

Изменение энергетического спектра и магнитный пробой в системе 2D дырок на гетерогранице GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As при одноосном сжатии

В. Краак, А. М. Савин*, Н. Я. Минина¹⁾+, А. А. Ильевский⁺, А. В. Полянский⁺

Институт физики, университет им. Гумбольдта, D-12489 Берлин, Германия

* Хельсинкский технологический университет, Лаборатория низких температур, P.O.B.2200, FIN-02015 HUT, Финляндия

⁺ Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 119992 Москва, Россия

Поступила в редакцию 14 июля 2004 г.

После переработки 26 июля 2004 г.

При одноосном сжатии гетероструктур GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As *p*-типа наблюдается развитие магнитного пробоя между расщепленными по спину подзонами основного состояния двумерных тяжелых дырок. Это явление служит прямым экспериментальным подтверждением сильного качественного изменения с одноосной деформацией энергетического спектра в этих структурах, которое было получено с помощью численных расчетов и согласно которому спиновое расщепление подзон при сжатии уменьшается, а контуры поверхности ферми-дырок в обеих подзонах касаются друг друга в направлении сжатия в области давлений 2.5 кбар.

PACS: 73.21.Fg, 73.40.Kp

Магнитный пробой является одним из явлений, наиболее ярко демонстрирующих квантовую природу движения носителей заряда в твердом теле, и представляет собой туннелирование электронов (дырок) в магнитном поле через классически запрещенные области импульсного пространства в местах сближения электронных (дырочных) орбит. С момента открытия его изучение представляло как самостоятельный интерес, так и служило инструментом для выявления особенностей энергетического спектра носителей в металлах и полупроводниках. Так, например, в монокристаллических сплавах Bi_{1-x}Sb_x наблюдавшееся при одноосном сжатии изменение связности изоэнергетической поверхности, сопровождаемое явлением внутризонного магнитного пробоя [1], позволило однозначно установить существование седловой точки в энергетическом спектре сплавов Bi_{1-x}Sb_x с $x \geq 0.2$. В настоящей работе наблюдается развитие магнитного пробоя в системе двумерных (2D) дырок на гетерогранице *p*-GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As при одноосном сжатии. Это явление служит прямым экспериментальным подтверждением картины изменения поверхности Ферми (ПФ) в этих структурах при сжатии, определенной нами ранее с помощью численных расчетов [2]. Расчеты в работе [2] и настоящее экспериментальное исследование проведены на гетерострукту-

рах с одной и той же конфигурацией, последовательностью слоев и концентрацией носителей в квантовой яме (КЯ).

Структуры GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As *p*-типа были выращены молекулярно-лучевой эпитаксией в институте Нильса Бора Копенгагенского Университета на подложке GaAs в направлении [001] со следующей последовательностью слоев: 1 мкм чистый GaAs; 70 Å – нелегированный спейсер из Al_{0.5}Ga_{0.5}As; 500 Å – активный слой из легированного Be ($5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) Al_{0.5}Ga_{0.5}As; защитный слой в 50 Å из легированного Be ($1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) GaAs. Образцы размером $3.0 \times 0.8 \times 0.5$ мм выкалывались из шайбы вдоль естественных плоскостей скольжения с длинной стороной

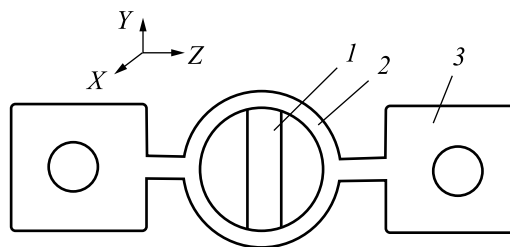


Рис.1. Упругий элемент, преобразующий растяжение в одноосное сжатие образца: 1 – образец, 2 – кольцо, 3 – “ушки” для крепежа в растягивающем устройстве

вдоль направления [110], и меза в холловской конфигурации вытравливалась в центральной части об-

