

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ В СВЕРХШИРОКОЗОННОМ ПОЛУПРОВОДНИКЕ $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

А.А. Никольская<sup>1)</sup>, Д.С. Королев<sup>1)</sup>, А.Н. Михайлов<sup>1)</sup>, А.В. Кудрин<sup>1)</sup>,  
В.Н. Трушин<sup>1)</sup>, П.А. Юнин<sup>1), 2)</sup>, М.Н. Дроздов<sup>2)</sup>, А.А. Конаков<sup>1)</sup>,  
А.А. Ревин<sup>1)</sup>, Е.В. Окулич<sup>1)</sup>, Д.И. Тетельбаум<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
пр. Гагарина 23/3, Нижний Новгород 603022, Россия

<sup>2)</sup>Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Нижний Новгород 603095, Россия,  
nikolskaya@nifti.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru, mian@nifti.unn.ru, kudrin@nifti.unn.ru,  
trushin@phys.unn.ru, yunin@ipmras.ru, drm@ipmras.ru, konakov@nifti.unn.ru,  
revinalexandre@yandex.ru, jenuha@ya.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

Оксид галлия (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) в последнее время привлекает большое внимание в связи с перспективой его применения в силовой электронике и ряде других областей. При этом важную роль играет разработка контролируемых и воспроизводимых способов легирования этого материала различными примесями. Наиболее употребительным методом легирования полупроводников является ионная имплантация. Однако, для Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> исследование закономерностей ионной имплантации находится еще в начальной стадии. В настоящей работе начат цикл работ по выявлению закономерностей ионно-лучевой модификации свойств Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Рассмотрено изменение структуры и электрофизических параметров слоев монокристаллического  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, подвергнутого облучению ионами Si<sup>+</sup>, в зависимости от режимов имплантации и последующего отжига. Обсуждаются фазовые превращения в эпитаксиальных плёнках Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, облученных ионами Si<sup>+</sup>. Исследовано изменение структурного совершенства слоев  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в процессе облучения ионами В<sup>+</sup> и последующего отжига. Обнаружено сильное перераспределение имплантированного бора в процессе постимплантационного отжига.

**Ключевые слова:** оксид галлия; ионная имплантация; разупорядочение структуры; фазовые превращения; ионное легирование; электрофизические свойства; перераспределение примеси

## SOME FEATURES OF ION IMPLANTATION IN ULTRAWIDE BAND GAP SEMICONDUCTOR $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

A.A. Nikolskaya<sup>1)</sup>, D.S. Korolev<sup>1)</sup>, A.N. Mikhaylov<sup>1)</sup>, A.V. Kudrin<sup>1)</sup>, V.N. Trushin<sup>1)</sup>,  
P.A. Yunin<sup>1), 2)</sup>, M.N. Drozdov<sup>2)</sup>, A.A. Konakov<sup>1)</sup>, A.A. Revin<sup>1)</sup>, E.V. Okulich<sup>1)</sup>, D.I. Tetelbaum<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,  
23/3 Gagarina Ave., 603022 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2)</sup>Institute for Physics of Microstructure of the RAS, GSP-105, 603950 Nizhny Novgorod, Russia,  
nikolskaya@nifti.unn.ru, dmkorolev@phys.unn.ru, mian@nifti.unn.ru, kudrin@nifti.unn.ru,  
trushin@phys.unn.ru, yunin@ipmras.ru, drm@ipmras.ru, konakov@nifti.unn.ru,  
revinalexandre@yandex.ru, jenuha@ya.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

Gallium oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) has recently received considerable attention due to its potential application in power electronics and a variety of other areas. At the same time, it is important to develop controlled and reproducible methods for doping this material with various impurities. Among the most commonly used methods for doping semiconductors is ion implantation. However, for Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the study of the regularities of ion implantation is still in its early stages. In this study, a series of experiments aimed at revealing the patterns of ion-beam modification of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> properties has been initiated. The changes in the structure and electrical parameters of single-crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers after being subjected to Si<sup>+</sup> ion irradiation are analyzed, taking into consideration the implantation mode and subsequent annealing. Additionally, it discusses the phase transformations of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial films caused by Si<sup>+</sup> ion irradiation. The research investigates the changes in the structural perfection of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layers during irradiation with B<sup>+</sup> ions and subsequent annealing. Strong boron implant redistribution was discovered during post-implantation annealing.

**Keywords:** gallium oxide; ion implantation; structural disorder; phase transformations; ion doping; electrophysical properties; impurity redistribution.

## Введение

В последние годы возник взрывной интерес к давно известному, но ранее мало изученному полупроводнику  $Ga_2O_3$ . Этот интерес связан с потребностями ряда областей индустрии (электротранспорт, связь, экология, безопасной в горной промышленности и др.) в электронных приборах, создаваемых на базе сверхширокозонных полупроводников, среди которых  $Ga_2O_3$  занимает лидирующие позиции благодаря своим уникальным свойствам (высокое пробивное напряжение, фоточувствительность к УФ излучению, термо- и радиационная стойкость, газочувствительность к взрывоопасным газам и кислороду при высоких температурах и др.) [1]. Хорошо известно, что наиболее эффективным способом модификации свойств материалов, необходимым при изготовлении полупроводниковых приборов, является ионная имплантация. Однако, для  $Ga_2O_3$  исследование закономерностей ионной имплантации находятся еще в эмбриональной стадии [1].

