

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**
(СГУ)

Кафедра физики полупроводников

**Исследование емкостных характеристик планарных мезоструктур
высокоомного GaAs с токовой неустойчивостью**

АФТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4052 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
института физики

Хамбекова Руслана Анверовича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

Консультант

зав. уч. лабораторией

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание

подпись, дата

Михайлов А.И.

инициалы, фамилия

подпись, дата

Кожевников И.О.

инициалы, фамилия

подпись, дата

Михайлов А.И.

инициалы, фамилия

Саратов 2021

ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием нанотехнологий сейчас необходимо разработать методы, учитывающие ограничения, связанные с размерными эффектами в полупроводниковых структурах. Среди методов определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах можно выделить метод вольт-фарадных характеристик. Для локального измерения электрической емкости полупроводниковых структур используются зондовые методы: сканирующая емкостная микроскопия, сканирующая микроволновая микроскопия. Необходимо разработать новые методы для определения локальной плотности зарядовых состояний и их распределения по энергии в полупроводниковых тонкопленочных микро- и наноструктурах. Особого внимания заслуживает разработка методики локального определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и наноструктурах. Зная параметры полупроводниковых структур, можно вывести проектирование полупроводниковых приборов и элементов интегральных схем на новый уровень. Одним из перспективных направлений развития методов исследования электрофизических свойств полупроводниковых структур является сочетание существующих электрофизических методов и их адаптация для использования в сочетании с техникой зондовой микроскопии, что позволит локализовать области исследования до 10 нм., что связано с использованием проводящих зондов атомно-силового микроскопа.

Общая характеристика темы.

На основе планарных структур полуизолирующего GaAs на кафедре физики полупроводников разработан функциональный однокристалльный преобразователь свет-частота, на разработку которого получен патент №161399. Данный функциональный полупроводниковый прибор способен генерировать высокоамплитудные токовые колебания, частота которых в широком диапазоне зависит от интенсивности засветки излучением видимого и ИК диапазонов, а также магнитного поля. Подконтактные области планарной структуры на границе с высокоомной подложкой должны обладать емкостью, поведение

которой при различных воздействиях может дать информацию о возникающей токовой неустойчивости.

Актуальность темы.

Исследование неустойчивостей тока — важное направление в физике полупроводников, поскольку позволяет создавать различные функциональные приборы (патент №161399 «Микрогабаритный генератор с оптическим управлением»).

В связи с этим, **целью** данной работы является исследование емкостных характеристик планарных мезоструктур полуизолирующего GaAs с токовой неустойчивостью.

Исследуемая структура

Экспериментальные образцы изготавливались на пластинах марок САГ-2БК, представляющих собой сформированные на полуизолирующей подложке из GaAs эпитаксиальные слои n и n^+ проводимости со следующими параметрами: $d^+ = 0,2$ мкм, $n^+ = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³, $d = 0,3$ мкм, $n = 1,5 \cdot 10^{17}$ см⁻³, полуизолирующая подложка GaAs марки АГЧП-8, толщиной 300 мкм и $n_i \approx 10^{14}$ см⁻³. Исходные пластины подвергались химической и плазмохимической обработке, после чего на их поверхности формировались контакты к n^+ -GaAs на основе AuGe/Ni/Au ($d \approx 0,03/0,05/0,25$ мкм). С целью межэлементной изоляции производилось формирование мезоструктур, включающее в себя процесс фотолитографии, травление SiO₂ на незащищенных участках, травление GaAs до подложки, удаление фоторезиста и оставшегося диоксида кремния. Каждая пара контактов формировала планарно-эпитаксиальную структуру прямоугольной формы с расстоянием между контактами равным 60 мкм и площадью контактных площадок – 10^{-2} мм².

На основе описанных структур на кафедре физики полупроводников разработан и запатентован функциональный однокристальный преобразователь свет-частота. При напряжении соответствующему участку спада и отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП) на вольт-амперной характеристике (ВАХ) возникают колебания тока, частота которых в высокой

степени зависит от интенсивности внешней засветки межконтактной области структуры. Применение планарно-эпитаксиальных мезоструктур позволяет получить действие двух физических явлений: рекомбинационной неустойчивости тока и внутреннего фотоэффекта. Номер патента №161399.

Оборудование и методика измерений

Исследование световых и темновых ВАХ экспериментальных образцов проводилось с использованием зондовой станции на базе анализатора полупроводниковых приборов Keysight Agilent B1500A (рисунок 1)

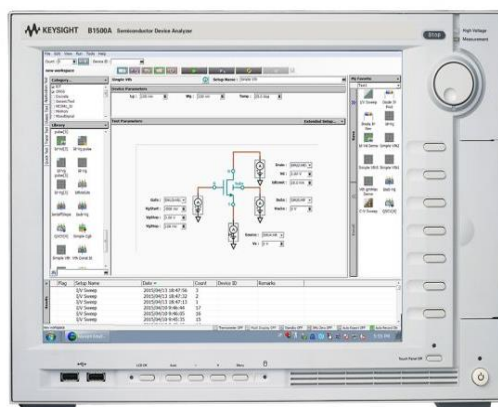


Рисунок 1 – Анализатор полупроводниковых приборов Keysight Agilent B1500A.

Зондовая станция Cascade Microtech PM5 представлена на рисунке 2. В качестве источника света использовалась лампа накаливания микроскопа, яркость свечения которой регулировалась источником напряжения, предварительно откалиброванным с помощью люксметра. Для измерения световых ВАХ устанавливалась максимальная яркость 4000 lux.



