

**Для цитирования:** Магомедова П.А. Термоэлектрические явления в светоизлучающих биполярных полупроводниковых структурах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017; 44 (2): 77-86. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

**For citation:** Magomedova P.A. Thermoelectric events in light-emitting bipolar semiconductor structures. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017; 44 (2): 77-86. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-77-86

### ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ БИПОЛЯРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

**Магомедова П.А.**

Дагестанский государственный технический университет  
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, д.70, Россия,  
e-mail: magomedova-pa@mail.ru

**Резюме. Цель.** Разработка светоизлучающих биполярных полупроводниковых структур с низким уровнем паразитных тепловыделений. **Метод.** Разработан метод преобразования термоэлектрического тепла в биполярных полупроводниковых структурах в оптическое излучение для отвода избыточной энергии в окружающую среду. При этом сохраняется охлаждающий эффект на термоэлектрических спаях. Вместо инерциального процесса кондуктивного или конвективного теплопереноса осуществляется практически мгновенный отвод тепла от электронных компонентов в окружающую среду. **Результат.** В результате светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции. Представляется возможным изготовление прозрачных светодиодных матриц с двухсторонним расположением прозрачных солнечных элементов и зеркальными металлическими электродами по периметру. При приложении тока светодиодная матрица на одних переходах будет поглощать тепловую энергию, а на других электродах испускать излучение, которое будет полностью рекуперировано в электроэнергию при помощи прозрачных солнечных батарей, после многократного отражения между зеркальными электродами. Невысокий коэффициент полезного действия солнечных батарей будет полностью скомпенсирован за счет многократного прохождения фотонов через эти батареи. **Вывод.** Светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят не только повысить надежность работы электронных компонентов в широком диапазоне эксплуатационных характеристик, но и повысить энергоэффективность за счет применения рекуперации оптического излучения. Полупроводниковые термоэлектрические устройства с использованием оптических явлений совместно с эффектом Пельтье позволяют реализовать широкий диапазон энергоэффективных компонентов радиоэлектронной аппаратуры, как для дискретной электроники, так и для микросистемотехники. Особую ценность представляют системы для получения сверхнизких температур с целью достижения сверхпроводимости.

**Ключевые слова:** светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры, термоэлектрические спаи, оптическое излучение, кондуктивный теплоперенос, конвективный теплоперенос

**TECHNICAL SCIENCE**  
**POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**  
**THERMOELECTRIC EVENTS IN LIGHT-EMITTING BIPOLAR SEMICONDUCTOR**  
**STRUCTURES**

**Patimat A. Magomedova**

Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,  
e-mail: magomedova-pa@mail.ru

**Abstract Objective** The development of light-emitting bipolar semiconductor structures having a low level of parasitic heat release. **Methods** A method for converting thermoelectric heat in bipolar semiconductor structures into optical radiation to divert the excess energy into the environment was developed. At the same time, the cooling effect on thermoelectric junctions remains. Instead of an inertial process of conductive or convective heat transfer, practically instantaneous heat removal from electronic components to the environment takes place. **Results** As a result, light-emitting bipolar semiconductor structures will allow more powerful devices with greater speed and degree of integration to be created. It is possible to produce transparent LED matrices with a two-way arrangement of transparent solar cells and mirror metal electrodes along the perimeter. When current is applied, the LED matrix on one of the transitions will absorb thermal energy; on other electrodes, it will emit radiation that is completely recovered into electricity by means of transparent solar cells following repeated reflection between the mirror electrodes. The low efficiency of solar cells will be completely compensated for with the multiple passages of photons through these batteries. **Conclusion** Light-emitting bipolar semiconductor structures will not only improve the reliability of electronic components in a wide range of performance characteristics, but also improve energy efficiency through the use of optical radiation recovery. Semiconductor thermoelectric devices using optical phenomena in conjunction with the Peltier effect allow a wide range of energy-efficient components of radio electronic equipment to be realised, both for discrete electronics and for microsystem techniques. Systems for obtaining ultra-low temperatures in order to achieve superconductivity are of particular value.

