

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ /
PHYSICAL CHARACTERISTICS AND THEIR STUDY

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2024. Т. 27, № 3. С. 271—277.

DOI: 10.17073/1609-3577j.met202404.581

УДК 621.315:592

**Влияние сульфидной пассивации подложки
на фотолюминесцентные свойства
автоэпитаксиальных слоев InAs**

© 2024 г. Д. В. Коляда✉, Д. Д. Фирсов, О. С. Комков, А. В. Соломонов

*Санкт–Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт–Петербург, 197022, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: kolyada.dima94@mail.ru

Аннотация. Методом низкотемпературной инфракрасной фурье–спектроскопии исследованы фотолюминесцентные свойства автоэпитаксиальных слоев арсенида индия. Структуры выращены методом хлоргидридной газофазной эпитаксии на сильнолегированных подложках n^+ –InAs. Сульфидная пассивация подложек проводилась в одномолярном водном растворе сульфида натрия при комнатной температуре, что приводит к удалению слоя естественного окисла и образованию защищающего поверхность подложки слоя серы. В спектрах фотолюминесценции структур (ФЛ), измеренных на инфракрасном фурье–спектрометре при температуре 8 К, обнаружены три отдельных пика. Пик с энергией 415 мэВ был соотнесен с прямым межзонным переходом в арсениде индия. Мощностная зависимость второго пика, с энергией 400 мэВ, носит сублинейный характер, что позволило отнести его к излучению связанных экситонов. В линии ФЛ третьего пика с максимумом при энергии 388 мэВ наблюдалась тонкая структура с серией близко расположенных пиков, что позволяет отнести данный сигнал к излучению донорно–акцепторных пар. Оценка влияния сульфидизации подложки на качество эпитаксиальных слоев InAs проводилась путем сравнения относительной площади пика ФЛ связанных экситонов для сульфидизированных и не сульфидизированных структур. Показано, что снижение относительной площади пика связанных экситонов после сульфидизации подложки обусловлено уменьшением числа дефектов в автоэпитаксиальных слоях InAs.

Ключевые слова: арсенид индия, автоэпитаксиальный слой, фотолюминесценция, сульфидизация, межзонный переход, связанные экситоны, донорно–акцепторные пары, инфракрасное фотоприемное устройство

Благодарности: Авторы выражают благодарность А.С. Петрову за предоставленные образцы и П.С. Шилову за помощь в обработке образцов.

Для цитирования: Коляда Д.В., Фирсов Д.Д., Комков О.С., Соломонов А.В. Влияние сульфидной пассивации подложки на фотолюминесцентные свойства автоэпитаксиальных слоев InAs. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2024; 27(3): 271—277. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202404.581>

Impact of substrate sulphide passivation on photoluminescent properties of InAs autoepitaxial layers

D. V. Kolyada✉, D. D. Firsov, O. S. Komkov, A. V. Solomonov

*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
5 Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation*

✉ Corresponding author: kolyada.dima94@mail.ru

Abstract. Photoluminescent properties of indium arsenide autoepitaxial layers have been investigated by low-temperature Fourier-transform infrared spectroscopy. The structures were grown by hydride vapour-phase epitaxy on heavily doped n^+ -InAs substrates. Sulfide passivation of the substrates was carried out in a unimolar aqueous solution of sodium sulfide at room temperature, which leads to the removal of the natural oxide layer and the formation of a sulfur layer protecting the substrate surface. Three distinct peaks were detected in the photoluminescence spectra of the structures measured on a Fourier-transform infrared spectrometer at 8 K. The peak with an energy of 415 meV corresponds to the direct interband transition in indium arsenide. The power dependence of the second peak, with an energy of 400 meV, has a sublinear character, which allowed us to attribute it to the emission of bound excitons. A structure with a series of closely spaced peaks was observed in the PL line of the third peak with a maximum at an energy of 388 meV, which allows us to attribute this signal to the emission of donor-acceptor pairs. The effect of substrate sulfidisation on the quality of InAs epitaxial layers was assessed by comparing the relative area of the PL peak of bound excitons for sulfidised and non-sulfidised structures. It is shown that the decrease in the relative peak area of bound excitons after substrate sulfidisation is due to a decrease in the number of defects in the InAs autoepitaxial layers.

