

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ РЕЛАКСАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВУМЕРНОГО ДЫРОЧНОГО ГАЗА НА ГЕТЕРОГРАНИЦЕ GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ОДНООСНЫМ СЖАТИЕМ

*В.Н.Кравченко, Н.Я.Минина, Я.С.Олсен*¹⁾, А.М.Савин, О.П.Хансен*¹⁾*

*Физический факультет Московского государственного университета
им.М.В.Ломоносова
119893 Москва, Россия*

**Niels Bohr Institute, Ørsted Laboratory
DK-2100, Copenhagen, Denmark*

Поступила в редакцию 2 февраля 1995 г.

При одноосном сжатии в системе двумерных (2D) дырок на гетеропереходе GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As в интервале температур 4,2–160 К обнаружено явление, которое по аналогии с остаточной фотопроводимостью может быть названо остаточным пьезосопротивлением. Долговременные релаксации сопротивления наблюдаются как при приложении, так и при снятии сжимающего образца усилия и обладают специфической "памятью". Темп релаксаций увеличивается с ростом температуры, а их временная зависимость обнаруживает двуступенчатый логарифмический характер.

В настоящей работе исследовано электросопротивление двумерного дырочного газа на гетерогранице GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As, легированного Be, при одноосном сжатии до 2,5 кбар в интервале температур 4,2–200 К.

Энергетический спектр в квантовой яме на границе гетероперехода GaAs/Al_xGa_{1-x}As весьма сложен и сильно изменяется при анизотропной деформации. Согласно расчетам [1] и экспериментальным данным, полученным с помощью оптических методов исследования [2, 3], одноосное сжатие существенно смещает положения подуровней легких и тяжелых дырок в квантовой яме и уже при значении волнового вектора $k = 0$ приводит к смешиванию состояний тяжелых и легких дырок. Насколько нам известно, только оптические методы использовались при исследованиях 2D-дырочного газа в GaAs/AlGaAs и других двумерных системах при одноосном сжатии [2, 3], тогда как кинетические характеристики 2D-носителей при этом не изучались. Обнаруженные в настоящей работе долговременные релаксационные процессы (ДРП), индуцированные анизотропной деформацией, ранее в гетероструктурах не наблюдались, хотя похожие явления имели место в образцах антимонида галлия при приложении и снятии одноосной нагрузки [4].

Исследуемая гетероструктура выращена методом молекулярной лучевой эпитаксии в институте Нильса Бора Копенгагенского университета и состоит из имеющей ориентацию [001] по направлению роста подложки из кристаллического GaAs, покрытой нелегированным слоем GaAs толщиной 1 мкм (буферный слой). За буферным слоем следует спейсер, представляющий собой 70 Å нелегированного Al_{0,5}Ga_{0,5}As, за спейсером – активный слой, состоящий из 500 Å Al_{0,5}Ga_{0,5}As, легированного Be до концентраций $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, и, наконец, завершает всю эту структуру слой Al_{0,5}Ga_{0,5}As толщиной 50 Å, легированный

¹⁾ J.S.Olsen, O.P.Hansen.

Ве до концентрации $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Образцы выкальвались по плоскостям скольжения [110] и имели форму параллелепипедов размером $3,0 \times 0,8 \times 0,625 \text{ мм}$. Одноосное сжатие осуществлялось вдоль направления [110]. Контакты были приготовлены напылением Mg/Au либо Zn/Au с последующим отжигом и имели две конфигурации: 1) роль токовых и потенциальных контактов выполняли четыре поперечные полоски (образцы типа PG); 2) стандартная холловская конфигурация (образцы типа PH). Качество контактов контролировалось по линейности вольт-амперных характеристик, которая выполнялась по крайней мере до 50 мкА (рабочий ток 1–2 мкА) при всех исследованных давлениях и температурах. Все описанные ниже явления наблюдаются в равной мере на образцах с обоими типами контактов (7 образцов).

