

На правах рукописи

**Гусихин Павел Артурович**

**Плазмон-поляритонные возбуждения в двумерной  
электронной системе**

Специальность 01.04.07 —  
«Физика конденсированного состояния»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Черноголовка — 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН

**Кукушкин Игорь Владимирович**

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

**Быков Алексей Александрович,**

доктор физико-математических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт физики  
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского  
отделения Российской академии наук,  
ведущий научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Защита состоится 14 ноября 2016 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 002.100.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук по адресу: 142432, Московская область, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики твёрдого тела Российской академии наук и на сайте диссертационного совета: <http://www.issp.ac.ru/main/dis-council.html>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г..

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.100.01  
доктор физико-математических наук



Зверев Владимир  
Николаевич

© Гусихин П. А., 2016

© ИФТТ РАН, 2016

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Исследование низкоразмерных электронных систем является одним из наиболее актуальных направлений физики твёрдого тела последних десятилетий. Особый интерес в физике низкоразмерных систем представляют коллективные зарядовые и спиновые возбуждения. Волны зарядовой плотности, плазмоны, в двумерных электронных системах обладают многими уникальными свойствами. В отличие от трёхмерного случая, плазменные возбуждения в двумерных системах имеют бесщелевой спектр [1]. Двумерные плазмоны представляют собой интересный объект для исследований, так как их дисперсия легко регулируется изменением электронной концентрации или приложением внешнего магнитного поля. Тем самым достигается возможность манипуляции распространением плазменных возбуждений в широких пределах. Во внешнем магнитном поле в ограниченных двумерных системах, кроме объёмных магнитоплазменных возбуждений, возникают также краевые магнитоплазмоны [2–4]. Эти возбуждения являются следствием существования краевых электронных состояний, играющих основную роль в механизме возникновения квантового эффекта Холла [5, 6].

Одним из широко распространённых методов исследования в физике твёрдого тела является изучение свойств системы при её взаимодействии с электромагнитным излучением. Собственные возбуждения системы могут гибридизироваться с излучением, образуя составные частицы, называемые поляритонами. Известны несколько типов поляритонов, в соответствии с тем, какие возбуждения участвуют в их образовании: фононные поляритоны [7–9], экситонные поляритоны [10–12], плазмонные поляритоны [13–15]. Основным объектом, в котором производится изучение экситонных поляритонов, являются микрорезонаторы на основе полупроводниковых гетероструктур, где реализуется сильное свето-экситонное взаимодействие. Впервые открытая и наиболее изученная разновидность плазмонных поляритонов — это поверхностные плазмонные поляритоны, распространяющиеся вдоль границы раздела проводника и диэлектрика. Их исследование привело к открытию ряда новых физических явлений, получивших практическое применение, таких как плазменная оптика [16] и лазеры на поверхностных плазмонах [17]. Поляритоны также возникают и при гибридизации света с плазмонами в двумерной электронной системе. Поскольку двумерные плазмоны обладают гибко регулируемыми свойствами, то и свойства соответствующих плазмонных поляритонов контролируются в широких пределах путём изменения электронной концентрации или приложения магнитного поля.

Значительный интерес к изучению плазменных возбуждений в последнее время объясняется перспективами возможного использования их в высокочастотных (терагерцевых) электронных приборах. Одним из наиболее перспективных направлений в данной области является фотоника - манипуляция фотонами как носителями информации. Подобная манипуляция возможна с помощью фотонных кристаллов - искусственных периодических структур [18]. Однако чисто фотонные технологии неспособны заменить все электронные компоненты. Миниатюризация базовых элементов фотонных систем ограничена длиной световой волны. Кроме того, фотонные компоненты не являются перестраиваемыми. Плазмонные технологии могут служить связующим звеном между фотонными и электронными компонентами, поскольку плазмонные поляритоны сочетают в себе колебания носителей заряда в электронной системе с колебаниями электромагнитного поля [19].

Оптимальными структурами для изучения плазменных возбуждений в двумерных электронных системах являются высококачественные GaAs/AlGaAs гетероструктуры ввиду высокой подвижности носителей заряда в них. Более того, в таких структурах могут наблюдаться качественно новые явления. В частности, улучшение качества структур позволило наблюдать поляритонные эффекты в плазменных возбуждениях в двумерных электронных системах [20]. Высокая подвижность электронов обеспечивает большую проводимость двумерной системы, которая, в свою очередь определяет скорость Максвелловской релаксации носителей заряда (двумерная проводимость имеет размерность скорости в Гауссовой системе единиц) [21]. При достаточно большой проводимости простой электростатический подход предсказывает движение электронов со скоростью, превышающей скорость света, что невозможно. В результате, характер Максвелловской релаксации в такой системе меняется [22], что также может привести к возникновению новых физических эффектов [23, 24].

**Целью** данной работы является экспериментальное исследование плазмонных возбуждений, существующих в двумерных электронных системах с высокой проводимостью, гибридизации плазмонных возбуждений с фотонными резонаторными модами, а также резонаторных мод двумерных фотонных кристаллов в субтерагерцевом частотном диапазоне.

1. Был исследован микроволновый отклик двумерной электронной системы в режиме большой проводимости ( $2\pi\sigma_{2D} > c$ ). В отклике обнаружены резонансы, соответствующие возникновению нового типа плазменных возбуждений. Их отличает то, что ширина обнаруженных плазменных мод существенно меньше ширины обычных плазменных возбуждений ( $\Delta\omega = 1/\tau$ , где  $\tau$  — плазменное время релаксации). То есть, можно говорить об аномально слабом затухании обнаруженных возбуждений, которое не опреде-

ляется напрямую временем рассеяния электронов. Показано, что ключевую роль в существовании слабозатухающих плазменных возбуждений играет величина проводимости ДЭС. Слабозатухающие моды возбуждаются только если выполняется соотношение:  $2\pi\sigma_{2D} > c$ .

2. Были проведены исследования обнаруженных возбуждений в магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной электронной системы. Магнитополевая зависимость частоты слабозатухающих плазменных возбуждений имеет две ветви. При этом, высокочастотная ветвь имеет зигзагообразную форму, характерную для плазменных возбуждений в условиях сильного влияния поляритонных эффектов. Была исследована зависимость их частоты от концентрации электронов в двумерной электронной системе. Обнаруженная корневая зависимость вместе с магнитополевой зависимостью показывают, что открытые колебания имеют плазменную природу.
3. Были изучены зависимости частоты колебаний от геометрических параметров системы: латеральных размеров двумерной электронной системы и металлического затвора и расстояния между двумерной электронной системой и затвором. Было показано, что ключевую роль в возбуждении слабозатухающих плазменных колебаний играет наличие металлического затвора над двумерной электронной системой.
4. Было обнаружено, что высокочастотная ветвь магнитодисперсии слабозатухающего плазменного возбуждения может гибридизироваться с фотонной модой внешнего резонатора, в качестве которого использовалась прямоугольная металлическая пластинка. Было определено влияние параметров двумерной электронной системы, геометрических размеров резонатора и диэлектрического окружения на магнитодисперсию результирующего поляритонного возбуждения.
5. На базе изученных эффектов была разработана интегральная технология производства на одном полупроводниковом чипе субтерагерцового фотонного кристалла с плазмонным детектором. Плазмонный детектор изготавливался в резонаторе двумерного фотонного кристалла. Обнаружено, что при облучении структуры субтерагерцовым излучением детектор демонстрирует резонансный отклик с добротностью  $Q = 70-200$ . Установлено, что резонансный отклик соответствует возбуждению резонаторных мод в дефекте фотонного кристалла. Проведены измерения зависимости частоты дефектной моды от параметров фотонного кристалла: толщины, периода и размера дефектов. Проведено численное моделирование распределения электромагнитного поля в резонаторе фотонного кристалла с плазмонным

детектором. Установлено, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

**Научная и практическая значимость.** В диссертационной работе был исследован ранее слабо изученный режим, в котором проводимость двумерной электронной системы превышает скорость света. В этом режиме были впервые обнаружены возникающие в двумерной электронной системе плазменные возбуждения, имеющие аномально слабое затухание. Данное новое физическое явление имеет перспективу практического применения. Поскольку затухание таких возбуждений не определяется транспортным временем рассеяния электронов, на их основе могут быть созданы плазмонные устройства, работающие при комнатной температуре. Также в диссертационной работе проведено исследование резонаторных мод в фотонных кристаллах в субтерагерцовом частотном диапазоне при помощи помещённых в фотонный кристалл плазмонных детекторов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены при выступлениях на конференциях:

1. В. М. Муравьёв, П. А. Гусихин, И. В. Кукушкин, «Новая высокодобротная плазменная мода в двумерной электронной системе с близким металлическим слоем», приглашённый доклад на XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, сентябрь 2013.
2. П. А. Гусихин, В. М. Муравьёв, И. В. Кукушкин, «Обнаружение нового слабо затухающего плазменного колебания в двумерной электронной системе», приглашённый доклад на 6-й Всероссийской конференции «Микро-, нанотехнологии и их применения» им. Ю. В. Дубровского, Черноголовка, ноябрь 2014.
3. П. А. Гусихин, В. М. Муравьёв, И. В. Андреев, «Новое слабозатухающее релятивистское плазменное возбуждение в двумерной электронной системе», И. В. Кукушкин, приглашённый доклад на 6-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения», Москва, май 2015.
4. V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, and I. V. Kukushkin, «Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system», invited talk on The 4th Russia–Japan–USA Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies «RJUS TeraTech-2015», Chernogolovka, June 2015.
5. I. V. Andreev, P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, and I. V. Kukushkin, «Novel Relativistic Plasma Excitations In A Gated Two-dimensional Electron System»,

40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves «IRMMW-THz-2105», Hong Kong, China, August 2015.

