

УДК 621.362:621.314

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ

¹Шелехов И.Ю., ²Смирнов Е.И., ¹Рупосов В.Л., ¹Шিশелова Т.И.

¹ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет», Иркутск, e-mail: promteplo@yandex.ru;

²ООО «Термостат», Иркутск

В статье представлен научно-технологический анализ использования термоэлектрических генераторов. Показано, что на данный момент применение термоэлектрических преобразователей оправдано в электронной промышленности при мощностях до нескольких десятков ватт. В бытовой сфере термоэлектрические модули практически не применяются из-за высокой стоимости по отношению к массовому бытовому оборудованию. Сделан вывод, что необходимо внедрение новых технологий производства на плоских и гибких подложках больших размеров. Натурные исследования проводились в действующих системах горячего и холодного водоснабжения. Для исследования параметров термоэлектрических генераторов мы сделали термоэлектрические модули по новой технологии размером 100×100 мм на дюралюминиевой подложке, покрытой диэлектрическим материалом. Изучалась не только возможность преобразования и использования теплопотерь в полезную электрическую энергию, но и стабильность параметров при длительной эксплуатации в реальных условиях. Показано, что стабильные характеристики наблюдаются при токовых нагрузках до 1 А, а разработанные термоэлектрические генераторы возможно использовать совместно со светодиодными осветительными приборами. Доказано, что применение разработанных термоэлектрических модулей позволит обеспечить дежурное и аварийное освещение подвальных помещений или аналогичных помещений, в которых имеется градиент температур. Применение термоэлектрических модулей является экономически высокоэффективным за счет утилизации обычно теряемой тепловой энергии.

Ключевые слова: термоэлектрические устройства, композиционные материалы, преобразование энергии, энергоэффективность

EXPERIENCE OF THERMOELECTRIC GENERATORS

¹Shelekhov I.Y., ²Smirnov E.I., ¹Ruposov V.L., ¹Shishelova T.I.

¹Irkutsk state technical university, Irkutsk, e-mail: promteplo@yandex.ru;

²JSC Termostat, Irkutsk

The paper presents an analysis of the scientific and technological use of thermoelectric generators. It is shown that, at present application of thermoelectric converters is justified in electronic industry at capacities up to several tens watt. In household sphere thermoelectric modules practically are not applied because of high cost in relation to the mass household equipment. It is drawn a conclusion that introduction of new «know-how» on flat and flexible substrates of greater sizes is necessary. Field investigations were carried out in the existing systems for hot and cold water supply. For research of parameters of thermoelectric generators, we have made thermoelectric modules on new technology in the size of 100×100 mm on the duralumin substrate covered by a dielectric material. We studied not only the possibility of transformation and use of heat loss into useful electrical energy, but also the stability of the parameters for long term use in the real world. It is shown that stable characteristics observed in the current loads up to 1 A, and developed thermoelectric generators may be used in conjunction with LED lighting fixtures. It is proved that the use of thermoelectric modules developed will provide courtesy and emergency lighting basements or similar premises in which there is a temperature gradient. The use of thermoelectric modules is highly cost by utilizing heat energy normally lost.

Keywords: thermoelectric devices, composite materials, energy conversion, energy efficiency

Термоэлектрические устройства в виде датчиков температуры широко вошли в наш повседневный быт. С развитием новых технологий в электронной промышленности и появлением новых композиционных материалов расширяются возможности получения новых свойств и характеристик в устройствах, созданных на базе термоэлектрических элементов.

Из теории термоэлектрических эффектов известно, что существует значительное влияние концентрации носителей заряда, или дефектов кристаллической решетки, на термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов. Искусственно создаваемые различными примесями, радиационными полями или другими способами дефекты в кристаллической решетке позволяют изменить свойства полупро-

дников. В основном такие искусственно создаваемые дефекты используют для снижения влияния термоэлектрического эффекта в электронной аппаратуре. Такое воздействие на кристаллическую решетку может как ухудшать термоэлектрические свойства полупроводниковых материалов, так и улучшать их.

