

07

## Температурный режим и механические напряжения в корпусированных фотоэлектрических преобразователях концентрированного солнечного излучения

© А.Н. Паньчак, М.З. Шварц

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: a.panchak@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 октября 2021 г.

В окончательной редакции 2 декабря 2021 г.

Принято к публикации 7 декабря 2021 г.

В фотоэлектрических преобразователях концентрированного солнечного излучения утонение подложки позволяет уменьшить тепловое сопротивление кристалла и снизить рабочую температуру активной области. Однако при этом механические напряжения в нем увеличиваются. Настоящая работа поднимает вопрос баланса между механической прочностью образца и уменьшением его рабочей температуры за счет утонения подложки.

**Ключевые слова:** фотоэлектрические преобразователи, теплоотвод, температурный режим, механические напряжения.

DOI: 10.21883/JTF.2022.03.52141.283-21

### Введение

Полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) являются основными элементами систем преобразования солнечной энергии в электрическую. В космических солнечных батареях ФЭП работают с неконцентрированным излучением, тогда как в наземных модулях экономически эффективным является преобразование концентрированного солнечного излучения [1–3]. При работе в условиях интенсивного (при концентрации солнечного излучения 400–1000 крат) облучения значения КПД ФЭП могут достигать 47% [4]. Однако предельные эффективности регистрируются при стандартных условиях тестирования (25°C), тогда как в реальных системах всегда присутствует разогрев ФЭП. Поскольку эффективность преобразования излучения падает с ростом температуры, остро встает вопрос снижения (или стабилизации) температуры активной области ФЭП и отвода тепла в рабочем режиме при непрерывном облучении. Стандартная конструкция ФЭП подразумевает ввод излучения в активную область со стороны верхнего широкозонного слоя (окна). Под активной областью обычно располагается тонкий переходный слой и подложка, на которой проводился процесс эпитаксии структуры или на которую структура была перенесена при производстве ФЭП [4,5]. Конструктивное исполнение высокоэффективных многопереходных ФЭП предполагает использование пластин германия толщиной до 200 мкм в качестве подложек.

До 50% приходящей солнечной энергии, поступающей на ФЭП, преобразуется в электричество и выводится во внешнюю цепь, тогда как оставшаяся часть представляет собой тепло, нагревающее полупроводниковый

кристалл. Для стабилизации рабочей температуры концентраторные ФЭП монтируются на теплоотводящее основание [6]. В зависимости от выбранных материалов коэффициенты теплового расширения теплоотвода и полупроводникового кристалла могут значительно различаться. Так как процедура монтажа обычно предполагает нагрев чипа ФЭП до высоких температур (~200°C) и последующее охлаждение, толстая подложка должна обеспечить кристаллу дополнительную жесткость, препятствовать появлению критических напряжений и дефектов в активной области и предотвратить разрушение кристалла. В качестве эффективного способа снижения рабочей температуры активной области и образца в целом следует рассматривать уменьшение толщины подложки с соответствующим одновременным снижением общего теплового сопротивления, определяемое ее материалом и толщиной. Очевидно, максимальный эффект может быть достигнут при некоторой толщине подложки, которой оказывается достаточно для обеспечения механической прочности и работоспособности ФЭП с учетом температурных режимов его жизненного цикла. В настоящей работе обсуждается вопрос баланса между уменьшением рабочей температуры активной области (за счет утонения подложки) и сохранением достаточной механической прочности полупроводниковой структуры, смонтированной на теплоотводе.

### 1. Перегрев активной области

Моделирование тепловых режимов и определение температуры проводилось для ФЭП, GaAs активная область которого сформирована на германиевой подложке. Для этого использовался пакет COMSOL Multiphysics.

ФЭП имел размеры  $3 \times 3$  mm. Толщина подложки изменялась от 200 до  $3 \mu\text{m}$ . В качестве материала для теплоотвода, на котором устанавливался ФЭП, рассматривались медь (Cu), ковар (Kovar), сталь (Steel), алюминитридная (AlN) и алюмооксидная ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) керамики. Размер теплоотвода составлял  $10 \times 12 \times 1$  mm<sup>3</sup>.

