



Розанов К.Н.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Родионова Даниила Александровича на тему
«Плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах:
роль эффектов электромагнитного запаздывания»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы диссертации

Коллективные колебания свободных носителей зарядов (плазмоны) в двумерных электронных системах исследуются уже довольно давно как теоретически, так и экспериментально. Благодаря достаточно высокому качеству современных двумерных систем, частоты таких плазмонов могут лежать в гига- и терагерцовом диапазонах частот, что ценно для практических приложений. В частности, плазмонные резонансы могут быть использованы в генераторах и детекторах электромагнитного излучения. Относительно недавно были проведены экспериментальные исследования плазмонов в двумерных электронных системах с латеральными размерами порядка миллиметра и сантиметра. В таких системах значительную роль играют эффекты электромагнитного запаздывания, а затухание плазмонов определяется не только временем электронного рассеяния, но и радиационными потерями. При этом в научной литературе теоретические исследования, описывающие поведение затухания плазмонных резонансов с учётом электромагнитного запаздывания в латерально ограниченных системах, присутствуют довольно ограниченно. Поэтому представленное исследование является актуальным и своевременным.

Структура и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Изложена на 96 страницах, включающих в себя 13 рисунков и 111 наименований списка литературы.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность результатов, а также определены научные положения, выносимые на защиту, указана структура диссертации.

В **обзоре литературы** кратко представлены известные из предыдущих работ результаты и вспомогательные сведения, позволяющие лучше понять оригинальную часть диссертации.

В **первой главе** диссертант получает уравнение, описывающее возбуждение плазмонных колебаний в изотропном двумерном диске, проводимость которого описывается в рамках динамической модели Друде. Диск располагался на некотором расстоянии от плоской идеально проводящей металлической пластины. На основе

уравнений Максвелла найдена связь между электрическим полем и плотностью тока в диске, которое будет решаться в различных пределах во второй и третьей главах.

Для удобства дальнейшего анализа и изложения автор вводит безразмерные параметры. Первый из них – параметр «запаздывания», который характеризует степень влияния электромагнитного запаздывания на свойства плазменных колебаний. Вторым – «столкновительный» параметр, определяемый временем рассеяния носителей заряда на примесях.

Во **второй главе** рассматривается предел неэкранированной системы, т.е. случай отсутствия металлического электрода. Основное внимание уделено исследованию частоты и ширины резонансов, соответствующих возбуждению фундаментальной и осесимметричной мод. При слабом запаздывании получены приближенные аналитические выражения для частоты и ширины резонанса. Показано, что ширина резонанса с увеличением параметра запаздывания сначала уменьшается, а потом возрастает до некоторого асимптотического значения.

В **третьей главе** изучено, как на свойства плазменных колебаний влияет расположенный рядом с диском идеально проводящий электрод. При слабом запаздывании найдены аналитические выражения для положения и ширины резонанса. Показано, что при переходе от предела сильной экранировки, когда расстояние между диском и металлом много меньше радиуса диска, к неэкранированной системе ширина сначала уменьшается от значения, равного обратному времени релаксации импульса носителей заряда, а затем возрастает и приобретает осциллирующий характер.

В **четвертой главе** исследованы свойства плазменных колебаний в сильно экранированной анизотропной полосе, помещенной во внешнее однородное постоянное магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости системы. Рассматривались системы с эллиптическим профилем поверхности Ферми, для которых использовалась анизотропная динамическая модель Друде. Анализ проводился в пределе сильного экранирования, что позволило найти точные выражения для частоты и скорости затухания плазменных колебаний. Показано, что частота краевого магнитоплазмона с ростом магнитного поля не меняется, а частота остальных мод приближается к величине, пропорциональной циклотронной частоте. При этом коэффициент пропорциональности не зависит от ориентации поверхности Ферми относительно края, и за счет запаздывания меньше единицы.

В **заключении** кратко приведены основные результаты диссертационной работы.

На защиту выносятся три научных положения:

1. Ширина плазменных резонансов в спектре поглощения, связанных с возбуждением фундаментальной и осесимметричной моды в двумерной электронной системе в форме диска, динамическая проводимость которой описывается моделью Друде, не является суммой столкновительного и радиационного уширений даже в режиме слабого электромагнитного запаздывания. В режиме сильного электромагнитного запаздывания частота и ширина этих плазменных резонансов стремятся к асимптотическим значениям так, что их добротность порядка единицы.
2. При увеличении расстояния от идеально проводящего металлического затвора до двумерной электронной системы в форме диска радиационная и полная ширина плазменных резонансов сначала уменьшается, а затем осциллирует с затухающей амплитудой. При расстояниях, существенно превышающих длину волны внешнего возбуждающего электромагнитного излучения, период этих осцилляций определяется отношением скорости света к частоте плазменного резонанса.

