

07;12

## Экспериментальное моделирование алмазной бета-вольтаической батареи

© В.Н. Амосов<sup>1</sup>, В.Н. Бабичев<sup>1</sup>, Н.А. Дятко<sup>1</sup>, С.А. Мещанинов<sup>1</sup>,  
А.Ф. Паль<sup>1,2,\*</sup>, Н.Б. Родионов<sup>1</sup>, А.Н. Рябинкин<sup>1,2</sup>,  
А.Н. Старостин<sup>1</sup>, А.В. Филиппов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГИЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\* E-mail: apal@mics.msu.su

Поступило в Редакцию 14 марта 2018 г.

Изготовлены алмазные монокристаллические *mi p*-структуры (metal–intrinsic diamond–*p*-doped diamond) с барьером Шоттки на основе НТНР *p*-алмаза и CVD *i*-алмаза размером  $3 \times 3$  и  $4.1 \times 4.28$  mm. С помощью широкоапертурного электронного пучка с начальной энергией 110 keV, частично рассеянного на пути к преобразователю слоями алюминия толщиной  $14 \mu\text{m}$  и воздуха 17 mm, исследованы бета-вольтаические характеристики алмазных структур. Максимальная генерируемая мощность достигала 2.18 mW ( $41 \text{ mW/cm}^2$ ) с КПД преобразования 2–3%.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46446.17290

Радиоизотопные батареи представляют большой интерес в качестве долговременных источников электрической энергии, способных работать в опасных и труднодоступных условиях без обслуживания. В зависимости от сорта изотопа и конструкции преобразователя, необходимого для конкретного применения, используются различные методы преобразования энергии ядерного распада в электричество [1]. Один из методов, основанный на генерации неравновесных носителей заряда в полупроводниковых структурах при их облучении  $\beta$ -излучением радиоактивного источника, позволяет осуществить прямое преобразование ядерной энергии в электричество. По сути, этот метод аналогичен фото-вольтаическому методу, используемому в солнечных элементах. Соот-

ветственно преобразователь  $\beta$ -излучения радиоактивного источника в электричество называется  $\beta$ -вольтаическим [2]. В настоящее время в качестве источника во многих работах рассматривается  $\beta$ -изотоп Ni-63, а наиболее распространенным материалом преобразователя является кремний. Главные недостатки преобразователей на основе кремния — невысокий коэффициент полезного действия (КПД) и проблемы с деградацией полупроводниковых структур вследствие радиационных повреждений.

Ранее было показано, что при использовании широкозонных непрямозонных полупроводников КПД  $\beta$ -вольтаического преобразователя повышается с увеличением ширины запрещенной зоны и может достигнуть 30% для алмаза [3]. Дополнительное преимущество широкозонных полупроводников — их высокая радиационная стойкость. С появлением доступных широкозонных материалов начались эксперименты по разработке  $\beta$ -вольтаических преобразователей на их основе, например, с использованием 4H-SiC [4] или GaN [5]. Однако наиболее перспективным материалом с точки зрения ширины запрещенной зоны, радиационной стойкости и других уникальных характеристик является алмаз [6]. До недавнего времени применение алмаза для преобразования энергии было ограничено из-за отсутствия доступной технологии получения качественных монокристаллических алмазных материалов, но теперь в этой области наблюдается существенный прогресс. Хорошо разработаны методы получения монокристаллического НТНР (high temperature–high pressure) и CVD (chemical vapour deposition) алмаза большого размера [7].

