

07.2

## Увеличение эффективности трехпереходных солнечных элементов за счет метаморфного InGaAs-субэлемента

© М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, М.В. Нахимович, Р.А. Салий, М.З. Шварц, Н.А. Калюжный

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: mamint@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2021 г.

В окончательной редакции 15 июня 2021 г.

Принято к публикации 16 июня 2021 г.

Исследована эффективность трехпереходных солнечных элементов GaInP/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, получаемых за счет замены (в широко используемой „классической“ гетероструктуре GaInP/GaAs/Ge) нижнего германиевого субэлемента на In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, формируемый с использованием технологии метаморфного роста. На основе оригинального подхода найдено оптимальное содержание индия в узкозонном субэlemente. Определены основные параметры субэлементов In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с концентрацией индия от  $x = 0.11$  до 0.36, на основе которых выполнен расчет вольт-амперных характеристик солнечных элементов GaInP/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Определено, что при  $x = 0.28$  эффективность трехпереходного солнечного элемента увеличивается на 3.4% (abs.) по сравнению с эффективностью для „классического“ варианта, достигая значения в 40.3% (AM1.5D). При этом показано, что эффективность таких солнечных элементов может быть увеличена до 41%.

**Ключевые слова:** многопереходные солнечные элементы, фотопреобразователи, метаморфный буфер.

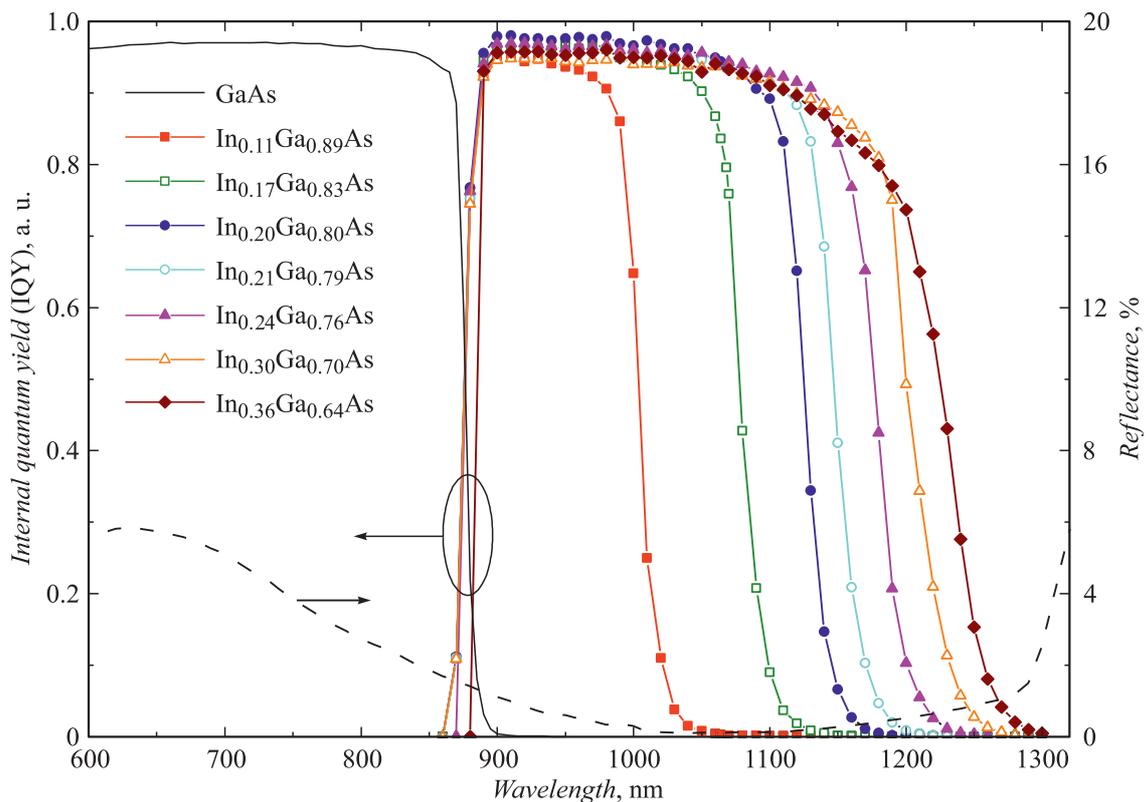
DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51475.18888

