

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1085-1091

УДК 539.23

Особенности импульсного лазерного напыления тонких пленок InGaAsN в атмосфере активного фоновых газа

Олег Васильевич Девецкий^{1,2}✉

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация

² Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация

v2517@rambler.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>

Аннотация

Предмет исследования. Соединения III-V-N являются перспективным классом твердых растворов, которые могут активно использоваться в оптоэлектронных приборах, работающих в широком спектральном диапазоне вплоть до 3 мкм. Соединения также применяются для увеличения эффективности фотодетекторов, лазеров в волоконно-оптических линиях связи и телекоммуникационных системах. В работе исследованы особенности различных способов получения новых полупроводниковых материалов III-V-N. Тонкие пленки InGaAsN получены методом импульсного лазерного напыления на подложках GaAs (100) и Si (100) в атмосфере активного фоновых газа. **Метод.** Импульсное лазерное напыление тонких пленок InGaAsN проведено с использованием мишени $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ в атмосфере особо чистой аргоно-азотной смеси при давлениях 2, 5 и 10 Па. В качестве источника лазерного излучения использовался лазер AYG:Nd^{3+} с длиной волны 532 нм (вторая гармоника), плотностью энергии лазерного излучения 2,3 Дж/см², частотой следования импульсов 15 Гц и длительностью импульса 10 нс. Температура подложки составила 350 °C, время напыления 60 мин. Основные результаты. Показано, что поверхность тонких пленок текстурирована микрокаплями. Установлено, что микрокапли на поверхности тонкой пленки образованы металлическим индием, а их распределение по поверхности пленки в основном упорядочено в виде линий. Подобное явление можно объяснить наличием дислокаций несоответствия. Средний размер микрокапель на поверхности пленки InGaAsN на GaAs (100) около 30 нм, а их плотность не превышала 0,076 мкм⁻². Для сравнения в пленках, полученных на Si подложках при давлении 2 Па, наибольшая плотность микрокапель — 0,26 мкм⁻². Наименьшая плотность микрокапель на поверхности (0,17 мкм⁻²) зафиксирована в образцах тонкой пленки InGaAsN на Si (100), полученной при давлении 10 Па. Отмечено, что интенсивность локальной фоновой колебательной моды (Local Vibrational Modes, LVM) InN на частоте 430 см⁻¹ возрастает с увеличением давления аргоно-азотной смеси при импульсном лазерном напылении в спектрах комбинационного рассеяния пленок InGaAsN на Si. Обнаружены фоновые моды второго порядка: LVM InN на частоте 450 см⁻¹ и LVM GaN — 470 см⁻¹. Данное обнаружение подтверждает наличие азота в тонкой пленке InGaAsN, полученной методом импульсного лазерного напыления. Показано, что увеличение давления аргоно-азотной газовой смеси при импульсном лазерном напылении способствует увеличению концентрации азота в тонких пленках InGaAsN на Si. Установлено, что концентрация азота в пленках InGaAsN, полученных при давлении 10 Па на подложках GaAs (100) и Si (100), различается незначительно и составляет 1,9 и 1,8 % соответственно. Практическая значимость. Представленные результаты могут быть использованы при создании на основе полученных тонких пленок InGaAsN высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей, фотодетекторов ближнего и среднего инфракрасного диапазона до 3 мкм.

Ключевые слова

разбавленные нитриды, InGaAsN, импульсное лазерное напыление, многокомпонентные твердые растворы, III-V-N/Si

Благодарности

Публикация подготовлена в рамках реализации государственного задания «Разработка новых полупроводниковых материалов на основе многокомпонентных твердых растворов для фотонных, оптоэлектронных и СВЧ применений» (номер государственной регистрации 122020100326-7), а также с использованием ресурсов центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета и при финансовой поддержке

Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687).

Ссылка для цитирования: Девицкий О.В. Особенности импульсного лазерного напыления тонких пленок InGaAsN в атмосфере активного фоновых газа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 6. С. 1085–1091. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1085-1091

Peculiarities of pulsed laser deposition of thin InGaAsN films in an active background gas atmosphere

Oleg V. Devitsky^{1,2}✉

¹ Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation

² North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation
v2517@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>

