

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 мезаструктур
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

Кожевников И.О.

инициалы, фамилия

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- иnanoструктурах 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 nanoструктурах. Особого внимания заслуживает разработка методики локального определения концентрации свободных носителей заряда в полупроводниковых микро- и nanoструктурах. 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 однокристальный 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 «Микроразмерный генератор с оптическим управлением»).

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

Исследуемая структура

Экспериментальные образцы изготавливались на пластинах марок САГ-2БК, представляющих собой сформированные на полуизолирующем 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 меза-структур, включающее в себя процесс фотолитографии, стравливание SiO₂ на незащищенных участках, травление GaAs до подложки, удаление фоторезиста и оставшегося диоксида кремния. Каждая пара контактов формировалась 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 мезаструктур 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)

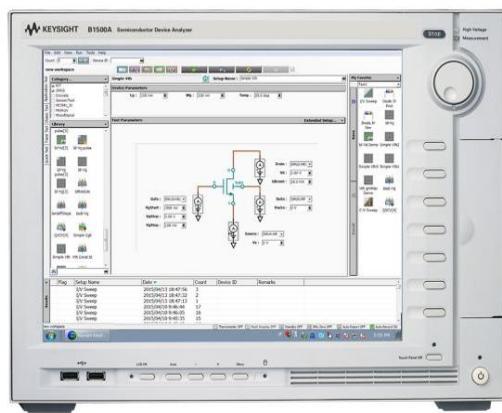


Рисунок 1 – Анализатор полупроводниковых приборов Keysight Agilent B1500A.

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).

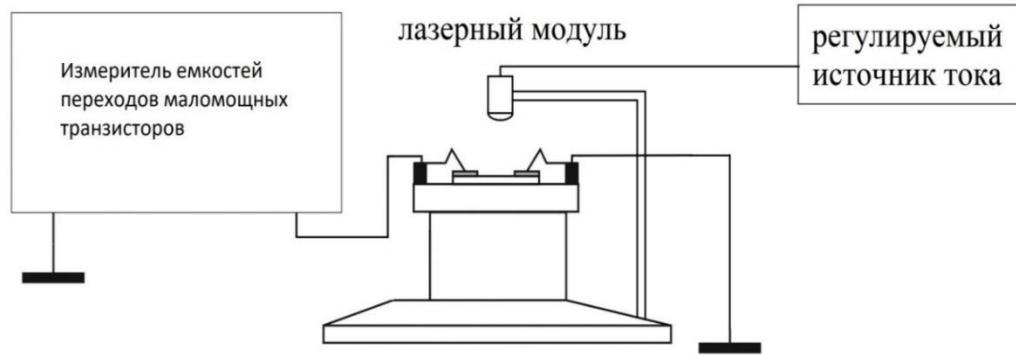


Рисунок 3 – Схема измерительного стенда.

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.

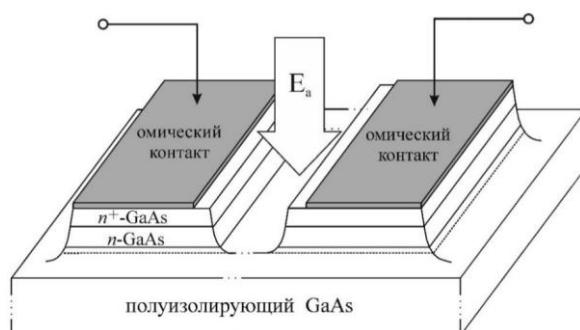


Рисунок 4 – Изображение исследуемой структуры и схема проведения измерений [8].

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 арсинидгаллиевого 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.

