

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

д-р физ.-мат. наук, профессор



О.П. Толбанов

« 14 » июня 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

СОЛНЕЧНО-СЛЕПЫЕ ДЕТЕКТОРЫ УФ-ДИАПАЗОНА

по основной образовательной программе подготовки магистров

направление подготовки 03.04.03 – Радиофизика

Цымбалов Александр Вячеславович

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук



В.М. Калыгина

« 13 » июня 2021 г.

Автор работы

студент группы № 753



А.В. Цымбалов

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра полупроводниковой электроники (КПЭ)

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
д-р физ.-мат. наук, профессор

О.П. Толбанов
25 октября 2019 г.

ЗАДАНИЕ
по подготовке ВКР магистра
студенту Цымбалову Александру Вячеславовичу группы № 753

1. Тема ВКР: Солнечно-слепые детекторы УФ-диапазона

2. Срок сдачи студентом выполненной ВКР:

а) на кафедре 07.06.2021,
б) в ГЭК 16.06.2021

3. Краткое содержание работы:

Работа направлена на разработку солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового излучения на основе полиморфных фаз оксида галлия. Исследование фотоэлектрических детекторов будет проводиться при помощи измерения вольт-амперных характеристик в отсутствии и при наличии ультрафиолетового излучения.

4. Календарный график выполнения ВКР:

а) изучение литературы	01.09.2019–01.01.2020
б) подготовка образцов и ознакомление с МДР	01.01.2020–01.06.2020
в) проведение экспериментов и анализ их результатов	01.06.2020–01.04.2021
г) написание текста ВКР	01.04.2021–15.05.2021
д) подготовка доклада и презентации работы	15.05.2021–01.06.2021

5. Дата выдачи задания «24» октября 2019 г.

Руководитель ВКР –
кандидат физ.-мат. наук,
доцент ТГУ



В.М. Калыгина

Задание принял к исполнению



А.В. Цымбалов

АННОТАЦИЯ

Магистерская диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и списка использованных источников. Работа изложена на 62 страницах машинописного текста, включая 27 страниц литературного обзора на данную тематику. Использовано 45 источников литературы. Работа содержит 46 рисунков, 4 формул и 4 таблиц.

ОКСИД ГАЛЛИЯ, УЛЬТРАФИОЛЕТ, ДЕТЕКТОРЫ, СОЛНЕЧНО-СЛЕПЫЕ, ПОЛИМОРФ.

Объект исследования: солнечно-слепые детекторы ультрафиолетового излучения на основе полиморфных пленок оксида галлия с различной топологией электродов.

Цель работы: разработка оптимального способа получения солнечно-слепых детекторов на основе пленок оксида галлия.

В процессе работы был проведен литературный обзор, отражающий физико-химические свойства, электрические и фотоэлектрические характеристики пленок оксида галлия, а также детекторов различной конструкции.

Проведенные исследования показали, что отжиг аморфных пленок оксида галлия позволяет увеличить фототок на 1-2 порядка. Было показано, что механизм протекания темнового тока в двухэлектродных детекторах определяется инжекцией электронов из металла в диэлектрик. Применение встречно-штыревых электродов значительно повышает фотоэлектрические характеристики сенсоров. Снижение межэлектродного расстояния ведет к увеличению значения фототока детекторов, что обуславливается возрастанием вероятности ударной ионизации. Выявлено, что полиморфная пленка $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3/\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ представляет практический интерес для нанесения встречно-штыревой топологии электродов с целью увеличения фотоэлектрических характеристик.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Физико-химические свойства полиморфных фаз оксида галлия и структур на их основе	10
1.1 Зонная структура и физические характеристики полиморфов Ga_2O_3	10
1.2 Электрические и фотоэлектрические свойства пленок оксида галлия. Влияние легирования	13
1.3 Детекторы УФ-излучения на основе пленок оксида галлия	20
1.4 Основные параметры детекторов УФ-излучения	34
1.5 Выводы по главе 1 и постановка задачи	36
2 Методика эксперимента	37
3 Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок β -фазы оксида галлия	42
3.1 Резистивные структуры с двумя параллельными электродами	42
3.2 Детекторы со встречно-штыревыми электродами	46
3.2.1 Образцы неподверженные термическому отжигу	46
3.2.2 Отоженные образцы	47
3.3 Вывод по главе 3	51
4 Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок α - и ε -фаз оксида галлия.	51
4.1 Вольт-амперные характеристики образцов на основе α - Ga_2O_3	51
4.2 Вольт-амперные характеристики и эффект переключения структур на основе пленок, содержащих α - и ε - Ga_2O_3	52
4.3 Вывод по главе 4	59
Заключение	60
Список использованных источников	61

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Интерес к созданию солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового (ДУФ) излучения на основе пленок оксида галлия (Ga_2O_3) обусловлен: наличием широкой шириной запрещенной зоны соединения $E_g = 4.4\text{--}5.3$ эВ, которая варьируется в зависимости от фазового состава пленки; селективностью к солнечному и ближнему ультрафиолетовому излучениям; низкой себестоимостью материала и простотой изготовления структур; химической и термической стабильностями [1–3]. Подбор фазового состава пленок оксида галлия, материала и топологии электродов активной области детектора обеспечивает возможность повышения фотоэлектрических характеристик и снижения рабочего напряжения сенсора [4]. Помимо этого, последние два года происходят попытки в направлении создания устройств визуализации изображения в ультрафиолетовом диапазоне, состоящих из матричных элементов [5, 6].

В настоящее время рассматриваются возможности применения ДУФ на основе Ga_2O_3 в военно-промышленном комплексе для создания систем противовоздушной обороны, а также в гражданских целях для производства: датчиков огня, систем контроля, космических приемников в УФ-диапазоне, устройств отслеживания состояния озонового слоя Земли и т.д. [7]. Такой подход позволит удешевить ныне существующие аналоги устройств.

В основе работы резистивных солнечно-слепых детекторов УФ-излучения лежит явление генерации носителей заряда падающими фотонами внешнего воздействия, при условии того, что энергия кванта E_p больше или равна ширине запрещенной E_g зоны оксида галлия. Носители заряда, созданные излучением, начинают двигаться в направлении электродов под приложенным внешним полем и увеличивают проводимость пленок. В ходе движения, свободные электроны, набравшие достаточную энергию в электрическом поле, могут ионизировать валентные электроны атомов за счет

передачи кинетической энергии. Такие электроны называются “горячими”, а процесс их умножения называется ударной ионизацией. Увеличение напряженности электрического поля между электродами ведет к повышению кинетической энергии электронов и вероятности ионизации атомов, следовательно, происходит возрастание числа “выбитых” носителей заряда, что приводит к резкому росту тока.

Степень разработанности темы исследования. В последние годы происходила разработка солнечно-слепых детекторов УФ-излучения преимущественно на основе пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$. В первую очередь это обусловлено тем, что данная фаза является химически и термически стабильной, а также обладает относительной простотой получения [8]. Исключая последние несколько лет была слабо отработана технология получения остальных фаз оксида галлия, несомненно представляющих интерес для электронного приборостроения.

На сегодняшний день исследования направлены на поиск оптимальной конструкции солнечно-слепых ДУФ. Активная область (АО) детектора должна обладать высокими фотоэлектрическими характеристиками и малым временем релаксации. Показано, что использование электродов со встречно-штыревой топологией позволяет повысить чувствительность сенсоров к ультрафиолетовому излучению на несколько порядков [9, 10]. Внедрение определенных примесей в пленку и подбор ее фазового состава позволит снизить времена отклика и восстановления.

Целью диссертационной работы является разработка солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового диапазона на основе пленок оксида галлия. В связи с этим, были поставлены следующие **задачи**:

1. Составление обзора литературы по методам получения пленок оксида галлия и конструкциям УФ-детекторов.
2. Ознакомление с технологическими способами изготовления структур, чувствительных к УФ излучению; выбор методики изготовления образцов.

3. Ознакомление с методиками измерения спектральной чувствительности образцов при использовании монохроматора МДР. Обработка результатов измерений.

4. Обобщение результатов НИР, составление и редактирование текста диссертации.

Научная новизна:

1. Показано влияние встречно-штыревой топологии контактов с различным межэлектродным расстоянием на фотоэлектрические характеристики детекторов на основе пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

2. Обнаружен участок насыщения на ВАХ детекторов, имеющих встречно-штыревую топологию электродов, который сдвигается в область меньших напряжений с сокращением межэлектродного расстояния.

3. Для детекторов на основе полиморфной пленки $\alpha\text{-}\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ был обнаружен эффект переключения из состояния с низким сопротивлением в состояние с высоким сопротивлением при воздействии УФ-излучения и сильного электрического поля.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется рассмотрением механизмов переноса носителей заряда в детекторах УФ излучения на основе пленок оксида галлия с разным фазовым составом. Полученные результаты позволили установить топологию и материал электрических контактов, обеспечивающих высокие значения параметров УФД, включая возможность увеличения фототока на несколько порядков без изменения значений темнового тока.

Результаты исследований помогут улучшить характеристики солнечно-слепых детекторов на основе пленок оксида галлия и снизить себестоимость производства. Это позволит создавать коммерчески выгодные устройства, такие как: датчики пожара, устройства контроля, системы ПВО и т.д.

Методология и методы исследования. В работе исследовались фотоэлектрические характеристики солнечно-слепых детекторов

ультрафиолетового излучения, имеющих различные типы активных областей, включая α -, β - и ε -Ga₂O₃.

Измерения вольт-амперных характеристик структур проводились при помощи облучения детекторов ультрафиолетовым излучением с длиной волны λ – 254 и 222 нм и в его отсутствии. Были получены следующие параметры детекторов: контраст (отношение тока при воздействии излучения I_L к темновому току I_D), удельная обнаружительная способность, величина отклика как функция напряжения на структуре, времена отклика и восстановления. Лучшие значения фотоэлектрических характеристик обнаружены для детекторов, имеющих встречно-штыревую топологию контактов с межэлектродным расстоянием $d = 5$ мкм.

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводилось в определенном диапазоне напряжений, который определялся исходя из особенностей конструкции детекторов. Такой подход обусловлен высокими значениями напряженности электрического поля, которые могли привести к разрушению электрических контактов к оксидной пленке.

Расчет фотоэлектрических характеристик проводился по общепринятым формулам, обычно используемым в литературе [11].

Положения, выносимые на защиту:

1. Отжиг пленок в аргоне при 900°C в течение 30 минут увеличивает фототок структур на 1-2 порядка, что объясняется изменением фазового состава оксида галлия.
2. Использование встречно-штыревой топологии позволяет улучшить фотоэлектрические характеристики УФД и на несколько порядков повысить фототок.
3. Большие значения отклика и обнаружительной способности ДУФ на основе пленок Ga₂O₃ объясняются эффектом внутреннего усиления, обусловленного повышением вероятности ударной ионизации в сильном электрическом поле.

Степень достоверности результатов исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается при помощи неоднократно проведенных экспериментов при использовании самого современного измерительного оборудования, сопрягаемого с ЭВМ, и специально разработанных программ.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований были представлены на следующих научных конференциях и конкурсах: 5-я школа-конференция с международным участием по оптоэлектронике, фотонике и наноструктурам «Saint Petersburg OPEN 2018» (Санкт-Петербург, 2018), 8-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2019), Всероссийский инженерный конкурс конференция «ВИК-2019» (Симферополь, 2019), CSW 2021 (Осло, 2021, онлайн). Помимо докладов на мероприятиях, результаты работы были опубликованы в научных статья, цитируемых WoS, ВАР и РИНЦ.

1 Физико-химические свойства полиморфных фаз оксида галлия и структур на их основе

1.1 Зонная структура и физические характеристики полиморфов Ga_2O_3

Существует пять фаз, в которых может кристаллизоваться оксид галлия: α -, β -, γ -, δ -, ε -фазы [12]. Каждая фаза отличается друг от друга кристаллической структурой и физико-химическими свойствами. Полиморфные соединения оксида галлия отличаются не только пространственными группами, но и координационным числом ионов галлия. Из всех пяти фаз наибольший практический интерес представляют α - и β -фазы, т.к. они являются наиболее устойчивыми.

$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ – бесцветные кристаллы, относящиеся к тригональной сингонии (рис. 1а). Эта фаза оксида галлия может быть получена с помощью нагревания $\text{GaO}(\text{OH})$ в воздухе в диапазоне температур от 450°C до 550°C . Плотность $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ – 6.48 г/см^3 , а температура плавления – 1740°C . Данный полиморф нерастворим в воде, но растворяется в большинстве кислот; удельное сопротивление $\rho \approx 6 \cdot 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{см}$; эффективная масса электронов $m_e^* = 0.276 m_0$.

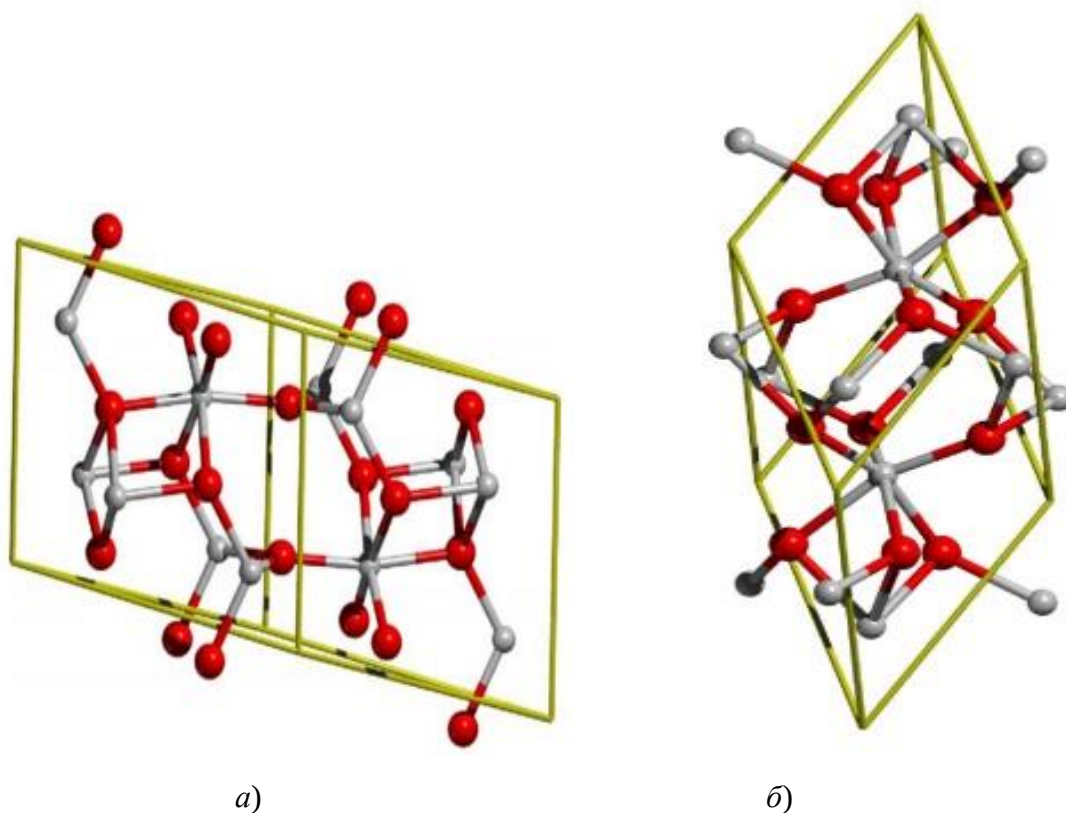


Рисунок 1 – Кристаллические структуры: α -Ga₂O₃ (a) и β -Ga₂O₃ (б) [13].

β -Ga₂O₃ – бесцветные кристаллы, относящиеся к моноклинной сингонии (рис. 1б). Данная фаза может быть получена при отжиге любой другой полиморфной формы Ga₂O₃ в воздухе, при температуре близкой к 900 °С [14]. Бета-оксид галлия мало растворим в воде, кислотах и щелочах. Плотность β -Ga₂O₃ – 5.88 г/см³, а температура плавления 1725°С; эффективная масса электронов $m_e^* = 0.28m_0$.

Элементарная ячейка β -Ga₂O₃ (рис. 1б) содержит два кристаллографически неэквивалентных атомов галлия: один с тетраэдрической геометрией Ga (I), а другой с октаэдрической геометрией: Ga (II). Кислородные ионы образуют так называемый «нарушенный куб» с плотной упаковкой. Они занимают три кристаллографически различные положения, обозначаемые как O(I), O(II) и O(III). Два кислородных атома с тригональной координатной ориентацией, а один – тетраэдрической. Простота получения и высокая химическая стойкость β -Ga₂O₃ позволяют рассматривать

данную фазу как многообещающее соединение в создании устройств, устойчивых при повышенных температурах и в кислотных средах.

На основе теоретических расчетов была построена структура энергетических зон $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (рис. 2), из которой следует, что минимум зоны проводимости находится в точке Γ зоны Бриллюэна. Валентная зона практически плоская, но в точке M имеется небольшой размытый максимум, который на 0,03 эВ больше энергии активации валентной зоны в точке Γ . Энергия активации прямых переходов $\Gamma \rightarrow \Gamma$ составляет 4.69 эВ, а не прямых $\Gamma \rightarrow M$ – 4.66 эВ. В работах Varley и Pailares показано, что $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ не прямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 4.83 и 4.87 эВ для не прямых и прямых переходов соответственно [15]. Так как энергии активации прямых и не прямых переходов практически не отличаются, то вероятность прямых переходов выше, что позволяет рассматривать данный полупроводник как прямозонный.

