

Исследования термовольтаического эффекта в полупроводниках в среднетемпературном интервале

В. В. Каминский¹, С. М. Соловьев¹, Н. В. Шаренкова¹✉,
М. М. Казанин¹, Н. М. Судак², М. И. Залдастанишвили²

¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

²ООО "ЭРА-СФТИ", пос. Агудзера, Республика Абхазия

✉natasha.sharenkova@mail.ioffe.ru

Аннотация

Введение. Преобразование тепловой энергии в электрическую является актуальной задачей. Обнаруженный в сульфиде самария (SmS) термовольтаический эффект (ТВЭ) позволяет решать ее с большим КПД по сравнению с классическими термоэлектрическими генераторами, работающими на основе классического эффекта Зеебека. ТВЭ в SmS проявляется в спонтанном появлении импульсов электрического напряжения 0.05 В в непрерывном режиме при температуре образца 470 К. Генерация ЭДС связывается с наличием градиента концентрации дефектных ионов Sm, находящихся в вакансиях подрешетки серы, и с переменной валентностью ионов самария ($Sm^{2+} \rightarrow Sm^{3+} + e^-$). При нагреве образца до определенной температуры концентрация носителей заряда скачкообразно увеличивается. Поскольку в образце дефектные ионы самария расположены неупорядоченно, происходит перенос заряда из области образца с большей концентрацией дефектных ионов в зону с меньшей концентрацией. Таким образом, создается ЭДС в направлении градиента концентрации этих ионов. Обнаруженный впоследствии в ZnO, Ge, Si и некоторых сложных полупроводниках ТВЭ достигал лишь 0.01 В.

Цель работы. Решается проблема повышения генерируемого напряжения и рабочей температуры генерации при ТВЭ.

Методы и материалы. Методом синтеза из простых веществ получены исходные материалы, из которых созданы гетероструктуры типа сэндвич $SmS/Sm_{1-x}Ln_xS$, где Ln = Eu, Yb. Кроме того, исследованы образцы на основе классического термоэлектрика PbTe с различной степенью легирования слоев, полученных спрессовыванием при высокой температуре в вакууме. На уникальной установке, исключающей градиенты температуры в образцах, проведены исследования ТВЭ.

Результаты. Показано, что повышение значений ЭДС и рабочей температуры достигается за счет заглупления донорных уровней путем легирования. В легированных образцах на основе SmS наблюдается генерация ЭДС до 0.15 В в непрерывном режиме при $T = 700$ К. Обнаруженный в гетероструктуре на основе термоэлектрического полупроводника *n*-типа PbTe ТВЭ позволяет получить значение генерируемого напряжения около 0.06 В в среднетемпературном режиме.

Заключение. Достигнутые результаты превосходят известные ранее и дают основание продолжать исследования с целью разработки полупроводниковых преобразователей, работающих на основе ТВЭ.

Ключевые слова: термовольтаический эффект, сульфид самария, теллурид свинца, гетероструктуры, среднетемпературный интервал

Для цитирования: Исследования термовольтаического эффекта в полупроводниках в среднетемпературном интервале / В. В. Каминский, С. М. Соловьев, Н. В. Шаренкова, М. М. Казанин, Н. М. Судак, М. И. Залдастанишвили // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 6. С. 37–44. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-37-44

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 19-08-00576).

Статья поступила в редакцию 09.07.2019; принята к публикации после рецензирования 18.09.2019; опубликована онлайн 30.12.2019

© Каминский В. В., Соловьев С. М., Шаренкова Н. В., Казанин М. М., Судак Н. М., Залдастанишвили М. И., 2019



Studies of the Thermovoltaic Effect in Semiconductors in the Medium Temperature Range

Vladimir V. Kaminskiy¹, Sergey M. Solov'ev¹, Natalia V. Sharenkova¹✉,
Mikhail M. Kazanin¹, Nikolay M. Sudak², Merab I. Zaldastanishvili²

Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

LLC "ERA-SFTI", pos. Agudzera, Republic of Abkhazia

✉natasha.sharenkova@mail.ioffe.ru

Abstract

Introduction. A conversion of thermal energy into electrical energy is an urgent task. The thermovoltaic effect (TVE) found in samarium sulfide (SmS) makes it possible to solve a higher efficiency problem as compared with classical thermoelectric generators operating on the basis of the Seebeck effect. TVE in SmS, is manifested in an appearance of voltage pulses of 0.05 V in continuous mode when a sample is heated to 470 K. Generation of electromotive force (EMF) is associated with a presence of a concentration gradient of defective Sm ions in sulfur sublattice vacancies, with a change in their valence ($\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+} + e^-$) and with electronic Mott transitions. TVE discovered subsequently in ZnO, Ge, Si, and in some complex semiconductors, reached only 0.01 V.