Полупроводниковые In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As  $p-n$ -переходы, сформированные на рассогласованной по параметру решетки подложке (например, GaAs) с использованием метаморфных буферных слоев (метаморфного буфера), активно используются в различных областях фотовольтаики. В многопереходных (МП) солнечных элементах (СЭ) с их помощью удалось получить рекордные значения эффективности для трех- [1], четырех- [2], пяти- [3] и шестипереходных [4] СЭ. Также на их основе получены рекордные значения эффективности для фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), предназначенных для преобразования мощного лазерного излучения [5,6]. Такое широкое применение In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As  $p-n$ -переходов связано с возможностью управления краем поглощения ФЭП за счет метаморфных буферных слоев. Разработано несколько технологических подходов использования In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As  $p-n$ -переходов в МП СЭ. Во-первых, субэлемент In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As включается в классические структуры на подложке Ge [3,7], во-вторых, разработана технология инвертированного роста на подложке GaAs [1,4,8–10], а также созданы МП СЭ с механической стыковкой субэлементов In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As и технологией склеиваемых подложек [11].

В настоящей работе представлены результаты, направленные на улучшение эффективности „классического“ СЭ GaInP/GaAs/Ge [12] за счет замены германиевого субэлемента на In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As [5]. Получению высокоэффективных МП СЭ GaInP/GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As посвящен ряд работ, в которых проводится поиск оптимального (с точки зрения токового согласования для субэлементов и эффективности МП СЭ в целом) процентного содержания индия в нижнем субэlemente, задающего

ширину его запрещенной зоны  $E_g$ . Так, в одной из первых работ [8] проведено моделирование характеристик МП СЭ и показано, что оптимальным для наземного применения будет субэлемент In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As с шириной запрещенной зоны 1.01 eV, что позволит получить эффективность прибора 41.5% при преобразовании концентрированного наземного солнечного излучения (AM1.5D, 250 X). В [9] оптимальная ширина запрещенной зоны указана как 1.0 eV при ширинах запрещенных зон двух верхних переходов (GaInP и GaAs), равных 1.85 и 1.42 eV соответственно. При этом указывается, что 1.0 eV достигается при  $x = 0.25$ , а экспериментально полученная эффективность составляет 37.9% (10X). В [10] ширина запрещенной зоны субэлемента In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, равная 1.0 eV, также считается оптимальной, но она достигнута при  $x = 0.3$ , при этом ширина запрещенной зоны верхнего субэлемента GaInP составляет 1.8 eV. Эффективность полученного СЭ составила 38.9% (AM1.5D, 81 X). В [1] получена рекордная эффективность 44.4% (AM1.5D, 302 X) на образце со следующим заявленным набором ширины запрещенных зон субэлементов: GaInP(1.88 eV)/GaAs(1.43 eV)/InGaAs(0.98 eV).

Выявленный разброс значений ширины запрещенной зоны узкозонного субэлемента In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As и процентного содержания индия в его слоях в значительной степени обусловлен тем, что оптимальная эффективность достигается только при полном балансе фотогенерированных токов всех субэлементов МП СЭ [13], а это определяется как балансом токов двух верхних субэлементов, так и зависимостью фотогенерированного тока нижнего субэлемента In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As от концентрации индия. Первый фактор во многом определяется ши-



**Рис. 1.** Экспериментальные зависимости внутреннего квантового выхода фотоответа для ФЭП на основе GaAs (сплошная темная линия) и для исследуемых субэлементов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  трехпереходного СЭ GaInP/GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (линии с символами).

риной запрещенной зоны субэлемента GaInP, которая меняется в зависимости от упорядочения атомов в кристалле [14–16]. На второй фактор во многом влияет качество метаморфного буфера  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , которое может меняться с увеличением содержания индия, как, например, наблюдается в [9].

В настоящей работе предложено решение указанной многофакторной проблемы, позволяющее определять для конкретного МП СЭ оптимальный нижний субэлемент  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Это решение отличается от предложенных ранее [8,17,18] тем, что базируется на экспериментальных закономерностях, полученных для субэлементов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [5], на двухдиодной модели МП СЭ [13], а также на экспериментально регистрируемых спектральных характеристиках оптимизируемых МП СЭ и однопереходных ФЭП на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Метод применим для любых технологий получения МП СЭ, где метаморфный субэлемент  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  создается отдельно от псевдоморфного тандема субэлементов GaInP/GaAs, например, путем инвертированного роста на подложке GaAs, роста на обратной стороне GaAs или отдельного эпитаксиального роста  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  и последующей его механической стыковки [1,4,8–11,19].