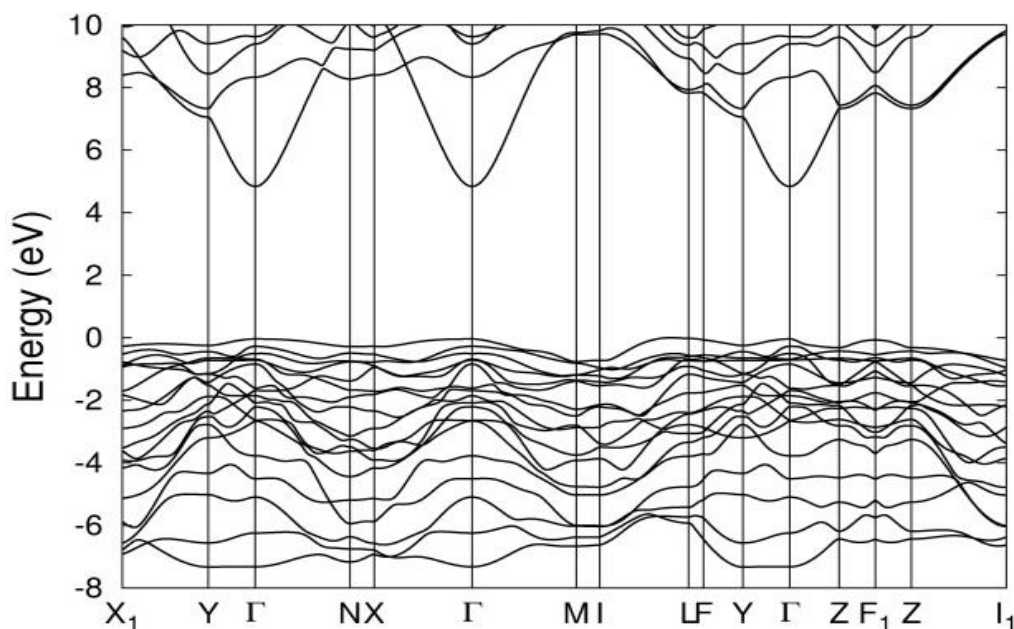


Рисунок 2 – Расчетная структура энергетических зон в $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [15].

Электронная эффективная масса $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ почти изотропна и составляет 0.27 – 0.28 m_0 . Эффективная масса дырок с учетом структуры валентной зоны равна 40 m_0 при движении вдоль направления $\Gamma - Z$ и 0.40 m_0 при движении вдоль направления $\Gamma - A$.

ϵ -Ga₂O₃ является ферроэлектриком со спонтанной поляризацией, в котором возможно создание двумерного электронного газа [16]. Одним из преимуществ данной фазы является регулируемая ширина запрещенной зоны, которая может варьироваться в широком диапазоне – 4.5-4.9 эВ. Согласно расчетам, ϵ -Ga₂O₃ является второй по метастабильности среди фаз оксида галлия и начинает менять свой фазовой состав при длительном отжиге при температуре 700-800 °С [17]. Относясь к гексагональной *P6₃mc* пространственной группе, эпсилон-фаза Ga₂O₃ демонстрирует хороший рост на гексагональных и псевдо-гексагональных подложках, что придает интерес к ней с коммерческой точки зрения.

Остальные фазы оксид галлия (γ и δ) являются малоизученными, и на данный момент в научных работах нельзя встретить информацию, дающую общее представление об этих полиморфах.

1.2 Электрические и фотоэлектрические свойства пленок оксида галлия. Влияние легирования.

Проводимость пленок оксида галлия зависит от многих факторов: способ получения, температура подложки, парциальное давление кислорода в камере, температура окружающей среды, легирование, химический состав подложки, дальнейшая обработка Ga₂O₃ и т.д. Имея большую ширину запрещенной зоны $E_g \sim 4.4$ -5.9 эВ, оксид галлия является хорошим изолятором. Однако, он проявляет свойства полупроводника *n*-типа проводимости, если синтез или выращивание ведется в восстановительной среде. Предполагается, что это связано с отрицательно заряженными вакансиями кислорода, которые выступают в роли доноров. Проводимость оксида может меняться в диапазоне от 10^{-9} до $38 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$, путем изменения содержания кислорода в окружающей среде во время производства пленок.

Zhang в своей работе показал, что *n*-тип проводимости оксида галлия обуславлен наличием вакансий кислорода [18]. Данный вывод был сделан на

основании обнаружения сильной корреляции между проводимостью и парциальным давлением кислорода во время выращивания Ga_2O_3 . По его мнению, вакансии кислорода выступают в роли донора. Рассчитано, что донорным уровням соответствуют энергии равные: $E_{t1} = 0.32\text{эВ}$, $E_{t2} = 0.62\text{эВ}$, $E_{t3} = 0.82\text{эВ}$, $E_{t4} = 1.0\text{эВ}$, $E_{t5} = 2.16\text{эВ}$, $E_{t6} = 4.4\text{эВ}$ (рис. 3).

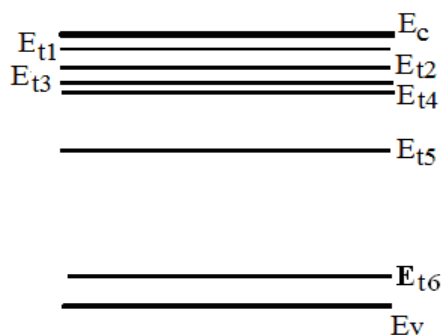


Рисунок 3 – Положение ловушечных уровней в Ga_2O_3 .

Varley и его сотрудники не согласны с утверждением Zhang. Они рассчитали, что энергия ионизации вакансий кислорода как минимум 1 эВ. В связи с этим Varley рассматривает вакансии кислорода как глубокие донорные центры, которые не вносят вклад в проводимость оксида галлия. Предполагается, что в роли мелкого донора выступают атомы водорода, которые внедряются в междоузлия кристаллической решетки Ga_2O_3 при контакте с окружающей средой [19].

N-тип проводимости в оксиде галлия получается при легировании химическими элементами IVA группы. Например, Si, Ge, Sn замещают атомы Ga. Если атомы элементов VII(A) группы таблицы Менделеева (например, Cl, F) замещают атомы кислорода, то они оказываются мелкими донорами. Атомы Si и Ge в основном замещают тетраэдрически координированный атом Ga, тогда как атом Sn вытесняет октаэдрически координированные атомы галлия. Cl и F замещают трехкоординированные состояния кислорода.

Оксид галлия, легированный кремнием, обладал высокой концентрацией носителей заряда. В работе [20] $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ был получен с помощью импульсного лазерного напыления при температуре сапфировой подложки 500 °C.

Легирование кремнием проводилось с помощью ионной имплантации. Плотность носителей заряда в пленках с содержанием кремния 0.01, 0.05, 0.1, и 0.3 вес. % составляла $1.0 \cdot 10^{15}$, $1.0 \cdot 10^{18}$, $1.7 \cdot 10^{19}$, $2.4 \cdot 10^{20}$ см^{-3} соответственно (рис. 4).

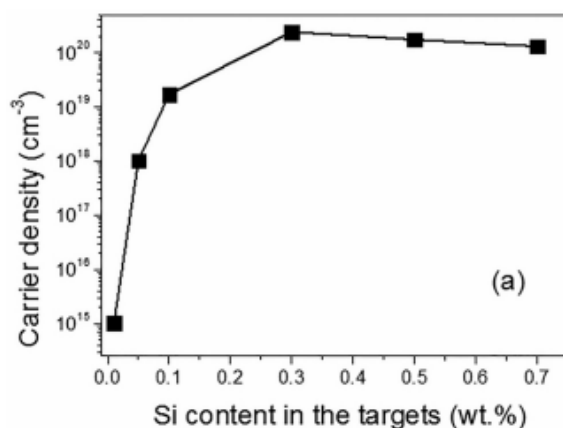


Рисунок 4 – Зависимость плотности носителей заряда $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Si}$ от содержания кремния [20].

Дальнейшее увеличение числа атомов кремния в оксиде галлия приводит к уменьшению плотности носителей заряда. Это связано с образованием вакансий галлия, которые, в свою очередь, являются глубокими акцепторами. Таким образом, плотность носителей заряда увеличилась более чем на 5 порядков с 10^{15}см^{-3} до $2.4 \cdot 10^{20}\text{см}^{-3}$. На рисунке 5 изображена проводимость $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ как функция концентрации кремния. Проводимость $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ с содержанием кремния 0.01, 0.05, 0.1 и 0.3 вес. %, составляла $4.7 \cdot 10^{-5}$, $4.0 \cdot 10^{-3}$, 0.1 и 1.3 См соответственно.

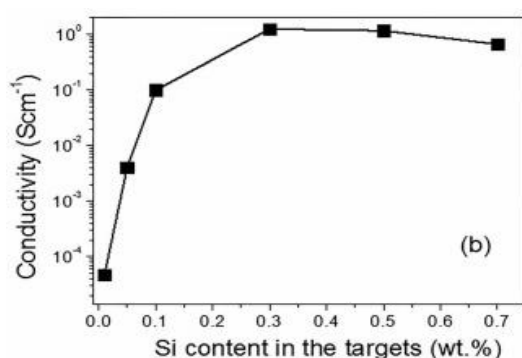


Рисунок 5 – Зависимость проводимости $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Si}$ от содержания кремния [20].

В работе [21] исследовались солнечно-слепые детекторы на основе пленок β -Ga₂O₃, легированных кремнием. Пленки оксида галлия были получены с помощью осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы, температура сапфировой подложки составляла 1200°C. Легировали β -Ga₂O₃ методом ионной имплантации. Было обнаружено, что детекторы имели быстрый отклик на излучение длин волн в диапазоне 254–365 нм (рис. 6) и высокую спектральную селективность [21]. Ссылаясь на статьи [20] и [21], мы можем предположить, что кремний ведет себя как мелкий донор для оксида галлия.

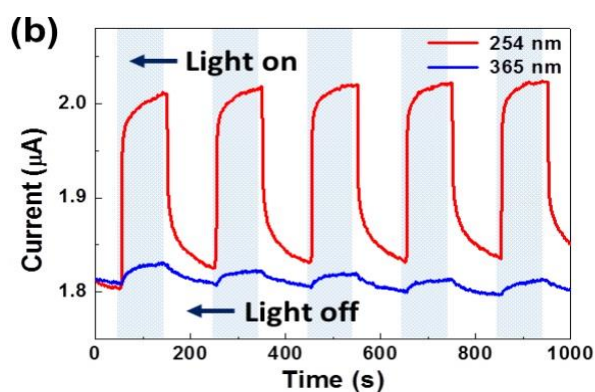


Рисунок 6 – Зависимость тока от времени детектора на основе β -Ga₂O₃:Si [21].

При легировании ε -Ga₂O₃ титаном наблюдалось изменение диэлектрической проницаемости и прозрачности Ga₂O₃ [22]. Было получено семь пленок оксида галлия, легированных титаном. Пленки оксида галлия и титана напылялись друг на друга поочередно с помощью метода вакуумного напыления; температура кремниевой подложки составляла 600 °C. Легирование происходило диффузионным методом, так как пленки титана и оксида галлия находились в непосредственном контакте. При легировании титаном от 2-6% наблюдалось существенное уменьшение диэлектрической проницаемости, связанное с изменением зонной структуры ε -Ga₂O₃ (рис. 7). Дальнейшее увеличение концентрации титана в оксиде галлия приводит к увеличению диэлектрической проницаемости. Это связано с тем, что происходит насыщение кристаллов оксида галлия атомами титана, и начинает

образовываться диоксид титана, который имеет существенно большую диэлектрическую проницаемость, чем $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Замечено сильное изменение прозрачности пленок при легировании Ti.

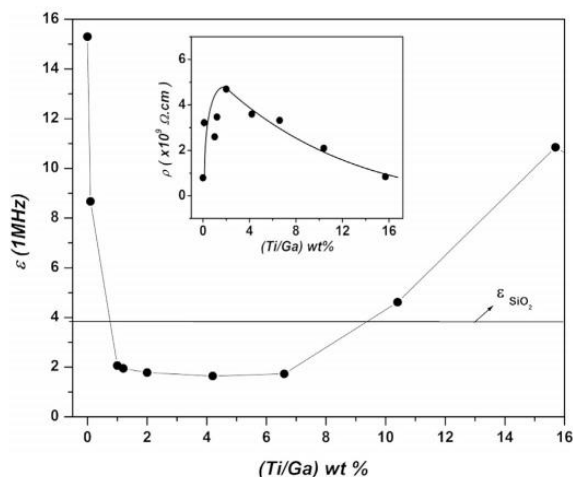


Рисунок 7 – Зависимость диэлектрической проницаемости $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ от содержания титана [22].

Уменьшение прозрачности пленок с увеличением содержания титана показано на рисунке 8.

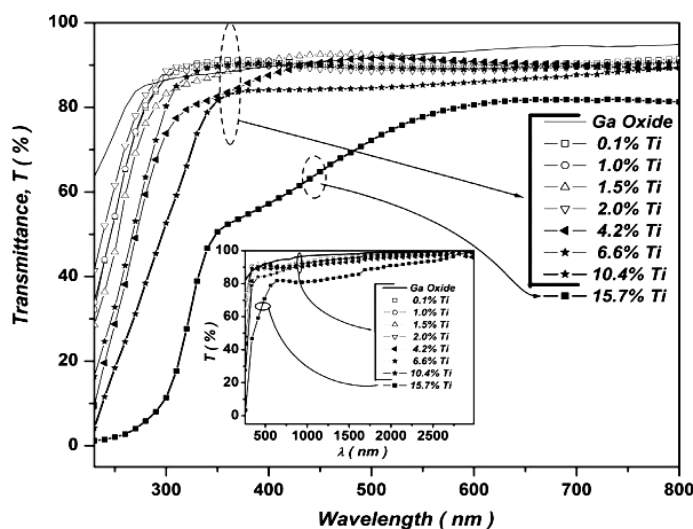


Рисунок 8 – Зависимость прозрачности пленок $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ от содержания титана [22].

Наибольшее снижение прозрачности пленок происходит при превышении содержания титана в оксиде галлия от 10.4% и более. Это объясняется тем, что при дальнейшем легировании начинают образовываться кристаллиты, обусловленные появлением диоксида титана. Удельное

сопротивление образцов в пределах $(1-5) \cdot 10^9$ Ом·см, что относит пленки $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Ti}$ к диэлектрикам.

Одним из потенциальных доноров для оксида галлия является олово. В работе Akaiwa описываются пленки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, которые были полученные методом химического осаждения из газовой фазы на сапфировые подложки при температуре 500°C . Пленки, легированные оловом, имели высокую концентрацию носителей заряда – $10^{17}\text{-}10^{19}$ cm^{-3} [23]. Было отмечено, что, чем больше отношение Sn/Ga, тем больше концентрация носителей заряда (рис. 9).

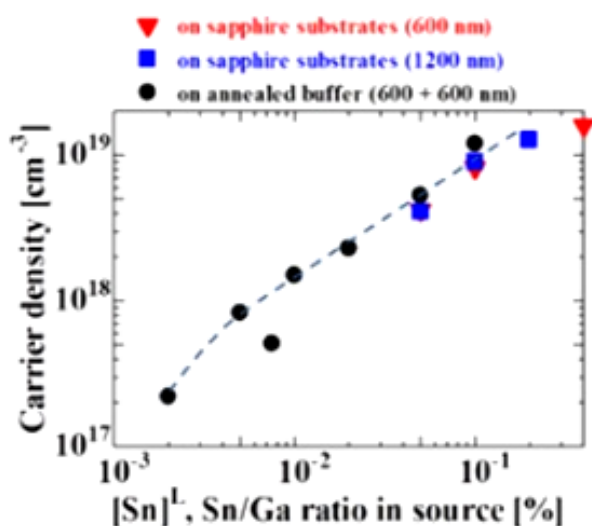


Рисунок 9 – Зависимость концентрации носителей заряда от отношения Sn/Ga [23].

Помимо этого, было обнаружено увеличение подвижности носителей заряда с $2.8 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ до $24 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$. Такие результаты были получены при увеличении толщины пленки и улучшении качества кристаллов $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$. Эмпирическим путем было установлено, что максимальная подвижность – $24 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ соответствует концентрации носителей заряда $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (рис. 10).

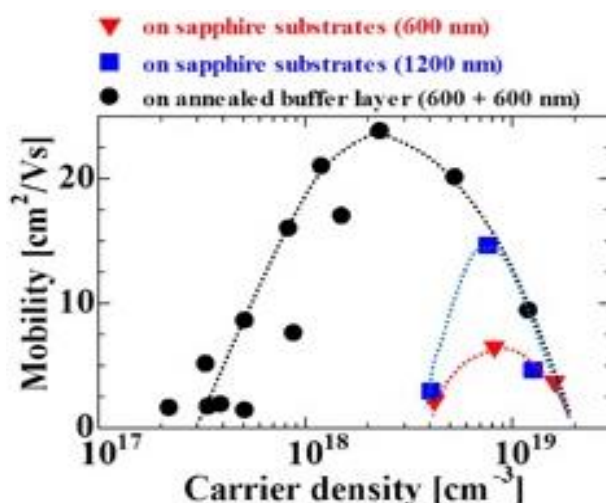


Рисунок 10 – Зависимость подвижности носителей заряда от их концентрации [23].

Анализ результатов показал, что с увеличением концентрации носителей заряда уменьшается прозрачность пленок (рис. 11).

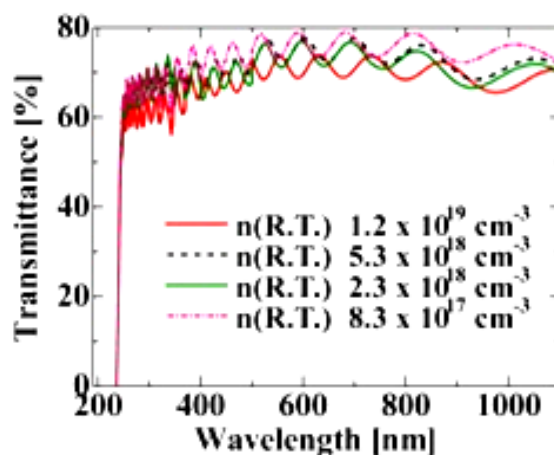


Рисунок 11 – Зависимость прозрачности пленок α -Ga₂O₃ от концентрации носителей заряда [23].

β -Ga₂O₃, легированный магнием, обнаруживает полу-изолирующие свойства с удельным сопротивлением $6 \cdot 10^{11}$ Ом·см, содержание Mg находилось в пределах от $4 \cdot 10^{18}$ см⁻³ до $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ [24]. Glazka в своей работе показывает, что магний является эффективным акцептором для оксида галлия. Ширина запрещенной зоны монотонно увеличивалась с повышением концентрации магния. Оптическая ширина запрещенной зоны для Ga₂O₃:Mg с содержанием магния 1%, 3%, 5%, 7% и 10% составляла 4.93 эВ, 5 эВ, 5.09 эВ, 5.21 эВ и 5.32 эВ соответственно. После отжига край поглощения сдвинулся в

длинноволновую область, и оптическая ширина запрещенной зоны составляла 4.87 эВ, 4.93 эВ, 5.04 эВ, 5.1 эВ и 5.22 эВ для образцов с концентрацией магния 1%, 3%, 5%, 7% и 10% соответственно. Зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации магния объясняется образованием Mg-Ga₂O₃ сплава, у которого ширина запрещенной зоны ($E_g = 7.8$ эВ) больше, чем у бета-фазы оксида галлия ($E_g \sim 4.9$ эВ).

