

На правах рукописи



Астраханцева Анна Сергеевна

# Электромагнитные плазменные волны в полупроводниковых и металл-диэлектрических структурах

Специальность 1.3.8.

Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук

**Научный руководитель:** **Муравьев Вячеслав Михайлович**  
доктор физико-математических наук

**Официальные оппоненты:** **Волков Владимир Александрович**  
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории методов получения тонких пленок и пленочных структур

**Морозов Сергей Вячеславович**  
доктор физико-математических наук, Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», ведущий научный сотрудник, заведующий Лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»**

Защита состоится **9 июля 2024 г. в 10 часов 00 минут** на заседании диссертационного совета 24.1.136.01 (Д 002.100.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН), расположенном **по адресу:** 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФТТ РАН и на сайте организации <http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/dis-council.html>.

Автореферат разослан «\_\_» мая 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.136.01 (Д 002.100.02),  
доктор физико-математических наук



Гаврилов С. С.

©Астраханцева А.С., 2024  
©ИФТТ РАН, 2024

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Последние девять десятилетий были отмечены бурными исследованиями в области физики плазмы твердого тела [1, 2]. Существование плазменных колебаний обусловлено кулоновским взаимодействием между носителями заряда. Возмущение плотности заряда создает электрическое поле, которое воздействует на заряды, стремясь восстановить электрическую нейтральность системы. Из-за своей инерции носители выходят за пределы своих равновесных положений, так что возникает колебательное движение зарядов. Свойства плазменных колебаний в твердых телах зависят от зонной структуры, эффективных размеров системы и наличия границ раздела и магнитных полей.

В последнее время особое внимание уделяется изучению двумерных (2D) плазмонов [3-8], которые представляют собой сравнительно низкочастотные колебания электронной плотности в двумерных электронных системах (ДЭС). В отличие от трехмерных (3D) плазмонов, они обладают бесщелевой дисперсией, охватывающей широкий спектральный диапазон от субтерагерцового до инфракрасного, что является крайне перспективным для применения в практических устройствах.

В отличие от плазмы в объемных металлах и полупроводниках, плазменной частотой в двумерных электронных системах можно легко управлять с помощью различных методов, например, при помощи изменения электронной плотности в ДЭС затвором или приложения внешнего магнитного поля. Второе основное свойство плазменных возбуждений в ДЭС заключается в том, что двумерные плазмоны обладают сильной дисперсией. Диэлектрическая среда вокруг ДЭС влияет на плазменную частоту и закон дисперсии двумерных плазмонов. Таким образом, варьируя диэлектрическое окружение, можно довольно просто перестраивать физические свойства плазменных возбуждений. Благодаря этим возможностям управления плазменной частотой и видом закона дисперсии, плазменные волны в ДЭС становятся чрезвычайно гибким и удобным инструментом для изучения фундаментальных физических явлений и создания различных устройств.

До недавних пор все наблюдаемые двумерные плазменные возбуждения ин-

терпретировались как продольные плазменные колебания. Однако недавно стали появляться экспериментальные свидетельства того, что картина плазменных мод не полна [9]. В 1991 году [10] впервые была предсказана возможность существования поперечных электромагнитных двумерных плазменных колебаний в пленке с ДЭС на поверхности. После этого появился ряд теоретических работ [11, 12], в которых более подробно описывается поведение электромагнитных двумерных плазменных волн в системе, представляющей собой ДЭС на поверхности диэлектрической подложки. В 2021 году существование поперечных плазменных волн было экспериментально подтверждено [13]. В данной работе измерялся спектр пропускания электромагнитного излучения через GaAs подложки, на поверхности которых были выращены квантовые ямы с различной концентрацией двумерных электронов. Таким образом, на данный момент экспериментальные данные о физических свойствах двумерных поперечных плазменных волн крайне скудны.

Согласно теоретическим работам [10-12] поперечные плазменные волны проявляют себя в виде резонанса в пропускании электромагнитной волны через подложку с ДЭС на её поверхности. Частота данного резонанса, рассчитанная для стандартных значений концентрации двумерных электронов в GaAs ( $\sim 10^{11} \text{ см}^{-2}$ ) и толщины подложки GaAs ( $\sim 0.5 \text{ мм}$ ), имеет величину около 10 ГГц. Помимо того, что такую частоту невозможно детектировать квазиоптическими методиками, нужно еще и иметь размеры образца хотя бы около 1 м, что экспериментально невозможно. Соответственно, чтобы поднять частоту плазменного резонанса, нужно увеличивать концентрацию носителей и уменьшать толщину подложки. Современные гетероструктуры имеют концентрацию электронов до  $\sim 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , и существенное увеличение концентрации пока недоступно. Поэтому в рамках настоящей диссертационной работы была разработана технология изготовления тонких диэлектрических мембран с двумерной электронной системой на их поверхности.

Благодаря данной технологии были исследованы спектры пропускания ДЭС на поверхности диэлектрических мембран различной толщины. Было установлено, что изготовленные образцы мембран с ДЭС обладают электромагнитной

прозрачностью выше частоты плазменного резонанса, что эквивалентно ультрафиолетовой прозрачности, наблюдаемой в металлах [1]. Также данная технология позволила определить, какие параметры системы влияют на наблюдаемый плазменный край. Оказалось, что, прикладывая внешнее магнитное поле, можно плавно управлять сдвигом фазы прошедшего излучения. Обнаруженный максимальный сдвиг фазы оказался сравним с наблюдаемым для образцов, представляющих собой активные графеновые метаматериалы ( $32^\circ$ ) [14] и метаповерхности с разрезными кольцевыми резонаторами (англ. split-ring) с интегрированными переключателями на полевых транзисторах (англ. Field-Effect Transistor (FET)) ( $\pm 30^\circ$ ) [15].

Одной из ключевых задач в современной высокочастотной электронике является разработка фазированных антенных решеток на частотах в терагерцовом (ТГц) частотном диапазоне (0.1 – 1 ТГц) [16]. Возможные применения таких фазированных массивов направлены на разработку систем скоростной беспроводной связи на ТГц частотах. Однако существующие методы создания фазовращателей на терагерцовых частотах имеют определенные недостатки. Например, фазовращатели, построенные с использованием PIN-диодов или переключающих элементов на полевых транзисторах, имеют проблемы с относительно большими потерями и дискретностью в изменении фазы [17, 15]. Фазовращатели на основе жидких кристаллов имеют громоздкий размер и низкую скорость работы, что ограничивает их применение [18-20]. Графеновые метаповерхности с управляемым затвором имеют ограниченные возможности изменения фазы, а также сталкиваются с проблемами производства крупных образцов достаточной чистоты и однородности [14, 21-24]. Поэтому новые физические подходы, основанные на современных полупроводниковых технологиях, являются крайне востребованными. Технология изготовления тонких мембран с ДЭС на поверхности позволила создать новый тип фазовращателей, который продемонстрировал работу при температурах до 80 К. Ожидается, что нет принципиальных препятствий для расширения этого диапазона до комнатной температуры на терагерцовых частотах. Дизайн устройства легко масштабируется до плоского фазированного массива, что открывает

перспективы для его применения в системах управления диаграммой направленности излучения.

В последние годы искусственные метаматериалы стали объектом повышенного внимания из-за своих уникальных электромагнитных свойств, которые отличаются от характеристик привычных природных материалов [25]. Метаповерхности, составленные из двумерных массивов рассеивателей, являются наиболее технологически простым классом метаматериалов [26, 27]. Их производство значительно упрощено по сравнению с другими видами метаматериалов, что делает их перспективными для интеграции с нанопотонными устройствами на кристалле благодаря плоским профилям. Возможные примеры включают плазмонные метаповерхности из графеновых лент [28], V-образные антенны [29, 30], щелевые плазмонные (англ. gap-plasmon) метаповерхности [31-34] и решетки из InSb [35]. Обнаружение поперечных электромагнитных плазменных волн открывает перспективы для создания новых плазмонных метаматериалов.

С учетом вышеперечисленного, исследование поперечных двумерных плазменных волн является крайне перспективным направлением не только для изучения фундаментальных основ явления, но и для прикладного применения в системах ТГц электроники. Таким образом, данная тема является **актуальной**.

**Целью диссертационной работы** является исследование фундаментальных физических свойств поперечных плазменных волн в системе, состоящей из ДЭС, располагающейся на диэлектрической подложке. Основными **задачами** являются разработка технологии изготовления тонких диэлектрических мембран с ДЭС на поверхности, а также разработка и реализация на основе полученных знаний ТГц плазмонного фазовращателя и метаповерхностей с уникальными физическими свойствами.

**Методы исследований.** В качестве метода исследований использовалась двухлучевая интерферометрия (интерферометр Маха-Цендера) для измерения пропускания и сдвига фазы при прохождении излучения через исследуемые образцы, а также транспортная методика для измерения концентрации и подвижности электронов в образцах.

