

(ОЦК), а также фазы Fe_2Ti . Количественное содержание фаз FeTi и Fe_2Ti в смеси увеличивается с ростом времени размола за счет изменений в концентрациях твердых растворов и уменьшения их количества. Кинетика этих процессов, рассчитанная по данным мессбауэровских спектров, представлена на рис. 3.

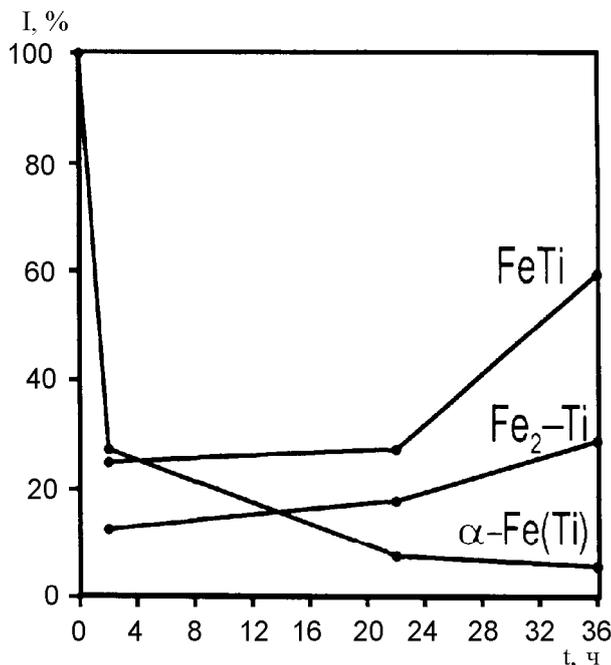


Рис. 3. Кинетика фазовых превращений, происходящих в эквипомной порошковой смеси Fe-Ti в процессе механического сплавления при увеличении времени размола

В результате 36 ч размола получается неоднородная смесь, которая в основном содержит фазы FeTi и Fe_2Ti в пропорции 5:4. В смеси также содержится до 11% неупорядоченных твердых растворов, близких по стехиометрии к фазе FeTi .

Авторы благодарят профессора А. А. Кацнельсона за полезные обсуждения полученных результатов.

Литература

1. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск, 1984.
2. Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии неорганических веществ. Новосибирск, 1983.
3. Umemoto M., Masuyama K., Raviprasad K. // Mat. Sci. Forum. 1997. 235–238. P. 47.
4. Schlump W., Grewe H. // Tech. Mitt. Krupp. 1989. No.2. P. 69.
5. Seidel M., Eckert J., Schultz L. // Mat. Sci. Forum. 1997. 235–238. P. 29.
6. Chien C.L., Liou S.H. // Phys. Rev. B31, No. 12. P. 8238.
7. Chien C.L., Liou S.H. // Appl. Phys. 1984. 55(6). P. 1820.
8. Литвинов В.С., Каракишев С.Д., Овчинников В.В. Ядерная γ -резонансная спектроскопия сплавов. М., 1982.
9. Zaluski L., Tessier P., Ryan D.H. et al. // J. Mater. Res. 1993. 8, No. 12. P. 3059.
10. Бродовой А.В., Братанич Т.И., Лашкаров Г.В. и др. // ФТТ. 1995. 37, № 11. С. 3446.

Поступила в редакцию
02.07.97

УДК 621.315.592

ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ РЕЛАКСАЦИИ ПЬЕЗОСОПРОТИВЛЕНИЯ В $p\text{-GaAs/AlGaAs}$

Е. В. Богданов, К. И. Колоколов, В. Н. Кравченко, Н. Я. Минина, А. М. Савин, О. П. Хансен*)

(кафедра физики низких температур и сверхпроводимости)

При температурах 4,2 и 77 К исследовано влияние инфракрасного излучения и сильного электрического поля на стимулированные одноосным сжатием долговременные релаксации сопротивления двумерных дырок на гетерогранице $p\text{-GaAs/Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$. Обнаружено, что разогрев носителей заряда подсветкой, а при 77 К и электрическим полем, вызывает резкое падение времен релаксации. При 4,2 К электрическое поле выше 200 В/см само вызывает переключение образцов в метастабильное высокоомное состояние.

