

## Сравнительный анализ источников питания, возбуждаемых различными $\beta$ -изотопами

*И.Е. Абанин*

*НПК «Технологический центр» (г. Москва)*

## Comparative Analysis of Power Sources Excited by Various $\beta$ Isotopes

*I.E. Abanin*

*SMC «Technological Center», Moscow*

Исследованы  $\beta$ -батареи, основанные на прямом преобразовании энергии кремниевыми  $p-i-n$ -диодами, облучаемыми электронами высоких энергий, которые образуются при распаде трития ( $^3\text{H}$ ), изотопов никеля ( $\text{Ni}^{63}$ ) и углерода ( $\text{C}^{14}$ ). Приведено сравнение эффективности указанных изотопов. Показано, что не применявшийся ранее изотоп  $\text{C}^{14}$ , несмотря на большой период полураспада, позволяет создавать источники питания с высоким КПД и внутренним квантовым выходом производства электронно-дырочных пар.

*Ключевые слова:* источники питания;  $\beta$ -вольтаический эффект; КПД;  $^3\text{H}$ ;  $\text{C}^{14}$ ;  $\text{Ni}^{63}$ .

The beta-voltaic batteries based on the direct energy conversion silicon  $p-i-n$  diodes, irradiated by high-energy electrons, which are formed by the tritium decay  $\text{Ni}^{63}$  and  $\text{C}^{14}$ , have been studied. The use of identical diodes has allowed comparing the quality of these batteries with different isotopes. It has been shown that previously not applied isotope  $\text{C}^{14}$ , though high half-life permits to create the power sources with the high efficiency and internal quantum yield in production of electron-hole pairs.

*Keywords:* power sources; beta-voltaic efficiency; tritium;  $\text{C}^{14}$ ;  $\text{Ni}^{63}$ .

**Введение.** Источники тока на основе  $\beta$ -излучения характеризуются компактностью, долговечностью и длительным сроком работы без подзарядки [1]. В настоящее время в мире, и прежде всего в США, ведутся разработки подобных устройств на основе трития ( $^3\text{H}$ ). Прямое преобразование состоит в генерации электронно-дырочных пар в области пространственного заряда полупроводникового прибора. В этом случае  $\beta$ -электроны генерируют в полупроводнике электронно-дырочные пары, которые разделяются электрическим полем  $p-n$ -перехода или контакта металл-полупроводник [2–5]. Недостаток этих устройств, использующих  $p-n$ -переходы и барьеры Шоттки, – высокое самопоглощение электронов высоких энергий источниками  $\beta$ -излучения на основе изотопа никеля ( $\text{Ni}^{63}$ ) и тритида титана ( $\text{TiT}_2$ ). Преимущество таких источников питания – длительный срок службы. Так, например, на основе изотопа  $\text{Ni}^{63}$  можно соз-

дать источники питания со сроком службы более 30 лет [2].  $\beta$ -батареи на основе трития имеют недостатки, связанные с газообразностью источника излучения электронов, что затрудняет перевод его в твердотельную форму.

Перспективными источниками излучения являются изотопы, находящиеся в твердом состоянии, например  $Ni^{63}$ , изотоп прометия ( $Pm^{147}$ ). Однако высокое самопоглощение  $\beta$ -излучения в  $Ni^{63}$  приводит к низкой активности изотопа, а следовательно, и к низкой энергетической эффективности источника питания. В 70-х гг. прошлого столетия исследования  $\beta$ -преобразования проводились с использованием  $Pm^{147}$ . Недостаток конструкций с  $Pm^{147}$  – непродолжительный срок службы, обусловленный малым периодом полураспада этого радионуклида (2,62 года). Трудно преодолимая загрязненность  $Pm^{147}$  сопутствующими радиоактивными изотопами  $Pm^{147}$  порождает нежелательные дозиметрические проблемы. Возникают трудности и при утилизации устройства. Они не являются решающими, однако обуславливают некоторые требования к конструкции изделия, которые рассмотрены в настоящей работе. Изотоп  $C^{14}$ , с одной стороны, имеет достаточно высокий запас энергии, а с другой – низкую стоимость.

О преимуществах использования того или иного изотопа трудно делать выводы только по литературным данным: изотопы применяются с различными по типу и базовому полупроводнику преобразователями. В настоящей работе сопоставлены свойства источников питания, которые созданы на одинаковых кремниевых преобразователях, представляющих  $p-i-n$ -структуры, но с различными изотопами, возбуждающими электрический ток.

