

07

Влияние свойств тыльного отражателя на характеристики инфракрасных светоизлучающих диодов на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктуры

© А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Р.А. Салий, Ф.Ю. Солдатенков, М.В. Нахимович, Д.А. Малевский

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

Поступило в Редакцию 9 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 23 мая 2024 г.

Принято к публикации 27 мая 2024 г.

Выполнены исследования технологии формирования тыльных отражателей для инфракрасных (850 nm) светоизлучающих диодов на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур с множественными квантовыми ямами, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Разработаны конструкции отражателей на основе многослойных систем, включающих слои диэлектрика (SiO_2), адгезионного материала (NiCr), металла с высокими зеркальными свойствами (Ag) и барьерные стоп-слои (Ti, Pt). Проведен анализ влияния состава отражателя на характеристики светоизлучающих диодов. Достигнуты значения внешней квантовой эффективности $> 45\%$ при токе 100–350 mA и оптической мощности > 450 mW при токе 800 mA.

Ключевые слова: инфракрасный светоизлучающий диод, AlGaAs/GaAs-гетероструктура, многослойный отражатель.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58625.19946

Инфракрасные (ИК) светоизлучающие диоды (СИД) широко используются в различных областях: для оптической диагностики, при создании оптической связи, в охранных системах ночного видения, в оптических датчиках беспроводных устройств [1–4]. Основные разработки в области создания высокоэффективных мощных ИК СИД ведутся на основе многопроходных гетероструктур с множественными квантовыми ямами (КЯ), выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии). Одним из методов увеличения оптической мощности СИД является встраивание внутреннего брэгговского отражателя (БО) или встроенного металлического отражателя (МО) между активной областью и поглощающей излучение ближнего ИК-диапазона подложкой GaAs. БО монолитно встраивается в эпитаксиальную структуру, и при нормальном падении излучения на длине волны 850 nm коэффициент отражения составляет более 90%. Однако отклонение угла падения лучей от 90° ведет к снижению доли излучения, отражающегося от БО (отражение излучения осуществляется в телесном угле с раскрытием $\pm 20^\circ$) [5,6]. Технология встраивания металлических отражателей в конструкцию СИД основана на переносе гетероструктуры с нанесенным отражателем на подложку-носитель [7,8]. Известны различные системы отражателей на основе слоев Ag, ITO/Ag (ITO — indium tin oxide), Ti/ITO/Ag, Ti/Au, Al/Au, Cu/Au, Ni/Au, обеспечивающие отражение ~ 92 –97% падающего излучения [9–11]. При этом большое количество операций, сопутствующих технологическому циклу встраивания МО, может привести к снижению оптических характеристик отражателей. Например, формирование

омических контактов СИД включает этап термического отжига при температуре до 400°C , что может привести к вплавлению материала отражателя в структуру полупроводника и соответственно к снижению коэффициента отражения падающего излучения. Технология переноса гетероструктуры на подложку-носитель основана на сплавлении связующего соединения на основе слоев Au и In. При этом образуется монолитное интерметаллическое соединение подложки-носителя и гетероструктуры. Однако за счет высокого коэффициента диффузии In может проникать в слои отражателя, ухудшая тем самым его оптические свойства, а возникновение микродефектов в сплаве Au–In [12] может увеличить резистивные потери прибора.

Задачами данного исследования являются: 1) разработка встроенного в конструкцию СИД отражателя, обеспечивающего отражение более 96–98% излучения; 2) анализ технологических этапов изготовления СИД, ведущих к деградации оптических свойств отражателя; 3) исследование влияния технологических параметров на оптическую мощность готовых приборов.