Долговременные релаксации сопротивления, индуцированные одноосным сжатием, наблюдались недавно [1] на гетероструктурах $p\text{-GaAs/Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ при температурах ниже 160 К. Так, при 77 К после приложения или снятия нагрузок стационарные значения сопротивления достигались за время $\Delta t = 10^3 \div 10^4$ с, а при 4,2 К $\Delta t \gg 10^4$ с. При этом стационарное состояние можно было получить путем нагрева образца до 200 К и последующего охлаждения до температуры проведения

эксперимента. Ранее похожие явления при одноосных деформациях наблюдались только на объемных образцах (например, в GaSb [2]).

В настоящей работе при 4,2 и 77 К исследовано влияние сильного электрического поля и инфракрасного (ИК) излучения на индуцированные одноосным сжатием долговременные релаксации сопротивления двумерного дырочного газа на гетерогранице $\text{GaAs/Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$, легированного Be.

*) Лаборатория Эрстеда Института Нильса Бора Копенгагенского университета, Дания.

Ориентированные вдоль направления [110] образцы с характерными размерами $3 \times 0,8 \times 0,625$ мм были получены скалыванием по плоскостям (110) из гетероструктуры, использовавшейся в работе [1]. Исходная гетероструктура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии в институте Нильса Бора Копенгагенского университета и состояла из ориентированной вдоль [001] подложки из кристаллического GaAs, буферного слоя толщиной 1 мкм из нелегированного GaAs, спейсера толщиной 7 нм из нелегированного $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$, активного слоя толщиной 50 нм из $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$, легированного Be (концентрация до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и слоя толщиной 5 нм из GaAs, легированного Be (концентрация до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Контакты изготавливались напылением слоев Zn и Au с последующим отжигом в двух конфигурациях. В одной роль токовых и потенциальных контактов выполняли четыре поперечные полоски, напыленные прямо на образец. В другом случае изготавливалась стандартная холловская конфигурация. Качество контактов контролировалось по линейности вольт-амперных характеристик, которая сохранялась по крайней мере до 50 мкА, тогда как рабочий ток составлял всего $1 \div 2$ мкА.

Все описанные ниже эффекты наблюдаются на образцах с обоими типами контактов при ИК-подсветке как от диода на основе GaAs с максимумом излучения на 0,92 мкм, так и от микролампы, использовавшейся в качестве теплового источника излучения. Образцы и источники света в специальном медном экране помещались непосредственно в жидкий гелий или азот для исключения прямого термического нагрева. Для измерений в сильных электрических полях использовалась исключаящая перегрев импульсная методика. Прямоугольные импульсы напряжения длительностью $30 \div 400$ нс и частотой повторения $1 \div 100$ Гц вырабатывались генератором на ртутном реле. Для одноосного сжатия образцов в направлении [110] использовалась методика, описанная в работе [3].

При низких температурах на исследованных образцах, как и в работе [1], наблюдаются индуцированные одноосным сжатием долговременные релаксации сопротивления двумерного дырочного газа на гетерогранице p -GaAs/ $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$ (см. временные интервалы 1–5 на рис. 1 и 2). Они проявляются в медленном увеличении (после приложения нагрузки) или уменьшении (после снятия нагрузки) сопротивления с последующим выходом на стационарное значение. Характерное время этих релаксационных процессов превышает 10^4 с при 4,2 К и быстро падает при увеличении температуры [1]. Это проявляется, в частности, в исчезновении заметной разницы между стационарным значением сопротивления и его величиной в индуцированном нагрузкой метастабильном состоянии при нагреве до $150 \div 160$ К (рис. 3). При этом стационарные значения сопротивления можно получать нагревом образца до 200 К с последующим медленным охлаждением до температуры проведения эксперимента [1].

Как видно из рис. 1, ИК-подсветка в течение $10 \div 30$ с позволяет получить стационарные значения сопротив-

ления даже при гелиевых температурах как после приложения нагрузки (интервал 9–10), так и после ее снятия (интервалы 5–6 и 13–14), а если цикл сжатия проводится в условиях непрерывной подсветки, то долговременные релаксации не отмечаются. Таким образом, освещение

