

Изменение свойств бета-Ga₂O₃ под действием имплантации ионов Si⁺

nikolskaya@nifti.unn.ru +7(962)-510-24-34

А.А. Никольская, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.В. Кудрин, А.В. Нежданов, В.Н. Трушин, Е.А. Питиримова, Д.А. Павлов, Д.Е. Николичев, Р. Н. Крюков, Д.И. Тетельбаум

1

Аннотация

Оксид галлия и его наиболее стабильная бета-модификация (β -Ga₂O₃) – широкозонный полупроводник ($E_g \approx 5$ эВ), наиболее перспективный для нового поколения целого ряда важнейших областей электронной техники – силовая электроника, термостабильные газовые сенсоры кислорода и водорода, детекторы ультрафиолетового излучения и др. Однако, разработка физических основ метода ионной имплантации для этого материала находится в начальной стадии. Наша работа посвящена исследованию ключевых для физики ионной имплантации процессов – разупорядочение структуры и связанной с этим эффективности ионного легирования при облучении и последующем отжиге монокристаллов β -Ga₂O₃ ионами донорной примеси – Si. Установлены не характерные для «традиционных» полупроводников факты: сильная зависимость указанных факторов от ориентации поверхности и немонотонная зависимость эффективности (электрических свойств) от дозы облучения. Предложен вариант объяснения этих особенностей. Впервые установлена возможность создания путем ионного легирования кремнием слоя *p*-типа. Получение *p*-типа является одной из важнейших и трудно разрешаемых для Ga₂O₃ задач.

2 Методика эксперимента

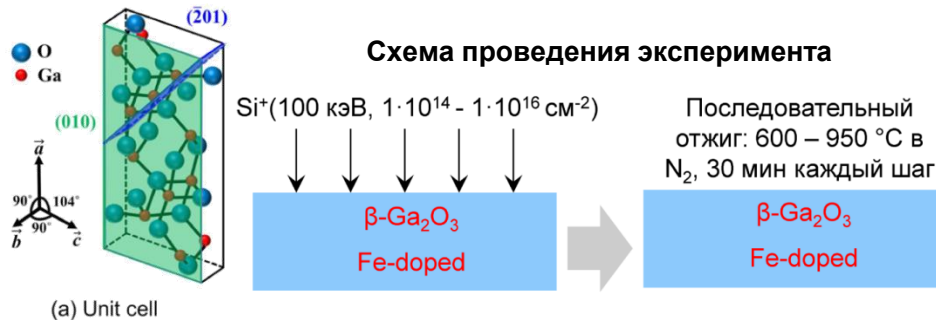


Рис. 1. Элементарная ячейка β -Ga₂O₃ с обозначенными ориентациями (-201) и (010)

3 Результаты и обсуждение

Исследование структуры [1]

После имплантации (без отжига) механические напряжения облученного слоя определенные методом XRD (рис. 2) имеют разный знак: сжатие для ориентации (-201) и растяжение для (010).

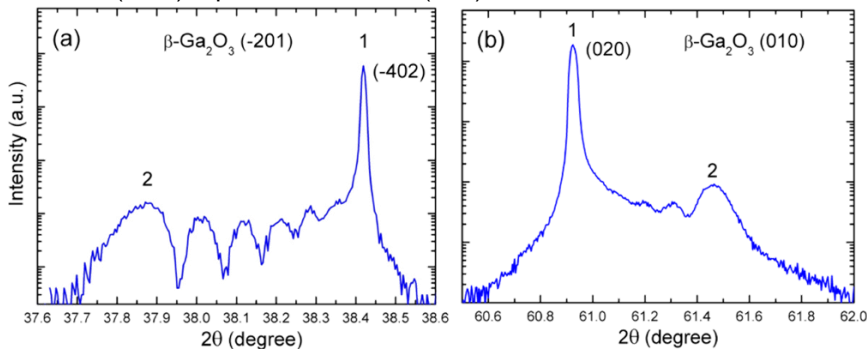


Рис. 2. Дифрактограммы β -Ga₂O₃ с ориентациями (-201) (a) и (010) (b), облученный ионами Si⁺ с дозой $4 \cdot 10^{14}$ см⁻², без отжига.

По мере отжига напряжения уменьшаются, а их знаки становятся одинаковыми (таблица 1).

Таблица 1. Изменение напряжений с температурой отжига.

Температура отжига, °C	Образец	Напряжение, ГПа
-	-201	9.91
	010	-5.92
600	-201	1.61
	010	1.14
750	-201	0.50
	010	0.67
850	-201	0.56
	010	1.36
950	-201	-
	010	0.25

Степень структурного разупорядочения при ионном облучении, определенная с помощью XRD, электронографии и оптической спектроскопии, монотонно увеличивается с ростом дозы и снижается в результате отжига. Причем для ориентации (010) она выше, чем для (-201). Такое различие объясняется, по-видимому, различными условиями для миграции и поверхностной сегрегации точечных дефектов из-за сильной анизотропии атомной структуры моноклинной фазы β -Ga₂O₃, в частности, наличия широких открытых каналов направленных вдоль оси [010] (рис. 1).

