

07

Формирование твердых растворов InPAs методом твердофазного замещения

© Г.С. Гагис, В.И. Кучинский, Д.Ю. Казанцев, Б.Я. Бер, М.В. Токарев, В.И. Васильев

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: gsgagis@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 25 ноября 2025 г.

Принято к публикации 29 ноября 2025 г.

Исследованы образцы, полученные методом твердофазного замещения элементов пятой группы мышьяком в InP и фосфором в InAs в течение $\tau = 30$ и 70 min при температурах $t = 585$ и 655°C . Согласно данным вторичной ионной масс-спектрометрии, элементы пятой группы проникали на глубину до 100 nm , для InP количество и глубина проникновения мышьяка при одинаковых τ и t имели различия при разных типах легирования подложек.

Ключевые слова: твердофазное замещение, арсенид индия, фосфид индия, диффузия цинка, вторичная ионная масс-спектрометрия.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.06.62465.20554

При изготовлении оптоэлектронных приборов, таких как фотоэлектрические преобразователи на основе GaAs и GaSb, остается актуальным метод создания $p-n$ -перехода за счет диффузии акцепторной примеси Zn из паровой фазы в пластину $n\text{-A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [1]. Ранее нами было показано, что аналогичным методом можно проводить твердофазное замещение элементов пятой группы B^{V} в пластине $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ другими элементами пятой группы C^{V} , обеспечивая формирование приповерхностного слоя твердого раствора и тем самым получение гетероструктуры $\text{A}^{\text{III}}\text{B}_{1-x}^{\text{V}}\text{C}_x^{\text{V}}/\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [2]. Одновременно с твердофазным замещением можно проводить диффузию легирующей примеси D^{II} (Zn или Cd), тогда для создания $p-n$ -перехода следует использовать пластину $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ n -типа. Источником легирующих примесей D^{II} и элементов пятой группы C^{V} могут служить растворы-расплавы, включающие эти компоненты, при этом удобно использовать растворы-расплавы вида $\text{Sn}-\text{D}^{\text{II}}\text{E}^{\text{IV}}\text{C}_2^{\text{V}}$.

Основные факторы, влияющие на распределение замещающих компонентов C^{V} и диффундирующими легирующей примеси в исходной пластине $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$, — это температура проведения процесса t , время выдержки τ и давление паров замещающего компонента P_C , которое существенно зависит от t и атомной доли компонента C^{V} в растворе-расплаве x_C^L . Также немалую роль играют качественный и количественный состав раствора-расплава, химическая природа исходной пластины $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и замещающего элемента C^{V} , о чем более подробно мы писали в [2]. В целом процессы, происходящие при твердофазном замещении, зависят от довольно большого количества различных факторов и не могут быть с достаточной точностью описаны теоретически, поэтому для успешного изготовления приборных структур необходимы соответствующие экспериментальные исследования.

В настоящей работе исследовалось твердофазное замещение фосфора мышьяком в пластинах InP(001) и мышьяка фосфором в InAs(001). В таблице приведены отличия в условиях получения исследованных в настоящей работе образцов: тип материала $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и объемная концентрация свободных электронов n в исходных пластинах, а также индивидуальные условия технологического процесса. Перед процессом твердофазного замещения поверхность пластин подвергалась анодному окислению, после чего окисел снимался в $\text{H}_2\text{O}: \text{HF}$ (7:1). Процессы твердофазного замещения проводились в нагреваемом кварцевом реакторе в атмосфере водорода. Исходные пластины $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ помещались в одну из камер в закрытой графитовой кассете, а в других камерах размещались растворы-расплавы, служащие источником паров элементов пятой группы C^{V} и легирующей примеси D^{II} , при этом все камеры в кассете сообщались между собой.