6. В. М. Муравьев, П. А. Гусихин, И. В. Андреев, И. В. Кукушкин, «Обнаружение релятивистской плазменной моды в системе двумерных электронов с проводимостью превышающей скорость света», приглашённый доклад на XII Российской конференции по физике полупроводников, Звенигород, сентябрь 2015.

**Личный вклад** автора состоял в изготовлении экспериментальных образцов, проведении измерений, обработке и интерпретации результатов экспериментов, проведении численного моделирования.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в публикациях:

1. V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, G. E. Tsydynzhapov, A. A. Fortunatov, and I. V. Kukushkin, «Spectroscopy of terahertz radiation using high-Q photonic crystal microcavities», Phys. Rev. B 86, 235144 (2012).
2. V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, and I. V. Kukushkin, «Ultrastrong coupling of high-frequency two-dimensional cyclotron plasma mode with a cavity photon», Phys. Rev. B 87, 045307 (2013).
3. П. А. Гусихин, В. М. Муравьев, И. В. Кукушкин, «Обнаружение аномально слабо затухающих плазменных волн в двумерной электронной системе», Письма в ЖЭТФ 100, 732 (2014).
4. V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, and I. V. Kukushkin, «Novel Relativistic Plasma Excitations in a Gated Two-Dimensional Electron System», Phys. Rev. Lett. 114, 106805 (2015).
5. P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, I. V. Kukushkin, «Dispersion of volume relativistic magnetoplasma excitation in a gated two-dimensional electron system», JETP Lett. 102, 859 (2015).

**Объём и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 120 страниц с 80 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 115 наименований.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы

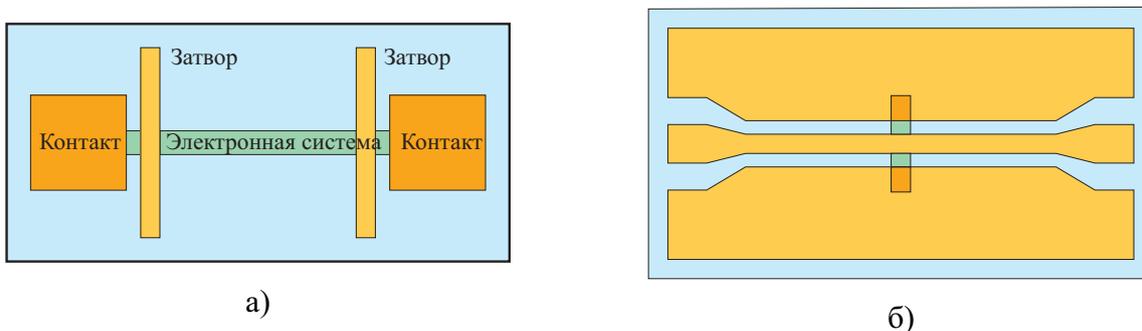


Рис. 1: а) Схематическое изображение образца, использовавшегося в методике спаренных резонаторов б) Схематическое изображение образца, использовавшегося в копланарной методике.

по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

В первой главе приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, описывается явление плазменных возбуждений в электронных системах различной размерности, обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований данного явления. Рассматриваются поляритонные эффекты для плазменных возбуждений. Кроме того, даётся обзор исследований фотонных кристаллов и запрещённых зон в их спектре.

Вторая глава представляет собой краткое описание технологии изготовления экспериментальных образцов и методики измерений.

Первый раздел посвящён технологии изготовления образцов. В нём приводятся основные параметры использовавшихся GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As гетероструктур. Все гетероструктуры, кроме двух случаев, содержали квантовые ямы, в одном случае гетероструктура содержала гетеропереход, ещё в одной гетероструктуре было пять квантовых ям. В гетероструктурах варьировалась глубина залегания квантовых ям или гетероперехода от 50 до 440 нм, электронная плотность менялась в пределах от  $1.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  до  $44 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , а подвижность при температуре кипения гелия  $T = 4.2 \text{ К}$  составляла от  $0.125 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$  до  $6 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Все гетероструктуры были односторонне  $\delta$ -легированы кремнием. Экспериментальные образцы (рисунок 1) изготавливались из гетероструктур в чистом помещении с классом чистоты ISO 5 в Институте физики твёрдого тела РАН. Изготовление образцов состояло из трёх основных этапов: жидкостное травление мез, нанесение и вжигание контактов к электронной системе, нанесение затворов и металлизации.

Во втором разделе приводятся экспериментальные методики исследования плазменных возбуждений в двумерной электронной системе. Все измерения проводились в гелиевом криостате. При этом образец находился внутри сверхпроводящего соленоида, который позволял создавать магнитное поле до 6 Тл.

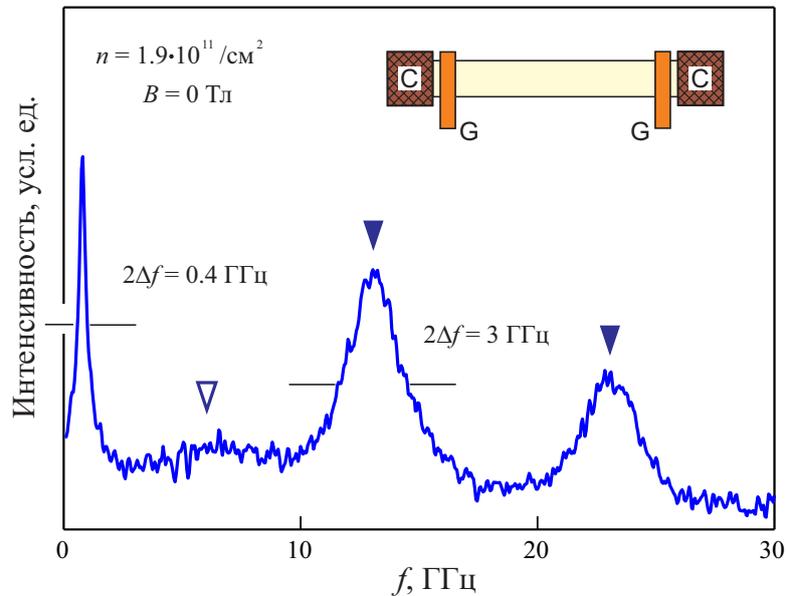


Рис. 2: Спектр поглощения полоски двумерной электронной системы. Закрашенными треугольниками показаны резонансы, соответствующие первой и второй гармоникам одномерного плазменного возбуждения вдоль полоски ДЭС. Контурным — экранированному плазменному возбуждению в подзатворной области. Из работы [25].

Измерения проводились при помощи нескольких основных методик. В методике спаренных резонаторов измерялось прохождение СВЧ-излучения через двумерную электронную систему между затворами. При развороте магнитного поля в сигнале пропускания наблюдались резонансы, соответствующие возбуждению плазменных колебаний. В копланарной методике двумерная электронная система помещалась в копланарный волновод, формирующийся на поверхности образца. При развороте магнитного поля в сигнале СВЧ-пропускания копланарного волновода наблюдались резонансы поглощения, соответствующие возбуждению плазменных колебаний. В оптической методике детектирования измерялось изменение сигнала люминесценции в некотором диапазоне длин волн при разогреве двумерной электронной системы. При этом разогрев системы является следствием резонансного поглощения СВЧ-излучения при возбуждении плазменных колебаний.