До сих пор создание Ga₂O₃ с *p*-типом проводимости остается невозможным. Это связано с самолокализацией дырок, которая, в свою очередь, обусловлена ионностью оксидов металла [25]. Дырки, образованные с помощью легирования оксида галлия путем замещения, локализуются на атомах кислорода и не могут перемещаться по кристаллической решетке под действием электрического поля. Отсюда следует низкая подвижность дырок порядка $\mu = 10^{-5}$ см²/В·с при комнатной температуре. Таким образом, если даже дырки будут введены в оксид галлия, то *p*-тип проводимости не может быть получен.

Аналогичный вывод можно сделать, если посмотреть на рисунок 2. Энергетическая диаграмма валентной зоны практически плоская, что говорит о большой эффективной массе дырок $m_p^* = 40m_0$. Подвижность носителей заряда μ обратно пропорциональна эффективной массе m^* , т.е. $\mu \sim 1/m^*$, а проводимость пропорциональна подвижности носителей заряда: $\sigma \sim \mu$ ($\mu_n = 50-100$ см²/(В·с)). Полная проводимость является суммой проводимости дырок и электронов $\sigma = \sigma_n + \sigma_p$. Так как подвижность дырок крайне мала, то можно сделать вывод, что полная проводимость зависит только от электронной составляющей, так как $\sigma_n \gg \sigma_p$.

1.3 Детекторы УФ-излучения на основе пленок оксида галлия

В настоящее время существует много различных детекторов, отличающихся друг от друга не только конструкцией, но и принципами работы. Фотонные приемники разделяют на три класса: на внешнем

фотоэффекте; на внутреннем фотоэффекте; на поглощении свободными носителями [26].

В приемниках на внешнем фотоэффекте (фотоэмиссионных приемниках) оптическое излучение обуславливает эмиссию электронов с поверхности фотокатода в окружающую среду. Фотоприемники на внешнем фотоэффекте разделяются на следующие типы: фотоэлементы (с обычным фотокатодом и фотокатодом с отрицательным электронным сродством), фотоэлектронные умножители (динодные, газонаполненные, многоканальные), электронно-оптические преобразователи.

К приемникам на внутреннем фотоэффекте относятся такие устройства, в которых возбужденные излучением фотоносители остаются внутри материала чувствительного элемента. Именно такие приемники и будут рассматриваться в данной работе.

Приемники на внутреннем фотоэффекте разделяются на три:

- на эффекте фотопроводимости (собственные фоторезисторы, примесные фоторезисторы, SPRITE, приемники на структурах с множественными квантовыми ямами и квантовыми точками, на сверхрешетках);

- на фотогальваническом эффекте (приемники с потенциальным барьером): фотодиоды с обычным p - n -переходом, гетерофотодиоды, лавинные фотодиоды, фотодиоды с переходом p - i - n , фотодиоды с барьером Шоттки, МДП-фотодиоды, фототранзисторы, фото-ППЗ (приборы с переносом заряда));

- на эффекте поглощения свободными носителями (приемники на эффекте фотонного увлечения, болометры на горячих электронах, приемники Патли).

В работе китайских ученых рассматриваются солнечно-слепые детекторы ультрафиолетового излучения на основе тонких пленок β -Ga₂O₃. Структура являлась анизотипным гетеропереходом β -Ga₂O₃/p-Si [26]. Верхний сплошной электрод представлял собой два последовательно напыленных слоя

Ti/Au, где титан выступал в роли омического контакта, а золото как проводник (рис. 12). Слой Ga_2O_3 выращивался на подложке $p\text{-Si}$ путем молекулярно-лучевой эпитаксии. Подложку с оксидной пленкой отжигали в камере при температуре $750\text{ }^\circ\text{C}$, толщина оксидной пленки составляла 250 нм [26].

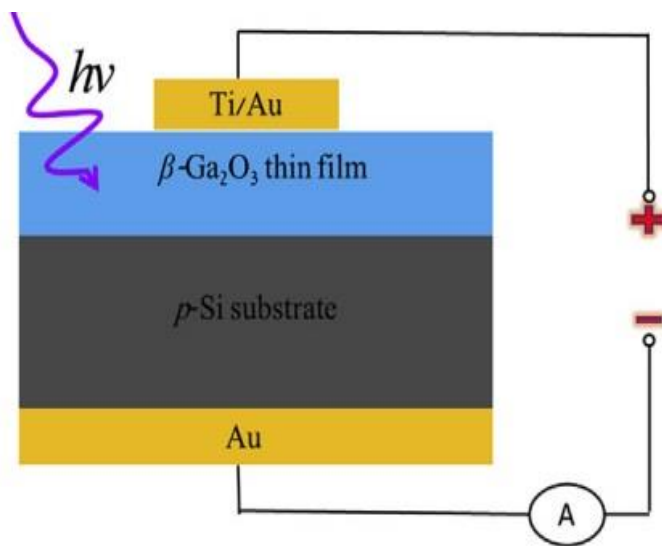


Рисунок 12 – Схематическое изображение детектора на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$ [26].

Для проверки отсутствия отклика на видимое излучение, были получены ВАХ при отсутствии излучения, а также при облучении монохроматическим излучением длинами волн 254 нм и 365 нм . Интенсивность излучения для длин волн 254 нм и 365 нм составляла 12 мВт/см^2 и 17 мВт/см^2 соответственно, эффективная облучаемая площадь равнялась $\sim 0.18\text{ см}^2$. На рисунке 13 показаны зависимость тока от поданного напряжения на структуру. Рассматриваемый детектор хоть и имел ОПЗ (область пространственного заряда) на интерфейсе полупроводников, но авторы рассматривали его исключительно как резистивный.

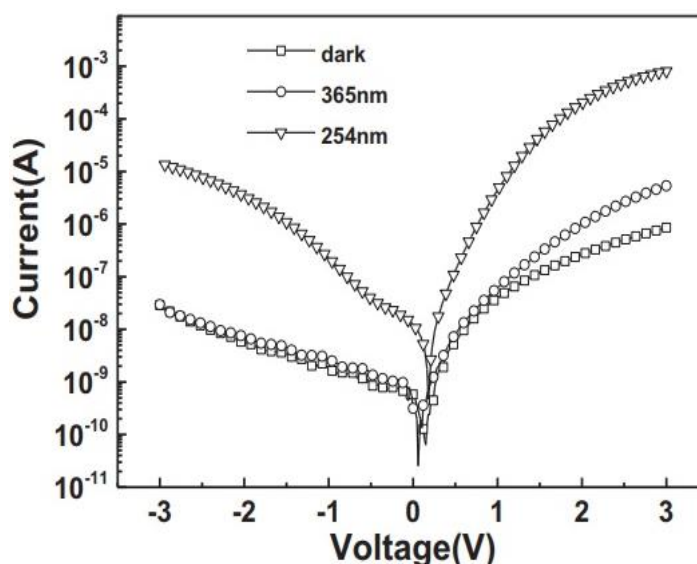


Рисунок 13 – Зависимость тока от напряжения детектора на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/p\text{-Si}$ при наличии УФ облучения 254 нм, 365 нм и в темноте [26].

Как видно из рисунка, представленного выше, наибольшее значение тока получается при облучении образцов длиной волны 254 нм, а воздействие источником излучения с длиной 365 нм вносит малый вклад в рост тока. Поэтому обратные ветви темновой ВАХ и ВАХ, полученной при облучении длиной волны 365 нм, сливаются на рисунке. Значения контраста для длины волны 254 нм составляет $C_{254} = 920$ отн. ед, а для 365 нм – $C_{365} = 6.2$ отн. ед.

Однако, данный тип детектора является чувствительным к полярности смещения. Токи, при подаче прямого напряжения, имеют большие значения, чем при обратном. Это объясняется наличием потенциального барьера на интерфейсе. В работе было показано, что наибольший отклик данные сенсоры имеют в УФ области, а рабочее смещение является положительным (рис. 14).

Рисунок 14 показывает, что с увеличением разницы потенциалов на электродах, увеличивается и отклик структуры. На обратной ветви ВАХ заметно, что при напряжении -3 В отклик на длину волны 254 нм превосходит отклик на длину волны 365 нм практически на четыре порядка. Чувствительность детекторов к длине волны 254 нм при смещении $U = 3$ В составляла $R_{254} = 370$ А/Вт, а внешняя квантовая эффективность $EQE = 5 \cdot 10^5$ %.

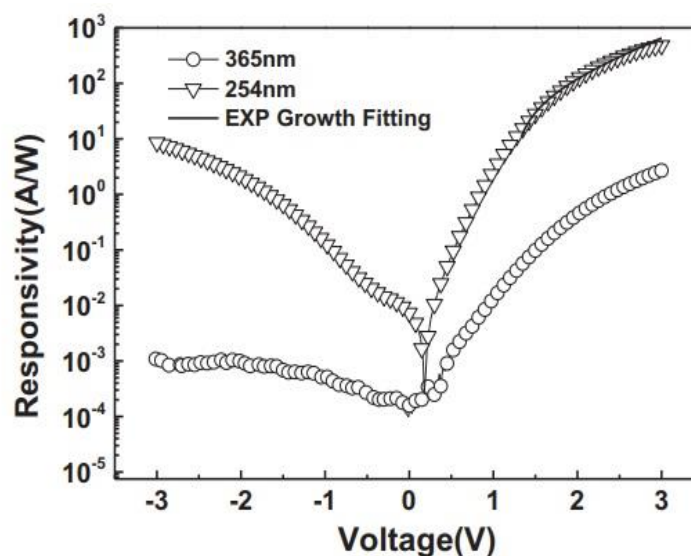


Рисунок 14 – Зависимость отклика от напряжения детектора на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{p-Si}$ при наличии УФ облучения 254 нм, 365 нм и в темноте [26].

Наличие слабой чувствительности детекторов к ближнему УФ, вероятно, объясняется влиянием на фототок кремниевой подложки, а также присутствием мелких донорных уровней, вызванных дефектами пленки.

Значительное увеличение квантовой эффективности и отклика детекторов авторы связывают с лавинным умножением носителей заряда в слое $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

В работе Guo с соавторами рассмотрены резистивные MSM детекторы со встречно-штыревыми электродами на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$. Авторы статьи легировали пленку оксида галлия цинком с целью уменьшения концентрации вакансий кислорода [27].

Оксидная пленка толщиной 200 нм напылялась с помощью ВЧ-магнетронного напыления на сапфировую подложку. В качестве мишени использовалась мишень оксида галлия, в которой содержался оксид цинка. Поверх пленки наносили встречно-штыревые электроды из Ti/Au, расстояние между штырями составляет 200 мкм (рис. 15). Содержание Zn в пленках из $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ составляло 0.69 ат.%, 0.88 ат.%, 0.96 ат.%, 1.83 ат.%, 2.49 ат.%, 3.03 ат.%.

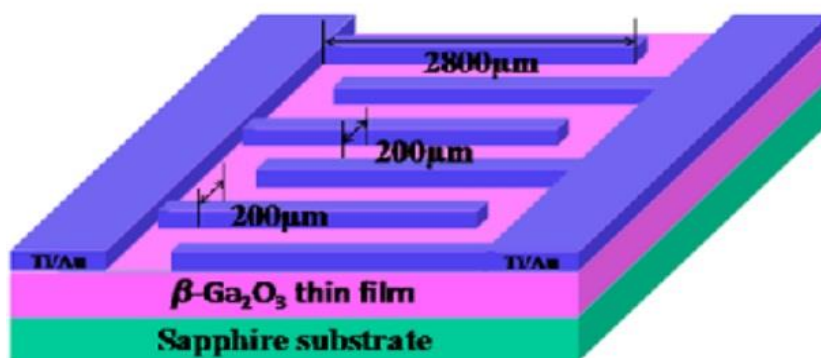


Рисунок 15 – Схематическое изображение активной области детектора на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ [27].

Полученные образцы оказались солнечнослепыми, и даже были нечувствительны к ближнему ультрафиолету (рис. 16).

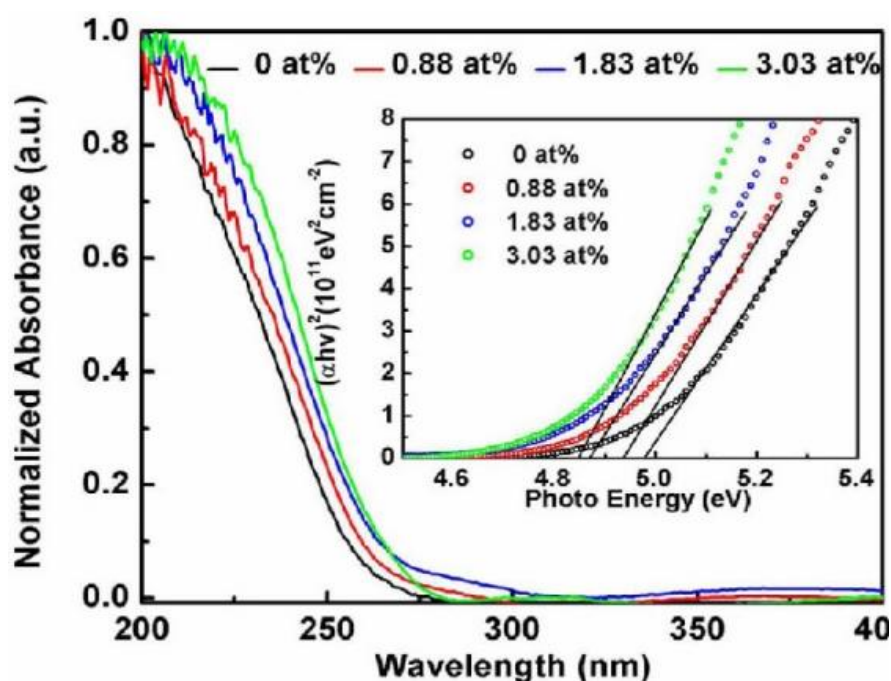


Рисунок 16 – Зависимость коэффициента поглощения $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ от содержания цинка в пленке оксида галлия [27].

Обнаружено, что край поглощения находится на длине волны около 280 нм. Увеличение содержания цинка в пленке приводило к монотонному повышению коэффициента поглощения структур, что объясняется металлическими свойствами материала.

Для проверки влияния различных длин волн УФ диапазона на вольт-амперные характеристики детекторов были исследованы зависимости тока от напряжения, полученные при воздействии излучения с длинами волн 254 нм, 365 нм (интенсивность 15 мкВт) и в его отсутствии (рис. 17).

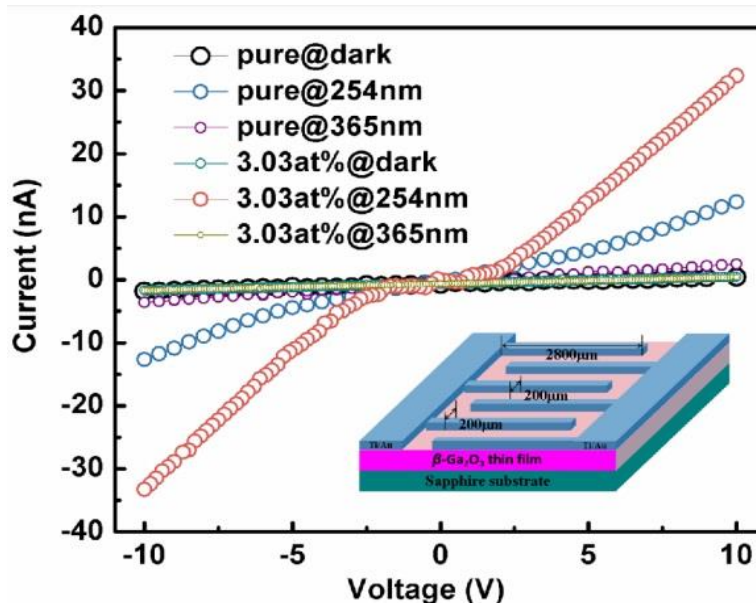


Рисунок 17 – Зависимости тока от напряжения для чистых пленок пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$ с содержанием цинка 3.03 ат.%, полученные при воздействии излучения с длинами волн 254 нм, 365 нм и в его отсутствии [27].

На зависимостях, представленных выше, показано, что вклад в фототок дает только воздействие излучения с длиной волны 254 нм; это относится как к легированной пленки оксида галлия, так и к нелегированной. Излучение с волной в 365 нм не приводит к существенному росту фототока, так что его влиянием можно пренебречь. Наибольшее значение фототока наблюдается для легированных пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Zn}$, где содержание цинка составляет 3.03 ат.%. Контраст для длины волны 254 нм составлял $C = 110$ отн. ед.

Было обнаружено, что легирование оксида галлия цинком снижает инерционность процессов в пленке, таким образом это приводит к тому, что токовое насыщение при воздействии излучение наступает быстрее, как и релаксация носителей заряда, по сравнению с нелегированной пленкой (рис. 18).

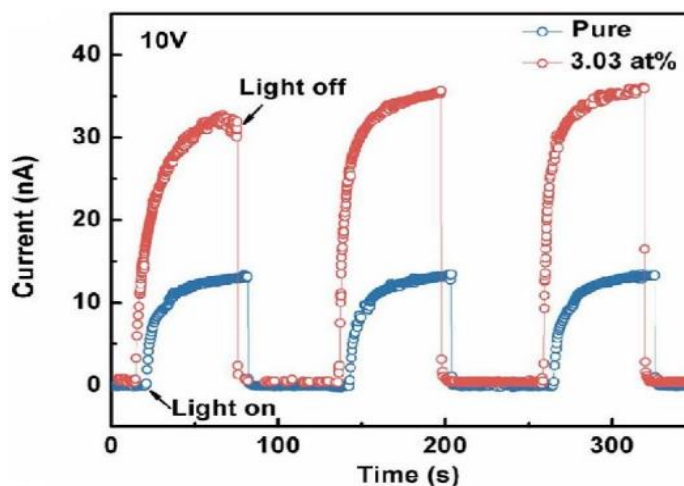


Рисунок 18 – Временной профиль тока детекторов на основе чистой пленки $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и легированной цинком при воздействии излучением с длиной волны 254 нм [27].

