

ИНДУЦИРОВАННАЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ФЕРМИ-КРАЕВАЯ СИНГУЛЯРНОСТЬ В ТУННЕЛЬНОМ ТОКЕ ЧЕРЕЗ САМООРГАНИЗОВАННУЮ КВАНТОВУЮ ТОЧКУ InAs

Ю. Н. Ханин^{a*}, Е. Е. Вдовин^a, Л. Ивс^{b**}, И. А. Ларкин^a,
А. Патанэ^{b**}, О. Н. Макаровский^b, М. Хенини^{b**}

^a Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук
142432, Черноголовка, Московская обл., Россия

^b Ноттингемский университет, Ноттингем NG7 2RD, Великобритания

Представлены результаты исследования туннельного транспорта при низких температурах через однобарьерную гетероструктуру GaAs/(AlGa)As/GaAs, содержащую самоорганизованные квантовые точки InAs. Обнаружено аномальное возрастание туннельного тока через квантовые точки как в параллельном, так и перпендикулярном току магнитном поле, обусловленное проявлением ферми-краевой сингулярности в токе из-за взаимодействия туннелирующего электрона с электронным газом в эмиттере.

PACS: 73.21.-b, 73.40.Gk, 71.55.Eq

Резонансное туннелирование через нуль-мерные состояния широко изучалось ранее, и поведение таких систем при очень низких температурах (в диапазоне милликельвин) часто не может быть объяснено в рамках одноэлектронного приближения. Это не кажется удивительным, поскольку эффекты, обусловленные электрон-электронным взаимодействием, такие как кулоновская блокада, эффект Кондо и ферми-краевая сингулярность (ФКС) [1–8], проявляются при низких температурах и оказывают сильное влияние на процессы туннелирования. Однако удивительным оказался обнаруженный недавно эффект, заключающийся в том, что ФКС в туннельном токе через квантовые точки InAs значительно усиливается в сильном магнитном поле, параллельном току [8], при этом усиление ФКС в перпендикулярном току поле зарегистрировано не было.

В данной работе мы сообщаем о наблюдении аномального возрастания туннельного тока через квантовые точки как в параллельном, так и в перпендикулярном току магнитном поле, которое является проявлением ФКС.

Экспериментальные образцы представляли собой асимметричные однобарьерные гетероструктуры GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs с тонким слоем InAs в центре барьера. Самоорганизованные квантовые

точки InAs образовывались в процессе роста напряженных эпитаксиальных слоев InAs методом Странского–Крастанова.

На рис. 1 показана $I(V)$ -характеристика экспериментального образца при $T = 0.5$ К, которая демонстрирует серию резких пиков, являющихся проявлением резонансного туннелирования электронов через квантовые точки InAs в барьере (AlGa)As. Положения и амплитуды таких пиков различны для разных образцов, однако полностью воспроизводимы для каждого образца в отдельности даже после термоциклирования. Различие в форме резонансных особенностей при разных направлениях смещения объясняется асимметрией барьерной области нашей гетероструктуры. Вследствие того, что рост точек начинается от середины барьерного слоя и точки обладают конечной высотой (около 2–3 нм), толщина туннельного слоя под квантовой точкой оказывается несколько больше, чем над ней, так что при положительном смещении скорость туннелирования электрона из эмиттера в квантовую точку намного меньше скорости туннелирования из точки в коллектор, т. е. $\Gamma_R \gg \Gamma_L$. В дальнейшем мы ограничимся рассмотрением поведения первого пика A , поскольку именно здесь при низкой температуре и относительно сильном магнитном поле нами наблюдалась сингулярность в туннельном токе.

Далее мы рассмотрим транспортные характеристики экспериментальной гетероструктуры при приложении магнитного поля. На рис. 2 показаны $I(V)$ -характеристики образца в перпендикулярном

*E-mail: khanin@ipmt-hpm.ac.ru

**L. Eaves, A. Patane, M. Henini, The School of Physics and Astronomy, University of Nottingham Nottingham NG7 2RD, UK

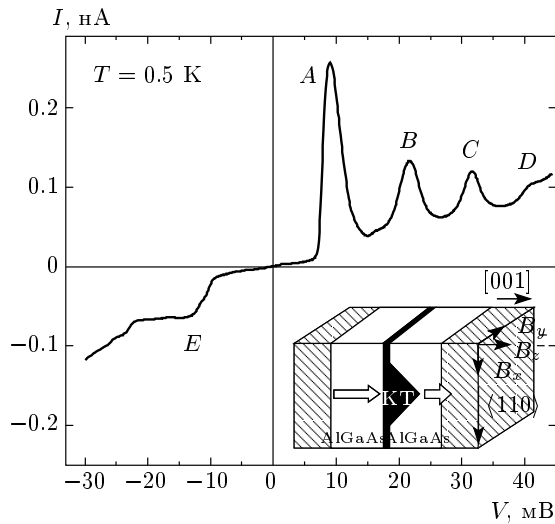


Рис. 1. $I(V)$ -характеристика экспериментального образца при $T = 0.5$ К. Вставка: схема туннелирования через квантовую точку в магнитном поле