**Экспериментальные результаты и обсуждение.** Источники питания состояли из источника  $\beta$ -излучения и специально изготовленного полупроводникового преобразователя на основе  $p-i-n$ -структуры. В качестве вещества для источников электронов высоких энергий использовались гидрид титана ( $TiH_2$ ), никелевая фольга, содержащая 20% изотопа  $Ni^{63}$ , и анилин, полученный на основе изотопа  $C^{14}$ . Размеры источника соответствовали рабочей поверхности  $p-i-n$ -диода. При наложении источника на диод он примыкал к поверхности достаточно плотно, практически не пропуская рассеянный свет. Между поверхностью диода и источником был небольшой воздушный зазор, который не играл существенной роли. При измерениях использован набор источников излучения различной активности.

В качестве преобразователя использовали  $p-i-n$ -диоды с рабочей площадью  $1\text{ см}^2$ . Исходным материалом для создания кристаллов  $p-i-n$ -диодов служили подложки высококачественного монокристаллического кремния марки 100 КЭФ-4400 (111). Слитки кремния с удельным сопротивлением  $1000\text{ Ом}\cdot\text{см}$  выращены методом бестигельной зонной переплавки слитка, полученного по методу Чохральского. Согласно техническим условиям на пластины данной маркировки, плотность дефектов упаковки составляет не более  $5\cdot 10^2\text{ см}^{-2}$ , а плотность дислокаций – менее  $1\cdot 10^2\text{ см}^{-2}$ .

Известно, что коэффициент преобразования  $\beta$ -излучения в электрический ток увеличивается при снижении обратных темновых токов. В технологию  $p-i-n$ -диодов введены две технологические операции: внутреннее геттерирование и создание охранного кольца. Геттерирование реализовано путем формирования на обратной стороне кремниевой пластины сильнолегированной области электронной проводимости. Область закрывалась слоями поликремния и нитрида кремния. Далее проводили геттерирующий отжиг при температуре от 700 до 1000 °С. Выбор высококачественного кремния как исходного материала и введение указанных операций позволили снизить обратные токи в темноте при 295 К и напряжении обратного смещения 40 В практически в 10 раз – до 0,1–0,2 нА.

С описанными полупроводниковыми преобразователями для получения источников питания применялись  $\beta$ -излучатели трех типов. Первый – никелевая фольга, на которую гальваническим способом наносился также слой никеля, но содержащий 20 % изотопа  $\text{Ni}^{63}$ . Второй тип представлял собой фольгу из титана, обработанную в атмосфере трития при высокой температуре до образования на ее поверхности  $\text{TiT}_2$ . Третий излучатель – пористый слой, насыщенный анилином, в котором 98 % атомов углерода – изотоп  $\text{C}^{14}$ . Свойства изотопов приведены в табл.1.

Таблица 1

## Характеристики излучателей, применяемых в исследуемых источниках питания

Параметр	Изотоп		
	$^3\text{H}$	$\text{Ni}^{63}$	$\text{C}^{14}$
Период полураспада	12,3 года	100 лет	5700 лет
Средняя энергия испускаемых электронов, кэВ	5,7	17,6	49
Мощность излучателя при активности 1 Ки, мкВт/Ки	34	100	290
Содержание изотопа в излучателе, %	12	20	70
Толщина рабочего слоя излучателя, мкм	0,35	1,5	80

Активность излучателя обратно пропорциональна периоду полураспада [1]. Можно было ожидать, что у излучателя на основе изотопа трития активность должна быть максимальной, а у  $\text{C}^{14}$  – минимальной, однако это не так. На величину активности влияет количество изотопа в рабочем слое. Из-за сильного самопоглощения толщина рабочего слоя, из которого способны выйти электроны высоких энергий, всего 0,35 мкм (см. табл.1). Кроме того, важно содержание радиоактивного изотопа в рабочем слое. Это содержание максимально у изотопа  $\text{C}^{14}$ . У него же наибольшая толщина рабочего слоя – 80 мкм. Поэтому на практике можно достичь примерно одинаковой активности потока электронов с поверхности излучателей во всех трех случаях. Однако средняя энергия электронов, излучаемых изотопом  $\text{C}^{14}$ , наибольшая.

Для всех диодов измерены вольт-амперные характеристики при прямом и обратном смещении по стандартной методике в темноте. Затем на диод накладывались источники  $\beta$ -излучения различной активности, и измерение вольт-амперных характеристик повторялось. По результатам измерения определены параметры источников излучения, приведенные в табл.2.

Активность потока электронов излучателя  $A_s$  одного квадратного сантиметра, электрическая мощность  $P_{av}$ , развиваемая излучателем, ток короткого замыкания  $I_{cs}$  источника питания, напряжение холостого хода  $U_{x,x}$  источника питания, мощность  $P$ , выделяемая источником питания на сопротивлении нагрузки, определялись непосредственно. КПД вычислялся по формуле

$$\eta = P / E_{av} A_s,$$

где  $E_{av}$  – средняя энергия излучаемого  $\beta$ -электрона.