**Keywords:** light-emitting bipolar semiconductor structures, thermoelectric junctions, optical radiation, conductive heat transfer, convective heat transfer

**Введение.** Основными тенденциями развития современной электронной компонентной базы является повышение степени интеграции и быстродействия СБИС. При этом ужесточаются требования к соблюдению критических тепловых режимов, так как даже при малых уровнях тепловыделений переключающих электронных компонентов, интегрально возрастает общее количество тепла. Аналогично оказывает воздействие высокое быстродействие на уровень тепловыделений активных электронных компонентов. Инерционность тепловых процессов не позволяет осуществить режим термостабилизации, так как затруднен конвективный и кондуктивный теплообмен с окружающей средой для СБИС [1].

Для устранения этих недостатков малоэффективно повышение производительности систем охлаждения различного типа – требуется изготовление энергосберегающих биполярных полупроводниковых структур.

**Постановка задачи.** В процессе работы электронных компонентов СБИС возникают паразитные тепловыделения двух видов. Омическое сопротивление полупроводниковых структур приводит к тому, что часть токовой нагрузки расходуется на формирование паразитных Джоулевых тепловыделений. Вторым источником паразитных тепловыделений являются термоэлектрические явления при протекании тока через спаи металл-полупроводник и через полупроводниковые переходы.

Джоулевые тепловыделения могут быть уменьшены за счет применения полупроводниковых материалов с низким удельным сопротивлением, а также применения более тонких полупроводниковых переходов.

Паразитные термоэлектрические явления имеют двойную природу. На одном полупроводниковом переходе в биполярной полупроводниковой структуре выделяется тепло Пельтье, а на противоположном полупроводниковом переходе происходит поглощение тепловой энергии. Применение соответствующих материалов при изготовлении полупроводникового перехода, позволяет вместо выделения тепла на полупроводниковом переходе при рекомбинации электрона с вакансией осуществить формирование фотонов, причем, чем больше энергия электрона, тем выше энергия фотона – от инфракрасных до ультрафиолетовых значений спектра [2-13].

В этом случае полупроводниковая активная структура вместо теплового нагрева будет незначительно нагреваться, существенно охлаждаться и отводить большую часть энергии в виде электромагнитного излучения оптического диапазона. В свою очередь это позволяет не только практически мгновенно обеспечить отвод излишней паразитной энергии в окружающую среду для термостабилизации СБИС, но и повысить энергоэффективность электронных компонентов за счет рекуперации оптического излучения на фотопреобразующих полупроводниковых переходах [14]. Кроме того, возрастет быстродействие полупроводниковых переключающих структур, так как информационный сигнал будет передаваться со скоростью света, а не за счет, медленно дрейфующих через базу биполярной полупроводниковой структуры электронов. Это справедливо также для полевых полупроводниковых структур, тиристоров, лазеров и других полупроводниковых приборов.

**Методы исследования.** Снижения тепловыделений в биполярных полупроводниковых структурах и повышения эффективности его работы можно достичь различными способами. Одним из таких способов, является возможность формирования обоих полупроводниковых переходов в виде светоизлучающих, а саму биполярную полупроводниковую структуру подключить по схеме с общей базой. Питание для базы – эмиттера и базы – коллектора нужно обеспечить таким образом, что полупроводниковые переходы могут в одно и то же время быть открыты или закрыты.

Когда электрон проходит через полупроводниковые переход и у него уменьшается энергия, поскольку она переходит в энергию излучения. Если электрон проходит полупроводниковый переход и его энергия увеличивается, то на этом полупроводниковом переходе происходит поглощение тепловой энергии.

Если полупроводниковый переход открыт и происходит генерация фотонов, то в полупроводниковых переходах происходит поглощение фотонов, в результате чего проводимость увеличивается, т.к. происходит генерация электронов и дырок. Все это дополнительно усиливает ток в биполярной полупроводниковой структуре. Быстродействие данного процесса можно соизмерить со скоростью света.

На рис. 1 изображены биполярные полупроводниковые структуры с двумя излучающими полупроводниковыми переходами. На рис.1, *a* в биполярной полупроводниковой р-п-р-структуре происходит излучение фотонов с двух полупроводниковых переходов.