Распределение облученности, формируемое концентратором на ФЭП, предполагалось „гауссовым“ при кратностях концентрирования излучения  $C = 100\text{--}1000$  X с размером освещаемой области 2.8 mm в диаметре и равномерным при  $C = 1$  X. Плотность потока солнечного облучения излучения, поступающего на концентратор, принималась равной  $1000$  W/m<sup>2</sup>.

В ходе моделирования было установлено, что наличие припойного слоя  $\text{Sn}_{0.62}\text{Pb}_{0.36}\text{Ag}_{0.02}$  толщиной до  $10 \mu\text{m}$  не оказывает существенного влияния на температуру и механические напряжения внутри полупроводникового кристалла (разница результатов моделирования с припоем и без него не превышала 2%), поэтому в проводимых оценках вклад характеристик припоя в возникающие напряжения в полупроводниковом кристалле принимался пренебрежимо малым и не учитывался. Кроме того, пайка ФЭП непосредственно на материал теплоотвода затруднительна, поэтому теплоотводящие платы покрывают тонким слоем меди. Было установлено, что при толщине медной пленки менее  $10 \mu\text{m}$  существенного влияния на результаты моделирования также нет. Таким образом, сейчас и далее принято допущение: полупроводниковая структура жестко смонтирована непосредственно на теплоотвод, при этом между ними имеется идеальный термический контакт.

Поскольку тепловое сопротивление на границе ФЭП–теплоотвод значительно меньше, чем на границе ФЭП–воздух, и основной поток тепла в кристалле направлен от фотоприемной поверхности (активной области) в сторону тыльного контакта и теплоотвода, перегрев активной области может быть определен из уравнения теплопроводности [7]

$$q = -\chi \nabla T, \quad (1)$$

где  $q$  — поток тепла,  $\chi$  — теплопроводность.

При „гауссовом“ (а также при равномерном) распределении облученности по фотоприемной поверхности максимальная температура наблюдается в центре ФЭП вблизи активной области. На рис. 1 приведен перегрев в этой точке относительно комнатной температуры ( $25^\circ\text{C}$ ) в режиме холостого хода. Так, при кратности концентрирования солнечного излучения  $1000$  X отчетливее всего видна разница влияния на рабочую температуру толщины подложки (рис. 1). Следует отметить, что в представленном варианте медный теплоотвод имеет максимальный (для рассматриваемых материалов) коэффициент теплопроводности и одновременно наибольшую разность коэффициентов линейного расширения (см. таблицу). Примеры использования теплоотводов (в том числе из меди) в концентраторных фотоэлектрических модулях приведены в [1,2,8,9].

Эффективность передачи тепла от активной области через подложку к теплоотводу будет зависеть от характеристик последнего. Так, с уменьшением толщины германиевой подложки не каждый теплоотвод сможет обеспечивать условия для понижения температуры активной области ФЭП (рис. 2). Для материалов с теплопроводностью меньше германия (Kovar и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , см. таблицу) утонение полупроводниковой подложки приводит к повышению температуры  $p$ – $n$ -перехода. Теплопроводность стали близка к теплопроводности германия, поэтому с уменьшением толщины подложки температура  $p$ – $n$ -перехода будет меняться незначительно.

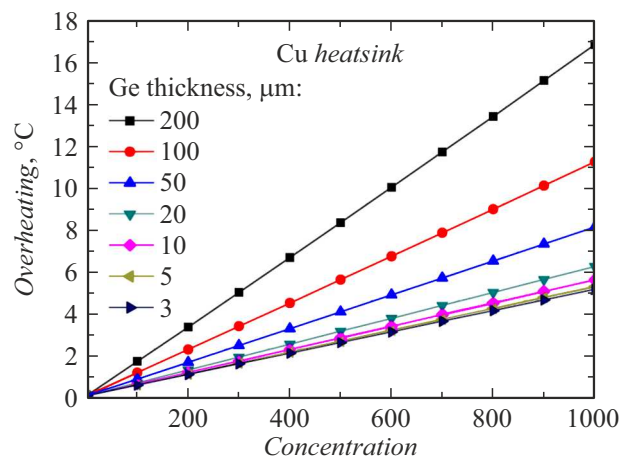


Рис. 1. Перегрев активной области ФЭП в центре относительно окружающей среды в зависимости от кратности концентрирования солнечного излучения и изменения толщины Ge-подложки при использовании медного теплоотвода толщиной 1 mm. Режим работы ФЭП — холостой ход. Температура тыльной стороны теплоотвода поддерживалась на уровне окружающей среды ( $25^\circ\text{C}$ ).

