

21. Malaver A., Motta N., Corke P., and Gonzalez F. Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases, *Sensors*, Feb. 2015, Vol. 15, No. 2, pp. 4072-4096.
22. Galkin B., Kibilda J., and DaSilva L.A. UAVs as mobile infrastructure: Addressing battery lifetime, *IEEE Commun. Mag.*, Jun. 2019, Vol. 57, No. 6, pp. 132-137.
23. Burlaka V.V., Gulakov S.V., Golovin A.Yu., Mironenko D.S. Sistema besprovodnoy peredachi elektricheskoy energii [Wireless electric power transmission system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2023, No. 5 (235), pp. 174-182.
24. Moghaddam Farzan A. and Van den Bossche A. A single transformer for active cell equalization method of lithium-ion batteries with two times fewer secondaries than cells, *Electronics*, 2019, Vol. 8, No. 9, Art. no. 951.

Бурлака Владимир Владимирович – ФГБОУ ВО "ПГТУ"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; г. Мариуполь, Россия; тел.: +79497048603; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; доцент; директор центра.

Гулаков Сергей Владимирович – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; тел.: +79497298638; научно-технический центр силовой электроники; д.т.н.; профессор.

Головин Андрей Юрьевич – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; тел.: +79497128054; научно-технический центр силовой электроники; мл. науч. сотрудник.

Мироненко Дмитрий Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: 89885153109; кафедра математического обеспечения и применения ЭВМ; к.т.н.; доцент.

Burlaka Vladimir Vladimirovich – FSBEI of HE "PSTU"; e-mail: vburlaka@rambler.ru; Mariupol, Russia; phone: +79497048603; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; associate professor; director of the center.

Gulakov Sergey Vladimirovich – e-mail: gulakov.s.v@yandex.ru; phone: +79497298638; Scientific and Technical Center for Power Electronics; dr. of eng. sc.; professor.

Golovin Andrey Yurievich – e-mail: a.golovin@tms-2022.ru; phone: +79497128054; Scientific and Technical Center for Power Electronics; research associate.

Mironenko Dmitrii Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: mironenko.d.s@yandex.ru; Taganrog, Russia; phone: +79885153109; the department of software engineering; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 620.3

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-273-280

Е.А. Лахина, Н.Е. Черненко, Н.А. Шандыба, С.В. Балакирев, М.С. Солодовник
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ОТЖИГА ПОДЛОЖКИ GaAs(111)
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАНОУГЛУБЛЕНИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ
ФОКУСИРОВАННЫМИ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ВРЕМЕНИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов формирования углублений методом фокусированных ионных пучков на подложках GaAs(111) и их последующей трансформации в процессе отжига в сверхвысоковакуумной камере молекулярно-лучевой эпитаксии в потоке мышьяка и в его отсутствие. Установлено, что при времени воздействия ионного пучка, равного 1 мс, процессы накопления ионов в подложке преобладают над процессами распыления материала, тогда как при времени, равном 5 мс, происходит интенсивное распыление материала подложки в точках воздействия ионного пучка с увеличением глубины вытравливаемых участков при повышении числа проходов. После отжига подложек с участками, модифицированными фокусированным ионным пучком, углубления значительно увеличиваются в размерах в результате процессов локального капельного травления. Исследования показали, что размеры углублений после отжига в потоке мышьяка превышают размеры углублений после отжига в отсутствие потока

мышьяка почти во всем диапазоне чисел проходов ионного пучка. Зависимости глубины и латерального размера углублений от числа проходов ионного пучка имеют немонотонный характер, обусловленный конкуренцией процессов капельного травления и кристаллизации областей, модифицированных ионным пучком, в потоке мышьяка. Результаты проведенных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что для получения высокосимметричных пирамидальных углублений с низкой поверхностной плотностью требуется создание на поверхности GaAs(111) массива точек обработки фокусированного ионного пучка с интервалом 2 мкм при времени воздействия 5 мс и количестве проходов, равном 40. На следующем этапе необходима трансформация точек обработки ионного пучка в углубления пирамидальной формы посредством отжига подложки в камере молекулярно-лучевой эпитаксии при температуре 600°C и временном интервале 60 минут. Предложенная в работе методика, основанная на комбинации процессов ионно-лучевой обработки поверхности и молекулярно-лучевой эпитаксии, позволяет получить наноуглубления с требуемой симметрией, которые в дальнейшем могут служить центрами зарождения квантовых точек InAs с заданными свойствами.