**Научную новизну работы** составляют следующие результаты.

- Впервые в пропускании диэлектрических мембран с ДЭС обнаружен резонанс, соответствующий возбуждению поперечных электромагнитных плазменных волн в системе. Обнаружен и впервые экспериментально исследован плазменный край в пропускании ТГц электромагнитных волн через систему.
- Разработаны научные основы и технология создания нового плазмонного фазовращателя. Разработана физическая модель, описывающая его поведение.
- Создана и исследована новая плазмонная метаповерхность - ДЭС в форме полосок, расположенных на тонких диэлектрических мембранах. В данной системе впервые обнаружен новый тип плазменных возбуждений, связанный с сильной взаимной экранировкой плазменных колебаний в соседних полосках.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Обнаружено, что в тонких GaAs мембранах с ДЭС на базе AlGaAs/GaAs гетероструктуры под действием падающей электромагнитной волны возбуждается особый тип волн – поперечные электромагнитные плазменные волны. Проведено всестороннее экспериментальное исследование физических свойств данного типа плазменных возбуждений.
2. Установлено, что поперечные плазменные волны можно характеризовать частотой плазменного резонанса. Экспериментально измерена зависимость частоты плазменного резонанса от концентрации двумерных электронов, а также от толщины полупроводниковой подложки.
3. Разработаны физические основы и создан прототип плазмонного полупроводникового фазовращателя. Успешная работа устройства продемонстрирована в частотном диапазоне от 50 до 270 ГГц. При этом фазовый сдвиг прибора непрерывно перестраивается напряжением на затворе в диапазоне от  $0^\circ$  до  $41^\circ$  (на частоте 65 ГГц).

4. Изучено влияние параметров полупроводниковой GaAs подложки на величину фазового сдвига электромагнитного излучения, проходящего через подложку с ДЭС. Установлено влияние на измеряемый фазовый сдвиг плотности электронов в ДЭС. Разработана физическая модель, хорошо описывающая полученные результаты. Установлено, что максимальный фазовый сдвиг, который можно достичь в предложенной схеме, составляет  $180^\circ$ . Экспериментально продемонстрирован фазовый сдвиг в  $105^\circ$ .
5. Показано, что ДЭС в виде периодических полосок, расположенных на диэлектрической подложке, выступает в качестве плазменной метаповерхности. Экспериментально установлено, что разработанная метаповерхность демонстрирует анизотропный электродинамический отклик. Когда вектор поляризации электромагнитного излучения направлен перпендикулярно полосам, обнаружено возбуждение новой плазменной моды. Установлено, что мода возникает вследствие бокового экранирования при стремлении щели между полосками к нулю.

**Научная и практическая значимость работы.** В диссертационной работе была впервые разработана технология изготовления тонких диэлектрических мембран с ДЭС на поверхности на основе высококачественных гетероструктур GaAs/AlGaAs, которая позволила обнаружить и впервые подробно исследовать двумерные поперечные плазменные колебания. Создан прототип плазмонного полупроводникового фазовращателя и разработана модель, описывающая его поведение. Изучено влияние частоты излучения, плотности электронов в ДЭС и параметров полупроводниковых подложек (на основе высококачественных гетероструктур GaAs/AlGaAs) на величину фазового сдвига. К важным научным результатам стоит отнести исследование метаповерхностей из ДЭС в виде полосок на тонких мембранах, которые демонстрируют сильно анизотропный электродинамический отклик. Было показано, как геометрические параметры такой системы влияют на частоту плазменного резонанса. Также была разработана теория, описывающая как боковое экранирование приводит к появлению новой плазменной моды при стремлении зазора между полосками к нулю. Все полученные экспе-

риментальные данные являются крайне важными с практической точки зрения, поскольку открывают возможности для разработки совершенно новых концепций в плазмонной электронике, а также для создания современных приборов с улучшенными характеристиками.

**Апробация работы.** Оригинальные результаты, представленные в данной диссертационной работе, получены впервые. Эти результаты были доложены на 65-ой Всероссийской научной конференции МФТИ и на Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов - 2023», а также на научных сессиях и семинарах ИФТТ РАН, где состоялось их обсуждение.

По материалам диссертации опубликовано 5 статей в международных реферируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus.

**Личный вклад автора.** Представленные в диссертационной работе результаты были получены лично автором работы, либо при его непосредственном участии. Соискатель принимал активное участие в постановке задачи, в выборе методологических подходов, в разработке технологии изготовления тонких мембран с ДЭС на поверхности, в изготовлении исследуемых образцов, в обработке и интерпретации полученных результатов, а также в подготовке и написании научных статей.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания методики изготовления и измерения исследуемых структур, трех основных глав с результатами исследований, заключения и списка литературы. Полный объём диссертационной работы составляет 118 страниц с 40 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 103 наименования.

## Содержание диссертации

**Во введении** сформулированы цели работы, обоснованы актуальность темы, научная новизна, достоверность полученных результатов и их апробация, представлены основные положения, выносимые на защиту, структура диссертации и список основных публикаций по теме диссертационной работы.

**В первой главе** приводится литературный обзор некоторых основных теоретических и экспериментальных результатов исследований коллективных плазменных возбуждений в трехмерных и двумерных электронных системах.

**Вторая глава** представляет собой описание технологии изготовления исследуемых образцов и используемых экспериментальных методик. В первом разделе приведены основные характеристики экспериментальных образцов, представляющих собой высококачественные гетероструктуры на основе  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, с концентрациями электронов вплоть до  $10^{13} \text{ см}^{-2}$  и подвижностями до  $10^6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Во втором разделе подробно описана разработанная технология изготовления тонких диэлектрических мембран с ДЭС на поверхности и процессы изготовления фазовращателей и метаповерхностей с использованием разработанной технологии. Для изготовления образцов с однородной мембраной была разработана особая процедура травления подложки GaAs жидкостным методом в растворе на основе лимонной кислоты, перекиси водорода и воды. В результате получались однородные по толщине мембраны размером примерно  $7 \times 7 \text{ мм}^2$  с толщинами вплоть до 10 мкм. Производство фазовращателей состояло из следующих основных этапов: изготовление контакта (термическое напыление  $70 \text{ \AA} \text{ Ni} / 1300 \text{ \AA} \text{ Ge} / 2600 \text{ \AA} \text{ Au} / 240 \text{ \AA} \text{ Ni}$  и последующее вжигание) к ДЭС подложки GaAs, создание металлического затвора (термическое напыление  $240 \text{ \AA} \text{ Cr} / 2000 \text{ \AA} \text{ Au}$ ) со стороны ДЭС и вытравливание GaAs с обратной стороны с целью получить тонкую мембрану. Производство метаповерхностей содержало следующие основные этапы: формирование мез (жидкостное травление в растворе  $\text{H}_2\text{O} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{SO}_4$ ) в виде полосок из ДЭС на подложках GaAs и вытравливание GaAs с обратной стороны с целью получить тонкую мембрану. В третьем разделе изложены основные принципы используемого для измерений интерферометра Маха-Цендера. Описан принцип работы лампы обратной волны, используемой для генерации субтерагерцового излучения.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию терагерцового отклика диэлектрической мембраны с высокоподвижной двумерной электронной системой

на поверхности. В данной главе образцы были изготовлены из гетероструктуры  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Квантовая яма содержит ДЭС с плотностью  $n_s = 9 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью электронов  $\mu = 10^5 \text{ см}^2/\text{В с}$  при  $T = 5 \text{ К}$ . Измерения проводились на шести образцах с различной толщиной мембран: 23, 30, 37, 71, 72 и 186 мкм (см. нижние панели на рис. 1(b)). Сначала травленая структура устанавливалась на держатель образца с апертурой диаметром 6 мм. Центр мембраны был соосен центру апертуры (рис. 1(a)). Затем эта конструкция помещалась в оптический криостат. Непрерывное терагерцовое излучение от 40 до 500 ГГц, генерируемое набором ламп обратной волны (англ. Backward Wave Oscillator (BWO)), подавалось нормально к поверхности подложки. Измерения проводились при базовой температуре образца  $T = 5 \text{ К}$ . Передаваемая мощность контролировалась с помощью охлаждаемого гелием болометра.

На рисунке 2 показаны спектры пропускания, полученные для мембран GaAs различной толщины,  $d = 30, 71$  и  $186$  мкм, с одной и той же плотностью электронов  $n_s = 9 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Кружки и одноцветные сплошные линии соответственно отражают экспериментальные данные по сравнению с теоретическим прогнозом на основе модели Друде. В верхней части рисунка построен график зависимости пропускания от частоты падающего излучения для мембраны толщиной 30 мкм в сильном магнитном поле  $B = 7 \text{ Тл}$ , в то время как спектры в нижней части рисунка получены при  $B = 0 \text{ Тл}$ . Спектры для каждой указанной толщины мембраны вертикально сдвинуты на единицу для наглядности. На этих же графиках для сравнения приведены спектры пропускания для диэлектрических мембран без ДЭС, показанные розовым ( $d = 30$  мкм), светло-зеленым ( $d = 71$  мкм) и светло-синим ( $d = 186$  мкм) цветами. Спектры для диэлектрической мембраны без ДЭС описываются функцией Фабри-Перо [36].

