

УДК 621.315.572

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕЖДУ МУЛЬТИСТАБИЛЬНЫМИ ТОКОВЫМИ СОСТОЯНИЯМИ В ДЛИННОПЕРИОДНЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

Ю. А. Ефимов, Ю. А. Митягин, В. Н. Мурзин, А. А. Пищулин

*Экспериментально исследованы процессы переключения между токовыми ветвями мультистабильности в длиннопериодных полупроводниковых сверхрешетках под действием импульсов электрического поля и показана принципиальная возможность создания элементов многоуровневой логики на основе твердотельных наноструктур.*

В настоящей работе предлагается вариант реализации переключающего устройства многоуровневой логики, основанный на использовании явления токовой мультистабильности, обнаруженного при изучении поперечного транспорта в слабо связанных полупроводниковых сверхрешетках (СР) [1 – 3]. Вольт-амперные зависимости (ВАХ) в этом случае имеют характерный ступенчатый вид с мелкой периодической структурой на платообразных участках, каждый из которых соответствует формированию нового типа домена электрического поля с резонансно-туннельной структурой, отвечающей туннелированию в более высокое возбужденное состояние размерного квантования в соседней квантовой яме. Мелкая периодическая структура определяется скачкообразным перемещением границы домена через последовательность квантовых ям в процессе расширения домена в направлении оси роста структуры при увеличении приложенного к СР напряжения. При определенных условиях в ВАХ наблюдается ярко выраженный токовый гистерезис [4, 5]. При изменении направления развертки поля, т.е. при уменьшении приложенного к СР напряжения, соответствующие платообразные участки ВАХ наблюдаются при существенно меньших значениях тока. Внутри области гистерезиса при этом наблюдается серия из  $(N - 1)$  дополнительных токовых ветвей ВАХ ( $N$  – число периодов СР), каждая из которых отвечает фиксированному положению границы домена в СР. Наличие таких ветвей означает, что каждому значению приложенного к

СР напряжения в области плато соответствуют несколько устойчивых токовых состояний (эффект мультистабильности). Как можно видеть из рис. 1, на котором приведен измеренный фрагмент ВАХ, иллюстрирующий этот эффект в области одного из плато, каждое из таких токовых состояний может быть достигнуто при медленном изменении приложенного к СР напряжения путем выбора соответствующей стратегии развертки напряжения.

Естественным образом возникает вопрос о возможности переключения между указанными токовыми состояниями посредством приложения к структуре коротких импульсов напряжения. Принципиальная возможность такого переключения экспериментально была продемонстрирована в работах [3, 6]. В данной работе мы приводим результаты более подробных исследований кинетики и функциональных особенностей процессов переключения с целью продемонстрировать возможности управляемого переключения в различных режимах между рассматриваемыми токовыми состояниями. На основании полученных результатов делается вывод о возможности реализации переключающих элементов многоуровневой логики на основе эффекта мультистабильности в квантово-размерных твердотельных наноструктурах.

Исследовались сверхрешетки  $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$   $n$ -типа (ширина ям – 350 Å, ширина барьеров – 120 Å, 30 периодов, объемная концентрация легирующей примеси кремния  $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), заключенные между двумя сильно легированными ( $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) слоями  $n^+$ - $GaAs$ . Измерения проводились на мезоструктурах с диаметром мез 500 мкм и  $Au/Cr$  контактами, изготовленными вакуумным напылением со стороны верхних частей мез и на обратной стороне  $n^+$ - $GaAs$  подложки.