Нанотехнологии; наноструктуры; наноматериалы; полупроводники; молекулярно-лучевая эпитаксия; арсенид галлия; поток мышьяка; фокусированный ионный пучок; отжиг; GaAs(111).

E.A. Lakhina, N.E. Chernenko, N.A. Shandyba, S.V. Balakirev, M.S. Solodovnik

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANNEALING MODES OF THE GAAS(111) SURFACE ON THE CHARACTERISTICS OF NANOHOLES FORMED BY FOCUSED ION BEAMS AT VARIOUS EXPOSURE TIMES

The paper presents the results of experimental studies of the processes of formation of holes by the method of focused ion beams on GaAs(111) substrates and their subsequent transformation during annealing in an ultrahigh vacuum chamber of molecular beam epitaxy in an arsenic flux and in its absence. It was found that at an ion beam exposure time of 1 ms, the processes of ion accumulation in the substrate prevail over the processes of the material sputtering, whereas at an exposure time of 5 ms, intensive sputtering of the substrate material occurs at the points of exposure to the ion beam with an increase in the depth of the etched areas with an increase in the number of ion beam passes. After annealing of substrates with ion beam-modified areas, the holes increase significantly in size as a result of local droplet etching processes. Studies showed that the hole size after annealing in the arsenic flux exceeds the hole size after annealing in the absence of an arsenic flux in almost the entire range of the number of ion beam passes. The dependences of the depth and lateral size of the holes on the number of ion beam passes are non-monotonic, due to the competition of the processes of droplet etching and crystallization of ion beam-modified areas in the arsenic flux. The results of experimental studies show that to obtain highly symmetric pyramidal holes with low surface density, it is required to create on the GaAs(111) surface an array of focused ion beam treatment points with an interval of 2 μm at an exposure time of 5 ms and a number of passes equal to 40. At the next stage, it is necessary to transform the ion beam processing points into pyramidal-shaped holes by annealing the substrate in a molecular beam epitaxy chamber at a temperature of 600°C and a time interval of 60 minutes. The technique proposed in this work, based on the combination of ion-beam surface treatment and molecular beam epitaxy, makes it possible to obtain nanoholes with the required symmetry, which can further serve as nucleation centers for InAs quantum dots with the desired properties.

Nanotechnology; nanostructures; nanomaterials; semiconductors; molecular beam epitaxy; gallium arsenide; arsenic flux; focused ion beam; annealing; GaAs(111).

Введение. Актуальность исследования геометрических характеристик углублений, сформированных с применением методик фокусированных ионных пучков (ФИП) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), связана с источниками одиночных и запутанных фотонов [1, 2] и обусловлена потенциалом квантовых точек (КТ), которые могут быть сформированы в углублениях и в дальнейшем использованы в сферах квантовой коммуникации и вычислений [3, 4]. Примечательно, что КТ с симметрией C_{3v} , выращиваемые на подложках GaAs с ориентацией (111) [5, 6], обладают минимальным расщеплением тонкой структуры, позволяющим повысить эффективность генерации запутанных фотонных пар [7–9]. Ключевые свойства КТ зависят от точности эпитаксиальной технологии, требующей понимания физических процессов, сопутствующих росту [10, 11]. Не менее важен выбор способа предварительной модификации поверхности. Традицион-

ная фотолитография не позволяет обеспечить высокое разрешение структурирования поверхности и имеет трудности в совмещении фотошаблона и образца [12]. Электронно-лучевая литография обладает более высоким разрешением, однако отличается очень низкой производительностью [13, 14]. При этом при использовании обоих методов поверхность будет химически загрязнена, что негативно сказывается на свойствах КТ. В то же время метод ФИП позволяет с высокой точностью регулировать начальные параметры углублений, в которых возможно дальнейшее формирование КТ, а также исключает наличие химических реагентов в технологическом процессе. Этот подход, в комбинации с МЛЭ, может применяться для самоорганизации высокоупорядоченных КТ InAs, обеспечивая при этом их высокое оптическое качество.