В процессе исследования зависимости сопротивления от величины приложенного к образцу одноосного напряжения наиболее удивительным и неожиданным эффектом явилось наличие ДРП, имеющих место в области достаточно низких температур ($T < 160 \text{ К}$) как при приложении, так и при снятии нагрузки. На рис.1 приведены два цикла нагружения и разгружения образца PH2 при $T = 4,2 \text{ К}$. Одноосное сжатие до давления $P = 0,36 \text{ кбар}$ в момент времени 1 приводит к резкому уменьшению сопротивления образца (точка 2), которое затем медленно увеличивается со временем (интервал 2–3), приближаясь к некоторому стационарному значению $R_{s,2-3}$ (пунктирная линия в интервале 2–3). При гелиевых температурах равновесного значения за время эксперимента достичь не удастся. При снятии нагрузки с образца в момент времени 3 наблюдается обратное поведение – сопротивление образца резко возрастает, "проскакивая" начальное значение R_0 до величины $R_4 > R_0$ (точка 4) с последующей медленной релаксацией к R_0 (штрих-пунктирная линия на рис.1). Повторное нагружение (точка 5) до большего давления $P = 0,73 \text{ кбар}$ приводит к аналогичным процессам в точках 6, 7, 8, причем величина изменения сопротивления при большей нагрузке возрастает. При 4,2 К процесс релаксации при разгрузке образца является практически "замороженным" и на его наличие указывает лишь необратимость сопротивления по отношению к начальной величине R_0 . Это явление позволяет говорить по аналогии с остаточной фотопроводимостью об остаточном пьезосопротивлении.

Отогрев образца до 200 К и достаточно медленное охлаждение до 4,2 К в отсутствие нагрузки (временной интервал 9–10 на рис.1) полностью восстанавливает сопротивление к начальной величине R_0 (точка 10). Это обстоятельство дает нам возможность при заданных давлении и температуре считать стационарным состоянием системы то, в котором она оказывается после ее отогрева до температуры 180–200 К и достаточно медленного охлаждения обратно. Можно ожидать, что аналогичный процесс термоциклирования под нагрузкой приводит нас к стационарному значению сопротивления образца в нагруженном состоянии. На рис.1 стационарные значения сопротивления R_s , соответствующие этим состояниям, отмечены пунктирными линиями. Значению давления одноосного сжатия $P = 0,36 \text{ кбар}$ отвечает $R_{s,2-3}$, а $P = 0,73 \text{ кбар}$ – $R_{s,6-7}$.

Переход системы в стационарное состояние при отогреве является следствием того, что с ростом температуры все наблюдаемые в настоящей работе релаксационные процессы ускоряются. Если в качестве оценочного параметра, характеризующего динамику релаксаций, использовать временной интервал Δt^* , за первую половину которого с начала релаксаций сопротивление

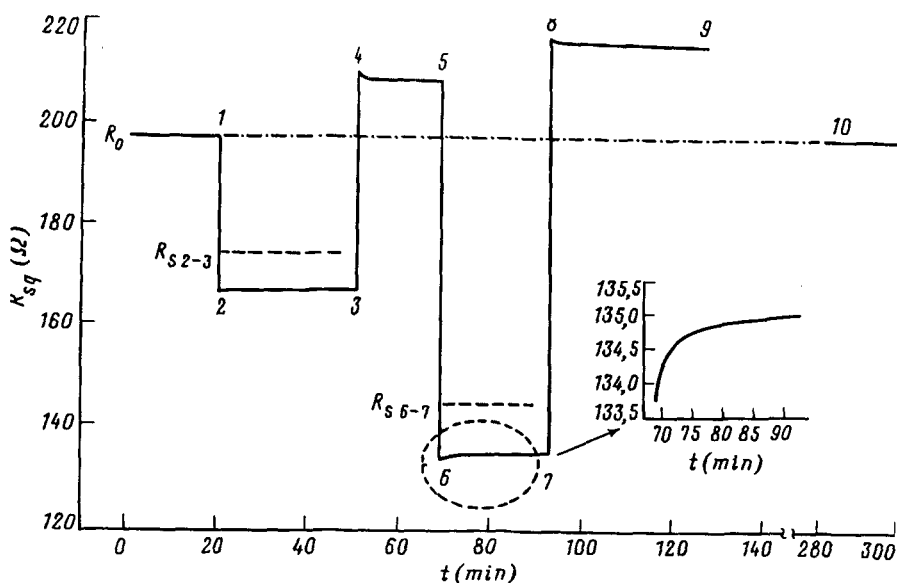


Рис.1. Зависимость сопротивления на квадрат поверхности $R_{s,q}$ образца PH2 от времени t при температуре 4,2К и различных значениях давления одноосного сжатия P : 0-1 - $P=0$; 2-3 - $P=0,36$ кбар; 4-5 - $P=0$; 6-7 - $P=0,73$ кбар; 8-9-10 - $P=0$; в интервале 9-10 осуществляется отогрев образца до 200К и медленное охлаждение до 4,2К

образца достигает значения, которое не изменяется в пределах точности в течение второй половины, то зависимость темпа релаксаций от температуры может быть качественно продемонстрирована на примере приведенных ниже данных для образца PG-2. Здесь Δt^* представлено для разных температур и для двух случаев релаксаций: а) после приложения и б) после снятия давления одноосного сжатия $P=0,87$ кбар:

Температура:	144 К,	100 К,	77 К;
Δt^* после приложения давления 0,87 кбар:	0,5 мин,	3 мин,	более 10 ч;
Δt^* после снятия давления 0,87 кбар:	2 мин,	18 мин,	более 10 ч.