Механизм процесса переключения между ветвями мультистабильности в сверхрешетке может быть схематично пояснен с помощью рис. 2, на котором показано семейство токовых ветвей ВАХ в верхней части токового гистерезиса. Пусть к структуре приложено постоянное напряжение смещения  $U_0$ . Этому напряжению соответствует набор устойчивых токовых состояний  $I_0, I_1, I_2, I_3 \dots$ . Допустим, в начальный момент система находится в состоянии, характеризуемом величиной тока  $I_0$ . При приложении к СР импульса напряжения треугольной формы с максимальной амплитудой  $U_{imp}$  рабочая точка по мере возрастания напряжения на СР движется по самой верхней ветви ВАХ. Если она не доходит до точки  $A$ , т.е. амплитуда импульса не превышает величины  $(U_A - U_0)$ , то при спаде напряжения импульса до нуля система возвращается в исходную точку  $(U_0, I_0)$ , и переключения не происходит. Если же рабочая точка смещается дальше точки  $A$ , т.е.  $U_{imp} > U_A - U_0$ , то система смещается на следующую ветвь ВАХ

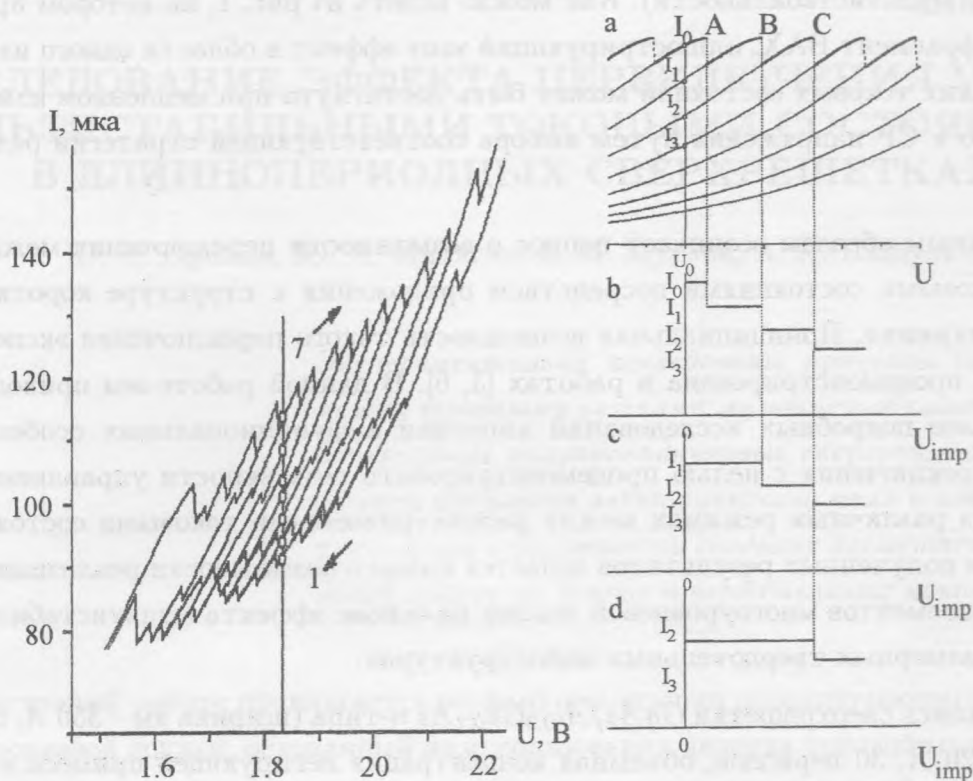


Рис. 1. Измеренный фрагмент ВАХ в поперечном направлении в длиннопериодной сверхрешетке GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As ( $d_w = 35$  нм,  $d_b = 12$  нм, 30 периодов,  $T = 4.2$  К), отвечающий формированию электрополевого домена с резонансными первым и пятым уровнями размерного квантования в соседних квантовых ямах. Вертикальной прямой отмечено фиксированное рабочее напряжение измерений ( $U_0 = 1.83$  В); кружками на прямой – точки, соответствующие различным токовым состояниям.