**Третья глава** посвящена исследованию принципиально новых слабозатухающих плазменных возбуждений в двумерной электронной системе. Эти возбуждения возникают в двумерной электронной системе с достаточно высокой проводимостью. При этом, в отличие от ранее известных плазменных возбуждений, условие  $\omega\tau > 1$  не является определяющим для их существования. Первый раздел посвящён обнаружению слабозатухающих плазменных колебаний. Исследовался спектр поглощения полоски двумерной электронной системы в СВЧ-диапазоне. На спектральной кривой можно видеть три пика, два из которых (показаны стрелками), на частотах  $f = 13$  ГГц и  $23.5$  ГГц соответствуют

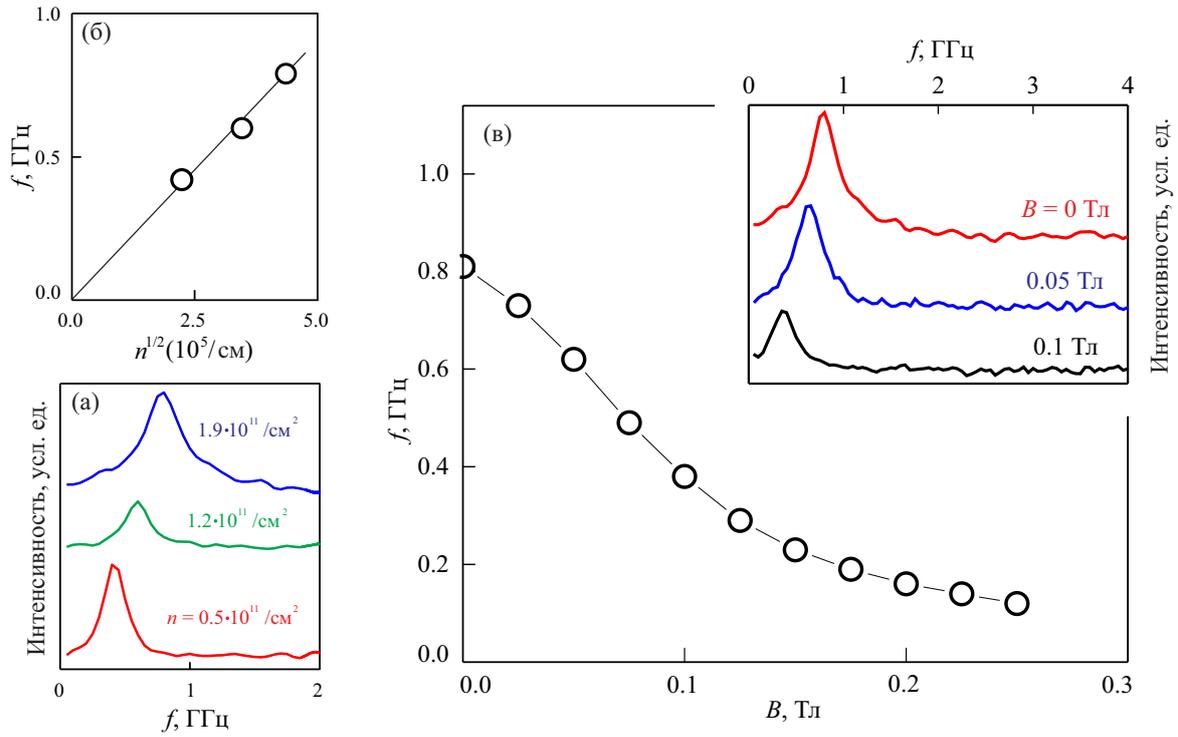


Рис. 3: а) Спектры поглощения двумерной электронной системы при различных значениях электронной концентрации:  $n_{2D} = 1.9 \text{ см}^{-2}$ ,  $n_{2D} = 1.2 \text{ см}^{-2}$ ,  $n_{2D} = 0.5 \text{ см}^{-2}$  в области низких частот микроволнового излучения. б) Зависимость частоты возбуждения от квадратного корня концентрации. в) Зависимость частоты наблюдаемого резонанса от величины приложенного перпендикулярного магнитного поля для структуры с электронной плотностью  $n_s = 1.9 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . На врезке приведены примеры спектров поглощения для значений магнитного поля 0 Тл, 0.05 Тл и 0.1 Тл. Из работы [25].

возбуждению продольной плазменной моды вдоль длины полоски [26]. Третий пик на частоте  $f = 0.8 \text{ ГГц}$  соответствует новому возбуждению. Во-первых, его частота намного меньше, чем частота любого из возможных плазменных возбуждений в исследуемой геометрии ДЭС. Во-вторых, обнаруженный резонанс имеет существенно меньшую ширину по частоте  $2\Delta f = 0.4 \text{ ГГц}$ , чем ширина резонанса  $2\Delta f = 3 \text{ ГГц}$ , отвечающего одномерному плазмону. Для подтверждения плазменной природы резонанса были сняты спектры поглощения при различных значениях двумерной электронной плотности (рисунок 3а) и б)) и магнитного поля, приложенного перпендикулярно электронной системе (рисунок 3в)). Полученные зависимости частоты резонанса от электронной плотности и магнитного поля доказывают, что обнаруженный резонанс имеет плазменную природу. Второй раздел посвящён изучению влияния параметров двумерной электронной системы на слабозатухающие плазменные возбуждения. Прежде всего была построена зависимость частоты возбуждения от расстояния  $h$  между двумерной электронной системой и затвором (см. рисунок 4а)). Показано, что, в отличие от ранее известных экранированных плазменных возбуждений, частота слабозату-

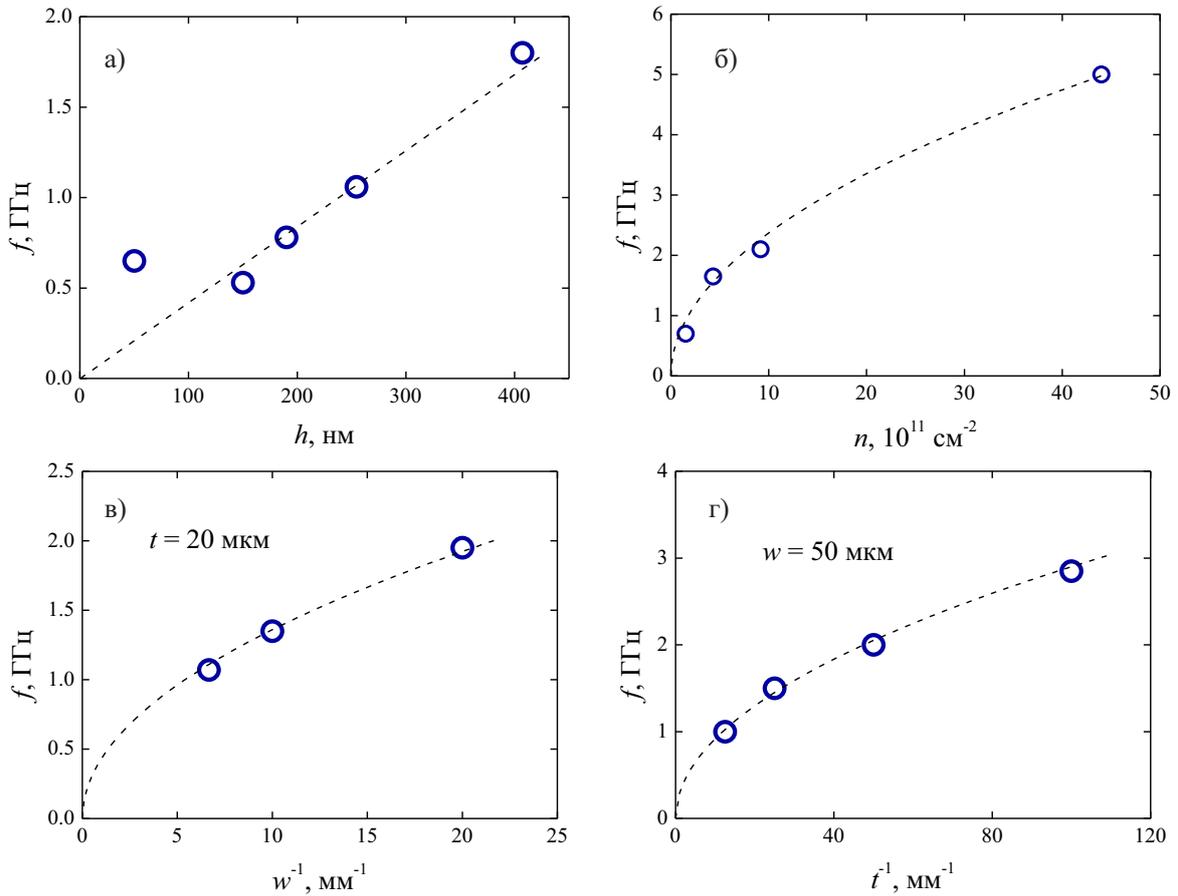


Рис. 4: а) Зависимость частоты слабозатухающего плазменного возбуждения в нулевом магнитном поле от глубины залегания квантовой ямы  $h$ . Пунктирной линией показана линейная зависимость. б) Зависимость частоты слабозатухающего плазменного возбуждения в нулевом магнитном поле от обратной величины ширины затвора  $t$ . Пунктирной линией показана подгонка корневой зависимостью. в) Зависимость частоты слабозатухающего плазменного возбуждения в нулевом магнитном поле от обратной величины ширины полоски ДЭС  $w$ . Пунктирной линией показана подгонка корневой зависимостью. г) Магнитополевые зависимости частоты слабозатухающего плазменного возбуждения для образцов с разной электронной плотностью в ДЭС  $n$ . Геометрические размеры одинаковы у всех образцов.