Сопротивление исследуемых образцов GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As как в стационарном, так и в нестационарном состояниях сильно зависит от величины прикладываемого (снимаемого) сжимающего усилия. При этом наличие ДРП приводит к тому, что вид зависимости сопротивления от нагрузки зависит от того, как она получена. Один из примеров такой зависимости, в которую включен процесс термоциклирования после каждого приложения и снятия давления, приведен на рис.2а. Светлые точки дают стационарную зависимость сопротивления 2D-дырочного газа.

Все наблюдаемые релаксационные процессы существенно неэкспоненциальны во времени. Этим объясняется введение эмпирического параметра Δt^* . Однако если представить временную зависимость R в масштабе $\lg(t)$, то большая часть наблюдаемых релаксационных кривых $R(t)$ может быть описана логарифмической зависимостью от времени с двумя линейными участками с

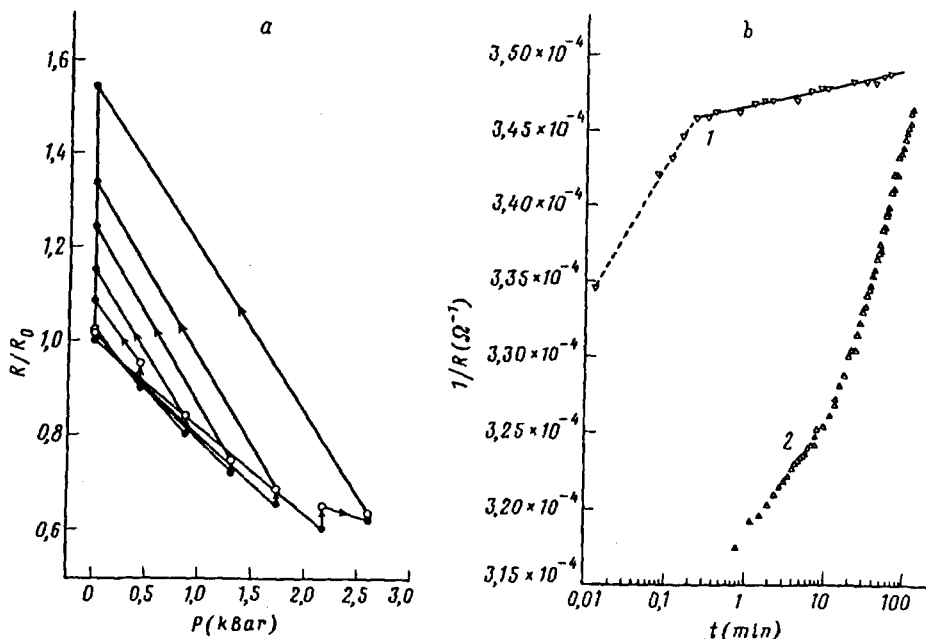


Рис.2. а - Зависимость сопротивления образца PG2 от давления при 4,2К. Черные точки соответствуют состоянию через 20мин после приложения (снятия) давления, а светлые - после отогрева до 200К и охлаждения обратно до 4,2К. Стрелками показана последовательность получения экспериментальных точек. б - Зависимость проводимости образца PG2 от времени при температуре 77К: 1 - после снятия давления 0,86 кбар; 2 - после снятия давления 1,72 кбар

разными наклонами. Общий вид этой зависимости меняется с увеличением значения приложенного (снятого) давления (рис.2б).

Одной из наиболее интересных особенностей обнаруженных ДРП является своеобразная "память" о предыдущих нагружениях и релаксациях образца. Так, если релаксационный процесс после снятия нагрузки (рис.3 интервал 4-5) прерывается кратковременным циклом приложения - снятия возмущающего одноосного напряжения той же величины, что и в предыдущем (1-2-3-4) цикле (рис.3, интервал 5-6-7-8), то сопротивление образца "помнит" свое состояние до последнего цикла нагружения, и последующая релаксация (8-9) является продолжением первой (4-5). Однако если релаксация в нагруженном состоянии происходит достаточно долго (10-11), то после снятия нагрузки процесс (12-13) уже не является продолжением релаксации (8-9), то есть сопротивление образца также "чувствует" и протекавшие в предыдущем состоянии релаксационные процессы.