Abstract

III-V-N compounds are a promising class of solid solutions that have the prospect of being used in optoelectronic devices operating in a wide spectral range up to 3 μm , as well as for increasing the efficiency of photodetectors, lasers in fiber-optic communication lines and telecommunication systems. In this work, the features of various methods for obtaining new III-V-N semiconductor materials are investigated. Thin InGaAsN films were obtained by pulsed laser deposition on GaAs (100) and Si (100) substrates in an active background gas atmosphere. Pulsed laser deposition of thin InGaAsN films was carried out using an $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{As}$ target in an atmosphere of a highly pure argon-nitrogen mixture at a pressure of 2, 5, and 10 Pa. The source of laser radiation was an AYG:Nd³⁺ laser with a wavelength of 532 nm (second harmonic), laser radiation energy density of 2.3 J/cm², pulse repetition rate of 15 Hz, and pulse duration of 10 ns. The substrate temperature was 350 °C, the deposition time was 60 minutes. It is shown that the surface of thin films is textured with microdroplets. It has been established that microdroplets on the surface of a thin film are formed by metallic indium. It has been established that the distribution of indium microdroplets over the film surface is mainly ordered in the form of lines. This phenomenon can be explained by the presence of misfit dislocations. The average size of microdroplets on the surface of the InGaAsN film on GaAs (100) was about 30 nm, and their density did not exceed 0.076 μm^{-2} . For comparison, in films obtained on Si substrates at a pressure of 2 Pa, the highest microdroplet density was 0.26 μm^{-2} . The lowest density of microdroplets on the surface (0.17 μm^{-2}) was noted in samples of a thin film of InGaAsN on Si (100) obtained at a pressure of 10 Pa. It is noted that the intensity of the local phonon vibrational mode LVM InN at a frequency of 430 cm^{-1} increases with increasing pressure of the argon-nitrogen mixture during pulsed laser deposition in the Raman scattering spectra of InGaAsN films on Si. In the Raman spectra of InGaAsN films on Si, second-order phonon modes LVM InN and LVM GaN were detected at frequencies of 450 cm^{-1} about 470 cm^{-1} , respectively. This confirms the presence of nitrogen in a thin InGaAsN film obtained by pulsed laser deposition. It is shown that an increase in the pressure of the argon-nitrogen gas mixture during pulsed laser deposition contributes to an increase in the nitrogen concentration in thin InGaAsN films on Si. It has been established that the nitrogen concentration in InGaAsN films obtained at a pressure of 10 Pa on GaAs (100) and Si (100) substrates differs insignificantly and amounts to 1.9 % and 1.8 %, respectively. The presented results will make it possible to create highly efficient photoelectric converters and photodetectors for the near and mid-infrared range up to 3 μm based on the obtained InGaAsN thin films.

Keywords

dilute nitrides, InGaAsN, pulsed laser deposition, multicomponent solid solutions, III-V-N/Si

Acknowledgments

The publication was prepared as part of the implementation of the state task “Development of new semiconductor materials based on multicomponent solid solutions for photonic, optoelectronic and microwave applications” (state registration number 122020100326-7), as well as using the resources of the North Caucasus Federal University Shared Use Center and with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, unique project identifier RF-2296.61321X0029 (No 075-15-2021-687).

For citation: Devitsky O.V. Peculiarities of pulsed laser deposition of thin InGaAsN films in an active background gas atmosphere. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 6, pp. 1085–1091 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-6-1085-1091

Введение

В начале XXI века произошло стремительное развитие методов получения эпитаксиальных тонких пленок и гетероструктур соединений III-V-N (разбавленные нитриды) с содержанием азота на уровне нескольких процентов (GaAsN, GaPN) [1]. Наиболее перспективный четырехкомпонентный твердый раствор — InGaAsN, который может быть выращен при условии согласования по постоянной решетке к подложке GaAs, или с

напряжениями на подложке Si. Приборное применение тонких пленок InGaAsN на подложках GaAs и Si нашло в диодных лазерах [2], излучающих в диапазоне 1,3–1,55 мкм, свододиодах и солнечных элементах [3]. Основные методы получения тонких пленок разбавленных нитридов на сегодняшний день — молекулярно-лучевая эпитаксия и осаждение металлоорганических соединений из газовой фазы. С помощью этих методов получены эпитаксиальные тонкие пленки InGaAsN/GaAs с долей азота около 2 % [4]. Отметим, что при

увеличении доли азота структурные свойства тонких пленок ухудшили свое качество на столько, что это лишило их приборного применения.

