ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

УДК 681.586.67

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-6-15

Оригинальная статья /Original Paper

Прецизионный термоэлектрический полупроводниковый датчик

С.М. Гаджиева, Т.А. Челушкина, Д.С. Гаджиев, П.С. Магомедова, И.М. Курбанов

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

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка прецизионного термоэлектрического полупроводникового датчика. **Метод.** В ходе исследования применен балансный метод, основанный на том, что вместо перепада температур термомодуль будет измерять совпадение температур. **Результат.** Применение термоэлектрического полупроводникового датчика уменьшает погрешность при измерении температуры окружающей среды либо исследуемого объекта. Термоэлектрический полупроводниковый датчик с эффектом Пельтье может функционировать в экономном режиме, не затрачивая энергию на измерение температуры. **Вывод.** Термоэлектрический полупроводниковый датчик функционирует в адаптивном режиме измерения температур, позволяя настраивать функциональный датчик для измерения температуры с необходимой точностью в зависимости от исследуемого объекта, а также стабилизировать границу расплава или кипения в контейнере, находящимся в контакте с цифровым термоэлектрическим устройством.

Ключевые слова: термоэлектрический полупроводниковый датчик, измерение температуры, охлаждение, кристаллизация, балансное измерение

Для цитирования: С.М. Гаджиева, Т.А. Челушкина, Д.С. Гаджиев, П.С. Магомедова, И.М. Курбанов. Прецизионный термоэлектрический полупроводниковый датчик. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (4): 6-15. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-6-15

Precision thermoelectric semiconductor sensor

S.M. Gadzhieva, T.A. Chelushkina, D.S. Gadzhiev, P.S. Magomedova, I.M. Kurbanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. The aim of the study is to develop a precision thermoelectric semiconductor sensor. **Method.** In the course of the study, a balanced method was applied, based on the fact that instead of a temperature difference, the thermal module will measure the coincidence of temperatures. **Result.** The use of a thermoelectric semiconductor sensor practically reduces the error when measuring the temperature of the environment or the object under study. The thermoelectric semiconductor sensor with the Peltier effect can operate in an economical mode, without wasting energy for measuring the temperature. **Conclusion.** The thermoelectric semiconductor sensor operates in an adaptive temperature measurement mode, allowing you to adjust a functional sensor to measure temperature with the required accuracy depending on the object under study, as well as stabilize the melt or boiling boundary in a container in contact with a digital thermoelectric device.

Keywords: Thermoelectric semiconductor sensor, temperature measurement, cooling, crystallization, balance measurement

For citation: S.M. Gadzhieva, T.A. Chelushkina, D.S. Gadzhiev, P.S. Magomedova, I.M. Kurbanov. Precision thermoelectric semiconductor sensor. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2021; 48 (4): 6-15. DOI: 10.21822 / 2073-6185-2021-48-4-6-15

Введение. Для проведения измерений в технической и биологической областях различных температур в широком диапазоне используются методики с применением различных устройств. Основным способом является измерение температуры по расширению нагреваемого объекта по изменению его геометрических параметров [1]. Это хорошо известный ртутный термометр. При нагревании ртуть занимает больший объём, и за счёт специальной конструкции это можно отобразить в виде откалиброванной шкалы. Вместо ртути могут быть использованы другие жидкости, также изменяющие свой объём в тех диапазонах, когда ртуть может замерзнуть или испариться, однако, точность такой методики невысока.

Широко распространены различные термопары, которые позволяют по перепаду температур выработать различные величины преобразуемого напряжения и токов. Однако нелинейность на краях диапазона приводит к большим погрешностям. Также существуют методы по измерению степени излучения нагретых объектов или же по изменению в диэлектрических и магнитных параметрах в резонансных сигналах по изменению частоты колебательных контуров. Эти методы являются наиболее точными, но они являются одновременно и наиболее сложными в реализации [2, 14].