Keywords: indium arsenide, autoepitaxial layer, photoluminescence, sulfidisation, interzone transition, bound excitons, donor-acceptor pairs, infrared photodetector

Acknowledgments: The authors express their gratitude to A.S. Petrov for providing samples and to P.S. Shilov for assistance in processing the samples.

For citation: Kolyada D.V., Firsov D.D., Komkov O.S., Solomonov A.V. Impact of substrate sulphide passivation on photoluminescent properties of InAs autoepitaxial layers. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2024; 27(3): 271—277. <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202404.581>

Введение

Арсенид индия (InAs) благодаря прямозонной энергетической структуре и высокой подвижности электронов является перспективным материалом для создания оптоэлектронных приборов среднего инфракрасного диапазона (3—5 мкм). За счет более высокой по сравнению с кремнием и арсенидом галлия подвижности электронов на его основе создаются высокочувствительные фотоприемники и быстродействующие диоды [1]. Эпитаксиальные слои InAs благодаря малой ширине запрещенной зоны нашли широкое применение при изготовлении фотоприемных устройств, работающих в средневолновой области инфракрасного диапазона [2, 3]. Такие фотоприемные устройства позволяют проводить наблюдения за состоянием окружающей среды, контролировать выбросы промышленного производства в атмосферу, а также используются в

медицинских целях. Одним из способов улучшения люминесцентных свойств эпитаксиальных слоев InAs является сульфидная пассивация подложек в водном растворе сульфида натрия. Цель работы — реализация способа бесконтактной оценки степени влияния сульфидизации подложек n^+ -InAs на выращиваемые на них автоэпитаксиальные слои.

Образцы и методы их исследование

Исследуемые в работе автоэпитаксиальные слои InAs были выращены методом газовой фазной хлоргидридной эпитаксии на сильно легированной серой подложке n^+ -InAs. Слои росли на промышленной установке ЭТР-100. Образцы подложек для сопоставления выкалывались из одной монокристаллической подложки InAs.

Концентрация и подвижность свободных носителей в слое были определены методом магне-

Таблица 1 / Table 1

Параметры автоэпитаксиальных слоев InAs
Parameters of InAs autoepitaxial layers

Номер образца	Режим обработки	Толщина слоя, мкм	Подвижность носителей при 77 К (магнетосопротивление), $10^4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Концентрация носителей при 77 К (магнетосопротивление), 10^{15} см^{-3}
2006–3	Без сульф.	21,1	6,9	1,2
2006–4	С сульф.	23,8	8,5	1,9
2007–3	Без сульф.	22,2	8,2	1,6
2007–4	С сульф.	24,5	8,3	1,9
2008–3	Без сульф.	22,0	7,1	1,7
2008–4	С сульф.	22,0	6,7	2,0

тосопротивления при температуре жидкого азота. Автоэпитаксиальные слои специально не легировались и имели n -тип проводимости. Толщины эпитаксиальных слоев определялись по спектрам отражения в инфракрасной (ИК) области [4]. Параметры исследуемых образцов представлены в табл. 1.

Сульфидная обработка поверхности подложек проводилась в девятиводном 1М растворе сульфида натрия ($\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$). Сульфидная пассивация поверхности подложки позволяет удалить слой естественного окисла и образует тонкий слой из атомов серы, защищающий поверхность от воздействия окружающей среды. После помеще-

ния сульфидизированных подложек в реактор и запуске процесса роста по мере увеличения температуры роста слой серы удаляется и рост осуществляется на атомарно чистую поверхность. Это должно улучшить фотолюминесцентные свойства автоэпитаксиальных слоев InAs, поскольку рост осуществляется на бездефектную поверхность подложки. Как отмечают авторы статьи [5] в процессе сульфидизации не происходит травления поверхности InAs, что обеспечивает сохранность рельефа.