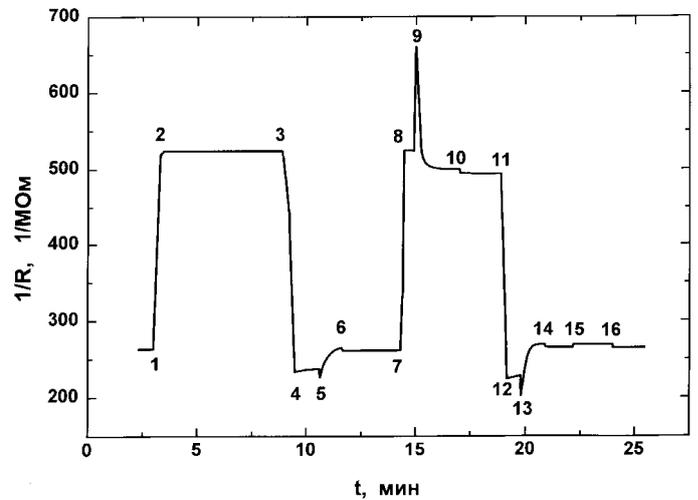


Рис. 1. Зависимость проводимости $1/R$ образца от времени при температуре 4,2 К. В интервалы времени 1–2, 7–8 создается, а в промежутки 3–4, 11–12 снимается одноосное напряжение сжатия $\sigma = 1,04$ кбар. В интервалах 5–6, 9–10, 13–14, 15–16 осуществляется ИК-подсветка

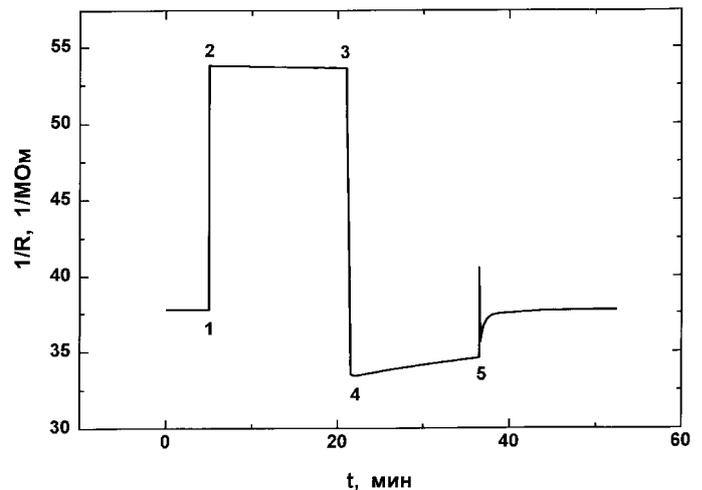


Рис. 2. Зависимость проводимости $1/R$ образца от времени при температуре 77 К. Во временной интервал 1–2 создается, а в промежутке 3–4 снимается одноосное напряжение сжатия $\sigma = 1,47$ кбар. В момент 5 на образец подается несколько импульсов сильного электрического поля $E = 3000$ В/см

существенно ускоряет релаксационные процессы и может быть использовано для получения стационарного значения сопротивления вместо термического нагрева до 200 К, как это предлагалось ранее [1]. Следует также отметить сложную кинетику фотопроводимости образцов (наличие положительного и отрицательного вкладов) в индуцированных сжатием метастабильных состояниях (интервалы 5–6, 9–10 и 13–14 на рис. 1), тогда как в стационарном состоянии подобные аномалии не отмечаются (интервал 15–16 на рис. 1).

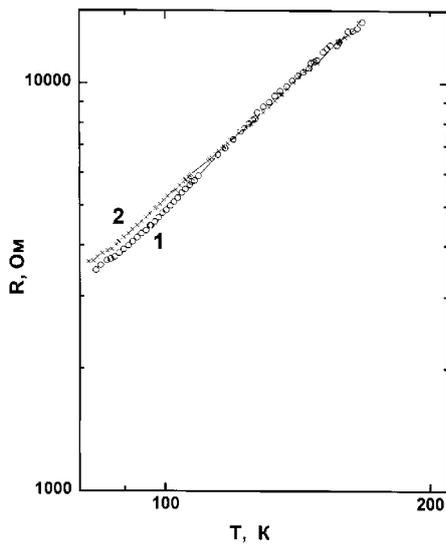


Рис. 3. Температурные зависимости сопротивления R образца, полученные в исходном стационарном состоянии (1) и в ходе отогрева после осуществленного при 77 К цикла ввода и вывода нагрузки $= 1,04$ кбар (2)

