Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственный университет, 2021

УДК 621.892

Оригинальная статья

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И СТРУКТУРА ТОНКИХ ПЛЕНОК InGaAsN НА Si

О.В. Девицкий^{1,2}

¹ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук»

344006, Россия, Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

²ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1

v2517@rambler.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.106

Аннотация: Методом импульсного лазерного напыления в атмосфере аргоно-азотной газовой смеси из мишени $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ впервые были получены тонкие пленки InGaAsN на подложках GaAs и Si . Мишень $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$ формировалась методом одноосного прессования из порошков GaAs и InAs . Методами атомно силовой микроскопии и рентгеновской дифракции исследованы морфология поверхности и структура данных тонких пленок. Показано, что пленки $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ на Si имеют средний размер кристалла 0,93 нм, а пленки и $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ на GaAs - 0,99 нм. Определено, что уменьшение давления аргоно-азотной смеси при импульсном лазерном напылении тонких пленок $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ на подложках GaAs и Si приводит к снижению значения среднеквадратичной шероховатости поверхности. Наименьшую среднеквадратическую шероховатость равную 0,25 нм имела тонкая пленка $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ на подложке GaAs , полученная в вакууме, наибольшую среднеквадратическую шероховатость имела тонкая пленка $\text{In}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}_{1-y}\text{N}_y$ на подложке Si , полученная при давления аргоно-азотной смеси от 10 Па - 19,37 нм.

Ключевые слова: InGaAsN , импульсное лазерное напыление, спектры комбинационного рассеяния света, тонкие пленки.

1. Введение

Стремительное развитие методов получения тонких пленок и гетероструктур соединений $\text{A}^3\text{B}^5\text{N}$, которые также принято называть разбавленными нитридами, началось с 2000 года. В первых работах по получению тонких пленок $\text{GaAs}_{1-y}\text{N}_y$ на подложках GaAs сообщалось о вхождении азота в GaAs на уровне около 1–1,5 % [1]. Основными методами получения тонких пленок $\text{A}^3\text{B}^5\text{N}$ считаются молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия [2–4]. В работе [5] методом МОС-гидридной эпитаксии удалось получить тонкие пленки $\text{InGaAsN} / \text{GaAs}$ с максимальной на данный момент времени долей азота - 4%. Также в этой работе было отмечено, что при попытках повышения доли азота в пленках InGaAsN их структурные свойства резко ухудшались. Основной причиной повышенного дефектообразования при увеличении доли азота являются неравновесные условия получения разбавленных

нитридов при относительно низких температурах, которые являются необходимыми для встраивания атомов азота в кристаллическую решетку соединений A^3B^5 . Проблема дефектообразования в тонких пленках разбавленных нитридов является критическим фактором их приборного применения и требует простых и эффективных методов решения [6-8]. Одним из таких способов может стать применение метода импульсного лазерного напыления (ИЛН) для получения тонких пленок A^3B^5N на различных типах подложек [9]. Изменяя долю азота в газовой смеси, давление газовой смеси в камере, плотность энергии лазерного излучения и частоту лазерных импульсов можно получать пленки A^3B^5N с различной концентрации азота. Также необходимо отметить, что увеличение концентрации азота в твердых растворах A^3B^5N сильно изменяет их физические и электрические свойства [10-14]. Интеграция многокомпонентных слоев A^3B^5N с кремниевыми подложками на данный момент является технологически сложным процессом.

В литературных источниках отсутствуют исследования по получению пленок A^3B^5N , и в частности $InGaAsN$, методом ИЛН на подложках Si и $GaAs$. В связи с этим актуальной задачей является исследование влияния параметров ИЛН на структурные свойства и морфологию поверхности тонких пленок $InGaAsN$ на подложках Si и $GaAs$.

Целью данной работы является исследование влияния давления аргоно-азотной смеси при импульсном лазерном напылении на морфологию поверхности тонких пленок $InGaAsN$ подложках Si и $GaAs$.