В данной главе изучается разница между спектрами для мембран с ДЭС и без нее, что наиболее ярко проявляется в области низких частот. В этой области наблюдается почти полная прозрачность для мембран без ДЭС, в то время как добавление ДЭС приводит к значительному снижению сигнала пропускания. По мере увеличения частоты пропускание достигает максимума, ограниченного

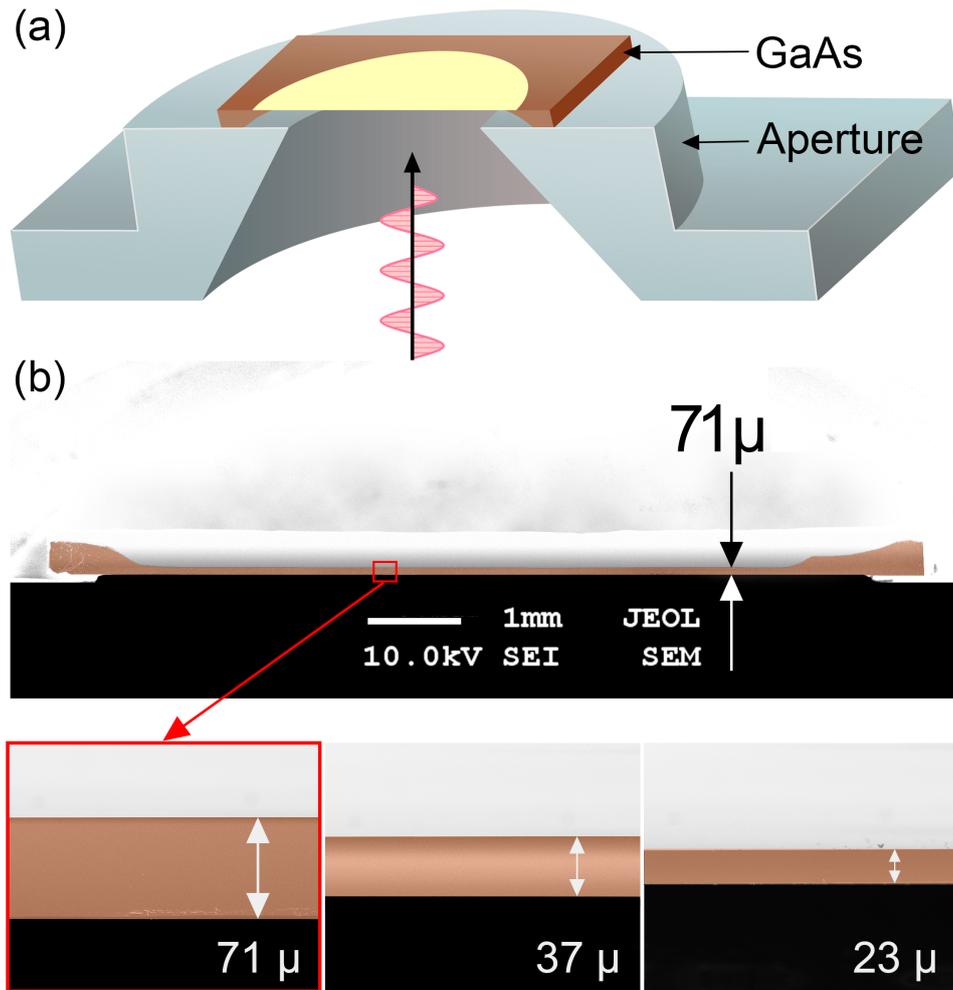


Рис. 1: (a) Принципиальная схема экспериментальной установки. Мембрана GaAs помещается поверх отверстия и облучается электромагнитной волной, падающей перпендикулярно к ее поверхности. (b) СЭМ-изображения профиля поперечного сечения образца. На нижних панелях показаны увеличенные СЭМ-изображения мембран толщиной 71, 37 и 23 мкм. Из работы [37].

функцией Фабри-Перо. Частоты максимумов обозначены стрелками на рисунке 2.

Интересно понять, что определяет частоту плазменного резонанса  $\omega_{res}$  для полупроводниковых мембран с 2D плазменным слоем. Как видно из рисунка 2, частота плазменного резонанса уменьшается с увеличением толщины мембраны, как указано стрелками. Были исследованы несколько мембран различной толщины и определены их резонансные плазменные частоты. Полученная зависимость

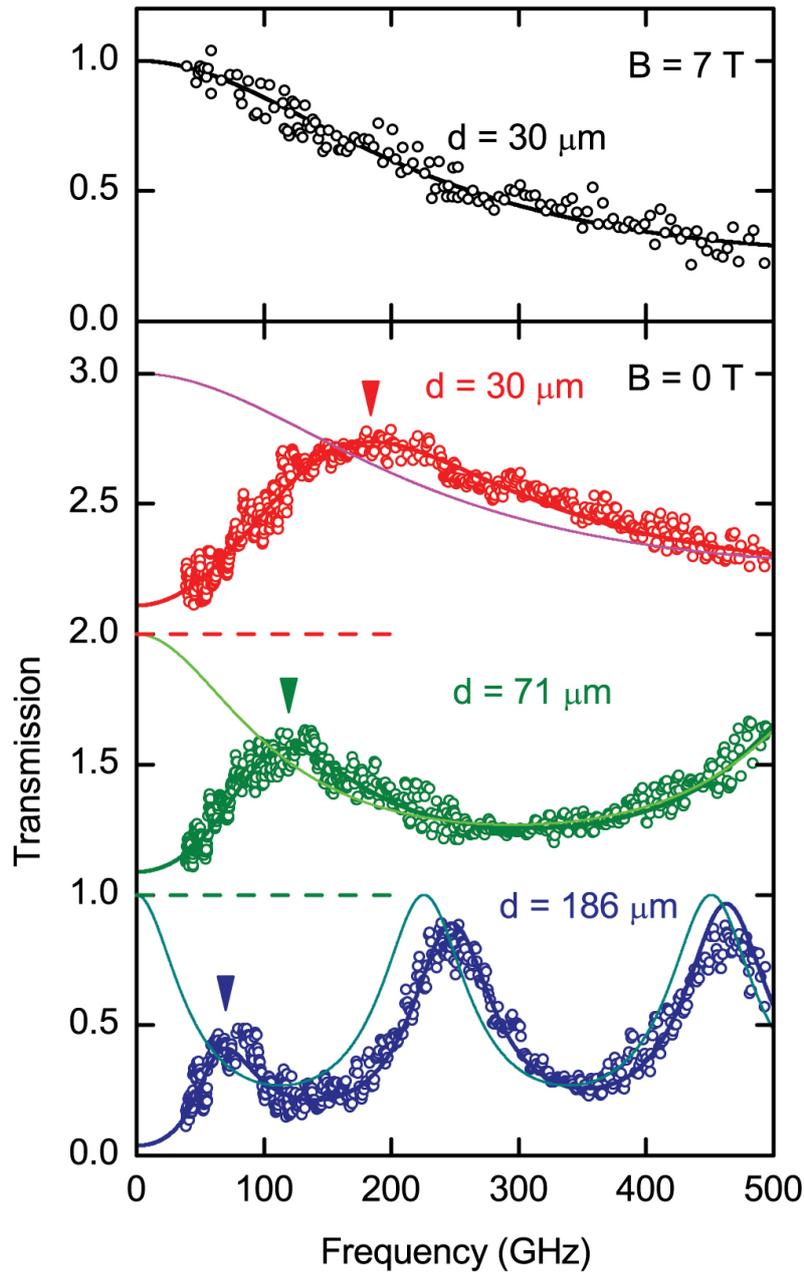


Рис. 2: Спектры пропускания мембран различной толщины - 30, 71 и 186 мкм. Графики смещены по вертикали для наглядности. На верхней панели показан спектр мембраны с толщиной 30 мкм в присутствии сильного магнитного поля  $B = 7$  Тл. Кружки и сплошные линии иллюстрируют экспериментальные данные и теоретические предсказания соответственно. Стрелками отмечены частоты плазменного резонанса в соответствии с уравнением (1). Спектры диэлектрических мембран без ДЭС обозначены кривыми розового, светло-зеленого и светло-синего цветов. Из работы [37].

2D частоты плазменного резонанса от обратной толщины мембраны показана на рисунке 3. Экспериментальные данные (кружки) хорошо описываются теоретическим предположением (сплошная линия), представленным уравнением частоты плазменного резонанса для диэлектрической подложки с ДЭС на поверхности:

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{n_s e^2}{m^* \varepsilon_0 (\varepsilon - 1) d}}, \quad (1)$$

где  $n_s$  - плотность двумерных электронов, а  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость подложки.

Следует отметить, что введенная концепция электромагнитной прозрачности хорошо работает при условии  $\omega_{res} \ll c\pi/\sqrt{\varepsilon}d$ . В этом режиме толщина мембраны намного меньше длины волны падающего излучения. Поэтому диэлектрическая пластина с ДЭС сверху воспринимается электромагнитной волной как однородная 3D плазма со “средней” концентрацией носителей заряда  $n_{3D} = n_s/d$ .

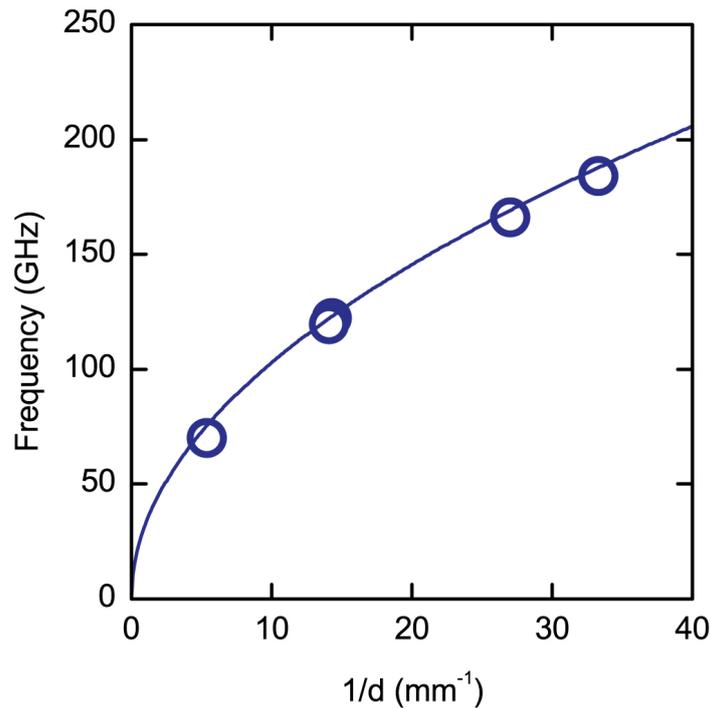


Рис. 3: График зависимости частоты плазменного резонанса от обратной толщины мембраны. Кружками обозначены экспериментальные значения, полученные из спектров пропускания. Сплошная линия - теоретический прогноз  $f_p \sim \sqrt{1/d}$ , основанный на уравнении (1). Из работы [37].

