

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК  
Руководитель ООП  
д-р физ.-мат. наук, доцент

  
\_\_\_\_\_ О.Н. Чайковская  
подпись

« 14 » июня 2021 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В SI-GAAS ПОСЛЕ  
МЕХАНИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Направление подготовки 03.03.02 Физика  
Направленность (профиль) «Фундаментальная физика»

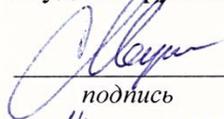
Фомин Марк Геннадьевич

Руководитель ВКР  
канд. физ.-мат. наук, Старший  
научный сотрудник

  
\_\_\_\_\_ С.Ю. Саркисов  
подпись

« 14 » июня 20 21 г.

Автор работы  
студент группы № 051721

  
\_\_\_\_\_ М.Г. Фомин  
подпись

« 14 » июня 20 21 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

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

 О.Н. Чайковская  
подпись

« 08 / февраля 20 21 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы бакалавра / специалиста / магистра обучающемуся Фомину Марку Геннадьевичу группы №051721 по направлению подготовки 03.03.02 «Физика», направленность (профиль) «Фундаментальная физика»

1 Тема выпускной квалификационной работы: исследование времени жизни носителей заряда в Si-GaAs после механической и химической обработки поверхностей.

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) в учебный офис / деканат – 15 июня 2021 года б) в ГЭК – 15 июня 2021 года

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – Полупроводниковые кристаллы LT-GaAs, SI-GaAs, GaSe

Предмет исследования – Процессы релаксации неравновесных носителей заряда

Цель исследования – Определение влияния обработки поверхностей кристаллов GaAs на времени жизни носителей заряда

Задачи: 1) Провести измерение времени жизни носителей заряда в кристаллах GaAs после механической и химической обработки поверхностей; 2) Провести анализ данных.

---

Методы исследования: OPTP (optical pump-terahertz probe) спектроскопия

---

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа, – Центр исследований и разработок «Перспективные технологии в микроэлектронике» ТГУ

4 Краткое содержание работы Проведены измерения временных профилей коэффициента пропускания для терагерцового излучения в кристаллах GaAs после механической и химической обработки поверхностей в сравнении с LT-GaAs, GaSe. Выполнена обработка полученных данных, рассчитаны времена жизни.

Руководитель выпускной квалификационной работы  
Доцент КПЭ РФФ

должность, место работы



подпись

/ Саркисов С.Ю.  
И.О. Фамилия

Задание принял к исполнению



подпись

/ Фомин М.Г.  
И.О. Фамилия

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа бакалавра «Исследование времени жизни носителей заряда в SI-GaAs после механической и химической обработки поверхностей» содержит: 27 стр., 3 главы, 10 рисунков, 1 таблицу, 13 источников.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ТЕРАГЕРЦОВАЯ PUMP-PROBE СПЕКТРОСКОПИЯ, GaAs, LT-GaAs, GaAs-EL2, SI-GaAs:Cr, ВРЕМЯ ЖИЗНИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА, ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТИ

В работе проведено исследование временной динамики процесса релаксации неравновесных носителей заряда в полупроводниковых кристаллах GaAs, LT-GaAs, GaAs-EL2 и SI-GaAs:Cr. А также для образца GaAs после механической и химической обработки поверхности. Проведен анализ полученных экспериментальных данных для изучения влияния обработки поверхности полупроводящего GaAs на время жизни неравновесных носителей заряда.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Обзор литературы .....	5
1.1. Фотопроводящие дипольные антенны.....	5
1.2. Встроенное поле. Генерация от поверхности. ....	6
1.3. Электрооптическое детектирование. ....	8
1.4. Терагерцовая спектроскопия во временной области .....	10
1.5. Влияние обработки поверхности на динамику релаксации неравновесных носителей заряда .....	13
1.6. Заключение и постановка задачи .....	14
2. Методика измерений времени жизни носителей заряда.....	16
2.1. Измерение временных профилей коэффициента пропускания фотовозбужденных полупроводников.....	16
2.2. Аппроксимация экспериментальных данных и расчет времени жизни .....	19
3. Обработка результатов исследования.....	20
Заключение .....	24
Литература .....	25

## Введение

Измерение динамики релаксации горячих электронов в полупроводниковых материалах чрезвычайно важно для физики неравновесных явлений. Для работы полупроводниковых приборов важно знать параметры неравновесных носителей заряда, в частности время жизни. Например, арсенид-галлиевым фотопроводящим дипольным антеннам для резкого спада фототока после возбуждения или фотомиксеров необходимо малое время жизни, порядка 200-500 фс [1 - 3]. К тому же известно, что на время жизни носителей заряда весомое влияние оказывают их состояния в поверхностном слое. Поверхностные состояния напрямую связаны с нарушением структуры на поверхности, будь то дефекты или химические связи со всевозможными покрытиями. Поэтому актуальна задача исследования влияния обработки поверхности кристалла Si-GaAs на динамику релаксации носителей заряда. Имеется ряд исследований, в которых наблюдались изменения темпа рекомбинации после нанесения сульфидного [4], полимерного [5] и прочих покрытий.

Потому как терагерцовые сигналы чувствительны к наличию свободных носителей заряда, т.е. за счет поглощения ими в материале интенсивность проходящего терагерцового излучения падает. К тому же применение терагерцовых систем в методе накачка-зонд спектроскопии с фемтосекундными импульсными лазерными системами дает возможность исследовать материалы с временем жизни горячих электронов порядка пикасекунд, что дает новые возможности для измерений по сравнению с классическими контактными способами. Это делает импульсные терагерцовые системы перспективными инструментами в исследовании сверхбыстрой динамики носителей заряда в полупроводниках.

Данная работа направлена на исследование влияния механической и химической обработки поверхности кристалла на временную динамику релаксации неравновесных носителей заряда. Исследование проводилось методом pump-probe («накачка-зонд») терагерцовой спектроскопии. Также,

совместно с экспериментальной задачей реализации схемы установки для измерения и проведения серии экспериментов, решается задача по обработке полученных зависимостей относительного дифференциального коэффициента пропускания и получения из них времени жизни неосновных носителей заряда.

Настоящая работа, направленная на решение вышеуказанных проблем, имеет практическую значимость для процесса производства и контроля дипольных антенн детекторов рентгеновского излучения.

# 1. Обзор литературы

## 1.1. Фотопроводящие дипольные антенны

Для генерации и регистрации терагерцового излучения активно используют устройства, основанные на фотопроводящих дипольных антеннах (ФДА), которым свойственно два режима работы: импульсный и режим фотомиксера. Устройство ФДА изображено на рисунке 1. Между металлическими электродами, расположенными на полупроводниковой (полуизолирующей) подложке, создается разность потенциалов порядка нескольких киловольт. Электрический ток протекает когда зазор между электродами освещают ультракороткими лазерными импульсами, в результате чего на короткое время резко возрастает концентрация носителей заряда в полупроводнике. Приложенное к электродам разность потенциалов действует на неравновесные носители заряда, благодаря чему они ускоряются и возникает импульсный, являющийся источником терагерцового излучения. Длительность импульса тока и спектр испускаемой терагерцовой волны определяется временем жизни неравновесных носителей заряда полупроводниковой подложки. Одним из важнейших параметров ФДА – это ширина запрещенной зоны полупроводящей подложки, потому как энергия фотона лазерного излучения должна быть больше ширины запрещенной зоны для получения максимальной эффективности ФДА.