Очевидно, что изменение свойств полупроводникового материала зависит не только от его исходных характеристик, но и от вида примесей и от внешнего воздействия, вызывающего дефекты в кристаллической решетке, а также величины, скорости и длительности воздействия. Существенное влияние оказывает температура, при которой происходит процесс формирования композиционных полупроводников. Особенное действие на термоэлектрические свойства

полупроводниковых материалов оказывает скорость термического воздействия в период формирования кристаллических решеток.

Несмотря на то, что термоэлектрические эффекты были исследованы еще в 1821 году Томасом Иоганном Зеебеком, в 1834 году – Жаном-Шарлем Пельтье и в 1858 году – Уильямом Томсоном (Кельвином), практическое применение они нашли только во второй половине XX века. В термоэлектрических охлаждающих устройствах используется эффект Пельтье, который проявляется особенно сильно в цепях, составленных из композиционных полупроводников с электронным (n-тип) и дырочным (р-тип) типами проводимости.

Если электрическое поле имеет направление от дырочного полупроводника к электронному, тогда электроны в полупроводнике n-типа и дырки в полупроводнике р-типа будут двигаться навстречу друг другу. Электрон из зоны проводимости электронного полупроводника после прохождения через границу раздела попадает в заполненную валентную зону дырочного полупроводника и занимает там место дырки. В результате такой рекомбинации высвобождается энергия, которая и выделяется в контакте в виде тепла.

Если ток проходит через границу от электронного полупроводника к дырочному, электроны в электронном и дырки в дырочном полупроводниках будут двигаться в противоположные стороны. Дырки, уходящие от границы раздела, будут пополняться в результате образования новых пар при переходах электронов из заполненной валентной зоны дырочного полупроводника в зону проводимости. На образование таких пар требуется энергия, которая и поставляется тепловыми колебаниями решетки. В результате на контакте тепло будет поглощаться, а сам контакт остывать.

С другой стороны, если тепловые колебания создавать внешним устройством, за счет образования новых пар носителей тока возникнет термоэлектрическая сила, вследствие чего возникает протекание электрического тока. Данное явление возникновения ЭДС в замкнутой электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разнородных проводников (полупроводников), контакты между которыми находятся при различных температурах, получило название эффекта Зеебека или термоэлектрического эффекта. Коротко описать эффект можно как возникновение электрического тока в замкнутой цепи, состоящей из двух разных проводников (полупроводников) при условии, что контакты находятся при

разных температурах. Значение величины возникающего термоЭДС зависит от двух параметров: материала проводников и температур холодного и горячего контактов. Для небольшого интервала температур термоЭДС можно рассчитать по формуле

$$E = \alpha_{12}(T_2 - T_1),$$

где T_1 – температура горячего контакта; T_2 – температура холодного контакта; α_{12} – термоэлектрическая способность пары (или коэффициент термоЭДС).

В ординарном случае коэффициент термоЭДС определяется только материалами полупроводников, но в реальных условиях, когда контакты защищены диэлектриками, изменение температуры становится ключевым параметром. Для некоторых материалов изменение температуры ($dT = T_1 - T_2$) может изменить знак термоЭДС. В связи с вышесказанным лучше применять формулу для выражения термоЭДС следующего вида:

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_{12}(T) dT.$$

Возникновение эффекта Зеебека вызвано следующими составляющими:

- 1) различная зависимость средней энергии электронов от температуры в различных веществах;
- 2) различная зависимость от температуры контактной разности потенциалов;
- 3) фоновое увлечение.

Термоэлектрические модули обладают целым рядом преимуществ по сравнению с другими типами устройств: бесшумность работы; отсутствие подвижных частей; отсутствие рабочих жидкостей; работа в любом пространственном положении; малый размер и вес системы; простота управления.

Термоэлектрические преобразователи представляют собой совокупность последовательно соединенных термопар. Количество может достигать несколько сотен пар. Выход из строя хотя бы одного спая или проводника приводит к потере работоспособности всей системы. Преобразователи не нашли широкого применения из-за сложности и дороговизны технологии их изготовления. Но преимущества, которыми они обладают, обуславливают постоянный рост спроса на них во всем мире и возникновение новых областей для их применения.