Таким образом, в данной главе были исследованы плазменные возбуждения в ДЭС на поверхности тонких диэлектрических мембран. Было обнаружено, что данные структуры являются электромагнитно прозрачным выше частоты плазменного резонанса. Также было показано, что пороговая частота зависит от концентрации носителей и толщины мембраны.

**В четвертой главе** описывается разработка и исследование физических свойств активного терагерцового фазовращателя с возможностью перестройки плотности ДЭС путем приложения внешнего напряжения на затвор.

В первой части для исследования использовались промышленные гетероструктуры  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  (рис. 4(a)). Квантовая яма содержит ДЭС с плотностью  $n_s = 7.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью электронов  $\mu = 10^5 \text{ см}^2/\text{В с}$  при  $T = 5 \text{ К}$ . Контакт  $\text{Ge} + \text{Au}$  к квантовой яме изготовлен с одного из краев образца. На верхнюю поверхность образца также напылен решетчатый затвор из  $\text{Cr}$  (24 нм) +  $\text{Au}$  (200 нм) (рис. 4(b)). Полосы решетки имеют ширину  $l_g = 4 \text{ мкм}$  с расстоянием между ними  $l_u = 3 \text{ мкм}$ . Мембрана имела толщину  $d = 50 \text{ мкм}$ . Для измерений образец помещался в оптический криостат с перестраиваемой температурой  $T = 5 - 100 \text{ К}$ . Поведение фазовой/интенсивной модуляции изготовленного устройства характеризовалось с помощью интерферометра Маха-Цендера (рис. 4(c)).

Плазмоника рассматривается как один из методов продвижения электроники в диапазон терагерцовых частот. Плазмонный отклик проявляется в том, что ДЭС действует как реактивный элемент. Действительно, проводимость ДЭС хорошо описывается моделью Друде

$$\sigma(\omega) = \frac{n_s e^2 \tau}{m^*} \frac{1}{1 + i\omega\tau}, \quad (2)$$

где  $n_s$  - это плотность 2D электронов,  $m^*$  - это эффективная масса, а  $\tau$  - время релаксации. Тогда импеданс 2D плазмы может быть выражен следующим образом [38-40]

$$Z_{2DES}(\omega) = R + i\omega L_K, \quad L_K = \frac{m^*}{n_s e^2}. \quad (3)$$

Здесь  $L_K$  - кинетическая индуктивность не магнитного происхождения, возникающая из коллективного движения электронов.

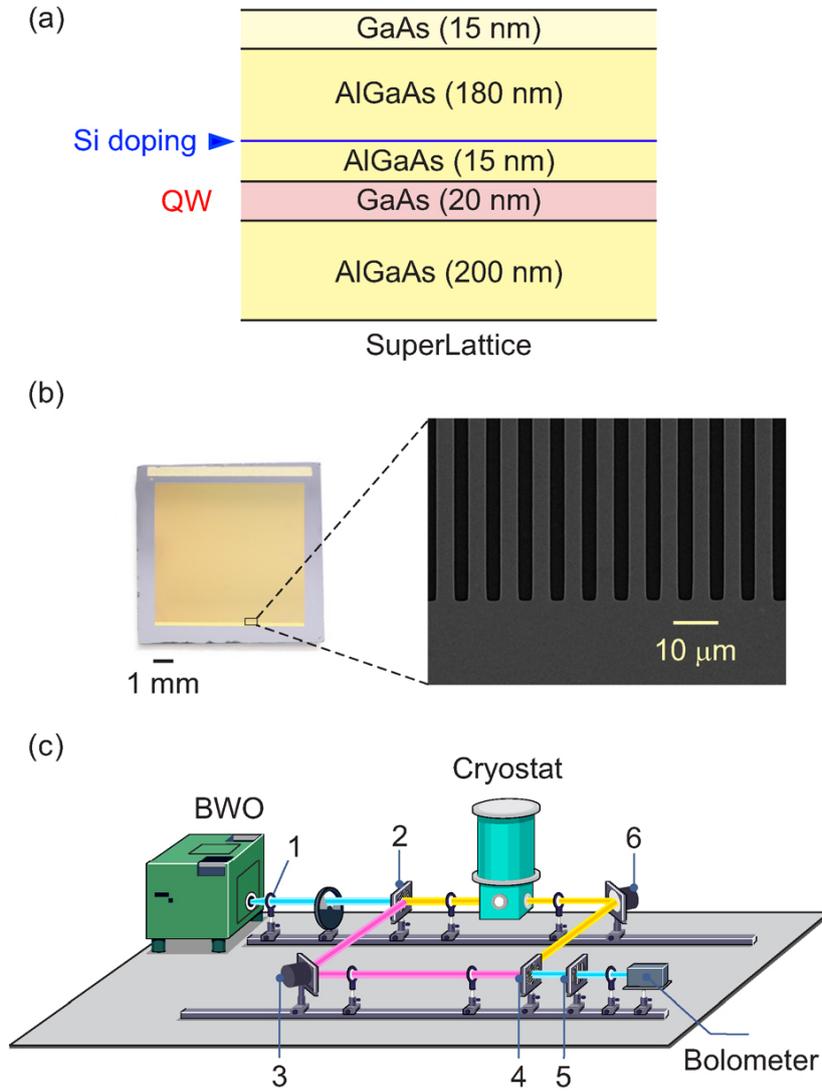


Рис. 4: (a) Поперечное сечение пластины AlGaAs/GaAs, иллюстрирующее слои и их толщину. (b) Фотография фазовращателя с увеличенным изображением решетчатого затвора, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. (c) Схема экспериментальной установки. Из работы [41].

Далее применим концепцию волнового сопротивления. При условии, что  $d \ll \lambda$ , можно пренебречь влиянием диэлектрического слоя подложки на электромагнитную волну. Тогда импеданс волны, распространяющейся в свободном пространстве, определяется импедансами пленки ДЭС  $Z_{2DES}$  и вакуума  $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ , соединенными параллельно. Таким образом, используя теорию линий передачи (англ. Transmission line theory), мы получаем амплитуду пропускания

$$t = \frac{Z_{2DES}}{Z_{2DES} + Z_0/2}. \quad (4)$$

В чистом пределе  $\omega\tau \gg 1$  импеданс ДЭС имеет чисто плазмонный вид  $Z_{2DES} \approx i\omega L_K$ . Таким образом, аргумент пропускания дает сдвиг фазы электромагнитного излучения, проходящего через устройство

$$\Delta\phi = \arctan \frac{Z_0}{2\omega L_K}, \quad L_K = \frac{m^*}{n_s e^2}. \quad (5)$$

Основное преимущество устройств на основе 2D плазмоники заключается в том, что их физические свойства могут перестраиваться в широких пределах путем изменения плотности электронов  $n_s$  в ДЭС [42-45], как видно из уравнения (5).

На рисунке 5(a) построен сдвиг фазы  $\Delta\phi$  как функция напряжения на затворе  $U_g$ , измеренного для набора частот излучения  $f = 65, 109$  и  $139$  ГГц при температуре образца  $T = 5$  К. Соответствующие зависимости пропускания от  $U_g$  показаны на рисунке 5(b). В проведенных экспериментах самая плоская характеристика пропускания достигается около частоты плазменного края  $f_{pl} = 135$  ГГц с соответствующими вносимыми потерями  $-2.2$  дБ. Верхняя ось на рисунке 5(a) обозначает плотность ДЭС под затвором, измеренную на отдельной структуре с холловским мостиком, изготовленной на подложке из той же пластины, что и исследуемые образцы. Процедура калибровки, использованная при измерениях, основана на транспортном методе. Вставка на рисунке 5(a) демонстрирует максимальный сдвиг фазы  $\Delta\phi_{\max}$ , полученный в диапазоне частот падающего электромагнитного излучения, с максимальным сдвигом фазы  $41^\circ$  при частоте 65 ГГц.

Теоретическое предсказание, рассчитанное из уравнения (5), показано пунктирной линией на вставке рисунка 5(a), демонстрируя разумное качественное согласие с экспериментальными данными. Сплошная красная линия на вставке указывает на результат более точной теоретической модели, учитывающей диссипацию в ДЭС и конечную толщину полупроводниковой подложки. Очевидно, что предложенная модель волнового импеданса подтверждается измерениями. Поэтому ее можно использовать для разработки более сложных активных плазмонных устройств.