2. Методика исследований

Схема проведения процесса ИЛН приведена на рис. 1. Лазерное излучение второй гармоники $AYG: Nd^{3+}$ -лазера фокусировалось на поверхности мишени под углом 45° . Частота повторения импульсов составляла 15 Гц, длительность лазерного импульса 15 нс, плотность энергии импульса составляла 2,3 Дж/см². Расстояние от мишени до подложки составляло 50 мм, толщина напыляемых слоев находилась в диапазоне 150–200 нм. Процесс осуществляли при температуре подложки 400 °С. На начальном этапе объем вакуумной камеры откачивался до 10^{-4} Па, после объем камеры изолировался и напускалась смесь особо чистого аргона и азота до необходимого давления. Объемная доля азота в аргоно-азотной газовой смеси составляла 80 %.

Импульсное лазерное напыление проводилось из мишени $In_{0.02}Ga_{0.98}As$ сформированной методом холодного прессования. Для получения шихты мишени рассчитывалась масса порошков $GaAs$ и $InAs$. Сформированная шихта перетиралась в течении двух часов, а потом просеивалась на ситах размером ячейки 20 мкм. Затем при помощи холодный изостатический

пресс ХИП 300×500 – 200 под давлением 207 МПа были сформирована монолитная мишень $In_{0.02}Ga_{0.98}As$.

Импульсное лазерное излучение фокусируется на поверхности вращающейся мишени $In_{0.02}Ga_{0.98}As$, распыляет её в объем вакуумной камеры, в результате чего происходит образование плазменного факела. Плазменный факел состоит из атомов, ионов, кластеров, а также микрокапель индия и галлия. С увеличением количества лазерных импульсов плазменный факел расширяясь достигает поверхности подложки, на поверхности которой происходит образование зародышей и в дальнейшем рост пленки $InGaAsN$.

Для проведения экспериментальных исследований использовались подложки кремния марки КДБ-12, а также $GaAs$ марки АГЧО-1-35а-1 с ориентацией (100), толщиной 390 мкм и размером 15×15 мм.

Рис. 1. Схема импульсного лазерного напыления тонких пленок $InGaAsN$ на Si и $GaAs$: 1 – вращающийся держатель мишени; 2 – мишень $In_{0.02}Ga_{0.98}As$; 3 – кварцевое окно; 4 – плазменный факел; 5 – подложка Si или $GaAs$; 6 – подложкодержатель с нагревателем; 7 – подвод аргоно-азотной газовой смеси; 8 – вакуумная камера.

Исследовалась морфология поверхности образцов тонких пленок, обработка АСМ-изображений заключалась в вычитании поверхности второго порядка, определялись амплитудные или высотными параметры, характеризующие нерегулярности поверхности тонкой пленки в вертикальном направлении.

3. Объект исследований

На рис. 1 приведены представлены АСМ-изображения тонких пленок $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на подложках Si , полученные в вакууме и при

давлении аргоно-азотной смеси в камере 2 Па, 5 Па и 10 Па. Все полученные пленки имели толщину примерно равную 200 нм.

В Таблице 1 приведены основные параметры, рассчитанные для представленных изображений АСМ, которые служат для характеристики морфологии поверхности в вертикальном направлении. Из представленных данных в Таблице 1 и рис. 1 видно, что шероховатость пленок увеличивается с ростом давления аргоно-азотной смеси в камере установки.

Основными параметрами, с помощью которых можно оценить шероховатость поверхности тонкой пленки, являются: Sq (среднеквадратическая шероховатость) и Sa (арифметическая шероховатость). Наименьшую шероховатость имеют тонкие пленки $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на подложках Si , полученные в вакууме ($Sq = 0,39$ нм, $Sa = 0,28$ нм), а наибольшую, те тонкие пленки, которые были получены при давлении аргоно-азотной смеси 10 Па ($Sq = 19,37$ нм, $Sa = 15,64$ нм). С ростом давления аргоно-азотной смеси от 2 Па до 5 Па Sa и Sq увеличивались с 8,42 нм до 9,4 нм и с 10,35 нм до 11,46 нм соответственно.