Опытные образцы СИД изготовлены на основе AlGaAs/GaAs-гетероструктур с множественными КЯ, выращенных на подложках GaAs *n*-типа проводимости методом МОС-гидридной эпитаксии. Гетероструктура включает активную область, состоящую из шести КЯ InGaAs, расположенных в центре широкозонного слоя $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ толщиной более $1\ \mu\text{m}$; барьерные слои $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ *n*- и *p*-типов проводимости; дополнительный тыльный широкозонный слой *n*- $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ толщиной 300 nm (со значением показателя преломления меньше, чем в узкозонных слоях $\text{Al}_{0.2-0.4}\text{Ga}_{0.6-0.8}\text{As}$),

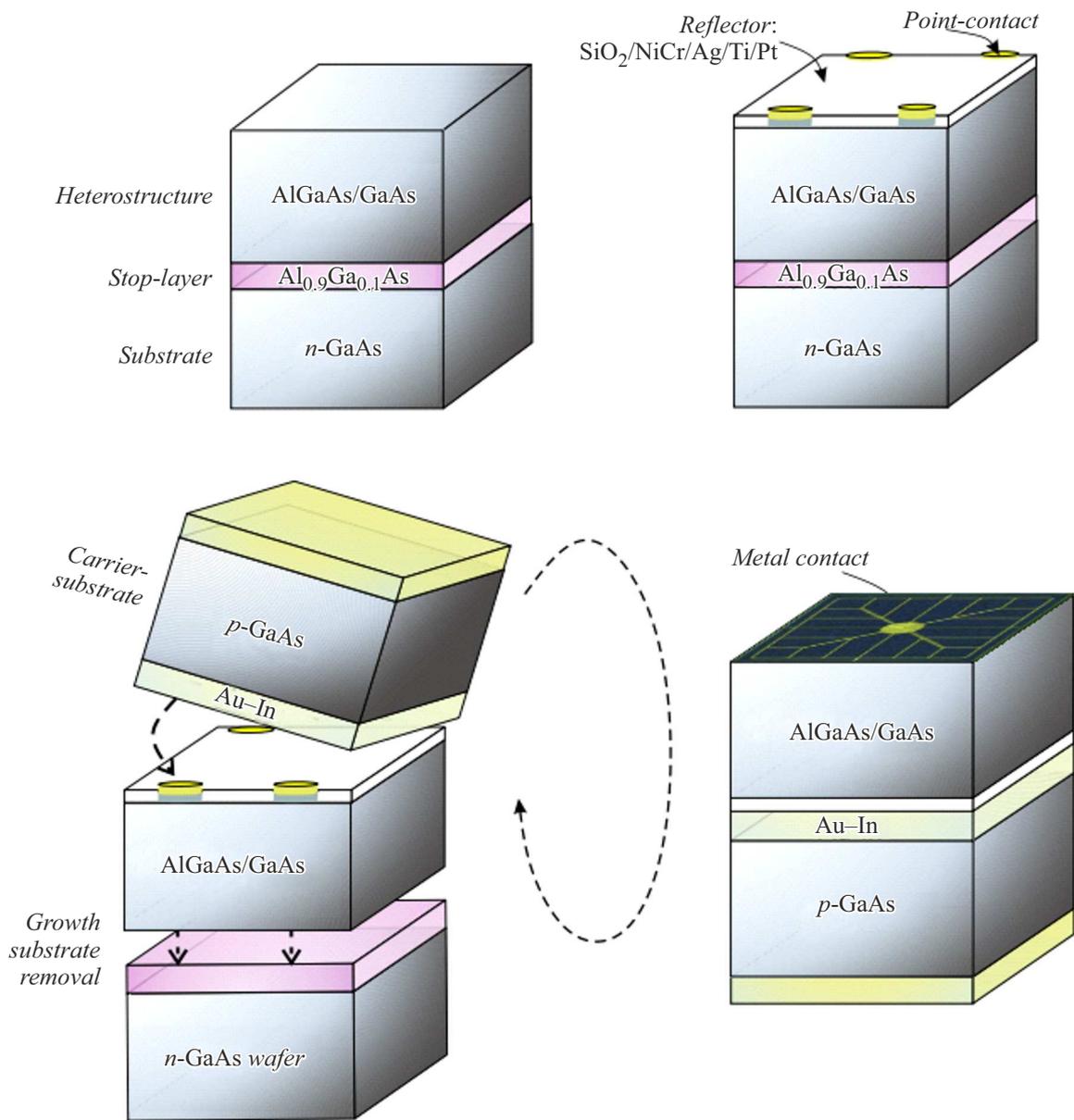


Рис. 1. Схематическое изображение этапов встраивания металлического отражателя путем переноса гетероструктуры на подложку-носитель.