Рисунок 2 – Зондовая станция Cascade Microtech PM5.

Для измерения емкостных характеристик структуры была собрана измерительная схема на базе, зондовой системы с микрометрическим позиционированием и лазерного модуля, изображенная на рисунке 3. Объект исследования (рисунок 4) располагался на подвижном столике измерительного стенда (рисунок 3).

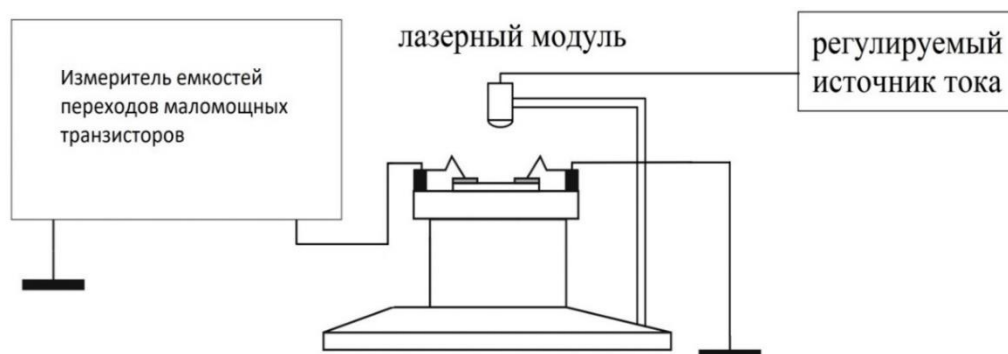


Рисунок 3 – Схема измерительного стенда.

К металлическим площадкам контактов структуры подводилось напряжение с помощью прижимных вольфрамовых зондов. Измерения ВАХ и ВФХ проводились в темновом режиме. Перед этим, предварительно производилась калибровка напряжения измерителя емкостей переходов маломощных транзисторов, в результате которой с помощью мультиметра фиксировалось реальное напряжение, соответствующее переключателям прибора. Смена полярности при измерениях осуществлялась встроенным переключателем. ВФХ измерялась при двух значениях частоты 0,3 и 10 МГц.

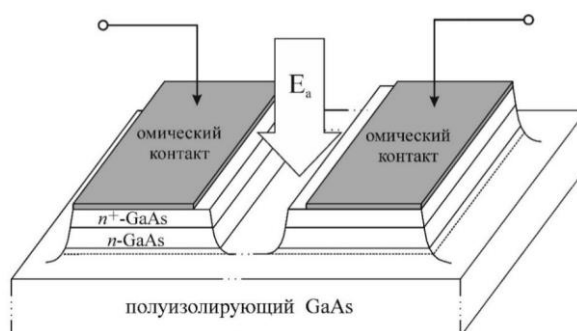


Рисунок 4 – Изображение исследуемой структуры и схема проведения измерений [8].

Для измерения зависимости емкости структур от освещения использовался модуль лазерного диода с регулируемым источником тока. С помощью системы

позиционирования измерительного стенда (рисунок 5) лазерный луч сводился в пучок диаметром 100 мкм и направлялся в межконтактную область структуры.



Рисунок 5 – Измерительный стенд.

Калибровка лазерного диода производилась с помощью арсенидгаллиевого фотодиода. Для этого использовалась паспортная фоточувствительность фотодиода. С помощью уравнения аппроксимации зависимости тока фотодиода от освещения был рассчитан график зависимости интенсивности свечения лазера от пропускаемого тока.

Эксперимент

В эксперименте было снято 28 ВАХ из которых было взято 7 зависимостей в которых наблюдалось ОДП, после этого графики разделили на прямой и обратных проход, (прямой проход – значение от минуса к плюсу, обратный – от плюса к минусу). Во время измерения производилось свечение на структуру, для того чтобы посмотреть, как структура реагирует на свет. На графиках виден гистерезис, и участки ОДП смещаются влево при обратном проходе, это происходит как при прямой полярности приложенного напряжения, так и при обратной. Сравнивая рисунки 6 и 7 можем увидеть, что от света на прямой ветви появились участки ОДП, а на обратной произошло смещение по току и напряжению. Сравнивая рисунки 10 и 11 наблюдаем, что под действием света ветви прямого и обратного прохода отфильтровались и стали более плавными. Согласно приведенным в таблице 1 данным, гистерезис уменьшается при воздействии на образец света. Это может быть связано с заполнением примесных

центров в высокоомной подложке GaAs носителями, сгенерированными светом, что уменьшает объемный заряд, а, следовательно и емкость структуры.