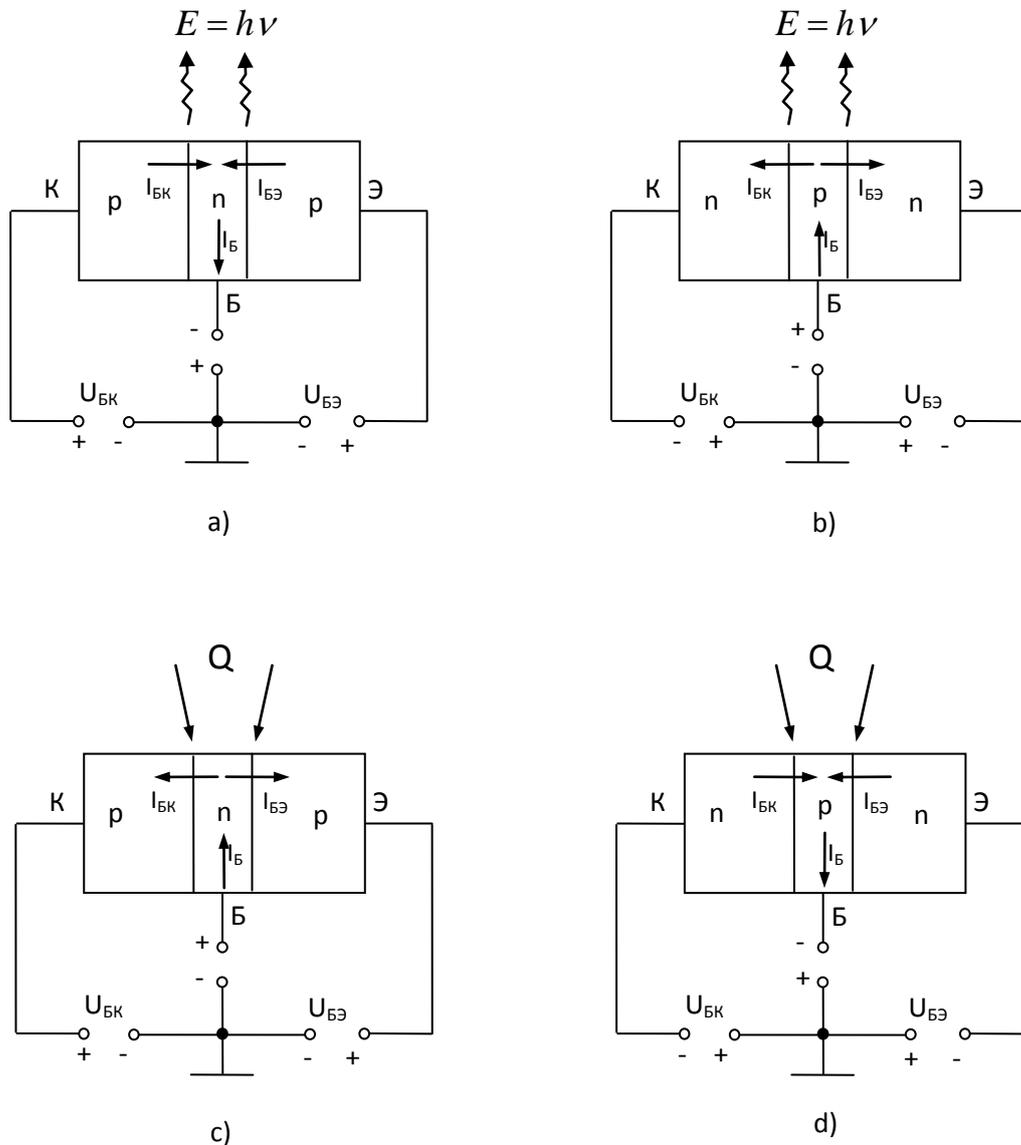
В результате подключения источников питания определенным образом, оба полупроводниковых перехода открыты, что приводит к испусканию фотонов, часть которых поглощается в полупроводниковых структурах с одновременным усилением тока базы за счет увеличения проводимости.

На рис.1, *b* приведена работа биполярной полупроводниковой р-п-р-структуры, когда больший запирающий потенциал подается не на коллектор или эмиттер, а на базу. В результате возникает охлаждающий эффект, в соответствии с законом Пельтье, и происходит поглощение тепла на обоих полупроводниковых переходах.

Аналогичные режимы работы для биполярных полупроводниковых р-п-р- и п-р-п-структур показаны на рис.1, *c* и *d*.