отражающий лучи, падающие на этот слой под углами, при которых имеет место полное внутреннее отражение; слои $n\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ и $p\text{-Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$, обеспечивающие растекание тока; высоколегированные контактные слои $n^+\text{-GaAs}$ и $p^+\text{-GaAs}$, к которым формируются фронтальный и тыльный омические контакты. Для переноса гетероструктуры на подложку-носитель и удаления ростовой подложки выращивался жертвенный слой $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$, жидкостное химическое травление которого обладает высокой селективностью относительно травления ростовой подложки GaAs.

Технология встраивания отражателя включает следующие этапы: формирование точечных контактов диаметром $10\ \mu\text{m}$ с шагом $75\ \mu\text{m}$, травление контактного

слоя $p^+\text{-GaAs}$ в местах, свободных от точечных контактов, нанесение слоев МО, перенос гетероструктуры на подложку-носитель $p\text{-GaAs}$ с использованием соединения Au–In, удаление ростовой подложки, текстурирование фронтальной световыводящей поверхности, формирование фронтального омического контакта, травление разделительной мезы СИД (рис. 1).

Технология формирования встроеного МО оказывает большое влияние на его оптические свойства и соответственно на оптическую мощность СИД. Проведено исследование формирования отражателей на основе Ag и Au с различными адгезионными слоями и без них. Эксперимент проводился путем осаждения слоев МО на покрывное стекло толщиной $140\ \mu\text{m}$ с последующим

измерением коэффициента отражения как со стороны стекла, так и со стороны слоев отражателя. Ранее проведенные исследования [6] показали, что нанесение слоев Ag или Au без адгезионных слоев ведет к нарушению монолитности конструкции СИД из-за отслаивания слоев отражателя. Однако нанесение слоя сплава NiCr толщиной 0.5–1 nm не ухудшает оптические свойства отражателя и позволяет формировать отражатель с высокой адгезией к полупроводниковой структуре. Коэффициент отражения, измеряемый при нормальном падении излучения на стекло, показал существенное снижение значений (на 7%) за счет потерь при френелевском отражении и из-за поглощения доли излучения в стекле. Коэффициент отражения излучения со стороны стекла составил 90–91% (линия 1 на рис. 2, *a*), а со стороны Ag — 97–98% в диапазоне длин волн 700–1000 nm (линия 2 на рис. 2, *a*).

Перенос гетероструктуры на подложку-носитель GaAs включает этап сплавления слоя In, осажденного на подложку-носитель, и слоя Au, осажденного на поверхность отражателя. Для исследования диффузии индия были определены оптические свойства отражателя на основе слоев NiCr (0.5–1 nm)–Ag. Выполнен следующий эксперимент: на стекло были нанесены слои отражателя, слои золота и индия толщиной по 2 μm , проведен термический отжиг структуры при температуре 200°C в течение 30 min. Выполнены измерения спектральной зависимости коэффициента отражения при нормальном падении излучения на образец до и после термического отжига. Значение коэффициента отражения до термического отжига составило 90–91%, а после отжига — 83–84% в диапазоне длин волн 700–1000 nm при измерении через стекло (линия 1 на рис. 2, *b*). Снижение коэффициента отражения на 7% свидетельствует о частичной диффузии индия в слои отражателя при термическом отжиге.

Для защиты металлического отражателя от диффузии индия проведена разработка различных барьерных слоев между серебряным отражателем и индием: NiCr (20 nm), Ti (50 nm), Ti (50 nm) + Pt (50 nm). Экспериментальные образцы изготавливались аналогично варианту, описанному выше, дополнительно проводилось осаждение барьерных слоев.

