

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Института  
физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук

\_\_\_\_\_ академик РАН А.В. Латышев

\_\_\_\_\_ 2022 г.

### **Отзыв ведущей организации**

на диссертационную работу Алексева Павла Сергеевича

«Гидродинамические явления в наноструктурах», представленную на соискание ученой  
степени доктора физико-математических наук  
по специальности 1.3.3 – теоретическая физика

Современные технологические достижения в области получения низкоразмерных полупроводниковых систем открывают широкие возможности создания экстремально чистых структур, характеризующихся большими значениями подвижностей носителей заряда. Ключевой особенностью таких структур является относительно слабое электрон-примесное рассеяние носителей заряда, способствующее квазибаллистическому режиму движения частиц. В таком режиме при теоретическом описании транспортных свойств указанных систем и структур ключевая роль отводится процессам электрон-электронного взаимодействия, а также процессам рассеяния электронов на границах образца. В пределе, когда длина пробега носителей заряда, обусловленная электрон-электронными столкновениями, меньше размеров изучаемого образца, широко используемым приближением для описания электронного транспорта является гидродинамическая модель. Большое разнообразие материалов и физических условий, в которых возможен гидродинамический режим течения носителей заряда, ставит перед теорией задачу детального описания гидродинамического транспорта в современных низкоразмерных наноструктурах, включая случаи воздействия внешних полей, в частности, внешнего стационарного однородного магнитного поля. Теоретическому исследованию этих вопросов посвящена диссертационная работа П.С. Алексева, что и определяют ее **актуальность**. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, семи приложений и списка литературы.

Во **введении** представлен краткий исторический обзор работ по тематике диссертации, сформулированы цели диссертационной работы, обоснованы актуальность темы, научная новизна, достоверность полученных результатов и их апробация,

представлены основные положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации и представлен список основных публикаций по теме диссертационной работы. В **первой главе** дано теоретическое описание электронного магнитотранспорта, а также развито теоретическое описание вязкоупругого резонанса и поперечных магнитоупругих мод на основе подхода, базирующегося на уравнениях Навье-Стокса. В этой же главе представлена теория спинового резонанса в области гидродинамического режима динамики электронной жидкости. **Вторая глава** посвящена последовательному выводу использованных в первой главе уравнений динамики сильно неидеальной двумерной электронной жидкости в рамках теории ферми-жидкости Ландау. Показано, что в пределе больших величин амплитуды и анизотропии функции Ландау, описывающей взаимодействие квазичастиц, кинетическое уравнение для квазичастиц электронной ферми-жидкости переходит в уравнение Навье-Стокса и уравнение непрерывности для потока квазичастиц и возмущения их плотности. Из кинетического уравнения для квазичастиц получен критерий на амплитуды гармоник функции Ландау, когда становится возможным гидродинамическое описание течения электронной жидкости в образце с резкими краями. В этой же главе представлена теория времени релаксации сдвиговых напряжений для слабонеидеального электронного двумерного ферми-газа. Приведено количественное сопоставление полученного результата с экспериментальными данными. **Третья глава** посвящена развитию теории линейного магнитотранспорта в электрон-дырочных системах. Показано, что здесь ключевую роль играют неоднородные распределения потоков носителей, обусловленные процессами диффузии и рекомбинацией носителей заряда. Продемонстрировано, что наиболее значимой является область концентраций вблизи точки электронейтральности системы. **Четвертая глава** посвящена теоретическому анализу переходной области между баллистическим и гидродинамическим режимами транспорта носителей заряда в слабом и умеренном магнитном поле. Показано, что в окрестности критического магнитного поля, при котором диаметр циклотронной орбиты электрона равен ширине образца, происходит фазовый переход от баллистического к гидродинамическому течению.

Можно выделить следующие **наиболее значимые результаты работы**.

