

Кинетика трансформации домена электрического поля в слабо связанных сверхрешетках в поперечном электрическом поле

© Ю.А. Митягин[¶], В.Н. Мурзин, Ю.А. Ефимов, А.А. Пищулин, В.Н. Пырков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
119991 Москва, Россия

(Получена 1 марта 2004 г. Принята к печати 4 марта 2004 г.)

С помощью исследований токового отклика в режиме реального времени изучена кинетика трансформации резонансно-туннельной доменной структуры сверхрешетки в резко меняющемся электрическом поле, и показано, что она преимущественно определяется инерционностью перераспределения пространственного заряда, формирующего доменную границу. Обнаружены немонотонная осциллирующая зависимость длительности переходного процесса от амплитуды импульса напряжения и эффект слабой зависимости времени трансформации от длины перемещения доменной границы, свидетельствующие о дискретном характере процессов трансформации. Обсуждаются возможности управления процессами переключения в мультстабильной системе токовых состояний в слабо связанных полупроводниковых сверхрешетках.

Резонансное туннелирование, ответственное за возникновение отрицательной дифференциальной проводимости, приводит в случае слабо связанных сверхрешеток (СР) к возникновению неустойчивостей и формированию однородно упорядоченной резонансно-туннельной структуры, в которой каждому нижнему уровню в одной квантовой яме соответствует определенный возбужденный уровень в соседней квантовой яме. В промежуточных полях такая структура оказывается неустойчивой и разбивается на области с различной, но фиксированной в пределах каждой области напряженностью электрического поля (домены сильного и слабого электрического поля) [1]. Изменение напряжения на концах сверхрешетки приводит к перестройке резонансно-туннельной структуры, что сопровождается расстройкой резонансов, смещением границы между доменами и, как следствие, изменением относительного объема доменов сильного и слабого электрического поля [1–5]. Характер перестройки существенно зависит от того, в каком именно режиме, т.е. при увеличении или уменьшении напряжения на СР, производится наблюдение [3]. В первом случае особенности формирования резонансно-туннельной структуры определяются максимально возможной величиной резонансного тока в домене слабого электрического поля. В результате резонансные уровни в этом домене должны быть хорошо согласованными и заметно расстроенными в домене сильного поля. Во втором случае условия формирования резонансно-туннельной структуры определяются минимально возможной (не резонансной) величиной проводимости в области домена сильного электрического поля и поэтому все резонансы как в домене сильного, так и в домене слабого поля оказываются существенно расстроенными. Следствием этих особенностей является возникновение токового гистерезиса, мультстабильности и тонкой периодической структуры на обеих ветвях гистерезиса [2,3].

Все эти закономерности, касающиеся формирования и трансформации доменов в медленно меняющемся электрическом поле, хорошо известны и подробно изучены [1–5]. В то же время подобных исследований в быстро меняющемся поле, которые позволили бы напрямую судить о характеристиках самого процесса трансформации, до последнего времени не проводилось.¹ Между тем, такие данные весьма существенны как для понимания физики формирования доменной структуры и особенностей ее изменения в электрическом поле, так и с точки зрения знания временных характеристик, определяющих быстродействие процессов переключения в многоуровневых переключающих и других устройствах [7], основанных на этих эффектах. Выполненные первые экспериментальные исследования в импульсных полях [7–9] доказали принципиальную возможность переключений между устойчивыми токовыми состояниями мультстабильности и позволили оценить характерные времена переключения. Однако более подробных данных о процессах трансформации резонансно-туннельной структуры в электрическом поле получить таким образом было затруднительно. В данной работе впервые с использованием метода регистрации токового отклика в режиме реального времени исследованы закономерности кинетики процессов трансформации резонансно-туннельной структуры в сверхрешетках в условиях быстро меняющегося электрического поля. Выполнено численное моделирование изменений во времени поперечного транспорта, распределения пространственного заряда и других характеристик сверхрешеток в импульсных полях. На основе сопоставления экспериментальных результатов с данными численного моделирования прослежена общая картина явлений трансформации резонансно-туннельной структуры и да-

¹ Проводимые в ряде лабораторий исследования токовых неустойчивостей и явлений типа самоподдерживающихся токовых осцилляций относятся к весьма специфическому случаю слабо легированных сверхрешеток, в которых сам процесс формирования доменной границы оказывается затруднительным из-за недостаточной концентрации носителей заряда [4,6].