4 Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 19-57-80011). Никольская А.А. признательна за поддержку в рамках Стипендии Президента РФ (СП-1894.2021.5).

Электрические характеристики образцов

Зависимость степени электрической активации имплантированных атомов Si от дозы изучалась методом измерения эффекта Холла и имеет аномальный характер. Близкая к 100 % активация была выявлена только для ориентации (-201) при дозе облучения $4 \cdot 10^{14}$ см⁻² (рис. 3), а для ориентации (010) степень активации оказалась не выше 5% для всех использованных доз.

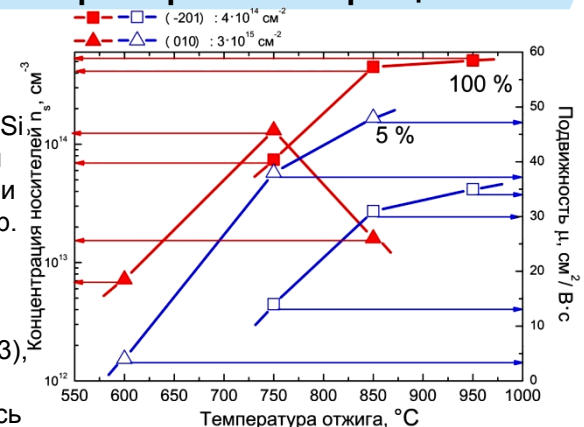


Рис. 3. Зависимость концентрации носителей заряда (левая шкала, красные кривые) и подвижности (правая шкала, синие кривые) от температуры отжига.

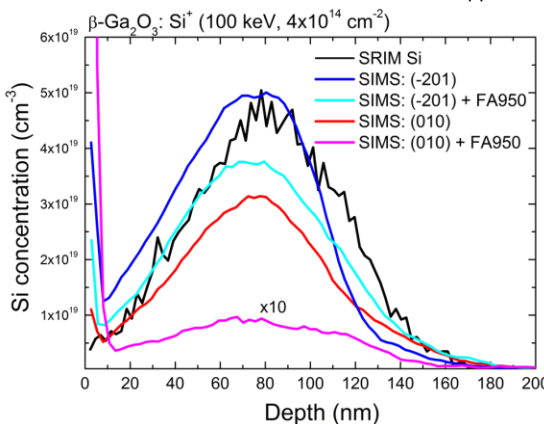


Рис. 4. Распределение ионов Si⁺ в β -Ga₂O₃ до и после отжига. Также приведено расчетное распределение ионов.

По данным вторично-ионной масс-спектрометрии видно (рис. 4), что после отжига для ориентации (-201) происходит небольшое расплывание профиля кремния, а для ориентации (010) происходит существенная сегрегация атомов легирующей примеси к поверхности. Исходя из этих данных понятно, что активация примеси для ориентации (010) не происходит по причине аутодиффузии ионов кремния из образца.

Важным результатом является наличие проводимости *p*-типа, наблюдаемое для образца (-201) при дозе $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² и температуре отжига 600°C: создание *p*-типа – одна из главных и труднодостижимых задач!

Зависимость проводимости *p*-слоя от температуры измерения (рис. 5) выявила наличие двух энергий активации (0.517 и 0.182 эВ), предположительно связанных с прыжковой проводимостью дырок по локализованным и нелокализованным состояниям, соответственно.

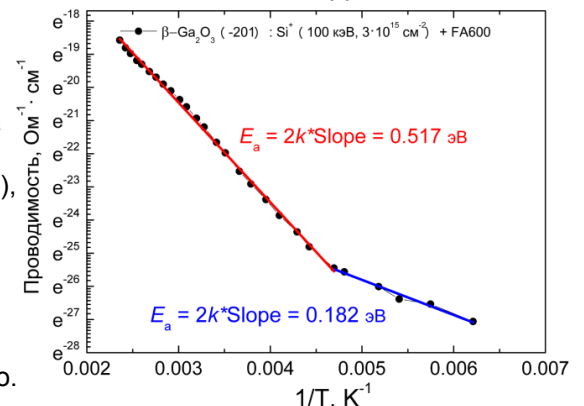


Рис. 5. Зависимость проводимости образца β -Ga₂O₃ облученного с дозой $3 \cdot 10^{15}$ см⁻² и отожженного при 600°C от температуры измерения.

Однако, в результате длительного хранения на воздухе, а также при дальнейшем отжиге при более высоких температурах *p*-слой переходит в *n*-тип.

Таким образом, проблема ионного легирования кремнием β -Ga₂O₃ не тривиальна и требует дальнейших исследований. Требуется также найти пути стабилизации дырочной проводимости и ее повышения.