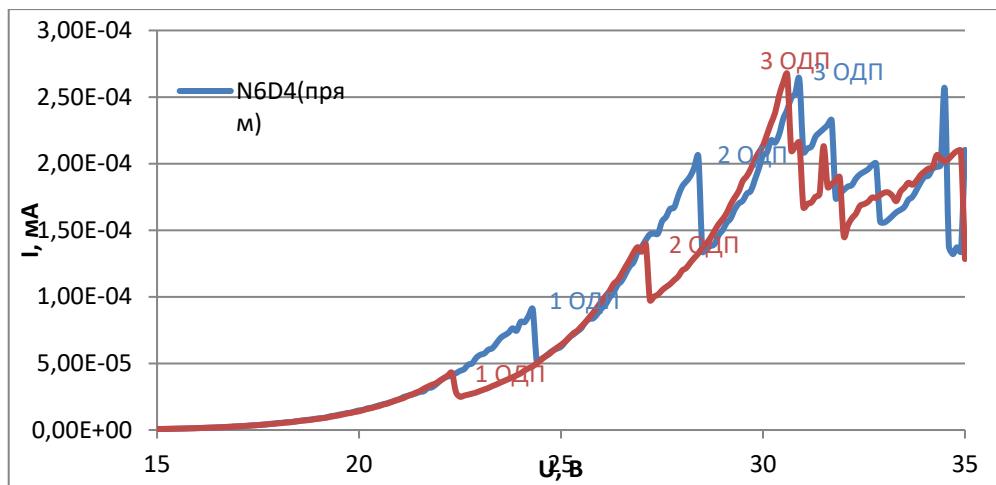


Рисунок 6 – Темновая ВАХ образца N6D4.

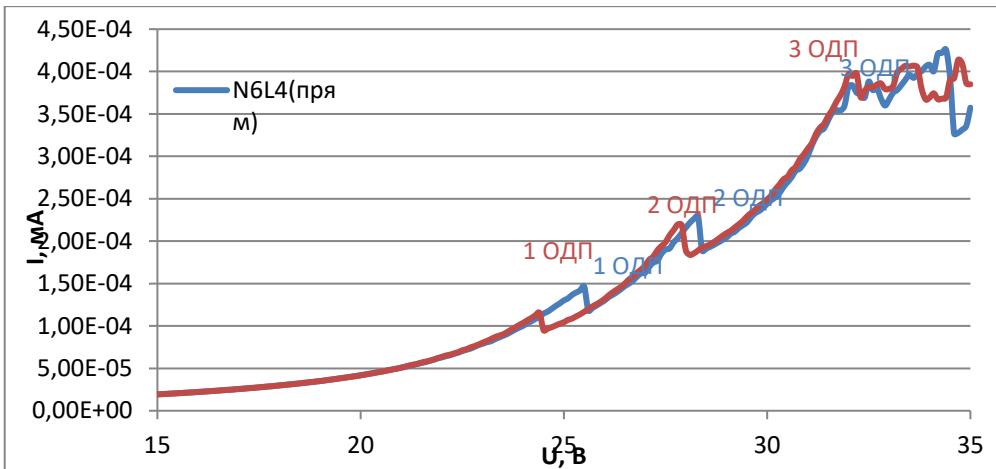


Рисунок 7 – Световая ВАХ образца N6L4.

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		28,05	26,7	1,35	
	2								
5L2,5L1	1					22,8	22,65	0,15	1,3229756 9
	2					-22,3	-22,5	0,2	
	3					-23,95	-27,8	3,85	
	4								
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.

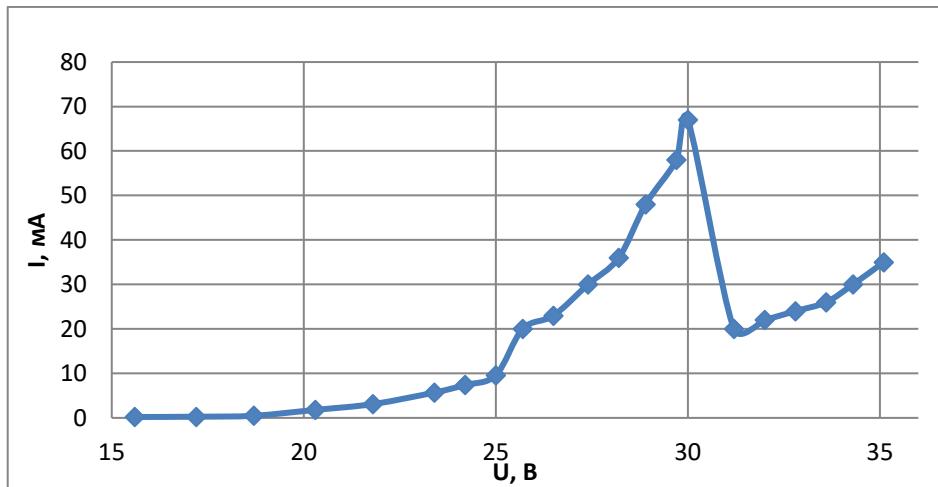


Рисунок 8 – ВАХ образца 1 при смещении 1.