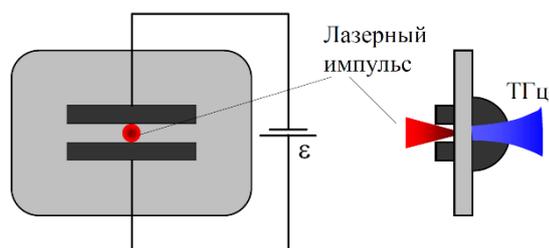


Рис.1. Схематичное изображение фотопроводящей антенны. [6]

Электромагнитное излучение является следствием изменения со временем фототока в полупроводнике. Такое излучение направлено по

нормали к поверхности источника. Напряженность такого излучения можно найти по приближенной формуле:

$$E_{THz} = \frac{A}{c^2 z} \frac{\partial J(t)}{\partial t},$$

где  $A$  – площадь зазора между контактами, освещаемая лазерным импульсом;  $c$  – скорость света;  $z$  – расстояние от источника излучения;  $J(t)$  – плотность фототока. Полагается, что  $z$  много больше размеров источника. Составляющей дырочного тока можно пренебречь, потому как подвижность электронов существенно больше подвижности дырок:

$$J(t) = N(t)e\mu E_b,$$

где  $N(t)$  – концентрация фотоэлектронов;  $e$  – элементарный заряд;  $\mu$  – подвижность электронов;  $E_b$  – приложенная разность потенциалов между электродами. В свою очередь концентрация носителей заряда зависит от энергии лазерного импульса. Чем выше энергия импульса, тем большая часть запасенной энергии переходит в терагерцовое излучение.

Подобным образом ФДА активно применяется и как детектор терагерцового излучения, лишь заменяя источник напряжения, приложенный к электродам, на вольтметр для регистрации импульса тока, возникающего при одновременном прохождении через ФДА терагерцового излучения и зондирующего (probe) лазерного импульса. Такой ток прямо пропорционален электрическому полю терагерцового импульса в момент прихода зондирующего импульса.

## **1.2. Встроенное поле. Генерация от поверхности.**

Для некоторые полупроводниковых материалов характерна генерация терагерцового излучения через поверхностные состояния. Для таких полупроводников свойственно встроенное (приповерхностное) электрическое поле в области изгиба энергетических зон на поверхности. Разберем этот процесс на примере одного из активно используемых электронного

полупроводника n-GaAs. Положение уровня Ферми (УФ) в объеме и у поверхности отличается: в объеме УФ расположен ближе к зоне проводимости, когда у поверхности ближе к центру запрещенной зоны (рисунок 2). Поле, возникающее благодаря этому, направлено к поверхности и вызывает изменение плотности электронов – смещение внутрь материала. Таким образом вблизи поверхности n-GaAs возникает обедненный слой – слой пониженной концентрации носителей заряда. Несмотря на наличие встроенного поля результирующий ток отсутствует благодаря тому, что дрейфовая составляющая тока уравновешена диффузионным током градиента концентрации электронов.

В результате действия лазерного импульса в приповерхностном слое полупроводника возникают электронно-дырочные пары, ускоряющиеся встроенным полем. Такой краткосрочное возбуждение носителей заряда можно считать мгновенным в силу того, что продолжительность лазерного импульса много меньше времени жизни возбужденных носителей заряда.

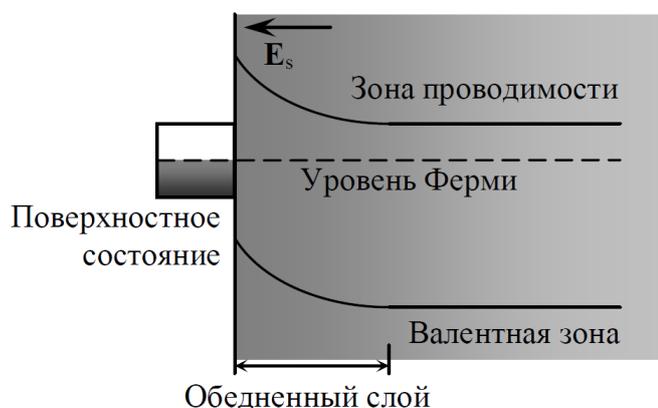


Рис. 2. Искривление запрещенной зоны в полупроводнике с электронным типом проводимости и встроенное поле  $E_s$ . [6]

Возникающий в результате разделения заряда диполь осциллирует до тех пор, пока состояние равновесия не установится вновь. Терагерцовое поле прямо пропорционально встроенному полю.

### 1.3. Электрооптическое детектирование.

Детектирование терагерцового излучения происходит путем электрооптического стробирования – процессе, заключающегося в изменении показателя преломления среды в оптическом диапазоне электромагнитного излучения в присутствии терагерцового излучения – внешнего электрического поля, которое изменяет ориентацию эллипсоида показателей преломления электрооптического кристалла, в результате чего кристалл становится двулучепреломляющим. Зондирующий импульс с линейной поляризацией, проходящий через электрооптический кристалл совместно с терагерцовым излучением, претерпевает изменение поляризации на эллиптическую, как результат различного набега фаз для обыкновенной и необыкновенной волны. Применяя призму Волластона (или призму Гланна) как поляризационный анализатор, можно измерить величину эллиптичности поляризации при помощи балансного фотодетектора. Балансный фотодетектор представляет собой два фотодиода с фильтрами. Такой детектор регистрирует разностный сигнал с диодов и позволяет отсечь большую часть шумов лазера, увеличивая по отношению к однодиодному детектору полезный сигнал вдвое.

Такое детектирование называют стробированием потому, измерение величины терагерцового излучения производится в узком временном стробе соответствующему перекрытию терагерцового поля и поля сверхкороткого электромагнитного импульса – фемтосекундного лазера. Потому как длительность терагерцового импульса много больше длительности фемтосекундного лазерного импульса, принимается, что при электрооптическом стробировании детектируется квазипостоянное электрическое поле. Также принимается, что относительная задержка зондирующего и терагерцового импульсов при прохождении через кристалл невелика, т.е. можно считать, что зондирующий импульс соответствует одному и тому же участку терагерцового импульса при их распространении через всю длину кристалла. Для проведения измерения следующего участка

терагерцового импульса изменяется задержка зондирующего импульса на нужную величину путем изменения длины пути зондирующего импульса. Проводя сканирование на всю длину терагерцового импульса, получают его волновую форму – осциллограмму. На рисунке 3 показана схема электрооптического детектирования. На входе схемы имеем линейно поляризованный зондирующий пучок, который в результате стробирования преобразуется в эллиптически поляризованный. Четвертьволновая пластинка необходима для изменения поляризации зондирующего пучка из эллиптической в круговую, ее расположение возможно перед и после электрооптического кристалла. Для разделения двух взаимно перпендикулярных поляризаций используется анализатор, скрещенный с первым поляризатором. При балансном детектировании необходимо использовать анализатор, способный разделить две взаимно перпендикулярные поляризации.

