

06.3;07.2;07.3

Замена туннельных переходов в InP на каналы проводимости с кристаллитами GaP

© А.Е. Маричев, В.С. Эполетов, А.С. Власов, Б.В. Пушный, А.И. Лихачев, А.В. Нащекин

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

Поступило в Редакцию 1 июня 2021 г.

В окончательной редакции 15 августа 2021 г.

Принято к публикации 18 августа 2021 г.

Представлены результаты исследований методом тока, индуцированного электронным зондом, p - n -переходов на основе InP с кристаллитами GaP в области объемного заряда. Показано, что введение кристаллитов в область пространственного заряда приводит к закорачиванию p - n -перехода. Качество материала, выращенного поверх кристаллитов, позволяет создавать фотоактивные области, о чем свидетельствуют измерения спектров фотолюминесценции.

Ключевые слова: кристаллиты, туннельный переход, соединительный элемент.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.22.51729.18893

В настоящее время наиболее эффективные солнечные фотоэлементы изготавливаются на основе каскадных гетероструктур. В таких приборах три или четыре фотоактивных p - n -перехода, работающих в разных спектральных диапазонах, соединяются последовательно туннельными переходами с предельно высокими уровнями легирования [1,2]. При достаточно высокой плотности излучения генерируемый фототок может превысить пиковый ток туннельных переходов, что ведет к увеличению сопротивления всей структуры и падению эффективности работы прибора [3].

В приборах на основе фосфида индия сложно получить качественные туннельные переходы из-за особенностей легирования фосфида индия примесями p -типа [4,5]. Возможным путем решения этих проблем является замена туннельных переходов на каналы проводимости, например получаемые посредством создания массива кристаллических включений в области объемного заряда (ООЗ) между соседними фотоактивными p - n -переходами [1]. В этом случае в каналах проводимости обеспечивается линейная зависимость протекающего тока. В работах [6,7] были впервые предложены и экспериментально исследованы p - n -переходы на основе GaSb, в ООЗ которых были введены кристаллиты кремния. Данное решение закреплено патентом РФ [8].

Для создания каналов проводимости нужно, чтобы материал кристаллитов в области объемного заряда удовлетворял следующим условиям: 1) необходимо наличие слабого поглощения оптического излучения; 2) материал кристаллитов не должен образовывать на границе p - n -переходов монокристаллический слой, а должны формироваться отдельные кристаллиты.

Важным является сохранение качества материала фотоактивных переходов, выращенных поверх слоев, содержащих нанокристаллиты, так как снижение их качества приводит к уменьшению эффективности преоб-

разования излучения. Особенности получения массивов кристаллитов GaP на слое InP описаны в [9,10].

В настоящей работе представлены результаты исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) и проводимости p - n -перехода на основе InP с кристаллитами GaP, включенными в область объемного заряда, методом тока, индуцированного электронным зондом (ТИЭЗ). Метод ТИЭЗ позволяет анализировать электрические характеристики структур в объеме без создания омических контактов. Следует отметить, что низкоомные контакты к p -InP [11] сложно изготавливать, и это влияет на измерения вольт-амперных характеристик. Методом фотолюминесценции оценивалось качество InP, выращенного на слое с кристаллитами.

Структуры выращивались методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений на установ-

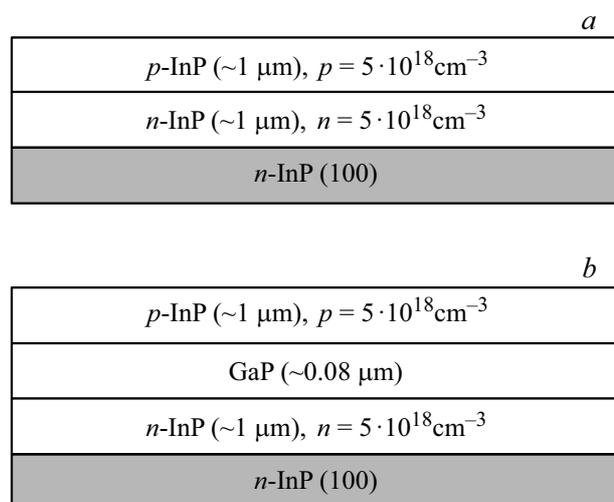


Рис. 1. Схематические изображения структур, выращенных на подложках n -InP. *a* — p - n -переход, *b* — соединительный p - n -переход с кристаллитами GaP в ООЗ.