В работе [28] рассматриваются резистивные солнечно-слепые детекторы УФ излучения на основе пленки оксида галлия с золотыми контактами. Пленка Ga_2O_3 наносилась на сапфировую подложку с помощью осаждения металлоорганических соединений из газовой фазы, затем подложка отжигалась при 850 °С. Типичный спектр поглощения данной структуры показан на рисунке 19.

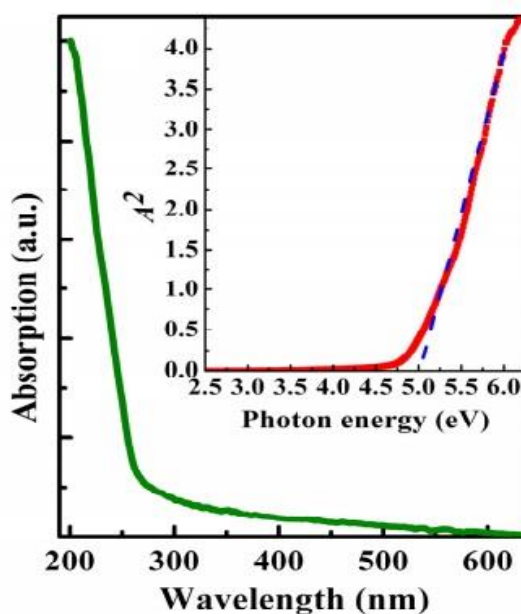


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента поглощения пленки Ga_2O_3 от падающей длины волны [28].

Заметное поглощение излучения происходит в пленке, когда длина волны становится равной 280 нм и меньше.

На рисунке 20 показана вольт-амперная характеристика $\text{Au/Ga}_2\text{O}_3/\text{Au}$, измеренная в темноте и при облучении длиной волны 255 нм с интенсивностью 0.12 мВт/мм^2 .

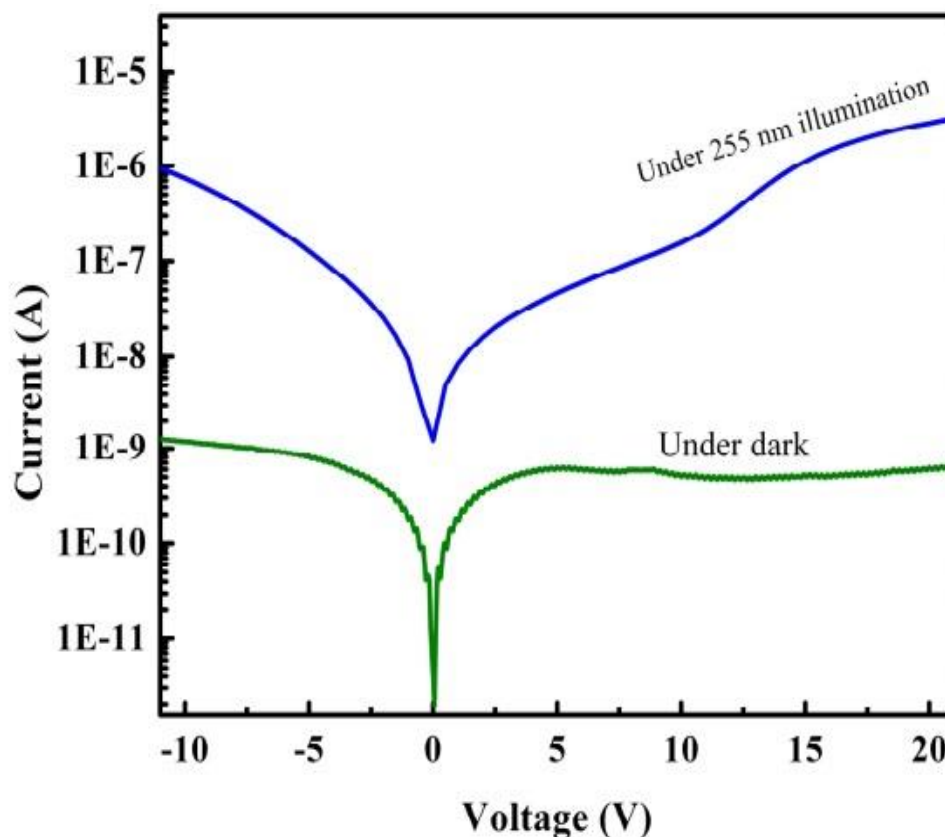


Рисунок 20 – Вольт-амперная характеристика фотодетектора на основе Ga_2O_3 , измеренная в темноте и при воздействии излучением 255 нм [28].

Фотоотклик таких сенсоров имеет явный максимум – 17 А/Вт на длине волны примерно 260 нм (рис. 21), а внешний квантовый выход достигает 8228 %. Характеристики имеют небольшие значения, что объясняется примитивной конструкцией фотодетектора, т.к. в данном случае чувствительность к УФ-излучению определяется исключительно качеством оксидной пленки.

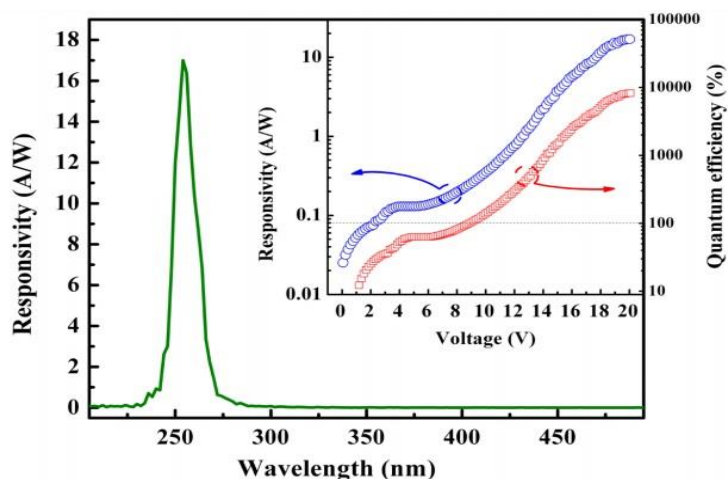


Рисунок 21 – Зависимость отклика фотодетектора на основе Ga_2O_3 от падающей длины волны [28].

Повышение чувствительности внешнего квантового выхода объясняют таким же образом, что и в работе [26].

В работе Qian сопоставляются влияния плазменной молекулярно-лучевой эпитаксии и ВЧ-магнетронного напыления Ga_2O_3 на характеристики солнечно-слепых детекторов УФ излучения резистивного типа [29].

В качестве подложки использовали сапфировую пластину. На поверхность пленки из оксида галлия были нанесены металлические встречно-штыревые контакты: 20 нм Ti и 80 нм Al; межэлектродное расстояние составляло 5 мкм. Полученные образцы подвергались воздействию излучения в одинаковых условиях.

С помощью молекулярно-лучевой эпитаксии удалось получить оксид галлия с четко выраженной β -ориентацией (рис. 22). Подобного не получилось добиться с помощью ВЧ-магнетронного напыления: изготовленная оксидная пленка оказалась аморфной. Это объясняется тем, что подложка не поддерживалась при повышенной температуре во время роста пленки; скорость напыления была слишком высокая (200 нм/ч); присутствовал низкий уровень вакуума в камере.

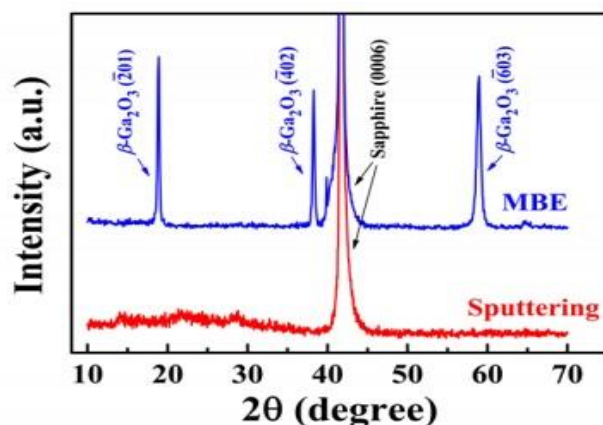


Рисунок 22 – Рентгеноструктурный анализ пленок оксида галлия, полученных с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии [29].

Было продемонстрировано, что пленки, полученные с помощью ВЧ-магнетронного напыления, содержат в 2 раза больше кислородных вакансий по сравнению с пленками, полученными при помощи МЛЭ. На рисунке 23 показаны спектры пропускания α -Ga₂O_x и β -Ga₂O₃.

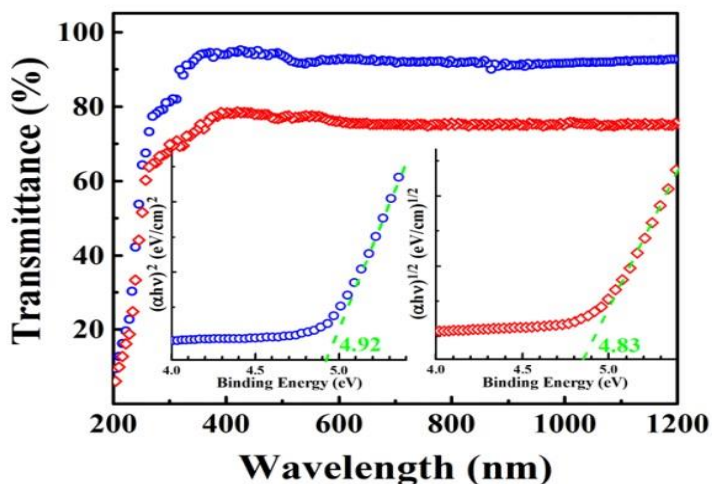


Рисунок 23 – Спектры пропускания α -Ga₂O_x (красный цвет) и β -Ga₂O₃ (синий цвет) [29].

Из графика, представленного выше, видно, что пленки α -Ga₂O_x имеют меньший коэффициент пропускания в длинноволновой части спектра, по сравнению с β -Ga₂O₃.

Для получения фотоэлектрических характеристик образцы облучались длиной волны 254 нм, и было обнаружено, что пленки α -Ga₂O_x имеют больший фототок и чувствительность, чем пленки β -Ga₂O₃ (рис. 24, 25).

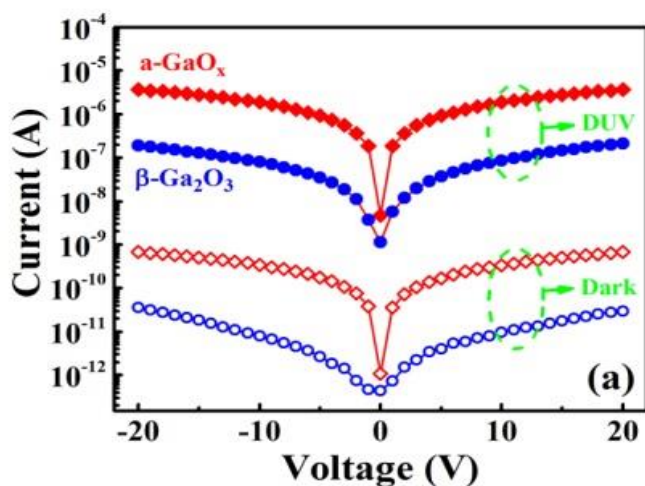


Рисунок 24 – Зависимость тока от напряжения для пленок α -Ga₂O_x и β -Ga₂O₃ в темноте (Dark) и при освещении длиной волны 254 нм (DUV) [29].

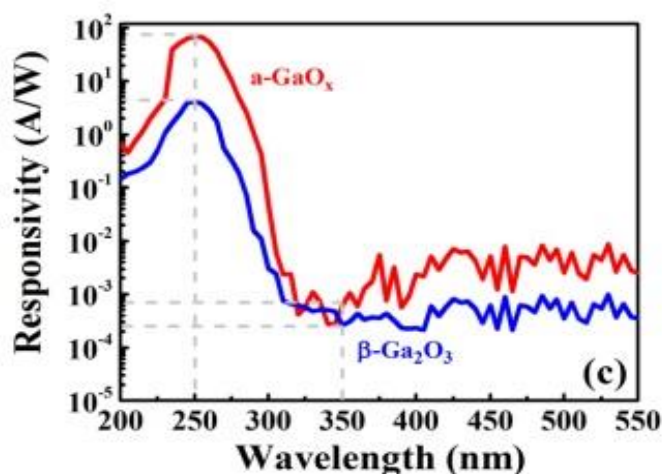


Рисунок 25 – Зависимость отклика от длины волны для пленок α -Ga₂O_x и β -Ga₂O₃ [29].

Используя метод Таука, удалось определить ширину запрещенной зоны для образцов, она оказалась равной 4.83 эВ и 4.92 эВ для α -Ga₂O_x и β -Ga₂O₃ соответственно. Данный факт говорит, что собственная концентрация в альфа-оксиде галлия больше, чем в β -Ga₂O₃. Это обстоятельство объясняет различия в значениях темновых токов.

Максимумы чувствительности детекторов приходятся на длину волны 250 нм и составляют 70.26 и 4.21 А/Вт для α -Ga₂O_x и β -Ga₂O₃ соответственно. В рассматриваемых образцах присутствует внутреннее усиление, причем для аморфной пленки оно больше. Авторы объясняют это тем, что β -Ga₂O_x содержит большое количество дефектов в структуре, которыми чаще всего являются кислородные вакансии, выступающие в роли акцепторов. Помимо

этого, в работе используются встречно-штыревые контакты с межэлектродным расстоянием 5 мкм, что обеспечивает высокую напряженность электрического поля, которое повышает энергию электронов.

Другая работа по солнечно-слепым детекторам ультрафиолетового излучения рассматривает вертикальный ФД, базирующийся на диоде с барьером Шоттки на основе $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ [30].

Подложка оксида галлия выращивалась с помощью метода зонной плавки и показывала *n*-тип проводимости, авторы это объясняют наличием вакансий кислорода. Для уменьшения кислородных вакансий подложка отжигалась при 1100 °С в течение 6 часов в кислородной среде. В качестве металла для создания барьера Шоттки использовался биметаллический сплав Au/Ni. Контакты наносились с помощью метода вакуумного напыления. Отношение площади соприкосновения верхнего контакта с подложкой к площади соприкосновения нижнего контакта с подложкой составляло 1/15; это означало, что емкостью контакта Au/Ti можно пренебречь.

На рисунке 26 представлена зависимость емкости от напряжения, сигнал подавался с частотой 1 МГц. На графике было замечено уменьшение емкости с уменьшением напряжения, что предполагает наличие барьера Шоттки *n*-типа. При напряжении 1.5 В и выше наблюдается насыщение емкости, авторы статьи объясняют это наличием высокоомного слоя, образованного при отжиге.

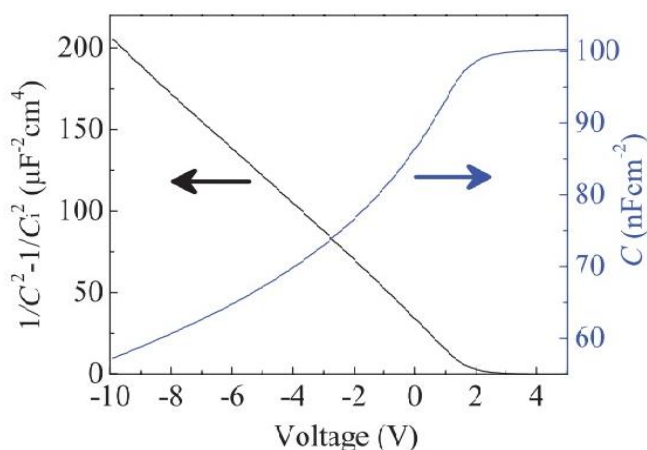


Рисунок 26 – Зависимость емкости от поданного напряжения на барьере Шоттки [30].

С целью определения фотоотклика и влияния УФ излучения на фототок диод облучали с помощью дейтериевой лампы. Свет от лампы собирался через две линзы и монохроматор, затем коллимированное излучение направлялось на ФД. На рисунках 27 и 28 представлены зависимости тока от напряжения и фотоотклика от длины волны соответственно.

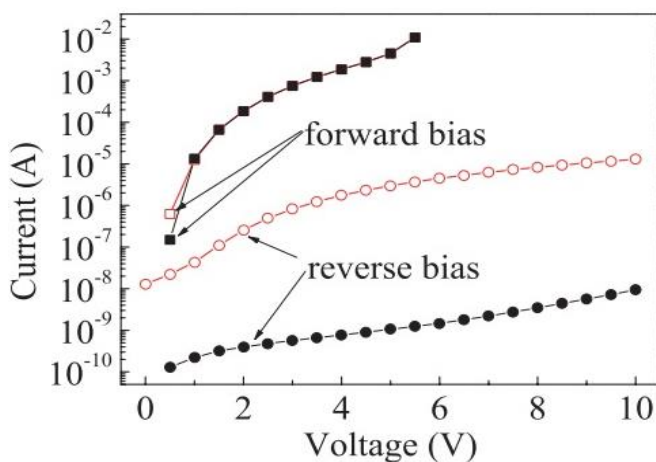


Рисунок 27 – ВАХ фотодетектора. Черные линии относятся к темновым характеристикам, а красные к характеристикам, полученным при облучении длиной волны 250 нм и интенсивностью 28.4 мВт/см^2 [30].

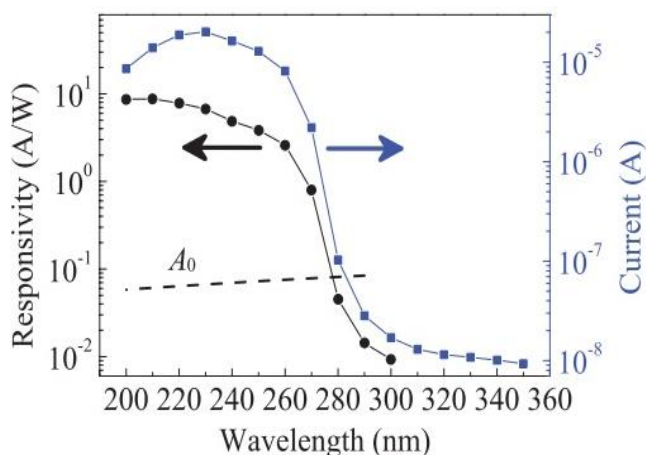


Рисунок 28 – Зависимость отклика ФД от длины волны излучения, полученная при напряжении -10 В [30].