На рис. 1, *a* представлены результаты измерений методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) образцов, полученных при $\tau = 30\text{ min}$ и $t = 585^\circ\text{C}$. Как можно видеть, количество фосфора, встроившегося в пластины InAs (кривые 3, 4 на рис. 1, *a*), при выбранных условиях на два порядка выше количества мышьяка, встроившегося в InP (кривые 1, 2 на рис. 1, *a*), что вполне объяснимо, если учесть различие в давлениях паров фосфора и мышьяка во время соответствующих технологических процессов. Согласно оценке, сделанной нами в [3] на основе справочных данных [4, 5], давление паров фосфора на два порядка больше давления паров мышьяка для величин t и x_C^L , близких к тем, при которых были получены образцы № 1–4 в настоящей работе. За счет повышения температуры t , времени выдержки τ и атомной доли мышьяка в жидкой фазе x_C^L (см. таблицу) для образца № 5 на основе InP удалось увеличить количество мышьяка x в приповерхностном

Условия технологических процессов получения образцов на основе исходных пластин $A^{III}B^V$

Номер образца	Исходная пластина $A^{III}B^V$		Индивидуальные условия технологического процесса				
	Материал пластины	n, cm^{-3}	Замещающие элементы	$t, ^\circ\text{C}$	τ, min	Раствор-расплав	x_{C}^L
1 (SPR117)	InP:S	$\sim 10^{18}$	Cd+As	585	30	Sn–CdGeAs ₂	0.05
2 (SPR118)	InP:Te	$\sim 10^{18}$					
3 (SPR116)	InAs:Sn	$\sim 10^{18}–10^{19}$	Cd+P	585	30	Sn–CdGeP ₂	0.08
4 (SPR119)	InAs:Sn	$\sim 10^{18}–10^{19}$	Cd+Zn+P	585	30	Sn–CdGeP ₂ Sn–Zn ₃ P ₂	0.08 0.05
5 (SPR193)	InP:Fe		As	655	70	Sn–InAs	0.16

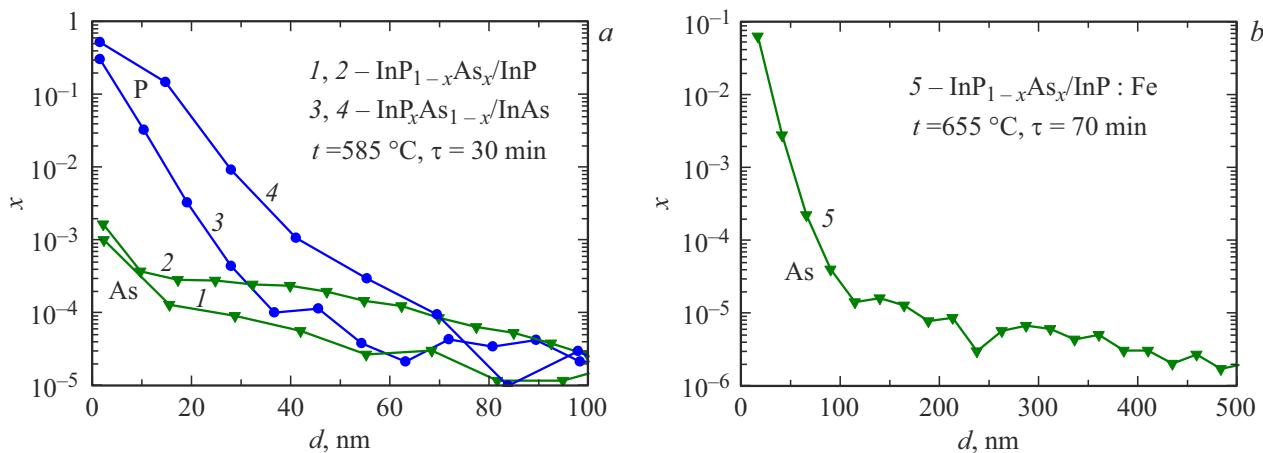


Рис. 1. Профили распределения замещающих элементов пятой группы по глубине d для образцов № 1–4 (a) и № 5 (b). Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

слое сформировавшегося твердого раствора $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ как минимум на порядок (рис. 1, b).

Образцы № 1 и 2 на основе пластин InP были получены в ходе одного технологического процесса и находились в одной камере графитовой кассеты, т.е. t , τ и P_C для них были одинаковы. Однако исследования методом ВИМС показали различия в распределении мышьяка (рис. 1, a) и кадмия (рис. 2, a). Эти различия могут быть объяснены разницей в свойствах исходных пластин InP, которые в нашем случае легированы разными донорными примесями (см. таблицу).