[¶] E-mail: mityagin@mail.lebedev.ru

но объяснение обнаруженных особенностей электронных свойств и в том числе поперечного транспорта в слабо связанных сверхрешетках в условиях приложения к ним коротких и длинных импульсных электрических полей.

Исследования выполнены на длиннопериодных сверхрешеточных структурах GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As с широкими квантовыми ямами, обладающих набором подзон размерного квантования. Сверхрешетки (ширина квантовых ям 25 нм, ширина барьеров 10 нм, число периодов 30), заключенные между двумя сильно легированными слоями *n*-GaAs ($2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), изготавливались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs и специально легировались донорной примесью кремния до концентрации $1.2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Электрические измерения проводились на меза-структурах с диаметром мез 500 мкм и контактами Cr/Au, изготовленными вакуумным напылением. Исследовалось изменение поперечной проводимости структуры при некотором фиксированном напряжении на СР в условиях приложения к ней прямоугольных импульсов напряжения различной полярности с достаточно резкими (менее 10 нс) фронтами. Измерения проводились в режиме реального времени и позволяли регистрировать временную зависимость тока, проходящего через структуру, в различные моменты времени вслед за передним фронтом импульса напряжения, во время действия импульса и после его окончания. Амплитуда и длительность импульсов менялись в пределах $\Delta U_p = 0-0.5 \text{ мВ}$ и $\tau_p = 10^{-4}-10^{-7} \text{ с}$ соответственно. Измерения выполнены при температуре $T = 4.2 \text{ К}$.

Как можно видеть из рис. 1, на котором показан фрагмент вольт-амперной характеристики $I(U)$, изготовленные структуры характеризуются наличием хорошо выраженного токового гистерезиса, верхняя и нижняя токовые ветви которого обладают тонкой периодической структурой, и наличием токовых ветвей мультистабильности внутри области гистерезиса. Приведенные данные относятся к интервалу напряжений 1.6–3.0 В, отвечающих формированию в СР домена слабого поля (резонансно-туннельные переходы $1 \rightarrow 2$ между подзонами 1 в предыдущей квантовой яме и подзоной 2 в следующей) и домена сильного электрического поля (резонансно-туннельные переходы $1 \rightarrow 3$). На рис. 1, *b* показан типичный пример измерений величины протекающего через СР тока I в зависимости от времени t при подключении к СР прямоугольных импульсов напряжения. В качестве стартовой выбрана точка $I_A(U_A)$ при $U_A = 2.040 \text{ В}$ на нижней ветви гистерезиса. При подключении импульса ΔU_p отрицательной полярности, приводящего к уменьшению напряжения на сверхрешетке, рабочая точка ВАХ должна сместиться по нижней ветви гистерезиса в сторону меньших значений U до точки $U = U_A - \Delta U_p$. После отключения импульса напряжение на СР должно вернуться к первоначальному значению $U = U_A$. При этом, однако, рабочая точка ВАХ не может двигаться по нижней ветви гистерезиса в прежнее токовое состояние, а должна перемещаться сразу же