Максимальный квантовый выход  $Q$  вычислялся путем деления средней энергии электрона на энергию образования электронно-дырочной пары. Достижимый квантовый выход определялся величиной тока генерации при коротком замыкании  $I_{cs}$ :

$$Q = I_{cs} / q P_{av} A_s,$$

где  $P_{av}$  – мощность источника с активностью 1 Ки;  $q$  – заряд электрона.

Таблица 2

## Параметры источников питания

Изотоп	$A_s$ , мКи	$P_{av}$ , нВт	$I_{cs}$ , нА	$U_{x,x}$ , мВ	$P$ , нВт	$\eta$ , %	$Q$	$Q/Q_{max}$
$C^{14}$	0,2	59	7,5	80,5	0,42	0,76	6330	0,45
	0,4	119	11,7	94,5	0,71	0,63	5810	0,42
	1,57	455	28	98	1,96	0,44	3013	0,22
	2,10	609	34	100	2,40	0,35	2735	0,20
	3,35	972	43	116	3,49	0,36	2167	0,16
	4,16	1206	51	121	4,41	0,37	2063	0,15
	5,32	1543	76	131	6,97	0,45	2422	0,17
$^3H$	1,2	43	5,8	58	0,22	0,53	795	0,48
	1,8	64	9,6	69	0,44	0,70	877	0,54
$Ni^{63}$	5	535	40	105	2,81	0,53	1320	0,26
	16	1170	62	117	4,94	0,29	637	0,13
	27	2780	67	120	5,8	0,21	424	0,09

*Примечание:*  $Q$  – квантовый выход преобразователя – количество электронно-дырочных пар, которые производит один электрон высоких энергий в области пространственного заряда преобразователя;  $Q/Q_{max}$  – доля электронно-дырочных пар, участвовавших в формировании тока;  $Q_{max}$  – максимальное количество электронно-дырочных пар, которые могут генерировать один электрон высоких энергий.

Из проведенного эксперимента следует, что КПД уменьшается с ростом напряжения холостого хода источника питания (см. табл.1). Это связано с тем, что электродвижущая сила, которая генерируется потоком быстрых электронов, снижает высоту потенциального барьера и уменьшает среднее электрическое поле в области пространственного заряда полупроводника. В результате ухудшаются условия разделения электронно-дырочных пар и усиливаются рекомбинационные процессы, которые снижают квантовый выход и эффективность источника питания.

**Заключение.** Источники питания, изготовленные на изотопе углерода  $C^{14}$ , имеют высокий квантовый выход электронов и высокий КПД. Это свидетельствует об их высоких эксплуатационных свойствах, которые превышают качество изотопов, традиционно используемых для изготовления ядерных батарей ( $^3H$  и  $Ni^{63}$ ).

## Литература

1. Polymers, phosphors, and voltaics for radioisotope microbatteries / Ed. by E. Kenneth. L. – N.Y. – Washington: CRC PRESS; Boca Raton 2002. – 472 p.
2. Перспективы создания миниатюрного источника тока на бета-вольтаическом эффекте с использованием в качестве активного элемента изотопа никель-63 / А.А. Резнев, А.А. Пустовалов, Е.М. Максимов и др. // Наномикросистемная техника. – 2009. – № 3. – С. 14–16.
3. Eiting C.J., Krishnamoorthy V., Romero E., Jones S. Betavoltaic power cells // Proc. of the 42 Power Source Conference. – 2006 – P. 601.
4. Tritium-powered betacells based on  $Al_xGa_{1-x}As$  / V.M. Andreev, A.G. Kavetsky, V.S. Kalinovsky et al. // Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference (Alaska, Sept. 2000). – 2000. – P. 1253.
5. Rappaport P., Linder E.G. Radioactive charging effects with dielectrics // J. Appl. Phys. – 1953. – Vol. 24. – P. 9.

Статья поступила  
18 мая 2016 г.

**Абанин Иван Евгеньевич** – заместитель директора по специальной технике НПК «Технологический центр» (г. Москва). *Область научных интересов:* микроэлектроника, микросистемная техника, преобразователи и датчики физических величин и микросистемы на их основе, наноэлектроника, нанотехнология, электронная компонентная база. **E-mail: aie@tcen.ru**

Книжные новинки



**Абрамов И.И. Основы моделирования элементов микро- и наноэлектроники. - LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2016. - 444 с.**



В монографии рассмотрены физические основы, проблемы и принципы моделирования приборных структур (элементов) микро- и наноэлектроники. С единых позиций проведена систематизация моделей элементов. Основное внимание уделено наиболее адекватным численным моделям. Книга предназначена для специалистов в области микро- и наноэлектроники, преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам соответствующих специальностей. Монография написана на основе статей автора, опубликованных в ведущих научно-технических журналах Российской Федерации в области микро- и наноэлектроники, и обобщает его сорокалетний опыт работы в данной области науки.

Информацию о книге и ее приобретении можно получить, обратившись на сайт: <https://www.ljubluknigi.ru/>