В работе [5] установлено, что основная причина данного ухудшения — неравновесные условия получения разбавленных нитридов при относительно низких температурах, которые являются необходимыми для встраивания атомов азота в соединения III-V. Из-за этого в тонких пленках с повышенным содержанием азота (от 2 до 4 %) происходит достаточно сильное дефектообразование. Проблема дефектообразования в тонких пленках разбавленных нитридов — критический фактор их приборного применения, который требует простых и эффективных методов решения [6]. Одним из таких способов может стать применение метода импульсного лазерного напыления (ИЛН) [7, 8] для получения разбавленных нитридов на различных типах подложек. ИЛН, в отличие молекулярно-лучевой эпитаксии, является дискретным методом. К тому же при ИЛН разбавленных нитридов источником азота является газовая смесь особо чистого аргона и молекулярного азота (активный фоновый газ). Активация азота происходит за счет образования плазменного факела при воздействии лазерных импульсов на поверхность мишени. В работе [9] получены эпитаксиальные слои $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ на подложках GaAs методом ИЛН мишени GaAs в атмосфере аммиака. Дифракция рентгеновских лучей с высоким разрешением показала, что существует пороговое давление аммиака, выше которого концентрация азота в пленке увеличивается линейно вместе с увеличением давления аммиака. Отметим, что в современных научных работах отсутствуют исследования по получению пленок InGaAsN методом ИЛН на подложках GaAs и Si, но показана перспектива создания приборов на их основе [10].

Цель настоящей работы — получение тонких пленок InGaAsN на подложках Si и GaAs и исследование влияния давления аргоно-азотной смеси при ИЛН на структуру тонких пленок.

Материалы и методы

ИЛН тонких пленок InGaAsN на подложках GaAs (001) и Si (001) выполнено из мишени $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$, сформированной методом холодного прессования. Для получения мишени использованы порошки GaAs и InAs, которые были перетерты в течение 2 ч, а затем просеяны на ситах с размером ячейки 20 мкм. Далее при помощи одноосного прессования под давлением 207 МПа сформирована монолитная мишень $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$.

Лазерное излучение с длиной волны 532 нм сфокусировано на поверхности мишени под углом 45° . Частота повторения импульсов составила 15 Гц, длительность лазерного импульса 10 нс, расходимость лазерного излучения 1–2 мрад. При помощи линзы с фокусным расстоянием 190 мм лазерное излучение сфокусировано на поверхности мишени в пятно диаметром 0,34 мм, плотность энергии импульса при этом составила 2,3 Дж/см². Значение плотности энергии лазерного излучения выбрана исходя из экспериментальных

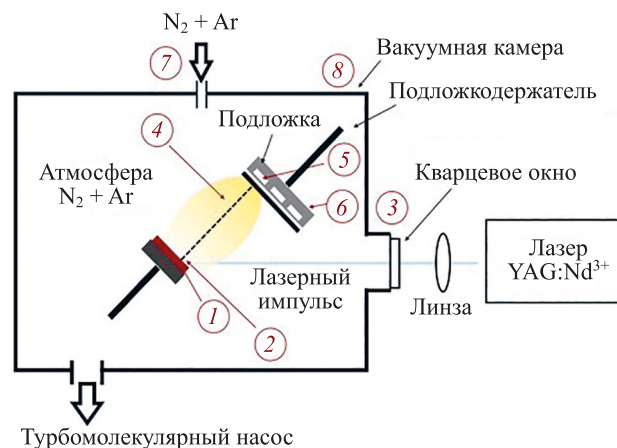


Рис. 1. Схема импульсного лазерного напыления тонких пленок InGaAsN на Si и GaAs: 1 — вращающийся держатель мишени; 2 — мишень $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$; 3 — кварцевое окно; 4 — плазменный факел; 5 — подложка Si или GaAs; 6 — подложкодержатель с нагревателем; 7 — подвод аргоно-азотной газовой смеси; 8 — вакуумная камера

Fig. 1. Scheme of pulsed laser deposition of InGaAsN thin films on Si and GaAs: 1 — rotating target holder; 2 — $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ target; 3 — quartz window; 4 — plasma torch; 5 — Si or GaAs substrate; 6 — substrate holder with a heater; 7 — supply of argon-nitrogen gas mixture; 8 — vacuum chamber

результатов, описанных в работе [7]. Расстояние от мишени до подложки 50 мм, а толщина напыляемых слоев находится в диапазоне 150–170 нм. Процесс напыления осуществлен при температуре подложки 400 °C. Схема процесса ИЛН показана на рис. 1.

На начальном этапе объем вакуумной камеры откачен до 10^{-4} Па, далее объем камеры был изолирован, и добавлена смесь особо чистого аргона и азота. Объемная доля азота в аргоно-азотной смеси составляла 80 %, а значения давления смеси: 2, 5 и 10 Па.

С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA3-LMN с системой определения элементного состава AZtecEnergy Standart/X-max 20, выполнено исследование СЭМ-изображений и измерение состава смеси на поверхности мишени и образцов тонких пленок.

Спектры комбинационного рассеяния света получены с использованием спектрометра inVia Raman Microscope Renishaw.