хающего возбуждения линейно зависит от  $h$ , а при малых величинах  $h$  частота выходит на постоянное значение. Следующими изученными параметрами были размеры подзатворной области: ширина затвора  $t$  и ширина мезы  $w$ . На рисунках 4в) и г) показаны зависимости частоты от обратных величин этих размеров, подогнанные корневой зависимостью. Отсюда следует, что частота слабозатухающих плазменных возбуждений подчиняется зависимости  $f \sim (w \times t)^{-0.5}$ , что также отличает их от ранее изученных возбуждений. Для подтверждения плазменной природы изучаемых резонансов были проведены исследования на структурах с разной электронной плотностью, от  $n_{2D} = 1.2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$  до  $n_{2D} = 44 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . На рисунке 4б) показана зависимость частоты слабозатухающего возбуждения от электронной плотности и подгонка корневой зависимо-

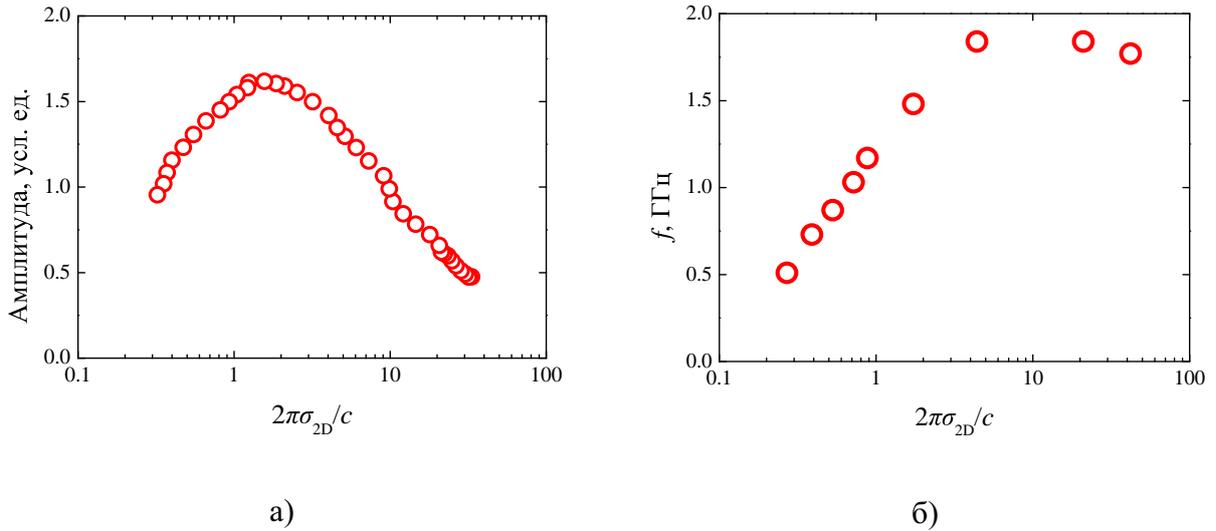


Рис. 5: а) Зависимость амплитуды резонансов в пропускании СВЧ-излучения при развороте магнитного поля на частоте 0.7 ГГц от величины параметра  $2\pi\sigma_{2D}/c$ . Для удобства по оси абсцисс выбран логарифмический масштаб. б) Зависимость положения резонансов в пропускании СВЧ-излучения при разных значениях температуры  $T$  и параметра  $2\pi\sigma_{2D}/c$ .

стью. Такая зависимость указывает на то, что возбуждение является следствием межэлектронного взаимодействия, то есть, является плазменным возбуждением. В третьем разделе рассматриваются условия существования слабозатухающих плазменных возбуждений. Основным утверждением данного раздела является то, что для их существования необходимо выполнение условия  $2\pi\sigma_{2D} \gtrsim 1$ . Для того, чтобы проверить данное утверждение, были проведены измерения при различной температуре. При изменении температуры проводимость двумерной электронной системы меняется в широких пределах. Также было проверено, что изменение температуры практически не влияет на электронную плотность  $n_{2D}$ . Снятые при различных температурах магнитополевые зависимости пропускания двумерной электронной системы показывают, что максимум амплитуды резонансов находится при  $2\pi\sigma_{2D} \approx 1$ . Построенные магнитополевые зависимости частоты возбуждений показывают, что при  $2\pi\sigma_{2D} > 1$  проводимость практически не влияет на частоту возбуждения в нулевом магнитном поле, а при дальнейшем уменьшении проводимости частота возбуждения резко падает вместе с амплитудой резонансов (рисунок 5). Вторым важным условием существования слабозатухающих плазменных возбуждений является наличие затвора над двумерной электронной системой. Кроме того, показывается, что двумерная электронная система за пределами подзатворной области не оказывает практически никакого влияния на положение, ширину и амплитуду резонансов.

В четвёртой главе описывается высокочастотная мода слабозатухающих плазменных возбуждений, а также её взаимодействие с фотонной модой внеш-

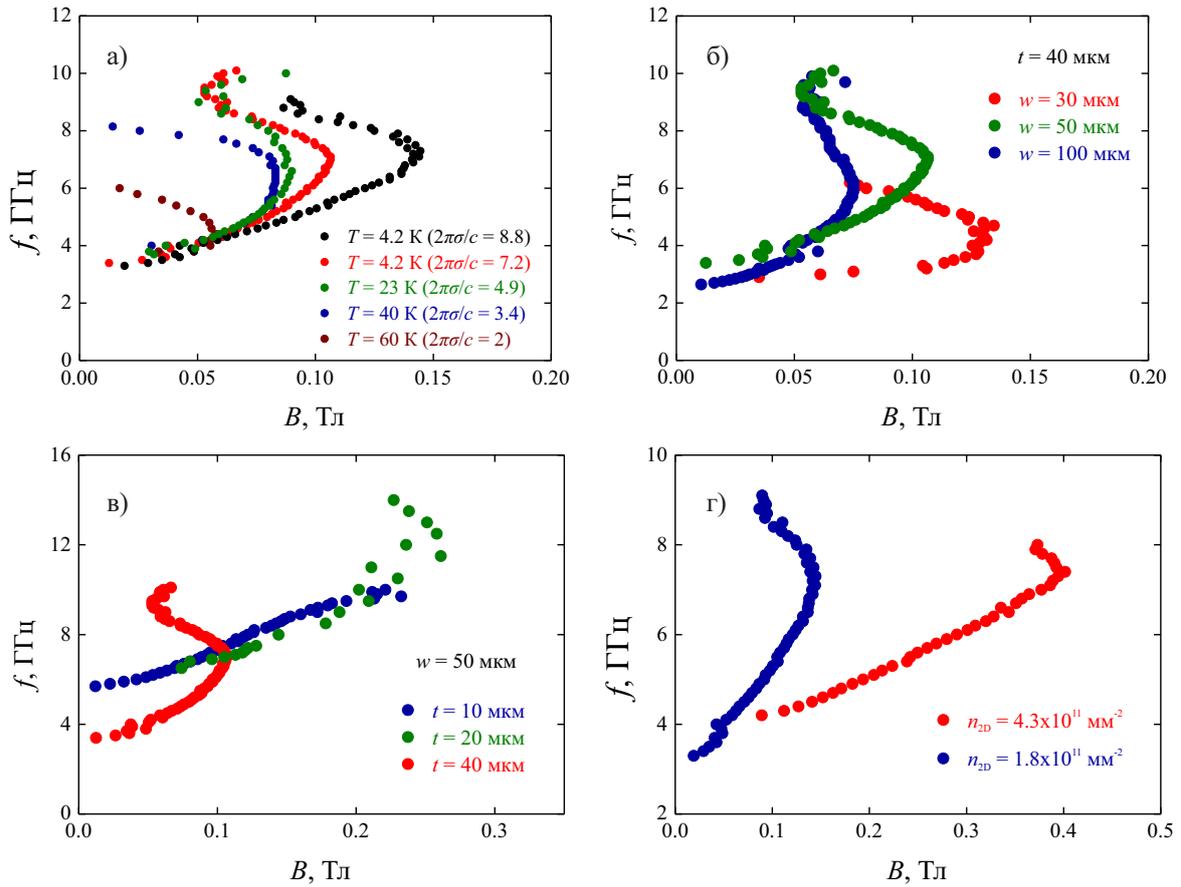


Рис. 6: а) Магнитополевые зависимости частоты верхней ветви слабозатухающих плазменных возбуждений при различных температурах. б) Магнитополевые зависимости частоты высокочастотной ветви слабозатухающих плазменных возбуждений для образцов с различной шириной ДЭС  $w$ . Ширина затвора во всех образцах была равной  $t = 50$  мкм. в) Магнитополевые зависимости частоты высокочастотной ветви слабозатухающих плазменных возбуждений для образцов с различной шириной затвора  $t$ . Ширина ДЭС во всех образцах была равной  $w = 50$  мкм. г) Магнитополевые зависимости частоты высокочастотной ветви слабозатухающих плазменных возбуждений для образцов с различной концентрацией носителей заряда  $n_{2D}$ . Геометрические параметры в образцах были одинаковыми.

