

УДК 621.315.572

САМОПОДДЕРЖИВАЮЩИЕСЯ ОСЦИЛЛЯЦИИ ТОКА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ТРАНСПОРТЕ В СВЕРХРЕШЕТКАХ GaAs/AlGaAs С ШИРОКИМИ КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Ю. А. Митягин, В. Н. Мурзин, А. А. Пишулин, И. П. Казаков

В сверхрешетках GaAs/AlGaAs с широкими квантовыми ямами проведены исследования, как экспериментальные, так и посредством численного моделирования, эффекта незатухающих осцилляций тока при поперечном транспорте, обусловленных формированием границы домена электрического поля при низких уровнях легирования структур. Обнаружен ранее не наблюдавшийся эффект периодической и сильной зависимости частоты осцилляций от напряжения смещения. Период указанной зависимости соответствует периоду ОДП резонансов в статических ВАХ сверхрешеток. Частота осцилляций при изменении напряжения в пределах одного периода изменялась в несколько раз. Показано, что наблюдаемый эффект обусловлен особенностями свойств системы в непосредственной близости от концентрационного порога неустойчивости.

В последние годы возник дополнительный интерес к изучению явлений, связанных с образованием доменов электрического поля при поперечном транспорте в полупроводниковых сверхрешетках, обусловленный, с одной стороны, развитием теоретических методов описания процессов резонансного туннелирования в таких структурах [1–3], и, с другой стороны, открытием новых эффектов, обусловленных резонансно-туннельным характером протекания тока при поперечном транспорте в сверхрешетках – токовой мультистабильности [4, 5] и возникновения самоподдерживающихся высокочастотных

осцилляций тока в поперечном постоянном электрическом поле [6 – 10]. Эффект самоподдерживающихся осцилляций тока обусловлен весьма специфическим типом токовой неустойчивости, связанной с возникающей при определенных условиях нестабильностью положения границы домена электрического поля и представляет как фундаментальный, так и определенный прикладной интерес, поскольку частота осцилляций может варьироваться при изменении параметров структур, согласно теоретическим оценкам [6], в весьма широких пределах – от десятков кГц до величин ~ 100 ГГц. Эффект осцилляций тока наблюдался в слабосвязанных сверхрешетках с пониженным уровнем легирования [7 – 9]. К настоящему времени экспериментальные исследования этого эффекта выполнены на ограниченном наборе структур, и объяснение явления далеко от завершения. Поэтому необходимость экспериментальных исследований в этом направлении с целью выяснения условий существования эффекта и связи частотных характеристик осцилляций с параметрами сверхрешеток (ширинами квантовых ям и барьеров, степени и характера легирования) сохраняет свою актуальность.

Данная работа посвящена исследованиям, как экспериментальным, так и методами численного моделирования, эффекта незатухающих осцилляций тока, обусловленных неустойчивостью границы домена электрического поля при поперечном транспорте в сверхрешетках $GaAs/AlGaAs$ с широкими квантовыми ямами. Исследовались выращенные методом МПЭ сверхрешетки $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ n -типа (ширина ям – 250 Å, ширина барьеров – 100 Å, 30 периодов), заключенные между двумя сильно легированными ($2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) слоями n^+ - $GaAs$. Уровень легирования структуры (объемная концентрация легирующей примеси кремния $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) выбран достаточно низким, чтобы обеспечить, в соответствии с рекомендациями теории, искомый режим неустойчивости доменной границы. Измерения проводились на мезоструктурах с диаметром мез 500 мкм и Cr/Au контактами, изготовленными вакуумным напылением со стороны верхних частей мез и на обратной стороне n^+ - $GaAs$ подложки.

Схема включения структуры приведена на вставке на рис. 1. Постоянное напряжение смещения U прикладывалось к образцу, а ток измерялся с помощью нагрузочного сопротивления R , сигнал с которого по коаксиальному кабелю подавался на вход системы регистрации. Сопротивление R выбиралось достаточно малым (50 – 150 Ом), чтобы не исказить существенным образом вольт-амперные характеристики образца.

Выбор типа структур был обусловлен наличием в каждой из квантовых ям нескольких подзон размерного квантования и соответственно возможностью наблюдать в них формирование нескольких типов доменов электрического поля, соответствующих ре-

зонансному туннелированию из первой подзоны предыдущей ямы в одну из верхних подзон последующей ямы.