Для образцов № 3 и 4 на основе пластин InAs, взятых из одной партии, различие в распределении встроившегося фосфора (рис. 1, a) может быть связано с различием в условиях проведения технологических процессов: в случае образца № 3 использовался только один раствор-расплав, а в случае образца № 4 было два разных раствор-расплава, находящихся в различных камерах (см. таблицу), один из них служил источником паров Zn. Как видно из рис. 2, b, профиль распределения Cd на расстоянии 20 nm от поверхности для образцов № 3 и 4

имеет схожий характер, но на глубине более 20 nm в образце № 4 методом ВИМС Cd нами обнаружен не был. На рис. 2, c показан профиль распределения Zn по толщине образца № 4. Видно, что Zn проникает на значительную глубину (до $1.2 \mu\text{m}$), что характерно для данного химического элемента. Полученные таким образом в пластинах InAs приповерхностные слои твердых растворов $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$ по своим толщинам и значениям ширины запрещенной зоны E_g (согласно расчетам на основе [6], их $E_g = 0.5–0.7 \text{ eV}$) подходят на роль широкозонного оптического окна для фотоприемника на основе материала InAs, у которого $E_g = 0.354 \text{ eV}$.

Полученные результаты показали, что для формирования приповерхностных областей твердых растворов $\text{InP}_{1-x}\text{As}_x$ в пластинах InP с $x \sim 0.1$ на глубинах $d = 20–40 \text{ nm}$ необходима температура не менее 655°C , повышенное содержание мышьяка в растворе-расплаве, служащем его источником ($x_{\text{As}}^L \sim 0.16$), а также длительное время выдержки (около часа). Приповерхностные слои твердых растворов $\text{InP}_x\text{As}_{1-x}$ с x до $0.2–0.4$ в пластинах InAs на глубинах до 20 nm