Рис. 2. Схема механизма переключения между ветвями мультистабильности в сверхрешетке. В верхней части показан фрагмент ВАХ, на котором вертикальной прямой обозначено приложенное к сверхрешетке фиксированное напряжение смещения  $U_0$ . Ниже приведены ожидаемые зависимости значений тока в зависимости от амплитуды прикладываемых к сверхрешетке медленных импульсов напряжения для переходов из различных стартовых токовых состояний:  $I_0$  (рис. 2b),  $I_1$  (рис. 2d),  $I_2$  (рис. 2c).

(если  $U_{imp} < U_B - U_0$ ) и при спаде напряжения переходит уже в точку  $(U_0, I_1)$ . Аналогичным образом происходит переключение в состояние  $(U_0, I_2)$ , если  $U_{imp} > U_B - U_0$

(при  $U_{imp} < U_C - U_0$ ), и т.д. Полученная в результате такого теоретического анализа переключающая характеристика (зависимость тока в конечном состоянии от амплитуды импульса) приведена в нижней части рисунка (рис. 2b). Аналогичным образом могут быть получены переключающие характеристики для переключений из состояний  $(U_0, I_1)$  (рис. 2c) или  $(U_0, I_2)$  (рис. 2d) и т.д. Приведенное рассмотрение относится к процессам переключения при подаче импульсов положительной полярности, т.е. к процессам переключения "сверху вниз" в состояния, характеризующиеся меньшими значениями тока. Нетрудно показать, что переключения "снизу вверх" в состояния, характеризующиеся большими величинами тока, можно осуществить, подавая импульсы напряжения отрицательной полярности.

Описанный механизм переключения предполагает, что развертка напряжения на переднем и заднем участках переключающих импульсов происходит достаточно медленно, т.е. за время, существенно превышающее характерные времена перераспределения заряда при перемещении границы домена из одной квантовой ямы в другую. Именно по этой причине все измерения в данной работе проводились с использованием достаточно медленных электрических импульсов треугольной формы, оптимальных с точки зрения устранения короткодействующих возмущений на фронте импульса, которые могут появляться в случае прямоугольных импульсов. Очевидно, что при достаточно больших скоростях нарастания и спада напряжения картина переключения может отклоняться от описанной.

На рис. 3 и 4 приведены результаты экспериментального изучения процессов переключения в сверхрешетке  $GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  ( $d_w = 35$  нм,  $d_b = 12$  нм, 30 периодов) под действием электрических импульсов  $U_{imp}$  треугольной формы при фиксированном ( $U_0 = 1.83$  В) приложенном к сверхрешетке напряжении, соответствующем фрагменту ВАХ, показанному на рис. 1. Токковые состояния на рис. 1, между которыми происходят переходы, отмечены кружками и соответствуют точкам пересечения токковых ветвей ВАХ с вертикальной прямой  $U = U_0$ , отвечающей выбранному значению фиксированного приложенного к СР напряжению. Экспериментальными точками показаны значения тока в конечных точках переключения в зависимости от величины импульсного напряжения  $U_{imp}$ . Цифрами показан тип переключений (начальная и конечная точки переходов). Температура измерений  $T \approx 4.2$  К.

На первом из рисунков (рис. 3) приведены данные измерений процессов переключения типа "сверху вниз" под действием импульсов положительной полярности. На другом рисунке (рис. 4) показаны результаты измерений переключений типа "снизу вверх"