Во второй части исследования проводились на трёх структурах с высококачественной двумерной электронной системой на основе  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As / GaAs / Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  квантовой ямы. Одна из структур содержала пять квантовых ям,

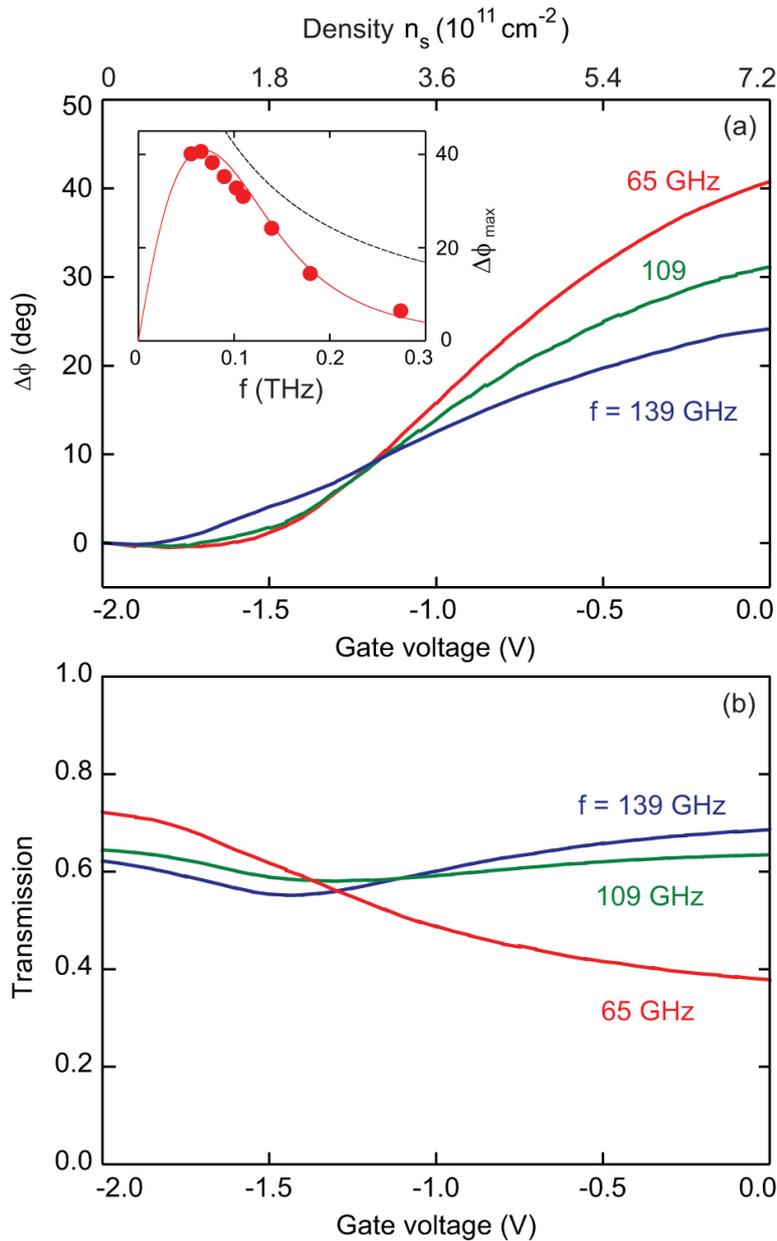


Рис. 5: (а) Сдвиг фазы, прошедшей через устройство электромагнитной волны, от напряжения на затворе (нижняя ось) и от соответствующей плотности электронов под “пальцами” затвора (верхняя ось). На вставке показан максимально достижимый фазовый сдвиг  $\Delta\phi_{\text{max}}$  в зависимости от частоты падающего терагерцового излучения. Пунктирная линия - теоретическое предсказание согласно уравнению (5). Сплошная красная линия является результатом теоретической модели, которая учитывает диссипацию в ДЭС и конечную толщину полупроводниковой подложки. (б) Зависимость пропускания структуры от напряжения на затворе. Все измерения проводились при  $T = 5$  К. Из работы [41].

каждая с шириной 20 нм. Первая квантовая яма располагалась на расстоянии 60 нм от поверхности кристалла. Общая концентрация электронов  $n_s = 7.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , толщина подложки  $d = 625 \text{ мкм}$ . Измерения проводились на интерферометре Маха-Цендера при базовой температуре образца  $T = 5 \text{ К}$ .

Для образца с электронной концентрацией  $7.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  наблюдается значительное отклонение от формулы (5). Для того, чтобы разобраться с этим неожиданным наблюдением, была детально измерена зависимость сдвига фазы от частоты вблизи резонанса Фабри-Перо с частотой 134 ГГц (рис. 6). Видно, что на самой частоте резонанса Фабри-Перо сдвиг фаз составляет  $80^\circ$  в полном соответствии с формулой (5). Однако, максимум изменения фазы,  $\Delta\phi = 105^\circ$ , сдвинут в сторону частоты 150 ГГц, когда  $qd = 2.25\pi$ . Действительно, анализ матрицы передачи показывает, что если импеданс ДЭС,  $Z_{2D}$ , является чисто реактивным и может изменяться от нуля до бесконечности, то максимум  $\Delta\phi$  достигается на частотах  $\omega = (N + 1/4)\omega_d = (N + 1/4)c\pi/\sqrt{\varepsilon}d$  ( $N = 1, 2, \dots$ ).

Если  $L_K$  изменяется от нуля до бесконечности, то максимальный сдвиг фаз, который можно достичь в системе ДЭС на подложке составляет:

$$\Delta\phi_m = \text{arctg} \sqrt{\varepsilon} + \text{arctg} \left( \frac{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} + \sqrt{\varepsilon}}{2} \right). \quad (6)$$

Заметим, что если  $\varepsilon \rightarrow \infty$ , то сдвиг фазы, вносимый двумерной электронной системой на подложке составляет  $\Delta\phi_m \rightarrow 180^\circ$ .

В реальных экспериментальных условиях развернуть  $L_K = m^*/n_s e^2$  от нуля до бесконечности не получается. Максимальный сдвиг фазы, который удалось достичь на структуре с концентрацией в ДЭС  $n_s = 7.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ , находящейся на GaAs ( $\varepsilon = 12.8$ ) подложке с толщиной  $d = 625 \text{ мкм}$ , равен  $105^\circ$ .

**В пятой главе** исследована серия мембран GaAs с сетчатой ДЭС на поверхности. Используемые образцы были изготовлены из промышленных гетероструктур  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Квантовая яма содержит ДЭС с плотностью  $n_s = 9.3 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью электронов  $\mu = 10^5 \text{ см}^2/\text{В}$  с при  $T = 5 \text{ К}$ . На полупроводниковой пластине литографически была изготовлена решетка по-

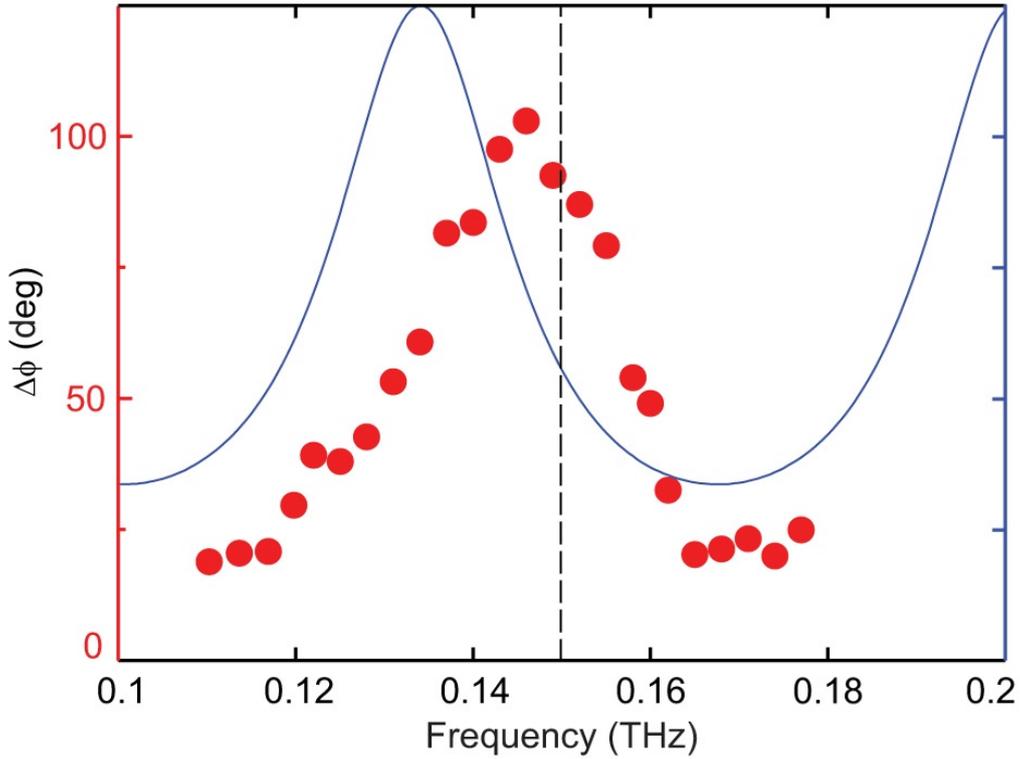


Рис. 6: Сдвиг фазы,  $\Delta\phi$ , вносимый наличием ДЭС как функция частоты электромагнитного излучения. Измерения проводились на образце с  $n_s = 7.9 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$  (красные кружки). Пунктирной линией показана частота, для которой  $\omega = (2 + 1/4)\omega_d$ . Синей линией показано пропускание подложки без ДЭС. Правая ось, к которой относится синяя линия безразмерна и имеет масштаб от 0 до 1.

лосок ДЭС (рис. 7). Измерения проводились на интерферометре Маха-Цендера при базовой температуре образца  $T = 5 \text{ К}$ .

В первой части на 5 образцах изготавливается сетчатая меза с периодом  $p = 25 \text{ мкм}$  и длиной полосок ДЭС  $9 \text{ мм}$ , где ширина полосок  $t$  изменяется от  $23 \text{ мкм}$  до  $7 \text{ мкм}$  между образцами. Толщина мембраны для различных образцов варьировалась от  $20$  до  $45 \text{ мкм}$ . В настоящих исследованиях падающее излучение поляризовано вдоль полос ДЭС.