В результате, при открытом состоянии, биполярная полупроводниковая структура с двумя излучающими полупроводниковыми переходами усиливает передачу цифровой информации с большим быстродействием используя оптический канал. А когда состояние закрытое,

происходит охлаждение, что позволяет повысить степень интеграции сверхбольших интегральных схем, а также увеличить энергосбережение в результате отсутствия систем отвода тепла.

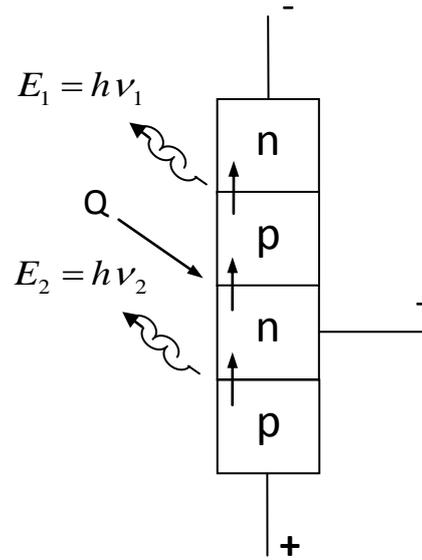


**Рис.1. Биполярные полупроводниковые структуры с двумя излучающими полупроводниковыми переходами**  
**Fig.1. Bipolar semiconductor structures with two radiating semiconductor transitions**

Предложенная биполярная полупроводниковая структура с двумя излучающими полупроводниковыми переходами позволит увеличить эффективность цифровых устройств при одновременном снижении энергетических затрат.

Применяя излучающие полупроводниковые структуры можно повысить эффективность работы тиристора. Для этого в полупроводниковой структуре тиристора необходимо сделать излучающими два полупроводниковых перехода в открытом состоянии, а оставшийся полупроводниковый переход поглощающим тепловую энергию. В результате, можно повысить эффект охлаждения в два раза.

На рис. 2 изображена полупроводниковая структура тиристора с излучающими и поглощающим переходами.



**Рис. 2. Полупроводниковая структура тиристора с излучающими и поглощающим переходами**

**Fig.2. Semiconductor structure of a thyristor with radiating and absorbing transitions**

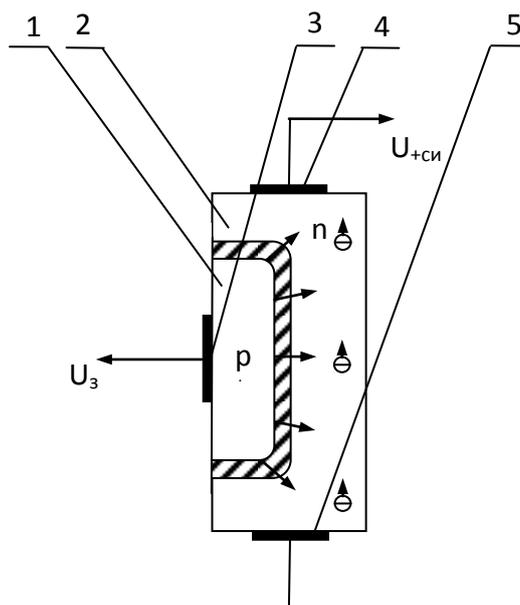
Так как излучение в двух открытых полупроводниковых переходах позволит снизить количество выделенного тепла и снизить возможность теплового пробоя, то появится возможность изготавливать полупроводниковые структуры тиристора с большей мощностью. Частота излучения в полупроводниковых переходах тиристора может быть одинаковой или разной. Это позволит повысить интенсивность излучения и охватить больший спектральный диапазон. Причем, чем выше частота излучения полупроводниковых переходов, тем больше энергии уйдет в виде излучения и тем больше холода создаст закрытый переход тиристора. Использование излучающей полупроводниковой структуры тиристора также позволит улучшить теплоперенос и уменьшить габариты теплоотвода.

Применить излучающие полупроводниковые структуры можно и для улучшения таких показателей, как коэффициент усиления. Помимо теплофизических характеристик и быстродействия, коэффициент усиления является важным показателем полевых полупроводниковых структур.

Обычно, усиление в полевой полупроводниковой структуре происходит при изменении размера запирающего слоя полупроводникового перехода с одновременной регулировкой размера канала, через который протекают электроны от истока к стоку. Применяв эффект излучения в полупроводниковом переходе происходит дополнительная генерация фотонов, которые, в дальнейшем, поглощаются и генерируют пары электрон-дырка. В результате сопротивление проводника n-типа уменьшается, а сила тока увеличивается.