¹⁾ e-mail: min@mig.phys.msu.ru

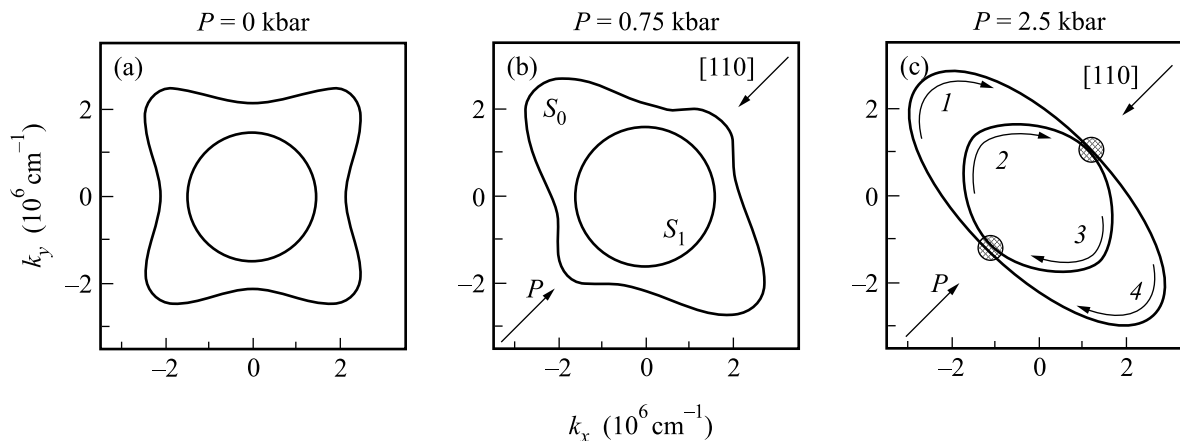


Рис.2. Контуры ПФ S_0 и S_1 в двух спиново-расщепленных подзонах тяжелых 2D дырок при различных давлениях вдоль направления $[110]$. При $P = 2.5$ кбар области магнитного пробоя заштрихованы, а цифры 1, 2, 3, 4 соответствуют различным участкам магнитопробойных орбит

разца. Контактные площадки создавались диффузией сплава Au:Zn, и золотые проволочки в 20 мкм подваривались к ним ультразвуковым методом. Квантовые осцилляции Шубникова-де Гааза (ШдГ), частота которых определяет сечения и соответствующую им концентрацию 2D дырок, исследовались при температуре 1.5 К в магнитных полях до 6 Тл. Полная концентрация дырок находилась также из эффекта Холла и при нормальном давлении $P = 0$ составляла $N_S = 7.6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Одноосное сжатие осуществлялось в сложной системе [3, 4], представляющей собою упругое кольцо из немагнитной стали 40ХНЮ с жестко закрепленным в нем с помощью низкотемпературной эпоксидной смолы образцом прямоугольной формы (рис.1). Кольцо преобразует растягивающее усилие, прикладываемое вдоль оси x , в сжимающее усилие вдоль оси y (вдоль образца). Растягивающее усилие прилагается к кольцу с помощью специального устройства при температурах жидкого гелия и определяется по удлинению стальной градуированной пружины, составляющей часть этого устройства. Преимущества метода: 1 – жесткая фиксация тщательно подогнанного к кольцу образца позволяет обойти требование строгой плоскопараллельности торцевых граней образца, необходимой при традиционных методах сжатия в наковальнях; 2 – центральная симметрия прикладываемой к образцу нагрузки снимает требование строгой ориентации оси образца в наковальнях вдоль сжимающего усилия, незначительное отклонение от которого приводит к преждевременному его разрушению. В настоящей работе одноосное сжатие до 5 кбар осуществлялось вдоль длины образца в направлении $[110]$.

