

06
Процессы абляции и роста структур при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на поверхность галлия в среде аммиака

© Д.А. Кочуев, А.С. Черников, Д.В. Абрамов, А.А. Вознесенская, Р.В. Чкалов, К.С. Хорьков

Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
600000 Владимир, Россия
e-mail: khorkov@vlsu.ru

Поступило в Редакцию 17 января 2023 г.

В окончательной редакции 17 января 2023 г.

Принято к публикации 17 января 2023 г.

Представлены результаты обработки металлического галлия в среде паров аммиака при давлении 2 bar фемтосекундными лазерными импульсами. Рассмотрено влияние концентрации аммиака и режима сканирования лазерным лучом на результат лазерного воздействия. Установлено, что повышение концентрации паров аммиака и изменение режима сканирования приводит к радикальному изменению процесса лазерной абляции. Уменьшение скорости сканирования приводит к остановке процесса абляции и развитию процесса нитридации поверхности галлия, сопровождающиеся формированием столбчатых структур длиной до 12 nm и диаметром порядка 100 μm. Полученные наночастицы и структуры исследованы с помощью растровой электронной микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния, рентгеноструктурного анализа.

Ключевые слова: лазерная абляция, нитрид галлия, получение наночастиц нитрида галлия, абляционный синтез наночастиц нитрида галлия.

DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55034.4-23

Введение

Воздействие лазерного излучения ультракороткой длительности на материалы позволяет осуществлять их разделение, изменение свойств поверхности, получение частиц различных форм и размеров [1–7]. Распространено применение фемтосекундного лазерного излучения для синтеза наночастиц в различных средах [8–11]. Именно такое лазерное воздействие позволяет наиболее эффективно получать наночастицы различной дисперсности и структуры. Лазерная абляция более длинными импульсами (больше времени нагрева ионной подсистемы решетки мишени, т.е. $> 10^{-10}$ s) приводит к увеличению области нагрева за счет теплопроводности материала и интенсивного нагрева лазерным эрозионным факелом [12–14]. Лазерная абляция материала в реакционной среде обеспечивает возможность формирования химической связи аблируемого материала и компонентов среды, в том числе возможно получение оболочечных частиц [15–18].

Нитрид галлия (GaN) является перспективным соединением, обладающим высокой стабильностью в условиях радиационного воздействия. Характеристики устройств на основе GaN превосходят кремниевые, поскольку средняя энергия смещения атомов в решетке для GaN составляет 21.3 eV, что существенно выше, чем у кремния (всего 11.07 eV) [19–21]. Устройства из GaN нашли также применения в качестве элементов сильноточной электроники [22]. Распространено их использование в

качестве источников излучения [23], а благодаря своей превосходной химической стабильности и высокой подвижности носителей GaN нашел свое применение в виде датчиков и биосенсоров [24–27]. Материалы из GaN продемонстрировали биосовместимость и, таким образом, они обладают потенциалом применения в биомедицинской инженерии. Биохимически настроенные поверхности GaN с отличной интеграцией в мягкие ткани потенциально могут быть использованы в различных биомедицинских и стоматологических приложениях [28–30].

В работе [31] рассмотрен процесс лазерной обработки поверхности металлического галлия в среде аммиака под действием электростатического поля. Использование данного метода позволяет получить наночастицы нитрида галлия и оксида галлия при абляции металлического галлия в реакционной среде фемтосекундными лазерными импульсами [32].

Цель настоящей работы состоит в исследовании доминирующих факторов, определяющих динамику протекания процесса лазерного воздействия на поверхность галлия в среде аммиака при различной тепловой нагрузке.

1. Материалы и схемы проведения экспериментов

Галлий представляет собой материал, обладающий широким диапазоном жидкого состояния от 29.8

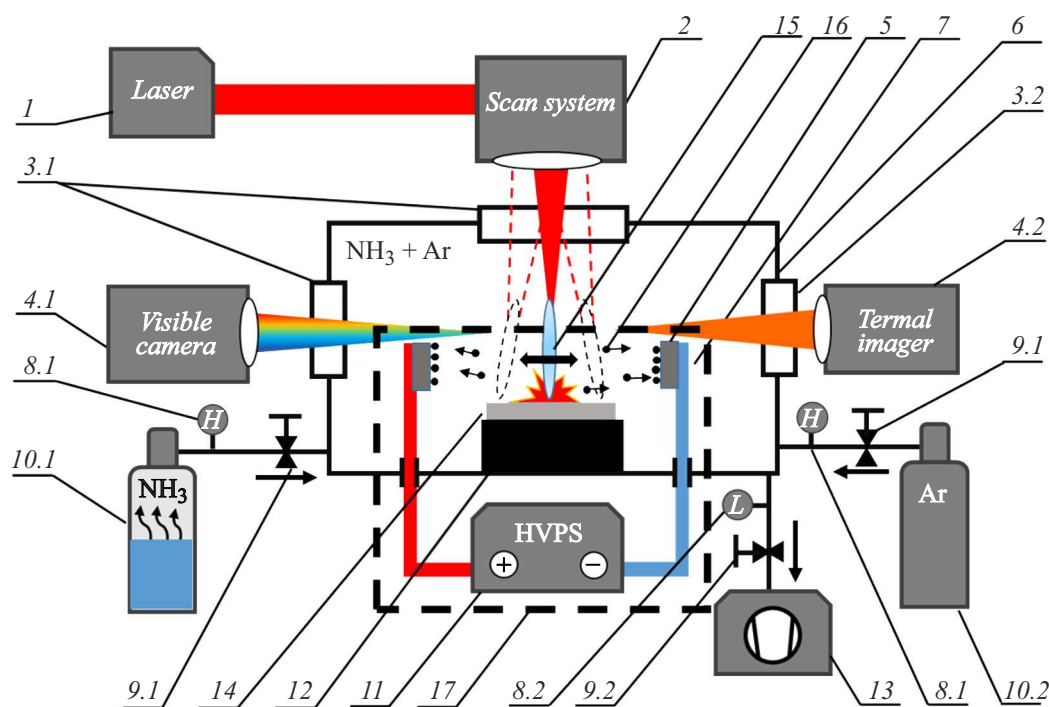


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Пояснения в тексте.