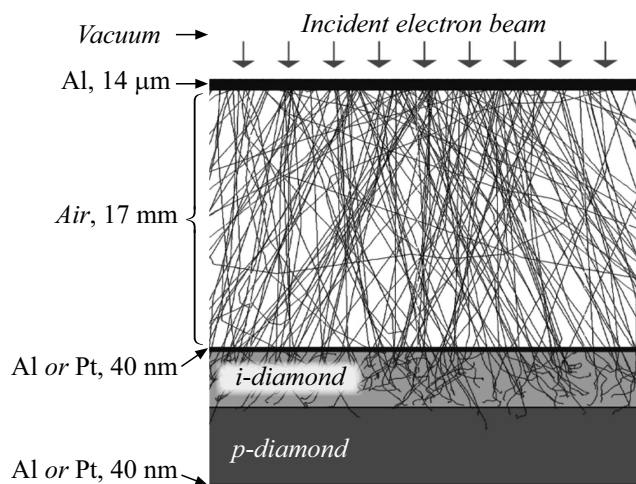
Поскольку существуют принципиальные затруднения при изготовлении и применении легированных  $p$ – $n$ -алмазных структур, в качестве преобразователей широко используются более доступные легированные бором алмазные структуры с барьером Шоттки [8,9]. На основе таких структур был изготовлен прототип ядерной батареи, содержащий 130 алмазных диодов Шоттки общей площадью  $15 \text{ cm}^2$  [6]. В этом устройстве под действием источника  $^{63}\text{Ni}$  с активностью  $5 \text{ mCi/cm}^2$  получена плотность мощности  $3 \text{ nW/cm}^2$  при КПД 0.6%. КПД батареи с источниками  $^{147}\text{Pm}$  и  $^{90}\text{Sr}$  составил 1 и 0.004% соответственно.

Масштабные экспериментальные исследования преобразователей с радиоизотопными источниками тормозятся высокой стоимостью обогащенных изотопов и трудностями их сопряжения с преобразователем. Поэтому для экспериментального моделирования работы такого конвер-

тора в качестве источника электронов часто применяется сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) [6,9,10]. Однако использование электронного микроскопа для симуляции радиоизотопного источника имеет очевидный недостаток: он генерирует моноэнергетический пучок электронов достаточно малого диаметра. Такой пучок не может адекватно моделировать реальный энергетический спектр и угловое распределение электронов, вылетающих из слоя радиоизотопа [11]. В упомянутых выше работах [6,9] электронный пучок СЭМ диаметром  $0.5\ \mu\text{m}$  был направлен перпендикулярно преобразователю, что, вероятно, могло привести к завышенным значениям КПД преобразования алмазного диода Шоттки: 6 [6] и 9.4% [9]. Методика прогнозирования характеристик  $^{63}\text{Ni}$ -батареи на основе моделирования транспорта электронов (методом Монте-Карло) и генерации избыточных носителей тока в полупроводнике совместно с измерениями параметров преобразователя с помощью СЭМ предложена в [11,12].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование  $\beta$ -вольтаического эффекта в алмазных структурах, аналогичных рассмотренным в [8,9], с помощью широкоапертурного электронного пучка, рассеянного на пути к преобразователю алюминиевой фольгой и воздухом. Меняя напряжение на пушке, толщину и материал фольги, а также расстояние до преобразователя, можно превратить моноэнергетический электронный пучок в поток электронов с распределением по энергии и углу, близким к распределению излучения конкретного  $\beta$ -активного изотопа. Использование дополнительной фольги вблизи входной диафрагмы преобразователя позволит получить угловое распределение электронов, приближающееся к изотропному.

В наших экспериментах в качестве  $\beta$ -вольтаического преобразователя использовались алмазные *tip*-структуры (metal–intrinsic diamond–*p*-doped diamond) на подложках из синтетического НТНР-алмаза типа IIb с концентрацией бора  $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ . На подложки нанесли эпитаксиальные алмазные пленки CVD типа IIa в условиях, аналогичных приведенным в [6,8]. Были изготовлены два преобразователя: В3 размером  $3 \times 3\ \text{mm}$  с толщиной подложки  $300\ \mu\text{m}$ , толщиной пленки  $10\ \mu\text{m}$ , контактами из платины толщиной  $40\ \text{nm}$ , с задним сплошным электродом и входным в виде сетки с шагом  $100\ \mu\text{m}$ ; Вr03 с подложкой размером  $4.1 \times 4.28\ \text{mm}$  и толщиной  $500\ \mu\text{m}$ , толщиной пленки  $40\ \mu\text{m}$ , сплошными алюминиевыми контактами толщиной  $40\ \text{nm}$ . Подложка образца Вr03 подвергалась высокотемпературному отжигу