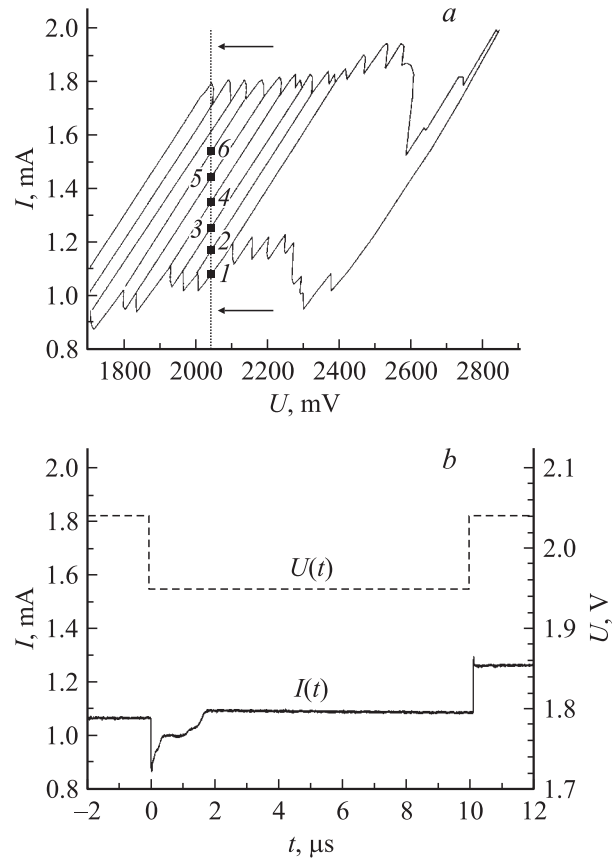


Рис. 1. Фрагмент ВАХ $I(U)$ (*a*) и зависимость тока от времени $I(t)$ (*b*), измеренные при приложении к СР прямоугольных импульсов напряжения отрицательной полярности. Цифрами обозначены устойчивые токовые состояния мультистабильности при фиксированном напряжении $U_A = 2.040 \text{ В}$. Приведенные данные относятся к амплитуде импульсов 0.092 В , обеспечивающей переход $1 \rightarrow 3$. *b*: показано изменение во времени напряжения на СР при подключении импульса ($\tau_p = 10 \text{ мкс}$).

вверх по новой токовой ветви мультистабильности в сторону больших значений тока в новое устойчивое токовое состояние при $U = U_A$ [3,8,9]. Именно такая ситуация наблюдается экспериментально в случае достаточно медленных импульсов ($\tau_p = 10 \text{ мкс}$), длительность которых существенно больше характерных времен перестройки резонансно-туннельной структуры. Как видно из рис. 1, выход значений тока (после некоторого переходного участка) на стационарный в пределах времени действия импульса участок $I = 1.07 \text{ мА}$ (для амплитуды импульса $\Delta U_p = 0.092 \text{ В}$) точно соответствует величине тока на нижней ветви гистерезиса при $U = U_A - \Delta U_p$ ($U = U_A - \Delta U_p = 1.948 \text{ В}$). После окончания импульса ток практически безынерционно увеличивается до нового стационарного значения $I \approx 1.25 \text{ мА}$, отвечающего точке пересечения соответствующей токовой ветви мультистабильности (в данном случае $1 \rightarrow 3$), с прямой $U = U_A = 2.040 \text{ В}$. С ростом амплитуды импульса, как показывают измерения, доменная граница смещается на

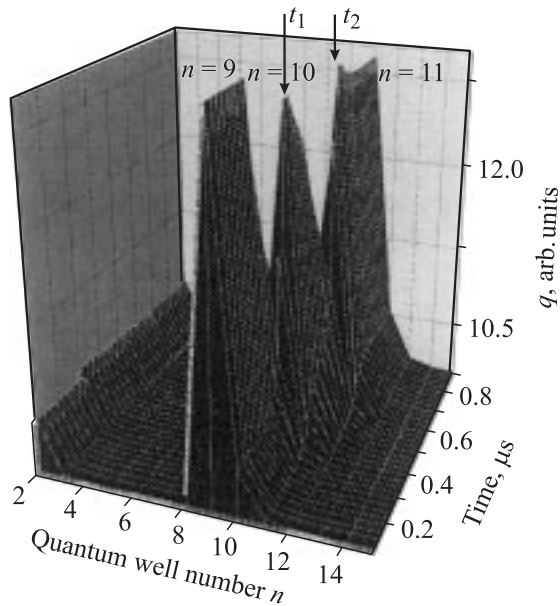


Рис. 2. Рассчитанное в различные моменты времени распределение пространственного заряда q по квантовым ямам в СР после резкого уменьшения напряжения на концах СР на величину $\Delta U_p = 100$ мВ (переход $1 \rightarrow 3$ согласно рис. 1). Стрелками показаны моменты перемещения пространственного заряда в первую соседнюю ($t_1 = 0.280$ мкс) и следующую ($t_2 = 0.476$ мкс) квантовые ямы.