до 2402°C [33], при этом он является достаточно устойчивым химическим элементом, в некоторой степени инертным при нормальных условиях. Однако изменение условий обработки и выявление доминирующих факторов представляют большой интерес для изучения процесса формирования GaN. Использование аммиака в качестве рабочей среды для формирования GaN обусловлено значительно меньшей энергией ионизации — 10.18 eV [34] — по сравнению с азотом — 14.53 eV [35]. Воздействие лазерного излучения осуществлялось в изолированном от окружающей атмосферы сосуде.

Обработка поверхности металлического галлия проводилась в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, где использовался источник фемтосекундного лазерного излучения ТЕТА-10 (Авеста-Проект, г. Троицк, Российская Федерация) со следующими параметрами: длительность импульса 280 fs , энергия в импульсе до $150\text{ }\mu\text{J}$, длина волны 1030 nm , частота следования импульсов 10 kHz 1. Сканирование лазерным лучом осуществлялось по поверхности металлического галлия 14, расположенного на предметном столе 12, гальваносканатором 2, оснащенным объективом плоского поля с фокусным расстоянием 200 mm . Ввод лазерного излучения и наблюдение процессов в видимом спектральном диапазоне осуществлялись через окна 3.1 с соответствующим просветлением. Скорость сканирования лазерного луча составляла $0\text{--}100\text{ mm/s}$. При скоростях сканирования $0\text{--}20\text{ mm/s}$ наблюдалось оплавление обрабатываемого образца. Во всех экспериментах энергия лазерного импульса устанавливалась на уровне $100\text{ }\mu\text{J}$, диаметр лазерного пятна на образце по уровню интенсивности $1/e^2$

составлял $50\text{ }\mu\text{m}$, соответствующая плотность потока энергии — 10.2 J/cm^2 . Сканирование лазерным лучом необходимо для исключения образования брызг расплава галлия в процессе аккумуляции остаточного тепла от воздействия лазерного излучения и лазерного эрозионного факела. Галлий является легкоплавким металлом, при образовании объемной ванны расплава наблюдается значительный выброс жидкой фазы и крупных брызг. В качестве рабочей среды использовалась смесь насыщенных паров аммиака, получаемых из раствора 25% водного аммиака 10.1 и газ аргон 99.998 из сосуда 10.2. Откачка объема рабочей камеры 6 перед заполнением осуществлялась вакуумным насосом 13. Давление контролировалось датчиками 8.1, 8.2 и регулировалось вентилями 9.1, 9.2 в диапазоне $0.1\text{--}2\text{ bar}$ путем закачки газообразного аргона, который выступал в качестве буферной среды. Сбор продуктов абляции осуществлялся с использованием электрофильтра, представленного совокупностью узлов 17. Электростатическое поле на электродах 7 создавалось источником высокого напряжения 11 и изменялось в диапазоне от 15 до 30 kV , напряженность поля составляла $2\text{--}15\text{ kV/cm}$. Процесс лазерной абляции в электростатическом поле регистрировался камерой в видимом спектральном диапазоне 4.1, регистрация температуры осуществлялась через окно из сульфида цинка (ZnS Multispectral) с использованием матричного инфракрасного приемника 4.2 с разрешением 320×240 , работающего в спектральном диапазоне $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$ 3.2. В результате лазерного воздействия наблюдалось образование аблированных частиц 16. Аблированные частицы под действием электростатического

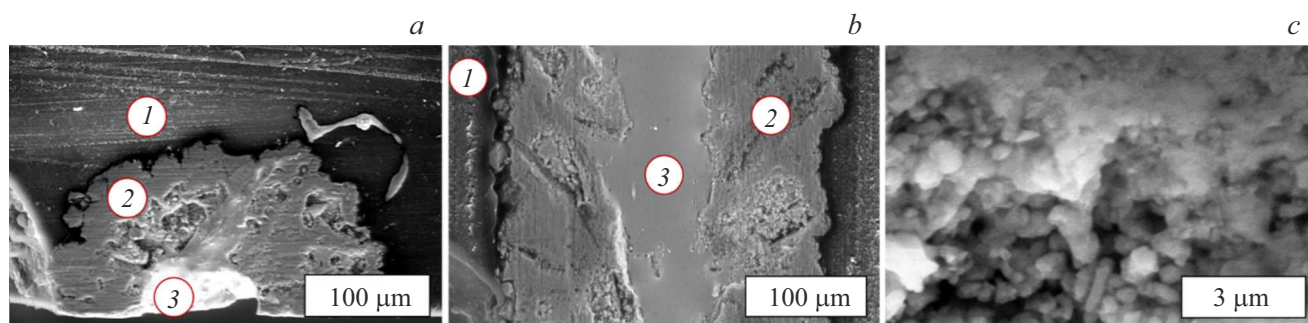


Рис. 2. РЭМ изображения поверхности сечения столбчатой структуры поперечного (а), продольного (b) и увеличенное изображение области 2 (с).