На рис. 3 показана схема полевой полупроводниковой структуры с неизолрированным затвором и излучающим полупроводниковым переходом. За счет фоточувствительности изменяется сопротивление сток-исток.

Работа полевой полупроводниковой структуры основана на следующем. Запирающий слой возникает между полупроводниками p-типа 1 и n-типа 2. Размеры этого слоя зависят от напряжения на затворе 3, стоке 4 и истоке 5. От истока 5 электроны перемещаются по полупроводнику n-типа к положительному стоку 4. Когда, на затвор 3 подается отрицательное напряжение, происходит увеличение запирающего слоя. Для электронов уменьшается поперечное сечение канала проводимости, сопротивление растет, а ток снижается. Излучающий полупроводниковый переход заперт, т.к. генерация фотонов отсутствует.



**Рис.3. Полевая полупроводниковая структура с излучающим полупроводниковым переходом**

**Fig.3. Field semiconductor structure with radiating semiconductor transfer**

Когда на затвор 3 подается положительное напряжение, происходит уменьшение запирающего слоя. Для электронов увеличивается поперечное сечение канала проводимости, сопротивление уменьшается, а ток возрастает.

После того, как полупроводниковый переход начнет генерировать фотоны, уменьшится сопротивление полупроводника n-типа 2, так как атомы кристалла поглотят фотоны и произойдет генерация пар электрон-дырка. После этого увеличится протекающий ток.

При использовании между стоком 4 и истоком 5 излучающего полупроводникового перехода, а также фоточувствительного полупроводника n-типа 2, возрастет коэффициент усиления полевой полупроводниковой структуры. Данная полевая полупроводниковая структура может быть использована в сверхбольших интегральных схемах.

Экономичность биполярных полупроводниковых структур при импульсном режиме работы можно также повысить за счет излучения. Для этого, частично, полезный сигнал, проходя через биполярную полупроводниковую структуру, на одном полупроводниковом переходе преобразуется в излучение.

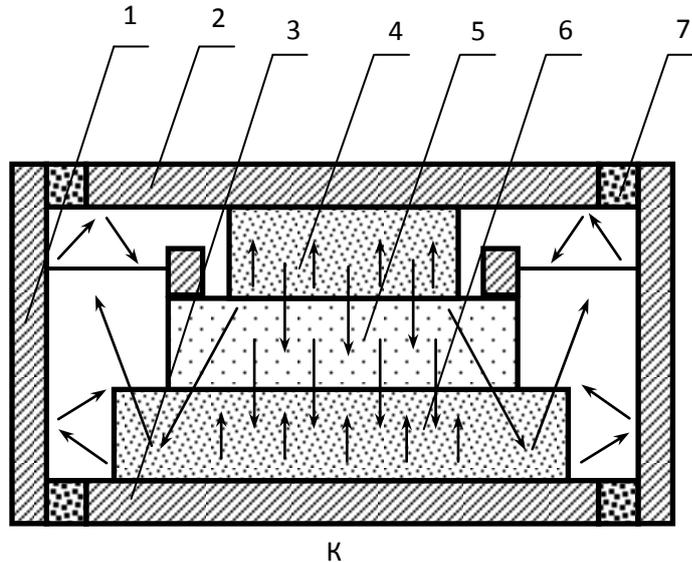
На втором полупроводниковом переходе, наоборот, оптическое излучение преобразуется в полезный электрический сигнал. При этом база, эмиттер, коллектор представлены в виде зеркальных металлических электродов. В результате, все фотоны многократно переотражаются внутри биполярной полупроводниковой структуры и преобразуются в электричество, несмотря на невысокий коэффициент полезного действия фотопреобразующего полупроводникового перехода.

На рис. 4 изображена биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами. Конструктивно биполярная полупроводниковая структура находится внутри зеркальных металлических электродов: база 1, эмиттер 2, коллектор 3.

Полупроводниковый переход, через который электроны переходят из n зоны 4 в p зону 5, является излучающим полупроводниковым переходом в биполярной полупроводниковой структуре. На этом полупроводниковом переходе происходит рассеивание энергии в виде оптического излучения.