Aim. To increase the magnitude of the generated voltage and the operating temperature at TVE.

Methods and materials. By the method of synthesis from simple substances, raw materials were obtained from which SmS/Sm_{1-x}Ln_xS sandwich-type heterostructures were created, where Ln=Eu, Yb. In addition, samples based on a classical thermoelectric PbTe with different degrees of doping of the layers obtained by pressing at high temperature in a vacuum were investigated. On the unique equipment, excluding temperature gradients in samples, TVE was studied.

Results. It was shown that an increase in the EMF value and in the operating temperature had been achieved due to the penetration of donor levels by doping. In doped samples on the basis of SmS, a generation of EMF up to 0.15 V was observed in continuous mode at $T = 700$ K. TVE detected in the *n*-type thermoelectric semiconductor heterostructure PbTe, make it possible to obtain the magnitude of the generated voltage of near 0.06 V in the medium temperature mode.

Conclusion. The achieved results exceed the previously known ones and give grounds to continue research with the aim of developing semiconductor converters operating on the basis of TVE.

Keywords: thermovoltaic effect, heterostructures, samarium sulfide, lead telluride, medium temperature range

For citation: Kaminskiy V. V., Solov'ev S. M., Sharenkova N. V., Kazanin M. M., Sudak N. M., Zaldastanishvili M. I. Studies of the Thermovoltaic Effect in Semiconductors in the Medium Temperature Range. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 6, pp. 37–44. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-37-44

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. This work was supported by RFBR (project 19-08-00576).

Submitted 09.07.2019; accepted 18.09.2019; published online 30.12.2019

Введение. Термовольтаический эффект (ТВЭ) представляет собой один из новых принципов преобразования тепловой энергии в электрическую. Суть эффекта заключается в том, что образцы полупроводника, находящиеся в однородном температурном поле без какого-либо градиента температуры и имеющие градиент концентрации донорных примесей по объему, генерируют электродвижущую силу (ЭДС) в направлении этого градиента. ТВЭ был первоначально обнаружен в

сульфиде самария (SmS) [1] и достаточно подробно исследован на микро-, наноструктурированных и пленочных образцах [2–4]. Обнаружение эффекта открыло новое направление в области нетрадиционных источников возобновляемой энергии [5].

Впоследствии ТВЭ был обнаружен в других полупроводниковых материалах: ZnO [6–8] и гетероструктурах $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnS})_x$ [9], $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ [10], АШВ^v [11]. Однако значение генерируемого напряжения в них было ниже, чем в SmS.

На сегодняшний день сульфид самария является рекордсменом по значению ЭДС, генерируемой вследствие эффекта. Природа эффекта в SmS, очевидно, связана с изменением валентности ($\text{Sm}^{2+} \rightarrow \text{Sm}^{3+} + e^-$) дефектных ионов Sm, занимающих вакансии в подрешетке серы. Эти же ионы образуют примесные донорные уровни с энергией активации 0.04 эВ [12]. Важную роль в ТВЭ играют незаполненные $4f^{0-14}$ -оболочки редкоземельного иона [13]. Электроны с $4f$ -оболочек переходят в зону проводимости и создают большие локальные концентрации носителей заряда [14]. Такие переходы моттовского типа [15] имеют коллективный характер при достижении температуры генерации и сопровождаются возникновением импульсов электрического напряжения и синхронизированных с ними тепловых процессов. При исследованиях ТВЭ наблюдается потеря тепла в образцах, связанная, как считают авторы, с лавинным характером моттовских переходов. Происходит самопроизвольное охлаждение образца, которое компенсируется постоянно поддерживаемой температурой генерации за счет внешнего нагрева. Эффект генерации ЭДС в SmS наблюдается при нагревании образцов до температуры 470 К. При более высоких температурах происходит истощение примесных уровней с концентрацией N_i и энергией активации 0.04 эВ, градиент концентрации которых по объему образца вызывает ТВЭ [12]:

$$E = K \text{grad } N_i,$$

где E – напряженность генерируемого электрического поля; K – коэффициент эффекта, который сложным образом зависит от температуры и параметров полупроводника.

В настоящей статье решается проблема повышения генерируемого при ТВЭ напряжения. Один из путей повышения генерируемого напряжения следует из формулы ЭДС эффекта [4]:

$$U = \frac{k(T - T_0)}{e} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right), \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; T , T_0 – рабочая температура генерации и исходная температура соответственно; e – заряд электрона; n_1 и n_2 – концентрации электронов проводимости в приконтактных областях генерирующего полупроводника.