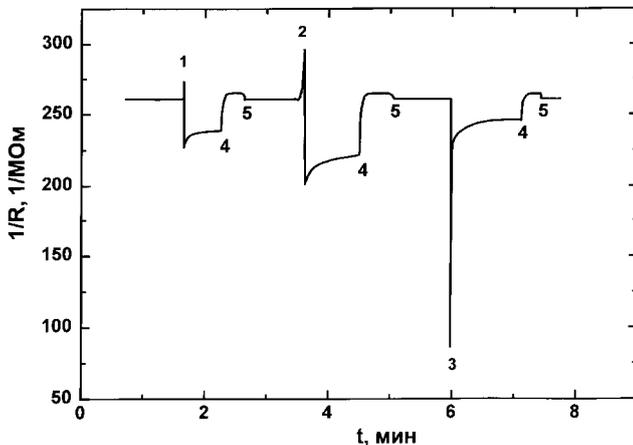


Рис. 4. Зависимость проводимости $1/R$ образца от времени при температуре 4,2 К в условиях подачи единичных импульсов сильного электрического поля напряженностью $E = 200$ (1), 800 (2) В/см одной полярности и $E = 1000$ В/см (3) другой полярности. В интервалах времени 4–5 осуществляется ИК-подсветка

При 77 К наблюдается ускорение индуцированных одноосной деформацией долговременных релаксаций и при воздействии импульсов сильного электрического поля $E \geq 3000$ В/см (рис. 2). Что касается отмечаемого в момент 5 пика, то он связан с кратковременной перегрузкой измерительной аппаратуры под действием высоковольтных импульсов.

В области гелиевых температур достаточно сильное электрическое поле ≥ 200 В/см само вызывает переключение образцов в чувствительное к ИК-подсветке долгоживущее высокоомное состояние (рис. 4). Заметная величина этого стимулированного полем сопротивления наблюдается при температурах ниже $60 \div 70$ К (рис. 5), тогда как критическая температура, при которой исчезает разница между стационарным значением сопротивления и его величиной в индуцированном одноосным сжатием метастабильном состоянии, достигает $150 \div 160$ К (рис. 3). Именно благодаря

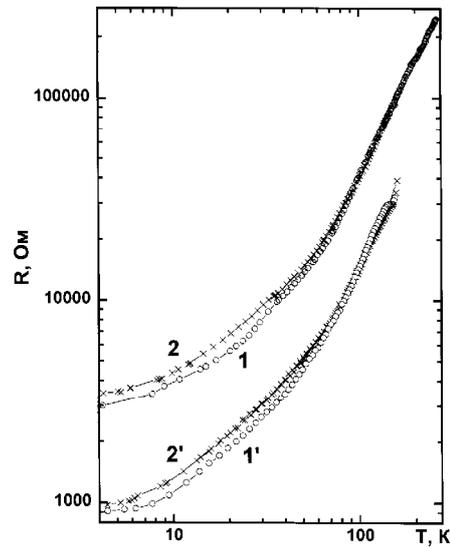


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления R всего образца (1, 2) и его центральной части (1', 2') в исходном стационарном состоянии (1, 1'), а также полученные в ходе отогрева после подачи на образец при 4,2 К импульсов сильного электрического поля $E = 3000$ В/см (2, 2')

различию критических температур эффектов удается наблюдать ускорение индуцированных деформациями релаксаций под действием сильного электрического поля при 77 К (рис. 2). Возможность переключения образцов в высокоомное состояние импульсами разной полярности (рис. 4) и отсутствие заметной неоднородности в относительной величине эффекта по длине образца (рис. 5) указывают на то, что связь этого явления с процессами в контактах маловероятна.

Долговременные релаксации сопротивления в объемных полупроводниковых материалах обычно связывают с наличием энергетических барьеров разной природы [4]. Поскольку исследованные структуры p -GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As являются не чем иным, как модельной системой с искусственно созданным потенциальным барьером, то кажется естественным воспользоваться подобными моделями и в этом случае. Однако, как отмечалось в работе [1], долговременные релаксации и сильное падение сопротивления при одноосном сжатии в системе двумерных дырок не сопровождаются заметным изменением полной концентрации носителей, как должно было бы происходить в случае туннелирования носителей через барьеры. Так, согласно результатам исследований квантового эффекта Холла и осцилляций Шубникова–де Гааза, при максимальных нагрузках $P = 2,5$ кбар происходит существенное перераспределение носителей между двумя спин-расщепленными подзонами с разными эффективными массами, тогда как изменение общей концентрации двумерных дырок в квантовой яме не превосходит $5 \div 6\%$ [5]. В то же время необратимость величины сопротивления после цикла ввода-вывода нагрузки может достигать $50 \div 60\%$ [1].