3. В двумерной электронной системе в форме полосы с анизотропией эффективной массы дисперсионное уравнение, описывающее краевой магнитоплазмон, содержит только диагональную компоненту тензора удельного сопротивления в случае малого расстояния между двумерной системой и затвором. В рамках анизотропной динамической модели Друде частота краевого магнитоплазмона не зависит от величины перпендикулярного магнитного поля. Квадрат частоты остальных мод является суммой квадрата плазменной частоты в отсутствие магнитного поля и слагаемого пропорционального квадрату циклотронной частоты, в котором коэффициент пропорциональности не зависит от ориентации осей тензора эффективных масс и уменьшается при увеличении роли электромагнитного запаздывания.

Все выводы обоснованы и не вызывают возражений.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Найдены и проанализированы различные зависимости положения и ширины плазмонных резонансов в изотропных дисках с однородной концентрацией носителей заряда от параметров системы, в том числе в режимах проявления эффектов электромагнитного запаздывания. Показано, что ширина резонанса отличается от суммы столкновительного вклада, определяемого рассеянием на примесях, и радиационного вклада.
2. Исследовано влияние плоского металлического затвора на свойства этих плазмонных резонансов.
3. Получены выражения для частоты всех магнитоплазменных колебаний в сильно экранированной анизотропной полосе с эллиптической поверхностью Ферми.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных уравнений математической физики, адекватных теоретических моделей рассматриваемых систем и современного математического аппарата для их решения и анализа. Полученные результаты имеют достаточную апробацию. Так, результаты диссертанта изложены в 5 статьях в ведущих российских и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в систему Web of Science, Scopus и РИНЦ, а также имеется 18 публикаций в сборниках тезисов и материалов конференций. Наконец, результаты неоднократно докладывались на ведущих международных и российских конференциях, а также научных семинарах.

Научная и практическая значимость определяется главным образом найденными свойствами плазмонных колебаний в различных латерально ограниченных изотропных и анизотропных двумерных системах, что расширяет современные представления о динамике двумерных электронных систем и их взаимодействии с электромагнитным полем. Особое внимание в работе уделено эффектам электромагнитного запаздывания и возникающим в связи с этим радиационным потерям в системе, которые могут несколько увеличивать добротность плазменных резонансов (для определенных систем). Последнее обстоятельство в перспективе может быть принципиально важно в микроволновых и терагерцевых устройствах.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты и выводы диссертационной работы Родионова Д.А. могут быть рекомендованы к использованию научно-исследовательскими организациями, занимающимися как фундаментальными, так и прикладными исследованиями плазменных

колебаний в различных двумерных системах, например, ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна РАН (г. Черноголовка), ФГБУН Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (г. Новосибирск), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), Саратовский филиал ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Саратов), ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (г. Москва), АНОО ВО «Сколковский институт науки и технологий» (г. Москва) и другие.

Основное содержание и тема диссертации соответствуют паспорту научной специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» (отрасль науки – физико-математические) (п.2 – Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности).

Ниже приводятся вопросы и замечания по диссертационной работе:

1. Чем обусловлен выбор разложения плотности тока по полиномам, которые, казалось бы, не образуют ортонормированный базис?
2. Можно ли сравнить результаты, полученные в диссертации, с другими работами по плазмонным модам графенового диска?
3. На рисунке 1.9 диссертации показаны зависимости частоты и ширины линии от величины d/R . Но не указан другой существенный параметр – d/λ .
4. В работе не хватает мотивационной части – обоснования ценности решаемых задач для науки и приложений, в частности, в системах, где затвор расположен на расстояниях, больших длины волны плазмона.

Сформулированные замечания не снижают качество диссертации. Диссертационная работа Д.А. Родионова представляет собой теоретическое исследование, проведенное на высоком научном уровне. Результаты работы имеют научную и практическую значимость.

