

Для цитирования: Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А. Термоэлектрические процессы в экономичном светотранзисторе. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (3): 8-19. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

For citation: H.M. Gadzhiev, M.E. Akhmedov, S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova. Thermoelectric processes in an efficient light-emitting transistor. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (3): 8-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-3-8-19

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭКОНОМИЧНОМ СВЕТОТРАНЗИСТОРЕ

Гаджиев Х.М., Ахмедов М.Э., Гаджиева С.М., Курбанова П.А.

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель Разработка энергоэффективных светоизлучающих биполярных полупроводниковых структур. **Метод** Предложен метод трансформации термоэлектрического тепла в биполярных полупроводниковых структурах в электромагнитное излучение оптического диапазона. При этом сохраняется охлаждающий эффект на термоэлектрических переходах. Вместо электрического переноса информационного импульса от излучающего свет перехода база-эмиттер информация переносится на поглощающий свет переход база-коллектор фотонами напрямую или после многократного переотражения от зеркальных металлических электродов. **Результат** Принцип излучения светодиода позволяет реализовать оптопару в пределах одного электронного компонента. В отличие от обычных оптопар, которые дискретно в пространстве разделены, здесь они интегрально объединены в пределах одного электронного компонента. В результате светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры позволят создавать более мощные приборы с большим быстродействием и степенью интеграции. **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. Перспективы развития световых экономичных транзисторов позволяют не только повысить степень интеграции, а значит, и увеличить производительность процессоров, но и снизить энергозатраты на системы охлаждения и на систему питания самого устройства.

Ключевые слова: светоизлучающие биполярные полупроводниковые структуры, оптическое излучение, рекуперация, энергоэффективный, зеркальный электрод

THERMOELECTRIC PROCESSES IN AN EFFICIENT LIGHT-EMITTING TRANSISTOR

H.M.Gadzhiev, M.E. Akhmedov, S.M. Gadzhieva, P.A. Kurbanova
Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract Objectives Development of energy-efficient light-emitting bipolar semiconductor structures. **Method** A method for transforming thermoelectric heat in bipolar semiconductor structures into optical-range electromagnetic radiation, which preserves the cooling effect on thermoelectric transitions, is proposed. Instead of transferring the information impulse electrically from the base-emitter light-emitting transition, the information is transferred directly to the light-absorbing base-collector transition by photons or following multiple re-reflections from mirror metal electrodes. **Results** Unlike conventional optocouplers discretely separated in space, the novel optocouplers described in the article are integrated into a single electronic component using the principle of LED radiation. As a result, light-emitting bipolar semiconductor structures will result in the creation of more powerful, faster and better integrated devices. **Conclusion** Light-emitting bipolar semiconductor structures will not only increase the reliability of electronic components across a wide range of performance characteristics, but also increase energy efficiency through the use of optical radiation recovery. The future development of light-efficient transistors improves integration and increases processor performance, at the same time as reducing the power consumption of the cooling system and the power supply of the device itself.

Keywords: Light-emitting bipolar semiconductor structures, optical radiation, recovery, energy-efficiency, mirror electrode

Введение. Современный уровень развития электроники основывается на широкой номенклатуре пассивных и активных элементов на основе полупроводниковых кристаллов [1, 3 - 9]. Наиболее широкое распространение получили полевые и биполярные структуры в виде диодов, транзисторов, тиристоров и других электронных компонентов.

В основе биполярных структур находится взаимодействие полупроводниковых материалов с различными электронными проводимостями. Если в четырехвалентный полупроводник типа германий, кремний или углерод внести трехвалентную примесь, то возникнет акцепторная проводимость с вакансией недостающего четвертого электрона. Таким образом, возникает дырочная проводимость. Если же внести пятивалентную примесь, то лишний пятый электрон для полупроводниковой четырехвалентной структуры будет играть роль донорной структуры. Электронная проводимость позволит осуществлять перенос зарядов непосредственно каждому электрону, в то время как в дырочной проводимости виртуальный мнимый перенос положительных зарядов осуществляется каждый раз перескоком нового электрона и образованием новой вакансии дырки.

Возможны комбинированные структуры на основе арсенид-галлия, когда трех- и пятивалентная структура в среднем создает четырехвалентную структуру полупроводниковую, а та или иная проводимость в виде электронной или дырочной осуществляется при помощи изменения концентрации и соотношения этих трех и пятивалентных примесей [2]. Такая структура является наиболее современной для формирования новой компонентной базы. На основе этих структур широкое распространение получили биполярные транзисторы.

Постановка задачи. Недостатком биполярных транзисторов является то, что перенос энергии в них осуществляется через Джоулевы потери, выражающиеся в виде паразитных тепловыделений, и требующие значительные ресурсы отводить на то, чтобы тепловую энергию отвести из рабочей зоны кристалла для предотвращения теплового пробоя. Однако инерцион-

ность тепловых процессов не позволяет данную процедуру осуществить быстро, и это является существенным препятствием для формирования мощных переключающих элементов. Также это же препятствие возникает и при попытке создать сверхбольшие интегральные схемы, в которых на единицу площади приходится большое количество переключающих элементов. Каждый элемент, даже при незначительных тепловыделяющих паразитных выделениях, в результате интеграции всех действующих компонентов приводит к тому, что на малой площади выделяется очень большая тепловая энергия, а это является препятствием для дальнейшей интеграции и повышения степени компоновки электронных схем.