Анализ данных по воздействию на структуру обработки ионными пучками с последующим восстановлением в разных условиях МЛЭ в литературе отсутствует несмотря на увеличивающийся интерес к поверхности с ориентацией (111) [15, 16]. В данной работе проводится исследование влияния режимов локального капельного травления при отжиге подложек GaAs(111) на изменение формы и размера наноглублений, предварительно сформированных ФИП. В частности, проводится анализ изменения характеристик углублений после ионной модификации, которые зависят от количества проходов ионного пучка и времени его воздействия на поверхность, а также отжига в камере МЛЭ при различных параметрах.

Описание эксперимента. В начале эксперимента поверхность подложки подверглась воздействию ФИП, которым оснащен растровый электронный микроскоп (РЭМ) Nova NanoLab 600, при ускоряющем напряжении 5 кВ и различном времени воздействия ионов Ga^+ на поверхность подложки GaAs(111): 1 мс и 5 мс. Размер модифицированной области составил 5×5 мкм, при этом расстояние между сформировавшимися углублениями 2 мкм, а количество проходов ионного пучка (N) изменялось от 1 до 60. Данным методом были получены образцы, которые в дальнейшем были помещены в камеру МЛЭ SemiTEq STE35, оснащенную источниками III и V группы [17, 18]. Образец 1 отжигался в камере МЛЭ в отсутствие потока мышьяка до начала схода естественного окисла, образец 2 – в потоке мышьяка до начала схода окисла, после чего каждый из образцов отжигался в потоке мышьяка при температуре $600^\circ C$ и временном интервале в 60 минут. Полученные образцы были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-MDT NTeгра в полуконтактном режиме.

Результаты и обсуждение. В ходе проведенного исследования были получены данные о состоянии модифицированной поверхности GaAs(111). По результатам АСМ-исследования выявлено, что форма углублений до отжига практически не изменяется при изменении N и времени воздействия ионного пучка (рис. 1). На рис. 1 видно, что с увеличением времени воздействия ионного пучка увеличивается глубина наноглублений. Также при повышении времени воздействия с 1 до 5 мс на поверхности появляется ярко выраженный ореол вокруг углублений (рис. 1,б). Ореол образуется в результате накопления ионов и перераспределения материала подложки во время ФИП-обработки. Также на АСМ-изображениях поверхности, полученной в результате ФИП-обработки без последующего отжига видны светлые области в виде частиц (рис. 1а,б), которые образуются в результате скайбирования подложки GaAs.

При увеличении N до 40 наблюдается увеличение глубины (рис. 2): для $N=10$ и $N=40$ максимальная глубина имеет значение 1,8 и 7,3 нм соответственно. Стоит также отметить, что латеральный размер увеличивается с увеличением времени воздействия с 1 мс до 5 мс и с увеличением N (рис. 2,в). При времени воздействия 1 мс в точках воздействия ФИП наблюдаются возвышения, окруженные узким ореолом (рис. 2,а), тогда как при 5 мс в точках воздействия формируются углубления без возвышений (рис. 2,б). Несмотря на то, что и время воздействия пучка, и число проходов увеличивают дозу ионного облучения, в случае 1 мс материал накапливается в точках воздействия с увеличением числа проходов, тогда как в случае 5 мс материал распыляется, образуя углубления. Следовательно, для обеспечения высокой степени распыления материала и его преобладания перед накоплением необходимо непрерывное воздействие ФИП в течение 5 мс для каждого прохода пучка.