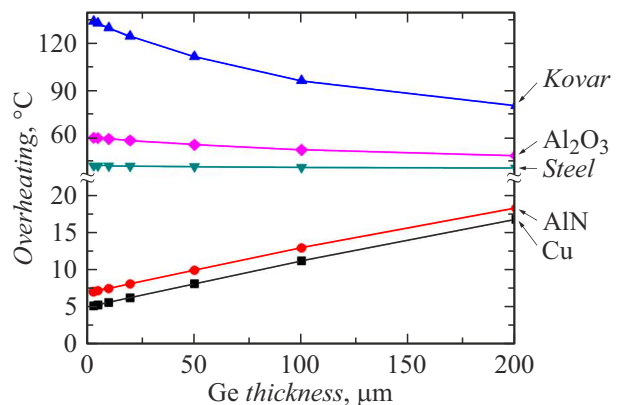


Рис. 2. Перегрев активной области ФЭП в центре относительно окружающей среды в зависимости от толщины Ge-подложки при использовании теплоотводов из меди (Cu), алюминитрида (AlN), стали, алюмооксида ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ковара (Kovar). Режим работы ФЭП — холостой ход. Температура тыльной стороны теплоотвода поддерживалась на уровне окружающей среды ( $25^\circ\text{C}$ ). Кратность концентрирования  $C = 1000$  X.

Значения теплопроводности и коэффициента линейного теплового расширения германия (Ge), арсенида галлия (GaAs), меди (Cu), алумонитридной керамики (AlN), ковара (Kovar), стали (Steel), алюмооксидной керамики ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) при комнатной температуре [10-23]

Материал	Ge	GaAs	Cu	AlN	Kovar	Steel	$\text{Al}_2\text{O}_3$
Теплопроводность ( $\chi$ ), W/(m·K)	61	33	401	287	14	47	35
Коэффициент температурного расширения $\times 10^{-6}$ , $\text{K}^{-1}$	6.1	6	16.5	5.3	6.2	13.8	5.6

Применение теплоотводов на основе материалов с коэффициентом теплопроводности, превышающим аналогичный показатель полупроводниковой германиевой подложки, обеспечивает снижение рабочей температуры ФЭП по мере ее утонения. Так, например, при кратности концентрирования солнечного излучения  $C = 1000 \times$  температура в центре активной области ФЭП, смонтированного на стабилизируемом при  $T = 25^\circ\text{C}$  теплоотводе из алумонитридной керамики, будет составлять  $43^\circ\text{C}$  (для режима холостого хода) при толщине Ge подложки  $200 \mu\text{m}$ . Температура аналогичного образца с толщиной подложки  $3 \mu\text{m}$  в этих же условиях будет уже  $32^\circ\text{C}$ . Таким образом, температура активной области утоненного ФЭП может быть снижена на  $11^\circ\text{C}$ , что соответствует простоту КПД на  $\sim 1\%$ .

## 2. Механические напряжения в корпусированных ФЭП

В процессе корпусирования ФЭП фиксируется на теплоотводе методом пайки составом  $\text{Sn}_{0.62}\text{Pb}_{0.36}\text{Ag}_{0.02}$  (температура затвердевания припоя составляет  $\sim 160^\circ\text{C}$ ). Затем пара „ФЭП–теплоотвод“ остывает до комнатной температуры. В результате реализации такой технологической операции в полупроводниковой структуре ФЭП могут возникать механические напряжения из-за различия коэффициентов линейного расширения (сжатия) материала подложки и теплоотвода. Поэтому для предотвращения повреждений слоев активной области ФЭП из-за механических напряжений, инициируемых со стороны области контакта ФЭП и теплоотвода, толщина подложки должна оставаться значительной, что, как уже обсуждалось выше, будет препятствовать отводу избыточного тепла от  $p-n$ -перехода и приводить к общему перегреву ФЭП.