большее число периодов СР, а рабочая точка ВАХ соответственно попадает в более высокие токовые состояния мультистабильности.

Помимо достаточно очевидного факта безынерционности всех стадий процессов переключения, обусловленных перемещением рабочей точки ВАХ вдоль ветвей мультистабильности и не связанных с изменением полей внутри СР, полученные данные позволяют сделать принципиальный вывод о том, что характеристическое время трансформации резонансно-туннельной структуры в СР в электрическом поле практически полностью определяется инерционностью процессов, связанных с перераспределением пространственного заряда и формированием доменных границ. Это проявляется, как можно видеть из рис. 1, в возникновении на кривых $I(t)$ переходного участка (всплеска) сразу же за передним фронтом импульса. Длительность этого участка, отсчитываемая от начала импульса до точки выхода тока на стационарное значение, составляет $\sim 10^{-7}$ с, что отвечает грубым оценкам времени резонансного туннелирования, полученным из измерений величины резонансного тока [10].

Более подробное изучение зависимостей $I(t)$ этого переходного участка позволяет проследить за особенностями кинетики перераспределения пространственного заряда и трансформации резонансно-туннельной структуры в полях, обеспечивающих перемещение доменной границы через несколько периодов сверхрешетки. Как

видно из рис. 1, кривая $I(t)$ на переходном участке имеет сложный немонотонный характер с несколькими перегибами. Количество перегибов, как показывают измерения, возрастает с увеличением числа периодов СР, на которое перемещается доменная граница [11]. Сопоставление этих данных с результатами теоретического моделирования, выполненного на основе дискретной модели поперечного транспорта в сверхрешетках со слабой связью [3], позволяет сделать вывод о том, что процессы трансформации имеют дискретный характер. Как следует из данных численного моделирования (рис. 2), которые удовлетворительно согласуются с экспериментом, перемещение пространственного заряда и доменной границы в конечную квантовую яму при изменении напряжения на СР не происходит в виде одного акта, а включает несколько ступеней, обусловленных последовательным рассогласованием и согласованием резонансных уровней по мере перетекания пространственного заряда через последовательность квантовых ям в конечном состоянии. Этот процесс сопровождается возникновением токовых неустойчивостей и соответствующих особенностей в виде перегибов на временных зависимостях тока $I(t)$ на переходном участке.