поля осаждались на поверхность кремниевых пластинок 5, которые были закреплены на электродах высокого напряжения. Принцип действия такого подхода описан в работе [36] при решении задачи синтеза высокодисперсных сферических порошковых гранул методом лазерной абляции. Для улучшения качества поверхности синтезированных частиц и повышения производительности процесса была использована система сбора продуктов абляции на основе электрофильтра непосредственно в области распространения лазерного луча. Данный подход позволяет сформированным частицам покидать зону лазерного облучения, не подвергаясь повторному воздействию источника излучения. Интенсивность свечения лазерно-индуцированного плазменного факела 15 при отключении источника высокого напряжения увеличивалась, что говорит о повторном попадании аблированных частиц в область распространения лазерного луча. Проведение абляционной обработки в изолированном сосуде без электростатического поля приводит к быстрому повреждению окна ввода лазерного луча ввиду осаждения частиц на оптическую поверхность и дальнейшую ее деградацию в процессе прохождения лазерного луча.

Измерения температуры производились методом инфракрасной радиометрии с использованием матричного сенсора с разрешением 320×240 пикселей и спектральным диапазоном 8–14 μm . Регистрация тепловых процессов производилась через окно из мультиспектрального сульфида цинка.

2. Методы исследования и результаты

Исследования поверхности проводились с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) (Quanta 200 3D, FEI). Изображения поперечного и продольного сечений полученных „столбчатых“ структур представлены на рис. 2, а, b соответственно. Поперечное и продольное сечения столбчатых структур были получены путем механической обработки образцов, залитых в эпоксидную смолу. Механическая обработка осуществлялась абразивным инструментом до получения сечения столбчатой структуры в плоскости, соответствующей половине диаметра. На полученных сечениях видна

выраженная зернистая структура. Цифрами обозначены зоны, соответствующие эпоксидной смоле 1, нитриду галлия 2 и металлическому галлию 3. Верификация зон осуществлялась с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния. Увеличенная область зоны 2 представлена на рис. 2, с.

Измерение спектров комбинационного рассеяния (КР) синтезированных столбчатых структур проводилось в геометрии обратного рассеяния с помощью зондовой нанолаборатории NTEGRA Spectra (NT-MDT, г. Зеленоград, Российская Федерация), которая представляет собой интеграцию сканирующего зондового микроскопа с конфокальной микроскопией/спектроскопией комбинационного рассеяния. При проведении измерений была использована дифракционная решетка, имеющая 1800 штрихов/мм. В качестве источника возбуждения при исследовании образцов использовался твердотельный лазер с диодной накачкой, генерирующий излучение на длине волны 473 nm.

На рис. 3 представлены КР спектры коммерческого порошка GaN (Alfa Aesar, 40218) и различных зон поверхности синтезированной столбчатой структуры, соответствующих РЭМ изображениям. Источником возбуждения являлось лазерное излучение с длиной волны 473 nm.

В случае КР спектра коммерческого порошка GaN (рис. 3, а) отчетливо видны пики на частотах 252, 418, 568, 720 cm^{-1} . При исследовании поверхности и внутренней части оболочки синтезированных столбчатых структур (рис. 3, b, c) более явным становится присутствие крыла у интенсивной линии на частоте 568 cm^{-1} со стороны низких частот. Таким образом, помимо пиков на частотах 252, 418, 568, 720 cm^{-1} можно выделить два дополнительных пика на частотах 531 и 559 cm^{-1} . Моды первого порядка на 531, 559, 568 и 720 cm^{-1} можно соотнести с частотами фоновых колебаний $A_1(\text{TO})$, $E_1(\text{TO})$, $E_2(\text{high})$ и $A_1(\text{LO})$ соответственно [37]. Видно, что доминирующими полосами являются моды $E_2(\text{high})$ и $A_1(\text{LO})$ с центрами на частотах 568 и 720 cm^{-1} . Кроме того, в случае с КР спектром внутренней части оболочки столбчатой структуры (рис. 3, c) интенсивность линии $A_1(\text{LO})$ значительно снижается. Сильная фоновая линия $E_2(\text{high})$ в спектрах отражает характеристики

гексагональной кристаллической фазы синтезированных столбчатых структур GaN. Фононные моды комбинационного рассеяния второго порядка при 252 и 418 cm^{-1} (на рис. 3, обозначены * и **) можно отнести к зонально-граничным фононам, активируемым поверхностными дефектами и эффектами конечного размера [37,38]. Данные пики наблюдались как в случае порошка GaN, так и при исследовании поверхности и внутренней части оболочки синтезированных столбчатых структур. На рис. 3, *d* представлен КР спектр, измеренный в центральной области синтезированной столбчатой структуры (на рис. 2 отмечен цифрой 3). Данная область характеризуется присутствием только расплава металлического галлия.

Структурные характеристики синтезированных столбчатых структур были изучены методом рентгеновской дифракции (XRD) на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker) с источником излучения $\text{CuK}\alpha$ и детектором LynxEye XE (измерения проводились в диапазоне углов 2θ от 20 до 80°). На рис. 4 представлена дифрактограмма синтезированных столбчатых структур и соответствующая ей карта из базы порошковых дифракционных данных (JCPDS карта № 50-0792).