Спектры фотолюминесценции (ФЛ) регистрировались на ИК фурье-спектрометре VERTEX 80. Измерения ФЛ проводились при температуре 8 К в гелиевом криостате замкнутого цикла. ФЛ возбуждалась лазерным диодом с длиной волны 809 нм в диапазоне мощностей от 1 мВт до 300 мВт.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлен типичный спектр низкотемпературной ФЛ слоя InAs при разных мощностях накачки лазером.

Основной пик при $E = 415 \text{ мэВ}$ близок по энергии к прямой межзонной рекомбинации электронно-дырочных пар ($E_g = 416 \text{ мэВ}$ при 8 К [6]). Поскольку энергия связи экситона в арсениде индия составляет 1 мэВ [7] и интенсивность пика, соответствующего энергии $E = 415 \text{ мэВ}$, растет с увеличением мощности накачки (рис. 2), то данный пик можно отнести к рекомбинации свободных экситонов [8]. Кроме того, в данной спектральной области может наблюдаться также и пик, соответствующий прямым межзонным переходам [9].

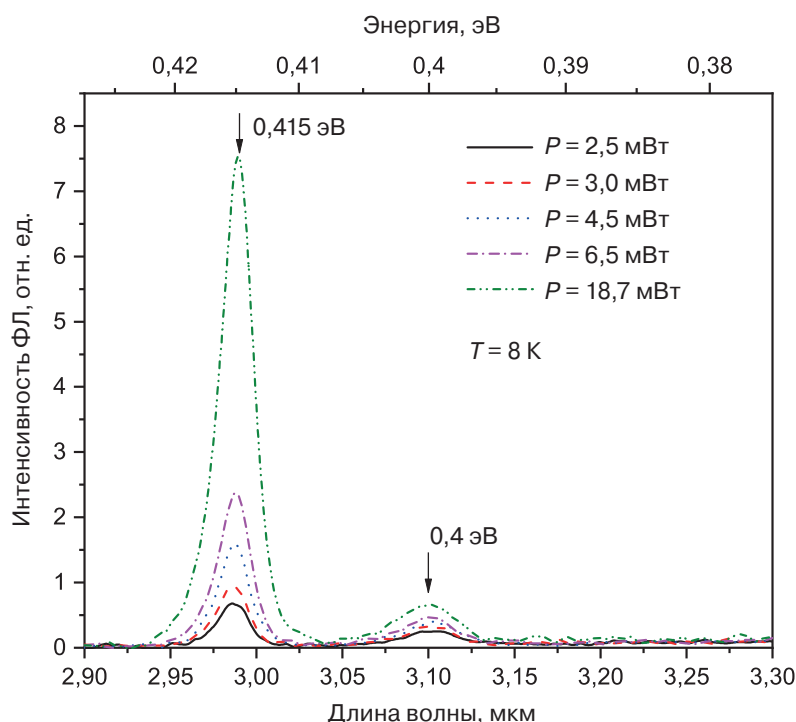


Рис. 1. Спектры ФЛ слоя InAs (образец 2007–3) при разных мощностях накачки. Стрелками отмечены характерные пики люминесценции

Fig. 1. Photoluminescence spectra of the InAs layer (sample 2007–3) at different pump powers. Arrows indicate characteristic luminescence peaks