Повышение генерируемой ЭДС возможно при

повышении температуры образца T . Таким образом, необходимо решить задачу перевода рабочей температуры материалов на основе SmS в средне-температурную область 700...1000 К. Однако максимальная температура для процесса генерации определяется положением энергетических уровней донорного иона. Чем глубже залегают доноры, тем при большей температуре они истощаются и до больших температур возможен процесс генерации ЭДС за счет ТВЭ (в SmS до 470 К). Таким образом, для увеличения рабочей температуры и генерируемого сигнала в SmS необходимо заглубить донорные уровни. Оценка возможности увеличения выходного сигнала за счет заглубления донорных уровней может быть сделана исходя из формулы, вытекающей из (1) и справедливой для невырожденных полупроводников:

$$U = \frac{k(T - T_0)}{e} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{N_{i2}}{N_{i1}} \right) + \frac{(E_{a1} - E_{a2})}{kT} \right], \quad (2)$$

где N_{i1} , N_{i2} – концентрации донорных уровней с энергией активации E_{a1} и E_{a2} соответственно, находящихся в приконтактных областях.

Для исследования ТВЭ в среднетемпературной области в работе, результаты которой описаны в настоящей статье, созданы гетероструктуры на основе SmS, а также гетероструктуры на основе одного из полупроводников, используемых в этой области температур (PbTe).

Методы. Образцы LnS (Ln = Sm, Eu, Yb) изготавливались методом синтеза из простых веществ Ln и S [16]. Для получения образцов твердых растворов $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$ и $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ полученные в результате синтеза порошки LnS брались в количествах, соответствующих требуемым значениям x , перемешивались, брикетировались и отжигались в вакууме при температуре 1600 °С. Двухслойные гетероструктуры с градиентом концентрации ионов $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Ln}_x\text{S}$ (Ln = Eu, Yb) изготавливались совместным пресованием слоев порошков SmS и $\text{Sm}_{1-x}\text{Ln}_x\text{S}$ и отжигом брикетов в вакууме при температуре 1600 °С в течение 30 мин.

Для проведения экспериментов был изготовлен трехслойный образец из PbTe n -типа. Материал слоев имел следующие составы. Первый слой: PbTe + 0.065 мол. % PbI_2 + 1.5 мас. % Pb. Средний слой: PbTe + 0.04 мол. % PbI_2 + 1.5 мас. % Pb. Тре-

тий слой: $\text{PbTe} + 0.016 \text{ мол. \% PbI}_2 + 1.5 \text{ мас. \% Pb}$. Коэффициенты термоЭДС слоев при температуре 300°C составляли $\alpha_1 = 150 \text{ мкВ/К}$, $\alpha_2 = 120 \text{ мкВ/К}$ и $\alpha_3 = 70 \text{ мкВ/К}$ соответственно. Постепенное изменение значения термоЭДС по толщине трехслойного образца указывает на наличие градиента концентрации примесных донорных уровней, необходимого для возникновения ТВЭ. Этот градиент задается различным количеством PbI_2 в слоях. Образцы готовились вакуумным прессованием при температуре $750 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 18...20 мин.

Контроль состава образцов осуществлялся методом рентгенофазового анализа.

ТВЭ измерялся на установке, схематически представленной на рис. 1. Нагреватель 1 линейно нагревался до необходимой температуры и удерживался в этом состоянии в течение заданного времени. Питание нагревателя осуществлялось блоком питания D1 типа Voltcraft PPS-11815. Температура нагревателя контролировалась термопарой T2, ее показания снимались мультиметром D2 типа UNI-T UT804. Затем питание нагревателя выключалось, и остывание происходило естественным образом. Выходной сигнал с образца 2 снимался с нижнего (медная пластина 3) и верхнего (точечного 4) контактов мультиметром D3 типа RIGOL DM3061. Температуры контактов измерялись термопарами T1 и T3 и регистрировались цифровым термометром D4 типа Voltcraft K204. Управление экспериментом и регистрация данных осуществлялись на ЭВМ (PC) программой, созданной в среде LabVIEW.