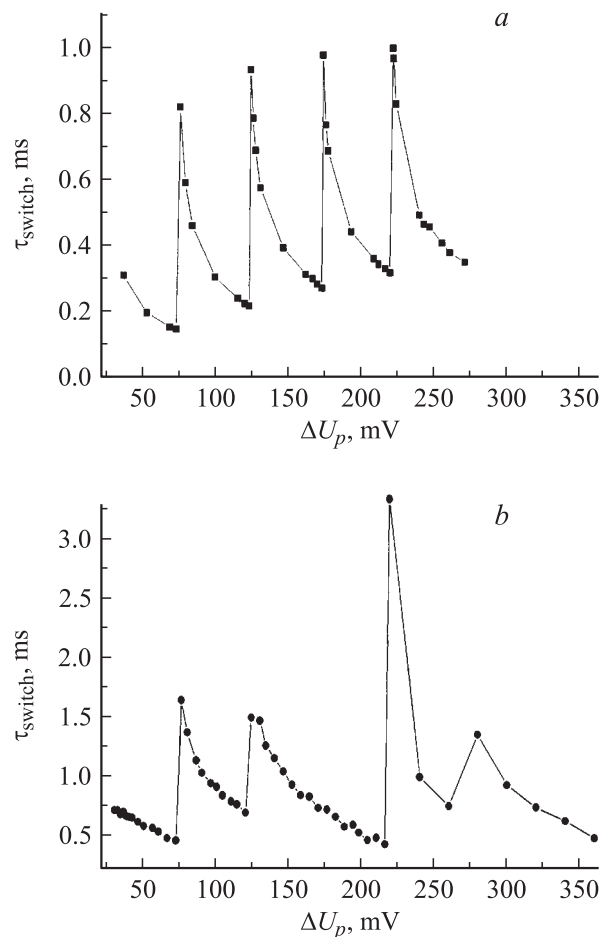


Рис. 3. Длительность переходного процесса в зависимости от амплитуды импульсов напряжения ($\tau_p = 10$ мкс): *a* — данные численного моделирования, *b* — экспериментальные значения.

Другим подтверждением дискретного характера процессов трансформации резонансно-туннельной структуры в СР в электрическом поле являются результаты исследований, выполненных при изменении амплитуды и длительности прикладываемых к СР импульсов напряжения. Как видно из рис. 3, время переходного процесса (τ_{switch}) в зависимости от амплитуды импульса имеет немонотонный осциллирующий характер. С ростом амплитуды длительность переходного процесса периодически сначала монотонно убывает, затем резко возрастает и снова убывает. Сопоставление этих данных с результатами численного моделирования позволяет однозначно связать наблюдаемые всплески с достижением каждый раз амплитудой импульса таких значений, которые оказываются достаточными для перехода доменной границы в соседнюю квантовую яму. Монотонный спад длительности переходного процесса и времени трансформации в пределах каждого периода $I(\Delta U_p)$ естественным образом объясняется ускорением электронных процессов, определяющих перемещение пространственного заряда, с увеличением амплитуды импульса и величины инициируемой им напряженности поля в СР.

В пользу такой интерпретации свидетельствуют данные исследования особенностей процессов трансформации резонансно-туннельной структуры в условиях приложения коротких импульсов, длительность которых порядка и менее характерных времен перестройки. Основным результатом, полученным в ходе этих исследований, заключается в экспериментальной регистрации того факта, что в условиях коротких импульсов, длительность которых недостаточна для осуществления перехода доменной границы в конечное состояние, реализуется только часть процесса трансформации с переходом доменной границы в некоторую промежуточную квантовую яму, до которой доменная граница успевает переместиться за время действия импульса. В итоге система переходит в соответствующее промежуточное токовое состояние, отличное от конечного состояния в случае длительных импульсов. Этот результат, подтвержденный данными модельных расчетов, в принципе показывает возможность управления процессами переключения в мультстабильной системе токовых состояний [7,9] не только посредством изменения амплитуды, но и посредством изменения длительности прикладываемого к СР импульсного напряжения необходимой полярности.

Довольно неожиданным фактом, обнаруженным в ходе этих исследований и потребовавшим специального изучения, является результат, касающийся самой величины характеристического времени трансформации резонансно-туннельной структуры. Оказалось, что в экспериментах с перемещением доменной границы на несколько периодов среднее характеристическое время трансформации почти не меняется по величине с увеличением числа периодов перехода и, соответственно, общей длины перемещения доменной границы. На первый взгляд, следовало ожидать возрастания времени трансформации в такой ситуации. Результаты прямых измерений

длительности переходного участка $I(t)$ в окрестностях переднего фронта импульса, подтвержденные данными численного моделирования, показывают, однако, что зарегистрированное изменение длительности переходного процесса при перемещении доменной границы на большее число периодов СР в действительности оказывается чрезвычайно малым (рис. 3). Причина обнаруженной слабой зависимости длительности переходного процесса от расстояния перемещения доменной границы, как следует из данных численного анализа, заключается в том, что переход на несколько периодов СР, требующий более высоких амплитуд импульсного напряжения, происходит в условиях большего градиента полей в СР, чем при перемещении доменной границы на меньшие расстояния.