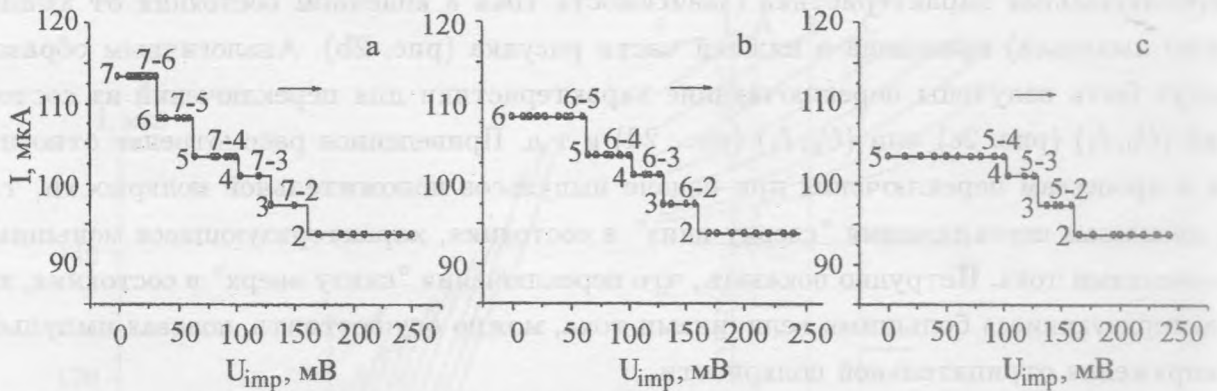


Рис. 3. Данные измерений эффекта переключения "сверху вниз" между токовыми ветвями мультистабильности под действием электрических треугольных импульсов напряжения положительной полярности. Экспериментальные точки и теоретическая кривая (сплошная линия) относятся к переходам из состояний 7 (рис. 3а), 6 (рис. 3б) и 5 (рис. 3с). Длительность импульсов 50 мксек, температура измерений 4.2 К.

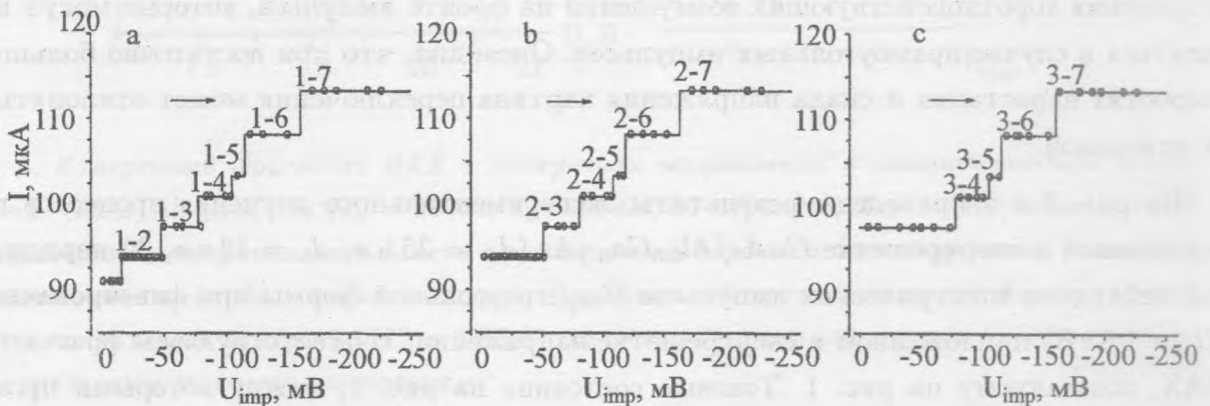


Рис. 4. Данные измерений эффекта переключения "снизу вверх" между токовыми ветвями мультистабильности под действием электрических треугольных импульсов напряжения отрицательной полярности. Экспериментальные точки и теоретическая кривая (сплошная линия) относятся к переходам из состояний 1 (рис. 4а), 2 (рис. 4б) и 3 (рис. 4с). Длительность импульсов 50 мксек, температура измерений 4.2 К.

при приложении импульсов отрицательной полярности. Как видно из рисунков, измеренная зависимость имеет ступенчатый вид. Каждый плоский участок отвечает набору значений  $U_{imp}$ , которые оказываются достаточными для перевода системы из исходного

в данное конечное токовое состояние (но недостаточны для переключения в последующие токовые состояния). Полученные результаты демонстрируют высокую устойчивость эффектов переключения. В таблице 1 суммированы данные об амплитуде и полярности импульсов, необходимых для переключения между всеми заданными парами состояний.

