

УДК 538.9

ОСОБЕННОСТИ ТУННЕЛЬНОГО ТОКА В СВЕРХРЕШЕТКАХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ

© 2019 г. С. К. Папроцкий¹*, И. В. Алтухов¹, М. С. Каган¹, Н. А. Хвальковский¹, И. А. Кон¹, Н. Д. Ильинская², А. А. Усикова², А. Н. Баранов³, Р. Тесье³

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

²Физико-технический институт им. А.И. Иоффе РАН, Российская Федерация, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

³Институт электроники и систем университета Монпелье, Французская Республика, 34090, Монпелье, рю де Сент-Прист, 860

*E-mail: paprotsky@cplire.ru

Поступила в редакцию 30.04.2019 г.

После доработки 30.04.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Исследован туннельный электронный транспорт в сверхрешетках GaAs/AlAs и InAs/AlSb с электрическими доменами при комнатной температуре. При напряжениях выше порога образования доменов были обнаружены: серия максимумов на вольтамперных характеристиках, почти эквидистантных по напряжению, и гистерезис тока при прямой и обратной развертке напряжения. Предложено объяснение, связывающее происхождение этих максимумов с туннельными переходами между квантовыми ямами в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов, а гистерезис — с переходом между режимами с движущимся и статическим доменом. Обнаружена сильная асимметрия времен перестройки доменных режимов.

DOI: 10.1134/S0033849419090158

ВВЕДЕНИЕ

Исследование электронного транспорта в полупроводниковых сверхрешетках (СР) вызывает большой интерес в течение последних десятилетий [1, 2], в основном, в связи с предсказанным усилением блоховских волн, перспективным для реализации перестраиваемых источников генерации терагерцового диапазона. Однако образование электрических доменов из-за статической отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП), возникающей в СР при резонансном туннелировании между квантово-размерными состояниями в соседних квантовых ямах (механизм Эсаки-Цу), препятствует усилению. В данной работе исследован туннельный ток в СР с электрическими доменами.

1. ОБРАЗЦЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Были исследованы СР двух типов: на основе GaAs и на основе InAs, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Указанные СР имели следующие параметры (1 период: яма/барьер): 4 нм GaAs/2 нм AlAs (100 периодов), 4 нм GaAs/3 нм AlAs, (100 периодов) и 4.5 нм InAs/3.5 нм

AlSb (60 периодов). СР были расположены между сильно легированными верхним контактным слоем n^+ -GaAs и, соответственно, n^+ -InAs и сильно легированной ($\sim 10^{19}$ см⁻³) подложкой. СР были легированы мелкими донорами в концентрации 2×10^{17} см⁻³. С помощью электронной литографии были изготовлены меза-структуры в форме колец диаметром 10–15 мкм и шириной кольца 0.8–1.5 мкм. Перед нанесением контактного металла (золота) пластинку с вытравленными мезами покрывали диэлектриком. Кольцевые металлические контакты к структурам формировали также распределенные терагерцовые резонаторы на длину волны в свободном пространстве от 110 до 160 мкм [3]. В таких резонаторах должны эффективно возбуждаться моды, в которых электрическое поле электромагнитной волны направлено поперек слоев, а волна распространяется вдоль периметра кольца. В некоторых образцах (по-видимому, с достаточной добротностью) удавалось наблюдать возбуждение резонатора за счет отрицательного сопротивления СР с доменами [4].

В данной работе был исследован туннельный ток в условиях образования электрических доме-

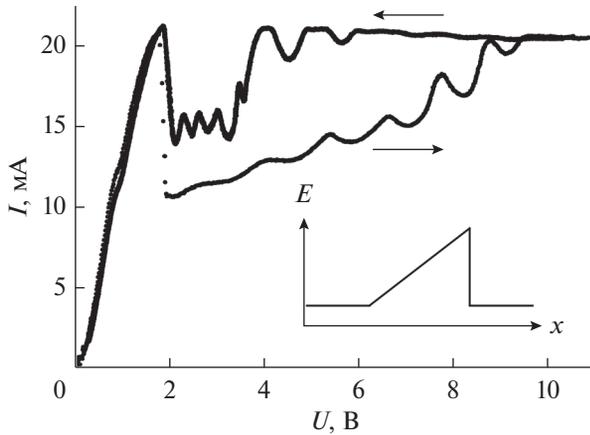


Рис. 1. ВАХ СР GaAs/AlAs при прямой и обратной развертке напряжения. На вставке – форма домена.