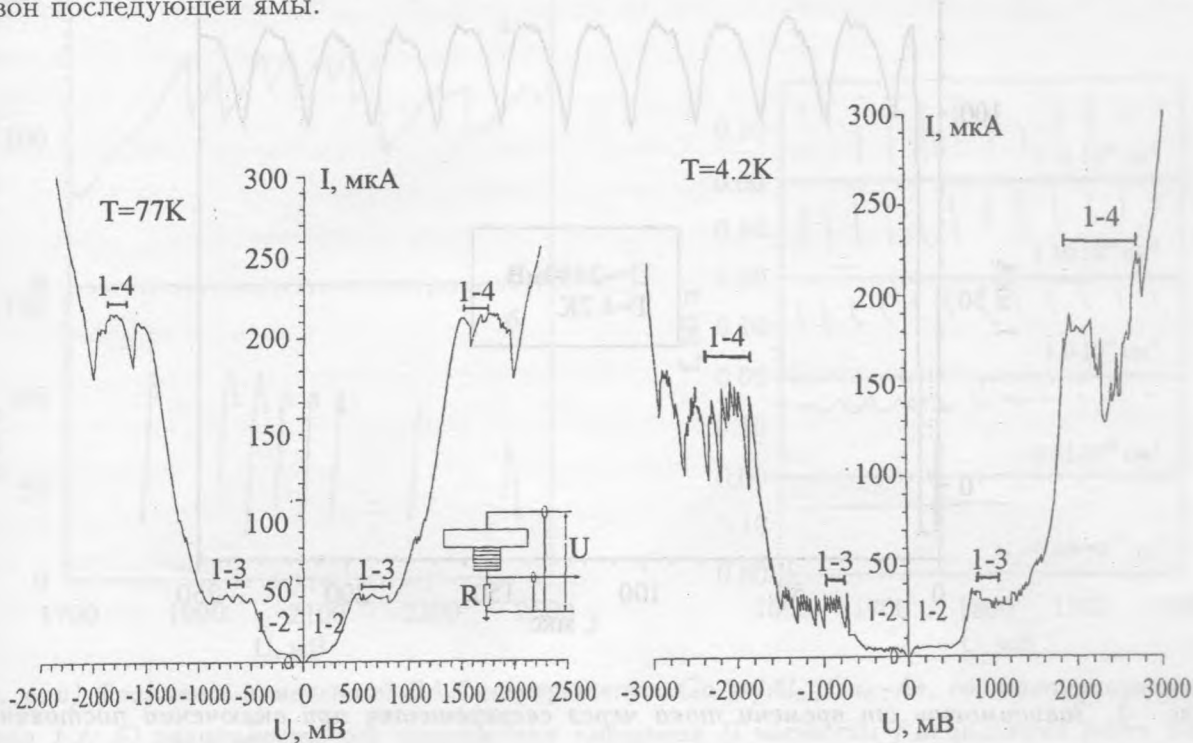


Рис. 1. Измеренные статические вольт-амперные характеристики сверхрешеток $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ при $T = 77 K$; на вставке – схема включения структуры.

Рис. 2. Измеренные статические вольт-амперные характеристики сверхрешеток $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ при $T = 4.2 K$.

Статические вольт-амперные характеристики (ВАХ) сверхрешеток (усредненные по времени), измеренные при температурах 77 и 4.2 K, приведены на рис. 1 и 2. При обеих полярностях приложенного напряжения ВАХ имели характерный ступенчатый вид с несколькими платообразными участками, обусловленными формированием доменов электрического поля и дискретным перемещением границы домена вдоль оси сверхрешетки. Общее количество наблюдаемых платообразных участков (4) соответствует числу уровней размерного квантования в каждой из квантовых ям (5) (последний платообразный участок на рис. 1 и 2 не показан).