Набор дифракционных пиков на 32.48 , 34.55 , 36.88 , 47.98 , 57.58 , 63.50 , 67.96 , 69.14 , 70.53 , 73.41 и 78.6° соответствует рассеянию на плоскостях кристаллической решетки GaN с ориентацией (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (201), (004), (202) соответственно. Наблюдаемые пики синтезированных столбчатых структур совпадают со стандартными значениями для гексагональной фазы вюрцита GaN, указанными в карте базы порошковых дифракционных данных JCPDS

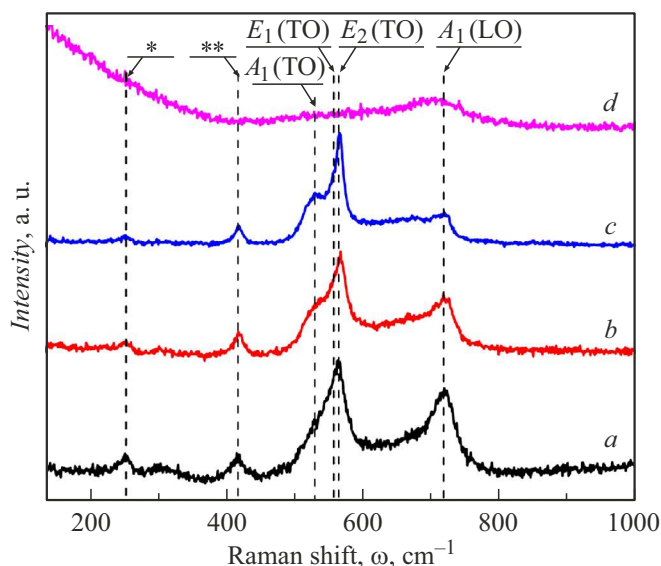


Рис. 3. КР спектры (источник возбуждения — лазерное излучение с длиной волны 473 nm): *a* — коммерческого порошка GaN (Alfa Aesar, 40218), *b* — поверхности синтезированной столбчатой структуры, *c* — внутренней части оболочки столбчатой структуры на небольшом удалении от центральной области, *d* — центральной области столбчатой структуры.

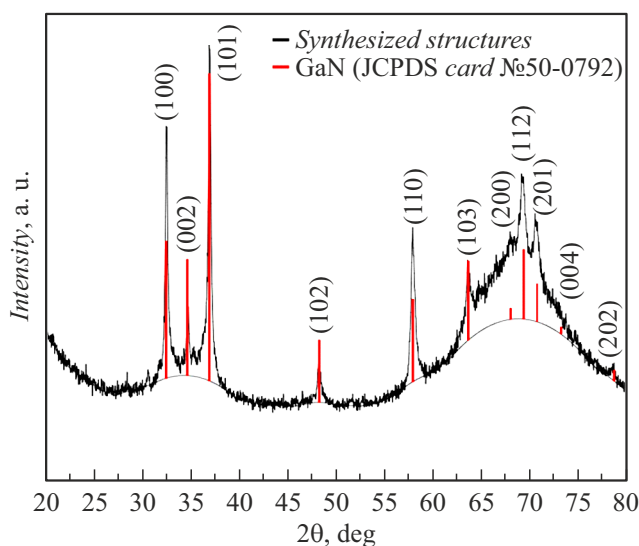


Рис. 4. Дифрактограмма синтезированных столбчатых структур и сравнение с картой базы порошковых дифракционных данных (JCPDS карта № 50-0792).

№ 50-0792 (отмечены красными линиями (в онлайн версии) на рис. 4).

3. Обсуждение результатов

В процессе выполнения работ установлен ряд закономерностей, позволяющих получать качественно отличающийся результат лазерного синтеза путем изменения условий обработки. Наиболее весомыми факторами в процессе экспериментальных работ является режим сканирования лазерным лучом и концентрация аммиака. Использование электростатического поля позволяет удалять аблированные частицы из области распространения лазерного излучения, а с помощью аргона регулировалось давление в рабочем сосуде.

Обработка поверхности галлия при использовании паров 25% водного раствора аммиака в качестве реакционной среды позволяет получать сферические наночастицы галлия, нитрида и оксида галлия. Наличие частиц галлия, в том числе оксидов галлия в полученных материалах, свидетельствует о недостаточном энергетическом воздействии в процессе лазерной абляции. Для аблированных частиц не создаются условия сорбции азота и формирования GaN, что, вероятно, связано с недостаточным временем пребывания в состоянии необходимой температуры для формирования GaN. Данные условия можно сформировать путем повышения энергии лазерного эрозионного факела и лазерно-индуцированного плазменного канала, что предложено в работах [39,40]. Данные методы могут эффективно осуществлять управление процессами нагрева, разлета наночастиц и временем их пребывания в области высокой температуры.