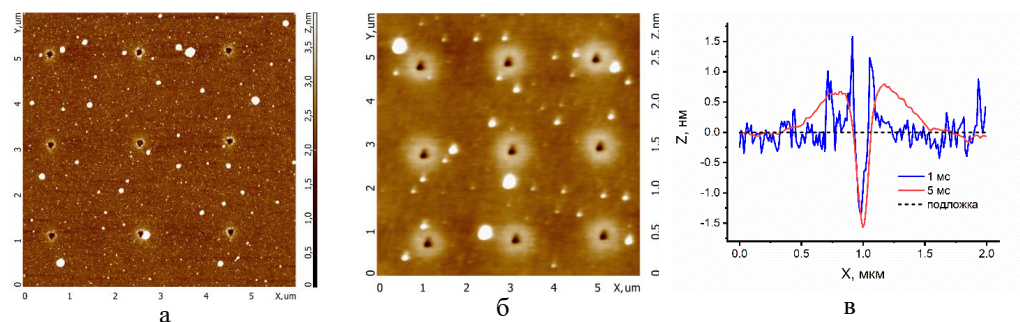


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации до отжига при количестве проходов ионного пучка $N=10$ при времени воздействия 1 мс (а) и 5 мс (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

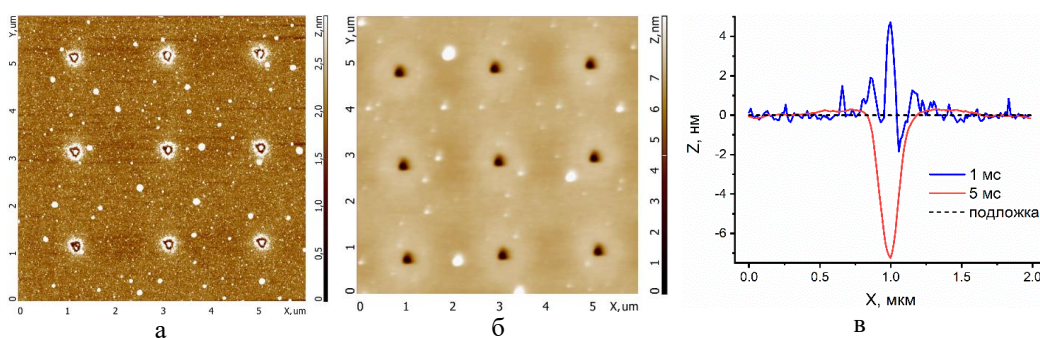


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации до отжига при количестве проходов ионного пучка $N=40$ при времени воздействия 1 мс (а) и 5 мс (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

АСМ-исследования поверхности ФИП-модифицированной подложки, подверженной отжигу в камере МЛЭ, показали, что поверхность за пределами областей модификации стала гладкой без видимых дефектов (рис. 3, а, б). Углубления приобрели форму равностороннего треугольника, что связано с кристаллографической ориентацией подложки GaAs(111) [19–21].

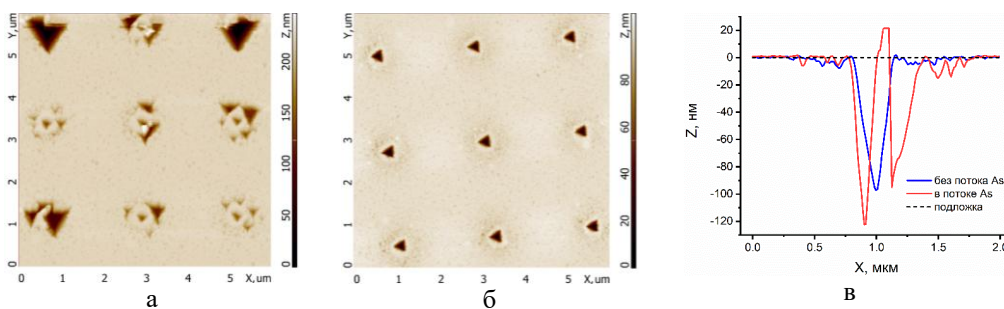


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации при количестве проходов ионного пучка $N=10$ при времени воздействия 5 мс после отжига в потоке мышьяка (а) и без потока мышьяка (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

Как видно из рис. 3, на образце, полученном в присутствии потока As, углубления не имеют четкой формы, что связано с процессами кристаллизации и перераспределения материала. При $N=10$ для образца 2 и образца 1 максимальная глубина имеет значение 122,1 и

97,2 нм соответственно. С увеличением N до 40 уменьшилась глубина нанougлублений (рис. 4,в), которая теперь становится равной 99 нм для образцов 1 и 2. Латеральный размер полученных углублений на 70 нм больше для образца 1 и равен 0,45 мкм. Следует также отметить, что при увеличении N все углубления приобрели форму равностороннего треугольника.