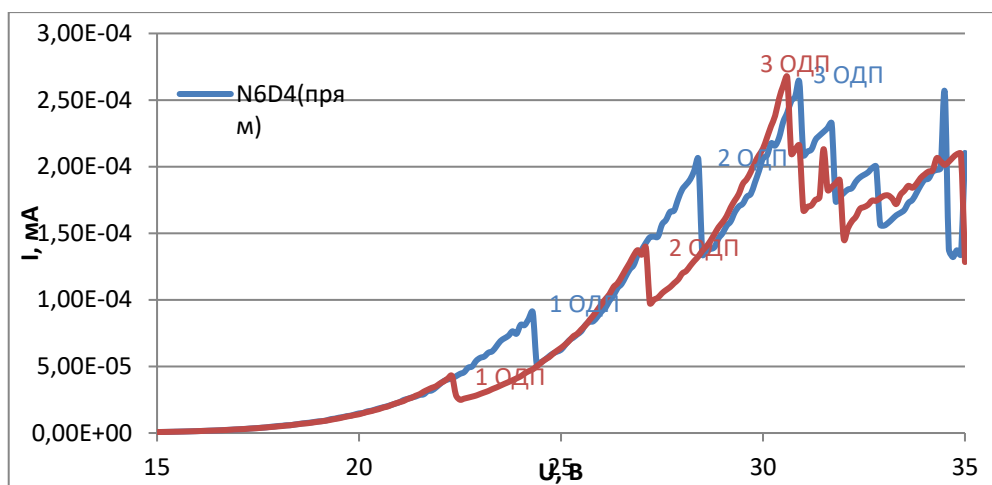


Рисунок 6 – Темновая ВАХ образца N6D4.

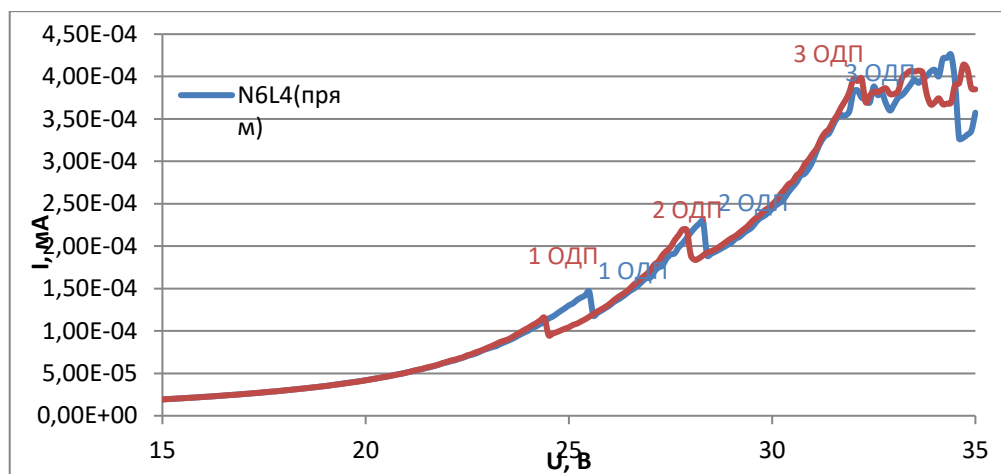


Рисунок 7 – Световая ВАХ образца N6L4.

Таблица 1 – Положение ОДП (по напряжению) на графиках ВАХ

№ образца	№ ОД П	темновая				световая			
		прямой пр.	обратный пр.	разница	доверит.	прямой пр.	обратный пр.	разница	доверит.
5D2	1	-23,4	-27,3	3,9					
	2								
5L2,5L1	1					28,05	26,7	1,35	1,3229756 9
	2					22,8	22,65	0,15	
	3					-22,3	-22,5	0,2	
	4					-23,95	-27,8	3,85	
N6D4, N6L4	1	24,3	22,3	2	2,2631714 7	25,5	24,4	1,1	1,2447443 1
	2	28,3	27,1	1,2		28,3	27,8	0,5	
	3	30,9	30,6	0,3		32,5	32,2	0,3	
N8D2, N8L	1	23,5	22,9	0,6	0,8315422 9	23,6	23,5	0,1	0,1385903 8
	2	24,1	23,3	0,8		24,5	23,7	0,8	
	3								

ВАХ и ВФХ измерялись для двух образцов, одинаковых по всем свойствам и расположенных на одном кристалле на расстоянии порядка 1 мм друг от друга.

Измеренные вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики образца 1 приведены на рисунках 8-11.

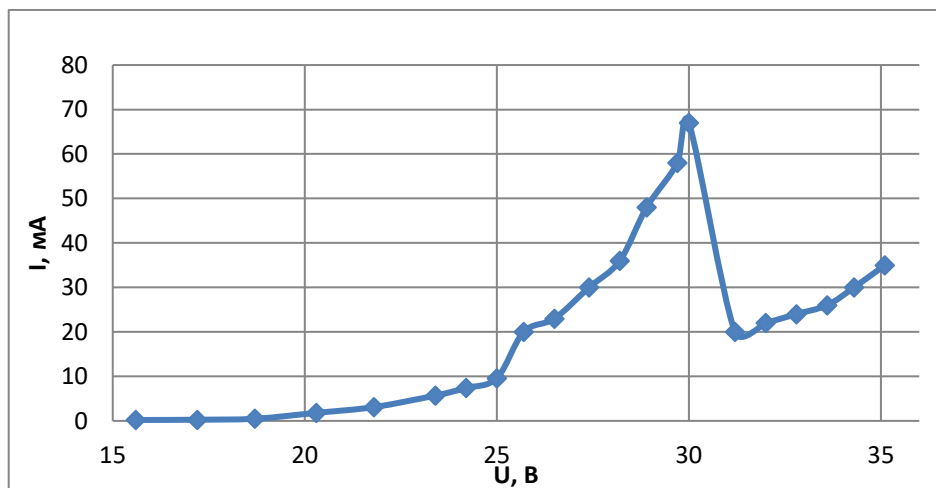


Рисунок 8 – ВАХ образца 1 при смещении 1.