Аналогично случаю непрерывной ДЭС, плазменный край наблюдается, когда падающее излучение линейно поляризовано вдоль полос ДЭС. Чтобы понять, как геометрия элемента метаповерхности влияет на плазменный край, была исследована серия образцов с фиксированным периодом  $p = 25 \text{ мкм}$  и различными значениями ширины полос  $t$ . Таким образом, всего было протестировано пять

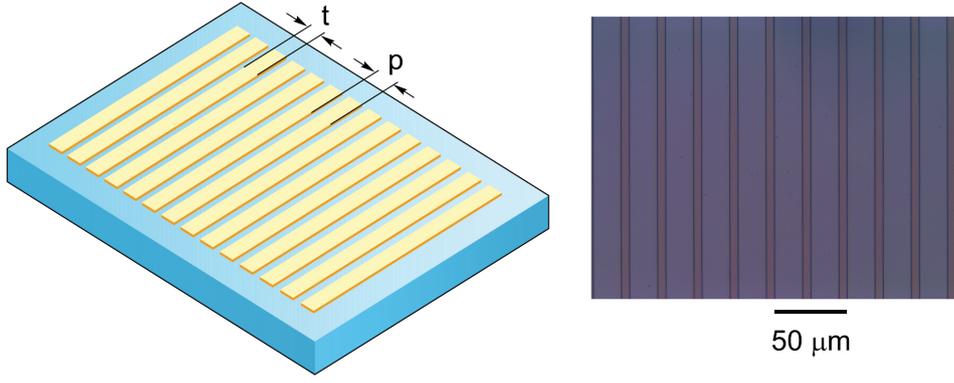


Рис. 7: Схема (слева) и фотография (справа) структуры плазмонной метаповерхности. На диаграмме показаны подложка GaAs (синяя) и ДЭС (желтая) с шириной полосы  $t = 20$  и периодом  $p = 25$  мкм. Из работы [46].

образцов с  $t = 23, 20, 15, 10$  и  $7$  мкм. На рисунке 8 показан результат измерений пропускания для образцов с шириной полос ДЭС  $7$  мкм (красные кружки) и  $15$  мкм (синие кружки) при одинаковой толщине мембраны  $20$  мкм. Сравнивая данные для двух образцов, важно отметить, что увеличение ширины полос  $t$  от  $7$  до  $15$  мкм приводит к значительному увеличению частоты плазменного края со  $115$  до  $170$  ГГц, как показано стрелками на рисунке 8. Фактически, кажется, что значение  $f_p$  увеличивается примерно как  $\sqrt{t}$ . Таким образом, частоту плазменного резонанса метаповерхности можно найти, если мы подставим эффективную 2D-плотность  $n_s^* = n_s(t/p)$  в уравнение (1):

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{n_s e^2}{m^* \varepsilon_0 (\varepsilon - 1)} \frac{t}{p d}}, \quad d, p \ll \lambda. \quad (7)$$

Действительно, на рисунке 9 представлена зависимость частоты плазменного резонанса умноженного на корень из толщины мембраны,  $f_p \sqrt{d}$ , от квадратного корня фактора заполнения  $(t/p)^{0.5}$ . Экспериментальные данные показывают хорошее соответствие линейной тенденции (сплошная линия), описываемой теоретическим предсказанием уравнения (7). Следует отметить, что введенное понятие плазмонной метаповерхности действительно при условии, что  $\lambda \gg p$ . В этом режиме мы можем использовать усреднение по периоду решетки, концептуально заменяя неравномерную среду однородной метаповерхностью, характеризуемой частотой плазменного края из уравнения (7).

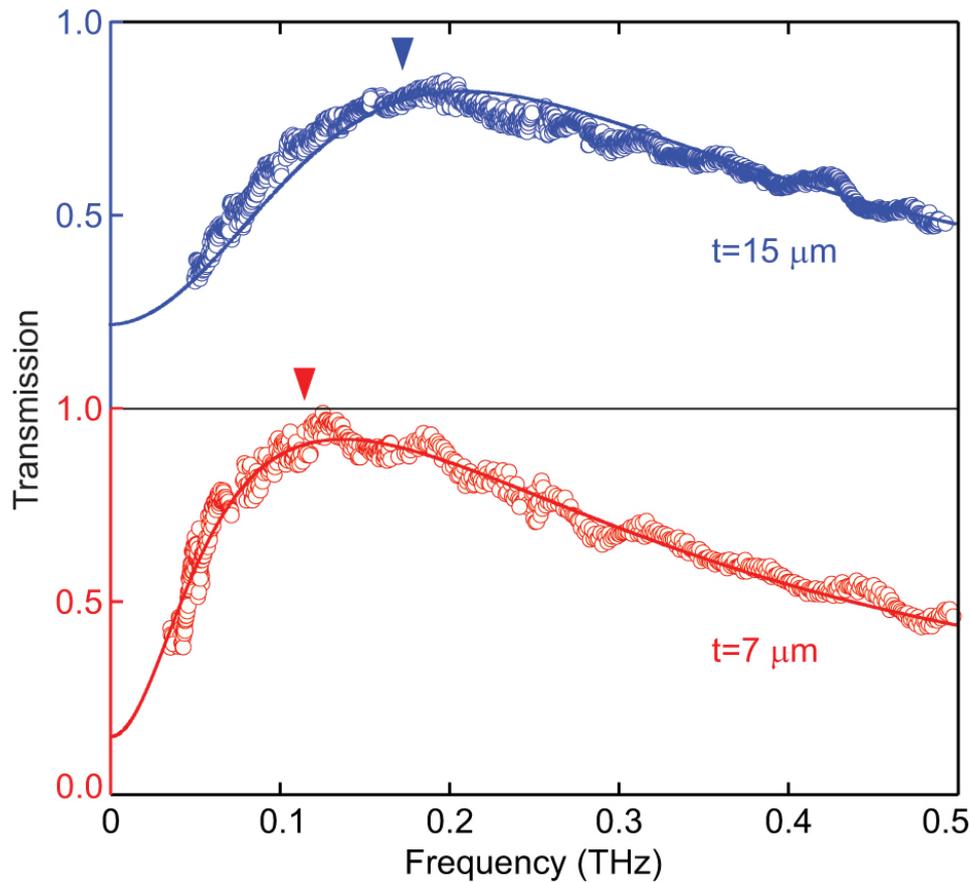


Рис. 8: Спектры пропускания ДЭС в форме 1D-решетки с шириной полосы  $t = 7$  мкм (красные круги) и  $t = 15$  мкм (синие круги). Образцы имеют одинаковую толщину мембраны - 20 мкм и период плазмонной метаповерхности  $p = 25$  мкм. Падающее излучение поляризовано вдоль полосок. Стрелками отмечены частоты плазменного резонанса. Из работы [46].

Во второй части для восьми образцов период метаповерхности так же составляет  $p = 25$  мкм, а ширина полоски варьируется от  $w = 13$  мкм до 24 мкм. Толщина мембраны для различных образцов варьировалась от 35 до 45 мкм. В данной части падающее излучение поляризовано поперек полос ДЭС.

Рисунок 10 показывает спектр пропускания для периода метаповерхности  $p = 25$  мкм и ширины полоски  $w = 21.5$  мкм. На частоте  $f_p = 0.2$  ТГц наблюдается явный плазменный резонанс, наложенный на функцию Фабри-Перо диэлектрической мембраны без ДЭС.

Оказалось, что этот резонанс плазмона смещается к более высокой частоте при уменьшении ширины полоски, что соответствует зависимости, предсказанной

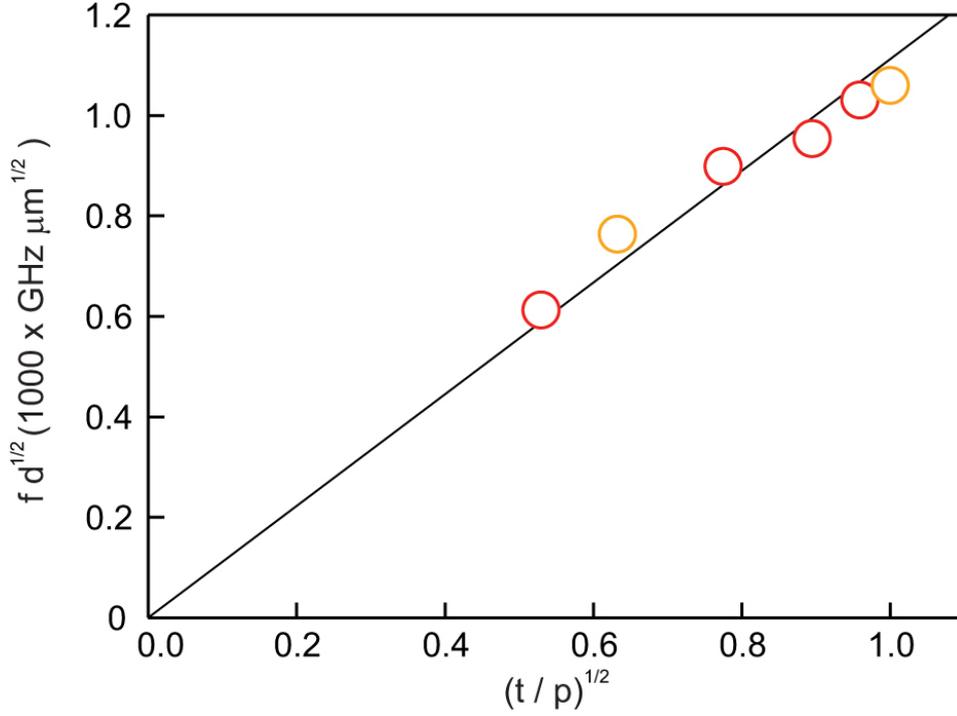


Рис. 9: Нормализованная частота плазменного края  $f_p \sqrt{d}$ , построенная как функция квадратного корня из фактора заполнения  $(t/p)^{1/2}$ . Кружками обозначены экспериментальные значения, полученные из спектров пропускания. Сплошная линия представляет теоретический прогноз, основанный на уравнении (7). Из работы [46].