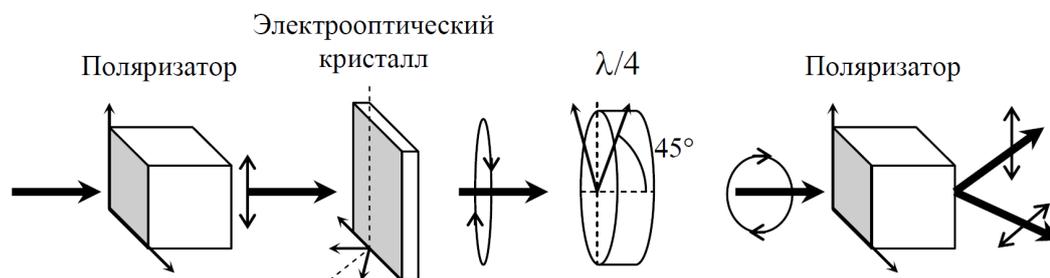


Рис 3. Электрооптическое балансное детектирование [6]

Балансный фотоприемник регистрирует разность интенсивностей двух поляризационных составляющих зондирующего импульса. При скрещенном детектировании (однодиодный фотоприемник) регистрируется интенсивность только в одной поляризации – по пропусканию анализатора, т.е. перпендикулярная первому поляризатору и первоначальной поляризации. В схеме с балансным детектированием в отсутствии терагерцового поля обе поляризации после разделения анализатором имеют одинаковую интенсивность и наблюдается нулевой балансный сигнал.

## 1.4. Терагерцовая спектроскопия во временной области

На рисунке 4 приведена типичная схема установки процесса генерации и детектирования терагерцового излучения сверхкороткими лазерными импульсами. Генерация терагерцового излучения производится лазерным пучком наибольшей энергии – импульс накачки (pump), действующим на некоторый кристалл (GaSe) или специальную структуру (дипольная антенна). Детектирование производится пучком небольшой энергии – зондирующий импульс (probe). Для генерации и детектирования могут применяться аналогичные структуры или кристаллы.

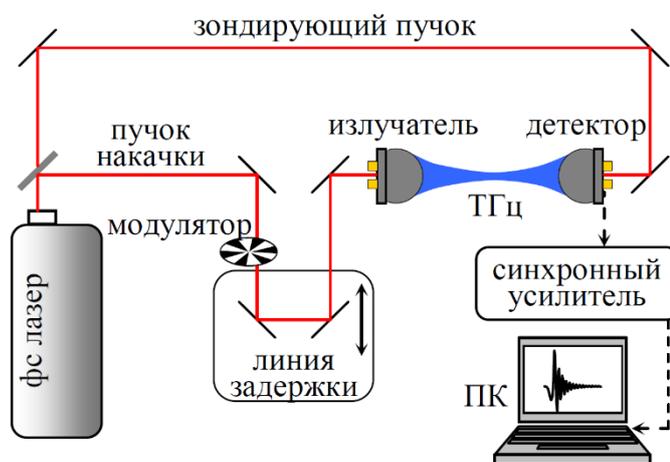


Рис. 4. Схема генерации и детектирования терагерцового излучения

[6]

Детектирование производится путем изменения поляризации зондирующего импульса (или другой его характеристики) в присутствии терагерцового излучения. Наиважнейшей особенностью приведенного метода является постоянная во времени связь фазы терагерцового излучения и интенсивности лазерного импульса. Периодическое изменение частоты повторения лазерных импульсов или механические вибрации одинаковы для терагерцового импульса и импульса накачки и поэтому не нарушают этой когерентности. К тому же импульс накачки и зондирующий импульс — это продукты одного и того же лазерного импульса в следствии чего они сохраняют когерентность. Таким образом терагерцовый и зондирующий

импульсы привязаны по фазе друг к другу, из-за чего можно утверждать, что зондирующий импульс взаимодействует в детекторе каждый раз с одним и тем же участком терагерцового импульса. Также считается что зондирующий импульс взаимодействует с некоторым постоянным полем, потому как длительность лазерного импульса невелика и составляет порядка десятка фемтосекунд и много меньше длительности терагерцового импульса. Зондирование различных участков терагерцового импульса производится путем изменения задержки прихода зондирующего импульса относительно момента прихода терагерцового импульса на электрооптическую схему. К тому же разрешение такого стробирования соответствует длительности зондирующего импульса. Изменение задержки производится путем изменения длины пути, который проделывает импульс накачки, прежде чем попасть на исследуемый образец. Длина пути варьируется с помощью механической линии задержки (рисунок 5) В дальнейшем к полученной осциллограмме применяют преобразование Фурье. Также в схеме используется механический преобразователь – модулятор, позволяющий модулировать стробирования определенной частоты, с которой производятся измерения, благодаря чему повышается чувствительность и снижается уровень регистрируемого шума, отсекая фоновые излучения.

Принципиальная схема тппового терагерцового спектрометра показана на рисунке 5. Лазерный пучок фемтосекундного (фс) лазера с помощью светоделительного клина К разделяют на два пучка: пучок накачки и зондирующий (пробный) пучок. Более мощный пучок накачки используется для генерации терагерцового импульса в кристалле-генераторе Г, а зондирующий пучок – для детектирования в кристалле-детекторе Д. Терагерцовое излучение, испускаемое кристаллом Г, часто имеет широкую диаграмму направленности, поэтому для его сбора обычно применяют параболическое зеркало с большой численной апертурой.

Терагерцовый пучок необходимо сфокусировать в области размеров порядка длины волны для повышенной эффективности его детектирования,

поэтому параболическое зеркало может использоваться также в плече детектора. Энергия зондирующего импульса может сильно отличаться – от нескольких нДж вплоть до десятков мДж, хотя для эффективного стробирования зачастую достаточно и меньших значений. Частотная характеристика повторений импульсов также сильно различается – от десятков Гц до сотен МГц[6], что требует некоторых изменений в способе детектирования. Регистрация сигнала производится синхронным детектором, который синхронизируется с ранее упомянутым модулятором, выделяя узкую частотную компоненту сигнала, повышая тем самым чувствительность и позволяя выделить слабый полезный сигнал на нужной частоте, даже если амплитуда шума существенно превышает амплитуду сигнала. внешними импульсами синхронизации задается рабочая частота синхронного детектора. При использовании лазерной системы с частотой повторения порядка 1 кГц синхросигнал обычно подается непосредственно из лазерной системы (со специального фотодиода)