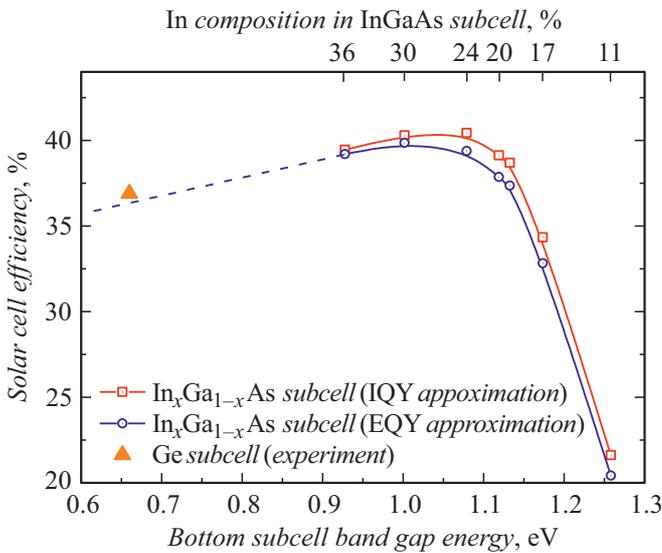
В качестве отправной точки для оптимизации использовался трехпереходный СЭ GaInP/GaAs/Ge, характеристики которого представлены в работе [13]. Структуры однопереходных ФЭП на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

с содержанием индия от  $x = 0.11$  до  $0.36$ , а также ФЭП на основе GaAs изготавливались методом металлоорганической газофазной эпитаксии [5]. Структуры включали в себя подложку GaAs, метаморфный буфер, состоящий из набора слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  со ступенчато меняющейся концентрацией индия и обеспечивающий достижение требуемого состава активной области, тыльный потенциальный барьер  $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ , непосредственно  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $p$ - $n$ -переход, а также широкозонное окно  $\text{In}_x\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{(0.5)(1-x)}\text{As}$ . Антиотражающее покрытие не применялось, что позволило повысить точность оценок состава при выборе субэлементов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , требуемых для получения сбалансированного по току МП СЭ GaInP/GaAs/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Возможные вариации (определяемые в том числе и технологическим процессом) в параметрах просветляющих покрытий, осаждаемых поверх слоев  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  разного состава, могут вносить существенную погрешность в регистрируемые спектральные зависимости внешнего квантового выхода (EQY) фотоответа ФЭП. Поэтому в эксперименте измерялись спектральные зависимости внешнего квантового выхода фотоответа ФЭП без просветляющих слоев и коэффициентов отражения от поверхности с последующим получением данных для внутреннего квантового выхода (IQY) фотоответа.

Итоговые спектральные характеристики внутреннего квантового выхода непосредственно для субэлемента

Параметры субэлемента  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , используемые в расчете эффективности  $\text{GaInP/GaAs/In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x$  — содержание индия в субэlemente  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )

$x$	$E_g, \text{eV}$	$J_{g,\text{IQY}}, \text{mA/cm}^2$	$J_{g,\text{EQY}}, \text{mA/cm}^2$	$J_{01}, \text{A/cm}^2$	$J_{02}, \text{A/cm}^2$
0.11	1.26	6.03	5.68	$3.47 \cdot 10^{-17}$	$1.67 \cdot 10^{-9}$
0.17	1.202	10.20	9.69	$1.03 \cdot 10^{-15}$	$9.07 \cdot 10^{-9}$
0.20	1.209	12.02	11.46	$5.32 \cdot 10^{-15}$	$2.06 \cdot 10^{-8}$
0.21	1.213	12.29	11.73	$9.13 \cdot 10^{-15}$	$2.70 \cdot 10^{-8}$
0.24	1.203	13.22	12.65	$4.51 \cdot 10^{-14}$	$6.01 \cdot 10^{-8}$
0.30	1.201	14.11	13.64	$9.92 \cdot 10^{-13}$	$2.52 \cdot 10^{-7}$
0.36	1.198	14.45	13.91	$1.90 \cdot 10^{-11}$	$1.23 \cdot 10^{-6}$