Т а б л и ц а 1

*Интервалы амплитуд и полярности прилагаемых к сверхрешетке импульсов, необходимых для переключения между заданными парами состояний (в милливольтат)*

NN состо- яний	7	6	5	4	3	2	1
7	-	+(35-60)	+(60-103)	+(103-130)	+(130-162)	+(162-250)	-
6	-(165-250)	-	+(60-103)	+(103-130)	+(130-162)	+(162-250)	-
5	-(165-250)	-(118-160)	-	+(103-130)	+(130-162)	+(162-250)	-
4	-(165-250)	-(118-160)	-(108-115)	-	+(130-162)	+(162-250)	-
3	-(165-250)	-(118-160)	-(108-115)	-(75-105)	-	+(162-250)	-
2	-(162-250)	-(118-160)	-(108-115)	-(75-105)	-(48-70)	-	-
1	-(162-250)	-(118-160)	-(108-115)	-(75-105)	-(48-70)	-(18-47)	-

Непрерывной линией на рисунках обозначена "модельная" характеристика переключения, полученная в приближении медленно меняющегося напряжения из анализа вольт-амперных характеристик, приведенных на рис. 1. Как нетрудно видеть, экспериментальные данные по наблюдению эффекта переключения находятся в удовлетворительном согласии с моделью.

На рис. 5 приведены результаты исследований эффекта переключения в зависимости от длительности прикладываемых к сверхрешетке импульсов напряжения. Как видно из рисунка, изменение длительности импульсов в пределах от 200 до 5 мксек никак не отражается на виде измеряемой ступенчатой зависимости, характеризующей процессы переключения, что свидетельствует о высоком быстродействии процессов переключения. Из рис. 5 также видно, что электрические импульсы подобранной величины и полярности обеспечивают переключение между всеми токовыми состояниями посредством переходов с различных стартовых состояний в данное избранное, либо посредством переходов из избранного состояния в различные заданные конечные токовые состояния.