Результаты и обсуждение

На рис. 2, а, б представлены СЭМ-изображения морфологии поверхности тонкой пленки InGaAsN на подложках GaAs (001), полученной при давлении аргоно-азотной газовой смеси 10 Па. Из представленных изображений видно, что поверхность пленки сплошная и состоит из зерен, что характерно для пленок с поликристаллической структурой. Кроме этого, на поверхности всех образцов тонких пленок присутствуют микрокапли (рис. 2, б), наличие которых типично для ИЛН.

По результатам рентгеноэнергодисперсионного элементного анализа пленки установлено, что микрокапли

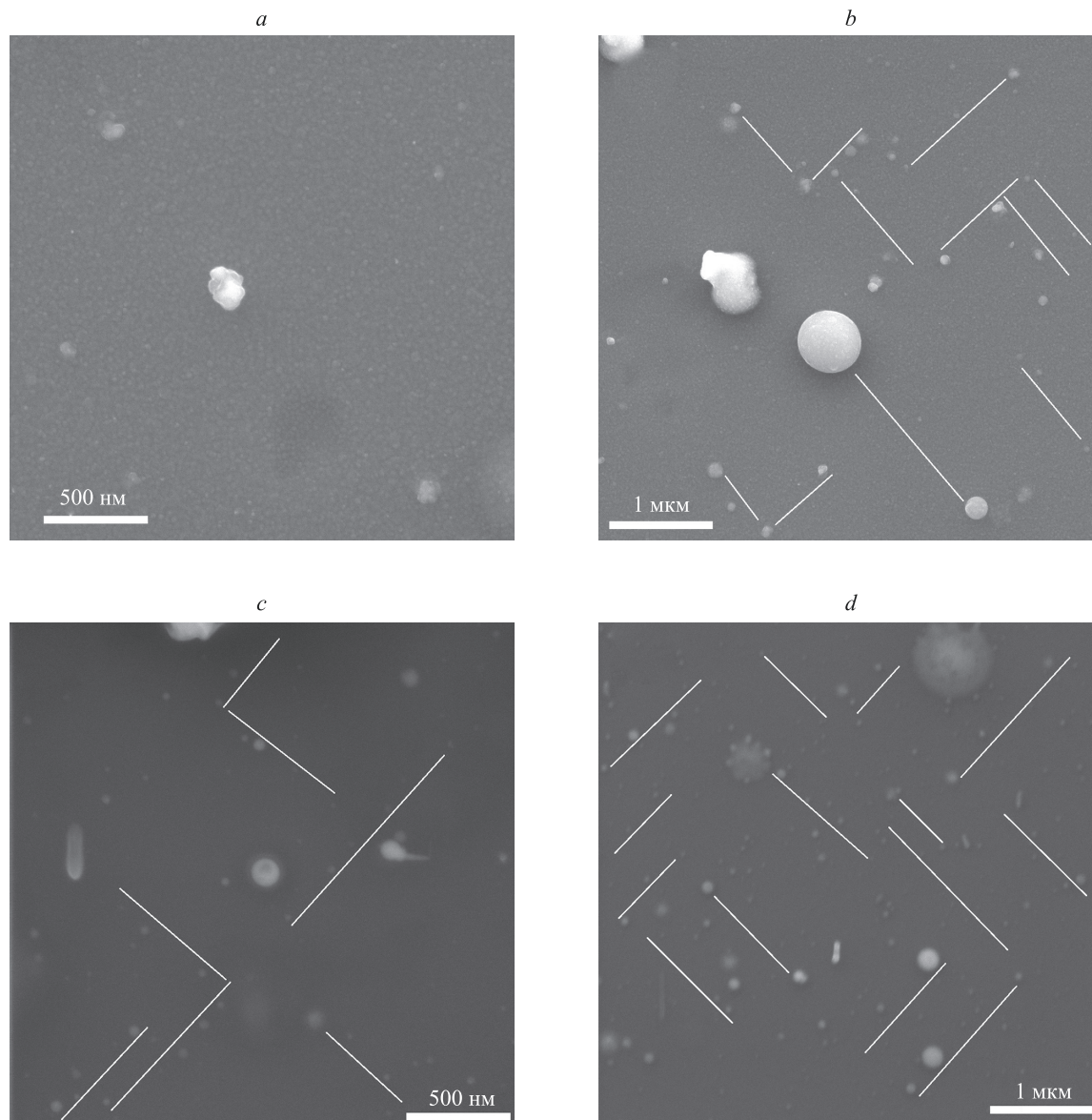


Рис. 2. СЭМ-изображения поверхности тонкой пленки InGaAsN на GaAs (a) и кремниевой (b) подложках и микрокапель индия (c, d)

Fig. 2. SEM images of the surface of a thin InGaAsN film on (a) GaAs and (b) silicon substrates and (c, d) indium microdroplets

образованы металлическим индием, а концентрация азота в пленке InGaAsN составляет 1,9 %. Средний размер микрокапель на поверхности пленки составил около 30 нм, а их плотность не превышает $0,076 \text{ мкм}^{-2}$. Установлено, что распределение микрокапель индия в основном упорядочено в виде линий, которые показаны на рисунке белым цветом. Предположим, что это связано с наличием дислокаций несоответствия, так как расогласования постоянных решетки пленки и подложки ($\Delta a/a$) составляют для InGaAsN на GaAs около 0,23 %, для InGaAsN на Si не более 3,9 %.