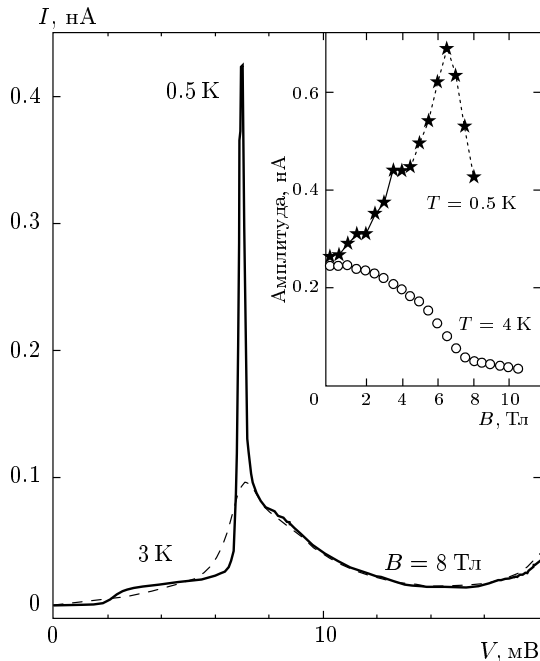


Рис. 2. $I(V)$ -характеристика образца в магнитном поле 8 Тл при двух температурах: $T = 0.5$ К (сплошная линия) и 3 К (штриховая линия). Вставка: зависимость от перпендикулярного току магнитного поля амплитуды пика A

току магнитном поле 8 Тл при двух различных температурах. Уменьшение температуры до 0.5 К приводит к чрезвычайно резкому обострению фронта резонанса A при напряжении смещения 8 мВ, соответствующем порогу туннелирования через нижнее по энергии нуль-мерное состояние. Появление син-

гулярности в токе не может быть объяснено только уменьшением температурного размытия эмиттера. Ширина этого пика (на полувысоте) составляет всего 0.3 мВ, что соответствует 130 мкэВ в энергетической шкале. Эта сингулярность представляет собой резкий рост туннельного тока с последующим, более медленным его убыванием при увеличении смещения. Как будет показано дальше, мы связываем это неожиданное увеличение тока в магнитном поле с проявлением ферми-краевой сингулярности при туннелировании через локализованное состояние. Подобная сингулярность наблюдалась нами и при приложении магнитного поля параллельного направлению тока (не приводится в данной работе для краткости). Еще раз отметим, что сингулярность не наблюдалась нами в отсутствие магнитного поля даже при наиболее низкой из доступных нам температур около 0.4 К (см. рис. 1).

На вставке к рис. 2 показана зависимость амплитуды резонанса A от величины перпендикулярного туннельному току магнитного поля B . Уменьшение амплитуды туннельного резонанса с увеличением B при $T = 4.2$ К связано с хорошо известным эффектом, который может быть понят в терминах одночастичной модели электронного туннелирования в перпендикулярном току магнитном поле. Этот эффект является основой метода визуализации волновых функций электронов в квантовых точках с помощью магнитотуннельной спектроскопии (МТС) и детально был рассмотрен в работах [9–11]. Как видно на вставке к рис. 2, зависимости амплитуды резонанса от перпендикулярного магнитного поля B для температур 4.2 К и 0.5 К радикально различаются. Это обусловлено проявлением при очень низкой температуре эффективного дополнительного канала туннелирования с электрон-электронным взаимодействием, эффективность которого имеет отличную от одночастичного канала зависимость от величины и направления перпендикулярного магнитного поля и не позволяет нам измерять форму волновых функций квантовых точек как при температуре около 4 К.

Для того чтобы определить природу наблюдаемого нами многочастичного тока, далее мы провели анализ формы резонансных особенностей. На рис. 3а подробно показана первая по напряжению резонансная особенность (пик A) в перпендикулярном магнитном поле $B = 6.5$ Тл при $T = 0.5$ К. Мы полагаем, что полный ток на рис. 3а определяется преимущественно каналом туннелирования с электрон-электронным взаимодействием, поскольку, как ясно видно на вставке к рис. 2, одноэлектронный ток