Из вольт-амперной характеристики видно, что отличие прямого тока от обратного может достигать 6 порядков. Наличие фототока при нулевом смещении объясняется фотовольтаическим эффектом. Фотоотклик на длину волны 254 нм составлял 3.1 А/В , также было показано наличие фотоотклика на длине волны 200 нм.

Анализируя результаты литературного обзора, можно сказать, что на данный момент не существует оптимального метода получения пленок оксида галлия и конструкции детектора на его основе.

1.4 Основные параметры детекторов УФ-излучения

Основными параметрами резистивных детекторов УФ-излучения являются: темновой ток, фототок, контраст C , чувствительность R , внешняя квантовая эффективность EQE , удельная обнаружительная способность D^* , времена отклика и восстановления [4, 28].

Под темновым током I_D [А] понимается ток, полученный без внешнего воздействия излучения на структуру.

Фототок I_L [А] – ток, созданный неравновесными носителями заряда при воздействии квантов излучения соответствующего номинала.

Под контрастом C понимается отношение суммы фототока и темного тока к темновому току, данная величина измеряется в относительных единицах.

Чувствительность фотодетектора R [А/Вт] показывает значение фототока, которое создается падающей мощностью излучения 1 Вт. Характеристика рассчитывается по следующей формуле:

$$R = \frac{I_\lambda - I_D}{P}, \quad (1)$$

где I_λ – ток, полученный при освещении длиной волны λ ; I_D – темновой ток; P – полная падающая мощность излучения на активную область детектора.

Внешняя квантовая эффективность EQE [отн. ед] является отношением числа фотогенерированных электронов к числу падающих фотонов за единицу времени, и рассчитывается согласно следующему выражению:

$$EQE = \frac{hc}{e\lambda} R, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; c – скорость света; e – заряд электрона; λ – длина волны излучения; R – чувствительность детектора.

Удельная обнаружительная способность D^* [$\text{смГц}^{0.5}\text{Вт}^{-1}$] характеризует возможность использования фотоприемника для обнаружения предельно малых сигналов и вычисляется по формуле:

$$D^* = R \sqrt{\frac{S}{2eI_D}}, \quad (3)$$

где S – площадь активной области детектора.

Время отклика – характеристика, равная времени, когда фототок достигает 90% от максимального своего значения.

Время восстановления – характеристика, равная времени, когда фототок снижается на 90% от максимального своего значения.

В таблице 1 приведены фотоэлектрические характеристики ультрафиолетовых детекторов, полученных различными методами.

Таблица 1. Некоторые параметры детекторов УФ излучения, полученных разными методами

Метод получения	Структура	R , А/Вт	I_D , пА	λ , нм	C , отн. ед.	Смещение, В	Ссылка
PLD	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/$ $p\text{-Si}$	370	$85 \cdot 10^4$	254	940	3	[26]
RMFS	MSM $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/$ Al_2O_3	-	310	254	110	10	[27]
MOCVD	MSM $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ on sapphire	17	1850	255	$8.5 \cdot 10^6$	20	[28]
RMFS	MSM $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_x$	70.26	340	250	-	10	[29]
FZ	MSM $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ on sapphire	3.1	-	254	$> 10^6$	3	[30]

RMFS	MSM Ga ₂ O ₃ on quartz	436.3	4.9	240	$10.7 \cdot 10^4$	25	[31]
RMFS	MSM β -Ga ₂ O ₃ on sapphire	-	100	254	$16.25 \cdot 10^3$	5	[32]
RMFS	MSM Ga ₂ O ₃ on quartz	91.88	200	254	$> 10^4$	10	[33]
RMFS	MSM Ga/Ga ₂ O ₃	2.85	8.52	260	$8 \cdot 10^5$	15	[34]
MBE	MSM β - Ga ₂ O ₃ on sapphire	$3.7 \cdot 10^{-2}$	1.2	254	-	10	[35]
PLD	MSM β - Ga ₂ O ₃ on sapphire	0.9	10^3	254	$1.8 \cdot 10^5$	5	[36]
LPCVD	MSM β - Ga ₂ O ₃ on sapphire	0.14	-	250	$1.44 \cdot 10^6$	1	[37]

1.5 Выводы по главе 1 и постановка задачи

На основе литературного обзора можно сделать вывод о том, что оксид галлия является перспективным материалом для создания солнечно-слепых детекторов ультрафиолетового излучения. В первую очередь это подтверждается большой шириной запрещенной зоны соединения, которая варьируется в широком энергетическом интервале 4.4-5.9 эВ, что позволяет управлять рабочим интервалом длин волн детектора. Во вторых, материал является термически и химически стойким к внешнему воздействию, позволяя

использовать его в экстремальных условиях. Низкая себестоимость и относительная простота роста пленок делают оксид галлия коммерчески перспективным кандидатом для массового производства приборов.

В работах, представленных выше, показано, что сенсоры на основе Ga_2O_3 обладают низкими темновыми токами ($I_D \sim 100$ пА), а воздействие УФ-излучения приводит к росту проводимости структур на 3-5 порядков. Была обнаружена сильная зависимость фотоэлектрических характеристик от фазового состава пленок, типа и топологии контактов. Оптимальный подбор конструкции детекторов позволит в будущем применять их в однофотонном режиме.

На основе сделанных выводов по литературным данным ставится задача: поиск материала и оптимальной конструкции солнечно-слепых детекторов на основе оксида галлия, обладающих высокими обнаружительными характеристиками и большими значениями светового тока при воздействии УФ излучения.

2 Методика эксперимента

В настоящей работе получены и анализируются детекторы на основе полиморфных фаз Ga_2O_3 с двумя типами контактов: с параллельными омическими (далее первый тип образцов) и со встречно-штыревыми на основе барьера Шоттки (далее второй тип образцов).

В детекторах первого типа электроды создавали путем нанесения слоя платины на гладкие сапфировые подложки методом вакуумного напыления с последующим формированием контактов при помощи взрывной фотолитографии. Расстояние между электродами составляло 250 мкм (рис. 29а). Пленку оксида галлия толщиной 150–200 нм наносили ВЧ-магнетронным распылением мишени Ga_2O_3 (99.999%) на не нагретые сапфировые подложки на установке AUTO-500 (производитель Edwards) в газовой смеси Ar/O_2 . Концентрация кислорода в смеси поддерживалась

равной (56.1 ± 0.5) об. %. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 мм. Давление в камере во время напыления поддерживалось равным $7 \cdot 10^{-6}$ бар. На следующем этапе сапфировую пластину с нанесенными Pt электродами и оксидной пленкой подвергали отжигу в аргоне при 900 °C в течение 30 минут. Затем пластину разрезали на чипы размером 1.4 x 1.4 мм². Изготовление детекторов заканчивалось распайкой Pt-контактов на кристалл-держатель с помощью золотой проволоки диаметром 50 мкм и размещением образцов в металлические корпуса ТО-8.

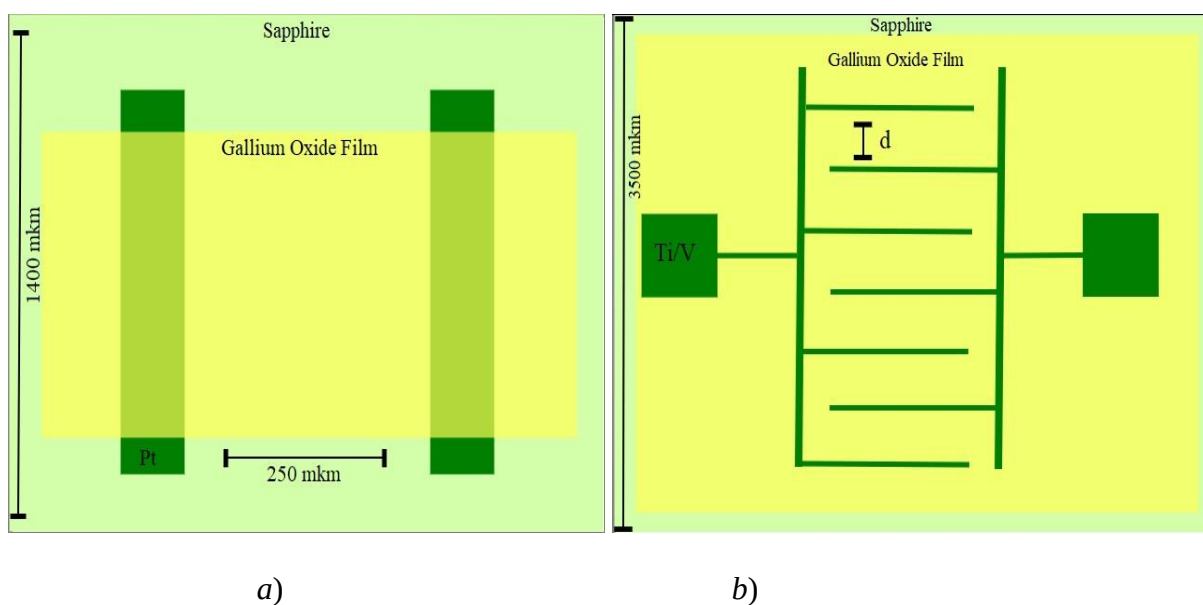


Рисунок 29 – Схематическое изображение активных областей детекторов первого (a) и второго видов (б).

Для изготовления образцов второго типа также использовали магнетронное распыление мишени Ga_2O_3 (99.9999%). На гладкие не нагретые сапфировые подложки (толщина 330 мкм) в газовой смеси Ar/O_2 наносилась пленка оксида галлия толщиной 150–200 нм. (установка AUTO-500, производитель Edwards). Концентрация кислорода в смеси поддерживалась равной (56.1 ± 0.5) об.%. Расстояние между мишенью и подложкой составляло 70 мм. Давление в камере во время напыления равнялось $7 \cdot 10^{-6}$ бар. После изготовления, пластина резалась на две равные части, одну часть подвергали отжигу в аргоне при 900 °C в течение 30 минут, а другую оставляли без

отжига. На следующем этапе наносился контактный слой, состоящий из Ti/Ni либо V/Ni при помощи вакуумного напыления. Затем формировалась топология детекторов со встречно-штыревыми контактами при помощи фотолитографии, которая проходила в несколько этапов:

1. Нанесение фоторезиста на поверхность образца
2. Сушка фоторезиста
3. Экспонирование через фотошаблон с топологией встречно-штыревых контактов
4. Задубливание фоторезиста
5. Экспонирование в потоке УФ-излучения без фотошаблона
6. Проявление
7. Нанесение пленки V/Ni либо Ti/Ni
8. Взрыв фоторезиста

В результате получались образцы четырех типов со встречно-штыревыми электродами, с межштыревым расстоянием 5, 10, 30 и 50 мкм; количество штырей составляло 200, 150, 75 и 50 соответственно. На следующем этапе происходила резка пластины на чипы размером $3.5 \times 3.5 \text{ мм}^2$, которые в последующем приклеивались к керамическим пластинам такого же размера (рис. 30б). Изготовление детекторов (будем называть их образцами второго типа) заканчивалось распайкой контактов на кристалл-держатель с помощью золотой проволоки диаметром 50 мкм и размещением образцов в металлические корпуса.

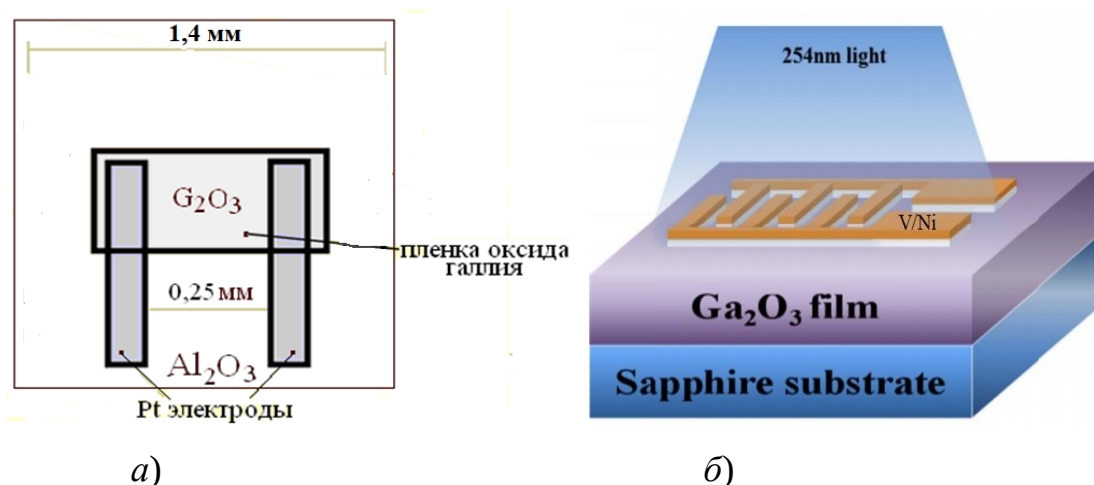


Рисунок 30 – Схематическое изображение двухэлектродных образцов (а) и образцов со встречно-штыревыми электродами (б).

Третьим типом образцов, неподверженные отжигу, выступали пленки оксида галлия, выращенные в ООО “Совершенные кристаллы” на сапфировых подложках. С помощью хлоридной газофазной эпитаксии на гладких сапфировых подложках были выращены пленки $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$, а на структурированных – полиморфные пленки оксида галлия, содержащие чередующиеся α - и ϵ -фазы. Размер исследуемых образцов составлял $1.85 \cdot 1 \text{ мм}^2$. На поверхность пленок были нанесены платиновые электроды с расстоянием 1850 мкм. На рисунке 28 представлен снимок, полученный при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ), для полиморфной оксидной пленки. Методика получения пленок подробно описана в работах [31, 32].

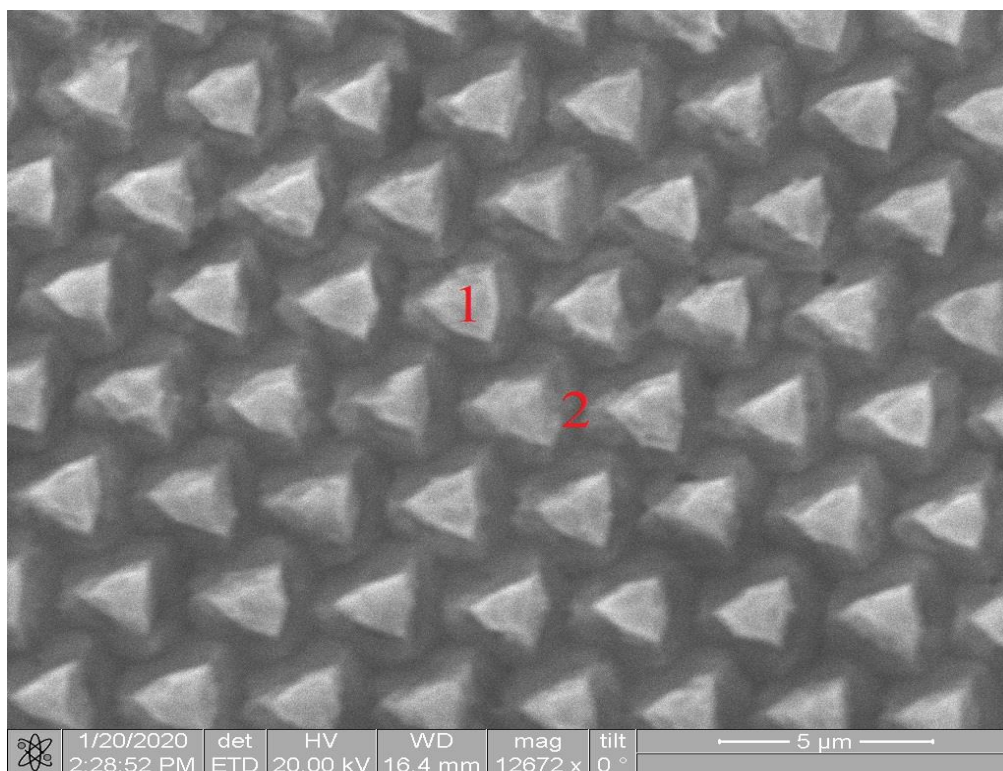


Рисунок 33 – РЭМ изображение поверхности двухфазного слоя оксида галлия на структурированной сапфировой подложке, цифрами отмечены характерные области с различной кристаллографической структурой (1– α -Ga₂O₃; 2 – ε -Ga₂O₃).

Четвертым типом активной области выступала исключительно пленка ε -Ga₂O₃, толщина которой была больше 2 мкм. Слои наращивались с помощью HVPE на гладкой подложке GaN при температуре 500-600 °C и комнатном давлении. Более подробная информация о росте пленок представлена в работе [8]. После приготовления пленок, подложка резалась на множество чипов, затем через подложку напылялись платиновые контакты. Межэлектродное расстояние на чипе составляло 1 мм.

Элементный состав пленок исследовали методом Оже спектроскопии на установке “Шхуна-2”. Разрешение Оже-анализатора по энергии составляло 0.1 %. В анализатор коаксиально встроен источник электронов, формирующий зондирующий пучок диаметром 1 мкм. Энергия электронов в пучке равнялась 3 кэВ. Для распыления поверхности исследуемого образца использовался

пучок ионов аргона, диаметр которого можно изменять от 0.5 до 2 мм. Пучок ионов формировался источником, ось которого наклонена на 70° относительно нормали к поверхности исследуемого образца. Энергия ионов Ag составляла 3 кэВ.

Темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и ВАХ при воздействии ультра фиолетового излучения исследовали при комнатной температуре с помощью источника-измерителя Keithley 2611B. В качестве источника УФ-излучения использовалась криптон-фторовая лампа VL-6.C с фильтром на 254 нм. Расстояние между лампой и образцами составляло 1 см, а падающая интенсивность излучения равнялась 1.65 мВт/см^2 .