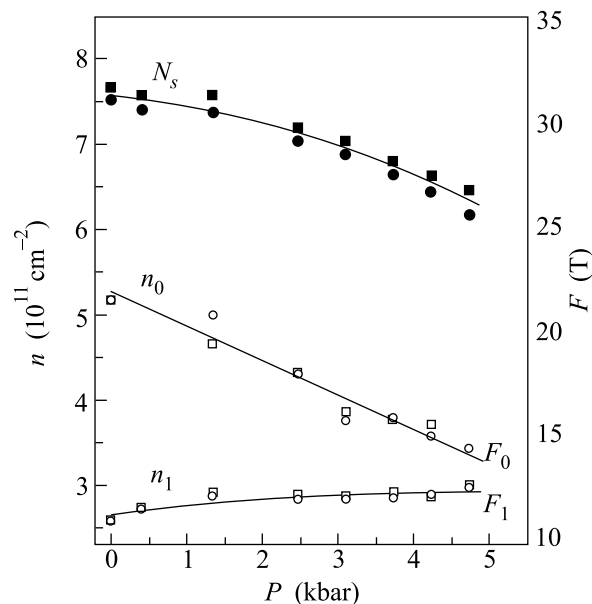


Рис.3. Зависимости концентрации (левая шкала) и частоты ШдГ осцилляций (правая шкала) от величины одноосного сжатия: N_S – полная концентрация дырок в КЯ, n_0 и n_1 – концентрации в спиново-расщепленных подзонах 0 и 1. Различные символы соответствуют разным образцам

Согласно расчету энергетического спектра в гетероструктурах $p\text{-GaAs}/\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ с описанной выше геометрией и концентрацией носителей [2] заполненным является только основное состояние тяжелых дырок, которое вследствие отсутствия инверсионной симметрии в треугольной КЯ на одиночной гетерогранице расщеплено на две спиново-невыврожденные подзоны. Закон дисперсии в таких подзонах сильно непараболический, а спиновое расщепление на уров-