Полупроводниковый переход, через который электроны переходят из p зоны 5 в n зону 6, является фотопреобразующим полупроводниковым переходом.

На этом полупроводниковом переходе электроны приобретают от излучения дополнительную энергию, также как и в солнечной батарее. Диэлектрическим материалом 7 друг от друга электрически изолируются база 1, эмиттер 2, коллектор 3.



**Рис.4. Биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами**

**Fig.4. Bipolar semiconductor structure with mirror metal electrodes**

Биполярная полупроводниковая структура с зеркальными металлическими электродами, является более экономичной, так как на фотопреобразующем р-п-переходе происходит генерация электричества из фотонов. При изготовлении всех приведенных выше полупроводниковых структур применяются общеизвестные материалы, например, для производства светодиодов (GaAs, GaP, GaN, SiC). Для проведения исследований технических параметров биполярных полупроводниковых структур был изготовлен компьютеризированный стенд, предназначенный для подачи питающих напряжений на исследуемые полупроводниковые структуры и преобразование в цифровую форму, как выходных параметров, исследуемых биполярных полупроводниковых структур, так и преобразования информации с датчиков температуры, интенсивности электромагнитного оптического излучения и других параметров.

На рис. 5 приведена структурная схема измерительного стенда для испытания биполярных полупроводниковых структур.

При подаче питающих напряжений биполярные полупроводниковые структуры с цифро-аналогового преобразователя на базу (затвор) подаются различные значения входных сигналов. Информация от считывающих датчиков после дискретизации и квантования, поступает в компьютер для последующей обработки, анализа и хранения. Внутри камеры стенда создаются условия, соответствующие различным режимам работы биполярных полупроводниковых структур в заданном диапазоне испытаний.

Имеется возможность для изменения конфигурации компьютеризированного стенда за счет применения дополнительных датчиков физических и электрических величин, а также расширения диапазона испытаний с применением дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры через интерфейсы, подключенные к компьютеру.

Проведенные испытания подтвердили высокую энергоэффективность биполярных полупроводниковых структур.

Для биполярных полупроводниковых структур энергоэффективность возросла в среднем до 65%. Для полевых полупроводниковых структур до 75%.