Между тем, исследования в данной области требуют наиболее детального, дифференцированного подхода в связи с рядом особенностей, присущих данному методу.  $Ga_2O_3$  обладает ярко выраженным полиморфизмом. Среди его полиморфных модификаций стабильной при нормальных условиях является только одна –  $\beta$ -фаза, исследования которой сталкиваются с трудностью, обусловленной низкой симметрией – моноклинная сингония, существование нескольких кристаллографически независимых позиций атомов Ga и O, а также междоузельных позиций, ионный характер связей, фазовые превращения при внешних воздействиях, отсутствие данных о потенциальных межатомных взаимодействиях, что затрудняет компьютерное моделирование процессов методом молекулярной динамики и др.

В последнее время нами начат цикл исследований в области ионной имплантации  $Ga_2O_3$ . Ниже изложены основные полученные результаты.

## Основная часть

1. Ионное легирование  $\beta-Ga_2O_3$  кремнием. Кремний в  $Ga_2O_3$  является мелким донором (замещая атомы галлия) и наиболее часто используется при изготовлении полевых транзисторов, диодов и др. для создания сильнолегированных областей с целью формирования омических контактов. Нами исследовались структурные и электрофизические свойства ионнолегированных кремнием слоёв. Использовались полуизолирующие кристаллы  $\beta-Ga_2O_3:Fe$ , с ориентацией поверхности (010) и (-201). Энергия ионов  $Si^+$  составляла 100 кэВ, доза варьировалась в интервале  $1 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , отжиг проводился в интервале температур 600 – 1000 °С. Изучение структурного совершенства облученных образцов методом рентгеновской дифракции показало, существование нарушенного слоя, испытывающего деформацию сжатия в латеральном направлении (что свидетельствует о доминировании дефектов междоузельного типа). После отжига при 850 °С деформация исчезает, то есть структура восстанавливается. Наиболее важной и неожиданный результат, полученный при измерении электрофизических свойств (методом эффекта Холла), сообщает о том, что при определенных дозах и высоких температурах отжига (850-950 °С) концентрация электронов существенно превышает концентрацию имплантированных атомов Si, то есть в легированном слое, наряду с кремнием присутствуют мелкие доноры, связанные с остаточными дефектами. При увеличении дозы или температуры отжига выше некоторых значений эффективность легирования резко снижается, предположительно вследствие образования дефектов другого типа, либо замещение кремнием узлов кислородной подрешётке, где Si также служит акцептором.

2. Методом рентгеновской дифракции установлено, что структура облученного ионами  $Si^+$   $\beta-Ga_2O_3$  до отжига сильно зависит от ориентации поверхности кристаллов. Если для ориентации (-201) су-

шествует латеральное сжатие, то для (010), наоборот, растяжение, причём степень разупорядочения выше, чем для (-201). Это объясняется анизотропией решётки  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ , определяющей возможность миграции междоузельных атомов по открытым каналам  $\langle 010 \rangle$  к поверхности и их аннигиляции на поверхности [2].

3. Тем же методом установлена возможность превращения фазы  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  в фазу  $\epsilon(\kappa)$  при облучении эпитаксиальных плёнок  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  на подложке сапфира.

4. При ионном легировании  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  ионами  $\text{B}^+$  с энергией 40 кэВ установлено, что при достаточно больших дозах наблюдается сильное перераспределение атомов бора в результате отжига: атомы бора испытывают миграцию в область с максимальной концентрацией радиационных дефектов, вследствие чего на профиле распределения примеси формируются два максимума [3]. При меньших дозах такое явление не наблюдается. Предполагается, что сегрегация происходит в процессе твердофазной рекристаллизации сильно разупорядоченного слоя.

5. Компьютерное моделирование из первых принципов показало, что при высоких концентрациях бора замещение атомами этой примеси вакансий Ga энергетически невыгодно. Также из первых принципов рассчитана зонная структура  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  при различных концентрациях бора и установлено противоположное по знаку изменение ширины запрещенной зоны для прямых и непрямых межзонных переходов.

## Заключение

Полученные результаты показали нетривиальные закономерности ионной имплантации  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  требующие большего объема дальнейших экспериментальных и теоретических исследований. В частности, актуальной остаётся проблема установления возможности получения с помощью данного метода оксида галлия р-типа, так как до сих пор не получена достаточно надёжных данных о создании дырочного материала  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  с достаточной для практики проводимостью путём легирования акцепторными примесями, хотя теоретические работы представляют некоторые достижения этой цели. Ионная имплантация, будучи сугубо неравновесным методом, представляется наиболее перспективной областью для таких исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-00052, <https://rscf.ru/project/23-79-00052/>.

## Библиографические ссылки

1. A. Nikolskaya, E. Okulich, D. Korolev, A. Stepanov, D. Nikolichev, A. Mikhaylov, D. Tetelbaum, A. Almaev, C.A. Bolzan, A. Buaczik, R. Giulian, P.L. Grande, A. Kumar, M. Kumar, D. Gogova Ion implantation in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ : Physics and technology. *Applied Physics Reviews* 2021; 39: 030802.
2. V. Trushin, A. Nikolskaya, D. Korolev, A. Mikhaylov, A. Belov, E. Pitirimova, D. Pavlov, D. Tetelbaum Disordering of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  upon irradiation with  $\text{Si}^+$  ions: effect of surface orientation. *Materials Letters* 2022; 319: 132248.
3. A.A. Nikolskaya, D.S. Korolev, V.N. Trushin, M.N. Drozdov, P.A. Yunin, E.A. Pitirimova, A.V. Kudrin, E.V. Okulich, V.I. Okulich, A.N. Mikhaylov, D.I. Tetelbaum Structural disorder and distribution of impurity atoms in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  under boron ion implantation. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* 2023; 537: 65-70.