него резонатора. Первый раздел посвящён изучению свойств высокочастотной моды слабозатухающих возбуждений. Прежде всего, было изучено влияние проводимости двумерной электронной системы на магнитополевые зависимости частоты возбуждения (рисунок 6а)). В отличие от низкочастотной моды, влияние повышения температуры в данном случае существенно более сильное. Магнитодисперсионная зависимость видоизменяется уже при небольшом изменении температуры. А при температуре  $T = 90$  К ( $2\pi\sigma_{2D} \approx 1$ ) мода перестаёт наблюдаться. Также были проведены измерения на образцах с разной электронной плотностью  $n_{2D} = 1.8 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и  $n_{2D} = 4.3 \times 10^{11}$  см<sup>-2</sup>. Результирующие магнитодисперсионные зависимости показаны на рисунке 6г). Магнитополевая зависимость частоты моды испытывает значительные изменения при изменении

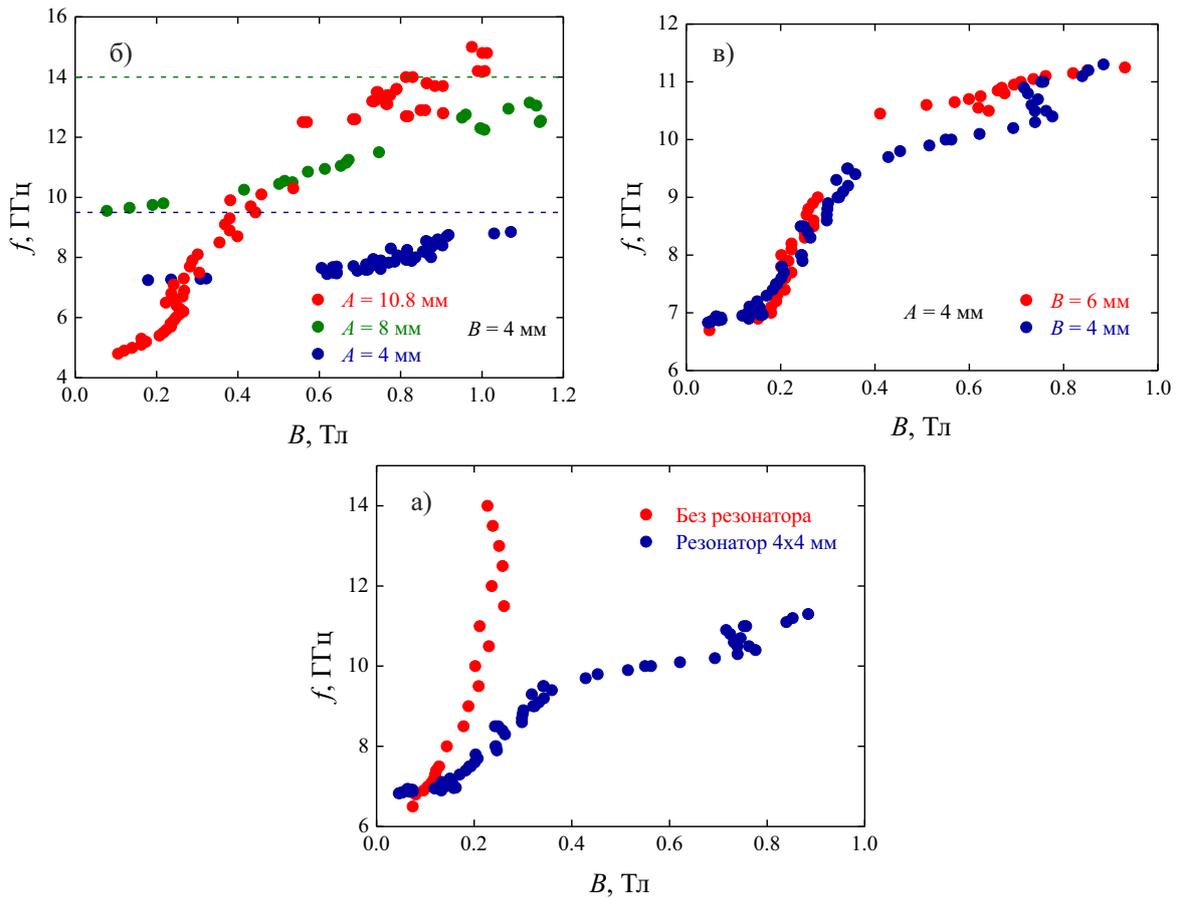


Рис. 7: а) Сравнение магнитодисперсионных зависимостей верхней ветви слабозатухающего плазменного возбуждения в присутствии резонатора размером  $4 \times 4 \text{ мм}^2$  и в его отсутствие. б) Сравнение магнитодисперсионных зависимостей поляритонного возбуждения, полученных при использовании резонаторов размером  $A \times B = 4 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $8 \times 4 \text{ мм}^2$  и  $10.8 \times 4 \text{ мм}^2$ . в) Сравнение магнитодисперсионных зависимостей поляритонного возбуждения, полученных при использовании резонаторов размером  $A \times B = 4 \times 4 \text{ мм}^2$  и  $4 \times 6 \text{ мм}^2$ .

электронной плотности в ДЭС. При увеличении концентрации наклон зависимости становится меньше, то есть мода становится более фотоподобной. Далее было исследовано влияние геометрических размеров подзатворной области: ширины затвора  $t$  и ширины мезы  $w$ . Соответствующие магнитодисперсионные кривые показаны на рисунках (б) и в). По графикам видно, что, во-первых, частота моды в нулевом магнитном поле зависит от ширины затвора  $t$  так же, как и для низкочастотной моды, корневым образом:  $f \sim t^{-1/2}$ . Во-вторых, частота моды в нулевом магнитном поле практически не зависит от ширины мезы  $w$ . Кроме того, в отличие от низкочастотной моды, наклон магнитополевой зависимости частоты моды сильно изменяется с изменением геометрических размеров. Во втором разделе проводится исследование взаимодействия высокочастотной моды слабозатухающего возбуждения с фотонной модой внешнего резонатора.

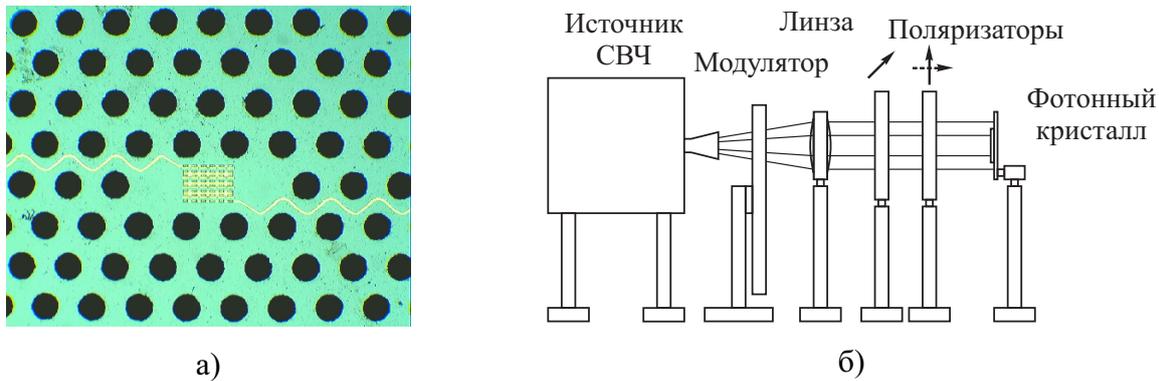


Рис. 8: а) Микрофотография фотонного кристалла, изготовленного из GaAs, со сформированным в нём резонатором и плазмонным детектором. б) Квазиоптическая схема для измерения отклика детектора, помещённого в резонатор фотонного кристалла, при облучении в субтерагерцовом диапазоне.

В качестве резонатора использовалась прямоугольная медная пластинка, на которую уже крепился образец. В экспериментах использовались пластинки с различными размерами:  $A \times B = 4 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $8 \times 4 \text{ мм}^2$ ,  $10.8 \times 4 \text{ мм}^2$  и  $4 \times 6 \text{ мм}^2$ . На рисунке 7а) приведено сравнение магнитопольных зависимостей частоты возбуждения при наличии металлического резонатора и в его отсутствие. А на рисунках 7б) и в) — магнитопольные зависимости частоты возбуждения при использовании резонаторов с различными размерами. По данным графикам видно, что плазменная мода действительно гибридизируется с фотонной модой резонатора. Магнитодисперсионная зависимость возбуждения сильно видоизменяется при наличии резонатора, и при изменении его продольного размера  $A$ . Изменение же поперечного размера практически не влияет на поведение моды.