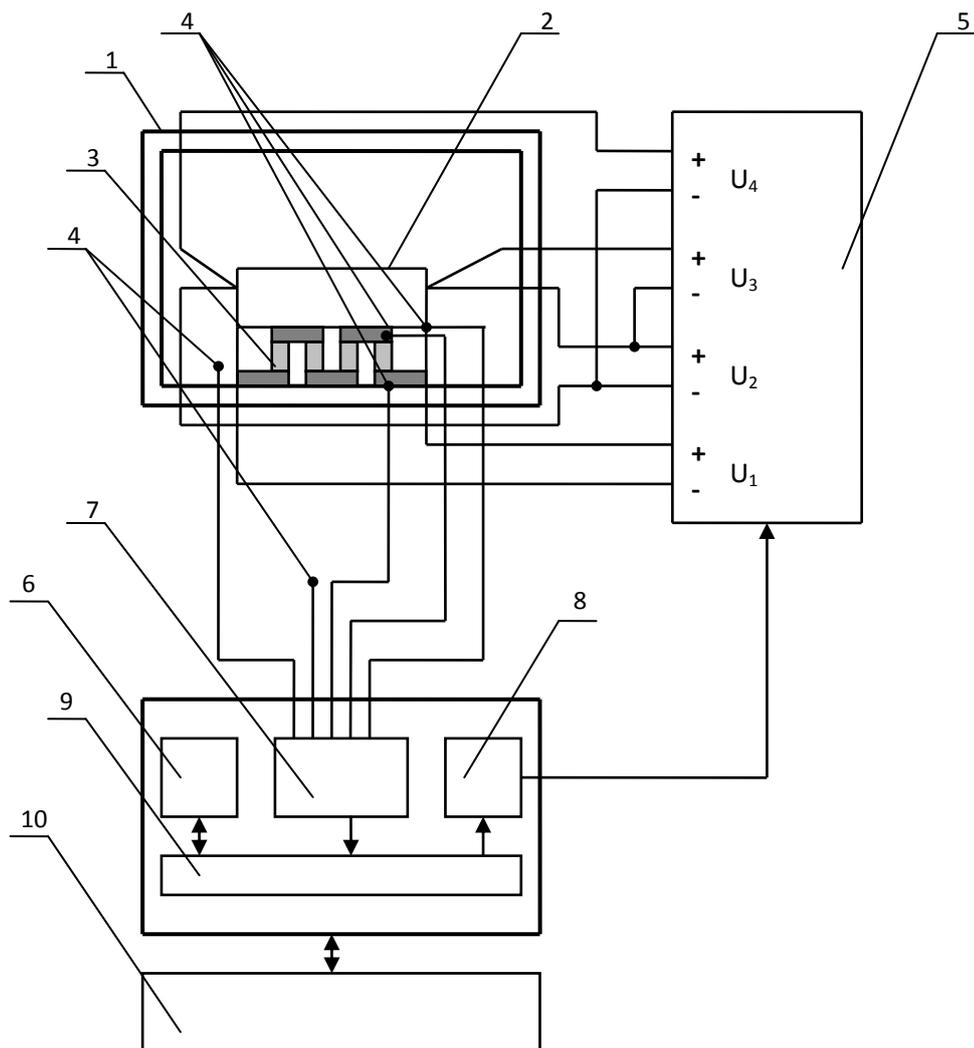


Рис.5. Схема измерительного стенда для испытания биполярных полупроводниковых структур  
Fig.5. Diagram of a measuring stand for testing bipolar semiconductor structures

- 1 – термостат;
- 2 – объект эксперимента;
- 3 – биполярные полупроводниковые структуры для имитации тепловой нагрузки;
- 4 – термопарные датчики для измерения температуры;
- 5 – управляющий блок питания;
- 6 – цифро-аналоговый преобразователь;
- 7 – многоканальный аналого-цифровой преобразователь;
- 8 – цифровой регистр для управляющего блока питания;
- 9 – интерфейс;
- 10 – компьютер.

**Обсуждение результатов.** Для достижения большей эффективности и экономичности светоизлучающих полупроводниковых структур, необходимо обеспечить их интегральное производство на основе излучающих кристаллов. Также можно изготовить прозрачные светодиодные матрицы, причем с двух сторон должны располагаться солнечные элементы, а по периметру необходимо расположить зеркальные металлические электроды. При таком изготовлении одни полупроводниковые переходы будут поглощать тепло, а другие полупроводниковые переходы излучать. Излучение полупроводниковых переходов, с помощью прозрачных солнечных батарей, после того, как многократно отразится между металлическими зеркальными электродами, полностью рекуперировается в электроэнергию на прозрачных солнечных батареях. При многократном прохождении фотонов через солнечные батареи значительно повысится их коэффициент полезного действия (до 100%). В результате светоизлучающие биполярные полу-

проводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции.

**Вывод.** Применение оптических явлений совместно с эффектом Пельтье в биполярных полупроводниковых структурах позволят не только повысить надежность работы электронных компонентов в широком диапазоне эксплуатационных характеристик, но и энергоэффективность за счет применения рекуперации оптического излучения.

#### **Библиографический список:**

1. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолуминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля  $\delta$ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 140. – № 1. – С. 158-169.
2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. - 386с.
3. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника, 2005.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д. Термостабилизация микроэлектронной аппаратуры при помощи полупроводниковых термоэлектрических устройств. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2013. – 149 с.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. – 165 с.
6. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. - Москва: «Академия», 2012. – 136 с.
7. Дорохин М. В., Данилов Ю. А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
8. Вихрова О. В., Данилов Ю. А., Дроздов Ю. Н., Звонков Б. Н., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Свойства квантово-размерных структур GaAs/InGaAs, содержащих  $\delta$ -Mn-легированные слои // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2007. – № 2. – С. 9-12.
9. Патент РФ на изобретение №2507613. Каскадное светоизлучающее термоэлектрическое устройство / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 20.02.2014.
10. Патент РФ на изобретение №2405230. Способ отвода тепла от тепловыделяющих электронных компонентов в виде излучения / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А., опубл. 01.06.2009.
11. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
12. Патент РФ на изобретение №2507632. Светотранзистор с высоким быстродействием / Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Нежведилов Т.Д., Юсуфов Ш.А., опубл. 20.02.2014.
13. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. – V. 40. – N 2. – P. R179-R203.
14. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation // Phys. Rev. B. – 2005. – V. 71. – N 3. – P. 035338-1-5.