Измерение электропроводности осуществля-

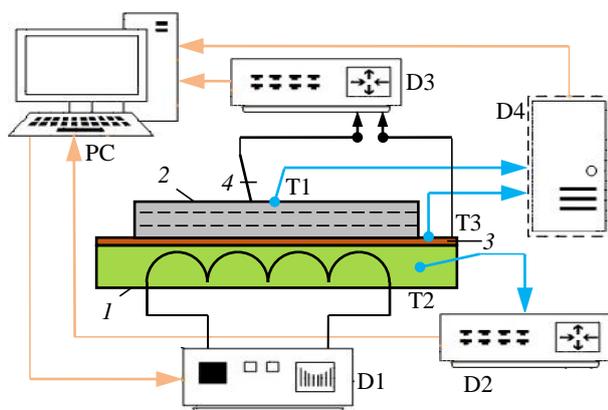


Рис. 1. Схема экспериментов по измерению термовольтаического эффекта

Fig. 1. Scheme of experiments on measuring of the thermovoltage effect

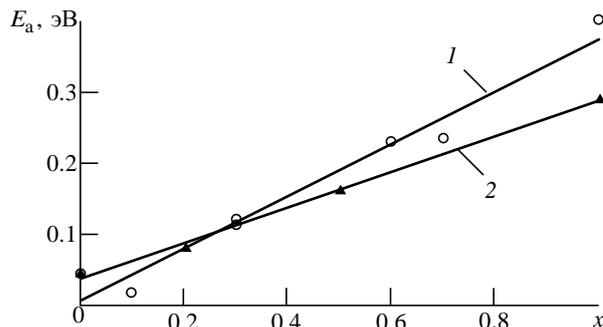


Рис. 2. Зависимость энергии активации проводимости от состава твердых растворов $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ (1) и $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$ (2)

Fig. 2. Dependence of the activation energy of conductivity on the composition of the solid solutions $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ (1) and $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$ (2)

лось четырехзондовым методом на постоянном электрическом токе.

Результаты. С целью заглупления донорных уровней выполнялось легирование SmS ионами европия и иттербия. Легирование Yb позволило увеличить энергию активации донорных уровней до $0.08...0.29 \text{ эВ}$, легирование Eu – до значений около $0.06...0.4 \text{ эВ}$ в зависимости от величины x в твердых растворах $\text{Sm}_{1-x}\text{Yb}_x\text{S}$ и $\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ (рис. 2). Как следует из рисунка, применение европия предпочтительнее.

На рис. 3 представлена температурная зависимость генерируемого за счет ТВЭ сигнала. На образце $\text{SmS}/\text{Sm}_{0.7}\text{Eu}_{0.3}\text{S}$ при $T = 750 \text{ K}$ получена генерация в непрерывном режиме со значением 0.15 В . На этом же рисунке представлена расчетная зависимость по (2). Наблюдается удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных результатов. Неточность связана с грубостью допущений при выводе этой

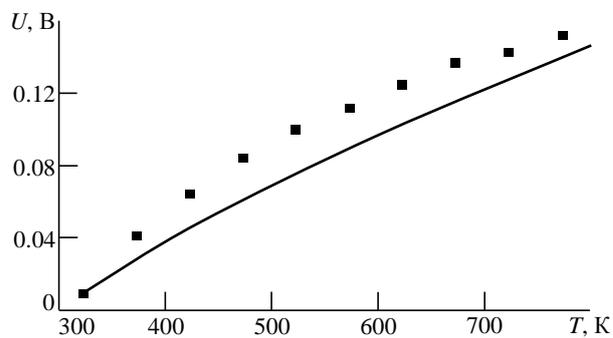


Рис. 3. Температурные зависимости генерируемого двухслойной гетероструктурой $\text{SmS}/\text{Sm}_{0.7}\text{Eu}_{0.3}\text{S}$ сигнала (маркеры – эксперимент, кривая – расчет)

Fig. 3. Temperature dependences of the generated by two-layer heterostructure $\text{SmS}/\text{Sm}_{0.7}\text{Eu}_{0.3}\text{S}$ signal (markers – experiment, line – calculation)

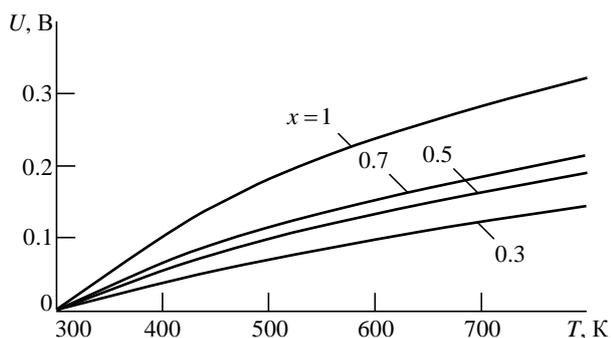


Рис. 4. Расчетные температурные зависимости генерируемого двухслойными гетероструктурами $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ сигнала при различных значениях x

Fig. 4. Estimated temperature dependences of generated by two-layer heterostructures $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ signal at various values of x

формулы. Однако полученная степень достоверности позволяет провести оценку возможностей увеличения выходного сигнала путем легирования.