Постановка задачи. Для проведения измерений температуры в широком диапазоне температур при минимальных погрешностях целесообразно разработать термоэлектрический датчик температуры, который будет работать по балансному методу. Термоэлектрическое устройство известно уже давно, а в термопарах используется эффект Зеебека. Эффект Зеебека подразумевает при наличии перепада температур выработку электрической энергии.

Если будет взят термоэлектрический модуль (ТЭМ), в котором полупроводниковые ветви последовательно соединены таким образом, что создают две поверхности, то перепад температур между ними сможет вырабатывать различные напряжения в зависимости от поданной разности температур. Такой термометр способен измерять температуру в широком диапазоне при изменении материалов полупроводниковых ветвей или использование чисто биметаллических конструкций. Однако погрешность на краях диапазона и погрешности изготовленных самих термопар приводят к тому, что нелинейные искажения могут принимать недопустимые значения.

Методы исследования. Для того чтобы исключить большую часть этих погрешностей, целесообразно осуществить балансный метод, который будет основываться на том, что вместо перепада температур такой термомодуль будет измерять совпадение температур [3, 9]. То есть это будет аналог компаратора, который при равенстве значений электрических, выдаёт определенный сигнал.

Такой подход ценен тем, что в момент равенства температур термоэлектрическое устройство перестает функционировать как объект, и все его нелинейные параметры становятся незначимыми. Так как не протекает никакой ток, то сопротивления, погрешности, искажения, — всё исчезает, то есть такое термометрическое устройство позволяет просто зафиксировать факт совпадения температур самим фактом отсутствия своего рабочего состояния [4,7]. А вот уже создать такую температуру, которую будем измерять, — это уже вторая задача такого балластного датчика.

Обсуждение результатов. Для создания такой температуры также может быть использован термоэлектрический модуль (ТЭМ) [8,14]. Но к нему предъявляются определенные требования: в отличие от обычных ТЭМ он будет создавать не просто перепад температур между горячим и холодным спаем, а должен это делать сразу в цифровом виде, так как современные параметры, в том числе температуры, уже фиксируются не в аналоговой форме, а в цифровой [9, 11-13].

Для этого целесообразно сделать модуль из 1, 2, 4, 8, и так далее 2^n полупроводниковых модулей. Количество включенных модулей соответствует определенному режиму работы, то есть задание определенного перепада температур. Граничным условием такой модели является наличие стабильной температуры — с одной стороны для формирования заданной температуры,

с другой стороны – на другом спае. Стабильную температуру можно получить относительно вещества в фазовом состоянии, которое кипит или которое плавится. В этом случае пока вещество всё не выкипит, например, вода кипит при 100° , и пока вся вода не выкипит, температура кипения при обычном атмосферном давлении составляет 100° [14]. Или же наоборот, если плавится водяной лед, то пока он весь не расплавится температура будет стабильно поддерживаться на уровне 0 градусов.

Это базовое значение температуры позволяет относительно него сформировать при помощи термомодуля заданное цифровое значение температуры для подачи на температурный компаратор и сравнение его с неизвестной температурой. Но у кипящего и у плавящегося вещества имеется неприятная особенность в том, что она имеет границу кипения или границу кристаллизации. Это граница подвижная и соответственно меняются условия кипения или кристаллизации. Для того чтобы эту границу зафиксировать на определенном уровне целесообразно использовать ещё один термомодуль, который отводит необходимое количество тепла в окружающую среду.

Разработанное устройство представляет собой каскад термоэлектрических модулей (ТЭМ), которое приведено на рис. 1.

Рис. 1. Термоэлектрический модуль
Fig. 1. Thermoelectric module

В устройстве тепловое воздействие на биоткань осуществляет ТЭМ 1, вторые спаи которого термостатированы относительно вещества в состоянии фазового перехода 3, стабильное значение температуры которого поддерживается на заданном уровне ТЭМ 2. Для теплообмена ТЭМ 2 с окружающей средой применяется теплоотвод 4.

Таким образом, ТЭМ 1 предназначен для получения только фиксированного значения температуры, соответствующей относительно какого-то опорного значения.