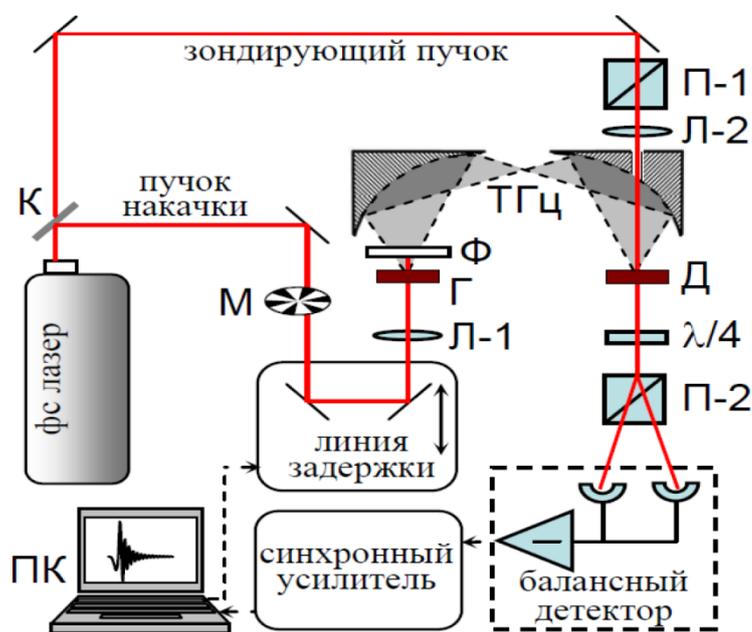


Рис. 5. Принципиальная схема импульсного терагерцового спектрометра [6]

В случае, когда частота повторения импульсов больше предельной частоты работы синхронного детектора необходимо вводить механически

модулятор лазерного пучка, который позволит синхронизировать частоту мерцания лазерного импульса и частоту регистрации детектора. Для этой цели на пути следования пучка накачки ставят механический прерыватель, выполненный в виде вертушки (М рис.5) с частотой вращения порядка 1кГц. Синхронизация механической задержки и детектора производится путем их связи, модулятор генерирует синхросигнал, соответственно которому детектор производит измерение. Лазеры с частотой повторения порядка 10 Гц позволяют получить импульсы с энергией десятки и сотни мДж (и, соответственно, обеспечить большую энергию в терагерцовом импульсе).

### **1.5. Влияние обработки поверхности на динамику релаксации неравновесных носителей заряда**

Полупроводящие арсенид галлиевые кристаллы нашли широкую популярность в производстве дипольных антенн. В силу этого ведется активная работа по улучшению фотоэлектрических свойств таких систем. Например, имеется ряд работ, в которых произведены исследования по влиянию состояния поверхности GaAs на временную динамику релаксации неравновесных носителей заряда [4][5][7].

В работе [4] рассматривалось влияние нанесения покрытий из неорганических сульфидов на скорость поверхностной рекомбинации носителей заряда в кристаллах арсенида галлия. Ставилась задача проверить влияние ковалентно связанного сульфидного слоя на свойства полупроводника. Для сравнения были взяты образцы GaAs, AlGaAs/GaAs и GaAs с покрытием  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ . В результате работы было установлено, что сульфидное покрытие способствует уменьшению скорости поверхностной релаксации носителей заряда. Это объясняется тем, что таким покрытием закрываются поверхностные свободные связи, тем самым уменьшается плотность состояний в запрещенной зоне, увеличивая время жизни носителей заряда.

Исследование проводилось на радиочастотном приборе с индуктивной связью (рис.6), который выявляет абсолютную проводимость полупроводника как функцию от времени. Принцип измерения основан на том, что образец облучается рассеянным от белой поверхности коротким некогерентным лазерным импульсом, возбуждающим носители заряда в полупроводнике. Далее проводимость определяется по изменению высокочастотной индуктивности резонансного контура. Дисбаланс в контуре обнаруживался при помощи фазового детектора. Результатом работы установки является массив значений абсолютной проводимости и соответствующих им моментов времени. Для построения кривой спада плотности носителей заряда необходимо поделить полученную проводимость на подвижность, зависящую от плотности носителей заряда. Уменьшение избыточной плотности носителей заряда представили как сумму объемного и поверхностного членов.

В результате проведенной работы было выявлено, что неорганическое сульфидное покрытие  $\text{Na}_2\text{S}\cdot 9\text{H}_2\text{O}$  позволяет уменьшить скорость релаксации неравновесных носителей заряда.

### **1.6. Заключение и постановка задачи**

В результате работы над литературным обзором было установлено, что для широко используемого в производстве дипольных антенн арсенида галлия свойственно различное время жизни неравновесных носителей заряда в зависимости от состояния поверхности. В свою очередь востребованными являются методы позволяющие определять время жизни в структурах с большой скоростью релаксации [8], которым свойственно малое время жизни, например для арсенида галлия – от сотен фемтосекунд (GaAs низкотемпературной эпитаксии) до сотен наносекунд (арсенид галлия легированный хромом). Используя бесконтактный метод «накачка-зонд» терагерцовой спектроскопии с применением генератора фемтосекундных лазерных импульсов, можно получать временные спектры высокого

разрешения, достаточным для изучения рекомбинационных процессов с высокой скоростью протекания.

В связи с этим целью данной работы было выбрано исследование влияния обработки поверхности на динамику релаксации носителей заряда путем получения времени жизни для образцов GaAs до и после обработки поверхности, используя метод терагерцовой спектроскопии.

## 2. Методика измерений времени жизни носителей заряда

### 2.1. Измерение временных профилей коэффициента пропускания фотовозбужденных полупроводников

В настоящей работе для определения времени жизни неравновесных носителей заряда используется метод терагерцовой pump-probe («накачка-зонд») спектроскопии, принцип которой основан на зондировании изменения пропускания терагерцевого излучения с задержками по времени относительно возбуждения неравновесной концентрации носителей заряда с помощью фемтосекундного лазерного импульса высокой интенсивности.