Рис. 2. АСМ-изображения тонких пленок $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на Si , полученные в вакууме (а), при давлении аргоно-азотной смеси в камере 2 Па (б), 5 Па (в), 10 Па (г).

Максимальная высота рельефа поверхности Sz – это разность высот

между самой высокой и самой низкой точками поверхности исследуемой пленки. Этот амплитудный параметр численно равен толщине поверхностного слоя пленки, то есть слоя пленки, не полностью «заросшего» $InGaAsN$ и в котором происходит изменение морфологии поверхности.

Таблица 1. Статистические параметры тонких пленок $In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y$ на Si .

Параметр	Давление аргоно-азотной смеси			
	вакуум	2 Па	5 Па	10 Па
Среднеквадратическая шероховатость Sq , нм	0,39	10,35	11,46	19,37
Средняя шероховатость Sa , нм	0,28	8,42	9,40	15,64
Максимальная высота Sz , нм	3,71	32,13	29,08	55,23
Максимальная высота пика Sp , нм	3,81	35,49	31,96	60,11
Максимальная глубина впадины Sv , нм	1,63	37,17	33,02	62,37

Для пленки, полученной в вакууме Sz составляло 3,71 нм, для пленок, полученных при давлении 2 Па, 5 Па и 10 Па этот параметр был соответственно равен 32,13 нм, 29,08 нм и 55,32 нм. Таким образом, можно сказать, что толщина поверхностного слоя пленки, полученной в вакууме не превышала 1,3 % от общей толщины пленки, а для пленок, полученных при давлении 2 Па, 5 Па и 10 Па она составляла 10,7 %, 9,6 % и 18,1 % соответственно.

Рис. 3. АСМ-изображения тонкой пленки $In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y$ на $GaAs$, полученной в вакууме в двумерном (а) и трехмерном (б) виде.

На рис. 3 представлено АСМ-изображение тонкой пленки $In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y$ на подложке $GaAs$, полученной в вакууме при аналогичных параметрах ИЛН что и для тонких пленок $In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y$ на Si . Тонкая пленка $In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y$ полученная на подложке $GaAs$ имела

среднеквадратическую шероховатость равную $Sq = 0,25$ нм и среднеарифметическую шероховатость $Sa = 0,19$ нм. Максимальная высота Sz для данной пленки имела величину 3 нм, максимальная высота пика $Sp = 1,33$ нм и максимальной глубине впадины $Sv = 1,66$ нм. Толщина поверхностного слоя пленки составляла 1,15%.

На рис. 4 изображены дифрактограммы тонких пленок $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на Si и $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на $GaAs$. Анализ рефлексов для этих пленок показывает, что их максимум находится на угле 2θ равным $32,97^\circ$. С помощью программного пакета Origin 9 были вычислены значения полной ширины на уровне половины высоты $FWHM$ для $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на Si - $0,1706^\circ$ и $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на $GaAs$ - $0,1618^\circ$.

Рис. 4. Дифрактограммы тонких пленок $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на Si и $GaAs$.

По формуле Шерера [15] был определен размер нанокристаллитов. Расчеты показали, что пленки $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на Si имеют средний размер кристалла 0,93 нм, а пленки $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на $GaAs$ - 0,99 нм.

5. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что тонкие пленки $In_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ полученные методом импульсного лазерного напыления из мишени $In_{0.02}Ga_{0.98}As$ в атмосфере аргона и азота на подложках $GaAs$ и Si имеют нанокристаллическую структуру. Определено, что уменьшение давления аргоно-азотной смеси при импульсном лазерном напылении тонких пленок $In_xGa_{1-x}As_{1-y}N_y$ на подложках $GaAs$ и Si приводит к снижению значения средней арифметической и среднеквадратичной шероховатости поверхности. Наименьшую среднеквадратическую

шероховатость равную 0,25 нм имела тонкая пленка $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на подложке $GaAs$, полученная в вакууме, наибольшую среднеквадратическую шероховатость тонкая пленка $In_{0.02}Ga_{0.98}As_{1-y}N_y$ на подложке Si , полученная при давлении аргоно-азотной смеси от 10 Па - 19,37 нм.

