

**Л.А. ЦВЕТКОВ, А.А. ПУСТОВАЛОВ,
Н.Н. БАРАНОВ, А.А. МАНДРУГИН**

ОСНОВЫ БЕТА-ВОЛЬТАИКИ

**Научные и технологические
аспекты преобразования
энергии бета-распада радионуклидов
в электрическую энергию**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
РадиоСофт**

**Москва
2019**

УДК 621.36.544.58.539.16

ББК 22.383я73

Ц27

Цветков Л.А., Пустовалов А.А., Баранов Н.Н., Мандругин А.А.

Ц27 Основы бета-вольтаики: научные и технологические аспекты преобразования энергии бета-распада радионуклидов в электрическую энергию.— М.: РадиоСофт, 2019.— 336 с.; ил.

ISBN 978-5-93274-268-6

Начало XXI века знаменуется бурным развитием нанотехнологий. На их основе создаются многочисленные микроэлектронные и микро-электромеханические устройства различной сложности и энергоёмкости, для питания которых требуются генераторы мощности в нано-, микро- и милливаттном диапазонах.

Формируется новое научное направление, нацеленное на разработку перспективных нетрадиционных источников питания — миниатюрных, высоконадёжных, безопасных и максимально длительно работающих, не требующих подзарядки в течение многих лет. Таким требованиям в полной мере удовлетворяет бета-вольтаическая полупроводниковая батарея на основе долгоживущего радионуклида. Она с полным основанием может быть отнесена к числу прорывных разработок. Однако на сегодняшний день технология создания таких энергоисточников и их выходные характеристики далеки от совершенства.

Рассмотрены вопросы современного состояния и перспективных направлений исследований по данной проблематике. Приводятся результаты авторских разработок в направлении оптимизации конструкции и существенного повышения параметров бета-преобразователя. Предложены новые технологические решения, нацеленные на создание высокоэффективных отечественных источников автономного электропитания, основанных на новых физических принципах.

Книга предназначена, в первую очередь, для научных работников и инженеров-исследователей, специализирующихся в областях прямого преобразования видов энергии. В качестве учебного пособия будет полезна для преподавателей, студентов и аспирантов фундаментальной физико-химической инженерии и радиохимии высших учебных заведений. Ориентирована на читателей, интересующихся современными прорывными научно-техническими разработками.

Работа выполнена при поддержке РФФИ. Грант № 19-08-00452

УДК 621.36.544.58.539.16

ББК 22.383я73

© ФГБУ науки Объединенный институт высоких температур РАН, 2019

© Государственное учебно-научное учреждение. Химфак МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019

© ФГБУ науки Институт динамики геосфер РАН, 2019

© НПП «БИАПОС», 2019

© Оформление, РадиоСофт, 2019

ISBN 978-5-93274-268-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Современные автономные малогабаритные источники питания	9
2. Радиоактивность	12
3. Способы получения радионуклидов.....	18
4. Преобразование энергии распада радионуклидов в электрическую энергию.	23
4.1. Батареи с непосредственным сбором заряда....	30
4.2. Батареи на контактной разности потенциалов ..	36
4.3. Фотоэлектрические атомные батареи	38
4.4. Батареи со вторичной электронной эмиссией ...	39
4.5. Батареи на полупроводниковом переходе.....	40
5. Радионуклиды для бета-вольтаических атомных батарей.	73
5.1. Требования к выбору радионуклидов	73
5.2. Тритий	84
5.3. Гидриды (тритиды) металлов	92
5.4. Интерметаллиды.....	93
5.5. Углерод-14.....	96
5.6. Никель-63	99
6. Свойства полупроводниковых материалов для бета-преобразователя.....	153
6.1. Электрофизические свойства полупроводников	159
6.1.1. Концентрация носителей заряда в равновесном состоянии полупроводника	159
6.1.2. Метод расчета концентраций	163
6.1.3. Концентрация основных и неосновных носителей в примесных полупроводниках.....	167
6.1.4. Положение уровня Ферми в полупроводниках.....	170
6.1.5. Неравновесное состояние полупроводника ...	172
6.1.6. Плотность тока в полупроводнике	177
6.1.7. Электрические переходы	179
6.1.8. Структура <i>p-n</i> -перехода.....	180
6.1.9. Образование <i>p-n</i> -перехода	181