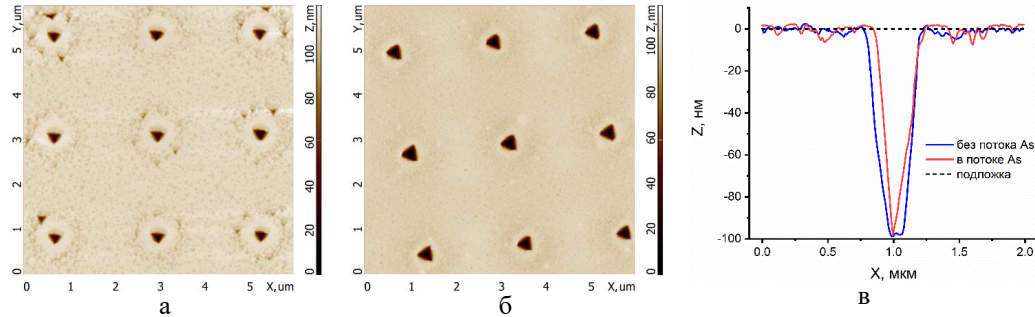


Рис. 4. АСМ-изображения поверхности образца после ФИП-модификации при количестве проходов ионного пучка $N=40$ при времени воздействия 5 мс после отжига в потоке мышьяка (а) и без потока мышьяка (б); профили центральных углублений относительно уровня подложки (в)

Для оценки влияния количества проходов и времени воздействия на изменение параметров углублений, были построены зависимости их глубины и латерального размера углублений от количества проходов ионного пучка (рис. 5). Из анализа полученных графиков следует, что как глубина, так и латеральный размер углублений при отжиге в потоке мышьяка достигают максимума при 5 проходах ФИП в случае времени воздействия 5 мс и при 30 проходах в случае 1 мс (рис. 5,б).

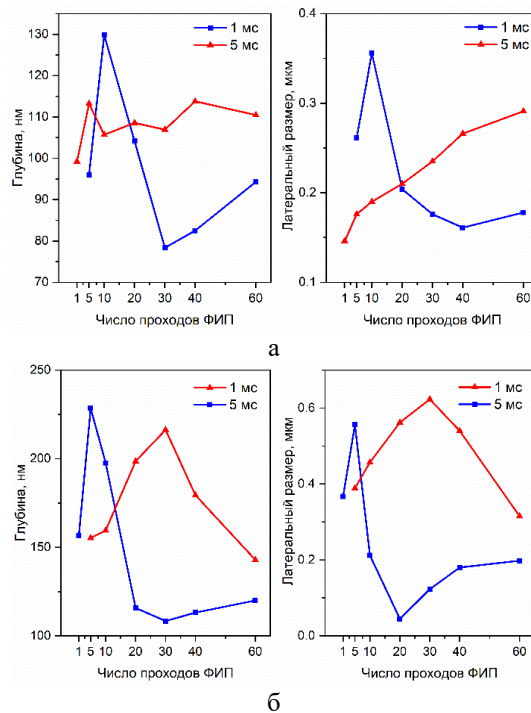


Рис. 5. Зависимости диаметра и латерального размера углублений от количества проходов ионного пучка для образцов, полученных после отжига в отсутствие потока мышьяка (а) и в присутствии потока мышьяка (б) при различном времени взаимодействия: 1 мс и 5 мс