Диссертационная работа Родионова Д.А. «Плазменные колебания в латерально ограниченных двумерных электронных системах: роль эффектов электромагнитного запаздывания» представляет собой законченное научное исследование и по объему результатов, достоверности, теоретической и практической значимости выводов удовлетворяет п.п. 9 – 14 «Положения о присуждении степеней», предъявляемых к кандидатским диссертациям физико-математического профиля, а ее автор Родионов Д.А. заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Результаты диссертации были доложены на семинаре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, протокол № 1 от 12 марта 2025 г. Присутствовало 18 сотрудников. Отзыв был одобрен.

Отзыв подготовлен д.ф.-м.н., г.н.с. ИТПЭ РАН Дорофеев А.В.



/ Дорофеев А.В. /

Я, Дорофеев Александр Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.



Подпись Дорофеев А.В. заверяю

Заместитель директора по научной работе по информационно-вычислительным технологиям Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук, доктор физико-математических наук



Сведения о сотруднике ведущей организации, подготовившем отзыв

Фамилия, имя, отчество: Дорофеев Александр Викторович

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность, по которой защищена диссертация: 01.04.03 — Радиофизика

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Телефон: +7(968)636-96-13

e-mail: adorofeev@itaer.ru

Название организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Должность: главный научный сотрудник

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной электродинамики Российской академии наук

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 6

Тел.: +7(495)484-23-83

e-mail: itae@itaer.ru

**Список основных публикаций сотрудников ИТПЭ РАН по теме
диссертации за последние 5 лет:**

- [1] A. Ivanov, I. Bykov, G. Barbillon, K. Mochalov, D. Korzhov, A. Kovalev, A. Smyk, A. Shurygin, A.K. Sarychev, Plasmon localization and field enhancement in flexible metasurfaces // *Physical Review Applied*. – 2024. – Vol. 22. – P. 064064.
- [2] A.K. Sarychev, A.V. Ivanov, D.J. Bergman, R. Fan, A.F. Smyk, Plasmon zebra resonances and nanopainting // *Modern Electrodynamics*. – 2024. – No. 5(13). – P. 26.
- [3] А. К. Сарычев, А. В. Иванов, И. В. Быков, М. С. Шестопалова, Д. С. Коржов, А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин, Д. В. Басманов, К. Е. Мочалов, Плазмонный резонанс в металлической нанооболочке и комбинационное рассеяние в микрообъектах // *Квантовая электроника*. – 2024. – Т. 54. – С. 450.
- [4] A.P. Vinogradov, A.V. Dorofeenko, Quasistatic (localized) plasmons: from Langmuir to Ferrell // *Modern Electrodynamics*. – 2023. – No. 4(6). – P. 38.
- [5] E. S. Andrianov, A. A. Pukhov, A. P. Vinogradov, A. V. Dorofeenko, Narrowing the linewidth of a plasmonic nanolaser with an increase of coupling between a two-level system and a plasmonic nanoparticle // *Modern Electrodynamics*. – 2023. – No. 6(8). – P. 4.
- [6] A.K. Sarychev, A.Ivanov, A.N. Lagarkov, I. Ryzhikov, K. Afanasev, I. Bykov, G. Barbillon, N. Bakholdin, M. Mikhailov, A. Smyk, A. Shurygin, A. Shalygin, Plasmon Localization and Giant Fields in an Open-Resonator Metasurface for Surface-Enhanced-Raman-Scattering Sensors // *Physical Review Applied*. – 2022. – Vol. 17. – P. 044029.
- [7] V.B. Novikov, A.M. Romashkina, D.A. Ezenkova, I.A. Rodionov, K.N. Afanasyev, A.V. Baryshev, T.V. Murzina, Surface plasmon driven enhancement of linear and nonlinear magneto-optical Kerr effects in bimetallic magnetoplasmonic crystals in conical diffraction // *Physical Review B*. – 2022. – Vol. 105. – P. 155408.
- [8] A.M. Pikalov, A.B. Granovsky, A.V. Dorofeenko, Plasmon–Magnon Interaction in the (Graphene–Antiferromagnetic Insulator) System // *JETP Letters*. – 2021. – Vol. 113. – P. 521.
- [9] I.V. Doronin, A.S. Kalmykov, A.A. Zyablovsky, E.S. Andrianov, B.N. Khlebtsov, P.N. Melentiev, V.I. Balykin, Resonant Concentration-Driven Control of Dye Molecule Photodegradation via Strong Optical Coupling to Plasmonic Nanoparticles // *Nano Letters*. – 2021. – Vol. 22. – P. 105.