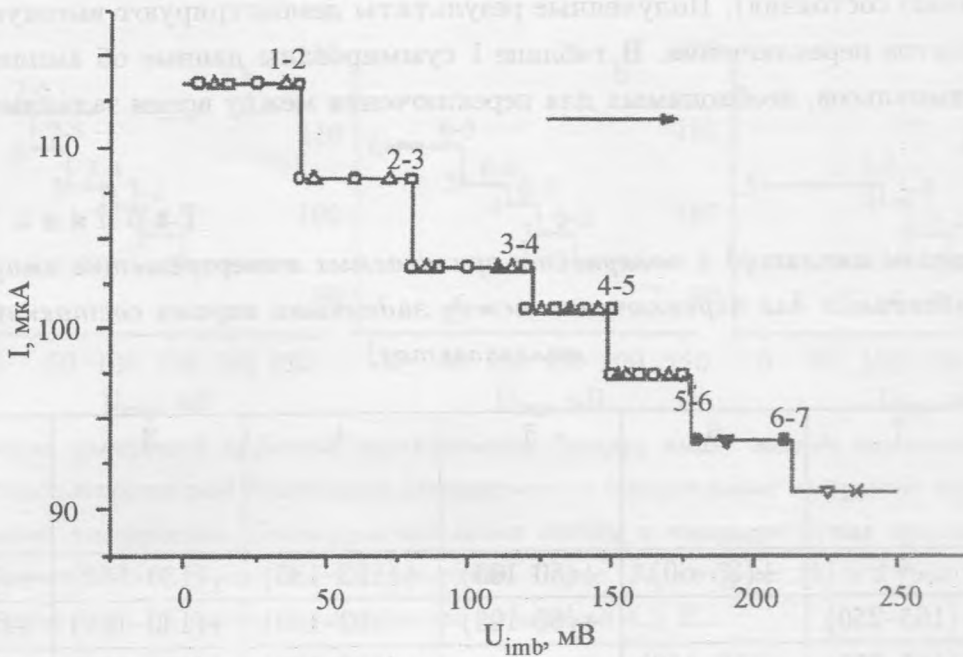


Рис. 5. Исследование кинетики процессов переключения в зависимости от длительности импульса напряжения (o – 200 мксек,  $\Delta$ ,  $\nabla$ ,  $\bullet$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\blacksquare$ ,  $\blacktriangle$  – 20 мксек,  $\square$ ,  $\times$  – 5 мксек). Экспериментальные точки – значения тока в конечных точках переключения для переходов между соседними токовыми ветвями (o,  $\Delta$ ,  $\square$ ), для переходов из (1), (2) и (3) стартовых состояний в токовое состояние (6) (точки  $\bullet$ ,  $\blacktriangledown$ ,  $\blacksquare$ ), для переходов из (1) стартового состояния в конечные (3), (4), (5) (точки  $\blacktriangle$ ) и (7) (точки  $\nabla$ ,  $\times$ ) токовые состояния.

Таким образом, можно констатировать, что электрические импульсы соответствующей величины и полярности обеспечивают устойчивое переключение между любыми "мультистабильными" токовыми состояниями, что в сочетании с достаточно высоким быстродействием процессов переключения открывает принципиальную возможность создания нового типа элементов многоуровневой логики на основе твердотельных квантово-размерных структур.

Не останавливаясь здесь на общих аспектах проблемы, ограничимся лишь двумя замечаниями. Исследованные в работе длиннопериодные сверхрешетки с широкими барьерами и, соответственно, слабой связью между электронными состояниями в соседних квантовых ямах, характеризующиеся относительно небольшими величинами плотности туннельного тока, конечно, не являются оптимальными с точки зрения быстродействия

процессов переключения. Времена перераспределения заряда в этих структурах, согласно модельным расчетам, составляют величины порядка микросекунды. Путь к повышению скорости переключения лежит в переходе к сверхрешеткам с более узкими барьерами. Хотя этот вывод очевиден, вопрос о наивысшем достижимом быстродействии эффектов переключения требует специального изучения. Не до конца ясна и требует специальных исследований возможность воспроизводимого изготовления таких структур с хорошо выраженными токовым гистерезисом и токовыми ветвями мультистабильности.

Другим, важным прежде всего с точки зрения практического использования, является вопрос о повышении рабочей температуры эффектов переключения. В исследованных сверхрешетках отчетливо выраженный токовый гистерезис и эффект мультистабильности наблюдались лишь при температуре жидкого гелия. Более перспективными с точки зрения рабочей температуры, очевидно, являются структуры с более узкими квантовыми ямами, характеризующиеся большими значениями межподзонных энергий. Однако и здесь картина явлений недостаточно изучена и требуются дальнейшие исследования.

Работа выполнена при поддержке ГНТП ПТУМНЭ (N 02.04.4.2.15 Э37), МНТП ФТНС (N 97-1048), РФФИ (N 99-02-17437 и N 00-02-16709).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kastrup J., Grahn H. T., Ploog K., et al. Appl. Phys. Lett., **65**, 1808 (1994).
- [2] Murzin V. N., Mityagin Y. A., Rasulova G. K., et al. Abstr. Intern. Symposium "Nanostructure: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 20-24 (1994), p. 285-286.
- [3] Rasulova G. K., Efimov Yu. A., Mityagin Yu. A., Murzin V. N. Abstr. Intern. Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", St. Petersburg, Russia, June 26-30 (1995), p. 151-154.
- [4] Стоклицкий С. А., Мурзин В. Н., Расулова Г. К. и др. Письма в ЖЭТФ, **61**, N 5, 399 (1995).
- [5] Митягин Ю. А., Мурзин В. Н. Письма в ЖЭТФ, **64**, N 3, 146 (1996).
- [6] Rasulova G. K., Efimov Yu. A., Murzin V. N. J. Appl. Phys., **82**, 3381 (1997).

Поступила в редакцию 1 июня 2001 г.