ТЭМ 2 предназначен для того, чтобы плавящееся вещество поддерживать в состоянии фазового перехода, необходимого для проведения точных измерений. Дополнительным устройством является теплоотвод 4, который отводит излишек температуры в окружающую среду.

ТЭМ 1 работает в режиме максимального холодильного коэффициента, т.е. при отсутствии больших токов и отсутствии необходимости создания переноса тепла, так как здесь между первым и вторым спаями также отсутствует перенос тепла. Работа ТЭМ 1 заключается только в создании перепада температур между температурой плавящегося вещества и температурой измеряемого объекта.

При этом температура плавления плавящегося вещества выбирается вблизи ожидаемой, прогнозируемой формируемой температуры. ТЭМ 1 отличается конструктивно, от существующих традиционных ТЭМ тем, что схема питания у него не параллельная и не последовательная, а дискретная, т.е. в состав ТЭМ1 входит набор однотипных ТЭМ, имеющих идентичные параметры.

На рис. 2 приведена структура двоичного дискретного формирователя перепада температур. Здесь обозначена структура, позволяющая однотипным модулям соединенным, таким образом, что питание можно подать, либо на первый ТЭМ, либо на ТЭМ второго типа, либо на ТЭМ третьего типа, четвертого, пятого и т.д. сформировать включение либо одного, либо двух, либо четырех, либо восьми, либо любого другого значения количества однотипных ТЭ.

Рис. 2. Структура двоичного дискретного формирователя перепада температур
Fig. 2. The structure of the binary discrete shaper of the temperature difference

Изменение температуры формирования будет регулироваться не изменением тока или напряжением питания тока ТЭ, а просто количеством подключенных однотипных ТЭ, которые питаются от одного и того же стабилизированного источника питания и работают в одних и тех же дискретных режимах, таких, что - либо он включен и формирует определенный тепловой поток, либо он выключен и ничего не формирует. Количество включенных или выключенных ТЭ позволяет реализовать соответствующий перепад температуры:

$$Q = cm(T_2 - T_1) \quad (1)$$

где T_1 – температура плавления, T_2 – это температура которую мы собираемся сформировать, c – теплоемкость всего устройства в целом, который тепловой поток должен нагреть на соответствующий перепад температуры, m – масса этого тела.

Общее тепло, которое вырабатывается ТЭМ 1 по двоичной логике определяется из выражения:

$$Q = 2^n X_n Q_3 + + 2^2 X_2 Q_3 + 2^1 X_1 Q_3 + 2^0 X_0 Q_3 \quad (2)$$

где Q_3 – является эталонной задаваемой мощностью теплового воздействия, X_n – разряды двоичной логики, принимающие значения 1 или 0.

По формуле (2) можно определить какое количество тепла будет сформировано соответствующим количеством ТЭМ.

Двоичная логика позволяет посылкой из ПЭВМ логических уровней 0 и 1 по соответствующим разрядам формировать больший или меньший тепловой поток через ТЭМ 1. Этот суммарный тепловой поток, подставленный в вышеприведенные формулы, приведет к соответствующему перепаду температур относительно температуры плавления.

Таким образом, дискретно формируется необходимая температура. При условии, когда температура плавления близка к формируемой температуре будут изменяться только младшие

разряды. Количество разрядов в этом случае может быть не значительным, но даже при 10 разрядах точность формирования составит 2^{10} (1024) различных дискретных значений.

Подобная структура, двоичной дискретизации позволяет реализовать путем перебора количества включенных ТЭМ точное дозированное формирование тепловых потоков в ТЭМ 1.

При таком подходе непосредственно с ПЭВМ можно сформировать на ТЭМ 1 точное значение температуры в первом спае относительно второго спае, являющегося опорным для температуры плавления.

Вместо двоичной логики возможно использование троичной логики за счет реверса питания ТЭМ 1 (рис. 3).

