismicheskikh issledovaniy. Vvedenie v obshchuyu seismologiyu* [Methods and objects seismic investigations. Introduction to the general seismology]. Novosibirsk, Sibirskoe otделение Rossiyskoy akademii nauk, NITs OIGGM, 1997, 301 p. (Rus)
6. Rabinovich E.V., Turkin A.S., Novakovskii Yu.L. [Ground-based location of microseismic signals for hydraulic fracture monitoring]. *Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*, 2012, no. 1(25), part 1, pp. 104-112. (Rus)
7. Shmakov F.D., Bortnikov P.B. [Solution of the inverse kinematic problem of locating the source of seismic radiation for horizontally layered medium]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, iss. 3(22), pp. 107–111. (Rus)
8. Shmakov F.D., Bortnikov P.B., Kuz'menko A.P. [Modeling of location method parameters for the surface microseismic monitoring of hydraulic fracturing]. *Privolzhskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 3 (19), pp. 28-39. (Rus)
9. Yaskevich S.V., Duchkov A.A. [Comparison of accuracy of microseismic event location using surface and downhole acquisition systems]. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2013, no. 3, pp. 43-51. (Rus)
10. Pozdnyakov E.K., Tkachenko V.N., Korotkov V.V. [Increase of accuracy of definition of coordinates by multiposition passive complexes on a basis of difference-distance measuring method and the problem solution in redundancy conditions]. *Radioelectronics and communications systems*, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 18-28. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272714090027> (Rus)
11. Tkachenko V.N., Korotkov V.V., Pozdnyakov E.K. [Application of input data redundancy to the problem of target's position determination in passive multiposition systems]. *Nauka i tekhnika povitryanykh sil zbroinykh sil Ukrainy*, 2013, no. 4(13), pp. 64-67. (Rus)
12. Salikov A.A., Dubyikin V.P., Matveev B.V. [Determination coordinates of the radio source]. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no. 11, pp. 28-30. (Rus)
13. Borisov E.G., Mashkov G.M., Turnetskii L.S. [Organization process detection-measurements in active-passive multistatic radar with a cooperative signal reception] *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2013, no. 3(140), pp.130-139. (Rus)
14. Velichko O.V., Krivokhata A.G. [The solution of the location problem in the area with the straight-line part of the border]. *Visnyk Ternopil'skogo natsional'nogo tekhnicheskogo universitetu*, 2009, vol. 14, no. 4, pp. 127-131. (Ukr)

РЕЦЕНЗЕНТЫ НОМЕРА

- Демьянчук Борис Александрович, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Военная академия, г. Одесса
- Должиков Владимир Васильевич, докт. физ.-мат. наук, зав. кафедрой, Харьковский национальный университет радиоэлектроники
- Дружинин Анатолий Александрович, докт. техн. наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника»
- Ефименко Анатолий Афанасьевич, докт. техн. наук, зав. кафедрой, Одесский национальный политехнический университет
- Ёдгорова Дилбар Мустафаевна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г. Ташкент
- Зельк Ярема Игоревич, докт. техн. наук, главный научный сотрудник, Институт космических исследований НАНУ и НКАУ, г. Киев
- Лузин Сергей Юрьевич, докт. техн. наук, технический директор ООО «Эремекс», г. Санкт-Петербург
- Олих Ярослав Михайлович, докт. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Рыбка Александр Викторович, канд. физ.-мат. наук, Национальный научный центр Харьковского физико-технического института
- Сольский Иван Михайлович, канд. техн. наук, начальник отдела, НПП «Карат», г. Львов
- Сыворотка Игорь Михайлович, начальник отдела, НПП «Карат», г. Львов
- Томашик Василий Николаевич, докт. хим. наук, ученый секретарь, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАНУ, г. Киев
- Трофимов Владимир Евгеньевич, канд. техн. наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет
- Фаст Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент, Национальный университет «Львовская политехника»

IEPS-2016

Intelligent Energy and Power Systems

2nd IEEE International Conference

June 7-11, 2016, Kyiv, Ukraine



Organized by



Institute
of Electrodynamics
of NASU



National Technical University
of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute"

With Support of



IEEE Ukraine Section



Fund "Lady Science"

Contacts

IEPS 2016 Office, National
Technical University of Ukraine
"Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy Ave., 37,
Kyiv, 03056, UKRAINE
Phone: +380 44 4549315
Fax: +380 44 2362117
E-mail: ieps.ieee@gmail.com
Website: <http://ieps.kpi.ua/>

Conference Topics

Topic 1: Modern Energy Systems and Power Electronics

Topic 2: Renewable Energy Systems and Distributed Generation

Topic 3: Intelligent and Adaptive Energy Systems

Topic 4: Industrial Electronics and Electrical Drives

Topic 5: Special Power Electronic Systems and Applications

Note: The above listed topics do not exclude submission of papers from other specific fields related to the general theme of the conference.

ПСЕ (PPE)



Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми сучасної електротехніки - ПСЕ"
International Scientific & Technical Conference "Problems of present-day electrotechnics - PPE"

Наукові напрямки конференції:

1. Теоретична електротехніка
2. Електроенергетичні комплекси, системи та керування ними
3. Електротехнічні комплекси
4. Силова електроніка
5. Нормативно-регламентуюча база електротехніки та енергетики

Місце проведення конференції:

Національний технічний університет України «КПІ», Київ, просп. Перемоги, 37;
Інститут електродинаміки НАН України, Київ, просп. Перемоги, 56

<http://ppe.kpi.ua>

Тел. (044) 454-94-42; +38(067)442-58-03
E-mail: mailppe2016@gmail.com



Тел./факс +38(057) 758-70-30,
758-70-29, 758-72-30

<http://expoua.all.biz/energetika-elektrotehnika-energoberezhenie-expo26961>

17-я специализированная выставка 11 — 13 марта 2016 г.



**Энергетика. Электротехника.
Энергосбережение**

Контрольно-измерительные приборы. Электроника. Информатика. Связь. Энергетика. Электротехника. Энергосбережение.

Электрические машины, приборы и аппараты.

Турбогенераторы, турбины, компрессоры, вспомогательное оборудование.

Автономные дизель-генераторы, малогабаритные электростанции, бензиновые и дизельные.

Средства передачи электро- и теплоэнергии, управление режимами электрических и теплоснабжающих систем.

Системы распределения электроэнергии, коммутационное оборудование. Аккумуляторы, электрические батареи и элементы.

Кабельно-проводниковая и оптоволоконная продукция.

Изоляционные материалы. Энергосбережение.

Разработка и внедрение энергосберегающей техники, материалов, оборудования и технологий.

Безопасность и надежность эксплуатации оборудования, средства диагностики технического состояния.

Осветительная аппаратура и арматура к ней. Радиационная и экологическая безопасность



ПВЦ «Радмир Экспохолл»
(г. Харьков ул. Академика Павлова, 271)



*Номер готовили
Днепропетровск, Запорожье, Киев,
Львов, Мелитополь, Одесса,
Санкт-Петербург, Ташкент, Харьков,
Черновцы*



Пишите
Подписывайтесь
Читайте