

Также интенсивность поглощения структур с перфорацией несколько выше (3–4 %) в случае $r = 1$ мкм в диапазоне 11.2–13.2 мкм. Это может быть связано с локализацией поля в отверстии, что и приводит к росту поглощения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе представлены спектры поглощения перфорированных структур $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti}/\text{Si}_3\text{N}_4$ рассчитанные методом конечных разностей во временной области. Показано что подобные структуры обладают высоким (> 75%) уровнем поглощения во всём исследованном диапазоне длин волн. Показано что наибольшим средним уровнем поглощения обладают структуры с диаметром перфорации 1 мкм. Установлено что интенсивность поглощения зависит от радиуса перфорации нелинейно. Установлено, что наличие перфорации увеличивает интенсивность поглощения в диапазоне 8–8.4 мкм.

Исследования выполнены в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (проект 3.1.2, № ГР 20212702).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Lyu, Xiaochuan. (2022). Recent Progress on Infrared Detectors: Materials and Applications. High-lights in Science, Engineering and Technology. 27. 191–200.
2. Kebapci, Basak & Dervisoglu, Ozgecan & Battal, Enes & Okyay, Ali & Akin, Tayfun. (2014). Broadband absorption enhancement in an uncooled microbolometer infrared detector. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.
3. Erturk, O., Battal, E., Kucuk, S. E., Okyay, A. K. and Akin, T., “A plasmonically enhanced pixel structure for uncooled microbolometer detectors,” Proc. of SPIE 8704, 87041E (2013).
4. Nanophotonic FDTD Simulation Software [Electronic resource], Lumerical FDTD – Mode of access, <https://www.lumerical.com/products/fdtd>, Date of access: 04.2024.
5. K. Luke, Y. Okawachi, M. R. E. Lamont, A. L. Gaeta, M. Lipson. Opt. Lett., 40, N 21 (2015) 4823–4826.
6. E. D. Palik. Handbook of Optical Constants of Solids, 2, Academic Press (1985).

МОДИФИКАЦИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ СВОЙСТВ ИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ОКСИДА ГАЛЛИЯ ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ

**Д. С. Королев, К. С. Матюнина, А. А. Никольская, Р. Н. Крюков,
А. А. Сушков, Д. И. Тетельбаум**

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23,
603022 Нижний Новгород, Россия, e-mail: dmkorolev@phys.unn.ru*

Исследованы структура и фотолюминесцентные свойства нанокристаллов оксида галлия, ионно-синтезированных в матрице SiO_2/Si . Показано, что светоизлучающие свойства определяются режимами ионного облучения и постимплантационного отжига. Исследование влияния дополнительного ионного облучения и последующего отжига продемонстрировало возможность управления светоизлучающих свойств путем вариации условий облучения и отжига.

Ключевые слова: оксид галлия; ионный синтез; ионное облучение; фотолюминесценция.

MODIFICATION OF PHOTOLUMINESCENCE PROPERTIES OF ION-SYNTHESIZED GALLIUM OXIDE NANOCRYSTALS AT ADDITIONAL ION IRRADIATION

D. S. Korolev, K. S. Matyunina, A. A. Nikolskaya, R. N. Kriukov,
A. A. Sushkov, D. I. Tetelbaum

*Lobachevsky University, Gagarina av., 23, 603022 Nizhny Novgorod, Russia
Corresponding author: D. S. Korolev (dmkorolev@phys.unn.ru)*

The structure and photoluminescent properties of gallium oxide nanocrystals ion-synthesized in a SiO_2/Si matrix were studied. It was shown that the light-emitting properties are determined by the ion irradiation and post-implantation annealing regimes. The study of the effect of additional ion irradiation and subsequent annealing demonstrated the possibility of controlling the light-emitting properties by varying the irradiation and annealing conditions.

Key words: gallium oxide; ion synthesis; ion irradiation; photoluminescence.