Несмотря на то что латеральные размеры (по осям  $X$  и  $Y$ ) моделируемого объекта значительно превышали вертикальный размер (по оси  $Z$ ), деформации во всех направлениях по предварительной оценке были незначительны. Поэтому при расчетах было принято допущение о том, что рассматриваемый объект подвергается малой деформации. В этом случае можно использовать модель деформации объемного упругого твердого тела [24]. Результаты расчетов приведены в виде механических напряжений по Мизесу [25]. Такое представление позволяет напрямую сравнивать их с пределом текучести ис-

следованных материалов. Моделирование проводилось в математическом пакете COMSOL Multiphysics с опорой на расчеты, приведенные в [26,27].

Были проведены расчеты напряжений, возникающих в структурах ФЭП ( $3 \times 3 \text{ mm}$ ) с германиевой подложкой при использовании различных теплоотводов (медь, ковар, сталь, керамика  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и AlN). Температура окружающей среды принималась равной  $25^\circ\text{C}$ . Таким образом, разница температур при выполнении технологической процедуры пайки ФЭП на теплоотвод и „холодным“ состоянием составляла  $135^\circ\text{C}$ . В настоящей работе рассматривались модели с минимальным шагом дискретизации  $1 \mu\text{m}$  по оси  $Z$  и  $10 \mu\text{m}$  по осям  $X$  и  $Y$ , что оказывалось достаточным для построения наглядной картины механических напряжений.

Рис. 3 иллюстрирует типичное распределение напряжений в исследуемом ФЭП, зафиксированном на медном теплоотводе. Результаты приведены для вертикального сечения, проходящего через центр ФЭП и середину его боковой грани (точки  $[0, 0]$  и  $[0, 1.5]$ ). Напряжение в полупроводниковой структуре наблюдается вдоль всего контакта с теплоотводом, а вблизи края ФЭП возникают области с повышенным напряжением. Для всех материалов теплоотводов расчетные напряжения в подложке не превышали предела текучести германия [28]. При утонении Ge-подложки активная область становится ближе к контакту ФЭП–теплоотвод. В этом случае при значительном рассогласовании коэффициентов термического расширения полупроводниковой структуры и

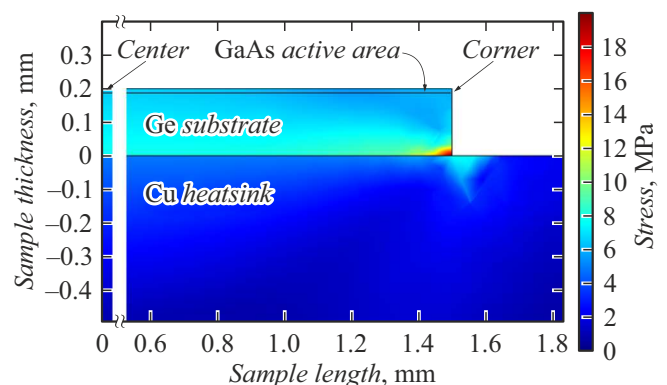
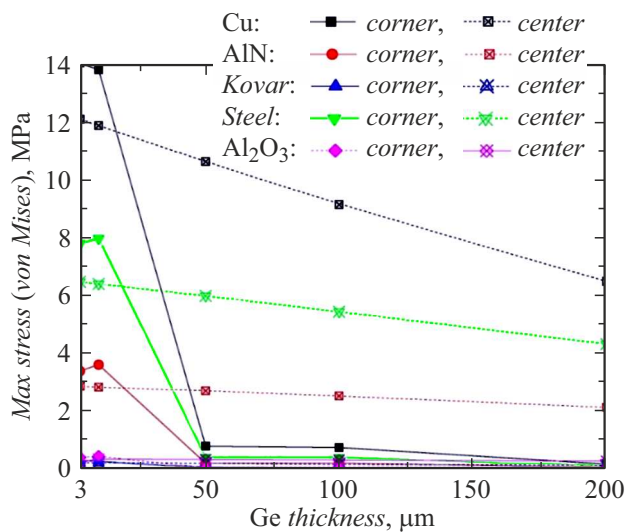


Рис. 3. Типичное распределение напряжений внутри образца с  $200 \mu\text{m}$  Ge-подложкой, смонтированного на медном теплоотводе. Данные приведены для вертикального сечения, проходящего через центр образца и центр боковой грани.