Для тонких пленок InGaAsN, полученных на кремниевых подложках, заметна большая плотность микрокапель на поверхности. Отметим, что при увеличении давления аргоно-азотной газовой смеси от 2 до 10 Па плотность микрокапель индия уменьшилась. Для образца пленки при давлении 2 Па получена наибольшая

плотность микрокапель — $0,26 \text{ мкм}^{-2}$. Наименьшая плотность микрокапель $0,17 \text{ мкм}^{-2}$ отмечена для образца тонкой пленки InGaAsN при давлении 10 Па (рис. 2, c).

Концентрация азота в пленках InGaAsN на Si, полученных при давлениях 2 и 5 Па, составила 1,1 %, в то время как при давлении 10 Па отмечена наибольшая концентрация азота — 1,8 %.

На рис. 3, a изображены спектры комбинационного рассеяния тонких пленок InGaAsN на подложке Si при давлении аргоно-азотной смеси при значениях 2, 5 и 10 Па. На спектрах комбинационного рассеяния наибольшей интенсивностью обладает мода длинноволнового поперечного оптического фона кремниевой подложки LO на частоте 512 см^{-1} . Кроме этого, присутствуют менее интенсивные моды кремния, связанные с поперечными акустическими фоновыми первого

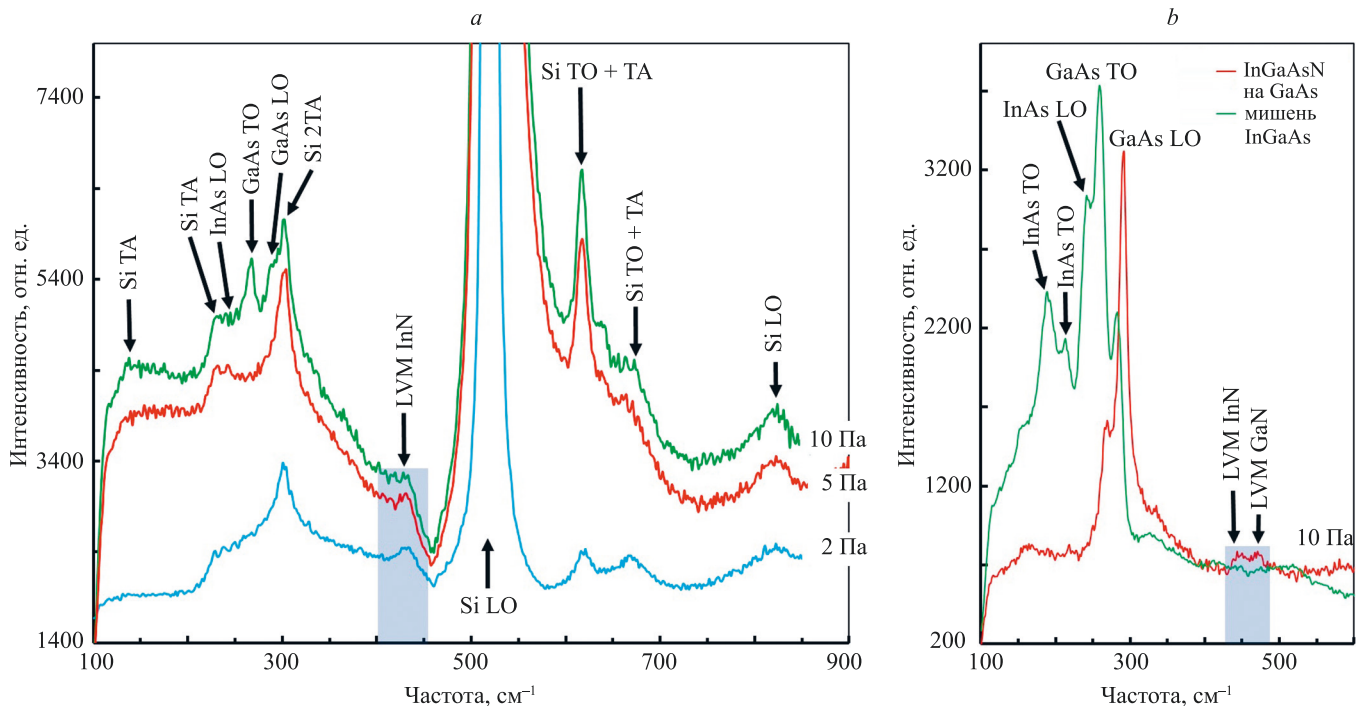


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света: тонких пленок InGaAsN на подложке Si (a), мишени InGaAs и тонкой пленки InGaAsN на подложке GaAs (b), полученные при воздействии давления аргоно-азотной газовой смеси