Для предотвращения этого недостатка необходимо изменить структуру самого полупроводникового компонента. Основной проблемой является тепловыделение, то есть оно возникает за счет обычного Джоулевого тепловыделения при прохождении электрического тока через полупроводниковую структуру p и n типа, а также за счет в основном эффекта Пельтье при разности энергии электронов в одном и другом типе полупроводника.

Методы исследования. Если электрон переходит из полупроводника, в котором его энергия выше, в полупроводник, в котором его энергия ниже, то после рекомбинации избыток энергии электрона передается атому, и он приобретает большую энергию, – а это и означает нагрев этой зоны. Если же наоборот, электрон переходит из зоны, в которой имел меньшую энергию, в зону, в которой он должен иметь большую энергию, или комбинирует на место вакансии, то в этом случае происходит поглощение энергии атома, он замедляется, – и это вызывает охлаждающий эффект в таком переходе. В биполярном транзисторе присутствуют оба типа по выделению и поглощению тепла. В одном переходе $p-n$ выделяется тепло, в другом $n-p$ поглощается тепло.

Данную структуру можно дополнить, если использовать свойства полупроводниковых светодиодов. При гораздо большей разнице, чем в обычных $p-n$ переходах, разница энергии в полупроводниковых светодиодах при переходе электрона из одной зоны в другую в виде избытка энергии может выделяться не в виде тепла, то есть приобретение атомом энергии, а в виде испускания фотонов, как инфракрасного диапазона, так и более энергичных: красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего, фиолетового и ультрафиолетового диапазона [10, 11]. Самой большой энергией обладают ультрафиолетовые светодиоды, в которых наибольший перепад уровней энергии между $p-n$ переходами способствует при перемещении электрона из одной зоны в другую испусканию фотонов ультрафиолетового диапазона [16].

Таким образом, вместо того, чтобы атом приобретал тепловую энергию, он испускает световую энергию, которую в дальнейшем можно использовать по назначению в виде полезной энергии либо для рекуперации.

На рис. 1 приведена схема экономичного светотранзистора. Биполярный светотранзистор состоит из $n-p-n$ структур [14, 15].

База на схеме представлена позицией 1. Она имеет кольцевую форму и присоединяется к полупроводнику типа p , находящемуся в середине между двух полупроводников типа n . Полупроводник типа p обозначен на рисунке позицией 4. Роль коллектора выполняет полупроводник типа n , обозначенный позицией 3. Электрод коллектора обозначен позицией 2, который представляет из себя металлический зеркальный электрод. Эмиттер обозначен структурой полупроводника n -типа и обозначен позицией 5 на рис.1.

Электрод непосредственно эмиттера обозначен позицией 6 и тоже представляет зеркальную металлическую структуру. Роль диэлектрика между базой, эмиттером и коллектором в виде металлических электродов выполняют диэлектрические прослойки, обозначенные позицией 7.

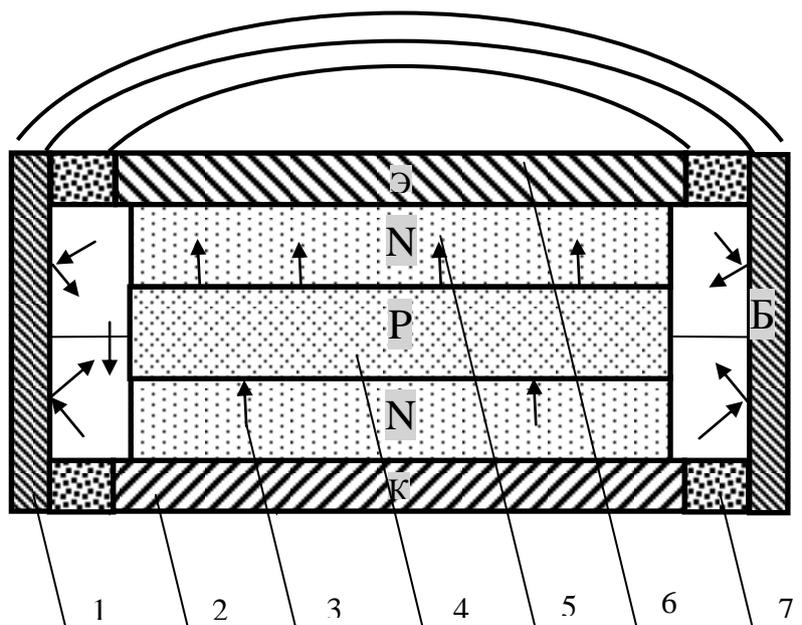


Рис.1. Схема экономичного светотранзистора
Fig. 1. Cost effective light transistor circuit

Функционирует светотранзистор следующим образом. При прохождении тока из зоны n в зону p от эмиттера к базе перепад энергии электрона приводит к тому, что избыток энергии должен превращаться в избыточное тепловое движение атома, но, так как перепад энергии выбран больше, то этот переход приобретает свойства светоизлучающего перехода, и избыток энергии испускается в виде фотонов, не нагревая непосредственно переход [12, 13].