В диапазоне от 20 до 60 проходов ФИП глубина и латеральный размер углублений выше при 1 мс, что связано со снижением дозы ионного облучения и объема материала, который в случае 5 мс задерживается в областях воздействия ФИП и снижает размеры углублений (рис. 5,б). При отжиге в отсутствие потока мышьяка ситуация несколько иная: при 1 мс максимум достигается при 10 проходах ФИП, а в диапазоне от 20 до 60 проходов значения и глубины и латерального размера углублений при 5 мс превышают значения при 1 мс несмотря на большую дозу ионного облучения (рис. 5,а). Данное поведение связано с меньшей интенсивностью локального капельного травления в случае отжига в отсутствие потока мышьяка. В то же время, в потоке мышьяка интенсивность травления ФИП-модифицированных участков возрастает за счет усиления диффузии атомов галлия из области воздействия ФИП. В свою очередь, этот процесс конкурирует с кристаллизацией скоплений галлия в потоке мышьяка, приводящей к увеличению объема материала в области воздействия ФИП и соответствующему снижению глубины и латерального размера конечных углублений, объясняющему немонотонность зависимостей, представленных на рис. 5. Степень преобладания одного процесса над другим в данном случае зависит как от потока мышьяка, так и от температуры, при которой происходит термический срыв окисла. В связи с тем, что в присутствии потока мышьяка сход окисла происходит при более высокой температуре, чем в его отсутствие, отток атомов галлия из-под оксидного слоя, покрывающего ФИП-модифицированный участок, происходит на протяжении большего времени, что объясняет увеличение размеров углублений, полученных в результате отжига в потоке мышьяка (рис. 5). Однако увеличение латерального размера углубления приводит к повышению вероятности срыва окисла в области воздействия ФИП, что при больших числах проходов ионного пучка приводит к снижению времени начала кристаллизации капель галлия и соответствующему снижению глубины и латерального размера углублений. Следовательно, в случае отжига в потоке мышьяка зависимость размеров углублений от числа проходов ФИП имеет ярко выраженный пик (рис. 5,б), в то время как в случае отжига в его отсутствие зависимость имеет более монотонный характер (рис. 5,а).

Выводы. В результате проведенных исследований было установлено, что поток мышьяка во время отжига подложки GaAs(111) оказывает значительное влияние на морфологию наноглублений, получаемых методом ФИП. Так, в потоке мышьяка возможно получение углублений большего латерального размера и глубины, чем в его отсутствие. Оптимальными параметрами для получения углублений с низкой поверхностной плотностью является предварительная обработка поверхности методом ФИП при расстоянии между углублениями 2 мкм, времени воздействия 5 мс и количестве проходов ионного пучка, равном 40. На следующем этапе необходимо проведение отжига подложки в камере МЛЭ для получения высокосимметричных наноглублений при температуре 600°C и временном интервале 60 минут. Таким образом, предложенная в работе методика, основанная на комбинации ФИП-обработки поверхности и метода МЛЭ, позволяет получить наноглубления с требуемой симметрией, которые в дальнейшем могут служить центрами зарождения КТ InAs с заданными свойствами.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10313, <https://rscf.ru/project/23-79-10313/>, в Южном федеральном университете.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Valeri M., Barigelli P., Polacchi B., Rodari G., Santis G., Giordan T., Carvacho G., Spagnolo N., Sciarrino F. Generation and characterization of polarization-entangled states using quantum dot single-photon sources, *Quantum Sci. Technol.*, 2024, Vol. 9 (2), pp. 025002.
2. da Silva S.F.C., Undeutsch G., Lehner B., Manna S., Krieger T., Reindl M., Schimpf C., Trotta R., Rastelli A. GaAs quantum dots grown by droplet etching epitaxy as quantum light sources, *Applied Physics Letters*. AIP Publishing LLC, 2021, Vol. 119 (12), pp. 120502.
3. Ahmadi A., Fognini A., E. Reimer M. Toward On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs with a Quantum Dot, *Recent Advances in Nanophotonics - Fundamentals and Applications*. IntechOpen, 2020.