**Пятая глава** посвящена исследованию резонаторных мод в фотонных кристаллах в субтерагерцовом частотном диапазоне с помощью плазмонного детектора, работающего при комнатной температуре. В эксперименте использовались два типа фотонных кристаллов. Первый тип кристаллов представлял собой прямоугольную пластинку GaAs с треугольной решёткой отверстий, изготовленных с помощью анизотропного реактивного ионного травления (рисунок 8а)). В центре фотонного кристалла находился резонатор, представляющий собой ряд из трёх пропущенных отверстий. В центре резонатора создавался плазмонный детектор субтерагерцового излучения [27]. В экспериментах измерялся спектр фотонного кристалла в субтерагерцовом диапазоне. Для проведения измерений собиралась оптическая схема, показанная на рисунке 8б). В качестве источников излучения использовалась серия ламп обратной волны (ЛОВ), покрывающих частотный диапазон от 0.1 до 0.4 ТГц, при этом излучаемая мощность в данном частотном диапазоне варьировалась от 0.1 до 10 мВт. Для калибровки частотных характеристик ЛОВ использовался пирометр, фотоотклик которого практически

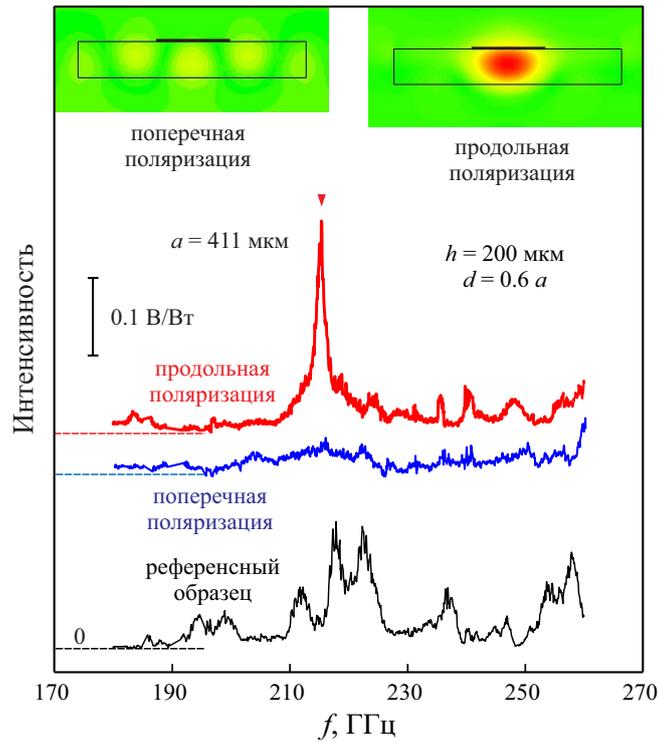


Рис. 9: Сравнение фотоотклика плазмонного детектора, помещённого в L3 резонатор в фотонном кристалле с периодом  $a = 411$  мкм в двух поляризациях, и без фотонного кристалла. Сверху приведены графики распределения интенсивности электромагнитного поля в срезе образца в двух взаимно перпендикулярных поляризациях.

не зависит от частоты. Модулированное с помощью оптико-механического модулятора на частоте  $f = 23$  Гц излучение коллимировалось в параллельный пучок с помощью линзы, изготовленной из полиметилпентена (TPX), с фокусным расстоянием  $F = 120$  мм. Затем излучение проходило через два поляризатора. При этом второй поляризатор устанавливался под углом  $\pm 45^\circ$ , что позволяло изучать фотоотклик на излучение в двух взаимно перпендикулярных поляризациях. Пучок падал на заднюю поверхность (противоположную от детектора) образца перпендикулярно ей. Образец ориентировался так, чтобы возможные поляризации падающего излучения совпадали с направлениями осей симметрии фотонного кристалла с резонатором. Измерение модулированного фотонапряжения проводилось с помощью синхронного усилителя SR-830D.

В спектре фотонного кристалла был обнаружен узкий резонанс, соответствующий возбуждению резонаторной моды (рисунок 9). Спектры были сняты для фотонных кристаллов с разным периодом (рисунок 10). Также было проведено численное моделирование для определения частоты резонаторной моды. На врезке рисунка 10 приведены экспериментальная и теоретическая зависимости частоты резонанса от обратной величины периода  $a$  фотонного кристалла, между которыми наблюдается хорошее согласие. Этим подтверждается, что наблюдаемый резонанс соответствует резонаторной моде фотонного кристалла.

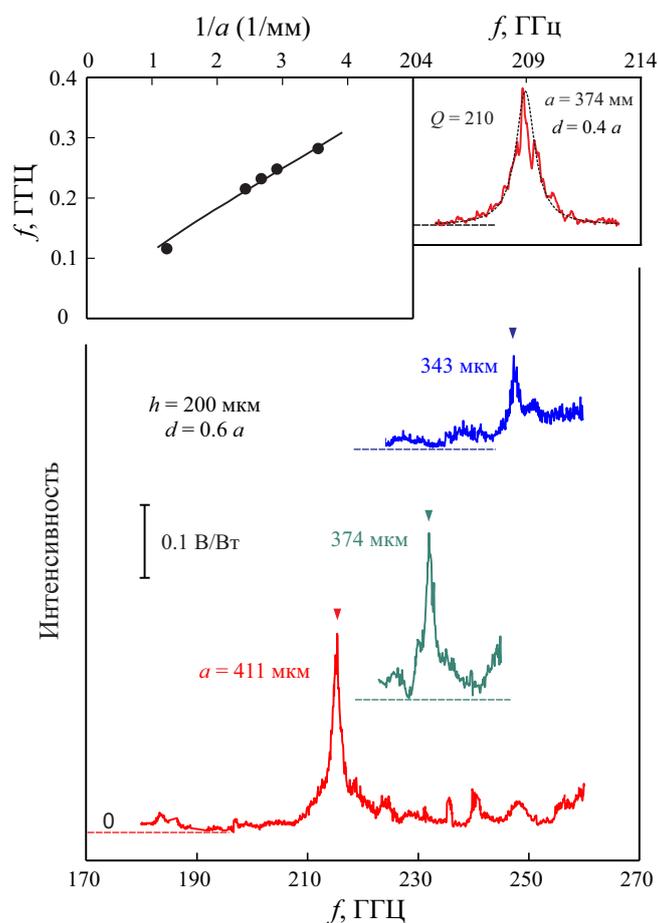


Рис. 10: Сравнение фотоотклика плазмонных детекторов, помещённых в L3 резонатор в фотонных кристаллах с периодами  $a = 343$  мкм,  $a = 374$  мкм и  $a = 411$  мкм. На врезке сверху слева показана зависимость частоты  $f$  резонаторной моды в L3 резонаторе фотонного кристалла от обратной величины его периода  $a$ . На рисунке представлены результаты экспериментальных измерений и численного моделирования. На врезке сверху справа показан пример аппроксимации резонансной кривой фотоотклика Лоренцевским резонансом для определения положения резонанса.

Второй тип образцов был изготовлен из ВЧ-ламината Arlon AD1000 толщиной  $h = 500$  мкм. Образцы представляли собой прямоугольную пластину размерами  $25 \times 20$  мм<sup>2</sup> с треугольной решёткой просверленных отверстий. В центре кристалла находился резонатор, представляющий собой семь отсутствующих отверстий, расположенных правильным шестиугольником (H2 резонатор). В данном типе образцов плазмонный детектор изготавливался отдельно (его структура была такой же, как и на первом типе образцов) на кристалле GaAs размером  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup> и затем вставлялся в отверстие в центре резонатора (рисунок 11). На этих образцах были проведены аналогичные измерения спектров. На этих спектрах также были обнаружены резонансы, соответствующие резонаторной моде фотонного кристалла (рисунок 12). На врезке рисунка 12 приведена зависимость частоты резонанса от обратной величины периода  $a$  фотонного

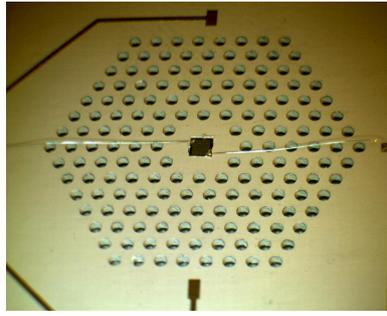


Рис. 11: Фотография фотонного кристалла, изготовленного из СВЧ-ламината Arlon AD-1000.

