

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИОННО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ НАНОВКЛЮЧЕНИЙ ОКСИДА ГАЛЛИЯ

Д.С. Королев, К.С. Матюнина, А.А. Никольская, Р.Н. Крюков, А.И. Белов, А.Н. Михайлов,
А.А. Сушков, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум
*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина 23/3,
Ниžний Новгород 603022, Россия, dmkorolev@phys.unn.ru, matyunina.ks@gmail.com,
nikolskaya@nifti.unn.ru, kryukov@unn.ru, belov@nifti.unn.ru, mian@nifti.unn.ru,
sushkovartem@gmail.com, pavlov@unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru*

Проведено исследование состава, фотолуминесцентных свойств и структуры образцов SiO_2/Si и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$, облученных ионами галлия и кислорода с последующим отжигом с целью ионно-лучевого синтеза нанокристаллических включений Ga_2O_3 в твердотельных матрицах. Показано, что свойства синтезированных образцов существенно зависят от режимов ионного облучения и постимплантационного отжига. Исследование химического состава показало формирование связей Ga-O в образцах даже в отсутствие отжига, и увеличение концентрации окисленного галлия в случае образцов SiO_2/Si после отжига. На спектрах фотолуминесценции обнаруживается полоса в области 400-550 нм, предположительно связываемая с рекомбинацией донорно-акцепторных пар в нанокристаллах Ga_2O_3 . Методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждено формирование нанокристаллов Ga_2O_3 в облученных образцах после отжига при температуре 900 °C.

Ключевые слова: оксид галлия; нанокристаллы; ионно-лучевой синтез; термообработка.

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF ION-SYNTHETIZED GALLIUM OXIDE NANOINCLUSIONS

D.S. Korolev, K.S. Matyunina, A.A. Nikolskaia, R.N. Kriukov, A.I. Belov, A.N. Mikhaylov,
A.A. Sushkov, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum
*Lobachevsky state university of Nizhny Novgorod, 23/3 Gagarina Ave.,
603022 Nizhny Novgorod, Russia, dmkorolev@phys.unn.ru, matyunina.ks@gmail.com,
nikolskaya@nifti.unn.ru, kryukov@unn.ru, belov@nifti.unn.ru, mian@nifti.unn.ru,
sushkovartem@gmail.com, pavlov@unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru*

The composition, photoluminescent properties, and structure of SiO_2/Si and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ samples irradiated with gallium and oxygen ions followed by annealing for the ion synthesis of nanocrystalline Ga_2O_3 inclusions in solid matrices have been studied. It is shown that the properties of the synthesized samples significantly depend on the regimes of ion irradiation and post-implantation annealing. The study of the chemical composition showed the formation of Ga-O bonds in the samples even in the absence of annealing, and an increase in the concentration of oxidized gallium in the case of SiO_2/Si samples after annealing. The photoluminescence spectra show a band in the region of 400-550 nm, presumably associated with the recombination of donor-acceptor pairs in gallium oxide nanocrystals. High-resolution transmission electron microscopy confirmed the formation of gallium oxide nanocrystals in irradiated samples after annealing at 900 °C.

Keywords: gallium oxide; nanocrystals; ion synthesis; thermal treatment.

Введение

Исследование свойств материалов на основе оксида галлия в последние несколько лет привлекает огромный интерес благодаря таким его уникальным свойствам, как большая ширина запрещенной зоны (~ 5 эВ), высокие значения пробивных напряжений, а также чувстви-

тельность к УФ-излучению и различным газам. Это открывает перспективы применения оксида галлия в качестве основы нового поколения устройств силовой электроники, солнечно-слепых фотодетекторов, газовых сенсоров и других устройств. Несмотря на наличие технологии роста монокристаллических подложек