**Рис. 2.** Расчетные зависимости эффективности СЭ  $\text{GaInP/GaAs/In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  от ширины запрещенной зоны и концентрации индия для субэlementa  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в двух случаях: сплошная линия с квадратами — предельный случай (фотогенерированный ток субэlementa  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  получен из экспериментальных спектров внутреннего квантового выхода фотоответа, рис. 1), сплошная линия с кружками — реалистичный случай (фотогенерированный ток получен на основе данных по внешнему квантовому выходу фотоответа). Штриховой линией показан возможный тренд в область меньшей ширины запрещенной зоны. Треугольник соответствует значению эффективности исходного „классического“ трехпереходного СЭ с Ge-субэlementом.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  формировались с учетом фильтрации длинноволновой части спектра субэlementами  $\text{GaInP/GaAs}$  (рис. 1).

Расчетные зависимости внутреннего квантового выхода фотоответа были использованы для получения соответствующих фотогенерированных токов субэlementов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  в структуре МП СЭ  $\text{GaInP/GaAs/In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  с учетом параметров типичного антиотражающего покрытия для нижнего субэlementa  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (рис. 1). Значения полученных фотогенерированных токов приведены в таблице. Очевидно, что фототоки  $J_{g,\text{IQY}}$ , полу-

ченные на основе данных по внутреннему квантовому выходу фотоответа, являются предельно достижимыми. В свою очередь значения  $J_{g,\text{EQY}}$ , характеризующие спектрами внешнего квантового выхода фотоответа, являются практически реализуемыми в МП СЭ.

При определении электрических параметров  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $p-n$ -переходов использовалась экспериментальная зависимость токов насыщения от ширины запрещенной зоны  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$   $p-n$ -переходов [5]. В результате для всех рассматриваемых  $p-n$ -переходов были получены диффузионный ( $J_{01}$ ) и рекомбинационный ( $J_{02}$ ) токи насыщения (см. таблицу).

Для поиска оптимальных параметров субэlementов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  была использована модель, описанная в [13], при помощи которой были рассчитаны вольт-амперные характеристики и эффективность трехпереходного СЭ  $\text{GaInP/GaAs/In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . В расчете использовались параметры субэlementов  $\text{GaInP}$  и  $\text{GaAs}$  и последовательного сопротивления, приведенные в [13], а параметры субэlementов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  брались из таблицы. Предполагалось равенство фотогенерированных токов субэlementов  $\text{GaInP}$  и  $\text{GaAs}$ :  $13.75 \text{ mA/cm}^2$  (AM1.5D) (установлено как среднее значение экспериментально определенных токов обоих субэlementов). Результат расчета приведен на рис. 2.

Предельная эффективность фотопреобразования для случая, когда фотогенерированные токи рассчитаны из спектров внутреннего квантового выхода фотоответа, достигается при ширине запрещенной зоны субэlementa  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.26$ ) в  $1.052 \text{ eV}$ . Для реалистичного случая (фотогенерированный ток субэlementa рассчитан из внешнего квантового выхода фотоответа) максимум эффективности достигается при  $1.027 \text{ eV}$  ( $x = 0.28$ ) и составляет  $40.3\%$ , что на  $3.4\%$  (abs.) превышает исходное значение для СЭ  $\text{GaInP/GaAs/Ge}$  ( $36.9\%$  — треугольник на рис. 2).

Таким образом, на основе разработанной ранее модели МП СЭ [13] был проведен расчет оптимального содержания индия в нижнем субэlementе МП СЭ  $\text{GaInP/GaAs/In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Показано, что при замене узкозонного германия на более широкозонный  $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$  (ширина запрещенной зоны  $1.027 \text{ eV}$ ) эффективность фотопреобразования МП СЭ возрастает на  $3.4\%$  (abs.). По-

вышение качества материала субэлемента  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $x = 0.24-0.26$ ) с соответствующим приближением его фотогенерированного тока к предельно достижимым для выбранного состава значениям позволит создавать МП СЭ с эффективностью на уровне 41% (AM1.5D). Дальнейшее улучшение эффективности возможно за счет совершенствования пары верхних субэлементов. Требуемая при этом корректировка оптимального содержания индия в субэlemente  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  может быть осуществлена предложенным в работе методом.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Усиковой за проведение постростовых операций.

## Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-08-00881 А).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] T. Takamoto, H. Washio, H. Juso, in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conf. (PVSC)* (IEEE, 2014), p. 1. DOI: 10.1109/PVSC.2014.6924936
- [2] R.M. France, J.F. Geisz, I. Garcia, M.A. Steiner, W.E. McMahon, D.J. Friedman, T.E. Moriarty, C. Osterwald, J.S. Ward, A. Duda, M. Young, W.J. Olavarria, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 578 (2016). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2505182
- [3] R.H. van Leest, D. Fuhrmann, A. Frey, M. Meusel, G. Siefert, S.K. Reichmuth, *AIP Conf. Proc.*, **2149**, 020007 (2019). DOI: 10.1063/1.5124177
- [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] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **217**, 110710 (2020). DOI: 10.1016/j.solmat.2020.110710
- [6] N.A. Kalyuzhnyy, V.M. Emelyanov, S.A. Mintairov, M.V. Nahimovich, R.A. Salii, M.Z. Shvarts, *AIP Conf. Proc.*, **2298**, 030001 (2020). DOI: 10.1063/5.0032903
- [7] W. Guter, J. Schone, S.P. Philipps, M. Steiner, G. Siefert, A. Wekkeli, E. Welsler, E. Oliva, A.W. Bett, F. Dimroth, *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 223504 (2009). DOI: 10.1063/1.3148341
- [8] M.W. Wanlass, S.P. Ahrenkiel, R.K. Ahrenkiel, D.S. Albin, J.J. Carapella, A. Duda, J.F. Geisz, S. Kurtz, T. Moriarty, R.J. Wehrer, B. Wernsman, in *Conf. Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 2005), p. 530. DOI: 10.1109/PVSC.2005.1488186
- [9] D.J. Friedman, J.F. Geisz, A.G. Norman, M.W. Wanlass, S.R. Kurtz, in *2006 IEEE 4th World Conf. on photovoltaic energy conversion* (IEEE, 2006), p. 598. DOI: 10.1109/WCPEC.2006.279527
- [10] J.F. Geisz, S. Kurtz, M.W. Wanlass, J.S. Ward, A. Duda, D.J. Friedman, J.M. Olson, M.E. McMahon, T.E. Moriarty, J.T. Kiehl, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 23502 (2007). DOI: 10.1063/1.2753729
- [11] F. Dimroth, T. Tibbits, M. Niemeyer, F. Predan, P. Beutel, C. Karcher, E. Oliva, G. Siefert, D. Lackner, P. Fus-Kailuweit, A.W. Bett, R. Krause, C. Drazek, E. Guiot, J. Wasselin, A. Tauzin, T. Signamarcheix, *IEEE J. Photovolt.*, **6**, 343 (2016). DOI: 10.1109/JPHOTOV.2015.2501729
- [12] N.A. Pakhanov, V.M. Andreev, M.Z. Shvarts, O.P. Pchelyakov, *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **54**, 187 (2018). DOI: 10.3103/S8756699018020115
- [13] М.А. Минтаиров, В.В. Евстропов, С.А. Минтаиров, Н.Х. Тимошина, М.З. Шварц, Н.А. Калужный, ФТП, **49** (5), 682 (2015). [M.A. Mintairov, V.V. Evstropov, S.A. Mintairov, N.K. Timoshina, M.Z. Shvarts, N.A. Kalyuzhnyy, *Semiconductors*, **49** (5), 668 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615050164].
- [14] A. Zunger, S. Mahajan, in *Handbook on semiconductors* (Elsevier, Amsterdam, 1994), vol. 3, p. 1399.
- [15] I. Pietzonka, T. Sass, R. Franzheld, G. Wagner, V. Gottschalch, *J. Cryst. Growth*, **195**, 21 (1998). DOI: 10.1016/S0022-0248(98)00594-6
- [16] N.A. Kalyuzhnyy, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, V.M. Lantratov, in *Proc. of the 24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. (WIP-Munich, 2009)*, p. 538. DOI: 10.4229/24thEUPVSEC2009-1CV.4.39
- [17] S.R. Kurtz, D. Myers, J.M. Olson, in *Conf. Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (IEEE, 1997), p. 875. DOI: 10.1109/PVSC.1997.654226
- [18] M.W. Wanlass, D.S. Albin, *AIP Conf. Proc.*, **738**, 462 (2004). DOI: 10.1063/1.1841925
- [19] H. Cotal, C. Fetzer, J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoonand, N. Karam, *Energy Environ. Sci.*, **2**, 174 (2009). DOI: 10.1039/b809257c