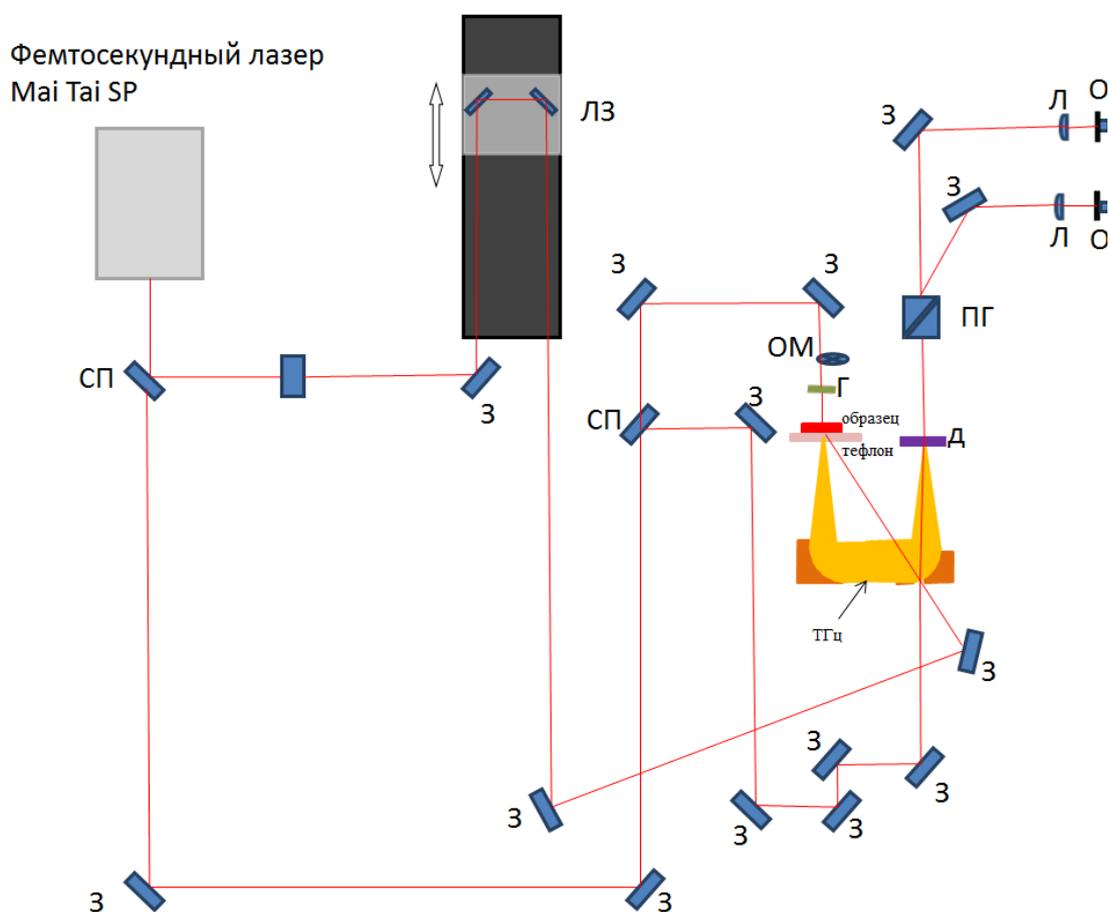


Рис. 6. Схема экспериментальной установки терагерцовой pump-probe спектроскопии ЛЗ – линия задержки, З – зеркало, Л – линза, ПЗ – параболическое зеркало, ПГ – призма Глана, О – ослабитель,  $\lambda/4$  – четвертьволновая пластинка, БФ – балансные фотодиоды

На рисунке 6 показана схема экспериментальной установки. Для возбуждения образцов и генерации терагерцового излучения используется регенеративный усилитель Spitfire Pro XP (Spectra-Physics, США) с длительностью импульсов 35 фс, энергией импульсов до 3,5 мДж и центральной длиной волны 791 нм. Из рисунка 7 видно, что фемтосекундный лазерный импульс, проходя через светоделительную пластину (СП) делится на два импульса в примерном соотношении энергий 1:1. Первый импульс используется для возбуждения неравновесных носителей заряда в образце (импульс накачки), а второй импульс делится еще на два импульса: импульс, использующийся для генерации терагерцового излучения и имеющий 97% мощности, и зондирующий импульс, имеющий 3% мощности. Генерирующий импульс, проходя через механический модулятор SR-541 (Stanford Research, США), попадает на кристалл GaSe, в котором путем оптического выпрямления генерируется терагерцовый импульс. Оставшаяся часть импульса, непреобразованная в терагерцовое излучение, попадает на тефлоновый фильтр, который препятствует его дальнейшему прохождению в детектор. Терагерцовый импульс, проходя параболические зеркала, фокусируется на исследуемом образце. Также на исследуемый образец попадет импульс накачки, проходящий механическую линию задержки M-IMS600CCHA (Newport, США) с помощью которой устанавливается разность моментов прихода импульса накачки и терагерцового импульса. Зондирующий импульс малой мощности, направленный на электрооптический кристалл ZnTe, является стробирующим импульсом для электрооптического детектирования. Одновременность прихода стробирующего импульса и максимума интенсивности терагерцового импульса (главный максимум) на кристалл ZnTe устанавливается при помощи линии задержки. Действием электрического поля терагерцовой волны обусловлено возникновение эффекта Поккельса в ЭО кристалле и проходящий через кристалл зондирующий импульс меняет свою поляризацию. При помощи четвертьволновой пластины и призмы Глана зондирующий импульс, изменивший поляризацию, раскладывается на две

ортогональные составляющие его поляризации. После чего два этих импульса проходят на балансный фотоприемник Nirvana Detector Model 2007 (New Focus, США), дающий сигнал, напряжение которого пропорционально разности интенсивностей (мощностей) проходящих импульсов. Сигнал с фотоприемника регистрируется фазочувствительным синхронным детектором SR830 (Stanford Research, США). Напряжение регистрируемого сигнала пропорционально напряженности электрического поля терагерцовой волны. При помощи линии задержки с компьютерным управлением устанавливается изменение времени между приходом на исследуемый образец импульса накачки и прохождением через образец импульса терагерцовой волны. Если это время мало, то на момент прохождения терагерцового импульса через образец в нём имеется большая концентрация неравновесных носителей заряда из-за чего терагерцовый импульс ослабевает. При увеличении времени задержки пропускание терагерцового импульса постепенно восстанавливается благодаря процессам рекомбинации неравновесных носителей заряда в образце.

Примеры записанных с помощью схемы временных профилей относительного дифференциального поглощения  $\Delta T/T_0$  представлены на рисунке 7. Здесь  $\Delta T$  рассчитывается как  $T - T_0$ , где  $T_0$  – пропускание образца без фотовозбуждения.

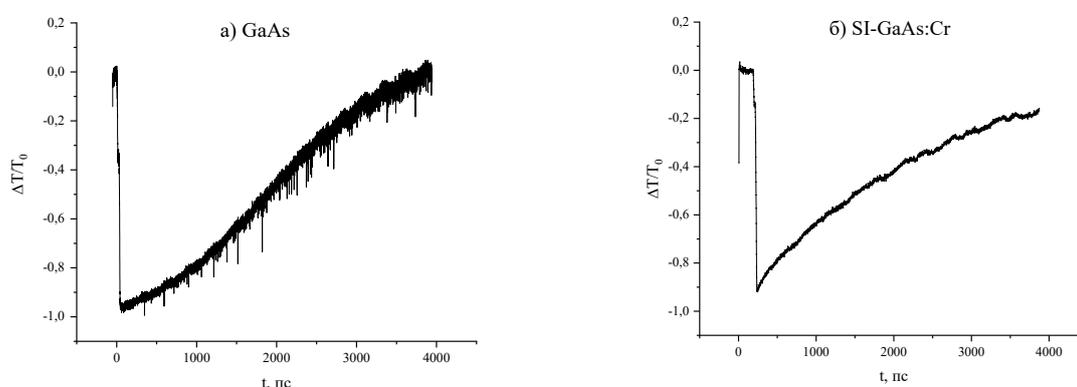


Рис. 7. Временной профиль относительного дифференциального поглощения для кристаллов GaAs

## 2.2. Аппроксимация экспериментальных данных и расчет времени жизни

Для расчета концентрации неравновесных носителей заряда на основе полученных значений  $\Delta T/T_0$  будет использоваться формула

$$\Delta n(t) = \frac{N+1}{Z_0 e \delta \mu} \left( \frac{1}{1 - |\Delta T/T_0|} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $N = 3,4$  - показатель преломления GaAs в терагерцовом диапазоне частот;  $Z_0 = 377$  Ом – импеданс свободного пространства;  $\delta = 1$  мкм – глубина проникновения импульса накачки;  $\mu$  - подвижность носителей,  $T_0$  - коэффициент пропускания в терагерцовом диапазоне частот при отсутствии фотовозбуждения. В расчетах пренебрегали возможной зависимостью подвижности носителей заряда от температуры или уровня инжекции.