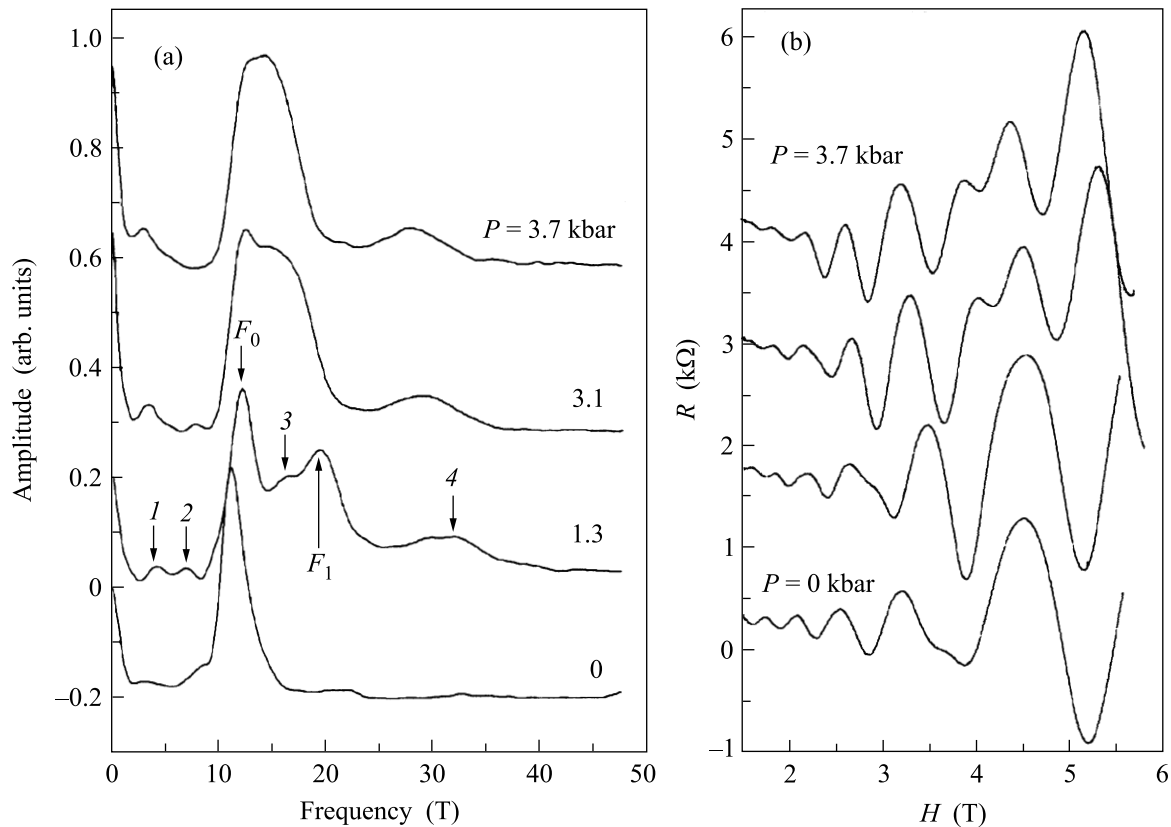


Рис.4. (а) Фурье-спектры и (b) соответствующие им квантовые осцилляции ШдГ при различных одноосных давлениях. F_0 и F_1 – фундаментальные частоты. Магнитопробные частоты обозначены цифрами при $P = 1.3$ кбар: 1) $(F_0 - F_1)/2$; 2) $(F_0 + F_1)/4$; 3) $(F_0 + F_1)/2$; 4) $F_0 + F_1$

не Ферми составляет $\varepsilon_g = 2.14$ мэВ в направлении $[110]$ и $\varepsilon_g = 1.65$ мэВ в направлении $[100]$. Приложение одноосного сжатия уменьшает величину спинового расщепления подзон [2] и ведет к сильной качественной трансформации поверхности Ферми (ПФ) в обеих подзонах (рис.2). Контуры 2D ПФ в подзоне 0 с более тяжелой эффективной массой и в более “легкой” подзоне 1 (соответствующие сечения ПФ – S_0 и S_1) превращаются в импульсном пространстве в вытянутые эллипсы, которые касаются друг друга в направлении сжатия $[110]$ при некотором критическом давлении $P_K = 2.5$ кбар. Энергетический зазор между подзонами $\varepsilon_g = 0$ в этом направлении и остается очень малым в окрестности P_K . Дальнейшее увеличение давления до 5 кбар снимает вырождение на уровне Ферми в направлении $[110]$, однако фактор близости орбит S_0 и S_1 в этом направлении остается.

Частоты осцилляций ШдГ F_0 и F_1 пропорциональны сечениям ПФ в спиновых подзонах S_0 и S_1 , а соответствующие концентрации дырок $n_0 = eF_0/hc$ и $n_1 = eF_1/hc$. Экспериментальная зависимость этих параметров от величин одноосного сжатия представ-

лена на рис.3. При этом, если частоты F_1 в “легкой” подзоне 1 считаются непосредственно из осцилляционных зависимостей в области низких магнитных полей, то частоты F_0 в “тяжелой” подзоне 0 определяются из фурье-спектров осцилляций магнитосопротивления (рис.4). Величину концентрации n_0 можно также определить как $n_0 = N_H - n_1$, где N_H – полная концентрация, определенная из эффекта Холла. На фоне общего уменьшения полной концентрации 2D дырок в КЯ наблюдается перераспределение носителей между спиновыми подзонами, в результате которого n_0 уменьшается, а величина n_1 возрастает (рис.3). Этот результат находится в согласии с предыдущими данными, полученными нами ранее на гетероструктурах p -GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As с большей концентрацией дырок [5]. Спектральный состав квантовых осцилляций ШдГ, относительно простой при $P = 0$, усложняется по мере увеличения одноосного сжатия, что можно заметить как непосредственно из осцилляционных зависимостей магнитосопротивления от магнитного поля (рис.4b), так и на соответствующих фурье-спектрах (рис.4а).