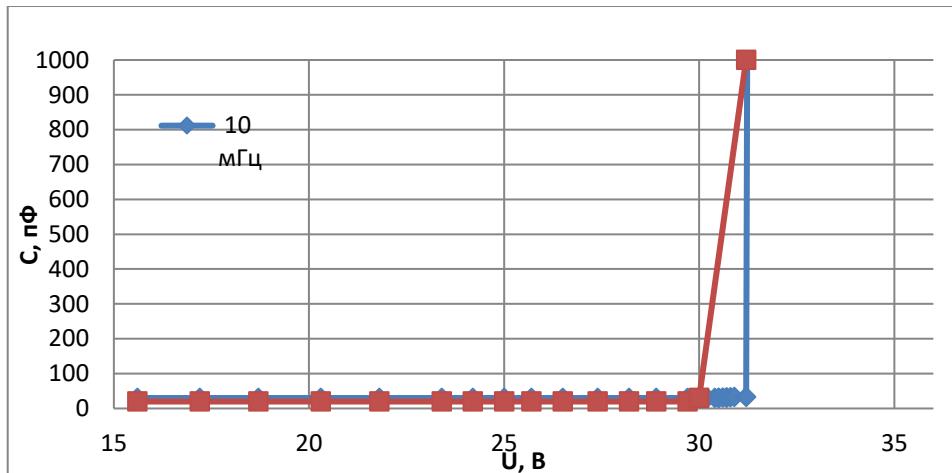


Рисунок 9 – ВФХ образца 1 при смещении 1.

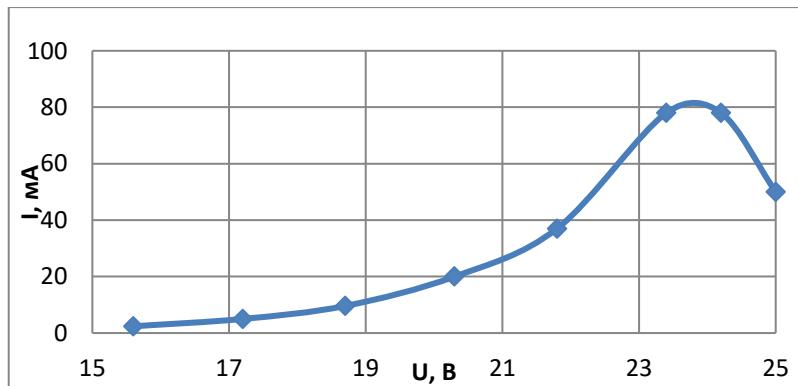


Рисунок 10 – ВАХ образца 1 при смещении 2.

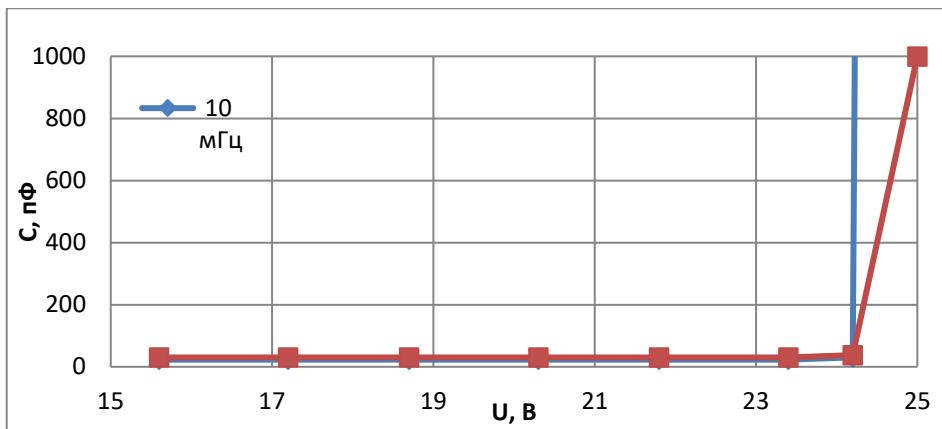


Рисунок 11 – ВФХ образца 1 при смещении 2.