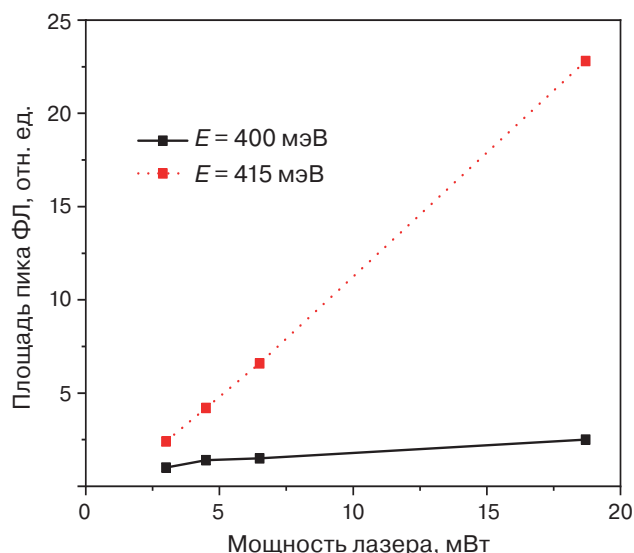


Рис. 2. Зависимость площади пиков ФЛ от мощности возбуждения. $E = 400$ мэВ — пик связанных экситонов, $E = 415$ мэВ — пик межзонных переходов

Fig. 2. Dependence of the area of PL peaks on the excitation power. $E = 400$ meV is the peak of bound excitons, $E = 415$ meV is the peak of interband transitions

Для пика при энергии $E = 400$ мэВ прослеживается более слабая зависимость от мощности накачки, что позволяет отнести его к излучению связанных экситонов [10]. Энергия этого пика меньше, чем у наиболее интенсивного на 15 мэВ. Это позволяет предположить, что экситоны связываются на донорном структурном дефекте «вакансия мышьяка + захваченная им примесь» [11], образующем хвосты плотности состояний [12]. Распространенной фоновой примесью в арсениде индия является углерод, однако атомы углерода как правило встраиваются в решетку вместо атомов индия [13, 14]. Соответственно, захват атома углерода вакансией мышьяка представляется маловероятным. Вероятнее всего захватываемой примесью является мелкий донор вроде S, Te или Se, которые являются фоновыми примесями в InAs [11].

При более высокой мощности накачки (64 мВт) наблюдается полоса люминесценции, максимум которой соответствует энергии $E = 387$ мэВ (рис. 3).

Как можно видеть из спектра на рис. 3, полоса люминесценции имеет тонкую структуру и состоит из нескольких пиков, расположенных близко по энергии. Такая форма спектра ФЛ соответствует излучению донорно–акцепторных пар. Поскольку расстояние между донорами и акцепторами изменяется дискретно, следовательно, энергия излучаемых фотонов так же дискретна, что и наблюдается на рис. 3. Вероятной акцепторной примесью может быть цинк [15].

В работе проводилась оценка влияния сульфидизации подложки на качество автоэпитаксиального слоя InAs. Сравнение интенсивности спектров ФЛ межзонных переходов показало, что после

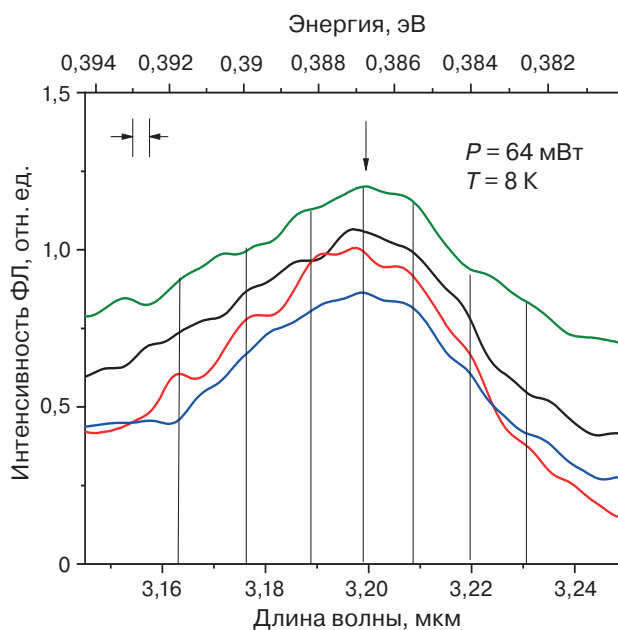


Рис. 3. Полоса люминесценции донорно–акцепторных пар в автоэпитаксиальном слое InAs