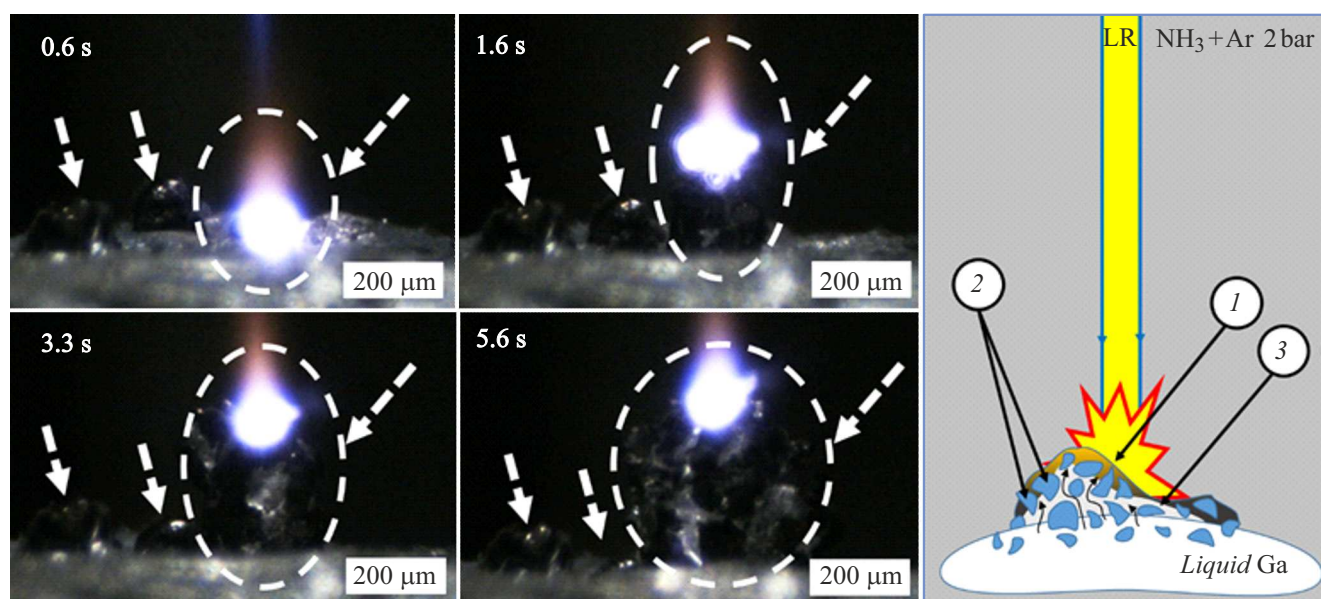


Рис. 5. Процесс формирования островковой структуры на поверхности жидкого галлия: 1 — область воздействия лазерного луча, 2 — GaN, 3 — основание столбчатой структуры.

Изменение скорости сканирования позволяет регулировать интенсивность абляции, а также размер фракции получаемых частиц. Использование скорости сканирования до 100 mm/s приводит к обильному выбросу жидкой фазы материала на поверхность подложек. Это следствие реактивного действия лазерного эрозионного факела и парогазового канала, формируемого в процессе лазерного воздействия. Увеличение скорости сканирования позволяет получать аблируемые наночастицы без брызг металлического галлия и снизить общую энергетическую экспозицию на область воздействия. При этом наблюдается меньший разогрев поверхности и снижение абляционного действия лазерного луча.

При лазерном воздействии на поверхность жидкого галлия в среде насыщенных паров, полученных при испарении 25% водного аммиака, со скоростью сканирования более 100 mm/s наблюдается интенсивный абляционный процесс. Внутреннее пространство камеры заполняется аблированными частицами, которые под действием электростатического поля собираются в нитевидные структуры, которые выстраиваются по линиям напряженности поля. Уменьшение скорости сканирования лазерного луча до величин ниже 20 mm/s приводит к значительному снижению интенсивности процесса абляции. Результатом лазерного воздействия является формирование на поверхности образца „островковой структуры“. КР спектр поверхности островковой структуры совпадает со спектром внутренней части оболочки столбчатой структуры (рис. 3, с). Сходство регистрируемых спектров областей обусловлено температурным режимом формирования. Повышение температуры способствует развитию кристаллической фазы GaN, совпадающей с КР спектрами коммерческого порошка. При формировании островковых структур данные

температурные условия не достигаются. Микрофотография процесса, полученная с помощью CCD-камеры, представлена на рис. 5. Штриховая стрелка обозначает область образовавшейся островковой структуры на поверхности жидкого галлия. В процессе воздействия лазерного луча на поверхность образца наблюдается его оплавление и за счет сил поверхностного натяжения, образуется околосферическая поверхность. В зоне воздействия лазерного луча наблюдается образование мениска за счет локального повышения давления (реактивное действие лазерного эрозионного факела). Область воздействия лазерного луча имеет выраженный лазерный эрозионный факел, срастающийся с лазерно-индуцированным плазменным каналом. Интенсивность свечения обусловлена взаимодействием лазерного излучения с парами галлия и аммиаком. Температура поверхности образца в режиме абляционного воздействия, в том числе в режиме формирования островковых структур, не превышает 39°C, температура формируемых островковых структур соответствует величине 240–270°C.

Воздействие лазерного излучения на поверхность галлия в среде паров аммиака в одну точку приводит к формированию „столбчатых структур“ (рис. 6). Интенсивность лазерного эрозионного факела и лазерно-индуцированного плазменного канала заметно снижается, что связано с переходом из режима абляции в режим роста столбчатых структур. Наблюдаются значительные изменения температуры поверхности образца, достигающей 220–330°C. Рост регистрируемой температуры при данном режиме воздействия, вероятно, связан с ухудшением теплового контакта с поверхностью предметного столика из-за дрейфа по поверхности жидкого галлия.