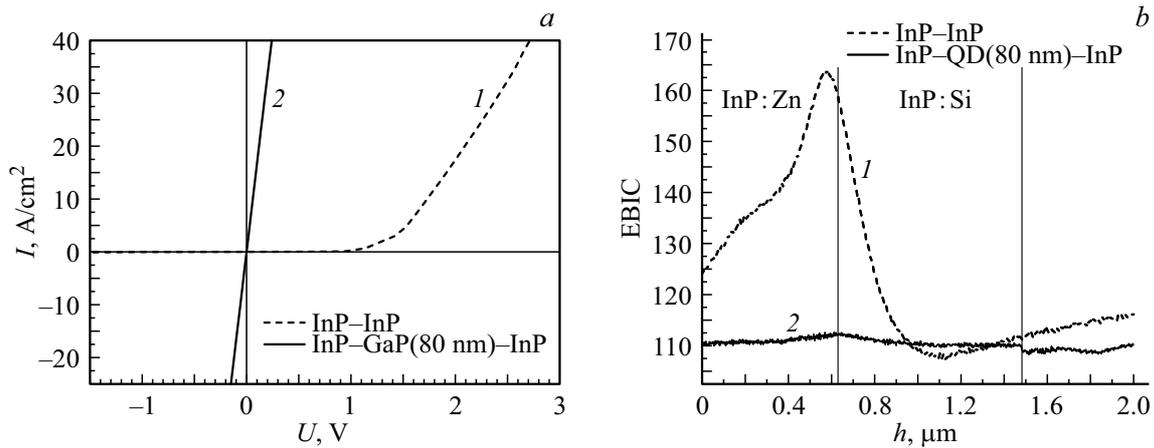


Рис. 2. *a* — ВАХ, *b* — сигнал ТИЭЗ структур на основе InP, выращенных на *n*-подложках. 1 — *p-n*-переход; 2 — *p-n*-переход с GaP-кристаллитами в ООЗ.

ке AIX-200 (AIXTRON, Германия) [9] на подложках *n*-InP(100). В настоящей работе изготовлены два типа структур, представленные на рис. 1: 1) *p-n*-переход на основе InP, *n*- и *p*-слои имели концентрацию $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и толщину $1 \mu\text{m}$ (*a*); 2) *p-n*-переход на основе InP с кристаллитами GaP, включенными в ООЗ, *n*- и *p*-слои имели концентрацию $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ и толщину $1 \mu\text{m}$, а толщина кристаллитов была равна 80 nm (*b*).

Измерения ВАХ проводились при комнатной температуре в диапазоне плотностей тока от 10^{-8} до 40 A/cm^2 , данные представлены на рис. 2, *a* (кривая 1 соответствует ВАХ *p-n*-перехода без кристаллитов в ООЗ, кривая 2 отвечает ВАХ *p-n*-перехода с кристаллитами, включенными в ООЗ, и имеет линейный характер).

Исследования методом ТИЭЗ проводились на растровом электронном микроскопе CAMSCAN Series 4-88 DV100 (Англия) с блоком усилителя „ЕВИС“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия) и энергией электронов 5 keV . На рис. 2, *b* представлен сигнал ТИЭЗ исследуемых структур: *p-n*-перехода без кристаллитов в ООЗ (кривая 1) и *p-n*-перехода с кристаллитами, включенными в ООЗ (кривая 2). Из зависимостей видно, что введение кристаллитов в ООЗ приводит к закорачиванию *p-n*-перехода.

Оценка качества материала верхнего слоя структуры, состоящей из эпитаксиального слоя *p*-InP толщиной $1 \mu\text{m}$ с концентрацией $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, выращенного на слое кристаллитов GaP с размерами 80 nm , проводилась методом фотолюминесценции в диапазоне длин волн $600\text{--}1500 \text{ nm}$ при температуре жидкого азота (77 K). Для возбуждения люминесценции использовался Nd:YAG-лазер с длиной волны излучения 532 nm и мощностью до 130 mW . Плотность мощности возбуждения составляла $\sim 100 \text{ W/cm}^2$, в качестве детектора использовался PbS-фоторезистор.

На рис. 3 приведено сравнение спектров фотолюминесценции контрольного образца без промежуточного подслоя GaP (кривая 1) и исследуемого образца с

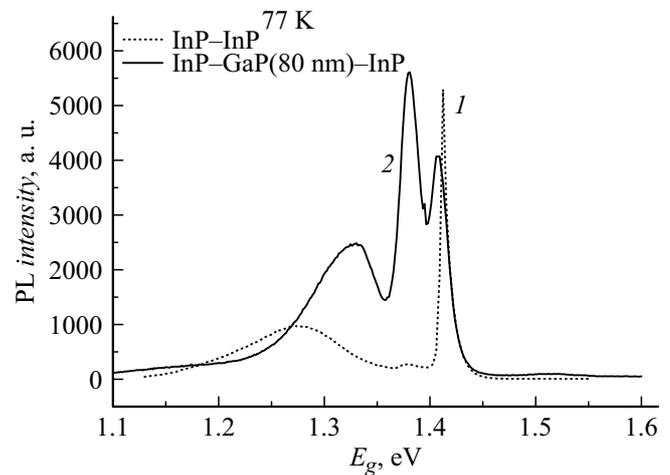


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции контрольного образца *p-n*-перехода без кристаллитов GaP (1) и образца с кристаллитами GaP высотой 80 nm (2).

кристаллитами GaP высотой 80 nm (кривая 2). В спектре контрольного образца присутствуют три полосы: 1.41 eV (межзонная рекомбинация), 1.38 eV (переход с участием мелкого акцепторного уровня) и 1.28 eV (полосу обычно приписывают собственным антиструктурным дефектам замещения в InP [12]).