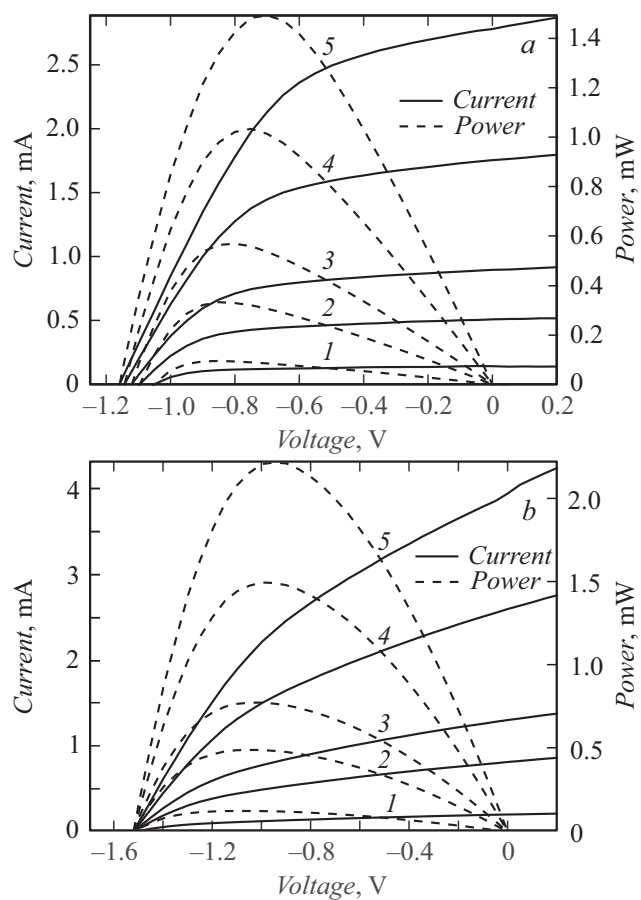


**Рис. 1.** Схема эксперимента. Линиями показаны траектории электронов.

в диапазоне от 1000 до 1500°C с интервалом 100°C и травлению в кислородной среде с последующим эпитаксиальным ростом. На обоих преобразователях была установлена входная диафрагма диаметром 2.6 mm.

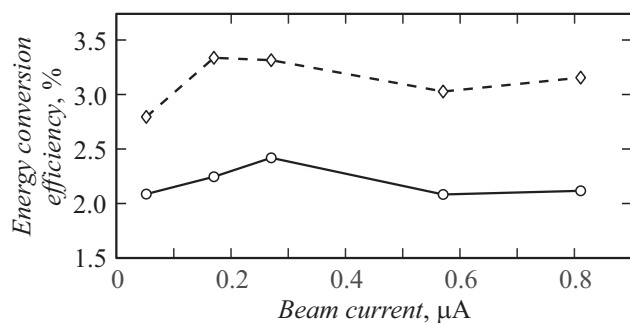
Для имитации  $\beta$ -источника использовалась электронная пушка с размером выходного окна  $12 \times 20$  mm. Моноэнергетический пучок электронов с энергией до 110 keV и плотностью тока до  $1000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  инжектировался из вакуумного объема пушки в атмосферу через алюминиевую фольгу толщиной  $14 \mu\text{m}$ . Помещенный в стандартный коаксиальный корпус  $\beta$ -вольтаический преобразователь располагался на расстоянии 17 mm от фольги. Пучок электронов на пути к преобразователю рассеивался в алюминиевой фольге и воздухе, плотность тока уменьшалась при этом, согласно расчетам, на три порядка. Ток пучка, проходящего через диафрагму преобразователя, измерялся непосредственно с помощью цилиндра Фарадея.

Принципиальная схема эксперимента с указанием основных конструктивных элементов преобразователя показана на рис. 1. На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ) преобразователей ВЗ



**Рис. 2.** ВАХ и зависимости мощности от напряжения для детекторов ВЗ (а) и ВгОЗ (b) при средней энергии пучка 87 keV. Ток пучка,  $\mu\text{A}$ : 1 — 0.052, 2 — 0.17, 3 — 0.27, 4 — 0.57, 5 — 0.81.