Рис. 3. Троичная логика
Fig. 3. Trinity logic

В этом случае понадобится не один источник питания, который параллельно подключается ко всем ТЭМ (либо не подключается к ним), а два источника питания на каждый ТЭМ или группу ТЭМ. Причем группа ТЭМ соответствует для троичной логики одному набору, трем наборам, девяти наборам и т.д.

Соответственно можно получить любое дозированное значение температуры, как тепловой поток по направлению к первому спаю, так и от него.

Суммарный тепловой поток даст нам результирующее значение точной величины температуры на первом спае ТЭМ 1:

$$Q_x = 3^n X_n Q_3 + \dots + 3^2 X_2 Q_3 + 3^1 X_1 Q_3 + 3^0 X_0 Q_3, \quad (3)$$

где Q_3 – является эталонной задаваемой мощностью теплового воздействия; X_n – разряды троичной логики, принимающие значения +1, 0, -1.

При таком подходе исчезают погрешности в аналоговом преобразовании, так как современные технологии позволяют получать идентичные параметры отдельных ТЭМ [16]. Количество включенных ТЭМ, работающих в одинаковых условиях от одного и того же источника питания позволяют реализовать точное значение температуры в каждом спае.

Требования к плавящемуся веществу заключаются в следующем. Температура плавления этого вещества должна быть не так далека от температуры измеряемой, иначе это приведет к большому перепаду температур между первым и вторым спаем и переведет ТЭМ 1 из режима работы при максимальном холодильном коэффициенте в режим нелинейной максимальной холодопроизводительности, что нежелательно скажется на точности.

В случае если температура в первом и втором спае приблизительно равны и отличаются только в пределах не большого диапазона значений, то точность формирования будет гораздо

выше, за счет того, что ТЭМ 1 работает в облегченном режиме (с учетом его дискретной структуры точность значительно повышается).

Другими требованиями к плавящемуся веществу являются поддержание стабильной температуры в течение всего цикла работы температурного аналого-цифрового преобразователя (ТЦАП). Плавящееся вещество может также внести погрешность за счет возникновения границы между расплавленным и еще твердым веществом. Снижение этой погрешности возможно за счет использования следующего режима.

На рис.4 приведен график плавления вещества. Температура плавления при отводе тепла от плавящегося вещества, с помощью ТЭМ 2 поддерживается какое-то время постоянной, а затем начинает снижаться.

Этот момент легко зафиксировать с помощью даже грубых температурных датчиков и если в этот момент включить реверс ТЭМ 2, то можно и часть затвердевшего и переохлажденного вещества вернуть в состояние плавления, либо найти точку на границе перегиба между тем состоянием, когда все вещество затвердело и находится еще на границе температуры плавления и между тем наклоном графика, когда все вещество начинает (уже в твердой форме) охлаждаться дальше.

Реверс ТЭМ 2 позволяет, либо вернуть вещество в состояние плавления, либо начинать границу расплава вблизи спая, что видно по рис. 5.

На точности измерения это не скажется, так как точность измерения зависит от того, чтобы возле спая плавящееся вещество было в твердом состоянии на весь цикл измерения.

Рис. 4. График плавления вещества, находящегося в состоянии фазового перехода

Fig. 4. Graph of melting of a substance in a state of phase transition

Рис. 5. Схема границы расплава вещества, находящегося в состоянии фазового перехода

Fig. 5. Scheme of the boundary of a melt of a substance in a state of phase transition

Так как процесс будет происходить быстро, то вещество 3, находящееся в состоянии фазового перехода, не успеет расплавиться при работе ТЭМ 1.

В этом случае можно будет пренебречь всеми нелинейными явлениями возникающие при расчетах с учетом границы между твердой и жидкой фазами вещества, а принять допущение, что все вещество 3 в состоянии фазового перехода находится в твердой форме на границе зоны плавления (рис. 6).

Рис. 6. Схема работы термоэлектрического модуля 2 температурного аналого-цифрового преобразователя

Fig. 6. Scheme of operation of thermoelectric module 2 of temperature analog-to-digital converter

Фактически это позволяет устранить систематические погрешности в процессе формирования теплового потока, также этот режим легко поддается калибровке. Отсюда и требования к ТЭМ 2: в его задачу входит как поддержание режима охлаждения плавящегося вещества, так и реверс тока, когда это вещество может быть нагрето до исходного состояния.