1. Предсказание ранее неизвестного типа магнитного резонанса в вязком электронном газе. Показано, что резонанс обусловлен совпадением частоты внешнего поля с частотой собственной динамики сдвиговых напряжений вязкого электронного газа в магнитном поле, равной удвоенной циклотронной частоте.
2. Выяснение роли неоднородных приграничных течений в формировании линейного магнетосопротивления образцов. Предсказано сильное положительное линейное магнетосопротивление в точке электронейтральности, обусловленное формирова-

нием приграничных слоёв течения с большой плотностью тока за счёт рекомбинации и диффузии носителей.

3. Построение микроскопической теории перехода «баллистический режим-гидродинамический режим» в классических магнитных полях, позволившей дать теоретическую трактовку наличия «изломов» у зависимостей продольного и холловского сопротивлений от магнитного поля.
4. Несомненным достоинством диссертационной работы является сравнение полученных в диссертационной работе теоретических результатов с имеющимися по теме исследований экспериментами.

Непринципиальные **критические замечания** по диссертации сводятся к следующим.

1. В некоторых ситуациях автор не дает пояснений о применимости разрабатываемой теоретической модели к экспериментальной системе, результаты измерений на которой пытается объяснить на основе полученных формул. Например, в разделе 3.2.5 диссертации автор применяет полученные в разделе 3.2.4 формулы для частиц с квадратичным спектром со щелью (запрещённой зоной) к двухслоевому графену, где, конечно, вблизи точки нейтральности, спектр квадратичный, но бесщелевой.
2. При построении теории линейного магнетотранспорта учет рекомбинации проводится посредством введения феноменологического рекомбинационного времени. Следовало бы дать пояснения, какие именно механизмы рекомбинационных процессов имеет в виду автор. В некоторых случаях само время рекомбинации может зависеть от концентрации частиц, а через нее, возможно, и от координаты поперек границы образца.
3. В тексте диссертационной работы в небольшом количестве, но все же встречаются опечатки.

Сделанные замечания не изменяют общую положительную оценку работы и не снижают ее научной ценности.

В целом, диссертация П.С. Алексеева является самостоятельным завершённым оригинальным научным исследованием, **достоверность результатов и обоснованность выводов** которого не вызывают сомнений. **Достоверность** полученных результатов основывается на надежности и обоснованности применяемых методов. Полученные в диссертации теоретические результаты являются новыми. Были даны новые предсказания для проведения экспериментальных исследований гидродинамических явлений в низкоразмерных системах, а также представлено сравнение полученных автором теоретических результатов с экспериментальными результатами, что является, несомненно, **значимым практическим результатом** диссертационной работы.

Материалы диссертации опубликованы в ведущих российских и международных рецензируемых журналах из списка Web of Science и Scopus, включая журналы первого квартала. Результаты работы докладывались на престижных российских и международных семинарах и конференциях. Полученные в диссертации результаты соответствуют специальности 1.3.3 – теоретическая физика. **Автореферат** правильно отражает содержание диссертации.

Доклад П.С. Алексеева по материалам диссертации был заслушан и обсужден на семинаре ФГБУН ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН на базе лаборатории теоретической физики 10 марта 2022 г. На семинаре присутствовало 19 человек. Из них: академик РАН – 1 чел., член-корреспондент РАН – 1 чел., д.ф.-м.н. – 7 чел., к.ф.-м.н. – 10 чел.

Отзыв на диссертационную работу П.С. Алексеева одобрен ученым советом ФГБУН ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, протокол № 3 от 30 марта 2022 г.

Диссертационная работа П.С. Алексеева «Гидродинамические явления в наноструктурах» в полной мере соответствует критериям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор, Алексеев Павел Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.3 – теоретическая физика.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник, исполняющий обязанности заведующего лабораторией теоретической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физ.-мат. наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

\_\_\_\_\_ /В.М. Ковалёв/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИФП СО РАН), Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13, тел.(383)330-9-55, факс 8(383)333-27-71, <http://www.isp.nsc.ru/>; IFP@isp.nsc.ru.

Подпись д.ф.-м.н., в.н.с., и.о. заведующего лабораторией теоретической физики ФГБУН ИФП СО РАН В.М. Ковалёва удостоверяю.

Ученый секретарь ФГБУН ИФП СО РАН, к.ф.-м.н.

\_\_\_\_\_ /С.А. Аржанникова/