На рис. 4 представлены рассчитанные по (2) для двухслойных гетероструктур $\text{SmS}/\text{Sm}_{1-x}\text{Eu}_x\text{S}$ с различными значениями x температурные зависимости генерируемого напряжения. Значения энергий активации для твердых растворов указанного состава взяты из рис. 2. Как следует из рис. 4, значение ЭДС в структурах этого состава может быть доведено в среднем интервале температур до ~ 0.3 В.

Помимо легированного SmS в качестве материала для среднетемпературного интервала возможно также применение полупроводников, используемых для этих температур в термоэлектрических преобразователях, работающих на эффекте Зеебека. Авторами настоящей статьи проведены эксперименты на гетероструктурах на основе типичного для среднетемпературного интервала термоэлектрического материала PbTe . На рис. 5

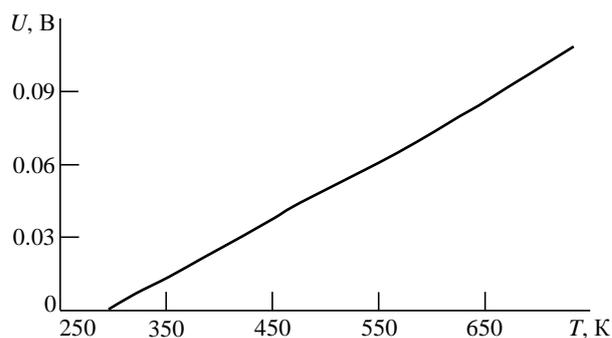


Рис. 5. Температурная зависимость сигнала, генерируемого на гетероструктуре на основе PbTe

Fig. 5. Temperature dependence of the signal generated on a PbTe based heterostructure

представлена полученная температурная зависимость генерируемого сигнала на гетероструктуре на основе этого материала. Разница в концентрации донорных уровней создавалась за счет разницы количества PbI_2 в слоях. При $T = 732$ К получена генерация 0.11 В. Эта достаточно большая величина дает основание продолжать исследования в рассмотренном направлении.

Обсуждение. В заключении можно сделать следующие выводы:

1. ЭДС, возникающая при ТВЭ, монотонно возрастает с ростом температуры.
2. Задача повышения выходного сигнала, генерируемого при ТВЭ, может быть решена за счет повышения температуры генерации вплоть до среднетемпературного интервала 700...1000 К.
3. Допирование SmS европием позволяет повысить выходной сигнал ТВЭ от 0.05 до 0.15 В.
4. Применение существующих термоэлектрических материалов, разработанных для среднетемпературного интервала, является перспективным для получения высоких значений выходного сигнала ТВЭ.

Авторский вклад

- Каминский В. В.** – постановка задачи и руководство работой.
Соловьев С. М. – измерения термовольтаического эффекта.
Шаренкова Н. В. – рентгеноструктурный анализ изготовленных образцов.
Казанин М. М. – электрические измерения.
Судак Н. М., Залдастанишвили М. И. – изготовление образцов.

Authors' contribution

- Vladimir V. Kaminsky**, statement of the problem and management of work.
Sergey M. Soloviev, measurements of the thermovoltaic effect.
Natalia V. Sharenkova, X-ray diffraction analysis of manufactured samples.
Mikhail M. Kazanin, electrical measurements.
Nikolay M. Sudak, Merab I. Zaldastanishvili, production of samples.