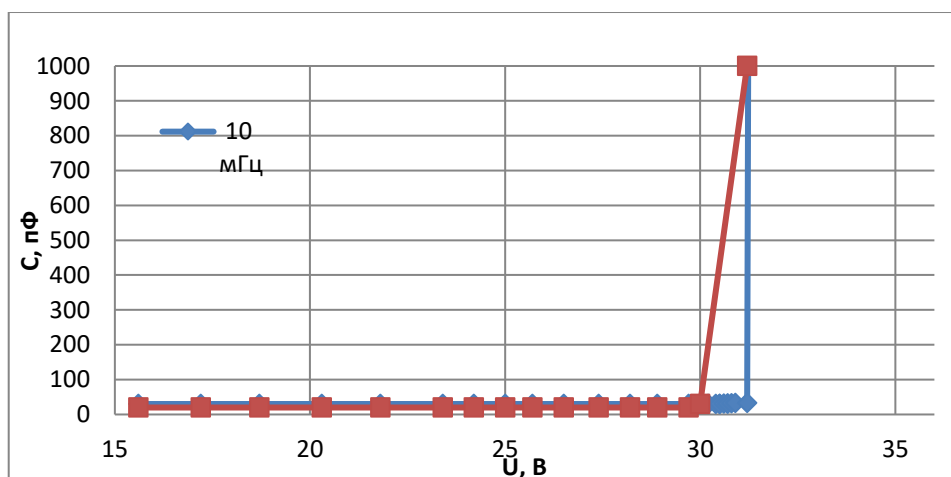


Рисунок 9 – ВФХ образца 1 при смещении 1.

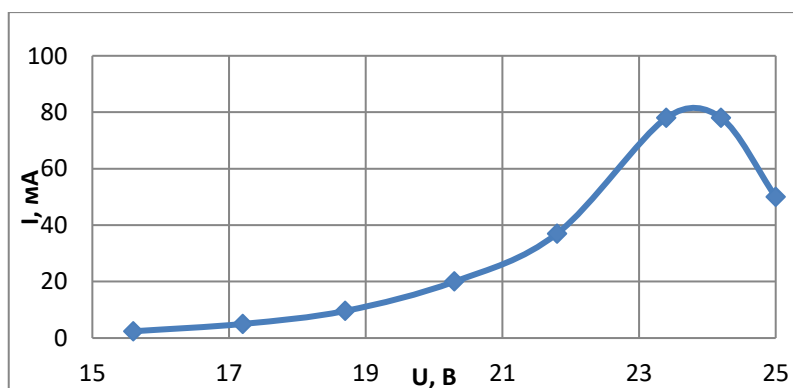


Рисунок 10 – ВАХ образца 1 при смещении 2.

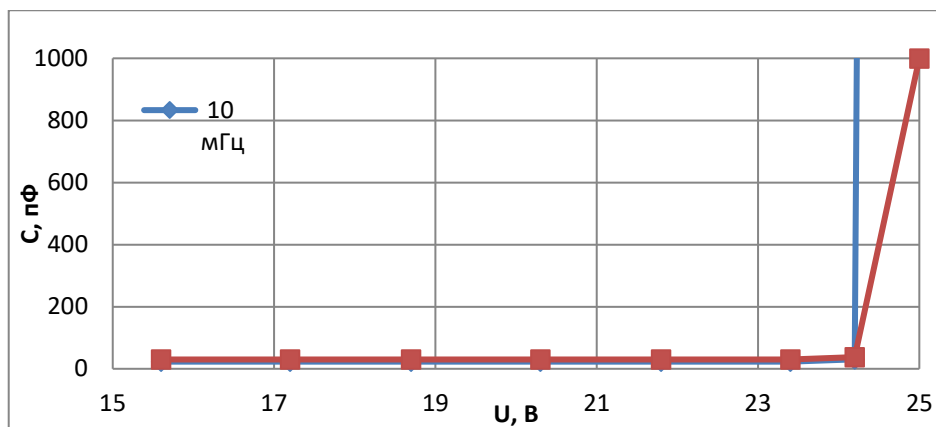


Рисунок 11 – ВФХ образца 1 при смещении 2.

На рисунках 8-11 видно, что при напряжении, соответствующем участку ОДП на ВАХ идёт резкое увеличение ёмкости, это свидетельствует о том, что в объёме структуры образуется домен сильного электрического поля. При этом значение ёмкости превышает предел измерения прибора в 1000 пФ.

Измеренные вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики образца 2 приведены на рисунках 12-15.

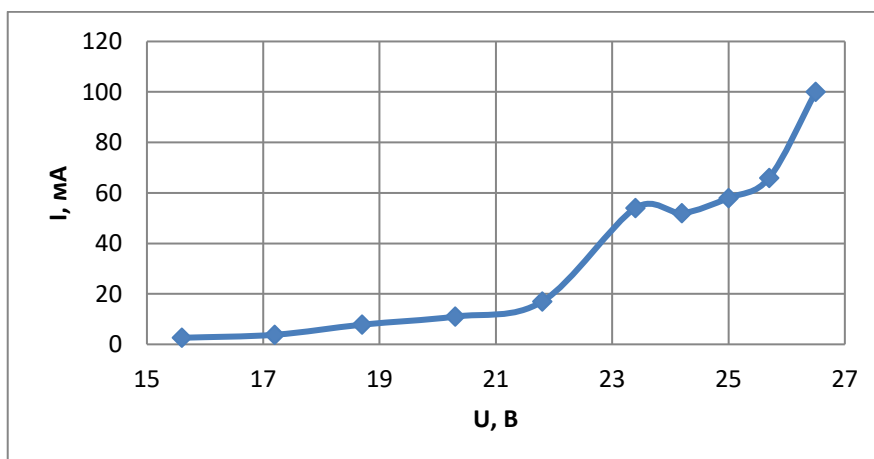


Рисунок 12 – ВАХ образца 2 при смещении 1.