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 емкости превышает предел измерения прибора в 1000 пФ.

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

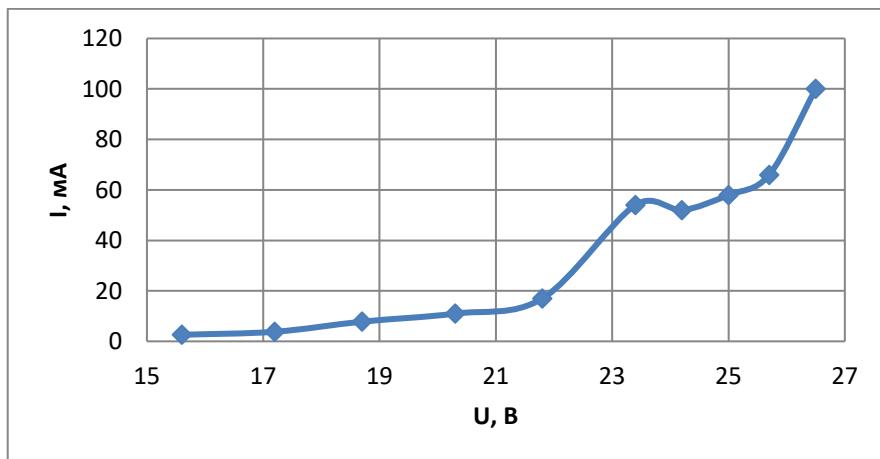


Рисунок 12 – ВАХ образца 2 при смещении 1.

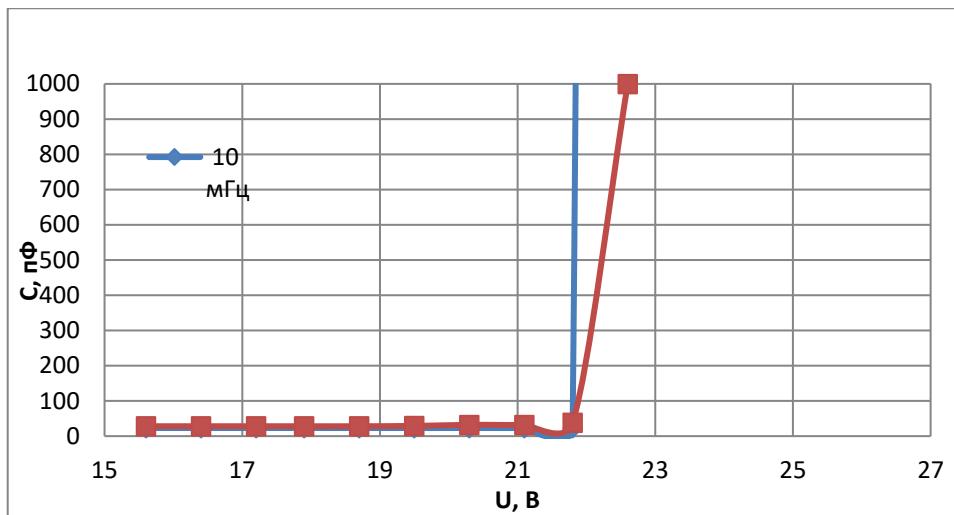


Рисунок 13 – ВФХ образца 2 при смещении 1.