Следовательно, в задачу ТЭМ 2 входит только лишь создание опорной температуры в веществе, находящемся в фазовом состоянии перехода, для того, чтобы обеспечить нормальную работу ТЭМ 1. Отвод тепла осуществляется с помощью теплоотвода 4 в окружающую среду, но в процессе измерения теплоотвод может просто накапливать тепло, необходимое для работы измерителя в целом [18-20].

В ходе проведения теплофизических исследований необходимо измерять температуру тел, для чего в свою очередь был разработан температурный аналого-цифровой преобразователь (ТАЦП), в котором используется метод тепловой компенсации, когда к ТЭМ 1 ТЦАП добавляется еще один ТЭМ - температурный компаратор, в задачу которого входит фиксация момента равенства температур формируемой ТЭМ 1 ТЦАП и измеряемой.

Исследование можно проводить в следующей последовательности: предварительно, если известна ориентировочно температура, которую мы хотим измерить с высокой точностью, что можно сделать более грубыми измерителями (либо это известно из предыдущих циклов измерения), можно подготовить ТЭМ 1 ТЦАП к этому измерению, т.е. задать такое значение температуры в первом спале относительно второго, которое будет приблизительно равно измеряемой температуре.

Перед тем как коснуться объекта измерения, плавящее вещество необходимо также привести в исходное состояние. Для этого ТЭМ 2 ТЦАП до прикосновения к объекту измерения включается в режим охлаждения плавящегося вещества и фиксирует начало изменения температуры. Как только температура стала ниже температуры плавления, ТЭМ 2 кратковременно включается в режим нагрева плавящегося вещества, чтобы вернуть его в состояние, при

котором все плавящееся вещество находится в твердом состоянии и его температура равняется температуре плавления (рис. 5).

После чего можно прикоснуться к объекту измерения и сравнить на температурном компараторе возникновение разности потенциалов. Если разность потенциалов на температурном компараторе отсутствует, то можно констатировать факт, что температура на первом спае ТЭМ 1 ТЦАП, которая дискретно задавалась на ПЭВМ в виде двоичного кода или троичного, соответствует измеряемой температуре. Тем самым можно с высокой точностью измерить температуру в объекте измерения.

Наиболее целесообразно это делать с помощью светоизлучающего термоэлектрического устройства, которое способно практически мгновенно со скоростью света отводить энергию от своего спае в окружающую среду в виде излучения [1-4]. Чем выше частота излучения от инфракрасного до ультрафиолета, тем большие мощности можно отводить [5-6]. Причём, такое устройство позволит стабилизировать границу расплава или кипения в контейнере, находящимся в контакте с цифровым термоэлектрическим устройством. Вместо жидкости или твердого тела можно использовать фазовый переход в виде сублимации, когда вещество сразу из твердой фазы переходит в газообразную [15-17].

Такой подход ценен тем, что здесь одновременно совмещён процесс и плавления, и кипения, и недостатки одного метода компенсируется другим. При этом в энергетическом плане такое явление в 2 раза более энергоэффективно.

В качестве примера можно привести кристаллы йода, которые способны возгоняться из твёрдой фазы сразу в газообразную [8]. Термомодуль с излучением способен возвращать из газообразной фазы его опять в твёрдую фазу, поддерживая стабильный процесс преобразования и измерения [15]. Тот термомодуль, который цифровой, находится в одном контакте одним спаем с плавящимся при 0 градусов льдом воды, должен работать в условиях, когда собственный теплоперенос не осуществляется, так как компаратор в момент равенства температур не должен проводить тепло ни в одну, ни в другой сторону; при разности температур теплопроводности теплоперенос отсутствует, а, значит, он будет отсутствовать и у находящегося в контакте с ним термомодулем. Это также является положительным моментом, так как в таких условиях меньше проявляются нелинейные параметры термоэлектрических устройств [10].