Измерения с временным разрешением показали, что при определенных величинах напряжения смещения (соответствующих платообразным участкам ВАХ) возникают

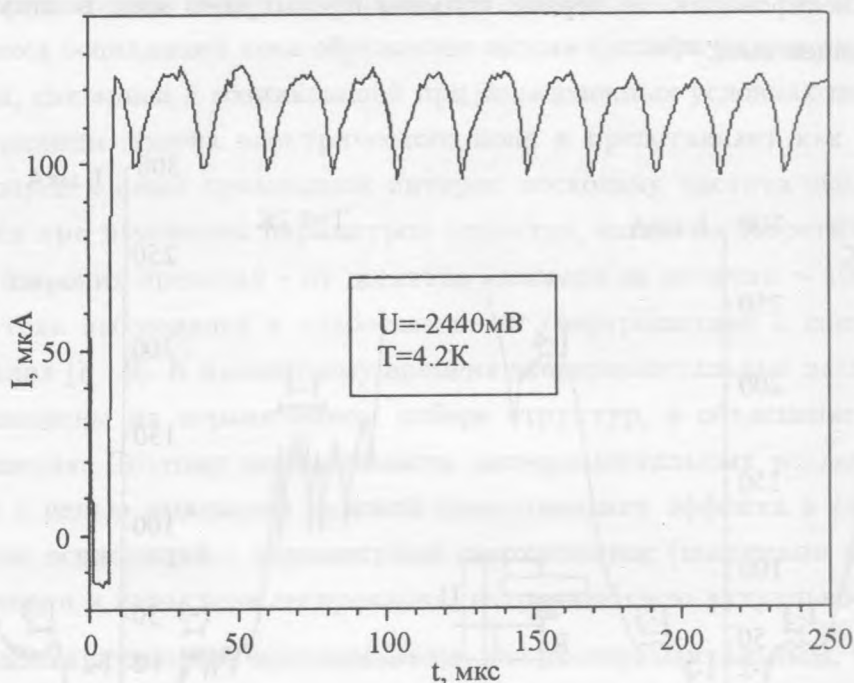


Рис. 3. Зависимость от времени тока через сверхрешетку при включении постоянного напряжения смещения U .

незатухающие осцилляции тока через структуру. Типичная картина осцилляций приведена на рис. 3 при температуре $T = 4.2 \text{ K}$, а области значений напряжения смещения, при которых наблюдался эффект, отмечены на рис. 1 ($T = 77 \text{ K}$) и рис. 2 ($T = 4.2 \text{ K}$) горизонтальными отрезками. Частотные характеристики осцилляций не зависели от параметров измерительной цепи, что свидетельствует о внутренней природе токовой неустойчивости, ответственной за эффект осцилляций. Осцилляции наблюдались на плато ВАХ, соответствующих туннельным резонансам 1-3, 1-4 и 1-5; при этом частота осцилляций возрастала с увеличением номера туннельного резонанса. Так, при $T = 77 \text{ K}$ частота основной гармоники осцилляций на плато 1-3 ($U = 540 - 1000 \text{ мВ}$) составляла $\sim 60 \text{ кГц}$, на плато 1-4 ($U = 1500 - 2000 \text{ мВ}$) – $250 - 300 \text{ кГц}$, на плато 1-5 ($U = 3050 - 3150 \text{ мВ}$) – $6 - 8 \text{ МГц}$. Наблюдаемое увеличение частоты объясняется увеличением вероятности туннелирования в верхние подзоны [5, 9].

При понижении температуры до 4.2 K наблюдались осцилляции тока, но с несколько более низкими частотами. Если в случае положительной полярности приложенного напряжения не наблюдалось заметной зависимости частоты осцилляций от напряжения,

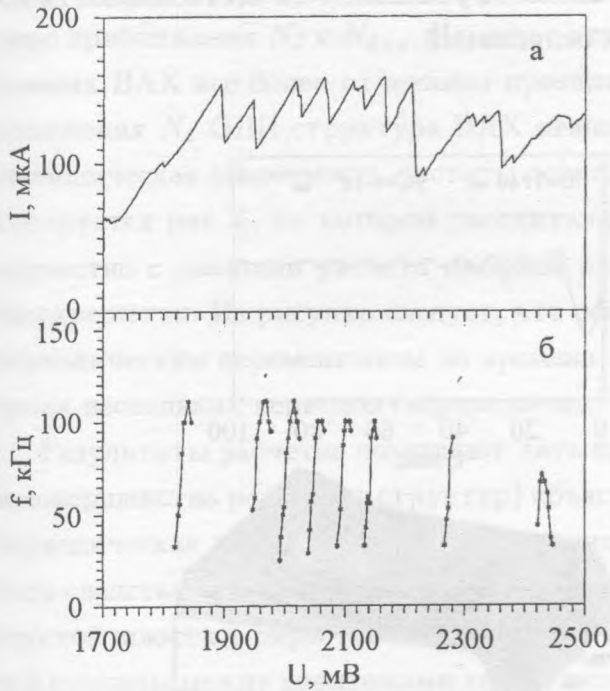


Рис. 4. а) Фрагмент измеренной ВАХ сверхрешетки $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, соответствующий плато 1-4; б) зависимость от напряжения смещения U частоты f осцилляций тока для этой же структуры. $T = 4.2 K$.