3 Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок β -фазы оксида галлия

3.1 Резистивные структуры с двумя параллельными электродами

При помощи Оже-спектроскопии была получена зависимость элементного состава активной области детекторов второго типа от ее толщины (рис. 34). Приведенные данные показывают, что пленка оксида галлия обладает высокой стехиометрией, которая близка к 60/40 at. % (O/Ga). Начиная с толщины, примерно, 190 нм стехиометрия Ga_2O_3 начинает монотонно ухудшаться, что обусловлено наличием платиновых контактов под пленкой.

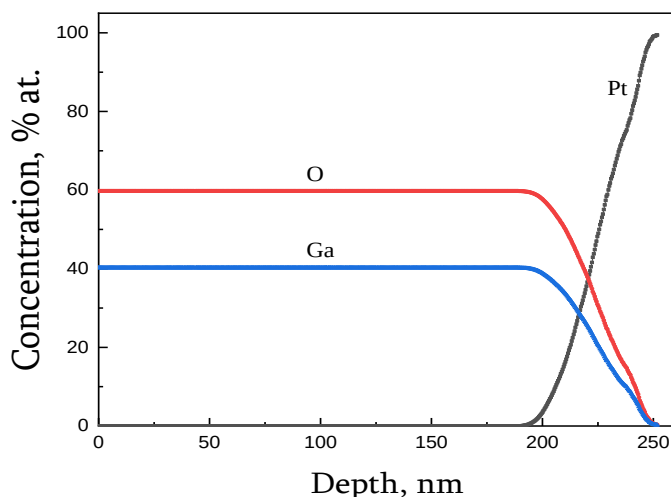


Рисунок 34 – Зависимость элементного состава активной области детекторов первого типа от ее толщины.

В ходе экспериментов были получены вольт-амперные характеристики двухэлектродных детекторов на основе отожженных пленок оксида галлия (второй тип образцов). Зависимость тока от напряжения исследовалась в диапазоне напряжений от 0 до 200 В.

Вольт-амперная характеристика имела квазилинейный вид, а темновой ток для всех образцов лежит в пределах от 20 пА до 650 пА при напряжении от 0 В до 200 В (рис. 35 а). Воздействие ультрафиолетовым излучением длиной волны $\lambda = 254$ нм на структуры приводит к росту тока в структурах на 2-3 порядка (в зависимости от образца) (рис. 35 б).

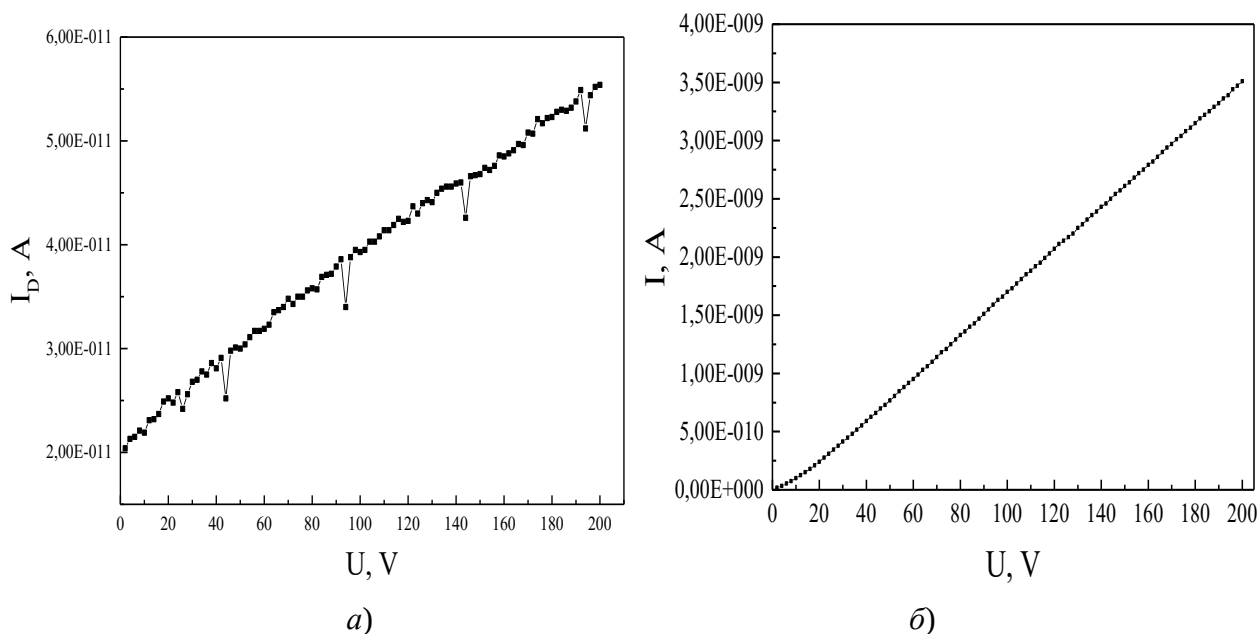


Рисунок 35 – Типичная темновая ВАХ (а) и ВАХ, полученная при облучении длиной волны $\lambda = 254$ нм, для двухэлектродного образца.

Из рисунка представленного выше, видно, что темновая зависимость тока не прямо пропорциональна напряжению. Спрямление некоторых кривых ВАХ происходит в полулогарифмических координатах тока от корня напряжения (рис. 36).

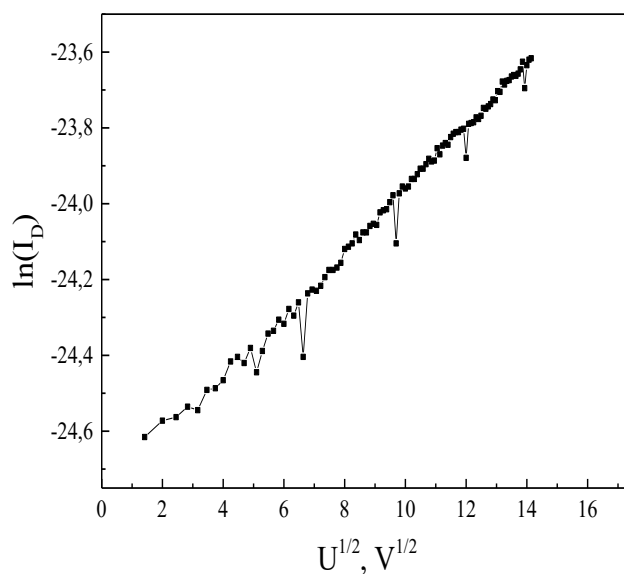


Рисунок 36 – Темновая ВАХ в полулогарифмических координатах тока от корня напряжения для двухэлектродного образца.

Такая зависимость тока от напряжения ($\ln(I_D) \sim U^{0.5}$) характерная для сильных полей, когда происходит инжекция электронов из металла в диэлектрик [33], описываемая выражением 4:

$$I = A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\sqrt{eE/4\pi\epsilon\epsilon_0}}{kT}\right) \quad (4)$$

где A^* – постоянная Ричардсона для Ga_2O_3 ; T – абсолютная температура; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; Φ_b – высота потенциального барьера на границе металл-оксид галлия; E – напряженность электрического поля в диэлектрике; ϵ_0 – электрическая постоянная; ϵ – диэлектрическая постоянная Ga_2O_3 .

Увеличение проводимости G пленок, при облучении длиной волны $\lambda = 254$ нм, обусловлено генерацией неравновесных носителей заряда. Квант энергии излучения на длине волны $\lambda = 254$ нм составляет $h\nu = 4.88$ эВ. Данной энергии хватает для обеспечения переходов зона-зона в оксиде галлия ($E_g = 4.7\text{--}4.9$ эВ), а также для “выброса” носителей заряда с ловушечных уровней.

В таблице 1 показаны фотоэлектрические характеристики для двухэлектродных образцов, рассчитанные при напряжении 200 В и падающей интенсивности излучения 2.5 мВт/см^2 .

Таблица 1– Фотоэлектрические характеристики для двухэлектродных образцов из первой партии.

Номер образца	C , отн. ед	R , А/Вт	D^* , $\text{Гц}^{0.5} \text{смВт}^{-1}$	$\langle t_d \rangle$, с	$\langle t_r \rangle$, с
1	28.9	0,0046	$4 \cdot 10^{10}$	0.2	0.4
2	356	0,005	$1.5 \cdot 10^{11}$		
4	614	0,008	$2.47 \cdot 10^{11}$		

6	70.3	0,0009	$2.77 \cdot 10^{10}$		
---	------	--------	----------------------	--	--

3.2 Детекторы со встречно-штыревыми электродами

3.2.1 Образцы неподверженные термическому отжигу

Неотожженные образы первого типа представляли собой детекторы со встречно-штыревыми электродами (ВШЭ) с контактами V/Ni, межэлектродное расстояние структур составляло 50, 30, 10 и 5 мкм.

Образцы демонстрировали планообразный вид темновых ВАХ, что обусловлено низкими I_D , которые лежат вне измеряемого диапазона прибора ($I_D \sim 1-10$ пА и меньше).

Воздействие длиной волны $\lambda = 254$ нм на пленки приводило к возрастанию тока на 2-3 порядка. Зависимости тока от напряжения для всех образцов имеют сложный характер, который объясняется низкой стехиометрией пленок и состоянием структур близкому к аморфному из-за отсутствия высокотемпературного отжига (рис. 37).

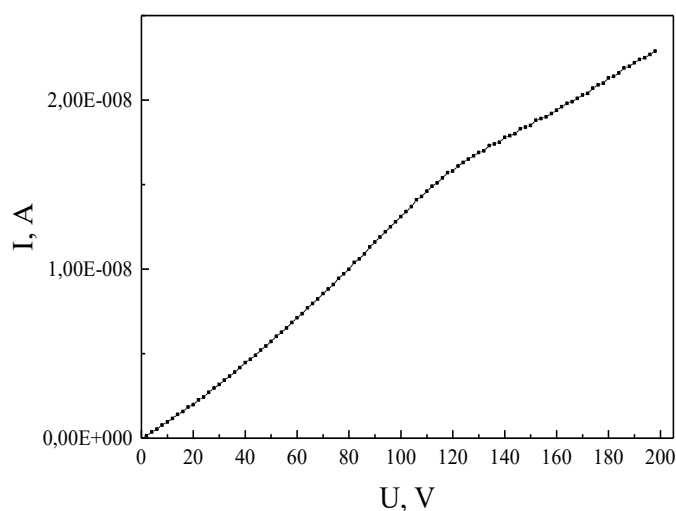


Рисунок 37 – ВАХ неотоженного образца со встречно-штыревыми контактами , полученная при облучении структур длиной волны $\lambda = 254$ нм

Значения фототока в данных структурах сопоставимо с фототоками в отоженных двухэлектродных образцах, а значения фотоэлектрических характеристик ниже (таб. 2).

Таблица 2 – Фотоэлектрические характеристики неотоженных образцов со встречно-штыревыми электродами из первой партии.

Межштыревое расстояние d , мкм	C , отн. ед	R , А/Вт	D^* , $\text{Гц}^{0.5}\text{см/Вт}$	Приложенное напряжение, В	$\langle t_d \rangle$, с	$\langle t_r \rangle$, с
50	73	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^9$	200	0.2	720
30	93	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^9$	200		
10	452	$5 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{10}$	200		
5	264	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{10}$	140		

Результаты измерений показывают, что использование встречно-штыревой топологии контактов для неотоженных пленок оксида галлия нецелесообразно. Фотоэлектрические характеристики детекторов одного порядка с двухэлектродными детекторами, или даже меньше.

3.2.2 Отоженные образцы

В данном разделе рассматривается влияние отжига пленок оксида галлия на фотоэлектрические характеристики детекторов, на поверхность которых нанесены встречно-штыревые электроды.

Зависимость темнового тока в пленках от напряжения описывается линейным и квази-линейным (в зависимости от образца) законами. Значения

I_D находятся в пределах 100-3000 пА при приложенном напряжении от 0 до 200 В. Это показывает, что отжиг в не приводит к сильному возрастанию темнового тока.

Воздействие излучением длиной волны 254 нм привело к росту тока на 5-8 порядков (в зависимости от межэлектродного расстояния) и изменило вид ВАХ, теперь на зависимости появился участок насыщения (рис. 38). Сильное изменение значений фототока, относительно двухэлектродных образцов, объясняется увеличением напряженности электрического поля за счет снижения межэлектродного расстояния. В результате сильные поля разгоняют свободные электроны, которые в последующем ионизируют атомы и дефекты пленки оксида галлия [34]. Данные детекторы имели уже не контакты с барьером Шоттки, а титановые электроды, образующие омическое соединение с оксидом галлия. Из этого должно следовать увеличение темнового тока в структурах за счет отсутствия потенциального барьера на интерфейсе [35].

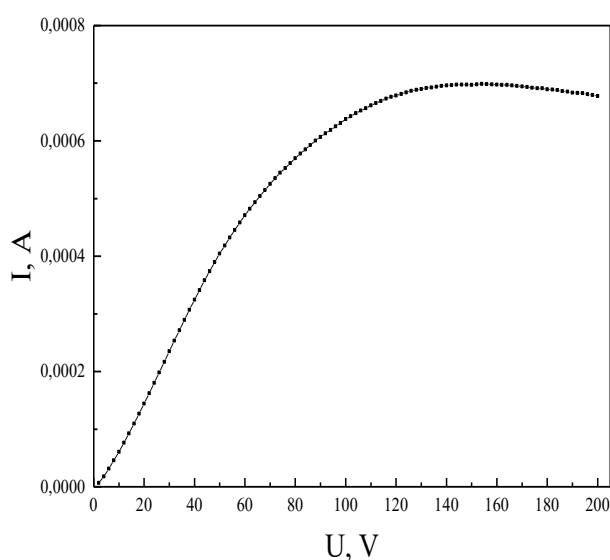


Рисунок 38 – ВАХ отожженного образца со встречно-штыревыми контактами из третьей партии, полученные при облучении структур длиной волны $\lambda = 254$ нм.

Анализ ВАХ показал, что смена контактов на основе ванадия на титановые не приводит к увеличению темнового тока, а даже уменьшает его значения. С уменьшением межэлектродного расстояния прослеживается и понижение I_D , такое поведение, вероятно, можно объяснить образованием барьера Шоттки на границе раздела материалов. Обосновать отсутствие омического контакта титана к пленке оксида галлия можно за счет того, что вместо чистого Ti образуется диоксид титана, дающий барьер.

Таблица 3 – Фотоэлектрические характеристики отожженных образцов со встречно-штыревыми электродами из четвертой партии.

Межштыревое расстояние, мкм	Сигнал/шум	R , А/Вт	D^* , Гц ^{0.5} см/Вт	Приложенное напряжение, В
50	$9.6 \cdot 10^6$	33.7	$2 \cdot 10^{14}$	142
50	$2.55 \cdot 10^6$	3.8	$1.1 \cdot 10^{14}$	200
50	$3.7 \cdot 10^5$	9.6	$6.6 \cdot 10^{13}$	200
30	$3 \cdot 10^6$	39	$3.8 \cdot 10^{14}$	140
30	$1.2 \cdot 10^6$	36.5	$7.5 \cdot 10^{14}$	150
30	$1.5 \cdot 10^6$	5.7	$1 \cdot 10^{14}$	200
10	$2.2 \cdot 10^7$	60	$1.3 \cdot 10^{15}$	30
5	$9.3 \cdot 10^3$	110	$3.6 \cdot 10^{13}$	30
5	10^8	192	$5 \cdot 10^{15}$	30

Наличие участка насыщения тока от напряжения можно объяснить нагревом пленок до высоких температур, из-за этого тепловая энергия переходит к узлам кристаллической решетки полупроводника. В следствии этого, амплитуда колебаний узлов увеличивается, а с ней возрастает и вероятность рассеяния носителей заряда на фононах. Можно заметить, что насыщение ток наблюдается примерно при равной выделяемой мощности на

структурах, которая находится в диапазоне 9-13 мВт (таб. 4). Времена отклика и восстановления сопоставимы с неотоженными пленками оксида галлия.

Следующее предположение строится на том, что фотоны генерируют носителей заряда – электроны и дырки. Как было описано ранее, свободные дырки самолокализуются на ионах галлия и становятся неподвижными. Неравновесные электроны начинают накапливаться на аноде и образуют область ОПЗ, тем самым создается внутреннее электрическое поле, направление которого противоположно приложенному внешнему полю. Увеличение внешнего электрического поля приводит к возрастанию концентрации электронов на аноде, вследствие чего, повышается напряженность внутреннего электрического поля. Когда напряжение достигает U_m , то внешние и внутренние поля в сумме равняются нулю. Дальнейшее увеличение внешнего поля происходит медленнее, чем растет внутреннее поле, поэтому значения фототока уменьшаются.

Таблица 4 – Зависимость от межэлектродного расстояния: темнового тока, фототока, тока во время действия УФ в начале участка насыщения, напряжения насыщения и мощности в начале участка насыщения.

d , мкм	I_D , А ($U = 10$ В)	I_L , А ($U = 10$ В)	$I_L(U_m)$, А	U_m , В	P_m , Вт
50	$1 \cdot 10^{-10}$	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	165	0.09
30	$6.7 \cdot 10^{-11}$	$1.44 \cdot 10^{-4}$	$6.2 \cdot 10^{-4}$	160	0.10
10	$6 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$	40	0.11
5	$4.3 \cdot 10^{-11}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	19	0.13

Где d – межэлектродное расстояние; I_D – темновой ток; I_L – значение тока, полученное при освещении образца; U_m – напряжение, при котором наступает насыщения тока; P_m – мощность на начале участка насыщения по току.

3.3 Вывод по главе 3

На основе проделанных экспериментов можно заключить, что активная область детекторов из неотоженной пленки оксида галлия со встречно-штыревой топологией электродов не приводит к улучшениям свойств детекторов (в сравнении с двухэлектродными образцами). Высокотемпературная обработка пленок Ga_2O_3 помогает улучшить фотоэлектрические характеристики на 4–5 порядков, не приводя к повышению I_D .

Использование контактов на основе титана повышает значения фототока, оставляя темновой ток на таком же уровне, как и с использованием контактов с барьером Шоттки. Замечено, что уменьшение межэлектродного расстояния сопровождается снижением значений темнового тока структур.