Примером могут послужить светодиодные светильники, которые обладают гораздо большей яркостью при меньших тепловых выделениях за счет более экономичного преобразования электричества в оптическую энергию при меньших затратах на тепловую энергию. Фотоны не могут покинуть внутреннюю поверхность светотранзистора, так как со всех сторон находятся зеркальные электроды. Сами $p-n-p$ структуры выполнены из арсенид-галлия и прозрачны для фотонов. Поэтому фотоны будут многократно отражаться, пересекая многократно внутренний объем светового транзистора. По достижению второго перехода база-коллектор, выполненного в виде солнечной батареи, они будут генерировать электронные пары дырка-электрон, которые будут дрейфовать в разные зоны и создавать электрический потенциал, то есть энергия фотонов вновь преобразуется в электрический сигнал уже на коллекторе. В результате то, что раньше превращалось в паразитную тепловую энергию в таком транзисторе будет преобразовываться в полезную энергию, причем, если в обычном биполярном транзисторе электрический сигнал проходил в виде электронов, дрейфующих со скоростью десятые доли миллиметра в секунду через полупроводниковые структуры, то в этом экономическом световом транзисторе перемещение полезного сигнала будет осуществляться со скоростью света, то есть увеличено на много порядков быстродействие такой структуры. Фотоны, так или иначе, не могут покинуть пределы этого транзистора, и поэтому все они рано или поздно на переходе база-коллектор, выполненном в виде солнечной батареи, будут преобразованы в электрический полезный сигнал.

Таким образом, паразитные тепловые потери будут рекуперированы в полезный электрический сигнал, и коэффициент полезного действия такого транзистора будет гораздо выше. Только малая часть тепловых потерь будет в нем использована. Всё остальное будет полезной энергией, причем это будет сопровождаться повышением быстродействия. Такой транзистор позволит как увеличить мощность переключающих элементов, так и увеличить степень интеграции сверхбольших интегральных схем при сохранении тепловых режимов в допустимых пределах.

$$\begin{aligned}
 P_{\Sigma} &= P_{ЭБ} + P_{\Phi} + P_{ДЖ} \\
 P_{ЭБ} &= U_{ЭБ} J_{ЭБ} \sim 5\% \\
 P_{\Phi} &= h\nu N_{\Phi}, \rightarrow 90\% \\
 P_{ДЖ} &= J_{ЭБ}^2 R_{ЭБ}, \sim 5\%, \text{ где } R_{ЭБ} \rightarrow 0 \\
 P_{\Phi \text{ БК1}} &= \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \\
 P_{\Phi \text{ БК2}} &= \left(P_{\Phi} - \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \right) \frac{\text{КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \\
 P_{\Phi \text{ БК3}} &= \left(P_{\Phi} - \left(\left(P_{\Phi} - \frac{P_{\Phi} \text{ КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \right) \frac{\text{КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \right) \right) \frac{\text{КПД}_{\text{БК}}}{100\%} \\
 P_{\text{БК}\Sigma} &\sim 90\% \\
 J_{БЭ} &\sim J_{БК} \\
 P_{\Sigma \text{ БК}} &= P_{\Phi \text{ БК}} + P_{\text{БК Эл}}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Баланс мощностей приведен в формуле, где P суммарное состоит из мощности электрического тока между эмиттером-базой и мощности энергии излучающихся фотонов и небольшой мощности Джоулевых паразитных тепловыделений. На долю электрической мощности между эмиттером и базой, приведенной в формуле, приходится не более 5%. Она складывается из произведения напряжения между эмиттером и базой и током эмиттер-база. Часть этого тока ответвляется в сторону базы, а основная часть тока следует дальше в сторону коллектора. Энергия фотонов складывается из постоянной Планка, частоты излучения и количества фотонов и составляет в светодиодной структуре до 90%. Частота чем выше, тем лучше, то есть, если использовать ультрафиолетовый диапазон, то эффективность такой структуры будет намного выше. Паразитные Джоулевы тепловыделения складываются из квадрата тока эмиттер-база и сопротивления между эмиттером и базой. И для полупроводниковых структур на основе арсенида галлия, выполненного в виде тонкой пленки, сопротивление стремится к нулю, поэтому общие потери будут не более 5%. Для того чтобы оценить преобразование, обратное фотонов в энергию полезного сигнала между базой и коллектором, то есть ту часть энергии, которая достигла коллектора, необходимо рассмотреть несколько циклов.

В момент первого прохождения фотонов в формуле приведена доля мощности, которая получается за счет коэффициента полезного действия солнечной батареи на основе перехода база-коллектор. КПД может достигать 18%. Но в данном случае это неважно, так как в основном экономичность батареи будет осуществляться не за счет однократного преобразования, а за счет специальной формы концентратора фотонов, который не позволяет фотонам покинуть пределы солнечной батареи и заставляет их многократно проходить через эту солнечную батарею до их полного преобразования в электричество. Таким образом, даже незначительный КПД позволяет реализовать практически стопроцентное преобразование фотонов.