**Рис. 4.** Зависимость напряжения (по Мизесу) на границе активной области и подложки на углу кристалла (сплошные линии) и в центре кристалла (прерывистые линии) от толщины подложки при использовании теплоотводов из материалов: медь (Cu), ковар (Kovar), сталь (Steel), алумонитридная (AlN) и оксидная ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) керамика.

теплоотвода (медь, сталь,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  керамика (см. таблицу)) повышенные механические напряжения могут распространяться и на материал активной области (слой GaAs).

На рис. 4 показана зависимость напряжения на границе подложка–активная область от толщины германиевой подложки для материалов теплоотвода: медь, ковар, сталь, керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и AlN. Приведены значения напряжения на углу ФЭП и в его центре (точки отмечены на рис. 3 как „corner“ и „center“). Общая тенденция в распределении напряжений такова, что области с повышенными значениями расположены вблизи углов кристалла рядом с границей подложка–теплоотвод. По мере удаления от теплоотвода напряжения на углах релаксируют быстрее, чем в центре структуры. Так, при малой толщине подложки (до  $10\ \mu\text{m}$ ) область повышенного напряжения на углах полупроводниковой структуры достигает активной области для всех вариантов теплоотвода. Особенно ярко этот эффект проявляется для медного, стального и керамического AlN теплоотводов, поскольку коэффициенты термического расширения этих материалов значительно отличаются от германиевого (см. таблицу). При толщине подложки более  $50\ \mu\text{m}$  напряжения на углах резко снижались. В центре напряжение от толщины подложки убывало линейно. Так, при толщине подложки более  $50\ \mu\text{m}$  оно оказывалось больше, чем на углу.

В образцах с теплоотводами из материалов с коэффициентом линейного расширения, близким к германию, наблюдаются самые низкие значения напряжения в активной области:  $0.3\ \text{MPa}$  у ковара и  $0.4\ \text{MPa}$  у  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Однако теплопроводность у них ниже, чем у герма-

ния, поэтому использование их в качестве теплоотвода возможно только для образцов с толстой подложкой в специальных условиях.

Для ФЭП на медном теплоотводе наблюдаются самые значительные структурные напряжения, достигающие активной области. В этом случае использование ФЭП с толщиной подложки менее  $100\ \mu\text{m}$  недопустимо, так как возникающие напряжения выше предела текучести материала активной области GaAs ( $10\ \text{MPa}$  [29]). Следует также учитывать, что в процессе корпусирования на ФЭП со стороны активной области могут оказываться дополнительные механические воздействия, например при контактировании измерительным зондом или при установке (разварке) верхней токоотводящей шины. Для устойчивости ФЭП к таким воздействиям необходимо обеспечить „запас прочности“, оптимизируя толщину германиевой подложки.

При использовании близкого по теплопроводности к меди керамического AlN-теплоотвода максимальное напряжение в районе активной области составляет  $3.6\ \text{MPa}$  в углу кристалла и  $2.9\ \text{MPa}$  в центре. Максимальная разница напряжений в структурах с тонкой и стандартной подложкой не превышает  $1.5\ \text{MPa}$ , что позволяет обеспечить утоненным ФЭП благоприятный температурный режим без снижения фотоэлектрических характеристик из-за механических напряжений.

