

УДК 537.87

## ИЗУЧЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ СИГНАЛА ФОТО-ОТРАЖЕНИЯ ПРИ ДРОБНОМ ФАКТОРЕ ЗАПОЛНЕНИЯ $\nu = 1/3$ В СЕКУНДНОМ ДИАПАЗОНЕ

© 2025 г. А. В. Ларионов\*, Л. В. Кулик

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела  
имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, Россия

\*E-mail: larionov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 27.09.2024 г.

После доработки 18.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Изучена временная динамика сигнала фото-отражения при дробном факторе заполнения двумерных электронов  $\nu = 1/3$  в GaAs квантовой яме при гелиевых температурах  $T \approx 0.6$  К. Продемонстрировано, что с помощью модифицированной методики счета-фотонов возможно проводить измерения времен релаксации возбуждений в лафлиновской жидкости порядка 100 с.

**Ключевые слова:** лафлиновская жидкость, двумерный электронный газ, дробный фактор заполнения, фото-отражение.

DOI: 10.31857/S0367676525020086, EDN: CXHSXY

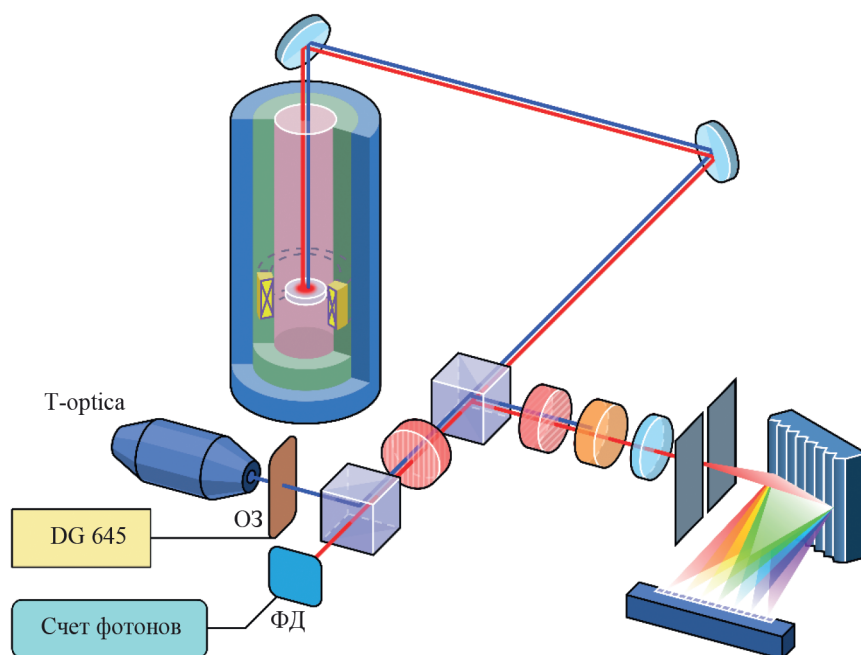
### ВВЕДЕНИЕ

Изучение лафлиновских состояний ведется уже более 30 лет и наибольший прогресс в последнее время происходит в оптических методах исследования [1]. Это обусловлено тем, что в транспортных методах измерений проявляются в основном краевые каналы дробных состояний. Оптические же методики позволяют получать информацию непосредственно из объема наноструктуры, где расположена квантовая яма с двумерными электронами. Ранее нами было продемонстрировано, что такие оптические методы как резонансное фото-отражение и резонансная фотолюминесценция эффективны для исследования лафлиновского состояния на дробе  $\nu = 1/3$  [2–5]. Было найдено, что времена жизни коллективных возбуждений в лафлиновских состояниях могут составлять несколько секунд. Настоящей работой мы демонстрируем, что усовершенствование метода счета фотона позволяет измерять времена жизни порядка 100 с.

### ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

В работе исследовались GaAs/AlGaAs наноструктуры с одиночной квантовой ямой шириной 17 нм, содержащей высокоподвижный 2D электронный газ (транспортная подвижность  $\mu \approx 5 \cdot 10^6$  см<sup>2</sup>/(В · с) с темновой концентрацией электронов  $n_s \approx 0.8 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>). Резонанс-

ное фотовозбуждение и фото-отражение в исследуемом образце осуществлялось с помощью перестраиваемого по длине волны (в диапазоне 750–850 нм) полупроводникового лазера T-Optica (см. рис. 1). Возбуждение и регистрация сигнала велось через скрещенные поляризаторы для устранения вклада от поверхности образца. Спектральное положение энергии лазерного излучения контролировалось ПЗС камерой, сопряженной с имидж-спектрометром (Acton 2500i) с линейной дисперсией 2 нм/мм. Разрешенный в секундном диапазоне режим измерений осуществлялся парой - оптический затвор + быстрый фотодетектор, сопряженный с системой счета фотонов. Оптический затвор управлялся с помощью задающего генератора (DG645), имеющего встроенную цифровую линию задержки и генерирующего прямоугольные импульсы вплоть до периода 200 с. Запуск системы счета фотонов синхронизовался с задающим генератором оптического затвора. Главной сложностью в таком эксперименте было одновременное считывание сигнала системой счета фотонов в течение всей длительности импульса вплоть до 100 сек. Для этого была написана специальная программа, управляющая одновременно задающим генератором и системой счета фотонов таким образом, что импульс при регистрации разбивался на 512 каналов и за каждый такт считывания импульса последовательно записывались все 512 каналов. Это позволяло существенным обра-



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки время-разрешенного резонансного фото-отражения. Здесь T-optica — узкополосный перестраиваемый полупроводниковый лазер; DG645 — управляющий генератор со строенной цифровой линией задержки; O3 — оптический затвор, модулирующий лазерный пучок; ФД — быстрый фотодетектор, преобразующий оптический сигнал в электрический, который поступает на систему счета фотонов.

зом (более чем на порядок) сократить время проведения эксперимента и записывать зависимость сигнала фото-отражения от плотности мощности лазерного излучения за один цикл захлаживания образца.

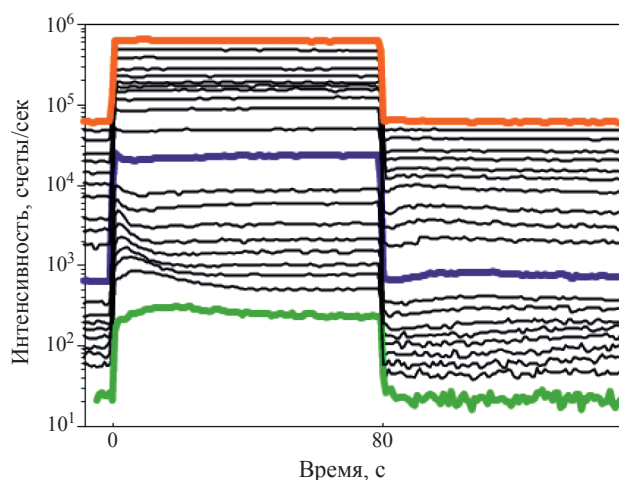
Исследуемый образец монтировался внутри держателя с оптическим окном, которое обеспечивало ввод лазерного излучения и вывод отраженного сигнала с помощью оптической системы из двух линз — короткофокусной асферика (15 мм) и плоско-выпуклой длиннофокусной линзы (300 мм). Сконструированный держатель образца помещался в криогенную вставку, специально сделанную для конденсации изотопа гелия  $^3\text{He}$ , которая, в свою очередь, находилась внутри криостата с соленоидом с изменяемым магнитным полем до 10.2 Тл. Криогенная вставка позволяла получать температуру на образце  $T = 0.6$  К и плавно регулировать ее до 30 К. Образец в оптическом держателе находился перпендикулярно направлению индукции магнитного поля (геометрия Фарадея).