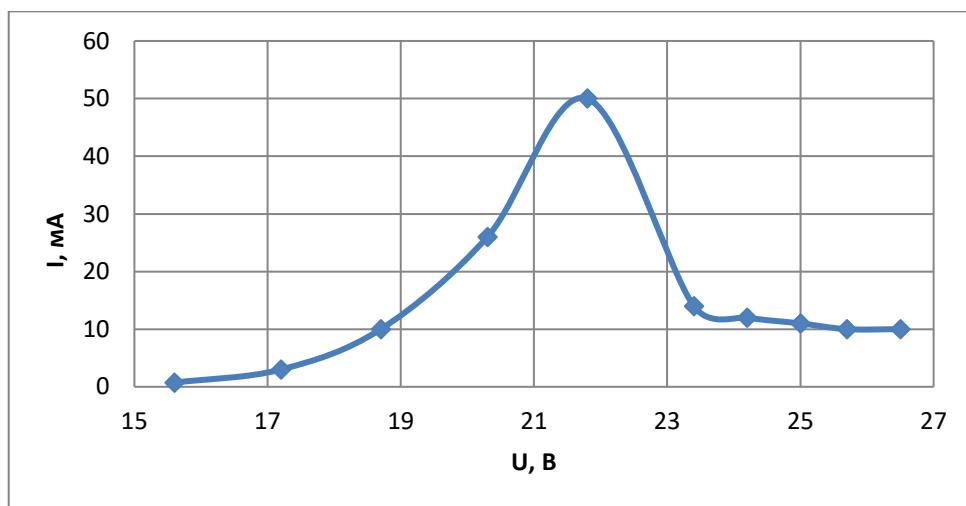


Рисунок 14 – ВАХ образца 2 при смещении 2.

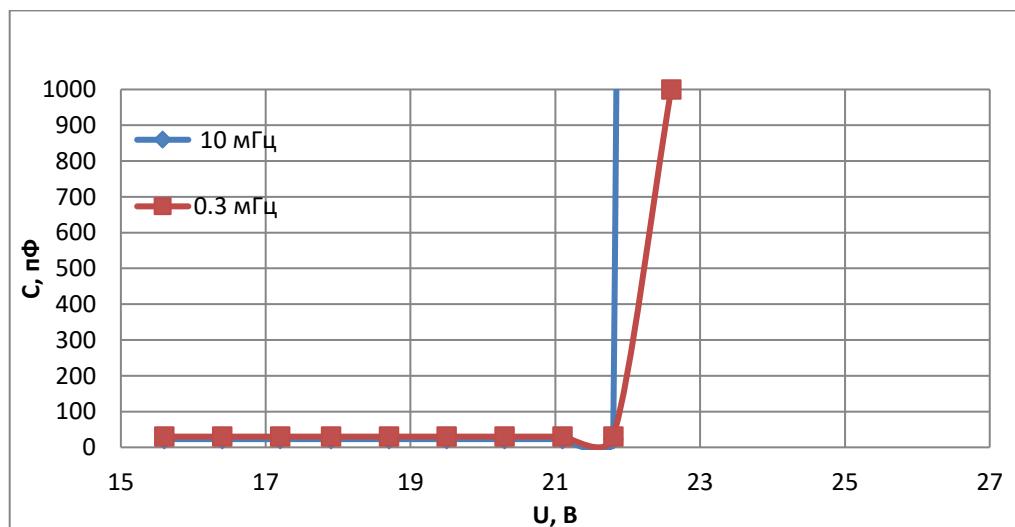


Рисунок 15 – ВФХ образца 2 при смещении 2.

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.