6.1.10. Энергетическая диаграмма p - n -перехода в состоянии равновесия	186
6.1.11. Температурная зависимость контактной разности потенциалов в полупроводниках	188
6.2. Характеристика полупроводниковых материалов	189
6.2.1. Кремний	190
6.2.2. Алмаз.....	193
6.2.3. Карбид кремния	196
6.2.4. Нитрид алюминия	198
6.2.5. Нитрид галлия	199
6.2.6. Аморфный кремний	199
6.2.7. Арсенид галлия	201
7. Бета-вольтаические преобразователи.....	203
8. Теоретические подходы по определению и оптимизации выходных характеристик атомных батарей	242
9. Способы повышения удельной электрической мощности атомных батарей	266
9.1. Разработка бета-преобразователя на основе полупроводниковой структуры с развитой рабочей поверхностью (3D структуры)	271
9.2. Электрохимическое текстурирование поверхности кремния	272
9.3. Плазмохимическое травление кремния	274
9.4. Анизотропное травление кремния	288
9.5. Разработка способов нанесения микронных слоёв никеля-63 на рабочую поверхность планарных и 3D полупроводниковых структур.....	292
9.6. Газофазное осаждение слоя никеля на текстурированную поверхность кремния	297
9.7. Другие способы модификации основных структурных элементов полупроводникового бета-преобразователя	310
10. Направления практического использования бета-преобразователей	317
Заключение	321
Литература	323

ВВЕДЕНИЕ

В связи с ростом потребностей в использовании портативных электронных устройств, способных работать продолжительное время без обслуживания, *возникла необходимость развития соответствующего научного направления — генераторов микромощности*. Эта область относительно новая и по многим показателям находится на этапе исследования возможностей практической реализации (в первую очередь, в связи с недостаточно высокой эффективностью и высокой стоимостью таких устройств). Рассматриваются возможности построения микроэнергетических систем на различных физических принципах.

В качестве возможного решения задачи, прежде всего, традиционно рассматривается использование современных химических источников тока: литиевых батарей, литий-ионных аккумуляторов, молекулярных суперконденсаторов. Однако удельная энергоёмкость этих устройств ($\text{Вт} \cdot \text{ч/г}$, $\text{Вт} \cdot \text{ч/см}^3$) невелика, максимальный срок службы наилучших образцов не превосходит нескольких лет, диапазон рабочих температур ограничен снизу снижением скорости химической реакции и, как следствие, понижением эдс батареи; сверху — закипанием электролита и саморазрядом.

В последние годы повысился интерес к созданию термоэлектрических генераторов (ТЭГ) по технологии печати термоэлементов с использованием эффективных наноструктурированных термоэлектриков. Печатная технология в принципе может стать основой создания микротермоэлектрических генераторов (микроТЭГ). Выполнение активной тонкоплёночной термоэлектрической структуры по технологии микроэлектроники обеспечивает возможность мультиплицирования отдельных термоэлектрических ячеек с целью получения требуемой выходной мощности микроТЭГ. Ожидается, что даль-

126. *Аверкин С.Н., Пустовалов А.А., Цветков Л.А.* Разработка технологического процесса формирования щелей путём глубокого анизотропного плазменного травления кремния // Отчёт НПП «Биапос». 2016.— 73 с.
127. *Толмачев В.А., Границына Л.С., Власова Е.Н., Волчек Б.З., Нащекин А.В., Ременюк А.Д., Астрова Е.В.* Одномерный фотонный кристалл, полученный с помощью вертикального анизотропного травления кремния // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 8.— С. 47–55.
128. *Kendall D.L.*— Ann. Rev. Mater. Sci. V. 9. P. 373. 1979.
129. *Гук Е.Г., Ткаченко А.Г., Токранова Н.А., Границына Л.С.* и др. Письма ЖТФ. Т. 27. (9). 2001.— С. 64–69.
130. *Долгий А.Л., Клышко А.А., Бондаренко В.П.* Электрохимическое осаждение никеля на макро- и мезопористый кремний // Доклады БГУИР. № 1 (39). 2009.— С. 32–34.
131. *Chen C., et al.*— ACS Applied Materials and Interfaces. V. 8 (37). P. 24638–24644. 2016.
132. *Karunakaran C., Senthilvelan S.* Journal of Molecular Catalysis. A: Chemical. V. 233. 2005.— P. 1–8.

Баранов Николай Николаевич

докт. техн. наук (ОИВТ РАН)

Мандругин Андрей Александрович

докт. хим. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Пустовалов Алексей Антонович

канд. техн. наук (ИДГ РАН)

Цветков Лев Алексеевич

инж.-физик (НПП «Биапос»)

ОСНОВЫ БЕТА-ВОЛЬТАИКИ

**Научные и технологические
аспекты преобразования
энергии бета-распада радионуклидов
в электрическую энергию**

Ответственный за выпуск *А.А. Халоян*

Компьютерная верстка *О.В. Лукьянова*

Дизайн обложки *Л.К. Абдрашитова*

Сдано в набор 12.08.19. Подписано в печать 30.09.19.
Формат 60×90/16. Гарнитура NewtonC. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Печ. л. 21,0. Тираж 300 экз.

Издательство «РадиоСофт»
109125, Москва, Саратовская ул., д. 6/2
www.radiosoft.ru
тел. (499) 177-47-20