Если ограничиваться подсистемой носителей заряда, то можно было бы связать стимулированные одноосным сжатием долговременные процессы с перераспределением носителей между спин-расщепленными

дырочными подзонами. Такое перераспределение при наличии запрета на процессы с переворотом спина может иметь большие времена релаксации. Крайняя чувствительность указанного механизма к внешним воздействиям, активирующим процессы с участием фотонов или многочастичные переходы, полностью соответствует результатам настоящей работы. Однако исключительно большие характерные времена наблюдаемых релаксаций пьезосопротивления, к примеру почти полное их «замерзание» при 4,2 К, свидетельствуют о том, что более вероятна их связь с процессами в решеточной подсистеме типа изменения зарядовых состояний примесей или дефектов на гетерогранице или в активном слое. Большая величина атомных масс и низкие температуры делают подобные процессы крайне медленными (времена релаксаций имеют макроскопические значения). В этом случае происходит изменение интенсивности рассеяния на заряженных примесях и релаксации обусловлены изменением подвижности, а не концентрации двумерных носителей. При таком механизме подсветка или сильные электрические поля также могут стимулировать релаксации, например благодаря появлению большого числа фононов, испускаемых горячими носителями заряда. Оценка электронной температуры T_e , выполненная основанная на сравнении электрополевой и температурной зависимостей сопротивления методом [6], для электрических полей $E \geq 3000$ В/см, в которых и наблюдается ускорение индуцированных сжатием долговременных релаксаций под действием электрического поля (рис. 2), приводит при 77 К к значениям $T_e \geq 150 \div 200$ К. Как раз такие температуры являются критическими для наблюдения долговременных релаксаций пьезосопротивления (рис. 3), хотя столь хорошее согласие полученных величин можно считать до определенной степени случайным, учитывая грубость оценки T_e .

Явление переключения в высокоомное состояние в системе двумерных электронов под действием электрического поля недавно [7] наблюдалось в дельта-легированных GaAs-гетероструктурах и связывалось с переходами носителей на DX-центры, наличие которых подтверждалось наблюдением значительного по величине эффекта задержанной фотопроводимости у исследованных в работе [7] образцов. Прямые данные

о существовании подобных центров (-центры?) в гетероструктурах на основе p -GaAs/Al_{0,5}Ga_{0,5}As, насколько нам известно, отсутствуют, однако имеются указания на то, что примесь Be образует в Al_xGa_{1-x}As различные типы примесных состояний [8], в частности глубоких уровни [9].

Механизм переключения системы двумерных дырок в высокоомное состояние под действием электрического поля скорее всего отличен от природы долговременных релаксаций сопротивления, индуцированных одноосным сжатием, так как эти эффекты характеризуются заметно различающимися критическими температурами (см. рис. 3 и 5). Качественно отличается и отклик на ИК-подсветку образцов в индуцированных одноосным сжатием и полем метастабильных состояниях (см. интервалы 5–6, 9–10, 13–14 на рис. 1 и интервалы 4–5 на рис. 4). Однако, по совокупности имеющихся данных, для объяснения обоих явлений представляется разумным провести исследование примесных состояний Be в Al_{0,5}Ga_{0,5}As методами фотолюминесценции и релаксационной спектроскопии глубоких уровней как в нормальном, так и деформированном состояниях.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 96-15-96500 и 97-02-17685).

Литература

1. Кравченко В.Н., Минина Н.Я., Олсен Я.С. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1995. **61**. С. 417.
2. Вуль А.Я., Шук А.Я. // ФТП. 1974. **8**. С. 1857.
3. Брандт Н.Б., Егоров В.С., Лавренко М.Ю. и др. // ЖЭТФ. 1985. **62**. С. 1303.
4. Шейкман М.К., Шук А.Я. // ФТП. 1976. **10**. С. 209.
5. Hansen O.P., Olsen J.S., Kraak W. et al. // Phys. Rev. 1996. **B54**. P. 1533.
6. Коцуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М., 1970.
7. Кульбачинский В.А., Лукин Р.А., Богданов Е.В. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1996. **63**. С. 326.
8. Ogawa J., Tamamura K., Akimoto K., Mori Y. // J. Appl. Phys. 1988. **63**. P. 2765.
9. Morita M., Kobayashi K., Suzuki T., Okano Y. // Jap. J. Appl. Phys. 1989. **28**. P. 553.

Поступила в редакцию
30.05.97