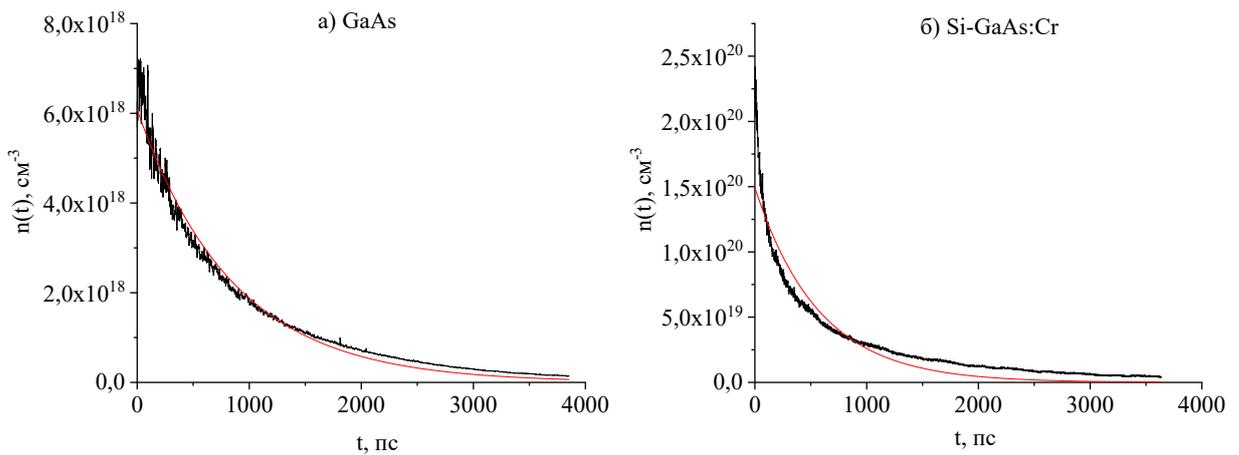


Рис. 8. Экспериментальные и аппроксимированные зависимости концентрации неравновесных носителей заряда в образцах GaAs и Si-GaAs:Cr без обработки поверхностей.

Аппроксимация полученных зависимостей  $\Delta n(t)$  будет проводиться соотношением:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{(-t/\tau)}, \quad (2)$$

где  $\Delta n_0$  – концентрация неравновесных носителей заряда в начальный момент времени,  $\tau$  – время жизни неравновесных носителей заряда. На рисунке 8 представлен пример полученной зависимости  $\Delta n(t)$ .

### 3. Обработка результатов исследования

В данной работе была проведена серия измерений для следующих образцов:

- 1) GaAs – контрольный образец арсенида галлия;
- 2) GaAs-EL2 – образец арсенида галлия с дефектом EL2;
- 3) LT-GaAs – образец выращенный методом низкотемпературной эпитаксии;
- 4) SI-GaAs:Cr – полу изолирующий образец легированный хромом;
- 5) GaAs-пш – образец арсенида галлия подвергшийся механической обработке поверхности;
- 6) GaAs-окис – образец арсенида галлий подвергшийся окислению поверхности.

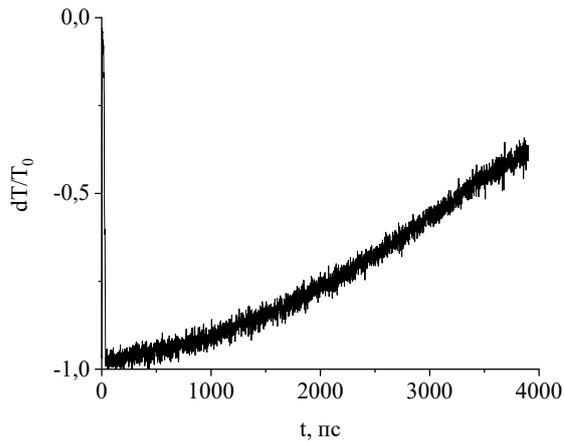
На рисунке 9 представлены временные профили дифференциального поглощения для ряда исследуемых образцов. По приведенным рисункам можно оценить величину времени жизни образцов относительно друг друга. Для образцов LT-GaAs и GaAs-пш будет свойственно меньшее время жизни из представленных, так как заметно восстановление уровня проходящего излучения в исследуемый промежуток времени задержки 4нс.

Таблица 1. Время жизни неравновесных носителей заряда.

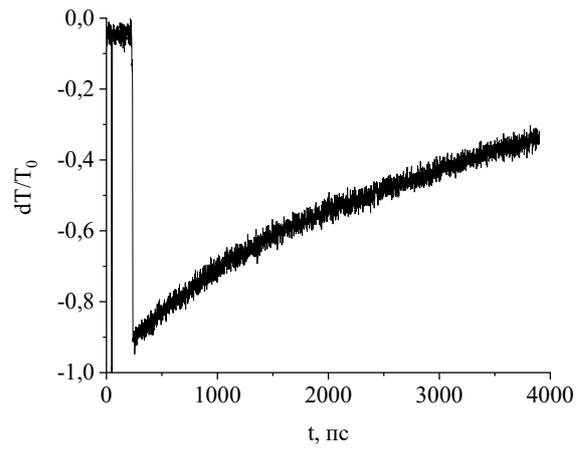
Образец	Время жизни, пс
GaAs	544
GaAs-окис	208
GaAs-пш	98
SI-GaAs:Cr	1440
GaAs-EL2	849
LT-GaAs	189

На рисунке 10 приведены кривые зависимости концентрации неравновесных носителей заряда от времени задержки импульсов, по результату аппроксимации которых было определено время жизни, приведенное в таблице 1.

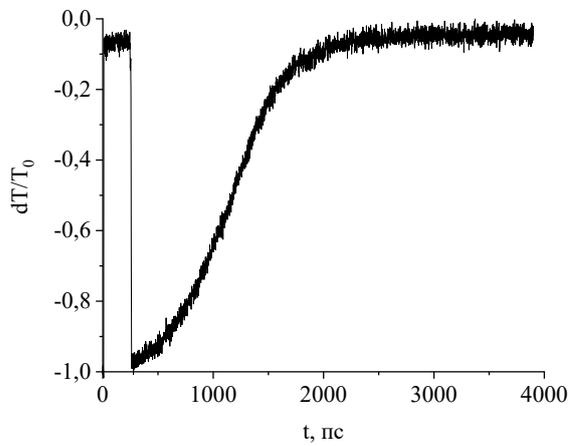
Данные в таблице 1 соответствуют качественной оценке по рисунку 6. Можем заметить, что для образца полу изолирующего арсенида галлия имеет место большее время жизни – 1440 пс. В свою очередь наименьшее время жизни соответствует трем системам: GaAs-окис – 208пс, LT-GaAs – 189пс и GaAs-шп – 09пс. Можно сделать вывод, что наблюдаемое уменьшение времени жизни является результатом образования поверхностных рекомбинационных центров посредством механической деформации поверхности путем шлифовки. Также можно заметить, что и в случае окисления поверхности наблюдается уменьшение времени жизни, что согласуется с работой [7], в которой утверждалось, что для создания и сохранения улучшенных электрических свойств полупроводника, в частности увеличения скорости рекомбинации, необходима очистка поверхности GaAs от оксидов и скоплений мышьяка с последующим созданием химически упругого поверхностного оксидного слоя для пассивации свойств поверхности.