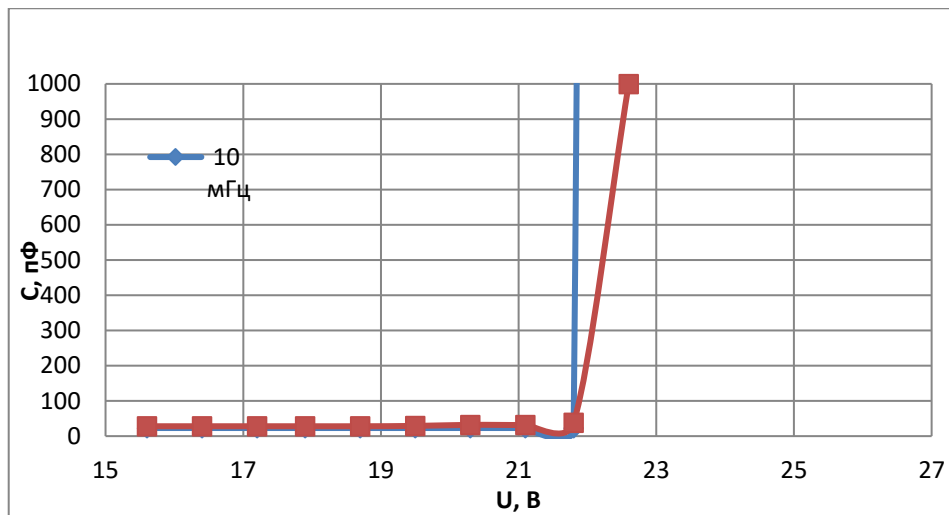


Рисунок 13 – ВФХ образца 2 при смещении 1.

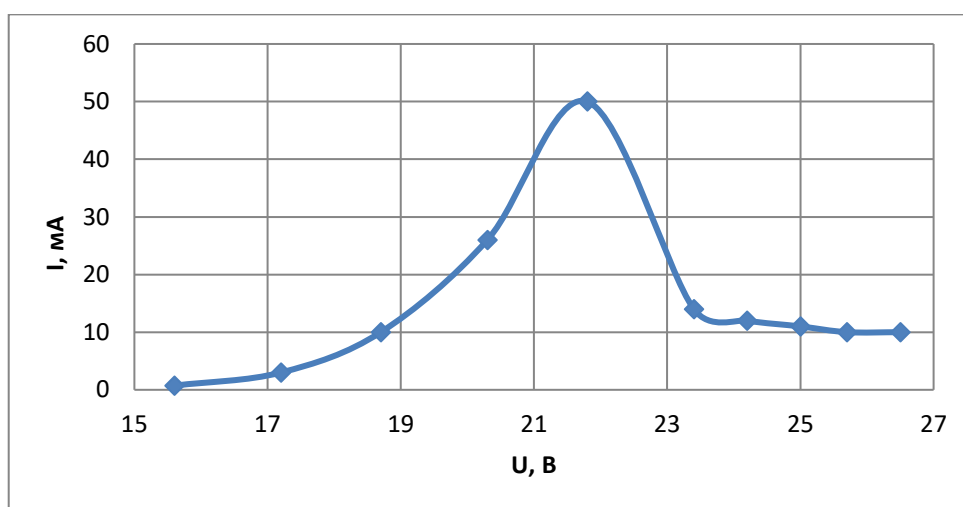


Рисунок 14 – ВАХ образца 2 при смещении 2.

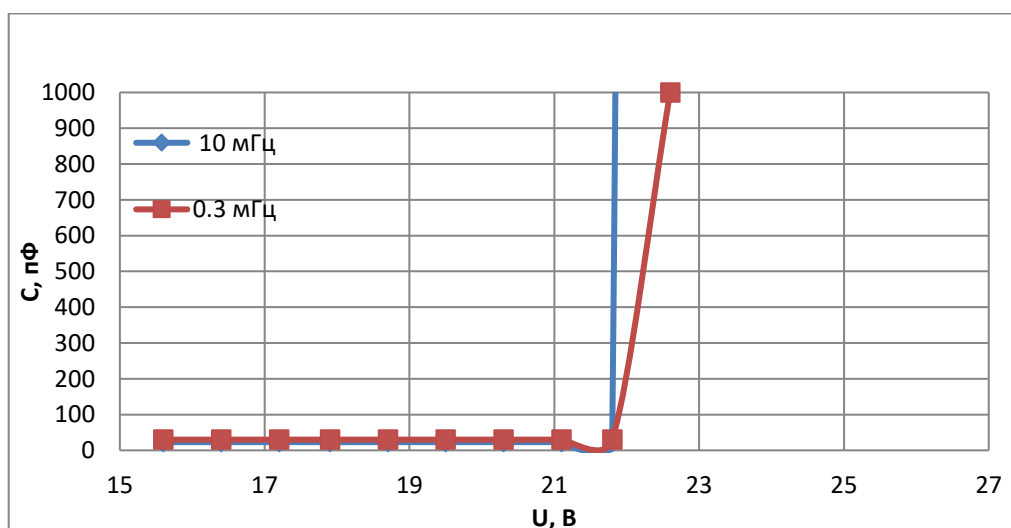


Рисунок 15 – ВФХ образца 2 при смещении 2.