Работа выполнена с использованием Центра коллективного пользования Северо-Кавказского федерального университета (ЦКП СКФУ) и при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0029 (соглашение № 075-15-2021-687) в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра Южного научного центра РАН (номер государственной регистрации АААА-А19-119040390081-2).

Библиографический список:

1. **Sato, Y.** Large spontaneous spin splitting in gate-controlled two-dimensional electron gases at normal $In_{0.75}Ga_{0.25}As / In_{0.75}Al_{0.25}As$ heterojunctions / Y. Sato, T. Kita, S. Gozu et. al. // Journal of Applied Physics. – 2001. – V. 89. – I. 12. – P. 8017-8021. DOI: 10.1063/1.1362356.
2. **Baranov, A.** Defect properties of $InGaAsN$ layers grown as sub-monolayer digital alloys by molecular beam epitaxy / A. Baranov, A. Gudovskikh, D. Kudryashov et. al. // Journal of Applied Physics. – 2018. – V. 123. – I. 16. – P. 161418-1-161418-11. DOI: 10.1063/1.5011371.
3. **Ściana, B.** Impact of gallium concentration in the gas phase on composition of $InGaAsN$ alloys grown by AP-MOVPE correlated with their structural and optical properties / B. Ściana, D. Radziejewicz, W. Dawidowski et. al. // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. – 2019. – V. 30. – I. 17. – P. 16216-16225. DOI: 10.1007/s10854-019-01990-x.
4. **Albo1, A.** Utilizing the interface adsorption of nitrogen for the growth of high-quality $GaInNAs / GaAs$ quantum wells by metal organic chemical vapor deposition for near infrared applications / A. Albo1, C. Cytermann, G. Bahir, D. Fekete // Journal of Applied Physics. – 2010. – V. 96. – I. 14. – P. 141102-1-141102-3. DOI: 10.1063/1.3360216.
5. **Goodrich, J.C.** Band anti-crossing model in dilute- As $GaNAs$ alloys / J.C. Goodrich, D. Borovac, C.-K. Tan, N. Tansu // Scientific Reports. – 2019. – V. 9. – Art. № 5128. – 6 p. DOI: 10.1038/s41598-019-41286-y.
6. **Shan, W.** Band anticrossing in $GaInNAs$ alloys / W. Shan, W. Walukiewicz, J.W. Ager III et. al. // Physical Review Letters. – 1999. – V. 82. – I. 6. – P. 1221-1224. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.1221.
7. **López-Escalante, M.C.** Atomic configurations in AP-MOVPE grown lattice-mismatched $InGaAsN$ films unravelled by X-ray photoelectron spectroscopy combined with bulk and surface characterization techniques / M.C. López-Escalante, B. Ściana, W. Dawidowski et. al. // Applied Surface Science. – 2018. – V. 433. – P. 1-9. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.10.032.
8. **Yonezu, H.** Elemental devices and circuits for monolithic optoelectronic-integrated circuit fabricated in dislocation-free $Si / III-V-N$ alloy layers grown on Si substrate / H. Yonezu // In book: Dilute Nitride Semiconductors. Springer Series in Materials Science. – V. 105; ed. by A. Erol. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – P. 405-418. DOI: 10.1007/978-3-540-74529-7.
9. **Wanarattikan, P.** TEM analysis of planar defects in $InGaAsN$ and $GaAs$ grown on $Ge(001)$ by MOVPE / P. Wanarattikan, S. Sanorpim, S. Denchitharoen et. al. // Key Engineering Materials. – 2016. – V. 675-676. – P. 639-642. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.675-676.639.
10. **Milanova, M.** Structural and electrical characteristics of $InGaAsN$ layers grown by LPE / M. Milanova, P. Vitanov, P. Terziyska et. al. // Journal of Crystal Growth. – 2012. – V. 346. – I. 1. – P. 79-82. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.02.021.
11. **Vitanov, P.** Study of melt-grown $GaAsN$ and $InGaAsN$ epitaxial layers / P. Vitanov, M. Milanova, B. Arnaudov et. al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. – V. 253. – Art. № 012045. – 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/253/1/012045.
12. **Kim, T.W.** 13,2% efficiency double-hetero structure single-junction $InGaAsN$ solar cells grown by