Fig. 3. Luminescence band of donor–acceptor pairs in the autoepitaxial InAs layer

Таблица 2 / Table 2

Относительная площадь пика ФЛ связанных экситонов для разных образцов при мощности накачки 4,5 мВт

Relative area of the PL peak of bound excitons for different samples at a pump power of 4.5 mW

Номер образца	Режим обработки	Толщина слоя, мкм	Относительная площадь при мощности накачки 4,5 мВт, отн. ед.	Концентрация носителей при 77 К (магнетосопротивление), 10^{15} см^{-3}
2006–3	Без сульф.	21,1	24	1,2
2006–4	С сульф.	23,8	19	1,9
2007–3	Без сульф.	22,2	33	1,6
2007–4	С сульф.	24,5	19	1,9
2008–3	Без сульф.	22	36	1,7
2008–4	С сульф.	22	22	2,0

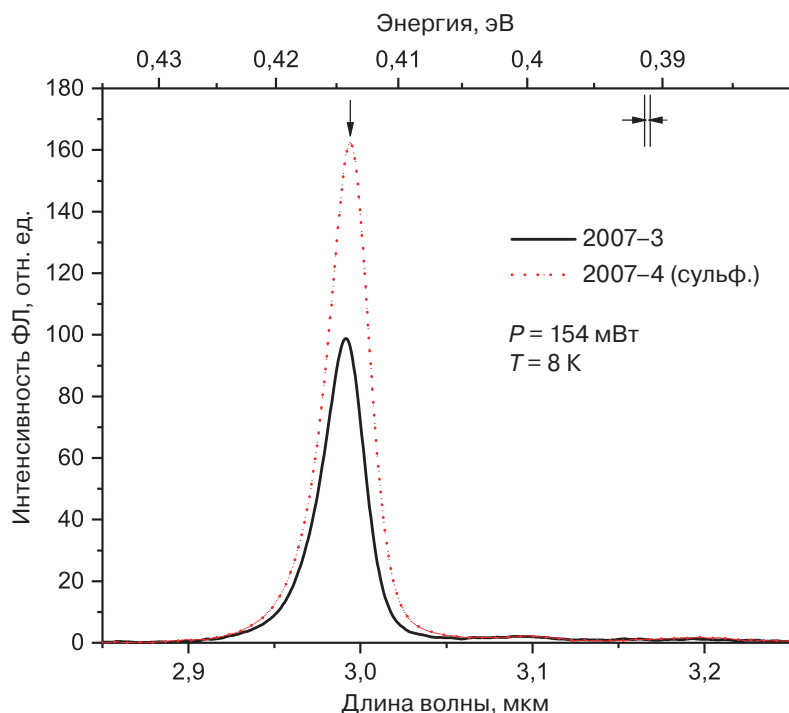


Рис. 4. Изменение интенсивности спектра ФЛ после сульфидной обработки подложки

Fig. 4. Change in the intensity of the PL spectrum after sulfide treatment of the substrate