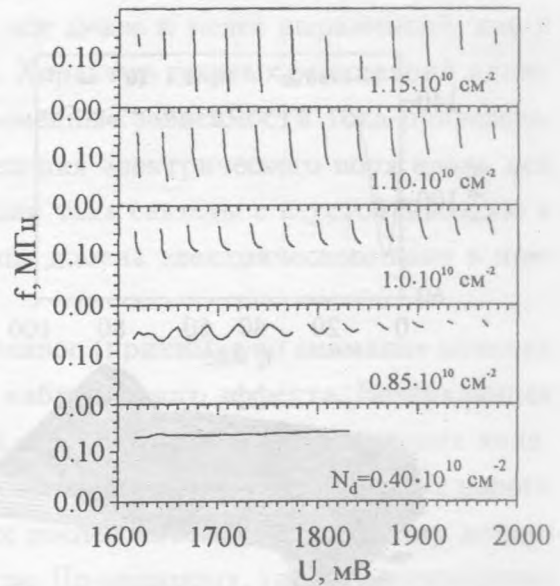


Рис. 5. Рассчитанные зависимости от напряжения смещения частоты осцилляций тока для сверхрешеток $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ с разной степенью легирования.

то в противоположной полярности была обнаружена ранее не наблюдавшаяся сильная и периодическая зависимость частоты осцилляций от напряжения смещения, приведенная на рис. 4. При этом в пределах одного периода частота осцилляций, как видно из рис. 4, плавно изменяется по величине в несколько раз. Обнаруженная периодическая зависимость $f(U)$ коррелирует с периодом ОДП (отрицательная дифференциальная проводимость) структуры, наблюдаемой в статических ВАХ. При этом осцилляции наблюдаются только на участках ВАХ с положительной дифференциальной проводимостью, что дополнительно свидетельствует о внутренней природе эффекта.

Обнаруженный эффект периодической и сильной зависимости частоты осцилляций от напряжения смещения ранее не наблюдался. Более того, в известных экспериментальных работах осцилляции в сверхрешетках с отчетливо выраженной ОДП-структурой на плато статических ВАХ вообще не имели места. Принято было считать

[9], что отсутствие ОДП-структуры в ВАХ является указанием на нестабильность домена и возможность существования токовых осцилляций.

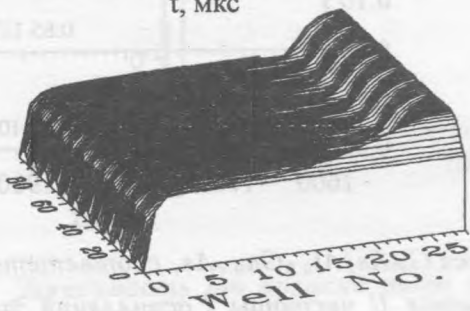
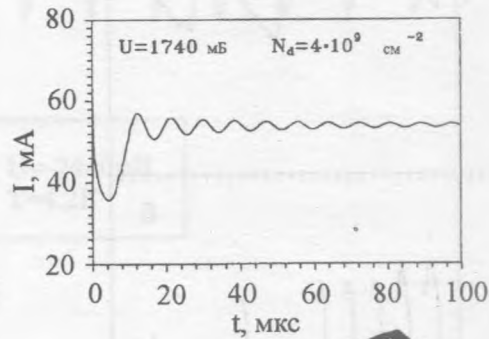
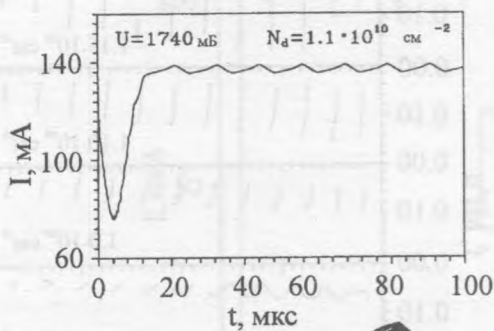


Рис. 6. Рассчитанные токовый отклик при включении смещения и зависимость от времени профиля распределения электрического поля вдоль оси структуры для сверхрешеток GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As ($d_W = 250 \text{ \AA}$, $d_B = 100 \text{ \AA}$, 30 периодов) с различным уровнем легирования.