- MOVPE / T.W. Kim, L.J. Mawst, Y. Kim et. al. // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2015. – V. 33. – I. 2. – P. 021205-1-021205-4. DOI: 10.1116/1.4906511.
13. Chafi, A. Combined Raman study of *InGaAsN* from the *N*-impurity and *InGaAs*-matrix sides / A. Chafi, O. Pagès, A.V. Postnikov et. al. // *Applied Physics Letters*. – 2007. – V. 91. – I. 5. – P. 051910-1-051910-3. DOI: 10.1063/1.2767244.
14. Bellil, W. Optimization and comparison between the efficiency of *GaNAsSb* and *GaInNAs* single solar cells deposited on *GaAs* / W. Bellil, A. Aissat, J.P. Vilcot // *Procedia Computer Science*. – 2019. – V. 151. – P. 1028-1033. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.145.
15. Ooi, Z.V. X-ray line profile analysis of *BaTiO₃* thin film prepared by sol-gel deposition / Z.V. Ooi, A.A. Saif, Y. Wahab, Z.A.Z. Jamal // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – V. 1835. – I. 1. – P. 020011-1-020011-5. DOI: 10.1063/1.4981833.

References:

1. Sato Y., Kita T., Gozu S. et al. Large spontaneous spin splitting in gate-controlled two-dimensional electron gases at normal *In_{0.75}Ga_{0.25}As / In_{0.75}Al_{0.25}As* heterojunctions, *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, issue 12, pp. 8017-8021. DOI: 10.1063/1.1362356.
2. Baranov A., Gudovskikh A., Kudryashov D. et al. Defect properties of *InGaAsN* layers grown as sub-monolayer digital alloys by molecular beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, issue 16, pp. 161418-1-161418-11. DOI: 10.1063/1.5011371.
3. Ściana B., Radziejewicz D., Dawidowski W. et al. Impact of gallium concentration in the gas phase on composition of *InGaAsN* alloys grown by AP-MOVPE correlated with their structural and optical properties, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, vol. 30, issue 17, pp. 16216-16225. DOI: 10.1007/s10854-019-01990-x.
4. Albo1 A., Cytermann C., Bahir G., Fekete D. Utilizing the interface adsorption of nitrogen for the growth of high-quality *GaInNAs / GaAs* quantum wells by metal organic chemical vapor deposition for near infrared applications, *Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 96, issue 14, pp. 141102-1-141102-3. DOI: 10.1063/1.3360216.
5. Goodrich J.C., Borovac D., Tan C.-K., Tansu N. Band anti-crossing model in dilute-*As GaNAs* alloys, *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, art. no. 5128, 6 p. DOI: 10.1038/s41598-019-41286-y.
6. Shan W., Walukiewicz W., Ager III J.W. et al. Band anticrossing in *GaInNAs* alloys /, *Physical Review Letters*, 1999, vol. 82, issue 6, pp. 1221-1224. DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.1221.
7. López-Escalante M.C., Ściana B., Dawidowski W. et al. Atomic configurations in AP-MOVPE grown lattice-mismatched *InGaAsN* films unravelled by X-ray photoelectron spectroscopy combined with bulk and surface characterization techniques, *Applied Surface Science*, 2018, vol. 433, pp. 1-9. DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.10.032.
8. Yonezu H. Elemental devices and circuits for monolithic optoelectronic-integrated circuit fabricated in dislocation-free *Si / III – V – N* alloy layers grown on *Si* substrate, *Dilute Nitride Semiconductors. Springer Series in Materials Science*, vol. 105, ed. by A. Erol. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008, pp. 405-418. DOI: 10.1007/978-3-540-74529-7.
9. Wanarattikan P., Sanorpim S., Denchitharoen S. et. al. TEM analysis of planar defects in *InGaAsN* and *GaAs* grown on *Ge(001)* by MOVPE, *Key Engineering Materials*, 2016, vol. 675-676, pp. 639-642. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.675-676.639.
10. Milanova M., Vitanov P., Terziyska P. et al. Structural and electrical characteristics of *InGaAsN* layers grown by LPE, *Journal of Crystal Growth*, 2012, vol. 346, issue 1, pp. 79-82. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.02.021.
11. Vitanov P., Milanova M., Arnaudov B. et. al. Study of melt-grown *GaAsN* and *InGaAsN* epitaxial layers, *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 253, art. no. 012045, 6 p. DOI: 10.1088/1742-6596/253/1/012045.
12. Kim T.W., Mawst L.J., Kim Y., et al. 13,2% efficiency double-hetero structure single-junction *InGaAsN* solar cells grown by MOVPE, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2015, vol. 33, issue 2, pp. 021205-1-021205-4. DOI: 10.1116/1.4906511.
13. Chafi A., Pagès O., Postnikov A.V. et al. Combined Raman study of *InGaAsN* from the *N*-impurity and *InGaAs*-matrix sides, *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, issue 5, pp. 051910-1-051910-3. DOI: 10.1063/1.2767244.
14. Bellil W., Aissat A., Vilcot J.P. Optimization and comparison between the efficiency of *GaNAsSb* and