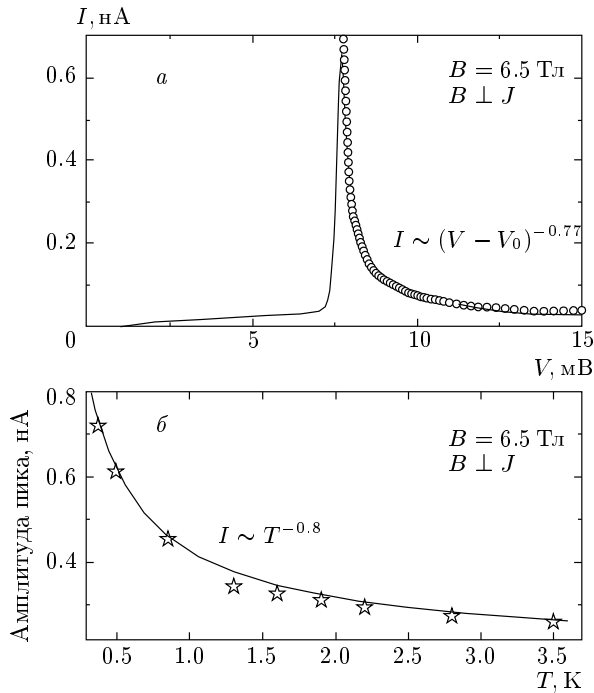


Рис. 3. *a*) $I(V)$ -характеристика экспериментально образца в области первого резонанса в перпендикулярном магнитном поле 6.5 Тл при $T = 0.5$ К. Точками показана зависимость $I \propto (V - V_0)^{-\gamma}$, с показателем степени $\gamma \approx 0.77$. *б*) Экспериментальная зависимость амплитуды ФКС пика от температуры (звездочки). Прямая линия соответствует степенной зависимости пикового тока $I_0 \propto T^{-\gamma}$ с показателем степени $\gamma \approx 0.8$

подавляется магнитным полем. Именно это и позволяет нам анализировать форму экспериментальной резонансной особенности и сравнивать ее с теоретическими предсказаниями [1, 2, 5]. Форма экспериментального пика, т.е. резкий рост туннельного тока с последующим убыванием по степенному закону $I \propto (V - V_0)^{-\gamma}$, где V_0 — напряжение, соответствующее пику в туннельном токе, является характерной именно для ферми-краевой сингулярности [1, 2]. Для экспериментальной кривой на рис. 3а нами получена величина $\gamma = 0.77$, что намного превышает теоретически предсказанную величину для подобной экспериментальной структуры [1] без магнитного поля и несколько выше величины γ , полученной в работе [8] для магнитного поля $B = 28$ Тл, приложенного параллельно направлению туннельного тока.

Определить природу аномального возрастания туннельного тока при туннелировании через квантовую точку можно также с помощью анализа температурных зависимостей $I(V)$ -характеристик.

Как показано в [5], тот факт, что площадь под кривой $I(V)$ в области резонанса растет с уменьшением температуры, недвусмысленно указывает на многочастичную природу эффекта. Наши экспериментальные кривые ясно демонстрируют такое поведение (см. рис. 2). Кроме того, экспериментальное исследование температурных зависимостей туннельных характеристик является еще одним способом определения показателя степени γ [4, 8]. Как видно на рис. 3б, амплитуда пика A уменьшается с увеличением температуры по степенному закону $I \propto T^{-\gamma}$ с $\gamma \sim 0.8$. Эта величина совпадает с экспериментальной точностью с величиной γ , полученной из формы резонансных особенностей $I(V)$ -характеристик при $V > V_0$. Таким образом, анализ температурных зависимостей дает нам дополнительное независимое подтверждение того, что аномальное увеличение туннельного тока с уменьшением температуры и увеличением магнитного поля связано с проявлением взаимодействия туннелирующего электрона с электронным газом в эмиттере (т.е. с ФКС).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 04-02-16869, 06-02-16556), а также в рамках программ фундаментальных исследований Президиума РАН «Квантовые наноструктуры», программы «Организация вычислений с использованием новых физических принципов» (ОИТВС РАН), EPSRC (Великобритания) и SANDiE (контракт NMP4-CT-2004-500101).

ЛИТЕРАТУРА

1. K. A. Matveev and A. I. Larkin, Phys. Rev. B **46**, 15337 (1992).
2. G. E. W. Bauer, Surf. Sci. **305**, 358 (1994).
3. A. K. Geim et al., Phys. Rev. Lett. **72**, 2061 (1994).
4. D. H. Cobden and B. A. Muzykantskii, Phys. Rev. Lett. **75**, 4274 (1995).
5. C. Zhang, D. J. Fisher, and S. M. Stewart, Surf. Sci. **361/362**, 231 (1995).
6. K. A. Benedict et al., Physica B **256/258**, 519 (1998).
7. D. A. Abanin and L. S. Levitov, Phys. Rev. Lett. **93**, 126802 (2004).
8. I. Nappke-Wurst et al., Phys. Rev. B **62**, 12621 (2000).
9. E. E. Vdovin et al., Science **290**, 122 (2000).
10. E. E. Vdovin et al., JETP Lett. **74**, 41 (2001).
11. A. Patané et al., Phys. Rev. B **65**, 165308 (2002).