большого диаметра, в силу своей малой распространенности и высокой стоимости они пока не нашли практического применения. Также остаются сложности в обработке тонкопленочной (в том числе эпитаксиальной) технологии нанесения Ga_2O_3 . Альтернативой может являться развитие технологии получения наноструктур на основе оксида галлия. Однако, к настоящему времени получены результаты только для синтеза нановключений с применением химических технологий, не совместимых с современной кремниевой технологией. Одним из перспективных вариантов развития технологии наноструктурирования может являться ионно-лучевой синтез нанокристаллов Ga_2O_3 в твердотельных матрицах. В данной работе приведены результаты исследования структуры и свойств нанокристаллических включений оксида галлия, ионно-синтезированных в оксидных матрицах на кремнии.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных образцов использовались пленки SiO_2 (350 нм) и Al_2O_3 (200 нм), осажденные на подложках Si (100). Образцы подвергались облучению ионами Ga^+ ($5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 80 кэВ) и O_2^+ ($3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, 45 кэВ) с вариацией порядка облучения. С целью получения стехиометрического состава Ga_2O_3 часть образцов была облучена с дозой O_2^+ , равной $4,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, при той же дозе ионов галлия. Отжиг проводился при температуре 900 °С (30 мин) в атмосфере N_2 или O_2 .

Состав образцов до и после отжига исследовался методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) с ионным травлением по глубине. Для анализа была выбрана фотоэлектронная линия Ga_{2p} . Фотолюминесцентные свойства изучались в стандартной схеме с синхронным детектированием с возбуждением на длине волны ~ 245 нм. Структура синтезированных образцов изучалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) поперечного среза.

Результаты и их обсуждение

Определяющим фактором при ионном синтезе является химический состав имплантированных образцов, и особенно – наличие химических связей Ga-O, служащих основой для формирования включений Ga_2O_3 . Исследование состава имплантированных образцов без отжига выявило сильную зависимость как от типа оксидной матрицы, так и от порядка имплантации. Для имплантированных образцов SiO_2/Si образование связей Ga-O происходит во всех использованных случаях, причем интересным является факт образования связей с кислородом в образце без дополнительного облучения кислородом, что свидетельствует об участии кислорода из матрицы. Для матрицы Al_2O_3/Si концентрация имплантированного галлия заметно ниже расчетной, что, по всей видимости, обусловлено потерей атомов галлия уже в процессе имплантации. Также в случае облучения галлием в отсутствие дополнительной имплантации кислорода образование связей Ga-O не наблюдается. Отжиг при температуре 900 °С в атмосфере азота имплантированных образцов Al_2O_3/Si приводит к дальнейшей потере имплантированного галлия. Для образцов SiO_2/Si ситуация иная. После отжига наблюдается снижение концентрации галлия в металлическом состоянии с одновременным увеличением концентрации окисленного галлия. При этом также растет концентрация окисленного галлия в стехиометрическом состоянии для всех вариантов синтеза, за исключением имплантации кислорода до имплантации галлия, для которого наблюдается снижение концентрации галлия в состоянии Ga_2O_3 (рис. 1). В качестве возможного варианта решения этой проблемы был использован отжиг в атмосфере кислорода при прежней температуре и длительности. В результате анализа спектров РФЭС после такой термообработки было выявлено, что в содержание окисленного галлия в стехиометрическом состоянии превышает 90% от общей концентрации галлия.