Использование материала NiCr в качестве барьерного слоя (линия 2 на рис. 2, *b*) привело к значительному снижению коэффициента отражения даже по сравнению со случаем МО без барьерного слоя, что может быть объяснено дополнительной диффузией хрома в слои отражателя. Максимальное значение коэффициента отражения 89–90% получено при использовании барьерных слоев на основе Ti (50 nm) + Pt (50 nm) (линия 4 на рис. 2, *b*), что практически совпадает со значением коэффициента отражения до диффузии индия (линия 1 на рис. 2, *a*). Использование только слоя Ti (50 nm) привело к небольшому уменьшению (на 2%) коэффициента отражения падающего излучения (линия 3 на рис. 2, *b*). Таким образом, формирование барьерных слоев Ti + Pt

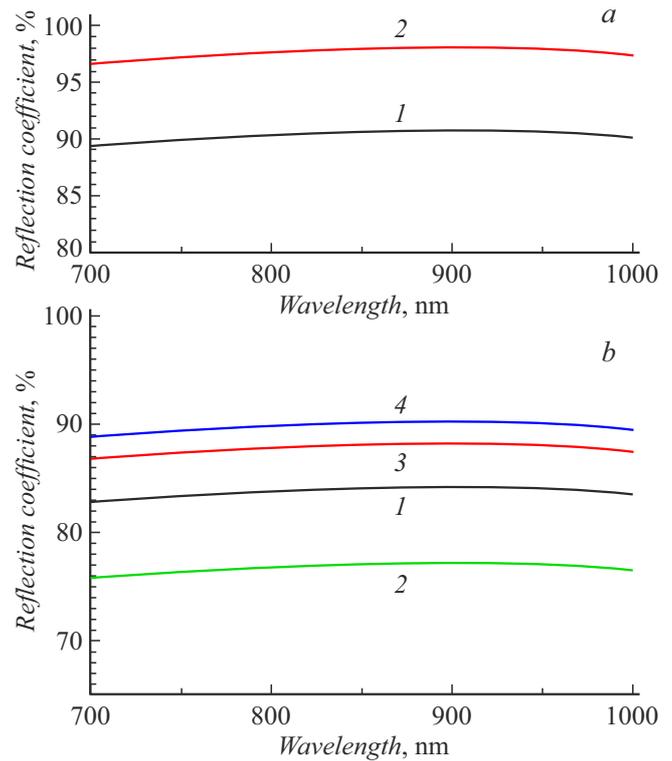


Рис. 2. Спектральная зависимость коэффициента отражения излучения от МО на основе NiCr–Ag (*a*) при измерении через стекло (1) и со стороны Ag-отражателя (2) и после диффузии индия (*b*) при измерении через стекло без барьерного слоя (1), с барьерными слоями NiCr (20 nm) (2), Ti (50 nm) (3), Ti (50 nm)+Pt (50 nm) (4).

между МО и индием предотвращает диффузию индия в слои отражателя и обеспечивает сохранение его оптических свойств, что в свою очередь позволяет достигнуть максимальных значений оптической мощности ИК СИД.

Разработана технология для предотвращения деградации оптических свойств МО при сплавлении его слоев в полупроводниковую структуру при осуществлении высокотемпературных процессов. Термический отжиг при изготовлении СИД проводится как при сплавлении Au и In, так и при формировании фронтального омического контакта к слоям *n*-типа проводимости. Предложено осаждение дополнительного слоя диэлектрика между слоями МО и гетероструктурой. Материал диэлектрического покрытия выбирался по значению коэффициента преломления: при нанесении слоя диэлектрика с минимальным коэффициентом преломления уменьшается угол полного внутреннего отражения, что ведет к увеличению доли излучения, падающего под углами, большими угла полного внутреннего отражения. Осаждение дополнительного слоя диэлектрика SiO₂ ($n \approx 1.4$) улучшает оптические свойства отражателя и одновременно препятствует сплавлению металлических материалов отражателя в полупроводник.