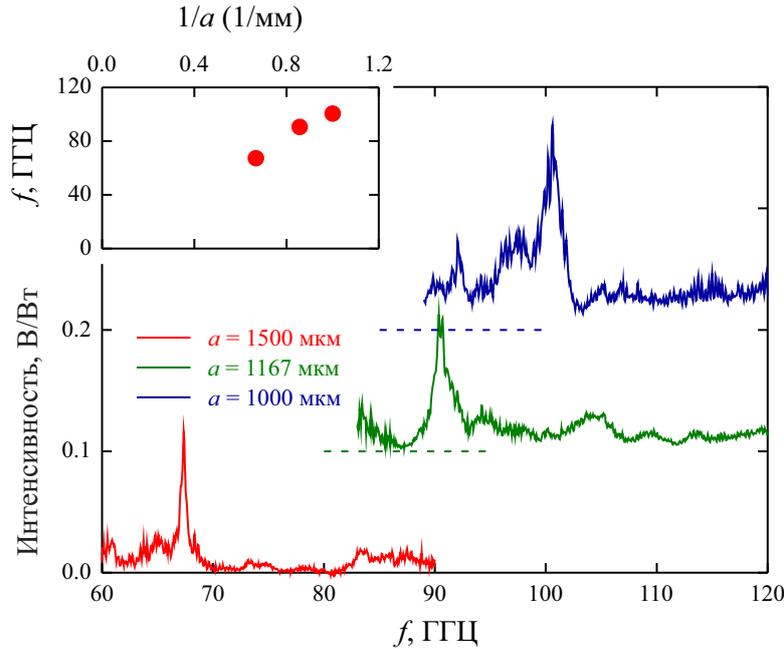


Рис. 12: Сравнение фотоотклика плазмонных детекторов, помещённых в L3 резонатор в фотонных кристаллах с периодами  $a = 1000$  мкм,  $a = 1166$  мкм  $a = 1500$  мкм. На врезке показана зависимость частоты  $f$  резонаторной моды в H2 резонаторе фотонного кристалла от обратной величины его периода  $a$ .

кристалла. На полученных спектрах, кроме резонанса, хорошо видна запрещённая зона фотонного кристалла. Кроме того, показано, что ширина запрещённой зоны зависит от диаметра  $d$  отверстий, образующих фотонный кристалл. На рисунке 13 приведены спектры фотонных кристаллов с  $d = 0.6a$  и  $d = 0.4a$ . Уменьшение диаметра отверстий приводит к уменьшению частоты резонанса с  $f = 231$  ГГц до  $f = 209$  ГГц и уменьшению ширины запрещённой зоны кристалла с  $\Delta f \approx 45$  ГГц до  $\Delta f \approx 17$  ГГц. Это хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями, запрещённая зона должна полностью исчезнуть при  $d = 0.17a$ .

В резонансе электромагнитное поле в основном сконцентрировано внутри диэлектрика фотонного кристалла, что приводит к эффекту, важному для взаимодействия между резонансной фотонной модой и плазмонным детектором.

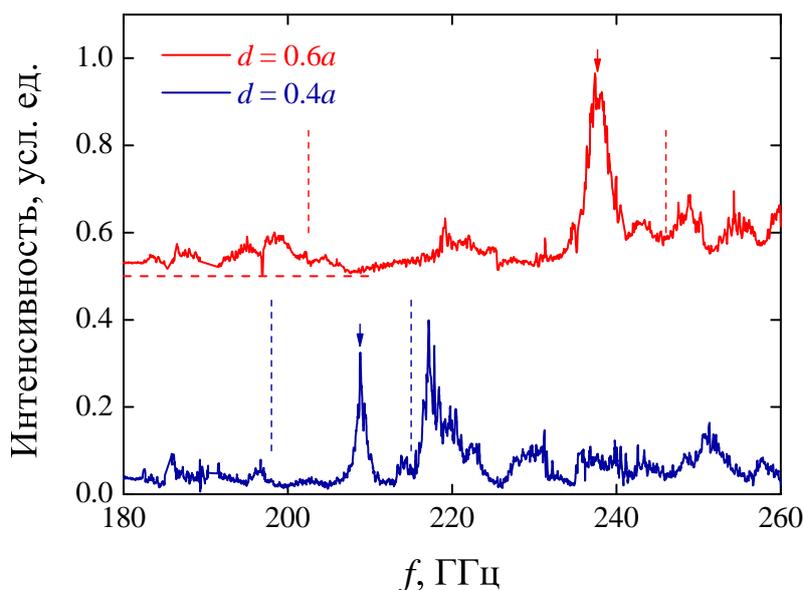


Рис. 13: Сравнение фотоотклика детекторов, помещённых в L3 резонатор в фотонных кристаллах с периодом  $a = 374$  мкм и различным диаметром отверстий  $d = 0.4a$  и  $d = 0.6a$ .

Детектор расположен на поверхности фотонного кристалла, а не в максимуме электромагнитного поля (рисунок 9), что существенно уменьшает его эффективность. Для того, чтобы проверить наличие этого эффекта, необходимо поместить детектор в толщу диэлектрика. Такая конфигурация была достигнута следующим способом. На фотонный кристалл с детектором сверху приклеивался второй такой же фотонный кристалл, при этом детектор оказывался в центре диэлектрика. На рисунке 14 представлены графики зависимости фотоотклика детектора, расположенного на поверхности кристалла и между двумя кристаллами. Амплитуда резонанса существенно возрастает при помещении кристалла в толщу диэлектрика. Кроме того, наблюдается уменьшение частоты резонанса с 233 ГГц до 217 ГГц, вызванное увеличением толщины фотонного кристалла, что хорошо согласуется с численным моделированием.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Был исследован микроволновый отклик двумерной электронной системы в режиме большой проводимости ( $2\pi\sigma_{2D} > c$ ). В отклике обнаружены резонансы, соответствующие возникновению нового типа плазменных возбуждений. Их отличает то, что ширина обнаруженных плазменных мод существенно меньше ширины обычных плазменных возбуждений ( $\Delta\omega = 1/\tau$ , где  $\tau$  — плазменное время релаксации). То есть, можно говорить об аномально слабом затухании обнаруженных возбуждений, которое не опреде-

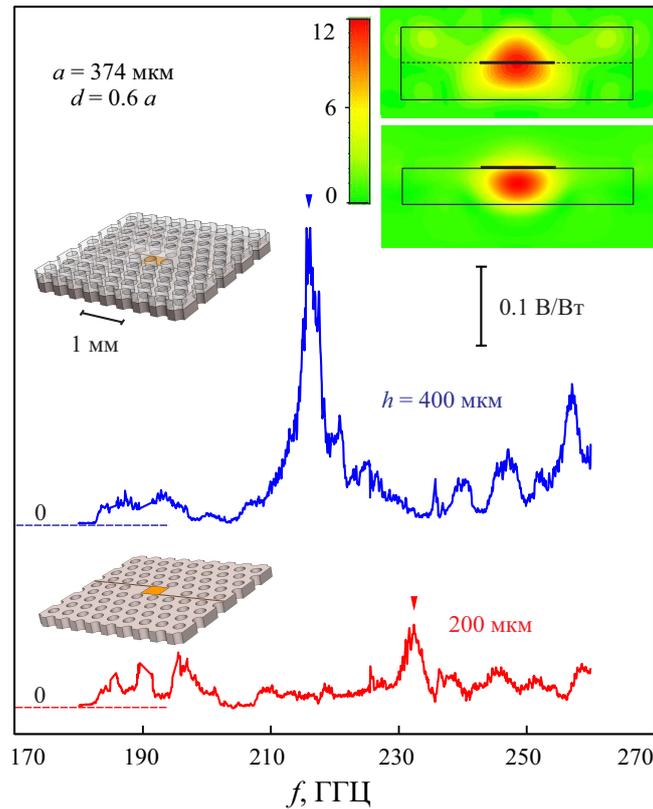


Рис. 14: Сравнение фотоотклика детекторов, помещённых на поверхности фотонного кристалла (период  $a = 374$  мкм) толщиной  $h = 200$  мкм и в толще кристалла  $h = 400$  мкм. На врезке показаны распределения плотности энергии электромагнитного поля внутри L3 резонатора в фотонном кристалле обычной и удвоенной толщины.

ляется напрямую временем рассеяния электронов. Показано, что ключевую роль в существовании слабозатухающих плазменных возбуждений играет величина проводимости ДЭС. Слабозатухающие моды возбуждаются только если выполняется соотношение:  $2\pi\sigma_{2D} > c$ .

2. Были проведены исследования обнаруженных возбуждений в магнитном поле, перпендикулярном плоскости двумерной электронной системы. Магнитополевая зависимость частоты слабозатухающих плазменных возбуждений имеет две ветви. При этом, высокочастотная ветвь имеет зигзагообразную форму, характерную для плазменных возбуждений в условиях сильного влияния поляритонных эффектов. Была исследована зависимость их частоты от концентрации электронов в двумерной электронной системе. Обнаруженная корневая зависимость вместе с магнитополевой зависимостью показывают, что открытые колебания имеют плазменную природу.
3. Были изучены зависимости частоты колебаний от геометрических параметров системы: латеральных размеров двумерной электронной системы и металлического затвора и расстояния между двумерной электронной системой

и затвором. Было показано, что ключевую роль в возбуждении слабозатухающих плазменных колебаний играет наличие металлического затвора над двумерной электронной системой.