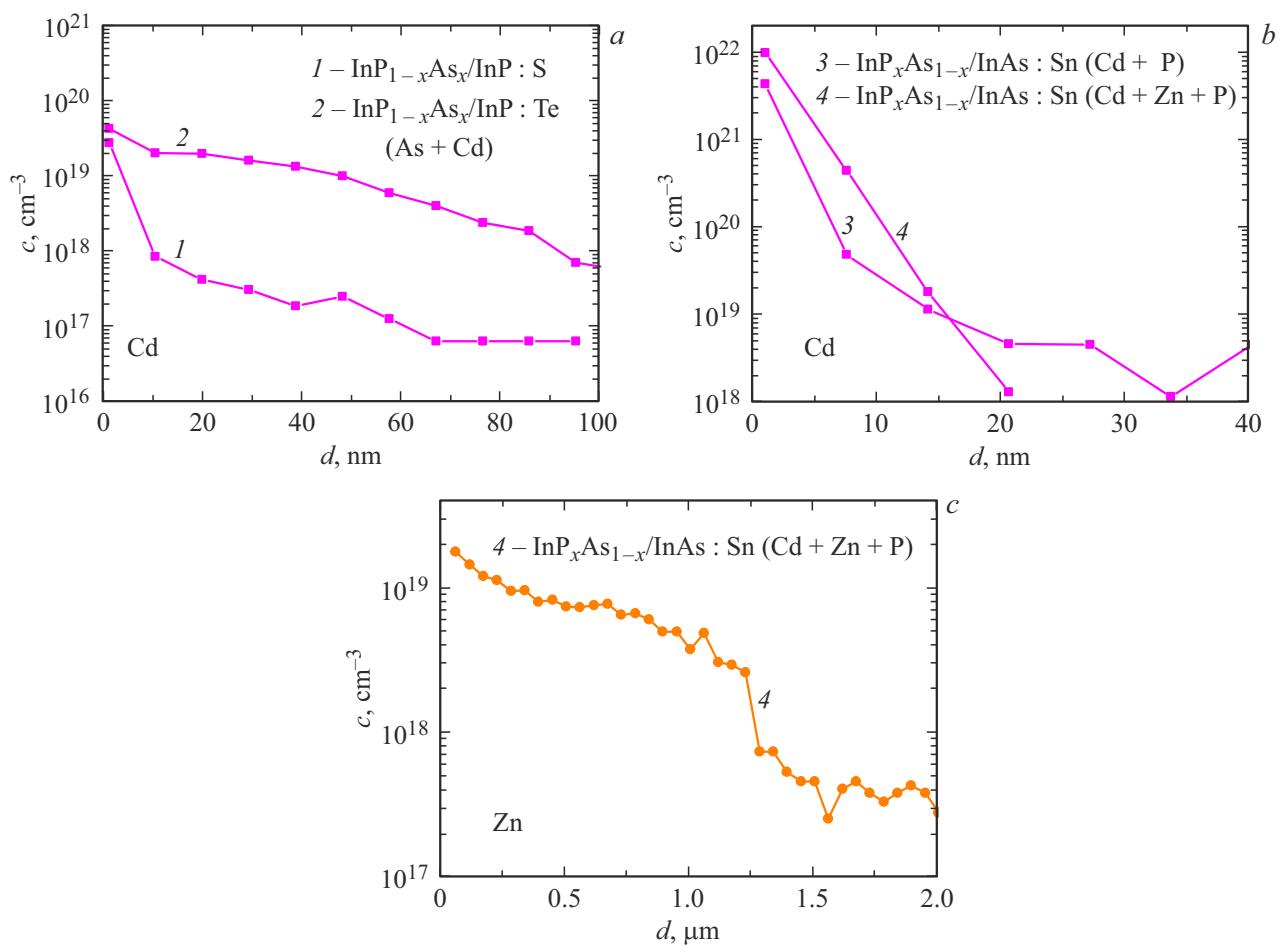


Рис. 2. Зависимость объемной концентрации c легирующих примесей от глубины d для Cd в образцах № 1, 2 на основе InP разного типа легирования (а), для Cd в образцах № 3, 4 на основе InAs:Sn (б) и для Zn в образце № 4 на основе InAs:Sn (в). Номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице.

могут формироваться при более низких температурах (около 585°C), при вдвое меньших временах выдержки и при более низком содержании фосфора в растворорасплаве ($x_{\text{P}}^L = 0.05\text{--}0.07$).

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность Ю.К. Ундалову за предоставление материалов тройных соединений $\text{D}^{\text{II}}\text{E}^{\text{IV}}\text{C}_2^{\text{V}}$.

Финансирование работы

Исследования методом ВИМС проводились с использованием оборудования ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), поддерживаемого Министерством науки и высшего образования России.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.П. Хвостиков, С.В. Сорокина, О.А. Хвостикова, М.В. Нахимович, М.З. Шварц, ФТП, **55** (10), 956 (2021). DOI: 10.21883/FTP.2021.10.51454.9686 [V.P. Khvostikov, S.V. Sorokina, O.A. Khvostikova, M.V. Nakhimovich, M.Z. Shwarts, Semiconductors, **55**, 840 (2021)]. DOI: 10.1134/S1063782621100134].
- [2] В.И. Васильев, Г.С. Гагис, В.И. Кучинский, В.Г. Данильченко, ФТП, **49** (7), 984 (2015). <https://journals.ioffe.ru/articles/41976> [V.I. Vasil'ev, G.S. Gagis, V.I. Kuchinskii, V.G. Danil'chenko, Semiconductors, **49**, 962 (2015). DOI: 10.1134/S1063782615070234].
- [3] Г.С. Гагис, В.И. Кучинский, Д.Ю. Казанцев, Б.Я. Бер, М.В. Токарев, В.П. Хвостиков, М.В. Нахимович, А.С. Власов, В.И. Васильев, Письма в ЖТФ, **48** (21), 3 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.21.53702.19304 [G.S. Gagis, V.I. Kuchinskii, D.Yu. Kazantsev, B.Ya. Ber, M.V. Tokarev, V.P. Khvostikov, M.V. Nakhimovich, A.S. Vlasov, V.I. Vasil'ev, Tech. Phys. Lett., **48** (11), 1 (2022)]. DOI: 10.21883/TPL.2022.11.54876.19304].

- [4] A. Smits, S.C. Bokhorst, Z. Phys. Chem., **91U** (1), 249 (1916).
DOI: 10.1515/zpch-1916-9114
- [5] B.E. Poling, G.H. Thomson, D.G. Friend, R.L. Rowley,
W.V. Wilding, in *Perry's chemical engineers' handbook*, ed. by
D.W. Green, R.H. Perry, 8th ed. (The McGraw-Hill Companies,
Inc., N.Y., 2008), section 2.
- [6] I. Vurgaftman, J.R. Meyer, L.R. Ram-Mohan, J. Appl. Phys.,
89 (11), 5815 (2001). DOI: 10.1063/1.1368156