Для интерпретации результатов эксперимента было выполнено численное моделирование процессов резонансного туннелирования и формирования доменов электрического поля, основанное на кинетической дискретной модели поперечного транспорта в сверхрешетках [5]. Параметры туннелирования для рассматриваемых структур были определены из результатов измерений статических ВАХ по методике, изложенной в [5]. Оказалось, что при уровнях легирования, меньших некоторого критического значения $N_{dкр}$ (для используемых модельных параметров эта величина составляла $N_{dкр} = 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в сверхрешетке возникает неустойчивость домена и связанные с нею незатухающие осцилляции тока. На рис. 5 приведены результаты расчета усредненных по времени ВАХ и зависимости частоты осцилляций тока (в тех случаях, если они имеют место) от напряжения смещения при различных значениях концентрации N_d легирующей примеси вблизи $N_{dкр}$. Как видно из рис. 5, расчет подтверждает возникновение периодического типа зависимости частоты осцилляций от напряжения смещения в непосредственной

близости от $N_{d\kappa p}$, причем обнаруженная периодическая зависимость усиливается по мере приближения N_d к $N_{d\kappa p}$. Наряду с этим по мере приближения N_d к $N_{d\kappa p}$ в рассчитанных ВАХ все более отчетливо проявляется ОДП-структура, и, наоборот, по мере понижения N_d ОДП-структура ВАХ становится все менее и менее выраженной, как и периодическая зависимость частоты осцилляций. Характер токовых осцилляций иллюстрируется рис. 6, на котором рассчитанные временные зависимости тока приведены совместно с данными расчета профиля распределения электрического поля вдоль оси сверхрешетки. Из рисунка следует, что осцилляции тока связаны с неустойчивостью и периодическим перемещением во времени границы домена электрического поля в пределах нескольких периодов сверхрешетки.

Результаты расчетов позволяют дать качественное (принимая во внимание влияние несовершенства реальных структур) объяснение наблюдаемого эффекта. Возникающая периодическая зависимость частоты осцилляций тока от напряжения смещения является следствием особенностей свойств системы в непосредственной близости от порога неустойчивости в окрестности ОДП, отвечающих последовательному перескоку доменной границы между квантовыми ямами в структуре. По-видимому, уровень легирования в экспериментально исследуемых структурах оказался достаточно близким к критическому значению $N_{d\kappa p}$, что и обеспечило возникновение наблюдаемой на эксперименте периодической зависимости частоты осцилляций от напряжения смещения U . Заметим, что характер зависимости $f(U)$ в пределах одного периода, следующий из модельного расчета, несколько отличается от экспериментально наблюдаемого, что указывает на необходимость либо уточнения используемых в расчете туннельных характеристик, либо усовершенствования самой модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 97-02-17474).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Prengel F., Wacker A., Scholl E. Phys. Rev. B, **53**, (1994).
- [2] Bonilla L. L., Galan J., Cuesta J. A., et al. Phys. Rev. B, **50**, 8644 (1994).
- [3] Wacker A. in: Theory of Transport Properties of Semiconductor Nanostructures, ed. by E. Scholl (Chapman and Hall, 1998).
- [4] Kastrop J. et al. Appl. Phys. Lett., **65**, 1808 (1994).

- [5] М и т я г и н Ю., М у р з и н В. Н. Письма в ЖЭТФ, **64**, 146 (1996).
- [6] W a s k e r A., P r e n g e l F., S c h o l l E. Proc. 22nd Int. Conf. Phys. Semicond., ed. by D. J. Lockwood (World Scientific, Singapore, 1995), p. 1075.
- [7] G r a h n H. T. et al. Jap. J. Appl. Phys., **34**, 4526 (1995).
- [8] K a s t r u p J. et al. Phys. Rev. B, **52**, 13761 (1995).
- [9] K a s t r u p J., H e y R., P l o o g K. H., et al. Phys. Rev. B, **55**, 2476 (1997).
- [10] Z h a n g Y., K a s t r u p J., P l o o g K. H., G r a h n H. T. Phys. Rev. Lett., **77**, 3001 (1996).

Поступила в редакцию 2 февраля 2000 г.