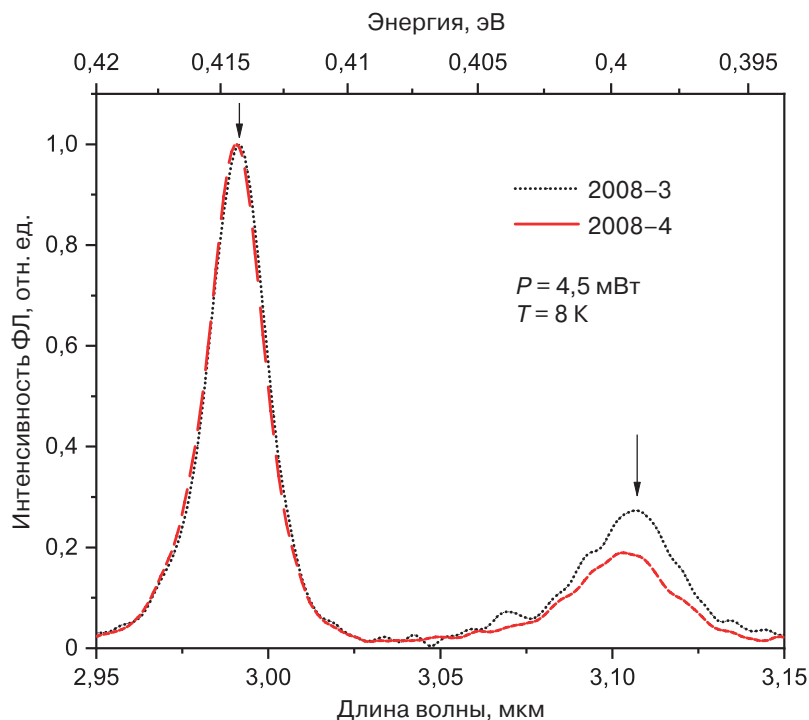


Рис. 5. Спектры ФЛ образцов 2008–3 (без сульфидизации подложки) и 2008–4 (на сульфидизированной подложке). Спектры образцов были нормированы на максимум пика межзонных переходов и приведены к одной температуре

Fig. 5. Photoluminescence spectra of samples 2008–3 (without sulfidization of the substrate) and 2008–4 (on a sulfidized substrate). The spectra of the samples were normalized to the maximum of the interband transition peak and reduced to the same temperature

сульфидизации подложки происходит увеличение амплитуды спектра (рис. 4) почти во всех образцах.

Данный эффект можно объяснить удалением слоя окисла с поверхности подложки, что позволяет расти InAs на чистой поверхности «родной» подложки. Также сульфидизация снижает число поверхностных дефектов на подложке, что позволяет выращивать эпитаксиальные слои лучшего структурного качества. Сравнение спектров ФЛ проводилось при большой мощности накачки, т. к. в этом случае пик межзонных переходов преобладает над остальными.

Обычно качество эпитаксиальных структур оценивают по ширине на полувысоте спектра [16]. Но в данном случае анализ полуширины спектра не дал результатов, поскольку изменение полуширины спектра было слишком незначительно ($\sim 0,2$ мЭВ), чтобы по нему можно было сделать вывод о изменении качества эпитаксиального слоя. Был использован другой способ: оценка с (рис. 5) (отношение площади фотолюминесценции связанных экситонов к площади фотолюминесценции межзонных переходов) [17]. Измерения проводились при малой мощности накачки, т. к. при большой мощности наступает насыщение интенсивности пика связанных экситонов (см. рис. 2).

Анализ относительной площади пика позволяет не учитывать влияние внешних факторов на ФЛ. Аналогичное снижение относительной площади ФЛ связанных экситонов после сульфидизации подложки наблюдалось во всех образцах (табл. 2).

Снижение относительной площади пика связанных экситонов после сульфидизации подложки обусловлено уменьшением числа дефектов и прочих центров, на которых связываются экситоны. Также в сульфидизированных образцах наблюдается рост концентрации носителей заряда, связанных с донорной примесью. Объяснить это можно диффузией дополнительной серы с подложки в слой из-за неполного удаления сульфидного

слоя, и последующей температурной активацией атомов серы ($E_{\text{акт.}} = 2\text{—}3$ мэВ [18]).