Исследованные в настоящей работе долговременные релаксации сопротивления 2D-дырочного газа обладают в основном теми же свойствами, что и ДРП в полупроводниковых материалах, описанные в обзоре Шейнкмана и Шика [5], а именно: большие времена релаксации, увеличение темпа релаксаций с ростом температуры, характерная "память" и неэкспоненциальная зависимость от времени. В работе [5] долговременные релаксации сопротивления объясняются на модели неоднородного полупроводника туннелированием (тер-

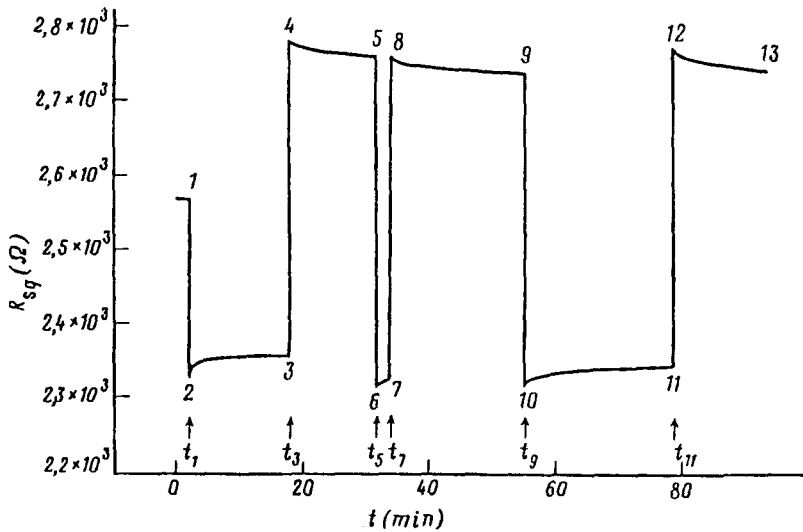


Рис.3. Зависимость сопротивления образца PG2 от времени при температуре 77 К. В моменты времени t_1 , t_5 , t_9 создается одноосное сжатие давлением $P = 0,83$ кбар, а в моменты t_3 , t_7 , t_{11} – давление снимается

моактивацией) носителей заряда через потенциальный барьер из низкоомных областей в высокоомные, или наоборот. Поскольку исследованные гетеропереходы GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As являются ничем иным, как моделированной макронеоднородностью с искусственно созданным потенциальным барьером, ограничивающим низкоомную область 2D-носителей заряда, разумно предположить, что обнаруженные ДРП имеют такую же природу.

Важно отметить, что индуцированные одноосным сжатием ДРП в GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As наблюдаются на фоне сильного падения равновесного значения сопротивления системы 2D-дырок при деформации. Оба эти эффекта, с нашей точки зрения, связаны с перестройкой спектра 2D-дырок в квантовой яме. Если предположить, что при одноосном сжатии уровень Ферми 2D-дырок оказывается ниже, чем уровень Ферми в AlGaAs, где сосредоточены акцепторные примеси, то релаксационные процессы как при приложении, так и при снятии нагрузки могут быть объяснены туннелированием (термоактивацией) неравновесных дырок через потенциальный барьер. Логарифмический характер затухания со временем таких процессов рассматривался ранее в работе [6] для релаксаций фотопроводимости в GaAs/AlGaAs, где он был объяснен спецификой рекомбинации пространственно разделенных барьером носителей заряда – 2D-электронов и ионизованной примеси в массивной части образца.

Очевидно, что исчерпывающее объяснение обнаруженных ДРП может быть получено только на основе данных об изменении с деформацией энергетического спектра 2D-дырок в квантовой яме, тем более, что наблюдаемое сильное падение сопротивления (рис.2а) имеет место при практически постоянном коэффициенте Холла.

В заключение мы приносим благодарность К.Б.Соренсену²⁾ за выращивание образцов и приготовление контактов.

²⁾С.В.Соренсен.

Настоящая работа была поддержана NATO Linkage Grant 931579, а также грантами 11-1080-1 и 11-1124-1, предоставленными Датским Советом по научным исследованиям.

-
1. J.Lee and M.O.Vassell, *Phys. Rev. B* **37**, 8861 (1988).
 2. C.Jogannath, E.S.Koteles, J.Lee et. al., *Phys. Rev. B* **34**, 7027 (1986).
 3. K.Zitouni, N.Saidi, A.Kadri et al., *High Pressure Research* **9**, 93 (1992).
 4. А.Я.Вуль, А.Я.Шик, *ФТП* **8**, 1952 (1974).
 5. М.К.Шейнкман, А.Я.Шик, *ФТП* **10**, 209 (1976).
 6. H.J.Quesser and D.E.Theodorou, *Phys. Rev. B* **33**, 4027 (1986).