На рисунках 12-15 также при напряжении, соответствующем участку ОДП на ВАХ, наблюдается резкое увеличение ёмкости, свидетельствующее о об

образовании домена сильного электрического поля. Видно, что зависимости схожие, есть повторяемость для разных структур.

При приложении к контактам структуры порогового напряжения в результате развития рекомбинационной неустойчивости тока, вследствие периодического захвата и выброса электронов ловушками в высокоомной подложке, возникает отрицательная дифференциальная проводимость и, как следствие, периодические колебания тока с определенной частотой и амплитудой. Колебания могут быть связаны с формированием как подвижного, так и неподвижного домена.

На рисунках 16 и 17 изображен характер изменения емкости структуры при изменении интенсивности засветки. Зависимости получены при полярности 1 постоянном напряжении 30 В и 31 В соответственно.

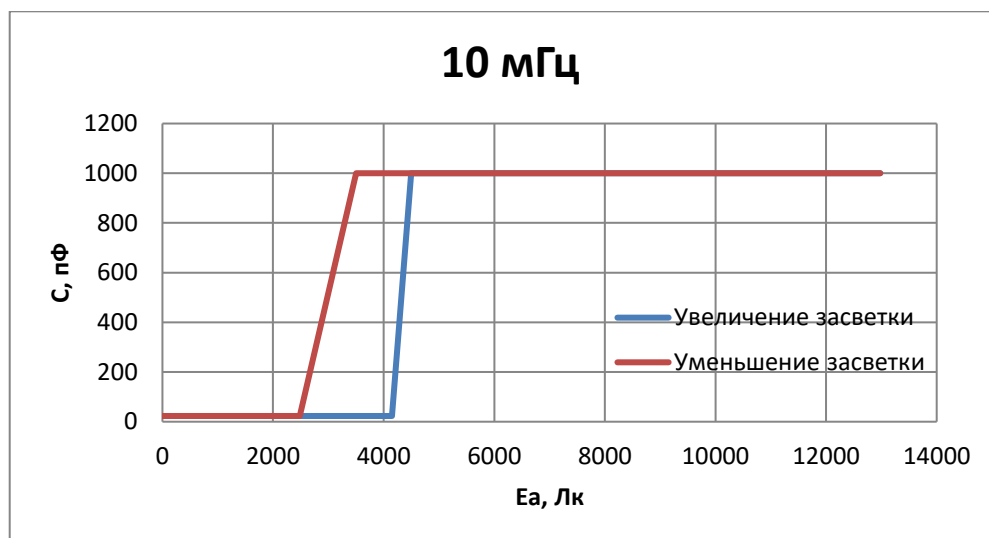


Рисунок 16 – Увеличение и уменьшение засветки при частоте 10 мГц.

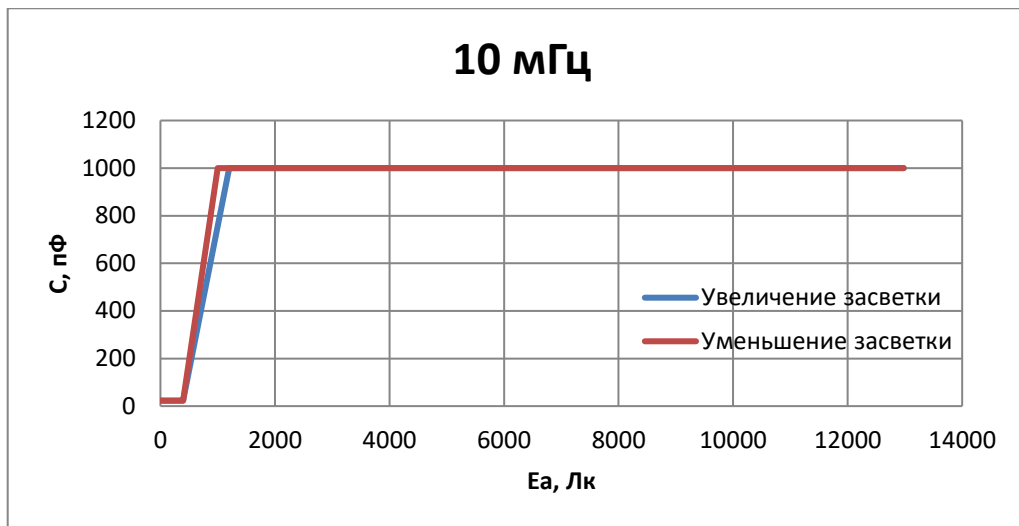


Рисунок 17 – Увеличение и уменьшение засветки при частоте 10 мГц.

На рисунках 16 и 17 видно скачкообразное изменение ёмкости высокоомной структуры при изменении засветки в двух направлениях, которое может быть связано со сдвигом порогового напряжения ОДП.

На рисунках 18-19 изображены сводные результатов измерений ВАХ и ВФХ одного образца. На зависимости видно, что при освещении обе характеристики смещаются приблизительно на 0,8 В в сторону больших напряжений.