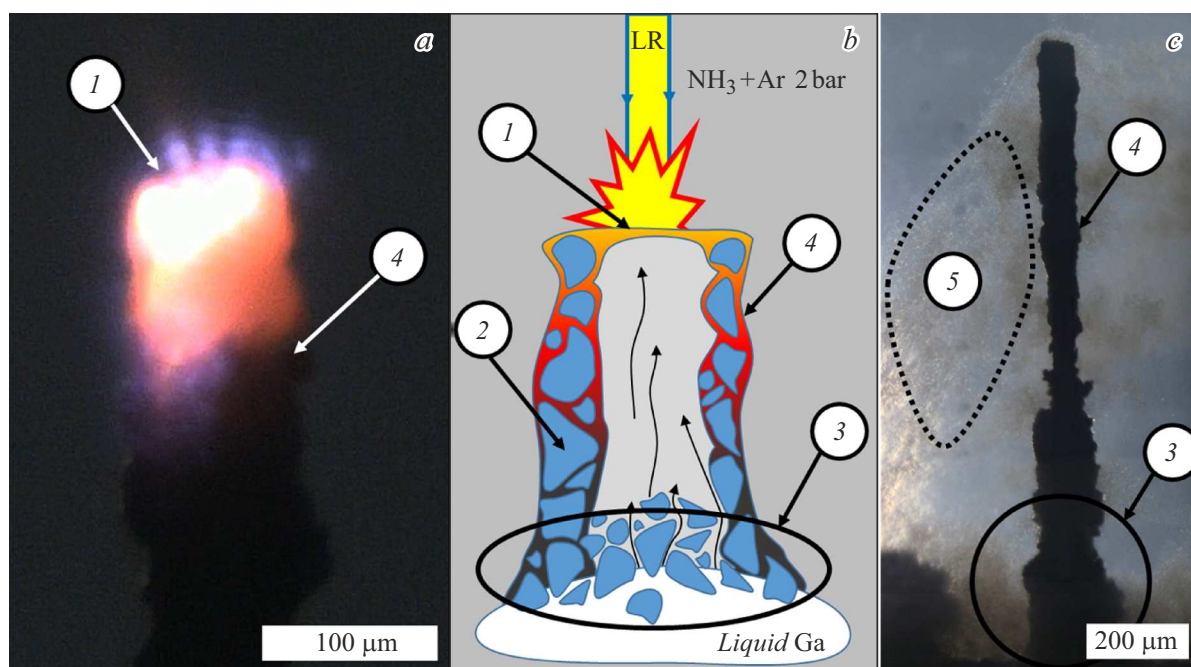


Рис. 6. Процесс роста столбчатой структуры: 1 — область воздействия лазерного луча, 2 — GaN, 3 — основание столбчатой структуры/островковая структура, 4 — столбчатая структура, 5 — нитевидные структуры.

Дальнейшее воздействие лазерного излучения приводит к формированию столбчатых структур в направлении воздействия лазерного луча (рис. 6, *c*). Рост таких структур протекает наиболее интенсивно при высоте более 0.7–1 mm от поверхности образца галлия. Также наблюдается интенсивный разогрев области воздействия. Температура в области воздействия/зоне роста составляет 870–1020°C. Значительные отклонения в температурных данных вызваны нестабильностью положения растущей структуры. В ее основании находится жидкий галлий. В процессе роста наблюдаются колебания структуры на величину порядка 100–150 μm. Регистрация температуры осуществлялась с использованием инфракрасной камеры, регистрирующей процесс с одного положения.

На рис. 7 представлен процесс роста столбчатой структуры с интервалом 0.3 s. При отклонении структуры в направлении камеры воздействие лазерного луча происходит с противоположной стороны, и регистрируется меньшая температура. При отклонении столбчатой структуры в направлении „от камеры“ регистрируется область подверженная непосредственному воздействию лазерного луча, что соответствует максимуму регистрируемой температуры.

Данные структуры могут образовываться в результате формирования зерен GaN. Кристаллизация происходит в результате сорбции азота при диссоциации аммиака из окружающей атмосферы. Дальнейший разогрев области воздействия способствует разрастанию зерна GaN. Вертикальный рост наблюдаемых структур происходит в результате цикла событий — образование кристаллов GaN, формирование капиллярных течений

жидкого металла между кристаллами, в том числе по поверхности полученной структуры, рост кристаллов GaN в результате лазерного разогрева объема материала и взаимодействия галлия с азотом (диссоциировавшим аммиаком в присутствии галлия). Рост кристаллов в процессе нагрева лазерным излучением способствует уменьшению размеров капилляра, что, в свою очередь, способствует увеличению потенциальной высоты капиллярного течения (ввиду уменьшения массы столба жидкого металла) и интенсификации роста, что схематично представлено на рис. 6, *b*.

В результате установлено доминирующее действие реакционной среды на процесс лазерной обработки. Использование водного аммиака с концентрацией 25% в качестве источника насыщенных паров аммиака — реакционной среды в процессе лазерного воздействия — способствует повышению интенсивности абляционного действия вместе с выходом наночастиц.

Снижение скорости обработки позволяет получать структуры, рост которых направлен в сторону воздействия лазерного луча. Данным методом возможно получение объемных структур из поликристаллического GaN. Производительность роста составляет порядка 150 μm/s при диаметре столбчатой структуры порядка 100 μm и длине до 12 mm. Нестабильность геометрии полученных столбчатых структур вызвана колебаниями стержня в процессе лазерного воздействия.

Полученные столбчатые структуры являются результатом формирования зерен и наночастиц GaN различной формы и размеров, что видно на рис. 2, *c*. Примеры формирования подобных структур методом химического осаждения из газовой фазы рассмотрены в обзорной

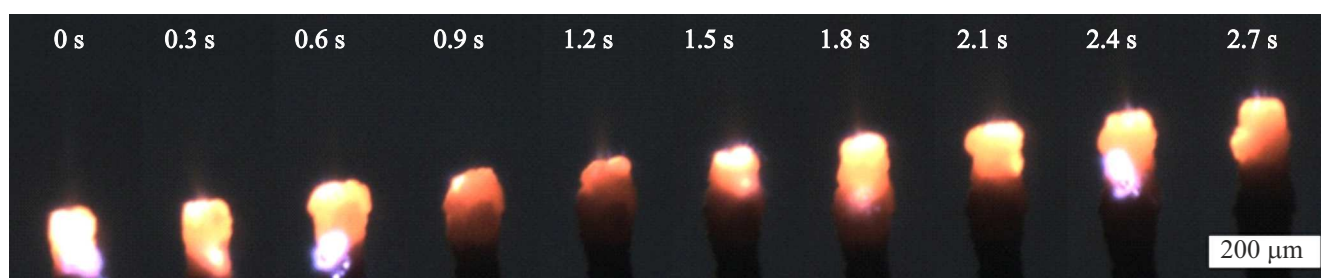


Рис. 7. Процесс роста столбчатой структуры с периодичностью съемки CCD-камерой 0.3 s (диаметр столбчатой структуры — 100 μm).