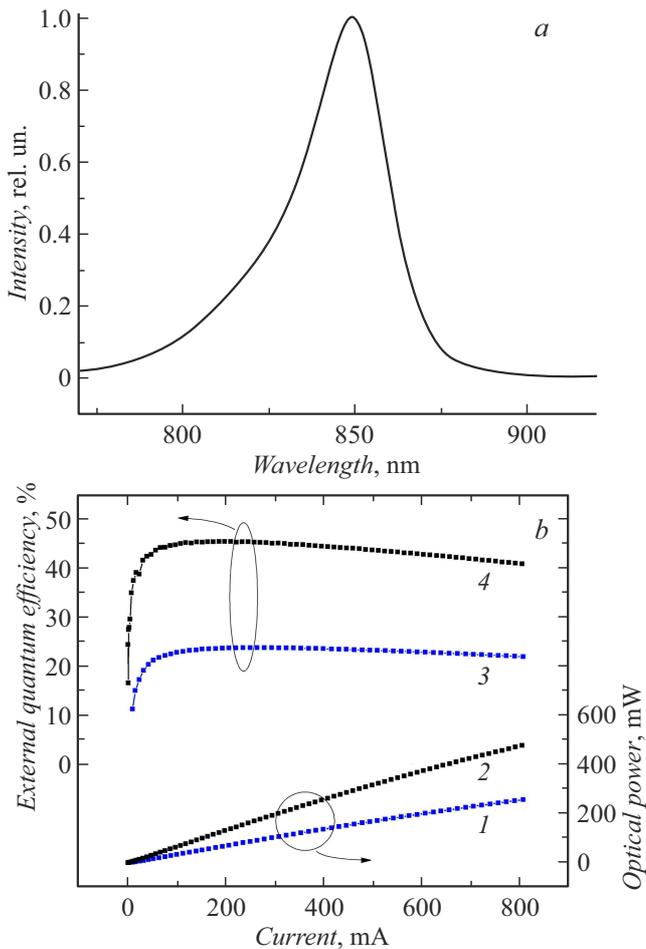


Рис. 3. Спектральная характеристика (а) и зависимость EQE и оптической мощности (б) ИК СИД с тыльным отражателем без барьерных слоев (1, 3) и с барьерными слоями Ti + Pt (2, 4).

Изготовлены кристаллы ИК СИД с длиной волны излучения 850 nm (рис. 3, а) с встроенным металлическим отражателем с различным составом слоев. В первом варианте отражатель включал слой диэлектрика SiO₂ (400 nm), адгезионный слой NiCr (0.5–1 nm), отражающий слой Ag (200 nm). Во втором варианте дополнительно на поверхности Ag формировались барьерные слои на основе Ti (50 nm) + Pt (50 nm). Для проведения измерений кристаллы СИД монтировались на керамические теплоотводящие основания, а их корпусирование было выполнено с использованием оптического элемента в виде силиконовой полусферы.

Измерение параметров ИК СИД проводилось в импульсном режиме пропускания тока ($\tau_{imp} = 5\text{--}300\ \mu\text{s}$): регистрировались значения напряжения на кристалле и уровень светового потока от СИД (определялся по фототоку контрольного фотоприемника с известной спектральной fotocувствительностью). На основе измеренных параметров выполнялся расчет значений внешней квантовой эффективности и оптической мощности СИД в зависимости от пропускаемого тока.

В образцах СИД, изготовленных без барьерных слоев, достигнуты значения оптической мощности $> 250\ \text{mW}$ при токе 800 mA (линия 1 на рис. 3, б), максимальное значение внешней квантовой эффективности (EQE) составило 23% при токе 100–500 mA (линия 3 на рис. 3, б). Разработка технологии формирования отражателей СИД с барьерными слоями Ti + Pt позволила увеличить значение EQE практически в 2 раза (до величины более 45%) при токе 100–350 mA (линия 4 на рис. 3, б), а величину выходной оптической мощности СИД до 450 mW при токе 800 mA (линия 2 на рис. 3, б).