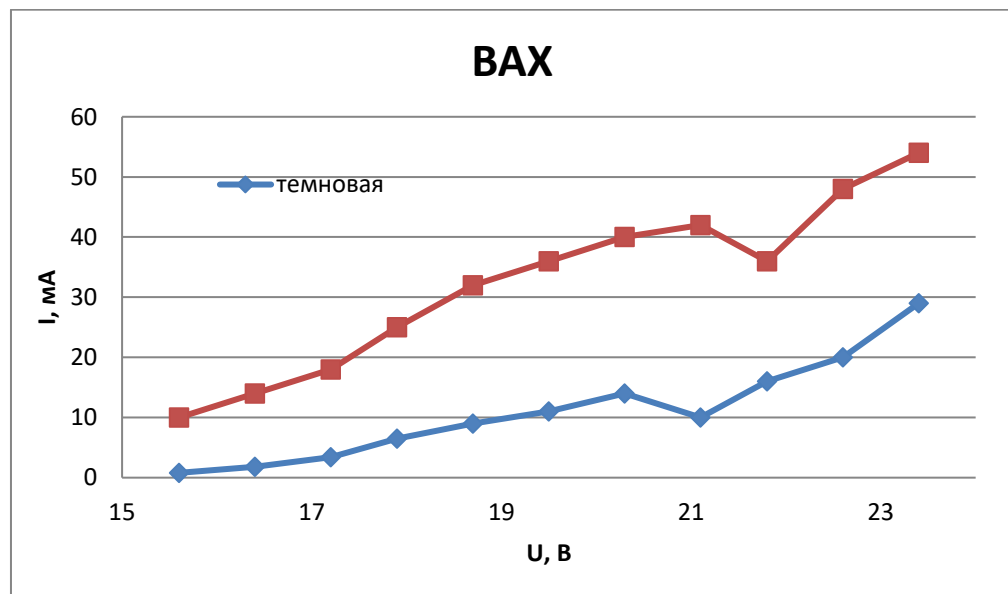


Рисунок 18 – Уменьшение засветки с разной постоянной частотой.

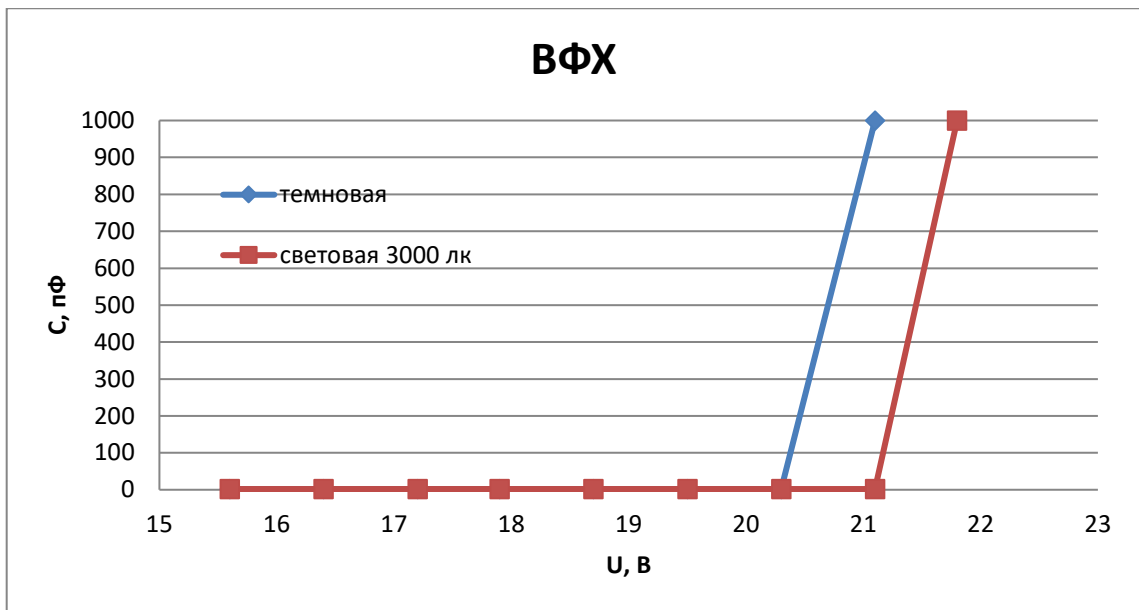


Рисунок 19 – Уменьшение засветки с разной постоянной частотой.

Из графиков на рисунках 18 и 19 видно, что участки роста полной емкости структуры соответствуют участкам ОДП в темноте и при засветке. Это подтверждает связь процесса роста емкости с процессом развития домена сильного поля в структуре.

На рисунках 20 - 21 изображена зависимость емкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении.