На данный момент применение термоэлектрических преобразователей оправдано в электронной промышленности при мощностях до нескольких десятков ватт. При малых мощностях работы они обладают наивысшей среди аналогичных устройств эффективностью, имея при этом

относительно низкую стоимость и высокую надежность работы. В редких случаях применение термоэлектрических модулей оправдано в специализированных установках с особыми требованиями, где мощность доходит до десятков киловатт. В бытовой сфере термоэлектрические модули практически не применяются из-за высокой стоимости по отношению к массовому бытовому оборудованию. Исключением являются бытовые автомобильные холодильники. Кроме этого, применение термоэлектрических модулей ограничивается тем, что массовые технологии производства настроены на изготовление термоэлектрических модулей на стандартной ситалловой подложке размерами 40×40 и 60×48 мм.

Работы по применению новых материалов, усиливающих термоэлектрический эффект, ведут многие научные школы. Основное направление – это создание охлаждающих устройств. Так, например, в 2004 году израильская компания ActiveCool выпустила в продажу новую систему охлаждения компьютеров под названием AC4G, представляющую собой твердотельный термоэлектрический тепловой насос (heatpump). Термоэлектрический преобразователь

создан по технологии изготовления интегральных микросхем. Технология охлаждения построена на основе термоэлектрических компонентов, применяемых в аэрокосмической индустрии и в военных приложениях.

В Иркутском государственном техническом университете ведутся работы, связанные с разработкой топологий интегральных микросхем и технологиями их производства. Используя технологии производства интегральных микросхем и новые композиционные материалы, нами разрабатывается технология серийного производства термоэлектрических модулей на широком спектре подложек размерами до 150×200 мм. При этом основное направление разработки направлено на сложнейшую задачу повышения их термоэлектрической добротности. В настоящее время достигнуты показатели добротности для промышленных материалов на уровне 1,0–1,5, при единичном производстве значение доходит до уровня 2,0. Дальнейшее повышение добротности возможно только на качественно другом уровне создания термоэлектрических сплавов (ямы квантования, нано-технологии и т.д.).

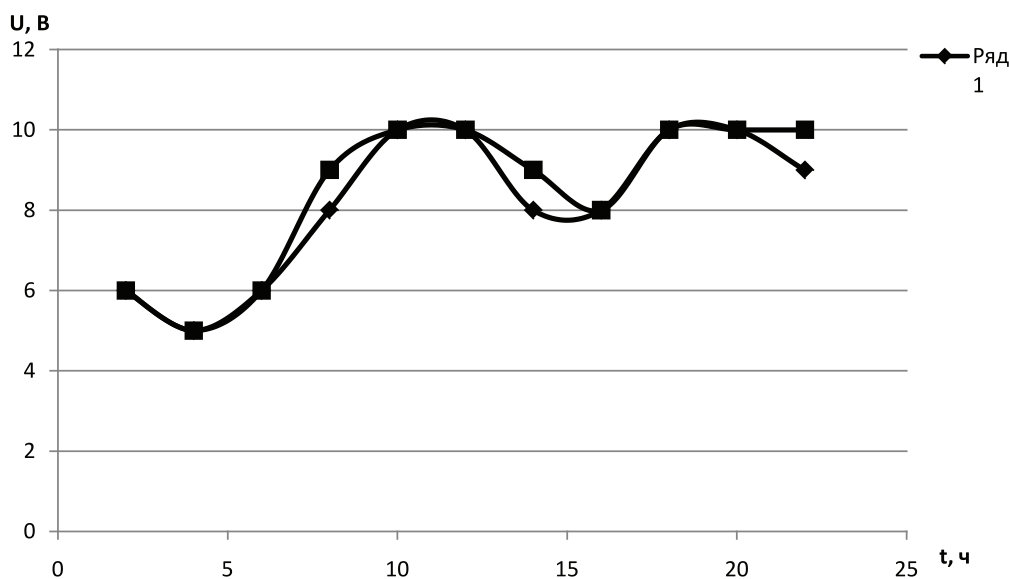


Рис. 1. Исследование термоэлектрических генераторов в системе горячего и холодного водоснабжения жилого дома. Суточный режим. Образец № 1 и № 2

Серийные промышленные термоэлектрические элементы находят применение только в узких специальных областях, так как пока достигают КПД 8–12%, что не позволяет им конкурировать в большой энергетике с тепловыми машинами. Внедрение новых технологий, при которых станет возможным производить термоэлектрические

модули на подложках больших размеров, и не только на плоских, но и на рельефных, расширит рамки областей применения.