## Заключение

В работе рассмотрены варианты уменьшения рабочей температуры GaAs  $p$ – $n$ -перехода в ФЭП с утоняемой германиевой подложкой при работе в условиях преобразования сконцентрированного солнечного излучения. Применяемая процедура корпусирования (пайки) приводит к возникновению механических напряжений, инициируемых со стороны области контакта ФЭП и теплоотвода, поэтому процесс утонения одновременно с уменьшением рабочей температуры приводит к увеличению структурных напряжений в ФЭП. Такие напряжения могут распространяться по полупроводниковому материалу, нарастать и достигать активной области ФЭП, снижая его КПД. В свою очередь, использование теплоотводов на основе материалов с теплопроводностью, большей, чем у германия, всегда снижает рабочую температуру ФЭП с утоненной подложкой.

Показано, что при использовании медного теплоотвода в условиях освещенности  $S = 1000\ \text{X}$  расчетная температура GaAs активной области уменьшается с  $41$  до  $30^\circ\text{C}$  при утонении Ge подложки с  $200$  до  $3\ \mu\text{m}$ , однако вместе с тем в активной области возникают механические напряжения, превышающие предел текучести ее материала, что может стать причиной разрушения образцов толщиной менее  $100\ \mu\text{m}$ .

Наиболее перспективным материалом теплоотвода с точки зрения уменьшения рабочей температуры активной области и возникающих в ней механических

напряжений является AlN—керамика. При уменьшении толщины подложки с 200 до 3  $\mu\text{m}$  максимальные напряжения в напаянном ФЭП увеличиваются с 2 до 3.6 МПа, что значительно меньше предела текучести материала активной области — GaAs (10 МПа). Вместе с этим ожидается уменьшение температуры активной области с 43 до 32°C в режиме холостого хода или с 36 до 28°C в режиме оптимальной нагрузки при кратности концентрации  $C = 1000 \times$ , что эквивалентно увеличению КПД приблизительно на 1% [30,31].