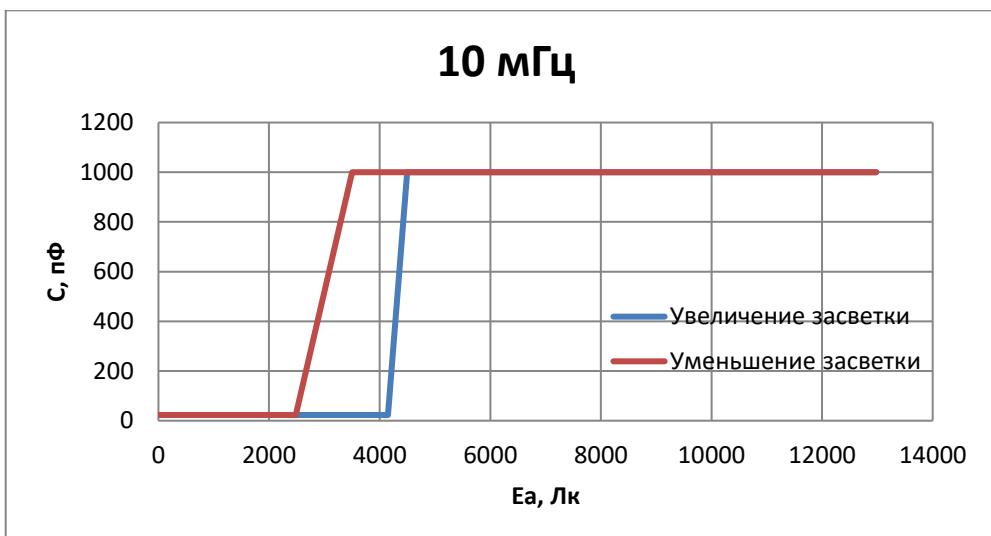


Рисунок 16 – Увеличение и уменьшение засветки при частоте 10 мГц.

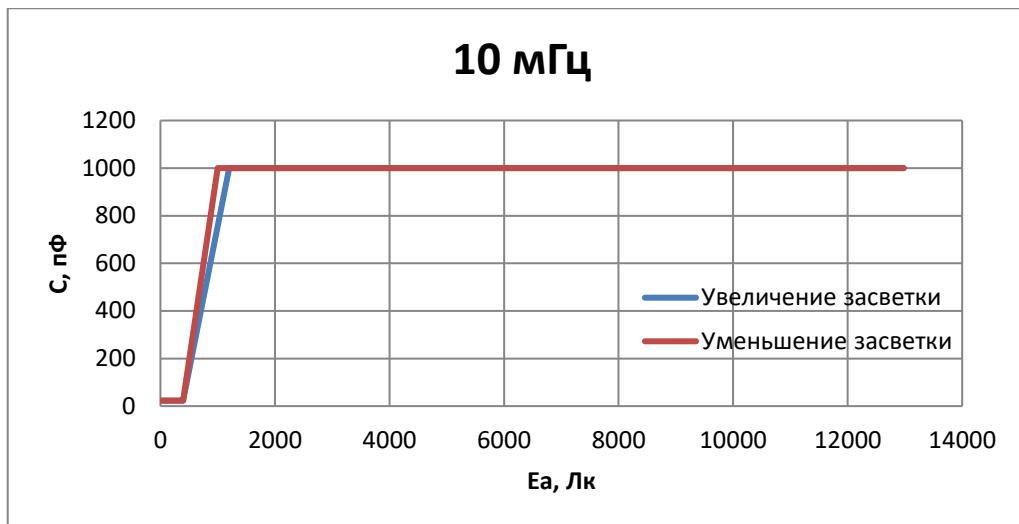


Рисунок 17 – Увеличение и уменьшение засветки при частоте 10 мГц.

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 результаты измерений ВАХ и ВФХ одного образца. На зависимости видно, что при освещении обе характеристики смещаются приблизительно на 0,8 В в сторону больших напряжений.