Список литературы

1. Каминский В. В., Соловьев С. М. Возникновение электродвижущей силы при изменении валентности ионов самария в процессе фазового перехода в монокристаллах SmS // Физика твердого тела. 2001. Т. 43, вып. 3. С. 423–426. URL: <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftt/2001/03/p423-426.pdf> (дата обращения 15.12.2019)
2. Грошев И., Полухин И. Сульфид самария и новейшие разработки на его основе // Компоненты и технологии. 2014. № 8. С. 150–157. URL: https://www.kit-e.ru/articles/device/2014_8_150.php (дата обращения 19.12.2019)
3. Особенности получения тонких пленок для термопреобразователей на основе SmS / В. И. Стрелов, Е. Б. Баскаков, Ю. Н. Бендрышев, В. М. Каневский // Кристаллография. 2019. Т. 64, № 2. С. 281–284. doi: 10.1134/S0023476119020292
4. Гетероструктура SmS/SiC и термо voltaический эффект в ней / В. В. Каминский, А. О. Лебедев, С. М. Соловьев, Н. В. Шаренкова // ЖТФ. 2019. Т. 89, вып. 2. С. 212–213. doi: 10.21883/JTF.2019.02.47072.225-18
5. Калинин Ю. Е., Чуйко А. Г., Новиков Е. Г. Перспективы развития термоэлектрических и термо voltaических материалов // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2015. № 3. С. 28–39. URL: <https://www.isjaee.com/jour/article/view/12> (дата обращения 19.12.2019)
6. Development of a physical model of thermovoltaic effects in the thin films of zinc oxide doped with transition metals / I. Pronin, N. Yakushova, I. Averin, A. Karmanov, V. Moshnikov, D. Dimitrov // Coatings. 2018. Vol. 8, № 12. P. 433(1–12). doi: 10.3390/coatings8120433
7. Термо voltaический эффект в оксиде цинка, неоднородно легированном примесями с переменной валентностью / И. А. Пронин, И. А. Аверин, А. С. Божина, А. Ц. Георгиева, Д. Ц. Димитров, А. А. Карманов, В. А. Мошников, К. И. Папазова, Е. И. Теруков, Н. Д. Якушова // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41, вып. 19. С. 22–28. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42354> (дата обращения 15.12.2019)
8. Новый тип газовых сенсоров на основе термо voltaического эффекта в оксиде цинка, неоднородно легированном примесями переменной валентности / И. А. Пронин, Н. Д. Якушова, Д. Ц. Димитров, Л. К. Красева, К. И. Папазова, А. А. Карманов, И. А. Аверин, А. Ц. Георгиева, В. А. Мошников, Е. И. Теруков // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, № 18. С. 11–16. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/45028> (дата обращения 15.12.2019)
9. Термо voltaический эффект $p\text{Si}-n(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnS})_x$ структур / Н. С. Саидов, А. С. Саидов, Ш. Н. Усмонов, К. А. Амонов // Гелиотехника. 2009. № 4. С. 102–104. URL: <http://geliotekhnika.uz/ru/articles/572> (дата обращения 15.12.2019)
10. Саидов А. С., Лейдерман А. Ю., Каршиев А. Б. Термо voltaический эффект в варизонном твердом растворе $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, вып. 14. С. 21–27. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43410> (дата обращения 15.12.2019).
11. Термо voltaические синергетические эффекты самоорганизации примесей и дефектов в полупроводниках типа $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ / А. Ю. Лейдерман, У. Х. Рахмонов, А. С. Саидов, М. М. Хашаев // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 7. С. 55–69. doi: 10.15518/isjaee.2015.07.004
12. Каминский В. В., Голубков А. В., Васильев Л. Н. Дефектные ионы самария и эффект генерации электродвижущей силы в SmS // Физика твердого тела. 2002. Т. 44, вып. 8. С. 1501–1505. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/39644> (дата обращения 15.12.2019)
13. Hickey C. F., Gibson U. J. SmS phase transition in thin films prepared by reactive evaporation // Phase Transitions: A Multinational J. 1989. Vol. 14, iss. 1–4. P. 187–199. doi: 10.1080/01411598908208095
14. Chemistry and Technology of Samarium Monosulfide / O. V. Andreev, V. V. Ivanov, A. V. Gorshkov, P. V. Miodushevskiy, P. O. Andreev // Eurasian Chemico-Technological J. 2016. Vol. 18, № 1. P. 55–65. doi: 10.18321/ectj396
15. Мотт Н., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1982. 658 с.
16. Миодушевский П. В., Андреев П. О., Высоких А. С. Фазовый состав поверхностного слоя образцов моносulfида самария // Вестн. Омск. ун-та. 2011. № 4. С. 122–126.

Информация об авторах

Каминский Владимир Васильевич – доктор технических наук (1991), главный науч. сотрудник, заведующий лабораторией ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Лауреат Государственной премии Республики Саха (Якутия) им. Г. И. Чиряева в области науки и техники (2018). Автор более 260 научных работ. Сфера научных интересов – теория физики твердого тела; химия и технология редкоземельных полупроводниковых соединений.

Соловьев Сергей Михайлович – кандидат физико-математических наук (2007), старший научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Автор 50 научных работ. Сфера научных интересов – физика редкоземельных полупроводников и технология напыления пленок.

Адрес: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: serge.soloviev@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5206-1732>

Шаренкова Наталия Викторовна – кандидат физико-математических наук (2010), старший научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Автор 78 научных работ. Сфера научных интересов – физика редкозе-

мельных полупроводников; рентгеноструктурный анализ.