ВВЕДЕНИЕ

Оксид галлия является одним из наиболее перспективных материалов электроники нового поколения благодаря большой ширине запрещенной зоны этого полупроводника, что открывает перспективы его использования в устройствах силовой электроники, создании солнечно-слепых фотодетекторов и газовых сенсоров. Один из новых способов получения такого материала – ионный синтез нанокристаллических включений Ga_2O_3 в диэлектрических матрицах, обладающих фотolumинесценцией в УФ- и видимой областях спектра. Целью данной работы является исследование фотolumинесценции (ФЛ) ионно-синтезированных нанокристаллов Ga_2O_3 и изучение влияния дополнительного ионного облучения на их светоизлучающие свойства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исследуемых образцов использовались пленки SiO_2 толщиной 350 нм, осажденные на подложки Si(100) методом электронно-лучевого испарения. Для первого этапа ионного синтеза была проведена имплантация ионов галлия и кислорода в различной последовательности, а также имплантация только ионов Ga^+ . Энергия ионов галлия составляла 80 кэВ, кислорода – 23 кэВ. Доза облучения составляла $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для ионов Ga^+ и $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ для ионов O^+ . На второй стадии синтеза образцы отжигались в трубчатой печи в атмосфере азота при температурах 700 и 900 °С, а также в атмосфере кислорода при температуре 900 °С. Длительность всех отжигов составляла 30 минут. Дополнительное ионное облучение проводилось ионами фтора, аргона и неона с энергиями, обеспечивающими совпадение максимума профиля распределения примеси с профилями галлия и кислорода. Дозы облучения подбирались для обеспечения одинаковых значений dpa (displacements per atom, количество смещений в расчете на один упавший ион), что позволяет проводить сравнение результатов по дефектообразованию при облучении различными типами ионов. Для изучения восстановления ФЛ после дефектообразующего воздействия образцы были отожжены последовательно при температурах 700 и 900 °С в атмосфере кислорода (по 30 мин). Синтезированные образцы были исследованы методом фото-

люминесцентной спектроскопии (в том числе спектроскопии возбуждения ФЛ) и просвечивающей электронной микроскопии

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование спектров ФЛ образцов, облученных галлием и кислородом в разном порядке, после отжига при температурах 700 и 900 °С в атмосфере азота, а также при 900 °С в атмосфере кислорода, показали существенную зависимость от условий ионного синтеза. Для исследуемых образцов на спектрах наблюдаются характерные полосы люминесценции в области 380–550 нм с максимумами на длинах волн ~400 нм, который предварительно может быть связан с рекомбинацией между свободными электронами и локализованными дырками в нанокристаллах Ga_2O_3 , и при ~480 нм, которая является характерной в спектре оксида галлия и связана с рекомбинацией донорно-акцепторных пар, где в качестве донора выступает вакансия кислорода, а в качестве акцептора – пара вакансий галлия и кислорода. Из всех использованных вариантов ионного синтеза наиболее интенсивной люминесценцией при ~480 нм обладает образец, облученный только ионами галлия, после отжига при температуре 900 °С в атмосфере кислорода. Данный образец был выбран в качестве исходного при изучении влияния дополнительного ионного облучения на спектры ФЛ. На рис. 1, а приведены спектры ФЛ для образцов, облученных ионами неона с дозами 0.01, 0.1 и 1 dpa , до и после отжига при 700 °С и 700→900 °С. На рис. 1, б показаны сводные зависимости интенсивности ФЛ в максимуме (на длине волны 480 нм) для ионов Ne, F, Ar, до и после отжигов.