В формуле приведено, что при втором прохождении фотонов доля полученной энергии будет меньше. В следующей формуле приведено соотношение для третьего прохождения фотонов и так далее. С каждым прохождением количество фотонов уменьшается, но со временем оно будет стремиться к нулю. Но если проинтегрировать все эти значения, то получим, что практически вся энергия фотонов, которые были испущены переходом база-эмиттер, будет поглощена на переходе солнечной батареи база-коллектор и составит в пределах 90% общей мощности батареи. Ток база-эмиттер приблизительно соответствует базе-коллектору за небольшим вычетом той части тока, которая ушла в сторону базы. Баланс мощностей для базы-коллектора приведен в формуле и состоит из мощности фотонов на базе-коллекторе и электрической мощности на базе-коллекторе.

Для того чтобы представить графически этот процесс и показать, что оптимизация позволит увеличить силу тока приведен график на рис.2.

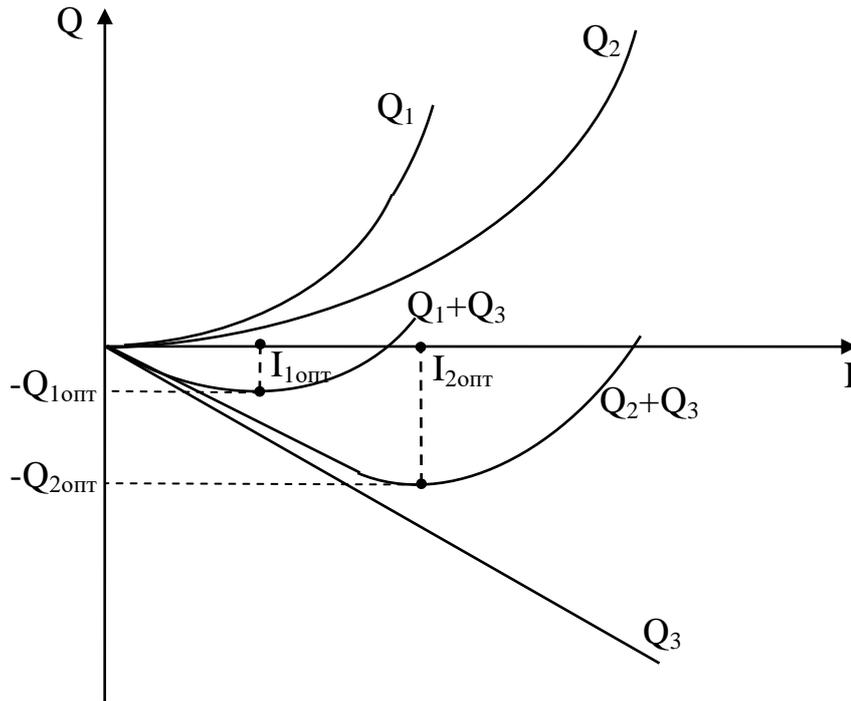


Рис. 2 Зависимость количества теплоты Джоуля (Q_1 и Q_2) и Пельтье (Q_3), поступающей на холодный спай от тока (I):

Fig. 2 Dependence of the amount of Joule heat (Q_1 and Q_2) and Peltier (Q_3) entering the cold junction on the current (I):

Q – теплота, приходящая на холодный спай термоэлемента,

Q_1 – кривая теплоты Джоуля обычного термоэлектрического устройства,

Q_2 – кривая теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического устройства,

Q_3 – кривая теплоты Пельтье,

$-Q_{1opt}$ – оптимальное количество теплоты для обычного термоэлектрического устройства при оптимальном токе питания,

$-Q_{2opt}$ – оптимальное количество теплоты для излучающего термоэлектрического устройства при оптимальном токе питания,

Q_1+Q_3 – сумма теплоты Джоуля обычного термоэлектрического устройства и теплоты Пельтье,

Q_2+Q_3 – сумма теплоты Джоуля излучающего термоэлектрического устройства и теплоты Пельтье,

I – ток питания,

I_{1opt} – оптимальный ток питания обычного термоэлектрического устройства,

I_{2opt} – оптимальный ток питания излучающего термоэлектрического устройства,

Q is the heat entering the cold junction of the thermocouple,

Q_1 is the Joule heat curve of a conventional thermoelectric device,

Q_2 is the heat curve of the Joule emitting thermoelectric device,

Q_3 - Peltier heat curve,

$-Q_{1opt}$ - the optimal amount of heat for a conventional thermoelectric device with an optimal supply current,

$-Q_{2opt}$ - the optimal amount of heat for the radiating thermoelectric device at the optimal supply current,

$Q_1 + Q_3$ - the sum of the Joule heat of a conventional thermoelectric device and the Peltier heat,

$Q_2 + Q_3$ - the sum of the Joule heat of the radiating thermoelectric device and the Peltier heat,

I is the supply current,

I_{1opt} is the optimal supply current of a conventional thermoelectric device,

I_{2opt} - optimal supply current of a radiating thermoelectric device

Для обычных термоэлектрических преобразователей баланс мощностей состоит из Джоулевых тепловыделений и эффекта Пельтье. Причем эффект Пельтье линейно зависит от тока, а Джоулевые тепловыделения квадратично. Но если выполнить транзистор в виде тонких пленок $n-p-n$ структур, то в этом случае Джоулевые сопротивления стремятся к нулю, и тогда ветвь параболы будет иметь очень плавную характеристику, настолько плавную, что только при больших значениях тока можно получить оптимум. В тоже время увеличение значения тока позволяет существенно повысить холодильный эффект Пельтье, то есть, пропуская большие мощности, транзистор будет не греться, а даже охлаждаться.