Адрес: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: natasha.sharenkova@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6471-6233>

Казанин Михаил Михайлович – кандидат физико-математических наук (1988), старший научный сотрудник ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Автор 110 научных работ. Сфера научных интересов – физика редкоземельных полупроводников.

Адрес: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, Политехническая ул., 26, Санкт-Петербург, 194021, Россия

E-mail: Kazanin45@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5309-8476>

Судак Николай Максимович – заместитель директора института СФТИ (г. Сухум), гл. конструктор ООО "ЭРА-СФТИ", нач. конструкторского бюро. Окончил Днепропетровский инженерно-строительный институт по специальности "инженер-механик" (1954). Автор более 40 научных работ. Сфера научных интересов – прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

Адрес: ООО "ЭРА-СФТИ", пос. Агудзера, 384964, республика Абхазия

E-mail: sfti-sudak@mail.ru

Залдастанишвили Мераб Иванович – заместитель начальника лаборатории термоэлектрического материаловедения, ООО "ЭРА-СФТИ". Окончил Грузинский политехнический институт (ГПИ) по специальности "инженер-металлург" (1962). Автор 40 научных статей. Сфера научных интересов – разработка технологий горячего вакуумного прессования низко-, средне- и высокотемпературных термоэлектрических сплавов; термоэлектрическое приборостроение.

Адрес: ООО "ЭРА-СФТИ", пос. Агудзера, 384964, республика Абхазия

E-mail: nano-it@mail.ru

References

1. Kaminskii V. V., Solov'ev S. M. The Emergence of an Electromotive Force with a Change in the Valency of Samarium Ions During the Phase Transition in SmS Single Crystals. *Semiconductors/Physics of the Solid State*. 2001, vol. 43, iss. 3, pp. 423–426. Available at: <http://www.ioffe.rssi.ru/journals/ftt/2001/03/p423-426.pdf> (accessed 15.12.2019) (In Russ.)
2. Groshev I., Polukhin I. Samarium Sulfide and the Latest Developments on its Basis. *Components & Technologies*. 2014, no. 8, pp. 150–157. Available at: https://www.kit-e.ru/articles/device/2014_8_150.php (accessed 19.12.2019) (In Russ.)
3. Strel'ov V. I., Baskakov E. B., Bendryshev Yu. N., Kanevskii V. M. Features of Obtaining Thin Films for Thermal Converters Based on SmS. *Kristallografiya* [Crystallography]. 2019, vol. 64, no. 2, pp. 281–284. doi: 10.1134/S0023476119020292 (In Russ.)
4. Kaminskii V. V., Lebedev A. O., Solov'ev S. M., Sharenkova N. V. SmS/SiC Heterostructure and Its Associated Thermovoltaic Effect. *Technical Physics*. 2019, vol. 64, iss. 2, pp. 181–182. doi: 10.1134/S1063784219020075
5. Kalinin Yu. E., Chuiko A. G., Novikov E. G. Prospects of Development of Thermoelectric and Thermovoltaic Materials. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2015, no. 3, pp. 28–39. Available at: <https://www.isjaee.com/jour/article/view/12> (accessed 19.12.2019) (In Russ.)
6. Pronin I., Yakushova N., Averin I., Karmanov A., Moshnikov V., Dimitrov D. Development of a Physical Model of Thermovoltaic Effects in the Thin Films of Zinc Oxide Doped with Transition Metals. *Coatings*. 2018, vol. 8, no. 12, pp. 433(1–12). doi: 10.3390/coatings8120433
7. Pronin I. A., Averin I. A., Bozhinova A. S., Georgieva A. Ts., Dimitrov D. Ts., Karmanov A. A., Moshnikov V. A., Papazova K. I., Terukov E. I., Yakushova N. D. Thermovoltaic Effect in Zinc Oxide Inhomogeneously Doped with Variable Valence Impurities. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2015, vol. 41, iss. 19, pp. 22–28. Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/42354> (accessed 15.12.2019) (In Russ.)
8. Pronin I. A., Yakushova N. D., Dimitrov D. Ts., Krasteva L. K., Papazova K. I., Karmanov A. A., Averin I. A., Georgieva A. Ts., Moshnikov V. A., Terukov E. I. A New Type of Gas Sensors Based on the Thermovoltaic Effect in Zinc Oxide Inhomogeneously Doped with Variable Valence Impurities. *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2017, vol. 43, iss. 18, pp. 11–16. doi: 10.21883/PJTF.2017.18.45028.16754 (In Russ.)
9. Saidov N. S., Saidov A. S., Usmonov Sh. N., Amonov K. A. Thermovoltaic Effect of $p\text{-Si-n}(\text{Si}_2)_{1-x}(\text{ZnS})_x$ Structures. *Geliotekhnika*. 2009, no. 4, pp. 102–104. Available at: <http://geliotekhnika.uz/ru/articles/572> (accessed 15.12.2019) (In Russ.)
10. Saidov A. S., Leiderman A. Yu., Karshiev A. B. Thermovoltaic Effect in a Graded-Gap Solid Solution $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 \leq x \leq 1$). *Pis'ma v ZhTF* [Letters to the Journal of Technical Physics]. 2016, vol. 42, iss. 14, pp. 21–27. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43410> (accessed 15.12.2019) (In Russ.)
11. Leyderman A. Yu., Saidov A. S., Khashaev M. M., Rahmonov U. K. Thermovoltaic Synergetic Effects of Self-Organization of Impurities and Defects in Semiconductors of Type AIIIIV. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2015, no. 7, pp. 55–69. doi: 10.15518/isjaee.2015.07.004 (In Russ.)