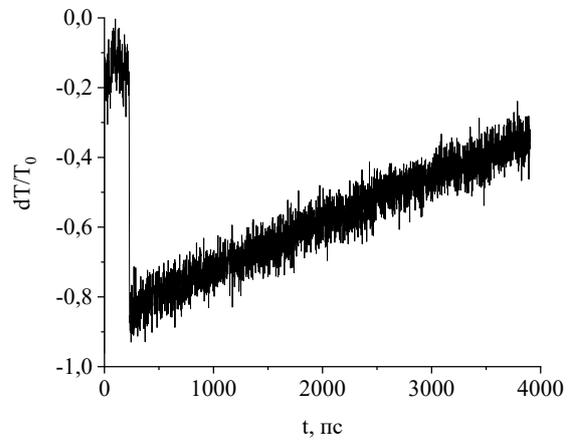
а) GaAs



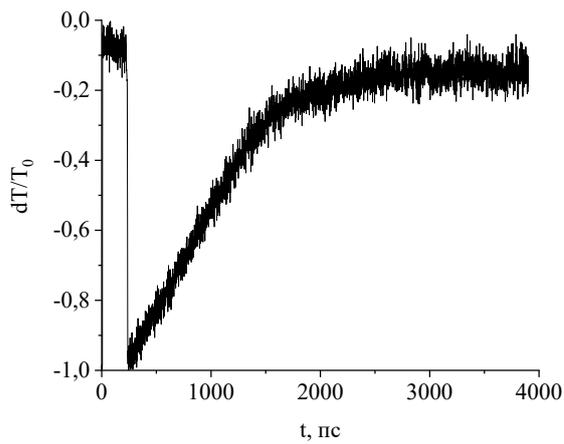
б) GaAs-EL2



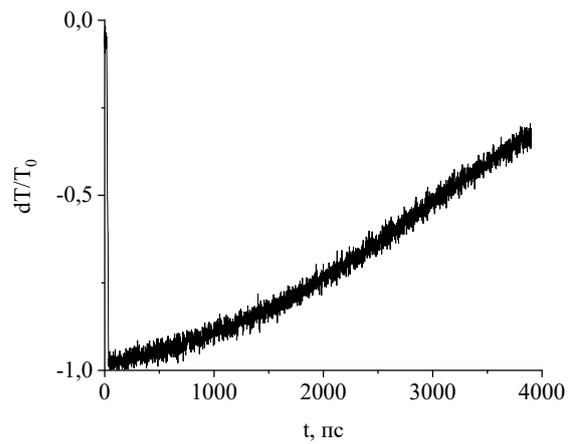
в) LT-GaAs



г) SI-GaAs:Cr

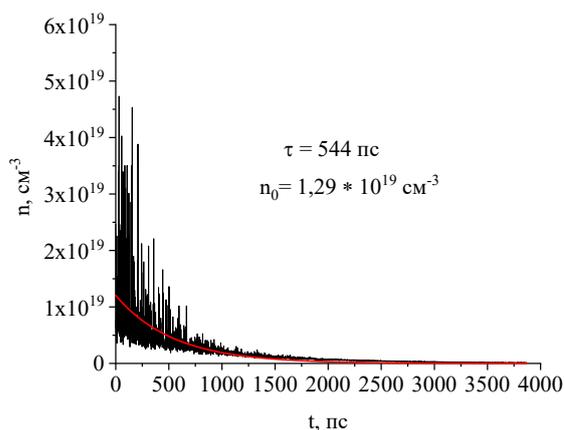


д) GaAs-шп

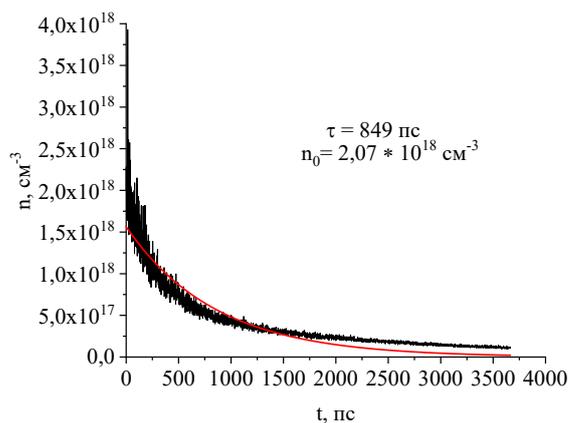


е) GaAs-окис

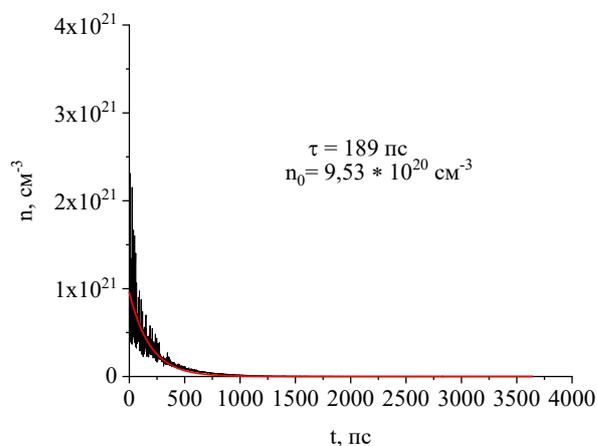
Рис. 9. Временной профиль относительного дифференциального поглощения для ряда исследуемых образцов GaAs.