Заключение

Был предложен способ оценки влияния сульфидизации сильнолегированной подложки на свойства автоэпитаксиальных слоев InAs. Способ

заключался в сравнении относительной площади пика связанных экситонов слоев до и после сульфидной обработки подложки. Было выявлено, что сульфидизация подложки снижает число связывающих экситоны центров, что говорит об улучшении структурного качества структуры, но при этом происходит диффузия дополнительной серы из подложки в слой.

Библиографический список

1. Zhijian Shen, Jinshan Yao, Jian Huang, Zhecheng Dai, Luyu Wang, Fengyu Liu, Xinbo Zou, Bo Peng, Weimin Liu, Hong Lu, Baile Chen. High-speed mid-wave infrared uni-traveling carrier photodetector with inductive peaked dewar packaging. *Journal of Lightwave Technology*. 2023; 42(5): 1504—1510. <https://doi.org/10.1109/JLT.2023.3322967>
2. Kovtonyuk N.F., Misnik V.P., Sokolov A.V. Sensitivity of insulator-semiconductor structures to time-dependent light fluxes. *Semiconductors*. 2005; 39: 1290—1293. <https://doi.org/10.1134/1.2128452>
3. Blain T., Shulyak V., Im Sik Han, Hopkinson M., Jo Shien Ng, Chee Hing Tan. Low noise equivalent power in avalanche photodiodes for infrared few-photon detection. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2024; 71(5): 3039—3044. <https://doi.org/10.1109/TED.2024.3373373>
4. Komkov O.S., Firsov D.D., Kovalishina E.A., Petrov A.S. Determination of the indium arsenide autoepitaxial layers' thickness by Fourier-Transform Infrared Spectroscopy. *Russian Microelectronics*. 2015; 44: 575—578. <https://doi.org/10.1134/S1063739715080156>
5. Львова Т.В., Седова И. В., Дунаевский М. С., Карпенко А.Н., Улин В.П., Иванов С.В., Берковиц В.Л. Сульфидная пассивация подложек InAs(100) в растворах Na_2S . *Физика твердого тела*. 2009; 51(6): 1055—1061.
6. L'vova T.V., Sedova I.V., Dunaevskii M.S., Karpenko A.N., Ulin V.P., Ivanov S.V., Berkovits V.L. Sulfide passivation of InAs(100) substrates in Na_2S solutions. *Physics of the Solid State*. 2009; 51: 1114—1120. <https://doi.org/10.1134/S1063783409060043>
7. Vurgaftman I., Meyer J.R., Ram-Mohan L.R. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*. 2001; 89(11): 5815—5875. <https://doi.org/10.1063/1.1368156>
8. Böer K.W., Pohl U.W. Excitons. In: *Semiconductor Physics*. Cham: Springer; 2023. 1419 p. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18286-0_14
9. Sumikura H., Shinya A., Notomi M. Time-resolved mid-infrared photoluminescence spectroscopy of an undoped InAs substrate. *Applied Physics Letters*. 2024; 124(5): 052105. <https://doi.org/10.1063/5.0188326>
10. Gladkov P., Nohavica D., Šourek Z., Litvinchuk A.P., Iliev M.N. Growth and characterization of InAs layers obtained by liquid phase epitaxy from Bi solvents. *Semiconductor Science and Technology*. 2006; 21(4): 544—549. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/4/022>
11. Firsov D.D., Komkov O.S., Petrov A.S. Photoluminescence of undoped InAs autoepitaxial layers. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015; 643(1): 012051. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/643/1/012051>
12. Voronina T.I., Lagunova T.S., Moiseev K.D., Rozov A.E., Sipovskaya M.A., Stepanov M.V., Sherstnev V.V., Yakovlev Yu.P. Electrical properties of epitaxial indium arsenide and narrow band solid solutions based on it. *Semiconductors*. 1999; 33: 719—725. <https://doi.org/10.1134/1.1187768>
13. Баранов А.Н., Воронина Т.И., Гореленок А.А., Лагунова Т.С., Литвак А.М., Сиповская М.А., Старосельцева С.П., Тихомирова В.А., Шерстнев В.В. Исследование структурных дефектов в эпитаксиальных слоях арсенида индия. *Физика и техника полупроводников*. 1992; 26(9): 1612—1624. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/23914>