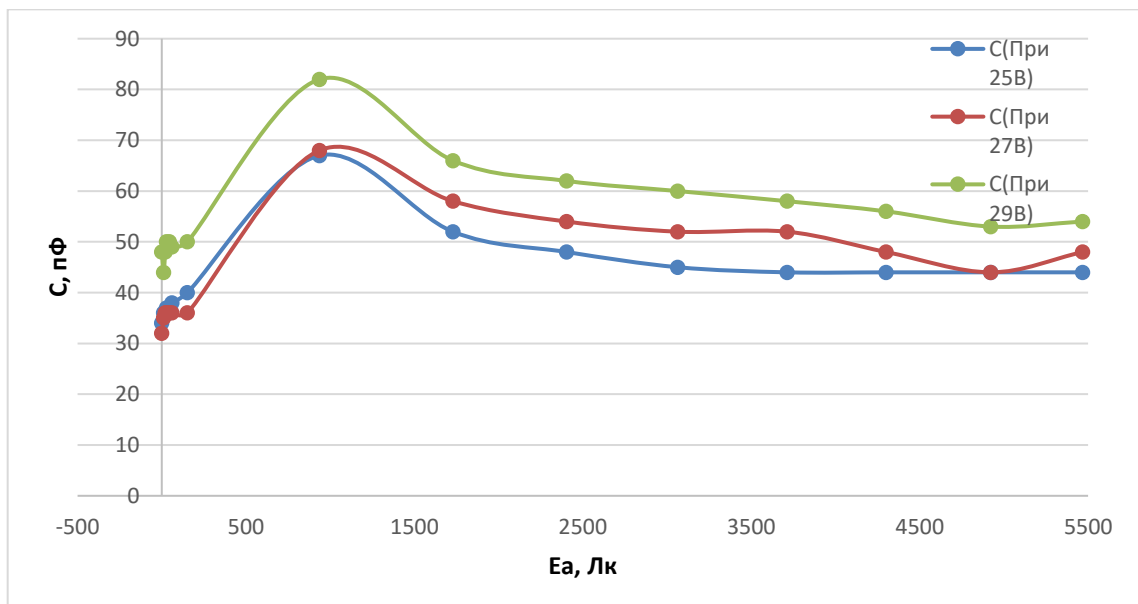


Рисунок 20 – Зависимость ёмкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении смещения 1.

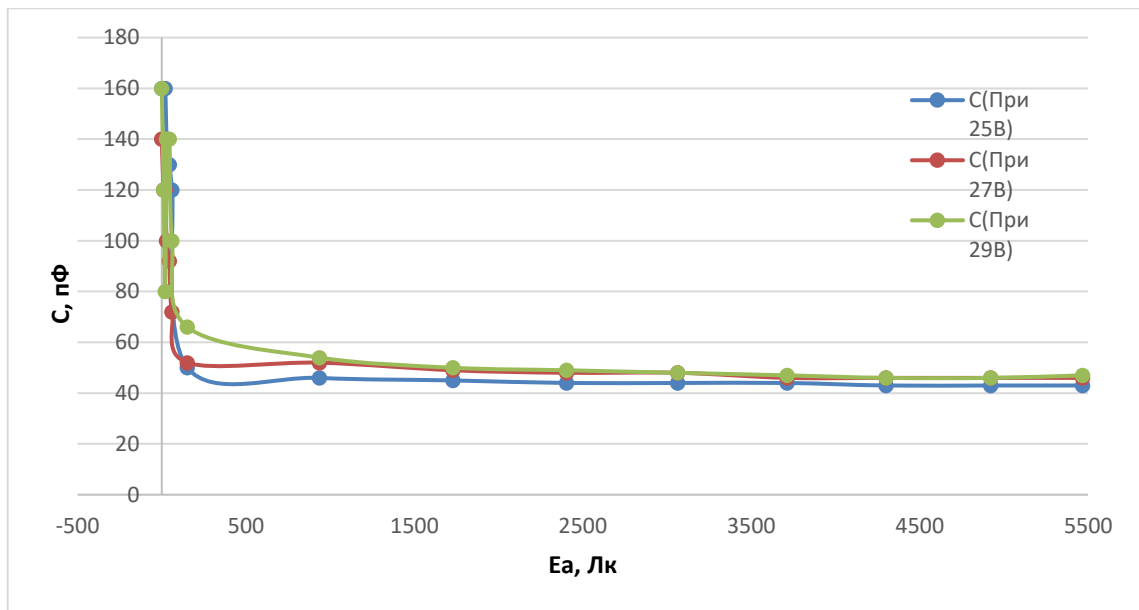


Рисунок 21 – Зависимость ёмкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении смещения 2.

Как было сказано ранее, при воздействии оптического излучения на высокоомную область структуры в промежутке между контактными площадками происходит увеличение частоты токовых колебаний и уменьшение их амплитуды. Это может происходить за счет увеличения фотопроводимости и роста постоянной составляющей тока через структуру вследствие заполнения глубоких уровней в подложке. Из зависимости видно, что при допороговом напряжении ёмкость структуры слабо зависит от освещения. Максимум на рисунке 20 может быть связан с перераспределением электрического поля в приконтактных областях, что приводит к изменению суммарной ёмкости структуры.

Проанализировав полученные результаты можно утверждать о том, что существует прямая связь скачкообразного возрастания ёмкости структуры с формированием домена сильного электрического поля в межконтактной области.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы при исследовании влияния освещения на ВАХ и ВФХ разработанных структур высокоомного GaAs были получены следующие выводы:

1) Напряжение, при котором наблюдается резкое увеличение емкости, соответствует началу участка ОДП на ВАХ. При напряжении, превышающем пороговое значение, во внешней цепи структуры возникают токовые колебания, связанные с развитием рекомбинационной неустойчивости тока.

2) При воздействии засветки начало участка ОДП на ВАХ и напряжение, при котором происходит резкое увеличение емкости на ВФХ, сдвигаются в область больших напряжений на одинаковую величину. При увеличении напряжения на структуре резкий рост емкости происходит при меньших значениях интенсивности засветки.

3) Емкость структуры при допороговом напряжении имеет слабую зависимость от интенсивности засветки.

4) Выводы 1-3 являются подтверждением связи скачкообразного возрастания емкости структуры с формированием домена сильного поля в межконтактной области.