GaInNAs single solar cells deposited on *GaAs*, *Applied Physics Letters*, 2019, vol. 151, pp. 1028-1033. DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.145.

15. Ooi Z.V., Saif A.A., Wahab Y., Jamal Z.A.Z. X-ray line profile analysis of *BaTiO₃* thin film prepared by sol-gel deposition, *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1835, issue 1, pp. 020011-1-020011-5. DOI:10.1063/1.4981833.

Original paper

ROUGHNESS AND STRUCTURE OF *InGaAsN* THIN FILMS ON *Si*

O.V. Devitskiy^{1,2}

¹*Federal Research Centre The Southern Scientific Centre of The Russian Academy of Sciences,
Rostov-on-Don, Russia*

²*North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.106

Abstract: By the method of pulsed laser deposition in atmosphere of an argon-nitrogen gas mixture, for the first time thin *InGaAsN* films on *GaAs* and *Si* substrates were obtained from the *In_{0,02}Ga_{0,98}As* target. The *In_{0,02}Ga_{0,98}As* target was formed by uniaxial pressing from *GaAs* and *InAs* powders. The surface morphology and structure of these thin films are studied by atomic force microscopy and X-ray diffraction. It is shown that *In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y* films on *Si* have an average crystal size of 0,93 nm, and *In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y* films on *GaAs* of 0,99 nm. It is determined that a decrease in the pressure of an argon-nitrogen mixture during pulsed laser deposition of thin *In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y* films on *GaAs* and *Si* substrates leads to a decrease in the value of the root-mean-square roughness of the surface. The smallest root-mean-square roughness equal to 0,25 nm had a thin *In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y* film on a *GaAs* substrate obtained in vacuum, the largest root-mean-square roughness of 19,37 nm had a thin *In_{0,02}Ga_{0,98}As_{1-y}N_y* film on a *Si* substrate obtained at the argon-nitrogen mixture pressure of 10 Pa -.

Keywords: *InGaAsN*, pulsed laser deposition, Raman spectra, thin films.

Девецкий Олег Васильевич – к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физики и технологии полупроводниковых наногетероструктур для СВЧ-электроники и фотоники ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник научно-образовательного центра фотовольтаики и нанотехнологии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Oleg V. Devitskiy – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Physics and Technology of Semiconductor Nanoheterostructures for Microwave Electronics and Photonics, Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Senior Researcher, Scientific and Educational Center for Photovoltaics and Nanotechnology North-Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 29.08.2021; после рецензирования/revised: 25.09.2021; принята/accepted 02.10.2021.