работе [41]. На основании анализа достигнутых характеристик предлагается их использование при производстве светодиодов, пьезоэлектрических наногенераторов, фотогальванических приборов, устройств фотокаталитического расщепления воды и в биоприложениях. Полученные структуры также могут использоваться в качестве мишеней для лазерного абляционного синтеза сферических наночастиц GaN. Следует отметить, что скорость рассмотренного в настоящей работе лазерно-индуцированного формирования структур значительно выше, чем в случае использования метода химического осаждения из газовой фазы.

Заключение

В работе проведено исследование механизмов взаимодействия лазерного излучения с поверхностью галлия в среде аммиака. В рамках настоящей работы изучалось влияние скорости сканирования на результат обработки и характера протекания реакции образования нитрида галлия. Рассмотренный метод получения нитрида галлия в виде наночастиц или столбчатых структур имеет свои конкурентные преимущества по сравнению с классическими. Характерными свойствами для данного метода является динамика синтеза нитрида галлия — как объемных структур, так и наноматериалов. Данные результаты могут быть также применены для формирования упорядоченных микро- и наноструктур на поверхности, содержащей металлический галлий, при обработке в среде аммиака остросфокусированным лазерным излучением. При использовании микрообъективов возможно кратное снижение размеров области воздействия, а также уменьшение зоны нагрева лазерным лучом, и, как следствие, получение структур меньшего масштаба.

Финансирование работы

Исследование процессов формирования наночастиц выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10348. Подготовка и анализ образцов выполнен в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FZUN-2020-0013.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M.V. Shugaev, C. Wu, O. Armbryster, A. Naghilou, N. Brouwer, D.S. Ivanov, T.J.-Y. Derrien, N.M. Bulgakova, W. Kautek, B. Rethfeld, L.V. Zhigilei. *MRS Bulletin*, **41** (12), 960 (2016). DOI: 10.1557/mrs.2016.274
- [2] А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин. *УФН*, **187** (2), 159 (2017). DOI: 10.3367/UFN.2016.09.037974 [A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Samokhin. *Phys. Usp.*, **60**, 149 (2017). DOI: 10.3367/UFN.2016.09.037974]
- [3] R. Fedorov, F. Lederle, M. Li, V. Olszok, K. Wöbbing, W. Schade, E.G. Hübner. *Chem. Plus. Chem.*, **86** (9), 1231 (2021). DOI: 10.1002/cplu.202100118
- [4] J. Hao, S. Xu, B. Gao, L. Pan. *Nanomaterials*, **10** (3), 439 (2020). DOI: 10.3390/nano10030439
- [5] J. Perrière, C. Boulmer-Leborgne, R. Benzerga, S. Tricot. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40** (22), 7069 (2007). DOI: 10.1088/0022-3727/40/22/031
- [6] В.В. Осипов, В.В. Платонов, А.М. Мурзакаев, Е.В. Тихонов, А.И. Медведев. *Квант. электрон.*, **52** (8), 739 (2022).
- [7] J.L.H. Chau, C.Y. Chen, M.C. Yang, K.L. Lin, S. Sato, T. Nakamura, C.C. Yang, C.W. Cheng. *Mater. Lett.*, **65** (4), 804 (2011). DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.04.014
- [8] A.V. Kabashin, M. Meunier. *J. Appl. Phys.*, **94** (12), 7941 (2003). DOI: 10.1063/1.1626793
- [9] A.A. Popov, G.V. Tikhonowski, P.V. Shakhov, E.A. Popova-Kuznetsova, G.I. Tselikov, R.I. Romanov, A.M. Markeev, S.M. Klimentov, A.V. Kabashin. *Nanomaterials*, **12** (10), 1672 (2022). DOI: 10.3390/nano12101672
- [10] K.S. Khorkov, D.V. Abramov, D.A. Kochuev, S.M. Arakelian, V.G. Prokoshev. *Phys. Proced.*, **83**, 182 (2016). DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.152
- [11] P.A. Danilov, A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Rudenko, I.N. Saraeva, D.A. Zayarny. *Las. Phys. Lett.*, **14** (5), 056001 (2017). DOI: 10.1088/1612-202X/aa6225
- [12] B.N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, F. Von Alvensleben, A. Tünnermann. *Appl. Phys. A*, **63** (2), 109 (1996). DOI: 10.1007/BF01567637
- [13] S. Nolte, C. Momma, H. Jacobs, A. Tünnermann, B.N. Chichkov, B. Welleghausen, H. Welling. *JOSA B*, **14** (10), 2716 (1997). DOI: 10.1364/JOSAB.14.002716

