

07

Изготовление и исследование коммутирующих $p-n$ -переходов для каскадных фотопреобразователей

© Р.В. Левин, А.Е. Маричев, Е.В. Контрош, Н.Д. Прасолов,
В.С. Калиновский, Б.В. Пушный

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

Поступило в Редакцию 11 июля 2018 г.

Представлены результаты исследований по созданию новых соединительных элементов для применения в монолитных многопереходных фотопреобразователях на основе InP. В качестве альтернативы туннельным переходам продемонстрирован новый тип соединительных элементов с удельным омическим сопротивлением менее $2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ в диапазоне плотностей тока до 700 A/cm^2 .

DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47026.17458

В настоящее время самыми эффективными являются солнечные элементы на основе каскадных гетероструктур. В таких фотопреобразователях три или четыре фотоактивных $p-n$ -перехода, работающих в разных спектральных диапазонах, соединяются последовательно туннельными $p^{++}-n^{++}$ -переходами с предельно высокими уровнями легирования [1,2]. При концентрировании солнечного излучения генерируемый фототок может превысить пиковый ток туннельных переходов, что ведет к увеличению сопротивления всей структуры и падению эффективности фотопреобразования [3].

Возможным путем решения проблемы соединительных элементов является создание каналов проводимости посредством введения массива кристаллических включений в область пространственного заряда (ОПЗ) между соседними фотоактивными $p-n$ -переходами [1]. В этом случае можно полностью исключить туннельные переходы и обеспечить механизм омического токопрохождения носителей тока. В работах [4,5] были впервые предложены и экспериментально исследованы $p-n$ -переходы в GaSb, в ОПЗ которых были введены кристаллические

Si-включения. Анализ темновых вольт-амперных характеристик (ВАХ) показал существенное снижение омических потерь в таких структурах в сравнении с туннельными переходами. Данное решение закреплено патентом РФ [6].

Результаты начального этапа работ по получению кристаллитов GaP приведены в [7], а настоящей работе впервые представлены данные по изготовлению аналогичных соединительных элементов в структурах на основе InP, так как изготовление туннельных переходов в InP сопряжено со сложностью сильного легирования этих материалов. Материалы на основе InP являются перспективными для изготовления фотоприемников в спектральном диапазоне 0.95–1.2 μm .

Необходимо, чтобы материал для создания каналов проводимости в области объемного заряда удовлетворял следующим условиям: 1) слабое поглощение оптического излучения, преобразуемое нижележащими более узкозонными каскадами; 2) материал кристаллитов не должен образовывать на границе p – n -переходов сплошного слоя, должны формироваться только отдельные кристаллиты с размерами больше толщины области объемного заряда. Для структур на основе InP использовались кристаллиты (квантовые точки) GaP, так как этот материал полностью удовлетворяет всем изложенным выше условиям.

Все структуры InP были изготовлены с помощью метода газовой эпитаксии из металлоорганических соединений на установке AIX-200 (AIXTRON, Германия). В качестве источников Ga и In использовались триэтилгаллий (TEGa) и триметилиндий, в качестве источника P — фосфин (PH_3). Источниками легирующих примесей были диэтилтеллур или силан для донорной примеси и диэтилцинк для акцепторной. Рост осуществлялся при давлении в реакторе 100 mbar. В качестве подложек использовались пластины n -InP(Те) (100).

Для анализа размеров и формы GaP-кристаллитов были выполнены технологические эксперименты по выращиванию GaP-кристаллитов на поверхности подложек n -InP. Были выбраны следующие условия роста GaP-кристаллитов: температура $T_g = 600^\circ\text{C}$; соотношение PH_3 и TEGa всегда составляло 300, а изменение скорости роста осуществлялось путем изменения общего количества PH_3 и TEGa; размер кристаллитов определялся временем роста $t_g = 25$ – 90 с.

На рис. 1 представлены типичная фотография и статистические данные для одного из образцов с GaP-кристаллитами, полученные с помощью атомно-силового микроскопа (AFM). Из приведенных на

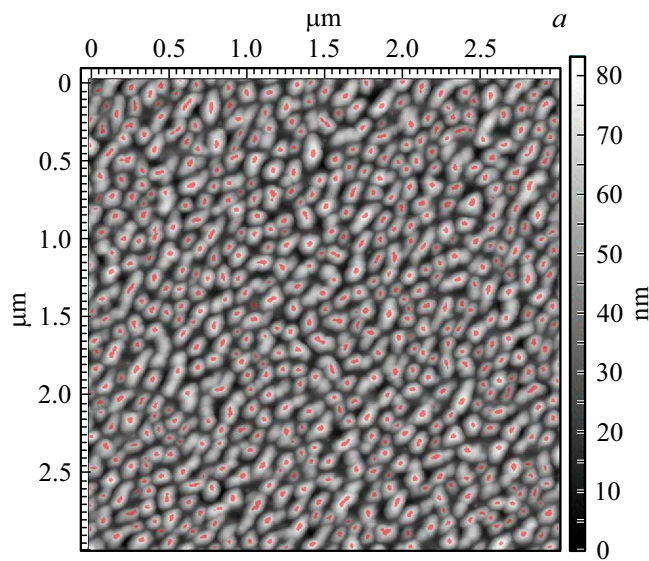


Рис. 1. Данные атомно-силовой микроскопии. *a* — GaP-кристаллиты на поверхности *n*-InP ($T_g = 600^\circ\text{C}$, $t_g = 45\text{ s}$), пятнами отмечены вершины кристаллитов, полученные при математической обработке снимков AFM; *b* — статистика линейных размеров GaP-кристаллитов, полученных из измерений и математической обработки снимков AFM.