Это позволяет в значительной степени повысить степень интеграции таких транзисторов, и увеличить их мощности, так как нет необходимости ставить большие теплоотводы от нагретой зоны в окружающую среду, и нет необходимости решать проблему инерциальности тепловых процессов. В этом случае такой транзистор не будет нагреваться. Кроме того при определенных условиях можно добиться того, что транзистор может охлаждаться до той степени, пока не наступит абсолютный ноль, и это приведет к возникновению сверхпроводимости. Такая криоэлектроника способна без существенных тепловых потерь реализовать многие функции современной электронной аппаратуры.

Конструктивно экономичный биполярный светотранзистор может быть выполнен в различных исполнениях. Вместо $n-p-n$ структуры возможна структура $p-n-p$. При этом полярность источника питания должна быть изменена, и излучающие, и приемные переходы тоже поменяются местами. Принцип излучения светодиода позволяет реализовать оптопару в пределах одного электронного компонента.

В отличие от обычных оптопар, которые дискретно в пространстве разделены, здесь, они интегрально объединены в пределах одного электронного компонента. И отличие состоит в том же, как, если биполярный транзистор с двумя $p-n$ переходами сравнивать с двумя диодами, у которых тоже есть два перехода, но нет общей базы. Отличие конструктивное влияет на схемотехническое решение и определяет все электрофизические параметры. Также и в данной структуре - светоизлучающая структура, объединенная вместе со свето-поглощающей структурой в виде солнечной батареи, позволяет реализовать не просто оптоэлектронную пару, а именно структуру, имеющую новые свойства и новые качества, которые позволяют не только повысить быстродействие при передаче полезной информации, но и повысить экономичность такой структуры.

В обычном чипе, электронном компоненте, который передает нули или единицы для компьютерной техники используются биполярные и полевые транзисторы с высоким быстродействием на основе транзисторно-транзисторной логики, логики металл-диэлектрик-полупроводник или эмиттерно-связанной логики. Но в данном случае логика не имеет значение, а имеет значение исполнение конструктивное светотранзистора для того, чтобы повысить быстродействие передачи сигнала и одновременно повысить мощность передаваемых сигналов. Мощность повышается за счет того, что уменьшаются паразитные тепловыделения в условиях, когда $p-n$ переходы и сами полупроводниковые структуры выполняются в виде тонких пленок.

В этом случае поперечное сечение таких сопротивлений имеет гораздо большее значение, чем толщина такой пленки. И в соответствии с формулой омического сопротивления, оно будет стремиться к нулю, то есть, чем меньше толщина и меньше путь тока и, чем шире размер пленки, тем меньше она обладает сопротивлением и большей проводимостью, что приводит к уменьшению паразитных тепловых выделений. В тоже время на термоэлектрические свойства это никоим образом не влияет. Но в отличие от обычных термоэлектрических модулей, в которых один переход, помимо Джоулевых тепловыделений, ещё выделяет тепло термоэлектрическое, а второй переход помимо того, что создает холод Пельтье, всё равно продолжает выделять

паразитическое тепло за счет эффекта Джоуля, там получается, что в обычном термомодуле количество выделяемого тепла в целом на термоэлектрическое устройство в среднем в три с половиной раза превышает генерируемый устройством холод, и это не позволяет реализовать высокоэффективные экономичные термоэлектрические охладители.

Но, если этот принцип использовать при изготовлении полупроводниковых транзисторов, и этот полупроводниковый биполярный транзистор сделать таким образом, что вместо нагревающегося перехода будет светящийся переход, то в этом случае большая часть энергии будет уходить не на тепло, а на излучение, которое может быть также использовано в самом этом биполярном транзисторе для рекуперации опять в полезный информационный или мощностной сигнал.

Таким образом, реализация такой концепции позволяет не только изменить принципы создания полупроводниковых компонентов с двумя $p-n$ переходами, но и изменить их электрофизические параметры в сторону большей энергоэффективности и меньших паразитных тепловыделений. В результате будет гораздо меньше затрат на охлаждение таких устройств и проблем с инерционностью тепловых процессов, которые в них происходят. Так как нет тепловыделения, то можно игнорировать их инерционность. Кроме того, сам процесс отвода энергии в виде излучения происходит практически мгновенно со скоростью света, а процесс охлаждения будет на том же уровне, на котором он был в обычных термомодулях.