#### **References:**

1. Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Fotoluminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmenenie magnitnogo polya  $\delta$ -sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs. ZhTF. 2011;140(1):158-169. [Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaytsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Photoluminescence response of a quantum well onto Mn  $\delta$ -layer magnetic field alteration in InGaAs/GaAs heterostructures. Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP). 2011;140(1):158-169. (in Russ.)]
2. Anatyshuk L.I. Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii. Kiev, Chernovtsy: Institut termoelektrichestva; 2003. 386 s. [Anatyshuk L.I. Thermal electricity. T.2. Thermo-electric energy converters. Kiev, Chernovtsy: Institute of thermal electricity; 2003. 386 p. (in Russ.)]

3. Ismailov T.A. Termoelektricheskie poluprovodnikovye ustroystva i intensifikatory teploperedachi. SPb.: Politekhnik; 2005. [Ismailov T.A. Thermo-electric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. Saint-Petersburg: Politekhnik; 2005. (in Russ.)]
4. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Termostabilizatsiya mikroelektronnoy apparatury pri pomoshchi poluprovodnikovykh termoelektricheskikh ustroystv. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D. Thermal stabilisation of microelectronic apparatus by means of semiconductor thermoelectric devices. Makhachkala: IPTs DGTU; 2013. 149 p. (in Russ.)]
5. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Okhlazhdenie radioelektronnykh sistem: uchebnoe posobie. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. The cooling of radioelectronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPTs DGTU; 2012. 165 s. (in Russ.)]
6. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Termoelektricheskoe okhlazhdenie teplovydelyayushchikh komponentov mikroelektronnoy tekhniki. Moskva: «Akademiya»; 2012. 136 s. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Thermoelectric cooling of heat-emitting components of microelectronic technique. Moscow: «Akademiya»; 2012. 136 p. (in Russ.)]
7. Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Izmerenie polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostruktur: uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet; 2011. [Dorokhin M.V., Danilov Yu.A. Measurement of polarisation features of nanoheterostructure emission: a Tutorial. Nizhniy Novgorod: Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod; 2011. (in Russ.)]
8. Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. Svoystva kvantovo-razmernykh struktur GaAs/InGaAs, sodershashchikh  $\delta$ <Mn>-legirovannye sloi. Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya. 2007;2:9-12. [Vikhrova O.V., Danilov Yu.A., Drozdov Yu.N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil M.J.S.P. The properties of GaAs/InGaAs quantum-dimensional structures, containing  $\delta$ <Mn>-doped layers. Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2007;2:9-12. (in Russ.)]
9. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Kaskadnoe svetoizluchayushchee termoelektricheskoe ustroystvo. Patent RF na izobretenie №2507613.0. Opubl. 20.02.2014. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Cascade light-emitting thermal-electric device. Patent RF №2507613.0. Publ. 20.02.2014. (in Russ.)]
10. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektronnykh komponentov v vide izlucheniya. Patent RF na izobretenie №2405230. Opubl. 01.06.2009. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. A method of heat removal from heat-emitting electronic components in the form of emission. Patent RF №2405230. Publ. 01.06.2009. (in Russ.)]
11. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Svetotranzistor. Patent RF №2487436. Opubl. 10.07.2013. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Light transistor. Patent RF №2487436. Publ. 10.07.2013. (in Russ.)]
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviem. Patent RF na izobretenie №2507632. Opubl. 20.02.2014. [Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A. Light transistor with high speed. Patent RF na izobretenie №2507632. Publ. 20.02.2014. (in Russ.)]
13. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. J. Phys. D: Appl. Phys. 2007;40(2):R179-R203.
14. Govorov A.O., Kalameitsev A.V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. Phys. Rev. B. 2005;71(3):035338-1-5.

**Сведения об авторе:**

**Магомедова Патимат Арсланадиевна**-аспирант, кафедра теоретической и общей электротехники.

**Information about the author:**

**Patimat A. Magomedova** - Graduate student, Department of Theoretical and General electrical engineering.

**Конфликт интересов.**

**Conflict of interest.**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов. The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.06.2017.

Received 10.06.2017.

Принята в печать 22.06.2017.

Accepted for publication 22.06.2017.