рис. 2 данных видно, что при выбранных условиях роста формируются GaP-кристаллиты с размерами 45–85 nm по высоте, 55–70 nm по ширине, а плотность кристаллитов составляет $(0.7–1.1) \cdot 10^{10}\text{ cm}^{-2}$.

Анализ качества материала *p*-InP, выращенного на поверхности с кристаллитами, оценивали при исследовании спектров фотолюминесценции. Полуширина и интенсивность пика фотолюминесценции материала, выращенного на поверхности с кристаллитами, и материала на поверхности подложки близки, что свидетельствует о хорошем качестве материала InP.

На следующем этапе работ были изготовлены две структуры: 1) с *p*–*n*-переходом в InP; 2) с *p*–*n*-переходом, в область объемного заряда которого были введены GaP-кристаллиты. Размеры кристаллитов составляли 70–90 nm по высоте и 50–70 nm по ширине.

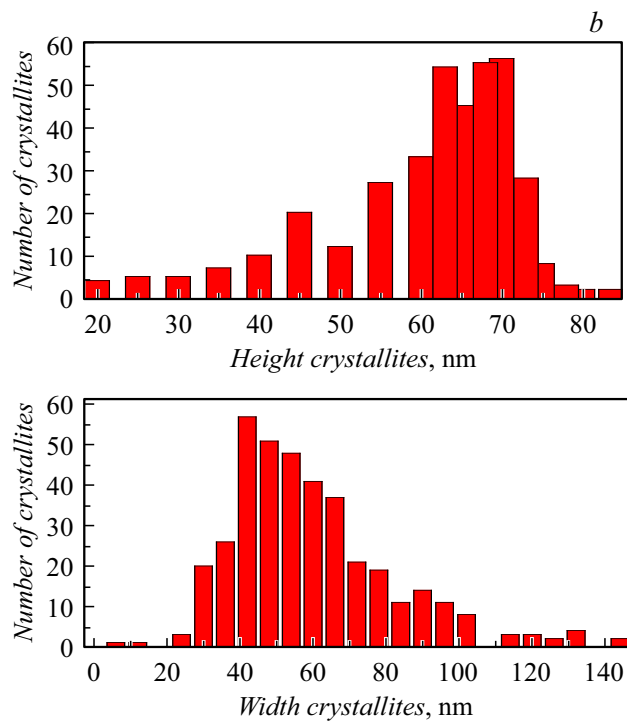


Рис. 1 (продолжение).

Были проведены экспериментальные исследования темновых ВАХ образцов структур с $p-n$ -переходом и соединительных $p-n$ -переходов с каналами проводимости в ОПЗ из GaP-кристаллитов, выращенных на подложке n -InP при комнатной температуре. Экспериментальные темновые ВАХ анализировались согласно методике, описанной в работах [8,9], с использованием трехкомпонентной экспоненциальной модели расчета темновой ВАХ

$$J = \sum_{i=1}^3 J_{0i} (\exp(V_{\phi}/A_i \varepsilon) - 1). \quad (1)$$

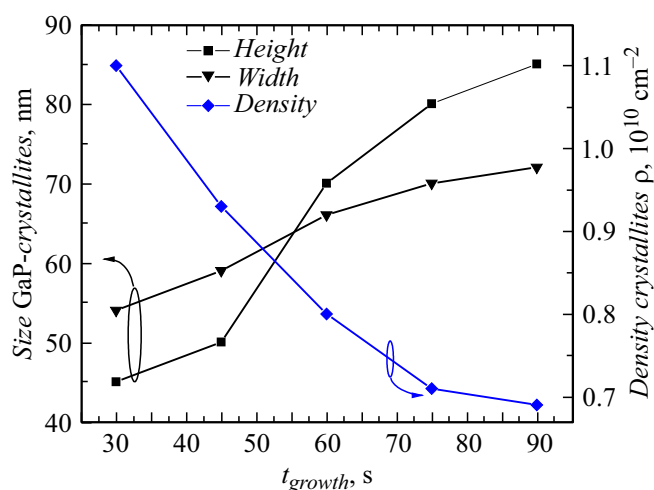


Рис. 2. Зависимости геометрических размеров (высоты и ширины) и плотности GaP-кристаллитов при соотношении $\text{PH}_3/\text{TEGa} = 300$ от времени роста. На зависимостях точками обозначены экспериментальные значения.