В результате получается, что при таком тепловом балансе уровень тепловыделения будет намного меньше, чем уровень охлаждения такого электронного компонента, так как большая часть энергии будет уноситься наружу в виде излучения либо трансформироваться в полезный сигнал на $p-n$ переходе типа солнечная батарея. Такой переход реализуется за счет того, что в обычной солнечной батарее кванты света генерируют пару электрон-дырка. Если электрон-дырка сгенерированы были в p -зоне, где имеется большой избыток дырок (положительных носителей), то в этом случае в паре электрон-дырка электрон быстро будет уничтожен большим количеством вакантных дырок.

Если генерация фотоном произошла в n -зоне, содержащей избыток электронов, то в этом случае в результате генерации пары электрон-дырка будет дырка уничтожена избытком электронов, но в $p-n$ переходе есть, так называемый, запрещенный слой, в котором отсутствуют основные носители электрического тока и, в котором сопротивление очень велико. А так как там отсутствуют основные носители, то в этом случае при генерации при помощи электромагнитных квантов света в этой зоне пары электрон-дырка не будут ничем скомпенсированы и начинают свой дрейф, положительная дырка дрейфует в сторону отрицательной n -зоны, а отрицательный электрон дрейфует в сторону положительной p -зоны. В результате создается неравновесная концентрация зарядов, которая и вырабатывает электрический ток.

Но этот же принцип один в один может быть использован внутри биполярного транзистора, когда переход база-эмиттер является излучающим, а переход база-коллектор является светопоглощающим. При поглощении фотонов там будет вырабатываться тоже неравновесная концентрация, и это будет равноценно электрическому току, который прошел от эмиттера к коллектору через базу, но движение носителей в виде электронов или ещё более медленных дырок в сторону коллектора несопоставимо по скорости, так как дрейфовая скорость таких зарядов ничтожно мала в пределах миллиметров или доли миллиметров в секунду, а вот скорость света, с которой распространяются электромагнитные кванты, позволяет практически без потерь времени и энергии оказаться на переходе база-коллектор, даже если КПД такого солнечного элемента имеет небольшое значение, после многократных отражений всё равно этот фотон с очень высоким быстродействием превратится в электрический сигнал, а не в паразитное тепловыделение.

Зеркальные электроды база, коллектор и эмиттер без потерь электрической или тепловой мощности позволяют переотражать этот сигнал внутри самого экономичного светотранзистора до тех пор, пока он не будет полностью поглощен в $p-n$ переходе между базой и коллектором. Таким образом, чуть-чуть растянута во времени, но практически при незаметном быстродей-

ствии для электронного компонента полезный сигнал будет передан гораздо быстрее в виде фотонов, чем в виде электрического тока, который с большим опозданием добавит незначительную часть энергии в перенос от эмиттера к коллектору через базу.

Такая концепция построения биполярного транзистора позволяет значительно повысить его экономичность, так как потери тепловые исчезают. Кроме того, такой транзистор больше защищен от помех, так как электрические помехи могут влиять на работу чувствительных баз или затворов, а на оптические сигналы эти помехи извне повлиять никак не могут, так как зеркальные электроды не только отражают внутри все эти сигналы, но и препятствуют прохождению электромагнитных помех извне внутрь транзистора. Таким образом, это будет дополнительная защита от помех аддитивного и мультипликативного характера из внешней среды для такого экономичного светотранзистора.

Для изготовления подобных структур целесообразно использовать аддитивные технологии на основе 3D принтеров нового поколения, способные не только работать с пластическими порошками или металлическими, а способные в одном технологическом цикле на одном слове реализовать как керамические структуры, так и металлические. Кроме того, желательно использовать структуры, способные формировать полупроводники n и p типа. В этом случае можно изготавливать целиком электронные компоненты любой степени интеграции. При этом будут получаться готовые изделия с необходимыми функциональными возможностями. Такие структуры могут быть использованы как в гражданском, так и военном аспекте.

Обсуждение результатов. Реализация световых транзисторов в виде мощных переключающих элементов и, наоборот, в виде компактных интегральных микросхем позволит в значительной степени повысить быстродействие современных электронных устройств и позволит реализовать мощные компьютеры с высоким быстродействием и высокой экономичностью, способные работать долгое время без существенных затрат энергии. Энергоэффективная аппаратура является приоритетом в развитии современной электроники. Подобные структуры могут быть реализованы не только в виде $n-p-n$ структур, но и в виде обычных светодиодных структур, оптоэлектронных пар, в виде экранов, в виде тиристоров, в виде полупроводниковых световых лазеров и так далее.

В том числе аппаратура на таких транзисторах будет прекрасно работать в военной аппаратуре, аппаратуре спецназначения в условиях агрессивной внешней среды и даже при активном воздействии техногенными средствами вплоть до ядерного электромагнитного импульса. Подобная электроника имеет значительные преимущества по сравнению с ранее применяемыми аналогами.

Перспективы развития световых экономичных транзисторов позволяют не только повысить степень интеграции, а значит, и увеличить производительность процессоров, но и снизить энергозатраты на системы охлаждения и на систему питания самого устройства. За счет большей эффективности такие устройства будут меньше потреблять энергии и будут в экологическом плане гораздо более престижны. Кроме того для реализации такого полупроводникового компонента достаточно просто металлических зеркальных электродов и арсенид галлиевых полупроводниковых структур.