Для большинства отоженных образцов, со встречно-штыревой топологией электродов, наблюдается участок насыщения тока на вольт-амперных характеристиках, который сдвигается в область меньших напряжений со снижением межэлектродного расстояния.

4 Электрические и фотоэлектрические характеристики структур на основе пленок α - и ε -фаз оксида галлия.

4. 1 Вольт-амперные характеристики образцов на основе α - Ga_2O_3

В структурах α - Ga_2O_3 , сформированных на гладких сапфировых подложках, обнаружены низкие темновые токи (I_D), симметричные относительно полярности напряжения. В интервале $-200 \text{ В} \leq U \leq +200 \text{ В}$ значения I_D не превышают $1\text{--}6 \cdot 10^{-11} \text{ А}$ (рис. 39). Пленки не обнаруживают

чувствительность к длине волны $\lambda = 254$ нм, но реагируют на более коротковолновое излучение – $\lambda = 222$ нм. Это объясняется тем, что альфа-фаза оксида галлия имеет ширину запрещенной зоны $E_g = 5.1\text{--}5.3$ эВ, а квант падающего излучения с $\lambda = 254$ нм равен $E_{ph} = 4.88$ эВ, поэтому облучение не может обеспечить выброс электронов в зону проводимости для повышения значения тока.

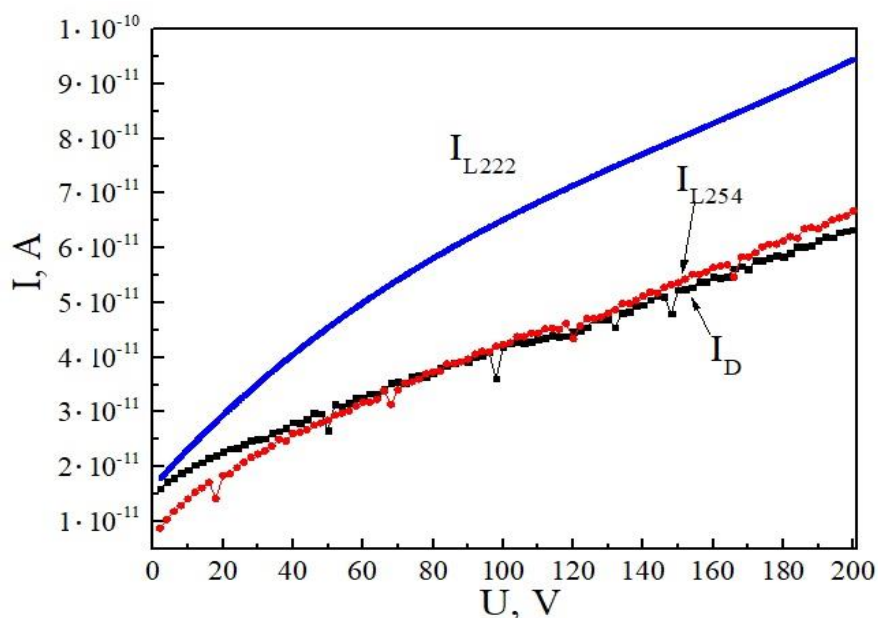


Рисунок 39 – ВАХ образца с пленкой $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{:Sn}$, выращенной на гладкой сапфировой подложке: темновой ток (I_D); токи (I_L) во время действия УФ-излучения с $\lambda = 254$ и 222 нм.

4.2 Вольт-амперные характеристики и эффект переключения структур на основе пленок, содержащих α - и $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$

ВАХ двухфазных структур $\alpha\text{-}|\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ из первой партии, полученных на профилированных подложках, практически симметричны относительно полярности напряжения и имеют максимумы (рис. 40).

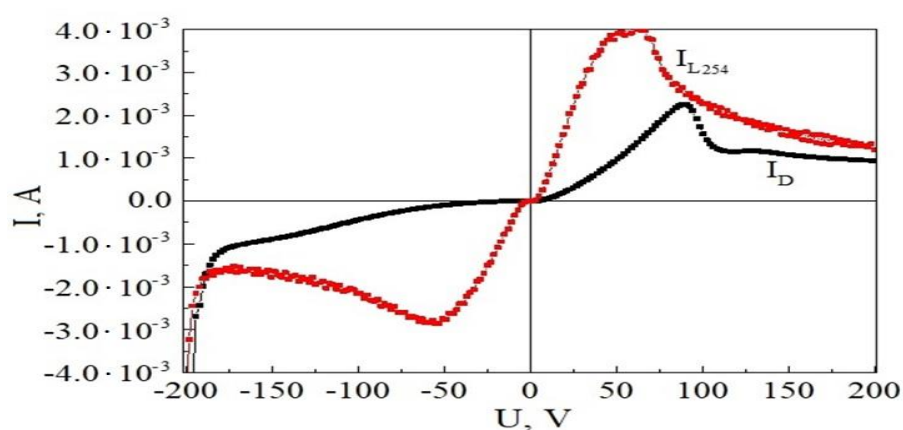


Рисунок 40 – ВАХ образца с пленкой оксида галлия на профилированной подложке в интервале $-200 \text{ В} \leq U \leq +200 \text{ В}$.

Поведение зависимости тока от приложенного напряжения полиморфного оксида галлия сильно отличается от ВАХ, структур на гладких сапфировых подложках. Это можно связать с более сложным механизмом проводимости в пленках α - ϵ -Ga₂O₃.

На рисунке 36 показаны темновые ВАХ, а также ВАХ полученные при воздействии сильного электрического поля и излучения с $\lambda = 254 \text{ нм}$.

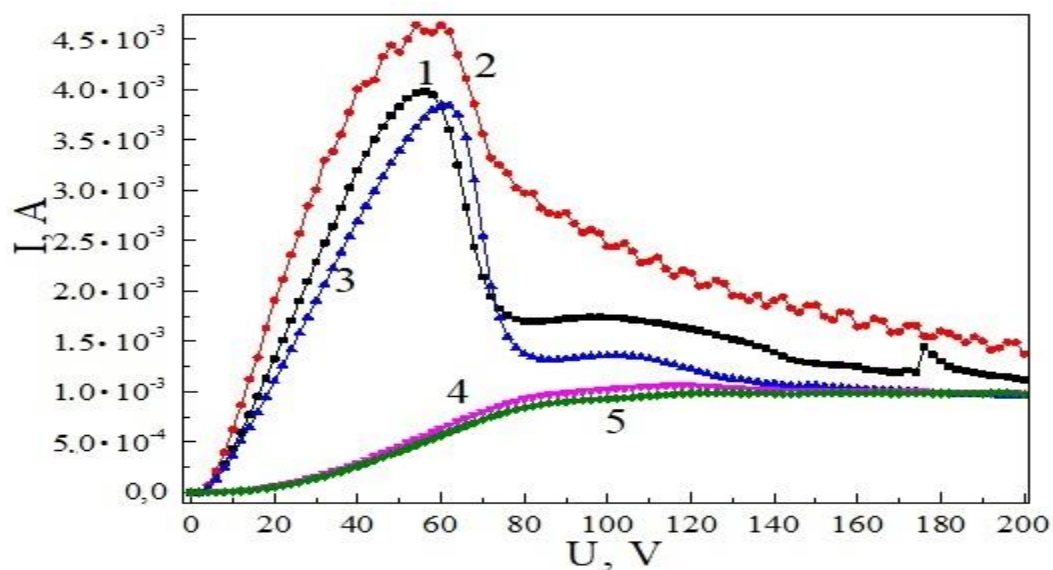


Рисунок 41 – ВАХ образца металл/ α - ϵ -Ga₂O₃/металл на профилированной подложке: 1 – исходная темновая; 2 – при действии УФ; 3 – темновая после УФ; 4,5 – темновые после действия сильного электрического поля.

При подаче напряжения на образец исходные темновые токи (до воздействия сильных электрических полей и УФ излучения) увеличиваются с повышением напряжения по нелинейному закону и достигают максимальных значений при $U_m = 50\text{--}70$ В (в зависимости от образца). При $U > U_m$ темновой ток резко снижается, и при напряжениях выше 80–100 В менее сильно зависит от напряжения (рис. 41, кривая 1). В итоге, темновая ВАХ изображается кривой с максимумом. Для четырех измеренных образцов максимальные значения темновых токов I_D наблюдались при напряжениях 50–60 В.

Зависимость тока от напряжения при воздействии излучения с $\lambda = 254$ нм (I_L) также изображается кривой с максимумом примерно при тех же напряжениях, что и максимальное значение темнового тока (рис. 41, кривая 2). При этом I_L не на много превосходит значения темнового тока I_D при фиксированных напряжениях на образце. Сразу после выключения УФ излучения образцы сохраняют повышенную проводимость (рис. 41, кривая 3), которая постепенно снижается. Если не подавать на образец напряжения, превышающие 100–120 В, то повышенные значения темнового тока сохраняются в течение некоторого времени. Однако, если на образец подать напряжение примерно равное 200 В то характер темновой вольт-амперной характеристики резко изменяется: на кривой зависимости I от U исчезает максимум, и темновой ток при низких напряжениях на образце резко снижается (рис. 41, кривые 4,5). В этом случае темновая ВАХ определяется токами, ограниченными пространственным зарядом (ТОПЗ) при экспоненциальном распределении ловушек по энергии в запрещенной зоне диэлектрика и описывается выражением (4) [36]:

$$J = N_c \mu e^{1-l} \left[\frac{\varepsilon \varepsilon_0 l}{N_t (l+1)} \right]^l \left(\frac{2l+1}{l+1} \right)^{l+1} \frac{U^{l+1}}{L^{2l+1}} \quad (4)$$

где N_c – эффективная плотность квантовых состояний в зоне проводимости оксида галлия, μ – подвижность электронов, N_t – концентрация ловушек в

плёнке Ga_2O_3 , $l = T/T_c$, T_c – характеристическая температура, определяющая распределение ловушек по энергии в запрещенной зоне диэлектрика.

Анализируя темновые ВАХ таких образцов, можно считать, что структуры обнаруживают эффект переключения из состояния с низким сопротивлением (НС) (рис. 42, кривая 1) в состояние с высоким сопротивлением (ВС) (рис. 42, кривая 2). Следует отметить: заметная чувствительность структур металл/ α - ϵ - Ga_2O_3 /металл к УФ излучению появляется только после их переключения в состояние ВС. На рисунке 43 показаны темновая ВАХ после перехода образца в состояние с высоким сопротивлением и ВАХ во время действия излучения с $\lambda = 254$ нм.

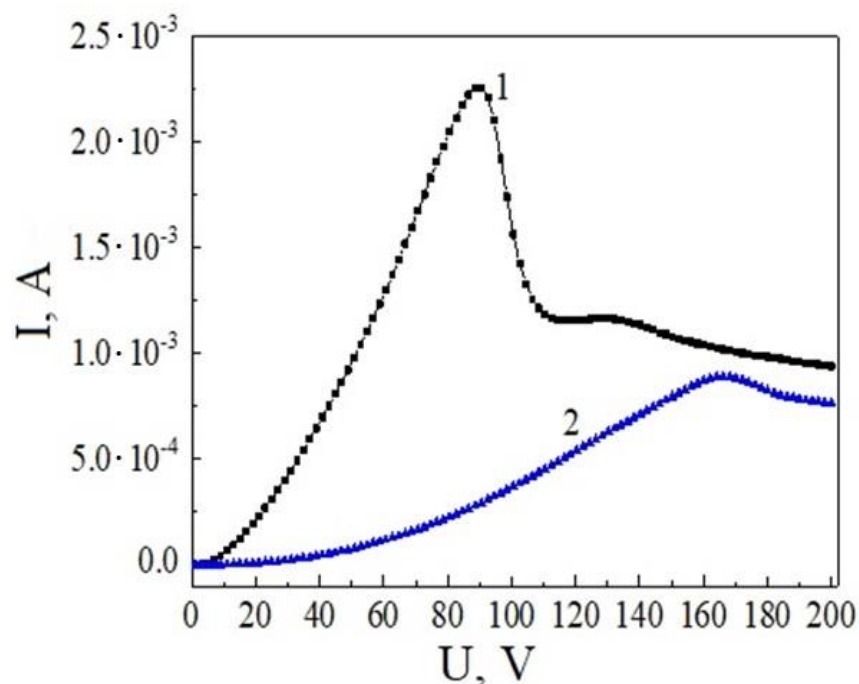


Рисунок 42 – Влияние электрического поля на темновые токи структуры металл/ α - ϵ - Ga_2O_3 /металл: до (1) и после (2) воздействия сильного электрического поля.

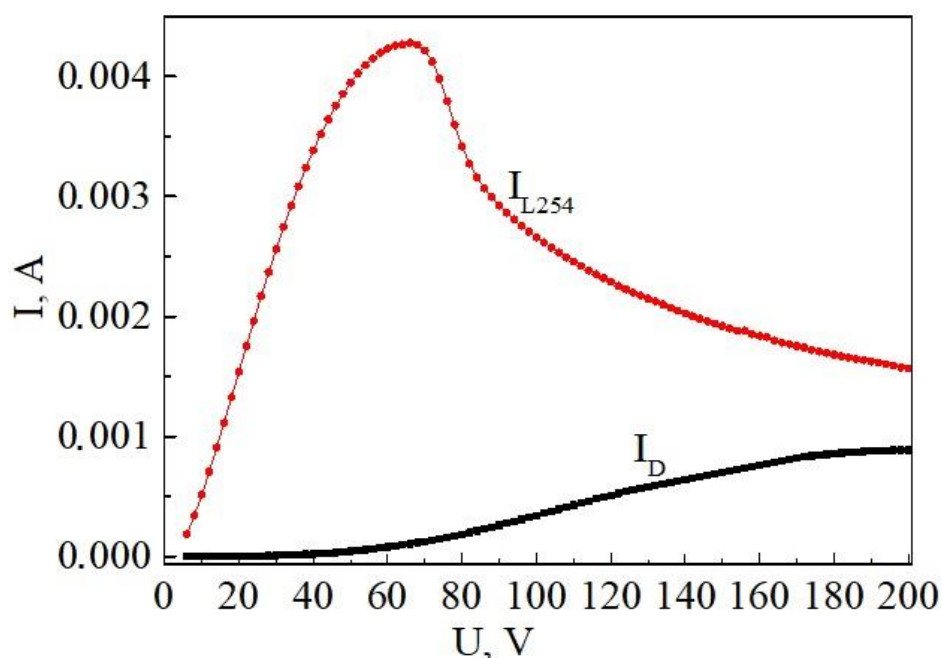


Рисунок 33 – Темновая ВАХ структуры металл/ α - ϵ -Ga₂O₃/металл после подачи 200 В (I_D) и при действии излучении с $\lambda = 254$ нм (I_L).

Расчет фотоэлектрических характеристик дал следующие результаты: $C = 46.7$ отн. ед., $R = 1.5$ А/Вт и $D^* = 2.1 \cdot 10^{10}$ Гц^{0.5} см/Вт, $\langle t_d \rangle = 0.2$ с, $\langle t_r \rangle = 2.5$ с.

Предполагается, что большие значения темновых токов в образцах металл/ α - ϵ -Ga₂O₃/ α -Ga₂O₃/...../ α - ϵ -Ga₂O₃/ α -Ga₂O₃/металл объясняются присутствием двумерного электронного газа (2DEG) в ϵ -фазе Ga₂O₃ за счет существования спонтанной поляризации P_{sp} [37]. Вектор спонтанной поляризации в ϵ -Ga₂O₃ по направлению совпадает с постоянной кристаллической решетки "с", и под действием сильного электрического поля может изменять направление на противоположное. В результате нарушаются условия формирования 2DEG, и темновой ток при $U > U_m$ резко снижается.

На следующем этапе была рассмотрена вторая партия α - ϵ -Ga₂O₃ на структурированных подложках. Структуры получали аналогичным образом, что и предыдущие. На рисунке 44 представлены темновые ВАХ детекторов.

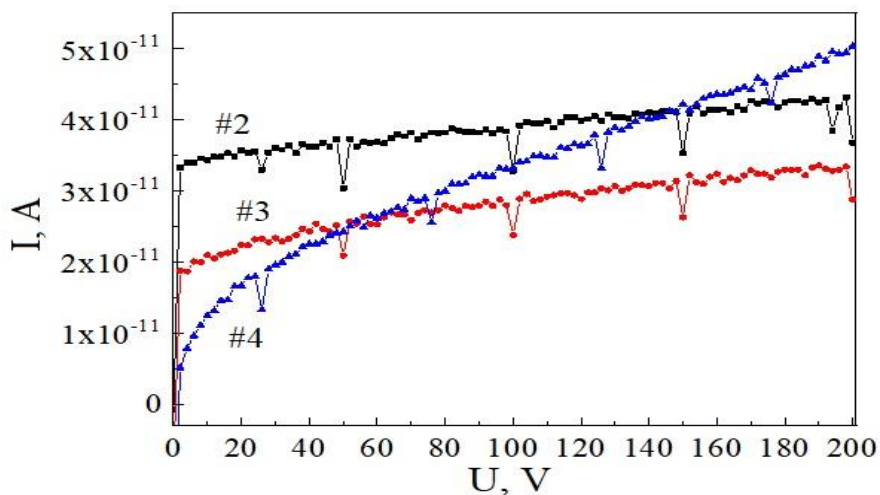


Рисунок 44 – Темновые вольт-амперные характеристики образцов на структурированной подложке (цифры возле кривых обозначают номер образцов).

Значения темнового тока образцов на паттерной подложке отличаются незначительно и изменяются в пределах от $2 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-11}$ А в интервале $0 \leq U \leq 200$ В. Воздействие УФ-излучения на ВАХ образцов показано на рисунке 45.