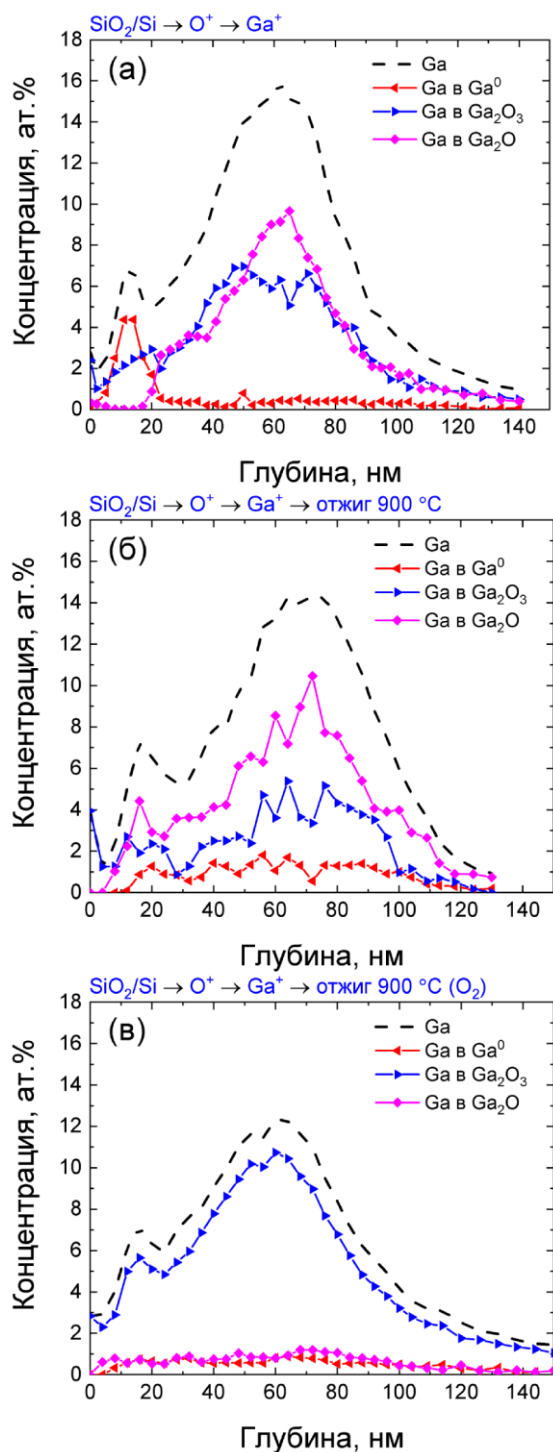


Рис. 1. Распределение атомов галлия, полученное методом РФЭС для образцов $\text{SiO}_2/\text{Si}: \text{O}^+ \rightarrow \text{Ga}^+$ до отжига (а), и после отжига при 900°C в атмосфере азота (б) и кислорода (в)

Сравнение фотолюминесцентных свойств для образцов, отожженных в атмосферах азота и кислорода, позволило установить, что в обоих случаях наблюдается широкая полоса в области 400-550

нм, предположительно связываемая с рекомбинацией донорно-акцепторных пар в оксиде галлия. Однако, интенсивность люминесценции в несколько раз выше для образца, отожженного в атмосфере кислорода, для которого также наблюдалась высокая доля содержания галлия в состоянии стехиометрического оксида Ga_2O_3 .

Исследование структуры образцов $\text{SiO}_2/\text{Si}: \text{O}^+ \rightarrow \text{Ga}^+$ после отжига в атмосфере кислорода методом ПЭМ показало формирование двух слоев темного контраста, что согласуется с данными профилей распределения галлия, полученных методом РФЭС. Обработка изображений высокого разрешения показывает, что после отжига происходит формирование нановключений Ga_2O_3 в β - и γ -фазах.

Заключение

В работе представлены результаты исследования структуры, химического состава и фотолюминесцентных свойств образцов SiO_2/Si и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$, для которых с применением метода ионного синтеза были получены нанокристаллы оксида галлия. Исследование химического состава выявило сложность образования связей Ga-O в матрице $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$, связанное, в первую очередь, с потерей имплантированного галлия. Для матрицы SiO_2/Si для отдельных вариантов ионного синтеза возможно увеличить концентрацию окисленного галлия в стехиометрическом состоянии путем отжига в атмосфере кислорода. Формирование нанокристаллов Ga_2O_3 было подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Показано, что свойства полученных образцов определяются режимами ионного синтеза.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10233, <https://rscf.ru/project/21-79-10233/>.