Вывод. Наиболее целесообразно подобные свето-транзисторы использовать для оптоволоконных линий связи для формирования мощных сигналов при передаче по магистральным линиям на большие расстояния. Так как быстродействие этих структур позволяет реализовать широкие информационные возможности и передавать большие информационные массивы по многожильным оптоволоконным кабелям трансатлантическим через континенты на большие расстояния без дополнительных устройств подпитки. Мощность таких устройств может быть сопоставима с полупроводниковыми лазерами, но быстродействие будет намного выше. При этом безопасность при защите информации также возрастет, а надежность вырастет на несколько порядков.

Кроме того подобные транзисторы могут быть использованы в качестве мощных силовых элементов для управления спутниковыми системами при передаче их по соответствующим

светоотражающим устройствам в пассивном и активном режиме, потому что на орбите отсутствует препятствия для распространения электромагнитных квантов, и всё упирается только в мощность и быстродействие бортовых систем. В связи с тем, что в последнее время реализуется концепция не одиночных автономных устройств, а формирование стаи или роя беспилотных управляемых микроспутников, беспилотников и так далее целесообразно использовать такие оптические системы управления, способные при любой погоде реализовать устойчивую надежную связь при передаче информации.

Библиографический список:

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386с.
2. 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 δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. № 1. С. 158-169.
3. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А. Применение полупроводниковых термоэлектрических устройств для охлаждения тепловыделяющих компонентов цифровых активных фазированных антенных решеток // Неделя науки - 2016. Материалы XXXVII итоговой научно-технической конференции ДГТУ. 2016. С. 56-57.
4. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Магомедова П.А., Челушкин Д.А. Энергоэффективный полупроводниковый термоэлектрический тепловой насос спирального типа // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. Т. 41. № 2. С. 49-60.
5. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Магомедова П.А., Челушкина Т.А. Энергоэффективный теплоотвод на основе многокаскадного термоэлектрического устройства с применением диодов Ганна // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. Т. 39. № 4. С. 14-20.
6. Гаджиев Х.М., Челушкина Т.А., Шкурко А.С. Излучающие полупроводниковые электронные приборы в цифровых активных фазированных антенных решетках // Перспективы модернизации современной науки. Сборник статей Международной научно-практической конференции. 2015. - С. 14-15.
7. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. - СПб.: Политехника, 2005.
8. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. - Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
9. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. - Москва: «Академия», 2012. 136 с.
10. Дорохин М. В., Данилов Ю. А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
11. 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 δ -Mn>-легированные слои // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 2. С. 9-12.
12. 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.
13. 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.
14. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А. Опубл. 10.07.2013.
15. 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.
16. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2007. Vol. 40. No 2. pp. 179-R203.
17. 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. Anatyчук L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003. 386c.
2. Dmitriyev A. I., Talantsev A. D., Zaytsev S. V., Danilov YU. A., Dorokhin M. V., Zvonkov B. N., Koplak O. V., Morgunov R. B. Fotolyuminescentnyy otklik kvantovoy yamy na izmeneniye magnitnogo polya d-sloya Mn v geterostrukturakh InGaAs/GaAs // ZHETF. 2011. T. 140. № 1. pp. 158-169. [Dmitriyev A. I., Talantsev A. D., Zaitsev S. V., Danilov Yu. A., Dorokhin M. V., Zvonkov B. N., Koplak O. V., Morgunov R. B. Photoluminescent QW response to a

change in the magnetic field of the Mn δ layer in InGaAs / GaAs heterostructures // JETP. 2011. T. 140. No. 1. pp. 158-169. (In Russ.)]

3. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Chelushkina T.A. Primeneniye poluprovodnikovyykh termo-elektricheskikh ustroystv dlya okhlazhdeniya teplovydelyayushchikh komponentov tsifrovyykh aktivnykh fazirovan-nykh antennykh reshetok // Nedelya nauki - 2016. Materialy XXXVII itogovoy nauchno-tekhnicheskoy konferen-tsii DGTU. - 2016. - S. 56-57. [Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Chelushkina T.A. The use of semiconductor thermoelectric devices for cooling the heat-generating components of digital active phased antenna arrays // Science Week - 2016. Materials of the XXXVII final scientific and technical conference of DSTU. - 2016. -- S. 56-57. (In Russ.)]

4. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A. Energoeffektivnyy po-luprovodnikovyy termoelektricheskiy teplovoy nasos spiral'nogo tipa // Vestnik Dagestanskogo gosudar-stvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - 2016. - T. 41. - № 2. - S. 49-60. [Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A. Energy-efficient semiconductor thermoelectric heat pump of spiral type //Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. - 2016. T. 41. No. 2. pp. 49-60. (In Russ.)]

5. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Magomedova P.A., Chelushkina T.A. Energoeffektivnyy tep-lootvod na osnove mnogokaskadnogo termoelektricheskogo ustroystva s primeneniyyem diodov Ganna // Vest-nik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki. - 2015. - T. 39. - № 4. - S. 14-20. [Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Magomedova P.A., Chelushkina T.A. Energy-efficient heat sink based on a multi-stage thermoelectric device using Gunn diodes // Bulletin of the Dagestan State Technical University. Technical science. - 2015. - T. 39. - No. 4. pp. 14-20. (In Russ.)]