Выполнены исследования технологии формирования встроенных многослойных МО на основе слоев NiCr–Ag для ИК СИД, изготавливаемых путем переноса гетероструктуры на подложку-носитель GaAs с использованием соединения Au–In. Показано, что диффузия индия из сплава Au–In, происходящая во время постростовых процессов нагревания СИД, оказывает существенное влияние на оптические свойства встроенного МО, снижая его коэффициент отражения на 7%. Применение барьерных слоев Ti (50 nm) + Pt (50 nm), предотвращающих процессы диффузии при прогреве структуры СИД, позволило достичь значения коэффициента отражения МО 97–98% в диапазоне длин волн 700–1000 nm. Изготовленные с применением технологии барьерных слоев ИК СИД продемонстрировали двукратное увеличение внешней квантовой эффективности ($> 45\%$) и оптическую мощность излучения $> 450\ \text{mW}$ при токе 800 mA.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A.G. Entrop, A. Vasenev, *Energy Proc.*, **132**, 63 (2017). DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.636
- [2] M. Kitamura, T. Imada, S. Kako, Y. Arakawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 2326 (2004). DOI: 10.1143/JJAP.43.2326
- [3] W. Wild, *Proc. Est. Acad. Sci. Eng.*, **13**, 436 (2007). DOI: 10.3176/eng.2007.4.15
- [4] A.C. Watts, V.G. Ambrosia, E.A. Hinkley, *Remote Sens.*, **4**, 1671 (2012). DOI: 10.3390/rs4061671
- [5] S.-C. Ahn, B.-T. Lee, W.-C. An, D.-K. Kim, I.-K. Jang, J.-S. So, H.-J. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **69**, 91 (2016). DOI: 10.3938/jkps.69.91
- [6] А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Мингаиров, Р.А. Салий, А.Н. Паньчак, П.В. Покровский, Н.С. Потапович, В.М. Андреев, *ФТП*, **55** (7), 614 (2021). DOI: 10.21883/FTR.2021.07.51028.9646
- [7] А.В. Малевская, Н.А. Калужный, Д.А. Малевский, С.А. Мингаиров, А.М. Надточий, М.В. Нахимович, Ф.Ю. Солдатенков, М.З. Шварц, В.М. Андреев, *ФТП*, **55** (8), 699 (2021). DOI: 10.21883/FTR.2021.08.51143.9665 [A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, D.A. Malevskii, S.A. Mintairov, A.M. Nadochiy, M.V. Nakhimovich,

- F.Y. Soldatenkov, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Semiconductors*, **55** (8), 686 (2021).
DOI: 10.1134/S1063782621080121].
- [8] А.В. Малевская, Н.А. Калюжный, Ф.Ю. Солдатенков, Р.В. Левин, Р.А. Салий, Д.А. Малевский, П.В. Покровский, В.Р. Ларионов, В.М. Андреев, *ЖТФ*, **93** (1), 170 (2023).
DOI: 10.21883/JTF.2023.01.54078.166-22
[A.V. Malevskaya, N.A. Kalyuzhnyy, F.Y. Soldatenkov, R.V. Levin, R.A. Saliy, D.A. Malevskii, P.V. Pokrovskii, V.R. Larionov, V.M. Andreev, *Tech. Phys.*, **68** (1), 161 (2023).
DOI: 10.21883/TP.2023.01.55451.166-22].
- [9] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, C.-H. Lee, J.-H. Kim, L.-K. Kwac, *Infrared Phys. Technol.*, **118**, 103879 (2021).
DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103879
- [10] H.-J. Lee, I.-K. Jang, D.-K. Kim, Y.-J. Cha, S.W. Cho, *Micromachines*, **13**, 695 (2022).
DOI: 10.3390/mi13050695
- [11] H.-J. Lee, G.-H. Park, J.-S. So, J.-H. Kim, H.-G. Kim, L.-K. Kwac, *Current Appl. Phys.*, **22**, 36 (2021).
DOI: 10.1016/j.cap.2020.12.002
- [12] N.A. Kalyuzhnyy, A.V. Malevskaya, S.A. Mintairov, M.A. Mintairov, M.V. Nakhimovich, R.A. Saliy, M.Z. Shvarts, V.M. Andreev, *Solar Energy Mater. Solar Cells*, **262**, 112551 (2023). DOI: 10.1016/j.solmat.2023.112551