### Финансирование работы

Работы проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Соглашение № 075-15-2021-989 от 23.09.2021 г. (Уникальный идентификатор контракта RF----225121X0054).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] A.B. Чекалин, A.B. Андреева, Н.Ю. Давидюк, Н.С. Потапович, Н.А. Садчиков, В.М. Андреев, Д.А. Малевский. ЖТФ, **91** (6), 915 (2021). DOI: 10.21883 JTF.2021.06.50859.314-20
- [2] M. Steiner, A. Bösch, A. Dilger, F. Dimroth, T. Dörsam, M. Müller, T. Hornung, G. Siefer, M. Wiesenfarth, A.W. Bett. Prog. Photovolt: Res. Appl., **23** (10), 1323 (2014). DOI: 10.1002/pip.2568
- [3] N.A. Pakhanov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, O.P. Pchelyakov. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, **54**, 187 (2018). DOI: 10.3103/S8756699018020115
- [4] J.F. Geisz, R.M. France, K.L. Schulte, M.A. Steiner, A.G. Norman, H.L. Guthrey, M.R. Young, T. Song, T. Moriarty. Nature Energy, **5**, 326 (2020). DOI: 10.1038/s41560-020-0598-5
- [5] X. Zhang, J. Hu, Y. Wu, F. Lu. J. Phys. D: Appl. Phys., **42**, 145401 (2009). DOI: 10.1088/0022-3727/42/14/145401
- [6] Н.Ю. Давидюк, A.B. Андреева, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, Н.А. Садчиков, A.B. Чекалин, В.М. Андреев. Письма в ЖТФ, **46** (9), 29 (2020). DOI: 10.21883 PJTF.2020.09.49369.18239 [N.Yu. Daviduk, A.V. Andreeva, D.A. Malevsky, P.V. Pokrovsky, N.A. Sadchikov, A.V. Chekalin, V.M. Andreev. Tech. Phys. Lett., **46**, 436 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020050041]
- [7] L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Theory of Elasticity* (3rd ed.) (Elsevier, 1986), v. 7, Ch. V, p. 152. DOI: 10.1063/1.3057037
- [8] A.B. Андреева, Н.Ю. Давидюк, Д.А. Малевский, А.Н. Паньчак, Н.А. Садчиков, A.B. Чекалин. ФТП, **52**, 3 (2018). DOI: 10.21883 JTF.2021.02.50365.155-20
- [9] G. Peharz, J.P.F. Rodríguez, G. Siefer, A.W. Bett. Prog. Photovolt: Res. Appl., **19**, 54 (2011). DOI: 10.1002/pip.987
- [10] A.S. Okhotin, A.S. Pushkarskii, V.V. Gorbachev. *Thermophysical Properties of Semiconductors* (Atom, Publ. House, M., 1972)
- [11] J.S. Blakemore. J. Appl. Phys., **53** (10), 123 (1982). DOI: 10.1063/1.331665
- [12] M. White, J. Gran, N. Tomlin, J. Lehman. Metrologia, **51**, S245 (2014). DOI: 10.1088/0026-1394/51/6/S245
- [13] G.A. Slack, R.A. Tanzilli, R.O. Pohl, J.W. Vandersande. J. Phys. Chem. Sol., **48** (7), 641 (1987). DOI: 10.1016/0022-3697(87)90153-3
- [14] M. Bukhari, M.S.J. Hashmi, D. Brabazon. In *The 2nd International Malaysia–Ireland Joint Symposium on Engineering, Science and Business (IMiEJS)*, 2012 At: Putra World Trade Centre, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [15] E. Ranjbarodeh, S. Serajzadeh, A.H. Kokabi, A. Fischer. J. Mater. Sci., **46**, 3225 (2011). DOI: 10.1007/s10853-010-5207-8
- [16] W. Martienssen, H. Warlimont. *Springer handbook of Condensed Matter and Materials Data* (Springer, Berlin, 2005), p. 431. DOI: 10.1007/3-540-30437-1
- [17] S.I. Novikova. Sov. Phys. Sol. State, **2** (1), 37 (1960).
- [18] S.I. Novikova. Sov. Phys. Sol. State, **3** (1), 129 (1961).
- [19] D. Minakov, P. Levashov. Phys. Rev. B., **92**, 224102 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.224102
- [20] G.A. Slack, S.F. Bartram. J. Appl. Phys., **46** (1), 89 (1975). DOI: 10.1063/1.321373
- [21] L. Del Castillo, D. Schatzel, C. Weber, T. Hatake, M. Mojarradi, E.A. Kolawa. In *Proc. 4th Int. Planetary Probe Workshop*, (2006).
- [22] G. Sun, Z. Chen, Z. Liu. J. Mater. in Civil Engineer., **23**, 1017, (2011). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000271
- [23] Y. Wang, J.J. Wang, W.Y. Wang, Z. Mei, S. Shang, L. Chen, Z. Liu. J. Physics-Condensed Matter, **22**, 202201 (2010). DOI: 10.1088/0953-8984/22/20/202201
- [24] L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Theory of Elasticity* (3rd ed.) (Elsevier, 1986), v. 7, Ch. I, p. 2. DOI: 10.1063/1.3057037
- [25] R.M. Jones. *Deformation Theory of Plasticity* (Bull Ridge Corporation, 2009), Section 4.5.6, p. 151. ISBN: 978-0-9787223-1-9
- [26] Y. Deng, S. Tang, D. Tung. *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, (Chiba, Japan, 2018), p. 1149-1151. DOI: 10.1109/ICASI.2018.8394487
- [27] M. Vajdi, F. Moghanlou, F. Sharifian Jazi, M. Shahedi Asl, M. Shokouhimehr. J. Composites and Compounds, **2** (2), 35 (2020). DOI: 10.29252/jcc.2.1.5
- [28] Yu.V. Milman, I.V. Gridneva, A.A. Golubenk. Sci. Sinter., **39**, 67 (2007). DOI: 10.2298/SOS0701067M
- [29] I. Yonenaga, K. Sumino. J. Appl. Phys., **71**, 4249 (1992). DOI: 10.1063/1.350805
- [30] C. Algora, I. Rey-Stolle. *Handbook of Concentrator Photovoltaic Technology* (Wiley, United Kingdom, 2016), p. 264. DOI: 10.1002/9781118755655
- [31] E.F. Fernández, G. Siefer, M. Schachtner, A.J. García Loureiro, P. Pérez-Higueras. AIP Conf. Proceed., **1477**, 189 (2012). DOI: 10.1063/1.4753865