4. Было обнаружено, что высокочастотная ветвь магнитодисперсии слабозатухающего плазменного возбуждения может гибридизироваться с фотонной модой внешнего резонатора, в качестве которого использовалась прямоугольная металлическая пластинка. Было определено влияние параметров двумерной электронной системы, геометрических размеров резонатора и диэлектрического окружения на магнитодисперсию результирующего поляритонного возбуждения.
5. На базе изученных эффектов была разработана интегральная технология производства на одном полупроводниковом чипе субтерагерцового фотонного кристалла с плазмонным детектором. Плазмонный детектор изготавливался в резонаторе двумерного фотонного кристалла. Обнаружено, что при облучении структуры субтерагерцовым излучением детектор демонстрирует резонансный отклик с добротностью  $Q = 70-200$ . Установлено, что резонансный отклик соответствует возбуждению резонаторных мод в дефекте фотонного кристалла. Проведены измерения зависимости частоты дефектной моды от параметров фотонного кристалла: толщины, периода и размера дефектов. Проведено численное моделирование распределения электромагнитного поля в резонаторе фотонного кристалла с плазмонным детектором. Установлено, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными.

## Публикации автора по теме диссертации

- [A1] Spectroscopy of terahertz radiation using high- $Q$  photonic crystal microcavities / V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, G. E. Tsydynzhapov et al. // *Phys. Rev. B.* — 2012. — Dec. — Vol. 86. — P. 235144. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.86.235144>.
- [A2] Ultrastrong coupling of high-frequency two-dimensional cyclotron plasma mode with a cavity photon / V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, I. V. Kukushkin // *Phys. Rev. B.* — 2013. — Jan. — Vol. 87. — P. 045307. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.87.045307>.
- [A3] *Гусихин П. А., Муравьев В. М., Кукушкин И. В.* Обнаружение аномально слабо затухающих плазменных волн в двумерной электронной системе // *Письма в ЖЭТФ.* — 2014. — Т. 100, № 9-10.
- [A4] Novel Relativistic Plasma Excitations in a Gated Two-Dimensional Electron System / V. M. Muravev, P. A. Gusikhin, I. V. Andreev, I. V. Kukushkin // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Mar. — Vol. 114. — P. 106805. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.114.106805>.
- [A5] *Gusikhin P. A., Muravev V. M., Kukushkin I. V.* Dispersion of volume relativistic magnetoplasma excitation in a gated two-dimensional electron system // *Письма в ЖЭТФ.* — 2015. — Т. 102, № 11-12. — С. 859.

## Список литературы

1. Stern F. Polarizability of a Two-Dimensional Electron Gas // *Phys. Rev. Lett.* — 1967. — Apr. — Vol. 18. — Pp. 546–548. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.18.546>.
2. Allen S. J., Störmer H. L., Hwang J. C. M. Dimensional resonance of the two-dimensional electron gas in selectively doped GaAs/AlGaAs heterostructures // *Phys. Rev. B.* — 1983. — Oct. — Vol. 28. — Pp. 4875–4877. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.28.4875>.
3. Mast D. B., Dahm A. J., Fetter A. L. Observation of Bulk and Edge Magnetoplasmons in a Two-Dimensional Electron Fluid // *Phys. Rev. Lett.* — 1985. — Apr. — Vol. 54. — Pp. 1706–1709. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.54.1706>.
4. Волков В. А., Михайлов С. А. Теория краевых магнитоплазмонов в двумерном электронном газе // *Письма в ЖЭТФ.* — 1985. — Т. 42. — С. 450–453.
5. von Klitzing K., Dorda G., Pepper M. New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant Based on Quantized Hall Resistance // *Phys. Rev. Lett.* — 1980. — Aug. — Vol. 45. — Pp. 494–497. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.45.494>.
6. Halperin B. I. Quantized Hall conductance, current-carrying edge states, and the existence of extended states in a two-dimensional disordered potential // *Phys. Rev. B.* — 1982. — Feb. — Vol. 25. — Pp. 2185–2190. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.25.2185>.
7. Толыго К. Б. Физические свойства решетки типа каменной соли, построенной из деформируемых ионов // *ЖЭТФ.* — 1950. — Т. 20, № 6. — С. 497–506.
8. Huang K. Lattice Vibrations and Optical Waves in Ionic Crystals // *Nature.* — 1951. — May. — Vol. 167. — Pp. 779–780. — <http://dx.doi.org/10.1038/167779b0>.
9. Henry C. H., Hopfield J. J. Raman Scattering by Polaritons // *Phys. Rev. Lett.* — 1965. — Dec. — Vol. 15. — Pp. 964–966. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.15.964>.
10. Пекар С. И. Теория электромагнитных волн в кристалле, в котором возникают экситоны // *ЖЭТФ.* — 1957. — Т. 33, № 4. — С. 1022–1036.

11. *Hopfield J. J.* Theory of the Contribution of Excitons to the Complex Dielectric Constant of Crystals // *Phys. Rev.* — 1958. — Dec. — Vol. 112. — Pp. 1555–1567. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.112.1555>.
12. *Fröhlich D., Mohler E., Wiesner P.* Observation of Exciton Polariton Dispersion in CuCl // *Phys. Rev. Lett.* — 1971. — Mar. — Vol. 26. — Pp. 554–556. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.26.554>.
13. *Ritchie R. H.* Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films // *Phys. Rev.* — 1957. — Jun. — Vol. 106. — Pp. 874–881. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.106.874>.
14. *Otto A.* Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection // *Zeitschrift für Physik.* — 1968. — Vol. 216, no. 4. — Pp. 398–410. — <http://dx.doi.org/10.1007/BF01391532>.
15. *Kretschmann E., Raether H.* Notizen: radiative decay of non radiative surface plasmons excited by light // *Zeitschrift für Naturforschung A.* — 1968. — Vol. 23, no. 12. — Pp. 2135–2136.
16. *Barnes W. L, Dereux A., Ebbesen T. W.* Surface plasmon subwavelength optics // *Nature.* — 2003. — Vol. 424, no. 6950. — Pp. 824–830. — <http://dx.doi.org/10.1038/nature01937>.
17. Long-wavelength ( $\lambda \approx 8\text{--}11.5 \mu\text{m}$ ) semiconductor lasers with waveguides based on surface plasmons / C. Sirtori, C. Gmachl, F. Capasso et al. // *Opt. Lett.* — 1998. — Sep. — Vol. 23, no. 17. — Pp. 1366–1368. — <http://dx.doi.org/10.1364/OL.23.001366>.
18. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light / J. D. Joannopolous, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade. — 2 edition. — 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540: Princeton University Press, 2008. — 304 pp.
19. *Ozby E.* Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions // *Science.* — 2006. — Vol. 311, no. 5758. — Pp. 189–193. — <http://dx.doi.org/10.1126/science.1114849>.
20. Observation of Retardation Effects in the Spectrum of Two-Dimensional Plasmons / I. V. Kukushkin, J. H. Smet, S. A. Mikhailov et al. // *Phys. Rev. Lett.* — 2003. — Apr. — Vol. 90. — P. 156801. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.156801>.
21. *Говоров А. О., Чаплик А. В.* Растекание неравновесных носителей заряда в двумерных электронных системах // *Поверхность.* — 1987. — Т. 12. — С. 5–9.

22. *Говоров А. О., Чаплик А. В.* Эффекты запаздывания в процессах релаксации двумерной электронной плазмы // *ЖЭТФ*. — 1989. — Т. 95. — С. 1976.
23. *Фалько В. И., Хмельницкий Д. Е.* Что, если проводимость пленки больше, чем скорость света? // *ЖЭТФ*. — 1989. — Т. 95. — С. 1988–1992.
24. *Чаплик А. В.* Эффекты запаздывания в плазменных колебаниях двухслойной структуры // *Письма в ЖЭТФ*. — 2015. — Т. 101. — С. 602.
25. *Гусихин П. А., Муравьев В. М., Кукушкин И. В.* Обнаружение anomalно слабо затухающих плазменных волн в двумерной электронной системе // *Письма в ЖЭТФ*. — 2014. — Т. 100, № 9-10.
26. Spectrum of one-dimensional plasmons in a single stripe of two-dimensional electrons / I. V. Kukushkin, J. H. Smet, V. A. Kovalskii et al. // *Phys. Rev. B*. — 2005. — Oct. — Vol. 72. — P. 161317. — <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.72.161317>.
27. *Muravev V. M., Kukushkin I. V.* Plasmonic detector/spectrometer of subterahertz radiation based on two-dimensional electron system with embedded defect // *Applied Physics Letters*. — 2012. — Vol. 100, no. 8. — P. 082102. — <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl/100/8/10.1063/1.3688049>.