Получены значения предэкспоненциальных множителей („токов насыщения“) J_{0i} , диодных коэффициентов (коэффициентов идеальности $p-n$ -перехода) A_i для трех механизмов транспорта неосновных носителей заряда в области объемного заряда $p-n$ -перехода: туннельно-ловушечного („избыточного“) с $J_{0t} = 0.004 \text{ A/cm}^2$ и $A_t > 2$; рекомбинационного (Саа-Нойса-Шокли) с $J_{0r} = 6.2 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$ и $A_r = 2$; диффузионного (Шокли) с $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$ и $A_d = 1$. Для исследованных структур с GaP-кристаллитами в $p-n$ -переходе фитинг осуществлялся линейной зависимостью в диапазоне плотностей тока до 700 A/cm^2 , при этом удельное сопротивление составило менее $2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ (рис. 3).

В результате проведенных исследований впервые продемонстрирован новый тип соединительных элементов с каналами проводимости в ОПЗ из GaP-кристаллитов для каскадных фотопреобразователей на основе InP с практически линейной зависимостью тока от приложенного напряжения и удельным омическим сопротивлением менее $2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ в диапазоне плотностей тока до 700 A/cm^2 . Разработанный соединитель-

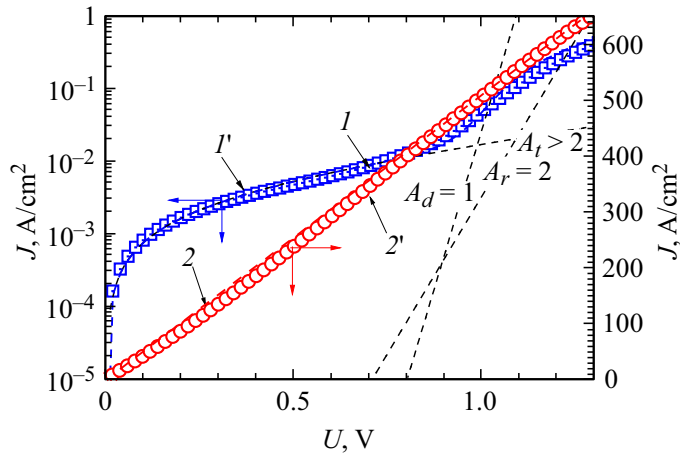


Рис. 3. Прямые темновые ВАХ структур InP. 1 — эксперимент, 1' — фитинг экспериментальной кривой структуры с $p-n$ -переходом, расчет с использованием трехэкспоненциальной модели (туннельно-рекомбинационная компонента — $J_{0r} = 0.004 \text{ A/cm}^2$, $A_t > 2$; рекомбинационная — $J_{0r} = 6.2 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}^2$, $A_r = 2$; диффузионная — $J_{0d} = 1 \cdot 10^{-19} \text{ A/cm}^2$, $A_d = 1$), 2 — эксперимент, 2' — линейный фитинг экспериментальной кривой структуры с GaP-кристаллитами в $p-n$ -переходе.

ный элемент может быть применен в монокристаллических многопереходных фотопреобразователях на основе соединений A_3B_5 .

Авторы выражают благодарность А.С. Власову за помощь в измерениях фотолюминесценции образцов.

Часть работы, связанная с эпитаксиальным ростом, выполнялась на оборудовании ЦКП „Элементная база радиофотоники и нанoeлектроники“ при НТЦ микроэлектроники РАН. Исследования, проведенные методом атомно-силовой микроскопии, осуществлялись с использованием оборудования федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, поддержанного Министерством образования и науки РФ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-30035).

Список литературы

- [1] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. В. 8. С. 937–948.
- [2] Karam N.H., Sherif R.A., King R.R. Multijunction concentrator solar cells. An enabler for low-cost concentrating photovoltaic systems // Concentrator photovoltaics. Springer Ser. in Optical Sciences. 2007. V. 130. P. 199–219.
- [3] Andreev V.M., Ionova E.A., Larionov V.R., Romyantsev V.D., Shvarts M.Z., Glenn G. Tunnel diode revealing peculiarities at I-V measurements in multijunction III-V solar cells // Proc. of the IEEE 4th World Conf. on photovoltaic energy conversion. Hawaii, 2006. P. 799–802.
- [4] Andreev V.M., Kalinovsky V.S., Levin R.V., Pushniy B.V., Romyntsev V.D. GaSb structures with quantum dots in space charge region // Proc. of the 24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf. Hamburg, 2009. P. 740–742.
- [5] Калиновский В.С., Лёвин Р.В., Пушный Б.В., Мизеров М.Н., Румянцев В.Д., Андреев В.М. // ФТП. 2013. Т. 47. В. 12. С. 1677–1680.
- [6] Полупроводниковая многопереходная структура. Патент № RU106443U1 от 10.07.2011.
- [7] Marichev A.E., Pushnyi B.V., Levin R.V., Lebedeva N.M., Prasolov N.D., Kontrosh E.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 993. P. 012036 (1–4).
- [8] Андреев В.М., Евстропов В.В., Калиновский В.С., Лантратов В.М., Хвостиков В.П. // ФТП. 2009. Т. 43. В. 5. С. 671–678.
- [9] Wu S.-N., Ding D., Johnson S.R., Yu S.-Q., Zhang Y.-H. // Prog. Photovolt.: Res. Appl. 2010. V. 18. P. 328–333.