В спектре фотолюминесценции материала на кристаллитах GaP обнаруживаются изменения. Основная полоса 1.41 eV уширяется и смещается в сторону более низких энергий, а интенсивность полосы 1.38 eV растет. Такое поведение свидетельствует об увеличении концентрации дырок в верхнем слое InP, что согласуется с расчетами из первых принципов [13]. При этом важно отметить, что интенсивность фотолюминесценции не уменьшается. Это указывает на то, что введение кристаллитов GaP в промежуточный слой не приводит к появлению значимого количества центров безызлучательной рекомбинации,

например дислокаций. Полоса 1.28 eV при введении слоя кристаллитов GaP увеличивается по интенсивности и смещается в сторону более высоких энергий. Также появляется дополнительная полоса 1.33 eV.

Таким образом, показано, что метод ТИЭЗ позволяет выявлять особенности протекания тока через $p-n$ -переход при введении кристаллитов GaP в ООЗ структуры. В том случае, когда размеры кристаллитов больше ширины ООЗ, происходит закорачивание $p-n$ -перехода, что подтверждено методом ТИЭЗ и исследованиями ВАХ. Качество материала, выращенного поверх кристаллитов, позволяет создавать фотоактивные области, о чем свидетельствуют результаты исследований фотолюминесценции.

Благодарности

Электронно-микроскопические и ТИЭЗ-исследования выполнены с использованием оборудования Федерального ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ж.И. Алфёров, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев, ФТП, **38** (8), 937 (2004). [Zh.I. Alferov, V.M. Andreev, V.D. Rumyantsev, Semiconductors, **38** (8), 899 (2004). DOI: 10.1134/1.1787110].
- [2] N.H. Karam, R.A. Sherif, R.R. King, in *Concentrator photovoltaics*, ed by A.L. Luque, V. Andreev. Springer Ser. in Optical Sciences (Springer, Berlin–Heidelberg, 2007), vol. 130, p. 199–219. DOI: 10.1007/978-3-540-68798-6
- [3] V.M. Andreev, E.A. Ionova, V.R. Larionov, V.D. Rumyantsev, M.Z. Shvarts, G. Glenn, in *2006 IEEE 4th World Conf. on photovoltaic energy conversion* (IEEE, 2006), vol. 1, p. 799–802. DOI: 10.1109/WCPEC.2006.279577
- [4] E.F. Schubert, C.J. Pinzone, M. Geva, Appl. Phys. Lett., **67** (5), 700 (1995).
- [5] M.F. Vilela, A. Freundlich, A. Bensaoula, N. Medelci, P. Renaud, in *Proc. of the 14th Space Photovoltaic Research and Technology Conf. (SPRAT 14)* (NASA Lewis Research Center, Cleveland, OH, 1995), p. 11.
- [6] V.M. Andreev, V.S. Kalinovsky, R.V. Levin, B.V. Pushniy, V.D. Rumyantsev, in *Proc. of the 24th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conf.* (Hamburg, 2009), p. 740–742. DOI: 10.4229/24thEUPVSEC2009-1DV.5.16
- [7] В.С. Калиновский, Р.В. Лёвин, Б.В. Пушный, М.Н. Мизеров, В.Д. Румянцев, В.М. Андреев, ФТП, **47** (12), 1677 (2013). [V.S. Kalinovsky, R.V. Levin, B.V. Pushniy, M.N. Mizerov, V.D. Rumyantsev, V.M. Andreev, Semiconductors, **47** (12), 1652 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613120105].
- [8] Полупроводниковая многопереходная структура, патент RU106443U1 (опубл. 10.07.2011).
- [9] А.Е. Маричев, В.В. Пушный, Р.В. Левин, N.M. Lebedeva, N.D. Prasolov, E.V. Kontrosh, J. Phys.: Conf. Ser., **993**, 012036 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/993/1/012036
- [10] Р.В. Левин, А.Е. Маричев, Е.В. Контрош, Н.Д. Прасолов, В.С. Калиновский, Б.В. Пушный, Письма в ЖТФ, **44** (24), 25 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.24.47026.17458 [R.V. Levin, A.E. Marichev, E.V. Kontrosh, N.D. Prasolov, V.S. Kalinovskii, B.V. Pushnyi, Tech. Phys. Lett., **44** (12), 1130 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018120490].
- [11] В.С. Эполетов, А.Е. Маричев, Б.В. Пушный, Р.А. Салий, Письма в ЖТФ, **46** (23), 13 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50340.18467 [V.S. Epolotov, A.E. Marichev, B.V. Pushnyi, R.A. Saliy, Tech. Phys. Lett., **46** (12), 1167 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020120056].
- [12] Y. Zhao, Z. Dong, J. Appl. Phys., **100** (12), 123519 (2006). DOI: 10.1063/1.2404467
- [13] R. Mishra, O.D. Restrepo, A. Kumar, W. Windl, J. Mater. Sci., **47** (21), 7482 (2012). DOI: 10.1007/s10853-012-6595-8