Вывод. Предлагаемый датчик позволяет с высокой точностью осуществить измерения температур в широком диапазоне с малой инерционностью. Изготовить такой датчик можно по современным технологиям на 3D принтере микроскопических размеров. Это также снизит инерционность работы таких датчиков; количество таких датчиков можно сделать очень большим на единицу площади, и такие датчики позволят измерять температуру не в одной точке, а на поверхности, увеличивая точность со статистической точки зрения. Перспективными областями применения таких датчиков является медицина, гражданская и военная техника, космонавтика.

Библиографический список:

1. Патент РФ №2405230, МПК: H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. 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. 27.11.2010. Бюл. №33.
2. Патент РФ №2487436. Светотранзистор/ Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М., Гаджиева С.М., Нежведилов Т.Д., Челушкина Т.А.//опубл. 10.07.2013. Бюл. №19
3. 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. Бюл. №5.
4. 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.
5. Исмаилов Т.А. Термоэлектрические полупроводниковые устройства и интенсификаторы теплопередачи. СПб.: Политехника, 2005.
6. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Охлаждение радиоэлектронных систем: учебное пособие. Махачкала: ИПЦ ДГТУ, 2012. 165 с.
7. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Термоэлектрическое охлаждение тепловыделяющих компонентов микроэлектронной техники. М.: «Академия», 2012; 136 с.

8. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Гаджиева С.М. Тонкопленочные термоэлектрические устройства с отводом тепла в виде излучения для охлаждения микросистемной техники // Научное приборостроение. 2013. Т.23. №3. С.120-124.
9. Исмаилов Т.А., Гаджиев Х.М. Челушкина Т.А., Челушкин Д.А. Высокоэффективные полупроводниковые термоэлектрические устройства и приборы. Махачкала: ИПЦ ФГБОУ ВПО «ДГТУ», 2014. 112 с.
10. Исмаилов Т.А. Гаджиев Х.М. Микроэлектронные компоненты с интегральным использованием эффекта Пельтье и оптического излучения. Махачкала: ИПЦ ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2015. 112 с.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003. 386 с.
15. 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.
16. 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.
17. Дмитриев А. И., Таланцев А. Д., Зайцев С. В., Данилов Ю. А., Дорохин М. В., Звонков Б. Н., Коплак О. В., Моргунов Р. Б. Фотолюминесцентный отклик квантовой ямы на изменение магнитного поля δ -слоя Mn в гетероструктурах InGaAs/GaAs // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. Т. 140. № 1. С. 158-169.
18. Дорохин М. В., Данилов Ю. А. Измерение поляризационных характеристик излучения наногетероструктур: учебно-методическое пособие. Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011.
19. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. Vol. 40. No. 2. pp. R179-R203.
20. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. *Physical Review B*. 2005. Vol. 71. No. 3. pp. 035338-1-5.

References:

1. RF patent No. 2405230, IPC: H01L 23/38, H05K 7/20, G06F 1/20. Method for removing heat from heat-generating electronic components in the form of radiation / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. Publ. 11/27/2010. Bul. No. 33. (In Russ)
2. RF patent №2487436. Light transistor / Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. // Publ. 10.07.2013. Bul. No. 19(In Russ)
3. RF patent for invention №2507613. Cascade light-emitting thermoelectric device .Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Gadzhieva S.M., Nezhvedilov T.D., Chelushkina T.A. publ. 02/20/2014. Bul. No. 5. (In Russ)
4. RF patent for invention №2507632. Light transistor with high speed. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Nezhvedilov T.D., Yusufov Sh.A., publ. 02/20/2014. (In Russ)
5. Ismailov T.A. Thermoelectric semiconductor devices and heat transfer intensifiers. SPb .:[Politekhnika] *Polytechnic*, 2005. (In Russ)
6. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Cooling of radio electronic systems: a tutorial. Makhachkala: IPC DSTU, 2012 . 165 p. (In Russ)
7. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Thermoelectric cooling of heat-generating components of microelectronic technology. M .: *Academy*, 2012; 136. (In Russ)
8. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Gadzhieva S.M. Thin-film thermoelectric devices with heat removal in the form of radiation for cooling microsystem technology. *Scientific instrument-making*. 2013; 23 (3): 120-124. (In Russ)
9. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M. Chelushkina T.A., Chelushkin D.A. Highly efficient semiconductor thermoelectric devices and devices. Makhachkala: IPC FGBOU VPO "DSTU", 2014; 112. (In Russ)
10. Ismailov T.A. Gadzhiev Kh.M. Microelectronic components with integrated use of the Peltier effect and optical radiation. - Makhachkala: IPC FGBOU VO "DSTU", 2015; 112. (In Russ)
11. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Magomedova P.A., Chelushkina T.A. Energy-efficient heat removal based on a multistage thermoelectric device using Gunn diodes. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2015; 39(4): 14-20. (In Russ)
12. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A. Application 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; 56-57. (In Russ)
13. Ismailov T.A., Gadzhiev Kh.M., Magomedova P.A., Chelushkin D.A. Energy efficient semiconductor thermoelectric heat pump of spiral type. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science*. 2016; 41 (2): 49-60. (In Russ)
14. Anatyuchuk L.I. *Thermoelectricity*. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity, 2003; 386.
15. Vikhrova O.V., Danilov Yu. A., Drozdov Yu. N., Zvonkov B.N., Iikawa F., Brasil MJSP Properties of quantum-well GaAs / InGaAs structures containing δ <Mn> -doped layers . *Surface. X-ray, synchrotron and neutron research*. 2007; 2: 9-12. (In Russ)
16. Gadzhiev Kh.M., Chelushkina T.A., Shkurko A.S. Radiating semiconductor electronic devices in digital active phased antenna arrays. Perspectives of modernization of modern science. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. 2015; 14-15. (In Russ)

17. Dmitriev A.I., Talantsev A.D., Zaitsev S.V., Danilov Yu.A., Dorokhin M.V., Zvonkov B.N., Koplak O.V., Morgunov R.B. Photoluminescent Response of a quantum well to a change in the magnetic field of the Mn δ -layer in InGaAs / GaAs heterostructures. [Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki] *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2011; 140(1): 158-169.
18. Dorokhin M.V., Danilov Yu. A. Measurement of polarization characteristics of radiation of nanoheterostructures: a training manual. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2011. (In Russ)
19. Holub M., Bhattacharya P. Spin-polarized light-emitting diodes and lasers. [Journal of Physics D] *Applied Physics Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007; 40 (2): R179-R203.
20. Govorov A. O., Kalameitsev A. V. Optical properties of a semiconductor quantum dot with a single magnetic impurity: photoinduced spin orientation. [Journal of Physics D] *Physical Review B*. 2005; 71(3): 035338-1-5.

Сведения об авторах:

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

Челушкина Татьяна Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники, телекоммуникаций и микроэлектроники, tatyana.chelushkina@yandex.ru

Гаджиев Даниял Солтанович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники, Danik.g.s@mail.ru

Магомедова Патимат Солтановна, аспирантка кафедры теоретической и общей электротехники, altra588@mail.ru

Курбанов Ислам Магомедович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники, m.i.kurbanow@mail.ru

Information about authors:

Soltanat M. Gadzhieva, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering, gadzhieva_soltanat@mail.ru

Tatyana A. Chelushkina, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Radio Engineering, Telecommunications and Microelectronics, tatyana.chelushkina@yandex.ru

Daniyal S. Gadzhiev, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, Danik.g.s@mail.ru

Patimat S. Magomedova, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, altra588@mail.ru

Islam M. Kurbanov, Postgraduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering, m.i.kurbanow@mail.ru

Конфликт интересов / Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/ Received 13.10.2021.

Одобрена после рецензирования / Revised 02.11.2021.

Принята в печать /Accepted for publication 03.11.2021.