Прежде чем переходить к их анализу, следует заметить, что малость спинового расщепления ε_g подзона в исследуемых структурах затрудняет наблюдение перехода от режима слабого магнитного поля, где магнитный пробой отсутствует, к режиму сильного магнитного поля, где он проявляется, и при имеющихся в распоряжении магнитных полях до 6 Тл межзонный магнитный пробой в наших образцах можно наблюдать уже в отсутствие одноосного сжатия. Поле пробоя $H_B \approx \varepsilon_g^2 / \varepsilon_F \mu$, где $\mu = e\hbar / m^* c$, а вероятность пробоя $W = e^{-H_B/H}$ [6], и, согласно оценкам, магнитный пробой с вероятностью $W = 0.4$ может проявиться уже в полях $H \geq H_B \approx 3 \div 4$ Тл. На рис.5 преобразования фурье-осцилляций ШдГ при $P = 0$

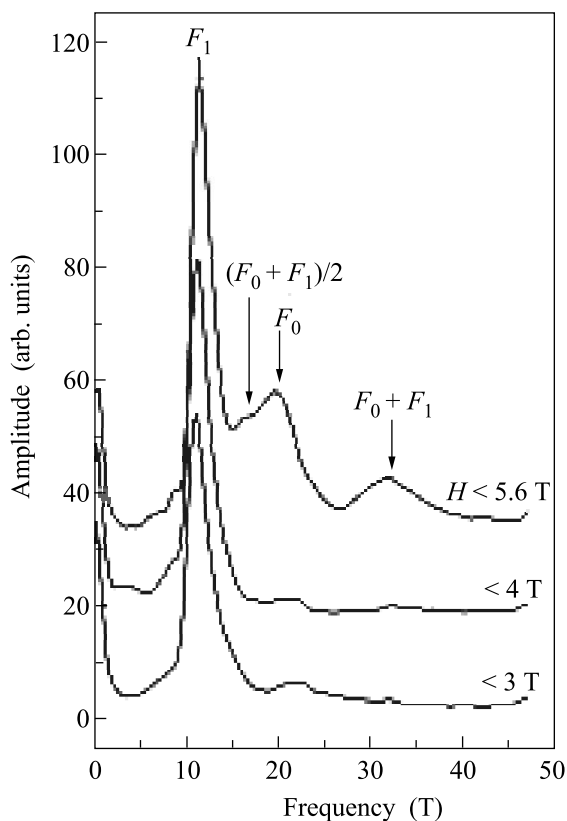


Рис.5. Фурье-спектры осцилляций ШдГ для различных областей магнитных полей в отсутствие сжатия

произведены в различных интервалах магнитных полей. В полях меньше 4 Тл на фурье-спектре присутствует фактически одна частота F_1 , соответствующая сечению S_1 дырок с наименьшей эффективной массой $m_1^* = 0.22 m_0$ [2], тогда как амплитуда осцилляций с частотой F_0 (сечение S_0 дырок с массой $m_0^* \sim 0.9 m_0$) в этой области магнитных полей еще мала, а соответствующий ей пик едва заметен. Однако при $H > 4$ Тл на фурье-спектре рис.5 уже присут-

ствуют обе фундаментальные частоты F_1 и F_0 , а также их сумма $F_0 + F_1$, указывающая на конечную вероятность магнитного пробоя между подзонами. Для однозначности интерпретации развития магнитного пробоя как следствия приложения одноосного сжатия все фурье-спектры на рис.4а соответствуют фурье-преобразованиям осцилляций ШдГ в магнитных полях $H < 4$ Тл (рис.4б).