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее нами была обнаружена новая линия в спектре фото-отражения лафлиновского состояния двумерных электронов на факторе заполнения  $\nu = 1/3$ , природа возникновения которой нами обсуждалась в работах [1–3]. Целью данного эксперимента было создание ней-

тральных возбуждений оптическими методами в лафлиновской жидкости на факторе заполнения электронов  $1/3$  и отработка методики время-разрешенных измерений сверхдлинных времен релаксации возбуждений в основное состояние во временном диапазоне порядка 100 с и более, что весьма сложно выполнить экспериментально.

На рис. 2 представлена зависимость сигнала резонансного фото-отражения в зависимости от плотности мощности фотовозбуждения. Запись и регистрация сигнала выполнялась с помощью модуляции оптического затвора прямоугольными импульсами с периодом 160 с. На рис. 2 выделены примеры временных разверток сигнала отражения, на которых отношение регистрируемого сигнала приблизительно соответствует затворному контрасту (зеленая и оранжевая развертки) и пример, в котором сигнал отражения меняется существенно больше затворного контраста (фиолетовая развертка). В работе [5] показано, что нелинейность в сигнале отражения связана с формированием в лафлиновской жидкости ансамбля нейтральных возбуждений с единичным спином (спин-магнитогравитонов). Поскольку соотношение интенсивностей отраженного сигнала от лафлиновской жидкости до и после переключения оптического затвора почти не изменяется на всем временном интервале после переключения затвора можно сделать



**Рис. 2.** Временная зависимость сигнала резонансного фото-отражения как функция плотности мощности оптического фотовозбуждения. Здесь период модуляции составлял порядка 160 сек, мощность изменялась от 0.1 мкВт до 1 мВт. Цветом выделены примеры временных разверток сигнала отражения, на которых отношение регистрируемого сигнала приблизительно соответствует затворному контрасту (зеленая и оранжевая развертки) и пример, в котором сигнал отражения меняется существенно больше затворного контраста (фиолетовая развертка).

однозначный вывод о том, что времена релаксации спин-магнитогравитонов превышают существенно 80 секунд. Таким образом, продемонстрировано, что программным образом модифицированная система счета фотонов позволяет измерять гигантские времена релаксации нейтральных возбуждений в лафлиновской жидкости порядка 80 с и более за короткий интервал времени накопления сигнала (около 2 мин).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, с помощью новой методики резонансного фото-отражения показано, что времена релаксации нейтральных возбуждений с единичным спином в лафлиновской жидкости на дробном факторе заполнения электронов  $\nu = 1/3$  существенно превышает 80 с, что делает эти возбуждения самыми долгоживущими среди двумерных электронных возбуждений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-12-00011).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулик Л.В., Мусина Л.И., Белозеров Е.И. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 4. С. 158; Kulik L.V., Musina L.I., Belozеров E.I. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 4. P. 386.
2. Кулик Л.В., Журавлев А.С., Белозеров Е.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. С. 516; Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Belozеров E.I. et al. // JETP Lett. 2020. V. 112. P. 485.
3. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Musina L.I. et al. // Nature Commun. 2021. V. 12. P. 6477.
4. Журавлев А.С., Кулик Л.В., Мусина Л.И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2020. V. 114. P. 474; Zhuravlev A.S., Kulik L.V., Musina L.I. et al. // JETP Lett. 2021. V. 114. P. 412.
5. Kulik L.V., Zhuravlev A.S., Larionov A.V. et al. // Appl. Phys. Lett. 2023. V. 123. No. 8. Art. No. 083101.

## Study of temporal dynamics of photo-reflection signal at the fractional filling factor $\nu = 1/3$ in the second time range

A. V. Larionov\*, L. V. Kulik

*Osipyan Institute of Solid-State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

*\*e-mail: larionov@issp.ac.ru*

The temporal dynamics of the photo-reflection signal was studied at a fractional filling factor of two-dimensional electrons  $\nu = 1/3$  in a GaAs quantum well at liquid helium temperatures  $T \approx 0.6$  K. It has been demonstrated that using a modified photon-counting technique it is possible to measure relaxation times of excitations in a Laughlin liquid of the order of 100 seconds.

**Keywords:** Laughlin liquid, two-dimensional electron gas, fractional filling factor, photoreflexion.