4. Vajner D.A., Holewa P., Zięba-Ostój E., Wasiluk M., von Helversen M., Sakanas A., Huck A., Yvind K., Gregersen N., Musiał A., Syperek M., Semenova E., Heindel T. On-Demand Generation of Indistinguishable Photons in the Telecom C-Band Using Quantum Dot Devices, *ACS Photonics*, 2024, Vol. 11 (2), pp. 339-347.
5. Zeuner K.D., Jöns K.D., Schweickert L., Reuterskiöld Hedlund C., Nuñez Lobato C., Lettner T., Wang K., Gyger S., Schöll E., Steinhauer S., Hammar M., Zwiller V. On-Demand Generation of Entangled Photon Pairs in the Telecom C-Band with InAs Quantum Dots, *ACS Photonics*, 2021, Vol. 8 (8), pp. 2337-2344.
6. von Helversen M., Haisler A.V., Daurtsev M.P., Dmitriev D.V., Toropov A.I., Rodt S., Haisler V.A., Derebezov I.A., Reitzenstein S. Triggered Single-Photon Emission of Resonantly Excited Quantum Dots Grown on (111)B GaAs Substrate, *Phys. status solidi – Rapid Res. Lett.*, 2022, Vol. 16 (8).
7. Tuktamyshev A., Fedorov A., Bietti S., Vichi S., Zeuner K. D., Jöns K. D., Chrastina D., Tsukamoto S., Zwiller V., Gurioli M., Sanguinetti S. Telecom-wavelength InAs QDs with low fine structure splitting grown by droplet epitaxy on GaAs(111)A vicinal substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 2021, Vol. 118 (13).
8. Zieliński M. Vanishing fine structure splitting in highly asymmetric InAs/InP quantum dots without wetting layer, *Sci. Rep.*, 2020, Vol. 10, pp. 13542.
9. Świdorski M., Zieliński M. Electric field tuning of excitonic fine-structure splitting in asymmetric InAs/InP nanowire quantum dot molecules, *Phys. Rev. B*, 2019, Vol. 100, pp. 235417.
10. Pelucchi E. On the multifaceted journey for the invention of epitaxial quantum dots, *Prog. Cryst. Growth Charact. Mater.*, 2023, Vol. 69 (2–4), pp. 100603.
11. Lozano M.S., Gómez V.J. Epitaxial growth of crystal phase quantum dots in III–V semiconductor nanowires, *Nanoscale Adv.*, 2023, Vol. 5(7), pp. 1890-1909.
12. Nishimura Y. et al. Photolithography, *Flat Panel Display Manufacturing*. Wiley, 2018, pp. 287-310.
13. Pease R.F.W. Electron beam lithography, *Contemp. Phys.*, 1981, Vol. 22 (3), pp. 265-290.
14. Chen Y. Nanofabrication by electron beam lithography and its applications: A review, *Microelectron. Eng.*, 2015, Vol. 135, pp. 57-72.
15. Mano T., Ohtake A., Kuroda T. Lattice-Mismatched Epitaxy of InAs on (111)A-Oriented Substrate: Metamorphic Layer Growth and Self-Assembly of Quantum Dots, *Phys. status solidi*, 2024.
16. Schliwa A. et al. In(Ga)As/GaAs quantum dots grown on a (111) surface as ideal sources of entangled photon pairs, *Phys. Rev. B*, 2009, Vol. 80 (16), pp. 161307.
17. Balakirev S.V., Solodovnik M.S., Eremenko M.M., Chernenko N.E., Ageev O.A. Anomalous behavior of In adatoms during droplet epitaxy on the AlGaAs surfaces, *Nanotechnology*, 2020, Vol. 31 (48), pp. 485604.
18. Balakirev S.V., Solodovnik M.S., Ageev O.A. Hybrid Analytical-Monte Carlo Model of In/GaAs(001) Droplet Epitaxy: Theory and Experiment, *Phys. status solidi*, 2018, Vol. 255 (4), pp. 1700360.
19. Xu H.Y. Effects of annealing and substrate orientation on epitaxial growth of GaAs on Si, *J. Appl. Phys.*, 2009, Vol. 106 (8).
20. Vina L., Wang W.I. AlGaAs/GaAs(111) heterostructures grown by molecular beam epitaxy, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, Vol. 48 (1), pp. 36-37.
21. Schowalter L.J., Yang K., Thundat T. Atomic step organization in homoepitaxial growth on GaAs(111)B substrates, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 12, pp. 2579-2583.

Лахина Екатерина Александровна – Южный федеральный университет; e-mail: lakhina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; техник-проектировщик.