обычным дисперсионным уравнением для 2D плазмона

$$\omega_p(k_x, k_y) = \sqrt{\frac{2\pi n_s e^2 k}{m^* \epsilon}}, \quad \omega_p \tau \gg 1. \quad (8)$$

Однако экспериментально полученные значения частоты плазмона значительно отличаются от тех, которые предсказаны обычной дисперсией, описываемой уравнением (8). Действительно, на рисунке 11 показана зависимость частоты плазмона от обратной ширины полосок ДЭС  $1/w$ . Сплошная синяя линия представляет теоретическое предсказание в соответствии с уравнением (8). Удивительно, но есть значительное различие между теорией (8) и экспериментом, даже при больших зазорах между отдельными полосками. Обнаруженное существенное красное смещение частоты плазмона вызвано кулоновским взаимодействием между колебаниями заряда в соседних полосках ДЭС [47-49].

Для лучшего понимания наблюдаемого физического явления была разработа-

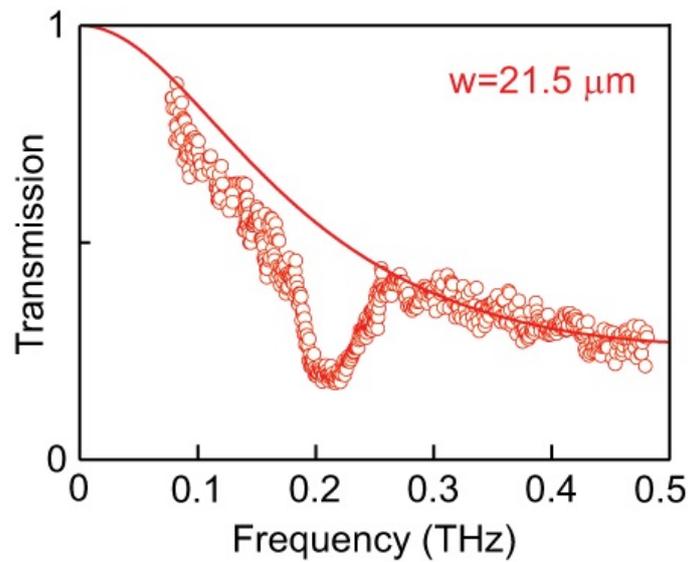


Рис. 10: Спектр пропускания для образца с шириной полосок ДЭС  $w = 21.5$  мкм. Сплошная красная линия представляет функцию Фабри-Перо для диэлектрической мембраны без ДЭС.

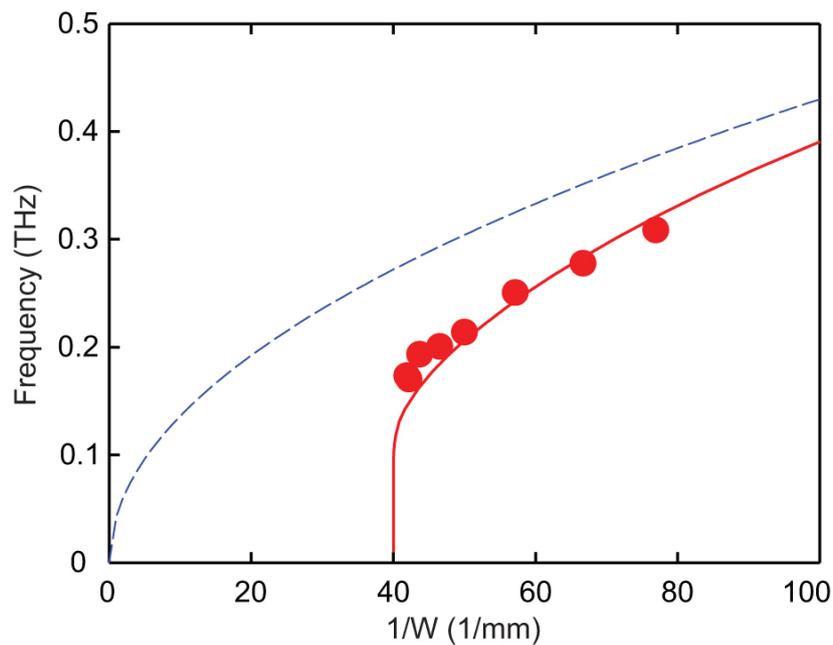


Рис. 11: Зависимость частоты резонанса плазмона от обратной величины ширины полосок ДЭС  $1/w$ . Период плазмонной метаповерхности поддерживался фиксированным  $p = 25$  мкм. Сплошная красная линия - это теория согласно (9), в то время как пунктирная синяя линия - двумерная плазмонная дисперсия согласно уравнению (8).

на качественная модель, учитывающая боковое экранирование соседних полосок с ДЭС. Эта модель приводит к следующему выражению для экранированной частоты:

$$\omega_s(q) = \sqrt{\frac{n_s e^2 q}{2m^* \varepsilon_0 \varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 + \ln \frac{2}{qh}}}, \quad (9)$$

где  $h = p - w$  - зазор между соседними полосками ДЭС.

Красная кривая на рисунке 11 представляет собой теоретическое предсказание в соответствии с уравнением (9). Наблюдается хорошее согласие между экспериментальными данными и теоретической моделью. Из вышесказанного следует, что при приближении  $w$  к  $p$  возникает новый экранированный плазменный режим. Логарифмическое экранирование между смежными полосками ДЭС доминирует в физических свойствах этого режима.

## Заключение

**В заключении** сформулированы основные результаты проделанной работы:

1. Установлено, что в тонких мембранах GaAs с ДЭС на основе гетероструктуры AlGaAs/GaAs под воздействием падающей электромагнитной волны возникает новый тип волн - поперечные электромагнитные плазменные волны. Проведено детальное экспериментальное исследование физических характеристик этого типа плазменных возбуждений.
2. Выявлено, что поперечные плазменные волны можно характеризовать частотой плазменного резонанса. Экспериментально изучена зависимость частоты плазменного резонанса от концентрации двумерных электронов и толщины полупроводниковой подложки.
3. Создан прототип и разработаны физические основы плазмонного полупроводникового фазовращателя. Успешная работа устройства продемонстрирована в широком частотном диапазоне от 50 до 270 ГГц. При этом фазовый

сдвиг прибора можно плавно перестраивать напряжением на затворе в диапазоне от  $0^\circ$  до  $41^\circ$  (на частоте 65 ГГц).

4. Исследовано влияние характеристик полупроводниковой подложки GaAs на величину фазового сдвига электромагнитного излучения, проходящего через подложку с двумерной электронной системой. Обнаружено, что плотность электронов в ДЭС оказывает влияние на измеряемый фазовый сдвиг. Разработана физическая модель, которая хорошо описывает полученные результаты. Установлено, что максимальный достижимый фазовый сдвиг в предложенной схеме составляет  $180^\circ$ . В эксперименте продемонстрирован фазовый сдвиг в  $105^\circ$ .
5. Продемонстрировано, что двумерная электронная система в виде периодических полос действует как плазменная метаповерхность. Экспериментально подтверждено, что разработанная метаповерхность проявляет анизотропный отклик. Когда вектор поляризации электромагнитного излучения направлен перпендикулярно полоскам, наблюдается возбуждение новой плазменной моды. Обнаружено, что к появлению этой плазменной моды приводит боковое экранирование при условии, что зазор между полосками сводится к нулю.

**Публикации автора по теме диссертации.** В основе диссертационной работы лежит 5 статей, опубликованных в зарубежных и российских научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

1. Astrakhantseva, A.S. Terahertz plasma edge engineering in semiconductor membranes with a two-dimensional electron layer / A.S. Astrakhantseva, A. Shuvaev, P.A. Gusikhin, A. Pimenov, I.V. Kukushkin, V.M. Muravev // Applied Physics Letters. – 2022. – Vol. 120, Iss. 3. – P. 31104.
2. Muravev, V.M. Tunable terahertz phase shifter based on GaAs semiconductor technology / V.M. Muravev, A. Shuvaev, A.S. Astrakhantseva, P.A. Gusikhin, I.V. Kukushkin, A. Pimenov // Applied Physics Letters. – 2022. – Vol. 121, Iss. 5. – P. 51101.

3. Shuvaev, A. Plasmonic metasurface created by a grating of two-dimensional electron strips on a substrate / A. Shuvaev, K.R. Dzhikirba, A.S. Astrakhantseva, P.A. Gusikhin, I.V. Kukushkin, V.M. Muravev // *Physical Review B*. – 2022. – Vol. 106, Iss. 16. – P. L161411.
4. Gromyko, D.A. Strong Local Field Enhancement of Raman Scattering Observed in Metal-Dielectric Gratings due to Vertical Fabry-Perot Modes of Surface Plasmon Polaritons / D.A. Gromyko, S.A. Dyakov, N.A. Gippius, T. Weiss, S.G. Tikhodeev, A.S. Astrakhantseva, Y.V. Fedotova, V.V. Solovyev, I.V. Kukushkin // *Physical Review Applied*. – 2022. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 24015.
5. Kukushkin, V.I. Stimulation of Inelastic Light Scattering in Plasmon Structures with Giant Raman Enhancement / V.I. Kukushkin, V.E. Kirpichev, E.N. Morozova, A.S. Astrakhantseva, V.V. Solov'ev, I.V. Kukushkin // *JETP Letters*. – 2022. – Vol. 116, Iss. 4. – P. 212–216.