и ВгОЗ при фиксированном напряжении электронной пушки (110 kV) и различных токах электронов, а на рис. 3 — зависимости КПД преобразования от тока электронов при напряжении на пушке 110 kV. Чтобы оценить энергетический спектр и угловое распределение элек-



**Рис. 3.** Зависимости КПД преобразования от тока при средней энергии электронов 87 keV. Сплошная линия — преобразователь Вг03, штриховая — В3.

тронов, попадающих во входную диафрагму преобразователя, были выполнены расчеты прохождения электронов через фольгу и воздушный промежуток методом Монте-Карло. Метод расчета описан, например, в [13]. Электроны запускались по всей площади выходного окна пушки, а регистрировались характеристики тех из них, которые попадали во входную диафрагму. Согласно расчетам, при напряжении на пушке 110 kV средняя энергия электронов, попадающих в преобразователь, составляла 87 keV, а средний угол — 15–20°.

Эксперименты показали, что КПД преобразования энергии электронов, проходящих входную диафрагму, составляет 2–3%, максимальная полученная электрическая мощность равна 2,18 mW (удельная мощность на единицу площади преобразователя 41 mW/cm<sup>2</sup>), фактор заполнения ВАХ меняется в диапазоне 0,46–0,65 и 0,37–0,5 для преобразователей В3 и Вг03 соответственно. Специальные эксперименты показали, что тормозное излучение электронов пучка, поглощенных корпусом преобразователя, вносит пренебрежимо малый вклад в вырабатываемую мощность алмазного преобразователя.

Таким образом, в настоящей работе предложен и успешно продемонстрирован экспериментальный метод моделирования процесса  $\beta$ -вольтаического преобразования энергии, а испытанные алмазные структуры показали возможность генерации электрической мощности в десятки mW/cm<sup>2</sup>.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-12-10511).

## Список литературы

- [1] *Prelas M.A., Weaver C.L., Watermann M.L., Lukosi E.D., Schott R.J., Wisniewski D.A.* // Prog. Nucl. Energy. 2014. V. 75. P. 117–148.
- [2] *Olsen L.C., Cabauy P., Elkind B.J.* // Phys. Today. 2012. V. 65. P. 35–38.
- [3] *Olsen L.C.* Review of betavoltaic energy conversion // Proc. of the 12th Space Photovoltaic Research and Technology Conf. Washington, 1993. P. 256–267.
- [4] *Thomas C., Portnoff S., Spencer M.G.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 013505.
- [5] *Voss P.L., Ougazzaden A.* // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 105101.
- [6] *Bormashov V., Troschiev S., Volkov A., Tarelkin S., Korostylev E., Golovanov A., Kuznetsov M., Teteruk D., Kornilov N., Terentiev S., Buga S., Blank V.* // Phys. Status Solidi A. 2015. V. 212. P. 2539–2547.
- [7] *Хмельницкий Р.А.* // УФН. 2015. Т. 182. № 2. С. 143–159.
- [8] *Tarelkin S., Bormashov V., Korostylev E., Troschiev S., Teteruk D., Golovanov A., Volkov A., Kornilov N., Kuznetsov M., Prikhodko D., Buga S.* // Phys. Status Solidi A. 2016. V. 213. P. 2492–2497.
- [9] *Delfaure C., Pomorski M., Sanoit J.* // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 252105.
- [10] *Chandrashekhar M.V.S., Thomas C.I., Li H., Spencer M.G., Lal A.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 033506.
- [11] *Polikarpov M.A., Yakimov E.B.* // Solid State Phenom. 2016. V. 242. P. 312–315.
- [12] *Yakimov E.B.* // Appl. Rad. Isotop. 2016. V. 112. P. 98–102.
- [13] *Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Дятко Н.А., Занозина Е.М., Кочетов И.В., Спицын Д.И., Ткаченко Д.Ю.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. № 1. С. 52–57.