Усложнение фурье-спектров при $P \geq 1.3$ кбар (рис.4а) связано с изменением ПФ 2D дырок при одноосном сжатии (рис.2). Возможность перехода с одной квазиклассической орбиты на другую в условиях магнитного пробоя изменяет динамику движения носителя заряда и, в случае ПФ, изображенной на рис.2с, помимо классических орбит, состоящих из участков 1–4 (сечение S_0 , частота F_0) и 2–3 (сечение S_1 , частота F_1), появляются орбиты 1–3 и 2–4 (частота $(F_0 + F_1)/2$ и ее гармоника $F_0 + F_1$). При этом фундаментальные частоты F_0 и F_1 , согласно данным рис.3, под давлением сближаются, как и условия их наблюдения, так что при максимальных давлениях они на фурье-спектрах не разрешаются. Чрезвычайно интересным с точки зрения теории магнитного пробоя представляется появление разностной частоты $(F_0 - F_1)/2$, которую можно сопоставить с площадями “лунок” 1–2 и 3–4 на рис.2с. Такие орбиты не разрешены в квазиклассической картине магнитного пробоя, а соответствующие разностные частоты являются результатом квантовой интерференции и не связаны с осцилляциями плотности состояний носителей заряда. Если магнитный пробой фазово-когерентен, то идущие в одном направлении и спаренные магнитным пробоем траектории (типа 1–2 рис.2с) представляют собой специфический “квантовый интерферометр”, базой которого являются сечения, находящиеся между траекториями [6]. Такие разностные интерференционные частоты наблюдались ранее при исследовании магнитного пробоя как в трехмерных материалах (например, ниобии [7]), так в последнее время в 2D органических проводниках [8].

Суммируя изложенное выше, отметим, что в системе 2D дырок в асимметричной треугольной КЯ на гетерогранице GaAs/Al_{0.5}Ga_{0.5}As при одноосном сжатии развивается магнитный пробой между двумя ПФ, принадлежащими различным спиноворасщепленным подзонам основного состояния тяжелых дырок. Индикатором магнитного пробоя служит усложнение фурье-спектров квантовых осцилляций ШдГ под давлением, в котором помимо фундаментальных частот, характеризующих реальные сечения ПФ в пространстве импульсов, появляются комбина-

ционные и разностные частоты, а также их гармоники. Наблюдаемое явление служит прямым экспериментальным подтверждением сильного анизотропного изменения ПФ у 2D дырок при одноосном сжатии, которое было получено ранее в результате численных расчетов. Согласно расчету, величина спинового расщепления подзон на уровне Ферми уменьшается в направлении одноосного сжатия до нуля при $P_K = 2.5$ кбар, что и служит основанием для развития межзонного магнитного пробоя.

Авторы выражают благодарность К. Б. Соренсену за выращивание структур и приготовление образцов и О. П. Хансену за содействие в работе. Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований # 04-02-16861 и НШ-# 1786.2003.2.

1. Н. Б. Брандт, М. Ю. Лавренюк, Н. Я. Минина и др., *ЖЭТФ* **94**, 235 (1988).
2. K. J. Kolokolov, A. M. Savin, S. D. Beneslavski et al., *Phys. Rev.* **B59**, 7537 (1999).
3. N. B. Brandt, V. S. Egorov, M. Yu. Lavrenyuk et al., *Sov. Phys. JETP* **62**, 1303 (1985).
4. Н. Б. Брандт, Н. Я. Минина, М. Ю. Лавренюк, А. М. Савин, Авторское свидетельство № 1259138, Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки, № 35 (1986).
5. O. P. Hansen, J. S. Olsen, W. Kraak et al., *Phys. Rev.* **B54**, 1533 (1996).
6. В сб.: *Электроны проводимости*, под ред. М. И. Каганова и В. С. Эдельмана, М.: Наука, 1985.
7. Н. Е. Алексеевский, К.-Х. Бергель, В. И. Нижанковский и др., *ЖЭТФ* **73**, 700 (1977).
8. Ju. H. Kim, S. Y. Han, and J. S. Brooks, *Phys. Rev.* **B60**, 3213 (1999).