- [14] Г.Н. Макаров. УФН, **183** (7), 673 (2013). DOI: 10.3367/UFNr.0183.201307a.0673 [G.N. Makarov. Phys. Usp., **56**, 643 (2013). DOI: 10.3367/UFNe.0183.201307a.0673]
- [15] A.S. Chernikov, D.A. Kochuev, A.A. Voznesenskaya, A.V. Egorova, K.S. Khorkov. J. Phys.: Conf. Ser., **2077** (1), 012002 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2077/1/012002
- [16] G.I. Tselikov, G.A. Ermolaev, A.A. Popov, G.V. Tikhonowski, D.A. Panova, A.S. Taradin, A.A. Vyshnevyy, A.V. Syuy, S.M. Klimentov, S.M. Novikov, A.B. Evlyukhin, A.V. Kabashin, A.V. Arsenin, K.S. Novoselov, V.S. Volkov. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **119** (39), e2208830119 (2022). DOI: 10.1073/pnas.2208830119
- [17] J. Simon, V.P.N. Nampoori, M. Kailasnath. Optik, **195**, 163168 (2019). DOI: 10.1016/j.jjleo.2019.163168
- [18] D.A. Kochuev, K.S. Khorkov, A.V. Ivashchenko, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian. J. Phys. Conf. Ser., **951** (1), 012015 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/951/1/012015
- [19] P. Hazdra, S. Popelka. Phys. Status Solidi A, **214** (4), 1600447 (2017). DOI: 10.1002/pssa.201600447
- [20] K. Li, P.L. Evans, C.M. Johnson. IEEE Trans. Power Electron., **33** (6), 5262 (2017). DOI: 10.1109/TPEL.2017.2730260
- [21] V.K. Pandey, C.M. Tan. IEEE Trans. Nucl. Sci., **68** (6), 1319 (2021). DOI: 10.1109/TNS.2021.3072654
- [22] B.J. Baliga. Semicond. Sci. Technol., **28** (7), 074011 (2013). DOI: 10.1088/0268-1242/28/7/074011
- [23] R. Quay. *Gallium Nitride Electronics* (Springer, Heidelberg, 2008) DOI: 10.1007/978-3-540-71892-5
- [24] C.M. Furqan, M.U. Khan, M. Awais, F. Jiang, J. Bae, A. Hassan, H.S. Kwok. Sci. Rep., **11** (1), 1 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-89956-0
- [25] D. Han, Y. Chen, D. Li, H. Dong, B. Xu, X. He, S. Sang. Sens. Actuators B Chem., **379**, 133197 (2023). DOI: 10.1016/j.snb.2022.133197
- [26] J. Zhou, H. Huang, M. Wang, D. Zhao, J. Yu, S. Jin, Y. Zhong, X. Chen, X. Yu, P. Liu, J. Zhao. Sens. Actuators B Chem., **345**, 130360 (2021). DOI: 10.1016/J.SNB.2021.130360
- [27] K. Asha, A. Sanjana, K. Narayan. In: *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics* (Tirunelveli, India, 2018), p. 955. DOI: 10.1109/ICOEL.2018.8553909
- [28] S. Cojocari, O. Ignatov, M. Jian, V. Cobzac, T. Braniste, E.V. Monaico, A. Taran, V. Nacu. Int. J. Biomed. Eng. Technol. Springer, Cham (Moldova, 2021), p. 373. DOI: 10.1007/978-3-030-92328-0_49
- [29] N. Wazzan, K.A. Soliman, W.S. Abdel Halim. J. Mol. Model., **25** (9), 1 (2019). DOI: 10.1007/s00894-019-4147-8
- [30] M. Mishra, J. Sharan, V. Koul, O.P. Kharbanda, A. Kumar, A. Sharma, T.A. Hackett, R. Sagar, M.K. Kashyap, G. Gupta. Appl. Surf. Sci., **612**, 155858 (2023). DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.155858
- [31] D.A. Kochuev, A.S. Chernikov, R.V. Chkalov, A.V. Prokhorov, K.S. Khorkov. J. Phys. Conf. Ser., **2131** (5), 052089 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052089
- [32] A.S. Chernikov, D.A. Kochuev, R.V. Chkalov, A.V. Egorova, D.G. Chkalova. *2022 International Conference Laser Optics* (Saint Petersburg, Russian Federation, 2022), p. 1. DOI: 10.1109/ICLO54117.2022.9840086
- [33] R.R. Moskalyk. Miner. Eng., **16** (10), 921 (2003). DOI: 10.1016/j.mineng.2003.08.003
- [34] P. Limão-Vieira, N.C. Jones, S.V. Hoffmann, D. Dufлот, M. Mendes, A.I. Lozano, F. Ferreira da Silva, G. Garcia, M. Hoshino, H. Tanaka. J. Chem. Phys., **151** (18), 184302 (2019). DOI: 10.1063/1.5128051
- [35] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader and NIST ASD Team (2022). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.10), [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2022, December 29]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [36] D.A. Kochuev, A.S. Raznoschikov, R.V. Chkalov. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **969** (1), 012034 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/969/1/012034
- [37] C.C. Chen, C.C. Yeh, C.H. Chen, M.Y. Yu, H.L. Liu, J.J. Wu, K.H. Chen, L.C. Chen, J.Y. Peng, Y.F. Chen. J. Am. Chem. Soc., **123** (12), 2791 (2001). DOI: 10.1021/ja0040518
- [38] E. Li, S. Song, D. Ma, N. Fu, Y. Zhang. J. Electron. Mater., **43** (5), 1379 (2014). DOI: 10.1007/s11664-014-3079-4
- [39] A.S. Chernikov, D.A. Kochuev, A.A. Voznesenskaya, A.V. Egorova. J. Phys. Conf. Ser., **1942** (1), 012024 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1942/1/012024
- [40] D.A. Kochuev, A.F. Galkin, A.A. Voznesenskaya, K.S. Khorkov, R.V. Chkalov. Bull. Lebedev Phys. Inst., **47** (2), 372020 (2020). DOI: 10.3103/S1068335620020062
- [41] Yu. Lan, J. Li, W. Wong-Ng, R.M. Derbeshi, J. Li, A. Lisfi. Micromachines, **7** (9), 121 (2016). DOI: 10.3390/mi7090121