Материал, на котором сформированы термоэлектрические элементы, во многом определяет не только спектр применения термоэлектрических генераторов, но и в значительной степени определяет его

электрофизические свойства. Любой материал обладает индивидуальными характеристиками, такими как гибкость, пластичность, температурные коэффициенты расширения, теплопроводность, адгезия, диэлектрические свойства, восприимчивость к окружающей среде и т.д. В зависимости от свойств материала подложки разрабатываются технологические режи-

мы формирования и придания конкретных электрофизических характеристик термоэлектрическим элементам. Для исследования параметров термоэлектрических генераторов, изготовленных по разработанной нами технологии, были сделаны модули размером 100*100 мм на дюралюминиевой подложке, покрытой диэлектрическим материалом на основе оксида алюминия.

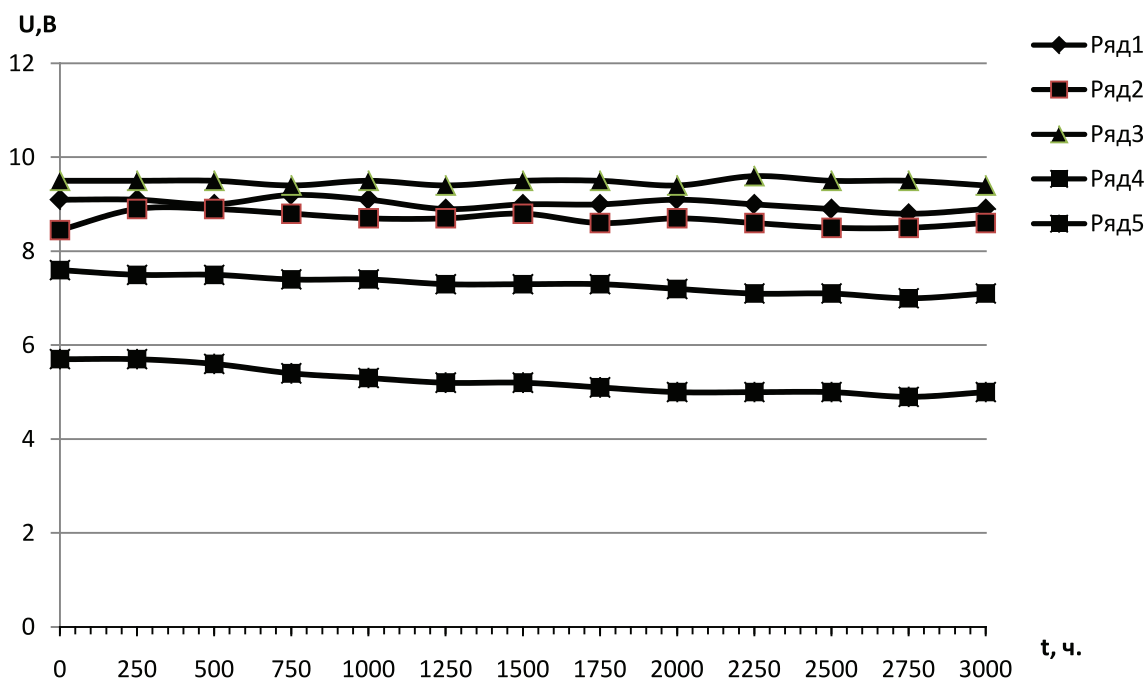


Рис. 2. Исследование стабильности параметров термоэлектрических модулей при длительной эксплуатации. Образцы № 1–№ 5

При использовании при относительно небольших градиентах температуры и на больших поверхностях термоэлектрические элементы формируются в модули по 250 элементов. При этом вырабатывается напряжение от 6 до 12 В. Испытания проводились в действующей системе горячего и холодного водоснабжения, где одна сторона охлаждалась водопроводной трубой холодного водоснабжения, а другая нагревалась трубой горячего водоснабжения. На рис. 1 изображен график изменения напряжения на выходе термоэлектрического модуля в зависимости от водозабора в течение суток. На рис. 2 представлен график стабильности параметров термоэлектрических модулей при длительной эксплуатации для различных токовых нагрузок. Исследовались пять образцов при токовых нагрузках: 1 – 0,25 А; 2 – 0,5 А; 3 – 0,75 А; 4 – 1,5 А; 5 – 2,5 А. Из графиков видно, что стабильные характеристики наблюдаются при токовых нагрузках до 1 А,

при больших токовых нагрузках элементы изменили свои характеристики, но сохранили работоспособность.