## Список литературы

1. Wood, R. W. Remarkable Optical Properties of the Alkali Metals / R. W. Wood // *Phys. Rev.* — 1933. — Т. 44, вып. 5. — С. 353–360.
2. Zener, C. Remarkable Optical Properties of the Alkali Metals / C. Zener // *Nature*. — 1933. — Т. 132. — С. 968.
3. Ritchie, R. H. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films / R. H. Ritchie // *Phys. Rev.* — 1957. — Т. 106, вып. 5. — С. 874–881.
4. Ferrell, R. A. Predicted Radiation of Plasma Oscillations in Metal Films / R. A. Ferrell // *Phys. Rev.* — 1958. — Т. 111, вып. 5. — С. 1214–1222.
5. Stern, F. Polarizability of a Two-Dimensional Electron Gas / F. Stern // *Phys. Rev. Lett.* — 1967. — Т. 18, вып. 14. — С. 546–548.
6. Grimes, C. C. Observation of Two-Dimensional Plasmons and Electron-Ripplon Scattering in a Sheet of Electrons on Liquid Helium / C. C. Grimes, G. Adams // *Phys. Rev. Lett.* — 1976. — Т. 36, вып. 3. — С. 145–148.

7. Allen, S. J. Observation of the Two-Dimensional Plasmon in Silicon Inversion Layers / S. J. Allen, D. C. Tsui, R. A. Logan // Phys. Rev. Lett. — 1977. — Т. 38, вып. 17. — С. 980—983.
8. Theis, T. Generation of 2D plasmon resonances at multiple wave-vectors; A test of the dispersion relation / T. Theis, J. Kotthaus, P. Stiles // Surface Science. — 1978. — Т. 73. — С. 434—436
9. Fine structure of cyclotron resonance in a two-dimensional electron system / V. M. Muravev [и др.] // Phys. Rev. B. — 2016. — Т. 93, вып. 4. — С. 041110.
10. Косевич, Ю. А. Полное прохождение электромагнитных волн и однородный плазменный резонанс двумерного электронного газа в тонкой полупроводниковой пленке / Ю. А. Косевич // Письма в ЖЭТФ. — 1991. — Т. 53, вып. 3. — С. 143.
11. Волков, В. А. Радиационные плазмон-поляритоны в многослойных структурах с 2D электронным газом / В. А. Волков, В. Н. Павлов // Письма в ЖЭТФ. — 2014. — Т. 99, вып. 2. — С. 99.
12. Gusikhin, P. A. Superluminal electromagnetic two-dimensional plasma waves / P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin // Phys. Rev. B. — 2020. — Т. 102, вып. 12. — С. 121404.
13. Discovery of Two-Dimensional Electromagnetic Plasma Waves / A. Shuvaev [и др.] // Phys. Rev. Lett. — 2021. — Т. 126, вып. 13. — С. 136801.
14. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials / H. L. Seung [и др.] // Nature Mater. — 2012. — Т. 11. — С. 936—941
15. A high-speed programmable and scalable terahertz holographic metasurface based on tiled CMOS chips / S. Venkatesh [и др.] // Nat Electron. — 2020. — Т. 3. — С. 785—793.
16. A Review of THz Modulators with Dynamic Tunable Metasurfaces / L. Wang [и др.] // Nanomaterials. — 2019. — Т. 9, No 7.
17. A programmable metasurface with dynamic polarization, scattering and focusing control / H. Yang [и др.] // Scientific Reports. — 2016. — Т. 6.

18. Lim, K. C. Liquid crystal millimeter wave electronic phase shifter / K. C. Lim, J. D. Margerum, A. M. Lackner // Applied Physics Letters. — 1993. — Т. 62, No 10. — С. 1065–1067
19. Liquid crystal programmable metasurface for terahertz beam steering / J. Wu [и др.] // Applied Physics Letters. — 2020. — Т. 116, No 13. — С. 131104.
20. Reconfigurable Millimeter-Wave Components Based on Liquid Crystal Technology for Smart Applications / E. Polat [и др.] // Crystals. — 2020. — Т. 10, No 5.
21. Widely Tunable Terahertz Phase Modulation with Gate-Controlled Graphene Metasurfaces / Z. Miao [и др.] // Phys. Rev. X. — 2015. — Т. 5, вып. 4. — С. 041027.
22. Graphene based terahertz phase modulators / N. Kakenov [и др.] // 2D Materials. — 2018. — Т. 5, No 3. — С. 035018.
23. Graphene controlled Brewster angle device for ultra broadband terahertz modulation / Z. Chen [и др.] // Nature Communications. — 2018. — Т. 9, No 4909
24. Hybrid graphene metasurfaces for high-speed mid-infrared light modulation and single-pixel imaging / B. Zeng [и др.] // Light: Science and Applications. — 2018. — Т. 7, No 51.
25. Smith, D. R. Metamaterials and Negative Refractive Index / D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire // Science. — 2004. — Т. 305, No 5685. — С. 788–792.
26. Yu, N. Flat optics with designer metasurfaces / N. Yu, F. Capasso // Nature Materials. — 2014. — Т. 13. — С. 139–150.
27. Hsiao, H.-H. Fundamentals and Applications of Metasurfaces / H.-H. Hsiao, C. H. Chu, D. P. Tsai // Small Methods. — 2017. — Т. 1, No 4. — С. 1600064.
28. Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials / L. Ju [и др.] // Nature Nanotechnology. — 2011. — Т. 6. — С. 630–634.
29. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction / N. Yu [и др.] // Science. — 2011. — Т. 334, No 6054. — С. 333–337.

30. Out-of-Plane Reflection and Refraction of Light by Anisotropic Optical Antenna Metasurfaces with Phase Discontinuities / F. Aieta [и др.] // Nano Letters. — 2012. — Т. 12, No 3. — С. 1702—1706.
31. High-Efficiency Broadband Anomalous Reflection by Gradient Meta-Surfaces / S. Sun [и др.] // Nano Letters. — 2012. — Т. 12, No 12. — С. 6223—6229.
32. Gradient-index meta-surfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves / S. Sun [и др.] // Nature Materials. — 2012. — Т. 11. — С. 426—431.
33. Pors, A. Plasmonic metasurfaces for efficient phase control in reflection / A. Pors, S. I. Bozhevolnyi // Opt. Express. — 2013. — Т. 21, No 22. — С. 27438—27451.
34. Vertical split-ring resonator based anomalous beam steering with high extinction ratio / W.-L. Hsu [и др.] // Scientific Reports. — 2015. — Т. 5. — С. 11226.
35. Direct Optical Tuning of the Terahertz Plasmonic Response of InSb Subwavelength Gratings / L. Deng [и др.] // Advanced Optical Materials. — 2013. — Т. 1, No 2. — С. 128—132.
36. Dressel, M. Electrodynamics of Solids: Optical Properties of Electrons in Matter / M. Dressel, G. Gruner. — Cambridge University Press, 2002.
37. Terahertz plasma edge engineering in semiconductor membranes with a two-dimensional electron layer / A. S. Astrakhantseva [и др.] // Applied Physics Letters. — 2022. — Т. 120, No 3. — С. 031104.
38. High frequency conductivity of the high-mobility two-dimensional electron gas / P. J. Burke [и др.] // Applied Physics Letters. — 2000. — Т. 76, No 6. — С. 745—747.
39. Induced transparency by coupling of Tamm and defect states in tunable terahertz plasmonic crystals / G. C. Dyer [и др.] // Nature Photonics. — 2013. — Т. 7. — С. 925—930.
40. A tunable plasmonic resonator using kinetic 2D inductance and patch capacitance / V. M. Muravev [и др.] // Applied Physics Letters. — 2020. — Т. 117, No 15. — С. 151103.

41. Tunable terahertz phase shifter based on GaAs semiconductor technology / V. M. Muravev [и др.] // Applied Physics Letters. — 2022. — Т. 121, No 5. — С. 051101.
42. Terahertz photoconductivity and plasmon modes in double-quantum-well field-effect transistors / X. G. Peralta [и др.] // Applied Physics Letters. — 2002. — Т. 81, No 9. — С. 1627—1629
43. Resonant detection of subterahertz and terahertz radiation by plasma waves in submicron field-effect transistors / W. Кнап [и др.] // Applied Physics Letters. — 2002. — Т. 81, No 24. — С. 4637—4639
44. Single-quantum-well grating-gated terahertz plasmon detectors / E. A. Shaner [и др.] // Applied Physics Letters. — 2005. — Т. 87, No 19.
45. Plasmonic terahertz detection by a double-grating-gate field-effect transistor structure with an asymmetric unit cell / V. V. Попов [и др.] // Applied Physics Letters. — 2011. — Т. 99, No 24. — С. 243504.
46. Plasmonic metasurface created by a grating of two-dimensional electron strips on a substrate / A. Shuvaev [и др.] // Phys. Rev. B. — 2022. — Т. 106, вып. 16. — С. L161411.
47. Coulomb coupling in arrays of electron disks / C. Dahl [и др.] // Phys. Rev. B. — 1992. — Т. 46, вып. 23. — С. 15590—15593.
48. Plasma waves in a two-dimensional electron system laterally screened by a metallic gate / S. I. Gubarev [и др.] // Condensed Matter. — 2009. — Т. 90. — С. 539—543
49. Laterally screened two-dimensional plasma excitations in a disk-shaped two-dimensional electron system / A. M. Zarezin [и др.] // Phys. Rev. B. — 2023. — Т. 108, вып. 11. — С. 115419.