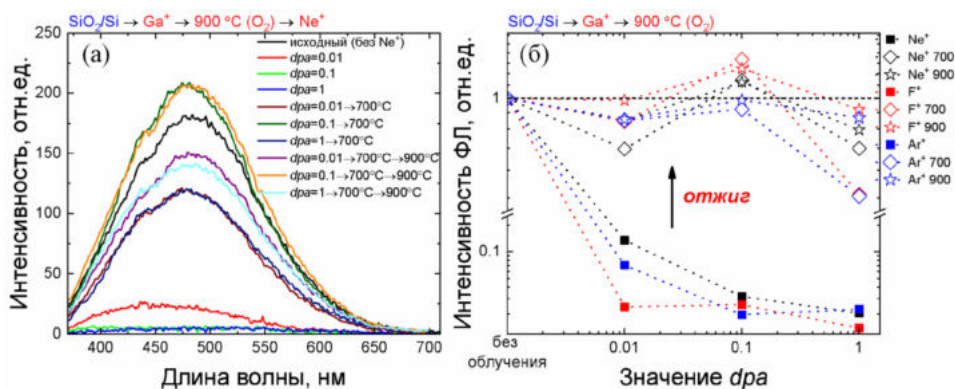


Рис. 1. а – Спектры ФЛ для образцов, облученных ионами неона с дозами 0.01, 0.1 и 1 dpa , до и после отжига при 700 °С и 700→900 °С; б – сводные зависимости интенсивности ФЛ в максимуме (на длине волны 480 нм) для ионов Ne, F, Ar, до и после отжигов

Из рисунка видно, что сразу после облучения даже с наименьшей дозой происходит существенное уменьшение интенсивности ФЛ, а рост дозы ионов приводит к ее дальнейшему снижению. Интересен тот факт, что если для аргона и неона поведение этих кривых достаточно закономерно – гашение для Ar выражено в большей степени в силу его большей массы, тогда как для фтора эта закономерность не соблюдается – при близкой с неоном массе (а, следовательно, и упругим воздействиям) гашение выражено гораздо сильнее. Наблюдаемый эффект может быть связан с тем, что фтор может проявлять не только дефектообразующие, но и «химические» свойства с обра-

зованием связей с атомами матрицы. Отжиг дополнительно облученных образцов приводит к восстановлению ФЛ, причем результирующая интенсивность существенно зависит от типа ионов и дозы облучения. Из кривых видно, что отжиг уже при 700 °С приводит к заметному восстановлению ФЛ для образцов, облученных всеми видами ионов. Отжиг при температуре синтеза нанокристаллов (900 °С) приводит к тому, что интенсивность ФЛ становится близкой к интенсивности исходного образца. Однако, на зависимостях наблюдаются особенности, связанные как с типом ионов, так и с их дозами. Заметно выделяются результаты, полученные при дозе ионов 0.1 *dpa* – интенсивность ФЛ превышает таковую для исходного образца для всех ионов, за исключением более тяжелых ионов аргона. Данный факт может свидетельствовать о том, что облучение при такой дозе может вызывать частичный распад нанокристаллов (в том числе тех, которые не участвовали в процессе излучательной рекомбинации) с образованием зародышей новой фазы, и последующий отжиг может приводить как к восстановлению структуры, так и к формированию новых нанокристаллов оксида галлия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение фотолуминесценции ионно-синтезированных нанокристаллов Ga₂O₃ продемонстрировало наличие полосы с максимумом при ~ 480 нм, интенсивность которой существенно зависит от режимов синтеза. Установлена возможность гибко регулировать светоизлучающие свойства структур путем вариации условий дополнительного ионного облучения и отжига.

Исследование выполнено при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» Министерства науки и высшего образования РФ.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ ПЛЕНОК ГРАФЕНА, СИНТЕЗИРОВАННЫХ МЕТОДОМ CVD

**В. К. Ксеневич¹, В. А. Доросинец¹, В. П. Романов¹
Д. В. Смовж², Д. В. Сорокин²**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: ksenevich@bsu.by*

²⁾ *Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, пр. Лаврентьева, 1, 630090, Новосибирск, Россия, e-mail: smovzh@itp.nsc.ru*

Исследованы магниторезистивные свойства мозаичных пленок графена (с толщиной, варьирующейся от 1 до 6 слоев) в температурном интервале 2–300 К и в магнитных полях до 8 Тл. В температурном интервале 2–50 К обнаружен переход от отрицательного к положительному магнитосопротивлению (МС) при повышении величины индукции магнитного поля. При температурах выше 50 К во всем диапазоне магнитных полей 0–8 Тл наблюдалось только положительное магнитосопротивление без тенденции к насыщению по величине. Значение положительного магнитосопротивления $\Delta R/R_0$ увеличивалось с повышением температуры. Максимальное значение $\Delta R/R_0 \sim 0,25$ зарегистрировано при 300 К в магнитном поле $B = 8$ Тл. Отри-