14. Baranov A.N., Voronina T.I., Gorelyuk A.A., Lagunova T.S., Litvak A.M., Sipovskaya M.A., Staroseltseva S.P., Tikhomirova V.A., Sherstnev V.V. Study of structural defects in epitaxial layers of indium arsenide. *Physics and Technics of Semiconductors*. (In Russ.). 1992; 26(9): 1612—1624. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/23914>
15. Voronina T.I., Zotova N.V., Kizhayev S.S., Molchanov S.S., Yakovlev Yu.P. Luminescence properties of InAs layers and p-n structures grown by metallorganic chemical vapor deposition. *Semiconductors*. 1999; 33: 1062—1066. <https://doi.org/10.1134/1.1187865>
16. Fang Z.M., Ma K.Y., Cohen R.M., Stringfellow G.B. Effect of growth temperature on photoluminescence of InAs grown by organometallic vapor phase epitaxy. *Applied Physics Letters*. 1991; 59(12): 1446—1448. <https://doi.org/10.1063/1.105283>
17. Lacroix Y., Tran C.A., Watkins S.P., Thewalt M.L.W. Low-temperature photoluminescence of epitaxial InAs. *Journal of Applied Physics*. 1996; 80(11): 6416—6424. <https://doi.org/10.1063/1.363660>
18. Криволапчук В.В., Мездрогина М.М., Поletaев Н.К. Влияние корреляции между подсистемами мелких и глубоких метастабильных уровней на экситонные спектры фотолюминесценции в n-типе GaAs. *Физика твердого тела*. 2003; 45(1): 29—32. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/4472>
19. Krivolapchuk V.V., Mezdrogina M.M., Poletaev N.K. Effect of correlation between the shallow and deep metastable level subsystems on the excitonic photoluminescence spectra in n-GaAs. *Physics of the Solid State*. 2003; 45(1): 28—31. <https://doi.org/10.1134/1.1537404>
20. Zhilyaev Yu.V., Nasonov A.V., Raevski S.D., Rodin S.N., Shcheglov M.P., Davydov V.Yu. Bulk gallium nitride: preparation and study of properties. *Physica Status Solidi (a)*. 2003; 195(1): 122—126. <https://doi.org/10.1002/psa.200306284>
21. Tetyorkin V., Sukach A., Tkachuk A. Infrared photodiodes on II-VI and III-V narrow-gap semiconductors. In: Ilgu Yun (Ed.) *Photodiodes from fundamentals to applications*. Rijeka: IntechOpen; 2012. P. 378. <http://dx.doi.org/10.5772/52930>

Информация об авторах / Information about the authors

Коляда Дмитрий Владимирович — младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6833-2102>; e-mail: kolyada.dima94@mail.ru

Dmitry V. Kolyada — Junior Researcher, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6833-2102>; e-mail: kolyada.dima94@mail.ru

Фирсов Дмитрий Дмитриевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; e-mail: d.d.firsov@gmail.com

Dmitry D. Firsov — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation; e-mail: d.d.firsov@gmail.com

Комков Олег Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, и.о. заведующего кафедрой микро- и нанoeлектроники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; e-mail: okomkov@yahoo.com

Oleg S. Komkov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Acting Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation; e-mail: okomkov@yahoo.com

Соломонов Александр Васильевич — доктор физ.-мат. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация; e-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com

Alexander V. Solomonov — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 5 Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation; e-mail: alexander.v.solomonov@gmail.com

Поступила в редакцию 27.04.2024; поступила после доработки 02.09.2024; принята к публикации 06.10.2024
Received 27 April 2024; Revised 2 September 2024; Accepted 6 October 2024