Fig. 3. Raman spectra of InGaAsN thin films on Si substrates (a), InGaAs target and InGaAsN thin film on GaAs (b), obtained at the pressure of an argon-nitrogen gas mixture

(transverse acoustic) TA на частоте 240 см^{-1} и второго порядков 2TA на частоте 300 см^{-1} , комбинация поперечных оптических (transverse optical, TO) и акустических мод TO + TA наблюдается на частотах 615 см^{-1} и 672 см^{-1} соответственно [11].

На спектрах рис. 3, a идентифицируются продольные LO- и поперечные TO-моды GaAs и InAs [12]. Интенсивность мод LO-InAs, LO-GaAs и TO-GaAs увеличивается при повышении давления аргоно-азотной смеси. Предположительно, это связано с наличием фазовых включений в пленках. Наличие на спектре вибрационной фононной колебательной моды (Local Vibrational Modes, LVM) InN на частоте 430 см^{-1} подтверждает вхождение атомов азота в InGaAs [13]. В связи с низким содержанием азота в пленке интенсивность LVM InN относительно невелика, однако видно, что с ростом давления она возрастает. Полученные данные совпадают с результатами, представленными в работах [14, 15].

На рис. 3, b представлены спектры комбинационного рассеяния мишени $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ и тонкой пленки InGaAsN, полученной при давлении аргоно-азотной смеси 10 Па. На спектрах тонкой пленки InGaAsN хорошо заметны высокоинтенсивные LO-GaAs 291 см^{-1}

и TO-GaAs 283 см^{-1} , связанные с подложкой GaAs. Также можно идентифицировать моду LVM InN второго порядка на частоте 450 см^{-1} и LVM GaN — 470 см^{-1} , возможно они связаны с такими конфигурациями, как In_4N и Ga_4N [16], которые присутствуют в полученной тонкой пленке InGaAsN.

Закключение

Анализируя экспериментальные данные, полученные в рамках настоящей работы, можно сделать вывод, что увеличение давления аргоно-азотной газовой смеси при импульсном лазерном напылении способствует увеличению концентрации азота в тонких пленках InGaAsN на подложке Si. Показано, что концентрация азота в пленках InGaAsN, полученных при давлении 10 Па на подложках GaAs и Si, различается незначительно и составляет 1,9 и 1,8 % соответственно. В спектрах комбинационного рассеяния света тонких пленок обнаружены локальные колебательные моды LVM InN и LVM GaN, что подтверждает наличие азота в тонкой пленке InGaAsN, полученной методом импульсного лазерного напыления.