12. Kaminskii V. V., Golubkov A. V., Vasil'ev L. N. Defective Samarium Ions and the Effect of the Generation of an Electromotive Force in SmS. *Semiconductors/Physics of the Solid State*. 2002, vol. 44, iss. 8, pp. 1501–1505. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/39644> (accessed 15.12.2019) (In Russ.)

13. Hickey C. F., Gibson U. J. SmS Phase Transition in Thin Films Prepared by Reactive Evaporation. *Phase Transitions: A Multinational Journal*. 1989, vol. 14, iss. 1–4, pp. 187–199. doi: 10.1080/01411598908208095

14. Andreev O. V., Ivanov V. V., Gorshkov A. V., Miodushevskiy P. V., Andreev P. O. Chemistry and Technology of Samarium Monosulfide. *Eurasian Chemico-Technological Journal*. 2016, vol. 18, no. 1, pp. 55–65. doi: 10.18321/ectj396

15. Mott N. F., Davis E. A. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials*. Moscow, *Mir*, 1982, 658 p. (In Russ.)

16. Miodushevskii P. V., Andreev P. O., Vysokikh A. S. Phase Composition of the Surface Layer of Samarium Monosulfide Samples. *Herald of Omsk University*, 2011, no. 4, pp. 122–126. (In Russ.)

Information about the authors

Vladimir V. Kaminsky, Dr. Sci. (Eng.) (1991), Chief Researcher in Ioffe Institute. Laureate of the State Prize of the Republic of Sakha (Yakutia) n. a. G. I. Chiryaev in the field of science and technology (2018). The author of more than 260 scientific publications. Area of expertise: solid state physics theory; chemistry and technology of rare-earth semiconductor compounds.

Sergey M. Soloviev, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2007), Senior Researcher in Ioffe Institute. The author of 50 scientific publications. Area of expertise: rare earth semiconductor physics and film deposition technology.

Address: Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Russia

E-mail: serge.soloviev@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5206-1732>

Natalia V. Sharenkova, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (2010), Senior Researcher in Ioffe Institute. The author of 78 scientific publications. Area of expertise: rare earth semiconductor physics; X-ray analysis.

Address: Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Russia

E-mail: natasha.sharenkova@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6471-6233>

Mikhail M. Kazanin, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (1988), Senior Researcher in Ioffe Institute. The author of 110 scientific publications. Area of expertise: rare earth semiconductor physics.

Address: Ioffe Institute, 26 Politekhnikeskaya, St Petersburg 194021, Russia

E-mail: Kazanin45@mail.ioffe.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5309-8476>

Nikolay M. Sudak, Deputy Director in Sukhumi Institute of Physics and Technology. chief designer in LLC "ERA-SFTI", Abkhazia. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: direct conversion of thermal energy into electrical energy.

Address: LLC "ERA-SFTI", Gulripsh Districts Agudzera 384964, Republic of Abkhazia

E-mail: sfti-sudak@mail.ru

Merab I. Zaldastanishvili, Deputy Head of the Laboratory of Thermoelectric Materials Science in LLC "ERA-SFTI", Abkhazia. The author of more than 40 scientific publications. Area of expertise: development of technologies for hot vacuum pressing of low-, medium- and high-temperature thermoelectric alloys; thermoelectric instrument making.

Address: LLC "ERA-SFTI", Gulripsh Districts Agudzera 384964, Republic of Abkhazia

E-mail: nano-it@mail.ru