6. Gadzhiyev KH.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. Izluchayushchiye poluprovodnikovyye elektron-nyye pribory v tsifrovyykh aktivnykh fazirovannykh antennykh reshetkakh // Perspektivy modernizatsii sovre-mennoy nauki. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. - 2015. - S. 14-15. Gadzhiyev H.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. Radiating semiconductor electronic devices in digital active phased antenna arrays // Prospects for the modernization of modern science. Collection of articles of the International scientific-practical conference. 2015 pp. 14-15. (In Russ.)]

7. Ismailov T.A. Termoelektricheskiye poluprovodnikovyye ustroystva i intensivatory teploperedachi. - SPb.: Politehnika, 2005. [Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. - St. Petersburg: Polytechnic, 2005. (In Russ.)]

8. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M. Okhlazhdeniye radioelektronnykh sistem: uchebnoye posobiye. - Makhachkala: IPTS DGTU, 2012. - 165 s. [Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M. Cooling of electronic systems: a training manual. - Makhachkala: CPI DGTU, 2012. 165 p. (In Russ.)]

9. Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M. Termoelektricheskoye okhlazhdeniye teplovydelyayushchikh kompo-nentov mikroelektronnoy tekhniki. - Moskva: «Akademiya», 2012. - 136 s. [Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M. Thermoelectric cooling of the fuel components of microelectronic technology. - Moscow: "Academy", 2012. - 136 p. (In Russ.)]

10. Dorokhin M. V., Danilov YU. A. Izmereniye polarizatsionnykh kharakteristik izlucheniya nanogeterostruktur: uchebno-metodicheskoye posobiye. - Nizhny Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2011 [Dorokhin MV, Danilov Yu. A. Measurement of the polarization characteristics of the radiation of nanoheterostructures: a training manual. - Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2011. (In Russ.)]

11. Vikhrova O. V., Danilov YU. A., Drozdov YU. N., Zvonkov B. N., Iikawa F., Brasil M. J. S. P. Svoystva kvantovo-razmernyykh struktur GaAs/InGaAs, sodержashchikh d<Mn>-legirovannyye sloi // Poverkh-nost'. Rentgenovskiy, sinkhrotronnyye i neytronnyye issledovaniya. - 2007. - № 2. - S. 9-12. [Vikhrova O. V., Danilov Yu. A., Drozdov Yu. N., Zvonkov B. N., Iikawa F., Brasil MJSP Properties of quantum-dimensional GaAs / InGaAs structures containing δ <Mn> -doped layers // Surface. X-ray, synchrotron and neutron studies. 2007. No. 2. pp. 9-12. (In Russ.)]

12. Patent RF na izobreteniyе №2507613. Kaskadnoye svetoizluchayushcheye termoelektricheskoye ustroystvo / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for the invention No. 2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device / Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 02/20/2014. (In Russ.)]

13. Patent RF na izobreteniyе №2405230. Sposob otvoda tepla ot teplovydelyayushchikh elektron-nykh komponentov v vide izlucheniya / Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Che-lushkina T.A., opubl. 01.06.2009. [RF patent for the invention No. 2405230. The method of heat removal from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A., publ. 06/01/2009. (In Russ.)]

14. Patent RF №2487436. Svetotranzistor/ Ismailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Opubl. 10.07.2013. [RF patent No. 2487436. Svetotransistor / Ismailov T.A., Gadzhiyev H.M., Gadzhiyeva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Publ. 07/10/2013. (In Russ.)]

15. Patent RF na izobreteniyе №2507632. Svetotranzistor s vysokim bystrodeystviyem / Is-mailov T.A., Gadzhiyev KH.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov SH.A., opubl. 20.02.2014. [RF patent for the invention No. 2507632. High-speed light transistor / Ismail T.A., Gadzhiyev H.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A., publ. 02/20/2014. (In Russ.)]

16. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. - 2007. Vol. 40. No 2. pp. 179-R203.

17. 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. No 3. pp. 035338-1-5. [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. Vol. 71. No 3. pp 035338-1-5. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Гаджиев Хаджимурат Магомедович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Ахмедов Магомед Эминович, доктор технических наук, доцент кафедры технологии пищевых производств, общественного питания и товароведения; e-mail: akhmag49@mail.ru

Гаджиева Солтанат Магомедовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Курбанова Патимат Арсланалиевна, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники, e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Information about the authors:

Hadzhimurat M. Gadzhiev, Cand.Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics; e-mail: gadjiev.xad@mail.ru

Magomed E. Akhmedov, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technology of Food Production, Catering and Commodity Science; e-mail: akhmag49@mail.ru

Soltanat M. Gadzhieva, Cand.Sci. (Physical and Mathematical), Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: gadzhieva_soltanat@mail.ru

Patimat A. Kurbanova, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; e-mail: magomedova-pa@mail.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.06.2019.

Принята в печать 26.08.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.06.2019.

Accepted for publication 26.08.2019.