Подводя итоги работы, отметим следующее. В результате выполненных исследований экспериментально и методами численного моделирования показано, что кинетика трансформации резонансно-туннельной структуры при изменении напряжения на СР практически полностью определяется инерционностью процессов перераспределения пространственного заряда, формирующего домены электрического поля. Это проявляется в возникновении переходного участка зависимости $I(t)$ вблизи переднего фронта импульса электрического поля, прикладываемого к сверхрешетке. Показано, что зависимость $I(t)$ на переходном участке является немонотонной и характеризуется наличием структуры, отражающей дискретный характер процессов трансформации резонансно-туннельной структуры при перемещении доменной границы через последовательность нескольких квантовых ям в СР. Обнаружена осциллирующая зависимость длительности переходного процесса от амплитуды изменения напряжения. Экспериментально и методами численного моделирования показано, что инерционность процессов трансформации резонансно-туннельной структуры в конечное состояние практически не меняется с увеличением числа периодов и расстояния, на которое перемещается доменная граница в СР под влиянием изменения внешнего напряжения. В экспериментах с короткими импульсами показана возможность прерывания процессов трансформации в любом промежуточном состоянии, что открывает возможность управления процессами переключения между токовыми состояниями не только с помощью изменения амплитуды, но и посредством изменения длительности прикладываемых к сверхрешетке импульсов напряжения.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты № 02-02-16977, № 03-02-06534), МНТП „Физика твердотельных наноструктур“ (грант № 97-1048) и ПФИ ПРАН „НКС“.

Список литературы

- [1] L. Esaki, L.L. Chang. Phys. Rev. Lett., **33**, 495 (1974).
- [2] J. Kastrop, H.T. Grahn, K. Ploog, F. Prengel, A. Wacker, E. Scholl. Appl. Phys. Lett., **65**, 1808 (1994).

- [3] Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин. Письма ЖЭТФ, **64**, 146 (1996).
- [4] A. Wacker. In: *Theory of Transport Properties of Semiconductor Nanostructures*, ed. by E. Scholl (Chapman & Hall, London, 1998) p. 321.
- [5] В.Н. Мурзин, Ю.А. Митягин. УФН, **169** (4), 464 (1999).
- [6] Ю.А. Ефимов, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, А.А. Пищулин. КСФ, № 5, 13 (2000).
- [7] Yu.A. Mityagin, Yu.A. Efimov, V.N. Murzin, A.A. Pishchulin. *Physica E*, **13**, 961 (2002).
- [8] V.N. Murzin, Yu.A. Mityagin et al. *Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, 1994) p. 285; (St. Petersburg, 1995) p. 151.
- [9] Ю.А. Ефимов, Ю.А. Митягин, В.Н. Мурзин, А.А. Пищулин. КСФ, № 7, 24 (2001).
- [10] Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin, I.P. Kazakov, V.A. Chuenkov, A.L. Karuzskii, A.V. Perestoronin, A.A. Pishchulin, L.Yu. Shchurova. *Nanotechnology*, **11** (4), 211 (2000).
- [11] V.N. Murzin, Yu.A. Mityagin, A.A. Pishchulin, Yu.A. Efimov. *Int. Symp. „Nanostructures: Physics and Technology“* (St. Petersburg, 2003) p. 188.

Редактор Л.В. Шаронова

Kinetics of electric field domain transformation in weakly-coupled GaAs/AlGaAs superlattices in transverse electric field

Yu.A. Mityagin, V.N. Murzin, Yu.A. Efimov, A.A. Pishchulin, V.N. Pyrkov

P.N. Lebedev Physical Institute,
Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

Abstract A kinetics of an electric field domain transformation in weakly coupled GaAs/AlGaAs superlattices was studied by investigating the current response of the structure to applied voltage pulses in real time regime. It was demonstrated to be caused mainly by the inertia of the domain boundary space charge redistribution. The non-monotonic and oscillating dependence of the transition process duration on the voltage pulse amplitude was observed as well as a weak dependence of the transformation time on the domain boundary travel length which is an evidence in favour of the discrete nature of the transformation process. A possibility of the switching process control in a multistable system of current states in superlattices is being discussed.