Черненко Наталия Евгеньевна – e-mail: nchernenko@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; м.н.с.

Шандыба Никита Андреевич – e-mail: shandyba@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; м.н.с.

Балакирев Сергей Вячеславович – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Солодовник Максим Сергеевич – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; тел.: +78634371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

Lakhina Ekaterina Alexandrovna – Southern Federal University; e-mail: lakhina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; technician designer.

Chernenko Natalia Evgenyevna – e-mail: nchernenko@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; junior research assistant.

Shandyba Nikita Andreyevich – e-mail: shandyba@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; junior research assistant.

Balakirev Sergey Vyacheslavovich – e-mail: sbalakirev@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Solodovnik Maxim Sergeevich – e-mail: solodovnikms@sfedu.ru; phone: +78634371611; the Department of Nanotechnologies and Microsystems; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.31

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-280-291

А.В. Юдин, Ю.И. Юрасов, О.А. Беляк, П.С. Пляка, М.И. Толстунов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМОЛ
ДЛЯ DLP 3D ПЕЧАТИ С ДОБАВКАМИ ПОРОШКОВ Al_2O_3 И ЦТС-19**

Расширение спектра материалов, доступных для обработки аддитивными методами, представляет большой интерес для промышленности. Технологии, такие как 3D печать полимерами, значительно раздвигают границы возможностей при проектировании, позволяя совершить переход к устройствам нового поколения. В виду постепенного внедрения таких подходов на практике, новый импульс развития получило направление метаматериалов – объемных структур, геометрия которых позволяет более полно использовать свойства базового материала. В частности, керамики, распространенные в современной электронной технике, могут быть введены в формуемый аддитивным способом полимер в качестве функциональной добавки. Последующая термическая обработка таких составов позволяет получить макроструктурированный керамо-полимерный или чисто керамический каркас с уникальными пьезо- или диэлектрическими свойствами. Однако, частицы добавки могут значительно изменять технологические свойства базового материала, что необходимо учитывать. При этом вычленение эмпирических признаков, характеризующих эту динамику, является нетривиальной задачей. Так, в публикациях по УФ-отверждаемым композитам в качестве ведущего признака признается критерий вязкости состава. В то же время оптическая прозрачность, определяющая потребную мощность оборудования, не рассматривается должным образом. В этой связи в представленной работе проведено исследование вязкостных, диэлектрических, оптических и температурных свойств композитов на основе УФ-отверждаемой смолы для DLP 3D печати, содержащих добавки 5 об. % порошков Al_2O_3 и ЦТС-19. Представлен метод качественного экспресс-анализа технологической пригодности состава, основанный на скотч-тесте. Показано, что вязкость состава менее значима в сравнении с его оптической прозрачностью в УФ-диапазоне. Рассмотренные составы обладают температурной стабильностью вплоть до 300 °C. Введение порошковых добавок позволяет в 2,5 раза увеличить показатель диэлектрической проницаемости ϵ'/ϵ_0 и снизить диэлектрические потери в материале при его нагреве выше 110 °C. Показано, что композиты, содержащие оксид алюминия обладают потенциалом для применения в электронике.

Оксид алюминия Al_2O_3 ; ЦТС-19; 3D печать; аддитивные технологии; композитные материалы; диэлектрическая спектроскопия.

A.V. Yudin, Yu.I. Yurasov, O.A. Belyak, P.S. Plyaka, M.I. Tolstunov

**TECHNOLOGICAL AND DIELECTRIC PROPERTIES OF RESINS
FOR DLP 3D PRINTING WITH ADDITIVES OF Al_2O_3 AND CTS-19 POWDERS**

Expanding the range of materials available for processing by additive methods is of great interest to industry. Technologies such as 3D polymer printing significantly expand the boundaries of design capabilities, allowing a transition to next-generation devices. In view of the gradual implementation of such approaches in practice, a new impetus for development has been given to the direction of metamaterials - volumetric structures whose geometry allows for more complete use of the properties of the base material. In particular, ceramics, common in modern electronics, can be introduced into a polymer molded by an additive method as a functional additive. Subsequent heat treatment of such compositions allows obtaining