Приведенные данные показывают, что разработанные термоэлектрические генераторы можно использовать совместно со светодиодными осветительными приборами. Это позволит обеспечить дежурное и аварийное освещение подвальных или аналогичных помещений, где имеется градиент температур. При использовании нескольких модулей возможно обеспечить освещение мест общего пользования, например, лестничные площадки, площадки перед подъездами и т.д. Данные изделия могут найти применение и в других отраслях народного хозяйства, где есть выделение тепловой энергии: автомобилестроение, коммунальное хозяйство, промышленность.

Применение термоэлектрических модулей имеет высокую экономическую эффективность, так как зачастую утилизи-

рует неиспользуемую тепловую энергию, которая просто растворяется в пространстве (работа второго закона термодинамики). Немаловажным является и то, что удешевление производства за счет перехода к массовому выпуску позволит снизить стоимость одного термоэлектрического элемента стандартного размера до 10 долларов США. Это открывает перспективы создания большого количества бытовых устройств с термоэлектрическими модулями, таких как холодильники, приборы освещения, устройства для зарядки мобильной электроники, генераторы электрического тока для автомобилей и т.д.

Список литературы

1. Болтакс Б.И. О зависимости коэффициента термоЭДС в полупроводниках от разности температур спаев // Журнал технической физики. – 1950. – Т. 20. – С. 9.
2. ГОСТ 8.338-2002 ГСИ. Преобразователи термоэлектрические. Методика поверки.
3. ГОСТ Р 50342-92. Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия.
4. Иоффе А.Ф. Физика полупроводников. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – С. 356–393, 403, 409–410.
5. Соминский М.С. Полупроводники. – М.: Физматгиз, 1961. – С. 127–138, 348–399.
6. Стилбанс Л.С. Термоэлектрические явления // Сборник: Полупроводники в науке и технике. – М.: Изд. АН СССР, 1957. – Т. 1. – С. 11–118, 126–132.

7. Шелехов И.Ю., Шишелова Т.И. Разработка отопительного оборудования и исследования его эффективности в системах жизнеобеспечения // Вестник ИрГТУ. – 2007. – Т. 1, № 1(29). – С. 104–109.

References

1. Boltaks B.I. About dependence of factor termoEEF in semiconductors from a difference of temperatures спаев // Magazine of technical physics. 1950. T. 20, pp. 9.
2. GOST 8.338-2002 GSI. Converters thermoelectric thermoelectric. A technique of checking.
3. GOST P 50342-92. Converters thermoelectric. The general specifications.
4. Ioffe A.F. Physics of semiconductors. Bulletin Academy of sciences of the USSR, 1957, pp. 356–393, 403, 409–410.
5. Sominsky M.S.. Semiconductors. physics of the mathematician publishing house, 1961, pp. 127–138, 348–399.
6. Stilbans L.S. thermoelectric phenomena // Collection: Semiconductors in science and technology. M. : Bulletin Academy of sciences of the USSR, 1957. T. 1., pp. 11–118, 126–132.
7. Shelekhov I.Y., SHishelova T.I. development of the heating equipment and research of its efficiency in life-support systems, Bulletin ISTU, 2007. T. 1, 1 (29). pp. 104–109.

Рецензенты:

Петров А.В., д.т.н., профессор, декан факультета кибернетики, ФГБОУ ВПО ИрГТУ, г. Иркутск;

Чупин В.Р., д.т.н., профессор, директор Института архитектуры и строительства, ФГБОУ ВПО ИрГТУ, г. Иркутск.

Работа поступила в редакцию 19.12.2013.