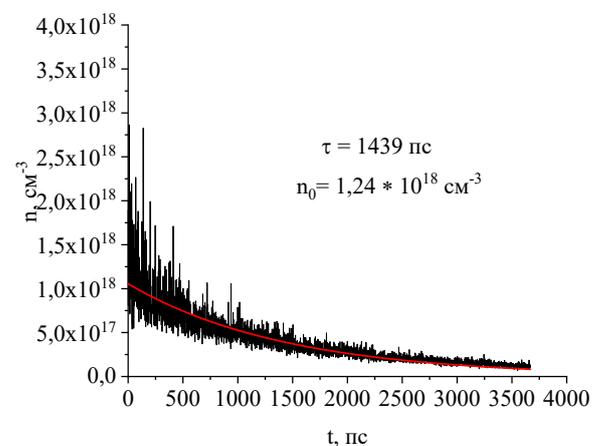
а) GaAs



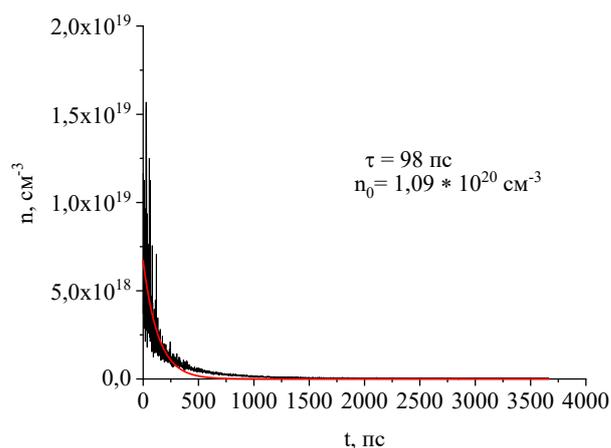
б) GaAs-EL2



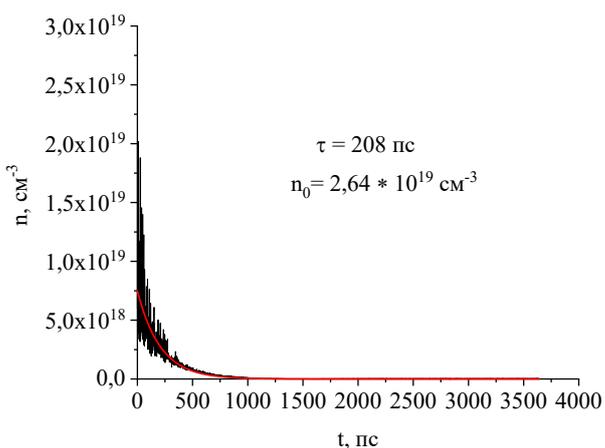
в) LT-GaAs



г) SI-GaAs:Cr



д) GaAs-ШП



е) GaAs-окис

Рис. 10. Зависимость концентрации неравновесных носителей заряда в исследуемых образцах GaAs от времени.

## Заключение

Целью данной работы было изучение влияния механической и химической обработки поверхности полупроводящего арсенида галлия посредством использования метода «накачка-зонд» терагерцовой спектроскопии во временной области. Для достижения данной цели были решены следующие задачи: проведен обзор литературы по свойствам терагерцового излучения, способам его генерации и детектирования, влиянию состояния поверхности на электрические свойства полупроводящих материалов. Была собрана экспериментальная оптическая схема, позволяющая проводить измерения пропускания терагерцового излучения и определять динамику релаксации неравновесных носителей заряда.

В результате проведенной работы было установлено, что изменение состояния поверхности существенно влияет на электрооптические свойства полупроводников. В частности, путем шлифовки поверхности можно добиться уменьшения времени жизни носителей заряда до порядка 100пс. Нанесение оксидной пленки позволяет получить время жизни  $\sim 200$ пс.

Таким образом, было показано, что оксиды хоть и увеличивают скорость поверхностной рекомбинации, но она все же остается гораздо ниже, чем у образцов с чистой поверхностью GaAs.

Полученные данные качественно согласуются с результатами других исследований влияния сульфидных и оксидных покрытий [7], в которой демонстрировали изменение скорости релаксации в зависимости от состояния поверхности.

## Литература

1. Sarkisov S.Yu., Safiullin F.D., Skakunov M.S. et al. // Russ. Phys. J. – 2013. – V. 53. – P. 890-898.
2. Zhang W.-D., Middendorf J.R., Brown E.R. // Appl. Phys. Lett. – 2015. – V. 106. – P. 021119 (4 pp).
3. Desmukh P., Mendez-Aller M., Singh A. et al. // Opt. Lett. – 2015. – V. 40. – P. 4540-4543.
4. Yablonovitch E. et al. Nearly ideal electronic properties of sulfide coated GaAs surfaces //Applied physics letters. – 1987. – Т. 51. – №. 6. – С. 439-441.
5. Yong C. K. et al. Strong carrier lifetime enhancement in GaAs nanowires coated with semiconducting polymer //Nano letters. – 2012. – Т. 12. – №. 12. – С. 6293-6301. Shi Y., Zhou Q., Zhang C., Jin B. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – V. 93. – 121115 (3 pp).
6. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами // Учебное пособие. – Нижний Новгород / Нижегородский госуниверситет, 2011. – 75.
7. Yablonovitch E. et al. Nearly ideal electronic properties of sulfide coated GaAs surfaces //Applied Physics Letters. – 1987. – Т. 51. – №. 6. – С. 439-441.
8. Shi Y. et al. Ultrafast high-field carrier transport in GaAs measured by femtosecond pump-terahertz probe spectroscopy //Applied Physics Letters. – 2008. – Т. 93. – №. 12. – С. 121115.
9. Tlustos L., Shelkov G., Tolbanov O.P.// Nucl. Instrum. Meth. Phys. Research A. – 2011. – V. 633. – P. S103-S107.
10. Chsherbakov I., Kolesnikova I., Lozinskaya A. // JINST. – 2018. – V. 13. – P. C01030 (8 pp).
11. Zhang, X.-C. Introduction to THz Wave Photonics / X.-C. Zhang, Jingzhou Xu. –Springer, 2010. – 248 p.

12. Tani M., Herrmann M., Sakai K. Meas. Sci. Technol. - 2002. - Vol. 13. - P. 1739– 1745.
13. Hiroshi Ito, Tadao Ishibashi // Surface Recombination Velocity in p-Type GaAs // Jpn. J. Appl. Phys. – 1994 – V. 33. – P. 88-89

# Отчет о проверке на заимствования №1



**Автор:** Фомин Марк

**Проверяющий:** Фомин Марк ([fomin\\_mark@mail.ru](mailto:fomin_mark@mail.ru) / ID: 2414757)

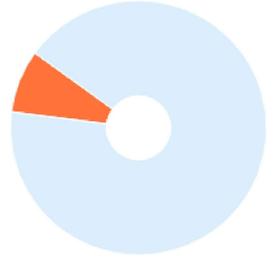
Отчет предоставлен сервисом «Антиплагиат» - [users.antiplagiat.ru](https://users.antiplagiat.ru)

## ИНФОРМАЦИЯ О ДОКУМЕНТЕ

№ документа: 16  
 Начало загрузки: 13.06.2021 11:59:46  
 Длительность загрузки: 00:00:02  
 Имя исходного файла: ВКР.Текст.2.pdf  
 Название документа: ВКР.Текст.2  
 Размер текста: 32 кБ  
 Символов в тексте: 32266  
 Слов в тексте: 3641  
 Число предложений: 270

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОТЧЕТЕ

Начало проверки: 13.06.2021 11:59:48  
 Длительность проверки: 00:00:00  
 Комментарии: не указано  
 Модуль поиска: Интернет



### ЗАИМСТВОВАНИЯ

7,57%

### САМОЦИТИРОВАНИЯ

0%

### ЦИТИРОВАНИЯ

0%

### ОРИГИНАЛЬНОСТЬ

92,43%

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; общепотребительные 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	Доля в тексте	Источник	Актуален на	Модуль поиска	Блоков в отчете	Блоков в тексте
[01]	4,29%	7,57%	48_67_17_0_0.600_48061388 <a href="http://unn.ru">http://unn.ru</a>	06 Дек 2020	Интернет	11	24
[02]	2,13%	3,44%	"Nikitin A.K.zip" (1/3) <a href="http://rad.pfu.edu.ru">http://rad.pfu.edu.ru</a>	12 Янв 2016	Интернет	9	15
[03]	1,16%	2,01%	"Nikitin A.K.zip" (2/3) <a href="http://rad.pfu.edu.ru">http://rad.pfu.edu.ru</a>	12 Янв 2016	Интернет	4	8

*С.С. Сидоров*