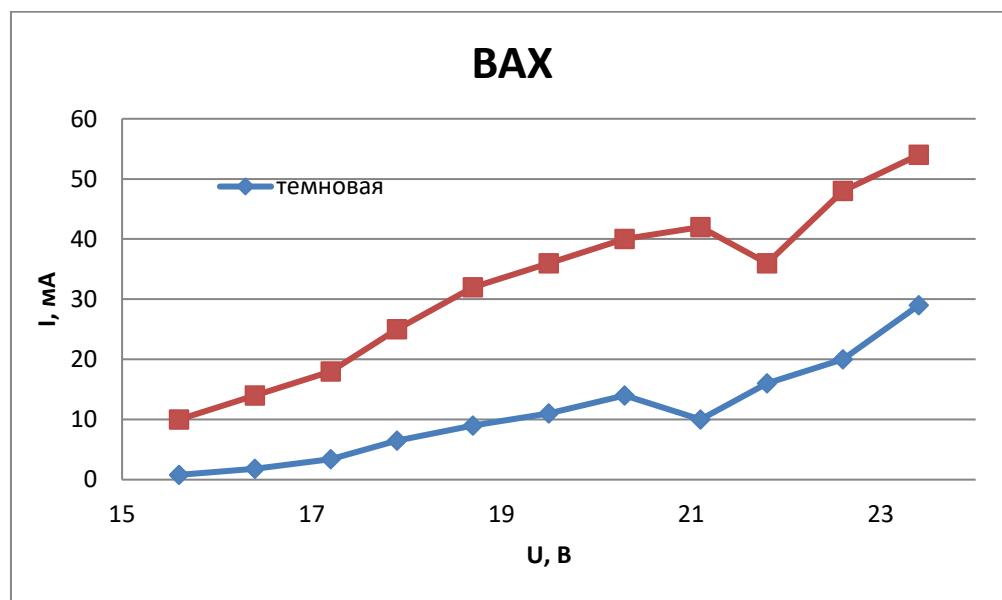


Рисунок 18 – Уменьшение засветки с разной постоянной частотой.

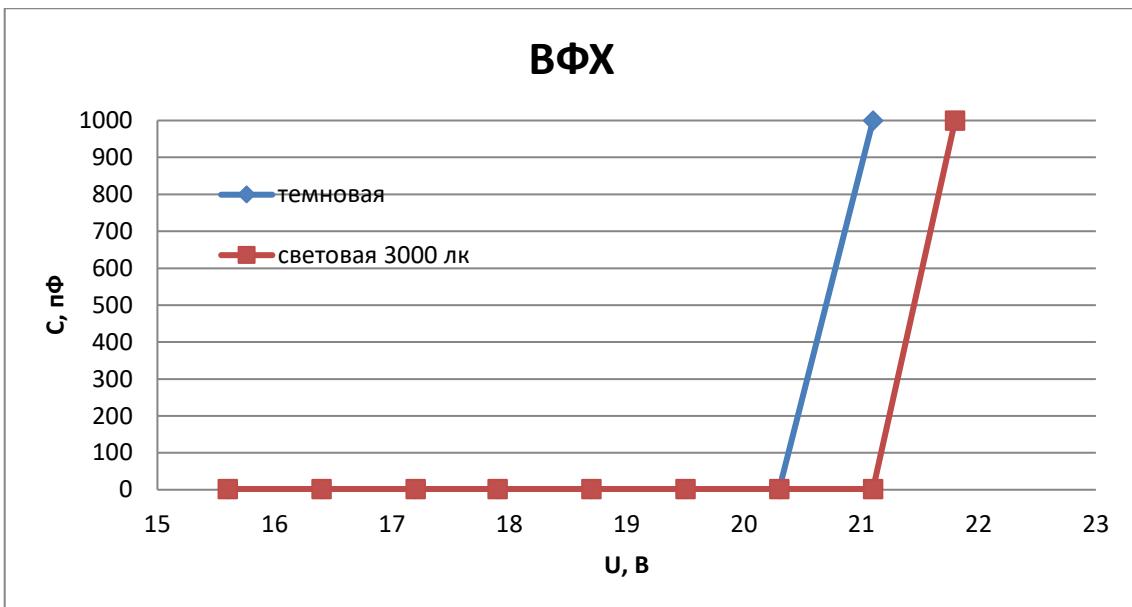


Рисунок 19 – Уменьшение засветки с разной постоянной частотой.

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 ёмкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении.