Литература

References

1. Park Y., Cich M.J., Zhao R., Specht P., Feick H., Weber E.R. AFM study of lattice matched and strained InGaAsN layers on GaAs // *Physica B: Condensed Matter*. 2001. V. 308–310. P. 98–101. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00669-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00669-X)
2. Kim T., Garrod T.J., Kim K., Lee J., Mawst L.J., Kuech T.F., LaLumondiere S.D., Sin Y., Lotshaw W.T., Moss S.C. Characteristics of bulk InGaAsN and InGaAsSbN materials grown by metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE) for solar cell application // *Proceedings of SPIE*. 2012. V. 8256. P. 82561D. <https://doi.org/10.1117/12.906961>
3. Levillayer M., Arnoult A., Massiot I., Duzellier S., Nuns T., Inguimbert C., Aicardi C., Parola S., Carrère H., Balocchi A., Vaissiere N., Decobert J., Almuneau G., Artola L. As-grown InGaAsN subcells for multijunction solar cells by molecular beam epitaxy // *IEEE Journal of Photovoltaics*. 2021. V. 11. N 5. P. 1271–1277. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3093048>
4. Pavelescu E.M., Wagner J., Komsa H.P., Rantala T.T., Dumitrescu M., Pessa M. Nitrogen incorporation into GaInNAs lattice-matched to GaAs: The effects of growth temperature and thermal annealing // *Journal of Applied Physics*. 2005. V. 98. N 8. P. 83524. <https://doi.org/10.1063/1.2112173>
5. Bank S.R., Wistey M.A., Yuen H.B., Goddard L.L., Bae H., Harris J.S. Molecular-beam epitaxy growth of low-threshold cw GaInNAsSb lasers at 1.5 μm // *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2005. V. 23. N 3. P. 1337–1340. <https://doi.org/10.1116/1.1914825>
6. Baranov A.I., Gudovskikh A.S., Kudryashov D.A., Lazarenko A.A., Morozov I.A., Mozharov A.M., Nikitina E.V., Pirogov E.V., Sobolev M.S., Zelentsov K.S., Egorov A.Yu., Darga A., Le Gall S., Kleider J.-P. Defect properties of InGaAsN layers grown as submonolayer digital alloys by molecular beam epitaxy // *Journal of Applied Physics*. 2018. V. 123. N 16. P. 161418. <https://doi.org/10.1063/1.5011371>
7. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S., Kasyanov I.V., Nikulin D.A., Pashchenko O.S. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition // *Thin Solid Films*. 2022. V. 743. P. 139064. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139064>
8. Девицкий О.В., Никулин Д.А., Сысоев И.А. Импульсное лазерное напыление тонких пленок нитрида алюминия на сапфировые подложки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 177–184. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184>
9. Hung W.K., Chern M.Y., Fan J.C., Lin T.Y., Chen Y.F. Pulsed laser deposition of epitaxial GaN_xAs_{1-x} on GaAs // *Applied Physics Letters*. 1999. V. 74. N 26. P. 3951–3953. <https://doi.org/10.1063/1.124234>
10. Девицкий О.В., Санакулов С.О. Численное моделирование функциональных характеристик солнечных элементов на основе гетероструктур InGaAsN/Si // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 2. С. 191–197. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-191-197>
11. Iatsunskiy I., Jurga S., Smyntyna V., Pavlenko M., Myndrul V., Zaleska A. Raman spectroscopy of nanostructured silicon fabricated by metal-assisted chemical etching // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9132. P. 913217. <https://doi.org/10.1117/12.2051489>
12. Chafi A., Pagès O., Postnikov A.V., Gleize J., Sallet V., Rzepka E., Li L.H., Jusserand B., Harmand J.C. Combined Raman study of InGaAsN from the N-impurity and InGaAs-matrix sides // *Applied Physics Letters*. 2007. V. 91. N 5. P. 051910. <https://doi.org/10.1063/1.2767244>
13. Milanova M., Donchev V., Kostov K.L., Alonso-Álvarez D., Valcheva E., Kirilov K., Asenova I., Ivanov I.G., Georgiev S., Ekins-Daukes N. Experimental study of the effect of local atomic ordering on the energy band gap of melt grown InGaAsN alloys // *Semiconductor Science and Technology*. 2017. V. 32. N 8. P. 085005. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa7404>
14. Alt H.C., Gomeniuk Y.V. Local mode frequencies of the NAs–InGa nearest-neighbor pair in (Ga,In)(As,N) alloys // *Physical Review B*. 2004. V. 70. N 16. P. 161314(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161314>
15. Kurtz S., Webb J., Gedvilas L., Friedman D., Geisz J., Olson J., King R., Joslin D., Karam N. Structural changes during annealing of
1. Park Y., Cich M.J., Zhao R., Specht P., Feick H., Weber E.R. AFM study of lattice matched and strained InGaAsN layers on GaAs. *Physica B: Condensed Matter*, 2001, vol. 308–310, pp. 98–101. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00669-X](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00669-X)
2. Kim T., Garrod T.J., Kim K., Lee J., Mawst L.J., Kuech T.F., LaLumondiere S.D., Sin Y., Lotshaw W.T., Moss S.C. Characteristics of bulk InGaAsN and InGaAsSbN materials grown by metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE) for solar cell application. *Proceedings of SPIE*, 2012, vol. 8256, pp. 82561D. <https://doi.org/10.1117/12.906961>
3. Levillayer M., Arnoult A., Massiot I., Duzellier S., Nuns T., Inguimbert C., Aicardi C., Parola S., Carrère H., Balocchi A., Vaissiere N., Decobert J., Almuneau G., Artola L. As-grown InGaAsN subcells for multijunction solar cells by molecular beam epitaxy. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1271–1277. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3093048>
4. Pavelescu E.M., Wagner J., Komsa H.P., Rantala T.T., Dumitrescu M., Pessa M. Nitrogen incorporation into GaInNAs lattice-matched to GaAs: The effects of growth temperature and thermal annealing. *Journal of Applied Physics*, 2005, vol. 98, no. 8, pp. 83524. <https://doi.org/10.1063/1.2112173>
5. Bank S.R., Wistey M.A., Yuen H.B., Goddard L.L., Bae H., Harris J.S. Molecular-beam epitaxy growth of low-threshold cw GaInNAsSb lasers at 1.5 μm . *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2005, vol. 23, no. 3, pp. 1337–1340. <https://doi.org/10.1116/1.1914825>
6. Baranov A.I., Gudovskikh A.S., Kudryashov D.A., Lazarenko A.A., Morozov I.A., Mozharov A.M., Nikitina E.V., Pirogov E.V., Sobolev M.S., Zelentsov K.S., Egorov A.Yu., Darga A., Le Gall S., Kleider J.-P. Defect properties of InGaAsN layers grown as submonolayer digital alloys by molecular beam epitaxy. *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 16, pp. 161418. <https://doi.org/10.1063/1.5011371>
7. Pashchenko A.S., Devitsky O.V., Lunin L.S., Kasyanov I.V., Nikulin D.A., Pashchenko O.S. Structure and morphology of GaInAsP solid solutions on GaAs substrates grown by pulsed laser deposition. *Thin Solid Films*, 2022, vol. 743, pp. 139064. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139064>
8. Devitsky O.V., Nikulin D.A., Sysoev I.A. Pulsed laser deposition of aluminum nitride thin films onto sapphire substrates. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 177–184. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-2-177-184>
9. Hung W.K., Chern M.Y., Fan J.C., Lin T.Y., Chen Y.F. Pulsed laser deposition of epitaxial GaN_xAs_{1-x} on GaAs. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 74, no. 26, pp. 3951–3953. <https://doi.org/10.1063/1.124234>
10. Devitsky O.V., Sanakulov S.O. Numerical simulation of functional characteristics of solar elements InGaAsN/Si. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 191–197. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-191-197>
11. Iatsunskiy I., Jurga S., Smyntyna V., Pavlenko M., Myndrul V., Zaleska A. Raman spectroscopy of nanostructured silicon fabricated by metal-assisted chemical etching. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9132, pp. 913217. <https://doi.org/10.1117/12.2051489>
12. Chafi A., Pagès O., Postnikov A.V., Gleize J., Sallet V., Rzepka E., Li L.H., Jusserand B., Harmand J.C. Combined Raman study of InGaAsN from the N-impurity and InGaAs-matrix sides. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 5, pp. 051910. <https://doi.org/10.1063/1.2767244>
13. Milanova M., Donchev V., Kostov K.L., Alonso-Álvarez D., Valcheva E., Kirilov K., Asenova I., Ivanov I.G., Georgiev S., Ekins-Daukes N. Experimental study of the effect of local atomic ordering on the energy band gap of melt grown InGaAsN alloys. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, vol. 32, no. 8, pp. 085005. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aa7404>
14. Alt H.C., Gomeniuk Y.V. Local mode frequencies of the NAs–InGa nearest-neighbor pair in (Ga,In)(As,N) alloys. *Physical Review B*, 2004, vol. 70, no. 16, pp. 161314(R). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.161314>
15. Kurtz S., Webb J., Gedvilas L., Friedman D., Geisz J., Olson J., King R., Joslin D., Karam N. Structural changes during annealing of