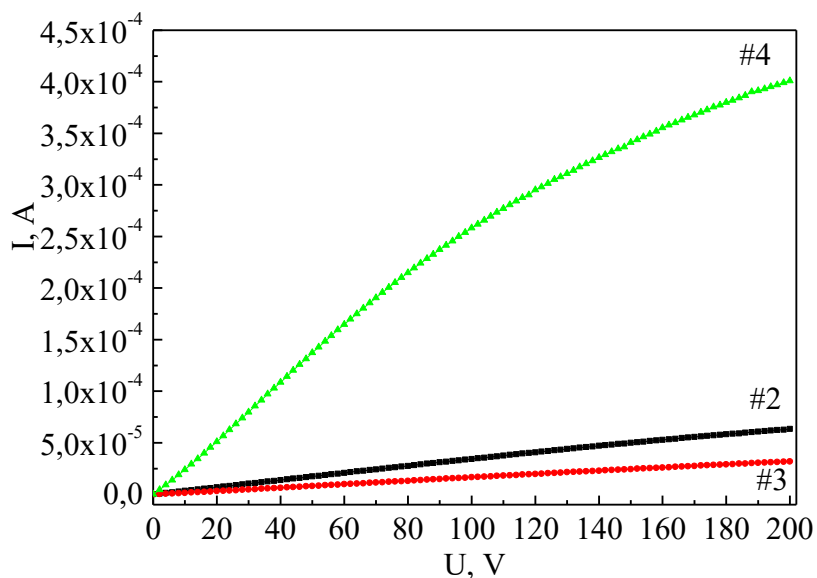


Рисунок 45 –ВАХ для образцов на структурированной подложке, полученные при облучении структур длиной волны $\lambda = 254$ нм (цифры возле кривых обозначают номер образца).

При воздействии излучения с $\lambda = 254$ нм токи увеличиваются на 6 – 7 порядков, фототок достигает 10^{-5} – 10^{-4} А. В отличие от темновых токов, наблюдается значительно больший разброс значений I_L для трех исследованных образцов. Было отмечено отсутствие максимума на ВАХ при воздействии УФ-излучения, а также эффекта переключения, которое проявлялось при приложении сильного электрического поля (см. рис. 42).

Такая разница в поведении ВАХ полиморфных образцов, вероятно, связана с заметным отличием элементного состава пленок, что обусловлено новизной материала и не идеальностью метода получения пленок.

Расчет фотоэлектрических характеристик четвертого образца дал следующие результаты: $C = 2.8 \cdot 10^6$ отн. ед., $R = 0.3$ А/Вт, $D^* = 3.25 \cdot 10^{13}$ Гц^{0.5} см/Вт.

Последним типом (четвертым) образцов были детекторы на основе эpsilon-фазы оксида галлия. Темновые токи активной области детекторов имеют значения ниже, чем может измерить источник-измеритель. Вольт-амперная характеристика, полученная при воздействии излучением длиной волны 254 нм, имеет линейную зависимость (рис. 46). Значения фототока имеют значения от 10 нА до 7 мкА при напряжении $0 \leq U \leq 200$ В.

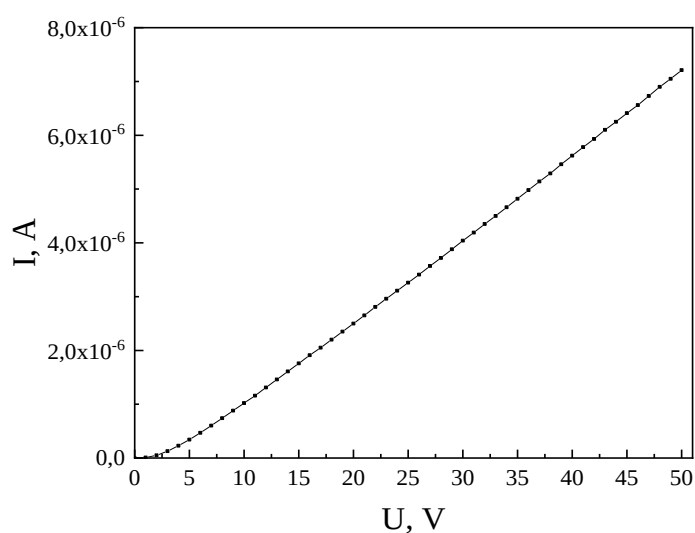


Рисунок 46 – ВАХ детектора на основе ϵ -Ga₂O₃, полученная при освещении $\lambda = 254$ нм.

Данная зависимость говорит о том, что верно и предположение о вкладе в фототок исключительно эpsilon-фазы в структуре α -| ϵ -Ga₂O₃, а альфа-фаза не способна чувствовать ультрафиолетовое излучение длиной волны 254 нм и больше.

Расчет фотоэлектрических характеристик дал следующие результаты: $C > 6 \cdot 10^4$ отн. ед., $R > 0.37$ А/Вт, $D^* = 6.5 \cdot 10^{12}$ Гц^{0.5} см/Вт.

4.3 Вывод по главе 4

Большую роль в росте пленок играет структура поверхности подложки. На гладких сапфировых подложках растет альфа-фаза оксида галлия, а на профилированных – α -| ϵ -Ga₂O₃. Как было сказано ранее, до сих пор рост полиморфных пленок оксида галлия является до конца неотработанным, что приводит к отличным друг от друга результатам.

Пленки α -Ga₂O₃ на гладких сапфировых подложках являются нечувствительными к УФ-излучению длиной волны 254 нм. Воздействие ультрафиолетом на полиморфные фазы оксида галлия приводит к значительному росту фотопроводимости. Данный факт дает полагать, что нанесение ВШЭ позволит значительно улучшить фотоэлектрические характеристики детекторов.

Воздействие УФ-излучением и сильным электрическим полем на α -| ϵ -Ga₂O₃ приводит к переключению из состояния НС в ВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации исследовались двухэлектродные детекторы, детекторы со встречно-штыревыми электродами, а также детекторы на основе полиморфных фаз оксида галлия. В работе показано влияние отжига пленок и топологии электродов на фотоэлектрические характеристики детекторов.

На основе проделанных экспериментов удалось определить положительное влияние отжига при 900 °С на характеристики детекторов. Было показано, что нанесение встречно-штыревых электродов на поверхность пленки оксида галлия увеличивает фотоэлектрические характеристики образцов на 3–4 порядка. Отмечено, что образцы с наименьшим межэлектродным расстоянием (5 мкм) показывают наибольшую чувствительность к ультрафиолетовому излучению.

Работа с полиморфными пленками оксида галлия на структурированных сапфировых подложках показала, что данные структуры имеют высокие значения фотоэлектрических характеристик без нанесения встречно-штыревых электродов на поверхность α - ϵ -Ga₂O₃.

Анализируя ВАХ и фотоэлектрические характеристики всех трех типов образцов, можно сделать следующие выводы:

1. Зависимость тока от напряжения для двухэлектродных образцов определяется инжекцией электронов из металла в оксид галлия.
2. Отжиг образцов увеличивает чувствительность к ультрафиолетовому излучению.
3. Снижение межэлектродного расстояния ведет к увеличению роста фототока.
4. Проявляется сильная зависимость фотоэлектрических характеристик от условий изготовления образцов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Metal–Semiconductor–Metal ϵ -Ga₂O₃ Solar-Blind Photodetectors with a Record-High Responsivity Rejection Ratio and Their Gain Mechanism / Y. Qin [et. al] // ACS Photonics. – 2020. – V. 3. – P. 812–820.
2. Self-powered MSM deep-ultraviolet β -Ga₂O₃ photodetector realized by an asymmetrical pair of Schottky contacts / L. Dong [et. al] // Optical Materials Express. – 2019. – V. 9. – P. 1191–1199.
3. Saikumar A.K. RF Sputtered Films of Ga₂O₃ / A.K. Saikumar, S.D. Nehate and K.B. Sundaram // ECS Journal of Solid State Science and Technology. – 2019. – V. 8. – P. 3064–3068.
4. Review of deep ultraviolet photodetector based on gallium oxide / Y. Qin [et. al] // Chin. Phys. B. – 2019. – V. 28. – 018501.
5. Arrays of Solar-Blind Ultraviolet Photodetector Based on β -Ga₂O₃ Epitaxial Thin Films / Y. Peng [et. al] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2018. – V. 30. – P. 993–996.
6. 3D Solar-Blind Ga₂O₃ Photodetector Array Realized Via Origami Method / Y. Chen [et. al] // Advanced Functional Materials. – 2019. – V. 29. – 1906040.
7. New concept ultraviolet photodetectors / H. Chen [et. al] // Materials Today. – 2015. – V. 18. – P. 493–502.
8. HVPE Growth and Characterization of ϵ -Ga₂O₃ Films on Various Substrates / V.I. Nikolaev [et. al] // ECS J. Solid State Sci. Technol. – 2020. – V. 9. – 045014.
9. High-performance β -Ga₂O₃ thickness dependent solar blind photodetector / X. Zhang [et. al] // Optic Express. – 2020. – V. 28. – P. 4169–4177.
10. β -Ga₂O₃/p-Si heterojunction solar-blind ultraviolet photodetector with enhanced photoelectric responsivity / X.C. Guo [et. al] // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 660. – P. 136–140.

11. Yotter R. A. A review of photodetectors for sensing light-emitting reporters in biological systems / R.A Yotter, D. Wilson // IEEE Sensors Journal. – 2003. – V. 3. – P. 288–303.
12. Lee S. Enhanced thermal stability of alpha gallium oxide films supported by aluminum doping / S. Lee, K. Akaiwa and S. Fujita // Japanese Journal of Applied Physics. – 2015. – V. 54, No. 3.
13. First-principles study of the structural, electronic, and optical properties of Ga_2O_3 in its monoclinic and hexagonal phases / H. He [et al.] // Phys. rev. – 2006. – Vol. 74. – 195123.
14. Roy R. Polymorphism of Ga_2O_3 and the System $\text{Ga}_2\text{O}_3\text{—H}_2\text{O}$ / R. Roy, V. Hill and E. Osborn // J. Amer. Chem. Soc. – 1952. – V. 74. – P. 719–722.
15. H. Peelaers. Brillouin zone and band structure of $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / Peelaers H. and Walle. C. // Physica status solidi B. – 2015. – V. 252. – P. 828–832.
16. Microstructures and rotational domains in orthorhombic $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ thin films / H. Nishinaka [et. al] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2018. – V. 57. – 115601.
17. The real structure of $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ and its relation to κ -phase / I. Cora [et. al] // CrystEngComm. – 2017. – V. 19. – P. 1509–1516.
18. Deep level defects throughout the bandgap of (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ detected by optically and thermally stimulated defect spectroscopy / Z. Zhang [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2016. – V. 108. – 052105.
19. Oxygen vacancies and donor impurities in $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / J. Varley [et al.] // Applied physics letters. – 2012. – V. 97. – 142106.
20. Toward controlling the carrier density of Si doped Ga_2O_3 films by pulsed laser deposition / F. Zhang [et al.] // Applied Physics Letters. – 2016. – V. 109. – 102105.
21. Development of solar-blind photodetectors based on Si-implanted $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ / S. Oh [et al.] // Optics Express. – 2015. V. 23. – P. 28300–28305.
22. Dakhel A. Investigation of opto-dielectric properties of Ti-doped Ga_2O_3 thin films / A. Dakhel // Solid State Sciences. – 2013. – V. 20. – P. 54-58.

23. Conductivity control of Sn-doped α -Ga₂O₃ thin films grown on sapphire substrates / K. Akaiwa // Japanese Journal of Applied Physics. – 2016. V. 55, No. 12.
24. On the bulk β -Ga₂O₃ single crystals grown by the Czochralski method / Z. Galazka [et al.] // J. Cryst. Growth. – 2014. – V. 404. – P. 184–191.
25. Role of self-trapping in luminescence and p-type conductivity of wide-band-gap oxides / Varley J. [et al.] // Phys. Rev. B. – 2012. – V. 85. – 081109.
26. Войцеховский А.В., Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013, – 560 с.
27. β -Ga₂O₃/p-Si heterojunction solar-blind ultraviolet photodetector with enhanced photoelectric responsivity / X.C. Guo [et. al] // Journal of Alloys and Compounds. – 2016. – V. 660. – P. 136-140.
28. Decrease of oxygen vacancy by Zn-doped for improving solar-blind photoelectric performance in β -Ga₂O₃ thin films / D. Guo [et al.] // Electronic Material Letters. – 2017. – V. 17. – P. 483–488.
29. High gain Ga₂O₃ solar-blind photodetectors realized via a carrier multiplication process / C. Hu [et al.] // OPTICS EXPRESS. – 2015. – V. 23, No. 10.
30. Ultrahigh-Responsivity, Rapid-Recovery, Solar-Blind Photodetector Based on Highly Nonstoichiometric Amorphous Gallium Oxide / L. Qian // ACS Photonics. – 2017. – V. 4. – P. 2203–2211.
31. Vertical Solar-Blind Deep-Ultraviolet Schottky Photodetectors Based on β -Ga₂O₃ Substrates / T. Oshima [et al.] // The Japan Society of Applied Physics. – 2008. – V.1. – 011202.
32. High-performance UV detectors based on room-temperature deposited amorphous Ga₂O₃ thin films by RF magnetron sputtering / S. Han [et. al] // J. Mater. Chem. – 2019. – V. 7. – P. 11834-11844.

33. Optimizing the performance of a β -Ga₂O₃ solar-blind UV photodetector by compromising between photoabsorption and electric field distribution / X. Wang [et. al] // Opt. Mater. Express. – 2018. – V. 9. – P. 2918-2927.
34. Room-Temperature Fabricated Amorphous Ga₂O₃ High-Response-Speed Solar-Blind Photodetector on Rigid and Flexible Substrates / S. Cui [et. al] // Adv. Opt. Mater. – 2017. – V. 5. – 1700454.
35. Enhanced photoresponse performance in Ga/Ga₂O₃ nanocomposite solar-blind ultraviolet photodetectors / S. Cui [et. al] // Chin. Physics B. – 2018. – V. 27. – 067301.
36. Ga₂O₃ Thin Film Growth on c-Plane Sapphire Substrates by Molecular Beam Epitaxy for Deep-Ultraviolet Photodetectors / T. Oshima [et. al] // Jpn. J. Appl. Phys. – 2007. – V. 46. – 7217.
37. Pulsed laser deposition of gallium oxide films for high performance solar-blind photodetectors / F. Yu [et. al] // Opt. Mater. Express. – 2015. – V. 5. – P. 1240-1249.
38. Thermal annealing effect on β -Ga₂O₃ thin film solar blind photodetector heteroepitaxially grown on sapphire substrate / S. Rafique [et. al] // Phys. Status Solidi A. – 2017. – V. 214. – 1700063.
39. HVPE growth of α - and ϵ -Ga₂O₃ on patterned sapphire substrates / V. I. Nikolaev [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1400. – 055049.
40. Halide Vapor Phase Epitaxy α - and ϵ -Ga₂O₃ Epitaxial Films Grown on Patterned Sapphire Substrates / S. Shapenkov [et al.] // Phys. Status Solidi A. – 2020. – 1900892.
41. F. Chien / A Review on Conduction Mechanisms in Dielectric Films // Advances in Materials Science and Engineering. – 2014. – V. 2014. – P. 1–18.
42. Deep ultraviolet photodetectors based on p-Si/i-SiC/n-Ga₂O₃ heterojunction by inserting thin SiC barrier layer / Y. An [et al.] // Applied Physics A. – 2016. – V. 112. – 1036.

43. Spectrally Selective and Highly Sensitive UV Photodetection with UV-A,C Band Specific Polarity Switching in Silver Plasmonic Nanoparticle Enhanced Gallium Oxide Thin-Film / Arora K. [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2020. – 2000212.
44. Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. – Москва: Россия, 1973, – 411 с.
45. S. Cho. Epitaxial engineering of polar ϵ -Ga₂O₃ for tunable two-dimensional electron gas at the heterointerface / Cho S. and Mishra R. // Appl. Phys. Lett. – 2018. – V. 112. – 162101.

Отчет о проверке на заимствования №1



Автор: zoldmine@gmail.com / ID: 6948317

Проверяющий: zoldmine@gmail.com / ID: 6948317

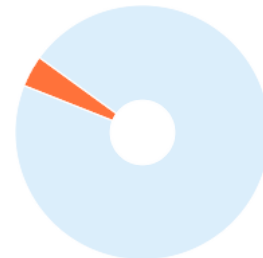
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - users.antiplagiat.ru

ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 9
Начало загрузки: 17.06.2021 10:56:30
Длительность загрузки: 00:00:01
Имя исходного файла: Цымбалов магистерская.pdf
Название документа: Цымбалов магистерская
Размер текста: 75 кБ
Символов в тексте: 77090
Слов в тексте: 9586
Число предложений: 638

ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 17.06.2021 10:56:32
Длительность проверки: 00:00:16
Комментарии: не указано
Модули поиска: Интернет



ЗАИМСТВОВАНИЯ

3,89%

САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

ЦИТИРОВАНИЯ

0%

ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

96,11%

Заимствования — доля всех найденных текстовых пересечений, за исключением тех, которые система отнесла к цитированиям, по отношению к общему объему документа.
Самоцитирования — доля фрагментов текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника, автором или соавтором которого является автор проверяемого документа, по отношению к общему объему документа.

Цитирования — доля текстовых пересечений, которые не являются авторскими, но система посчитала их использование корректным, по отношению к общему объему документа. Сюда относятся оформленные по ГОСТу цитаты; общеупотребительные выражения; фрагменты текста, найденные в источниках из коллекций нормативно-правовой документации.

Текстовое пересечение — фрагмент текста проверяемого документа, совпадающий или почти совпадающий с фрагментом текста источника.

Источник — документ, проиндексированный в системе и содержащийся в модуле поиска, по которому проводится проверка.

Оригинальность — доля фрагментов текста проверяемого документа, не обнаруженных ни в одном источнике, по которым шла проверка, по отношению к общему объему документа.

Заимствования, самоцитирования, цитирования и оригинальность являются отдельными показателями и в сумме дают 100%, что соответствует всему тексту проверяемого документа.

Обращаем Ваше внимание, что система находит текстовые пересечения проверяемого документа с проиндексированными в системе текстовыми источниками. При этом система является вспомогательным инструментом, определение корректности и правомерности заимствований или цитирований, а также авторства текстовых фрагментов проверяемого документа остается в компетенции проверяющего.

№	Доля в отчете	Источник	Актуален на	Модуль поиска
[01]	1,71%	http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/services/Download/vtls:000464340/SOURCE1 (2/3) http://vital.lib.tsu.ru	28 Янв 2020	Интернет
[02]	1,7%	OSA Review of gallium-oxide-based solar-blind ultraviolet photodetectors (2/2) https://osapublishing.org	14 Июл 2020	Интернет
[03]	0,49%	https://esu.citis.ru/dissertation/D8FQWQEMUMWMAB8QOUCQKBDO https://esu.citis.ru	20 Мар 2018	Интернет