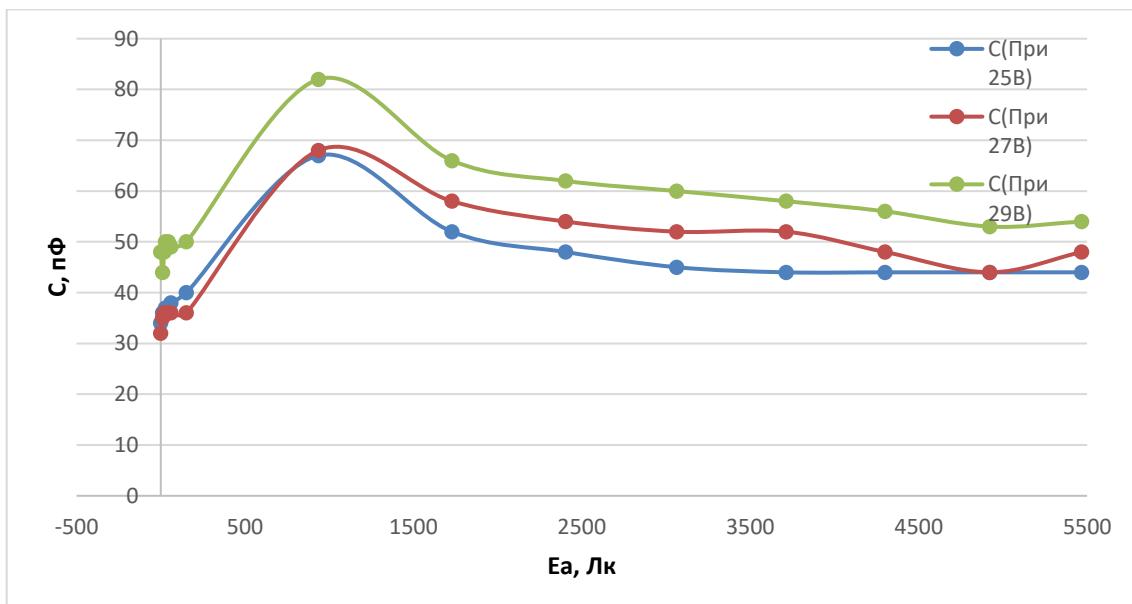


Рисунок 20 – Зависимость ёмкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении смещения 1.

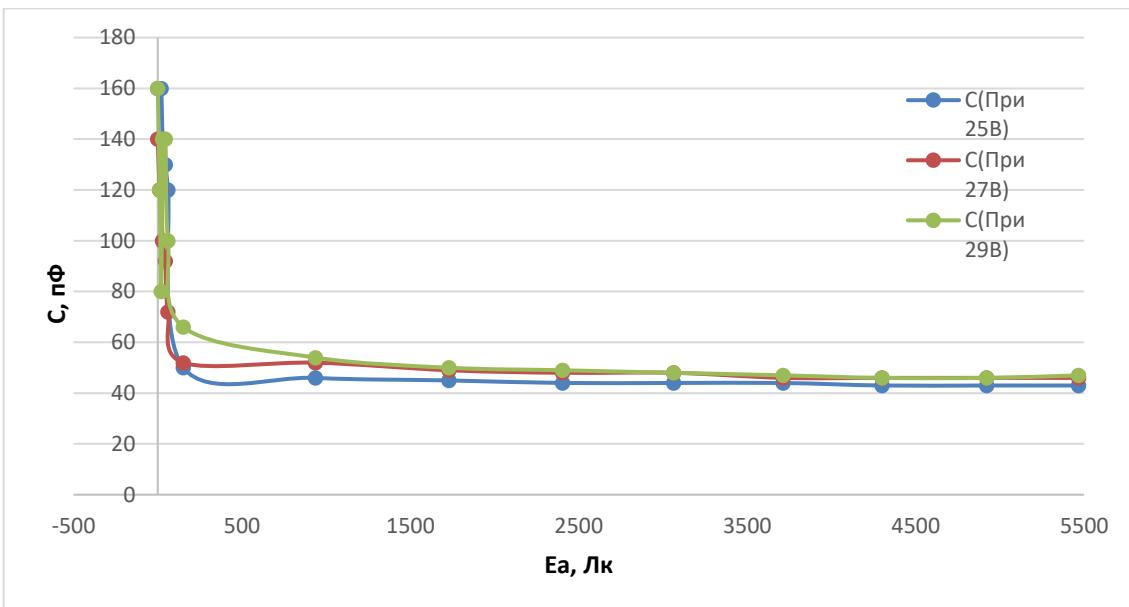


Рисунок 21 – Зависимость ёмкости от интенсивности освещения при разном постоянном напряжении смещении 2.

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.