GaInAsN // *Applied Physics Letters*. 2001. V. 78. N 6. P. 748–750. <https://doi.org/10.1063/1.1345819>

16. De La Mare M., Das S.C., Das T.D., Dhar S., Krier A. N incorporation and photoluminescence in In-rich InGaAsN grown on InAs by liquid phase epitaxy // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011. V. 44. N 31. P. 315102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/31/315102>

GaInAsN. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 78, no. 6, pp. 748–750. <https://doi.org/10.1063/1.1345819>

16. De La Mare M., Das S.C., Das T.D., Dhar S., Krier A. N incorporation and photoluminescence in In-rich InGaAsN grown on InAs by liquid phase epitaxy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, vol. 44, no. 31, pp. 315102. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/31/315102>

Автор

Девицкий Олег Васильевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, Ростов-на-Дону, 344006, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, 355017, Российская Федерация,  57193670678, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, v2517@rambler.ru

Author

Oleg V. Devitsky — PhD, Senior Researcher, Federal Research Center the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation; Senior Researcher, North-Caucasus Federal University, Stavropol, 355017, Russian Federation,  57193670678, <https://orcid.org/0000-0003-3153-696X>, v2517@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 22.08.2022
Одобрена после рецензирования 15.09.2022
Принята к печати 09.11.2022

Received 22.08.2022
Approved after reviewing 15.09.2022
Accepted 09.11.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»