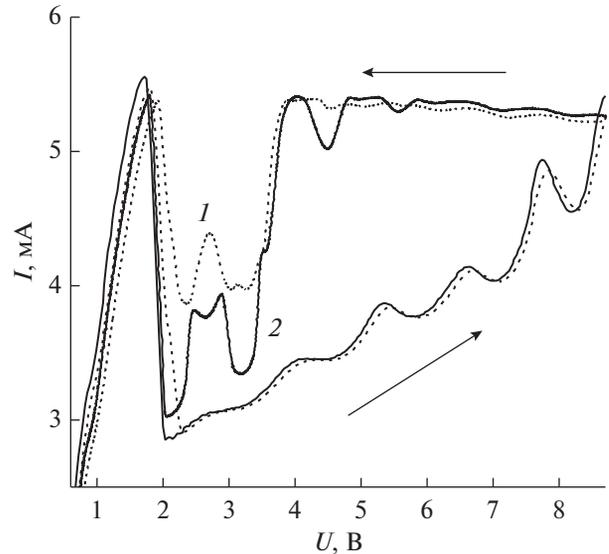


Рис. 2. ВАХ СР GaAs/AlAs при времени развертки напряжения 50 мкс (кривая 1) и 100 мкс (кривая 2).

нов, возникавших из-за наличия ОДП в некоторой области напряжений. К образцам прикладывали треугольные импульсы напряжения с временами нарастания и спада 0.5–100 мкс. Из зависимостей напряжения и тока от времени восстанавливали вольтамперные характеристики (ВАХ) при прямой и обратной развертке напряжения.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены ВАХ сверхрешетки GaAs/AlAs. Движущиеся домены возникали при некотором пороговом напряжении, что проявлялось в резком падении тока (до 50%). Рост тока при напряжении выше порогового свидетельствует о треугольной форме дипольного домена [5] (см. вставку к рисунку). Отрицательный заряд на одной из границ домена (в одной квантовой яме – КЯ) создается свободными электронами (концентрация которых больше, чем на порядок, превышает концентрацию доноров), что обеспечивает необходимый скачок поля, а положительный заряд на другой границе – положительно заряженными донорами. Из-за полного опустошения доноров появляется линейный участок зависимости поля от координаты внутри домена. Действительно, оценка величин полей вне и внутри домена, проведенная по экспериментальной ВАХ, дает концентрацию носителей, необходимую для скачка поля на границе домена, $\sim 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, тогда как концентрация легирующих доноров $\sim 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. (Здесь и в дальнейшем для анализа характеристик доменной неустойчивости мы используем аналогию с эффектом Ганна.)

Гистерезис тока при прямой и обратной развертке напряжения мы связываем с переходами между режимами со статическим и движущимся доменом. В режиме со статическим доменом на

ВАХ появляется участок с насыщением тока. При прямой развертке насыщение начинается при напряжении, когда ток достигает значения в максимуме ВАХ. При обратной развертке область насыщения расширяется до меньших полей. Это связано с тем, что напряжение перехода от движущегося домена к статическому больше, чем для обратного перехода при уменьшении напряжения. Обнаружена также большая асимметрия времен перестройки доменных режимов: переход от движущегося к статическому домену происходит за время меньше 100 нс, а обратный переход – за время $\sim 100 \text{ мкс}$ (рис. 2). Большее время связывается с наличием глубоких примесей на одной из границ СР – буферный слой.

На рис. 3 приведены ВАХ двух СР GaAs/AlAs, отличающихся толщиной барьеров AlAs – 2 (структура 1) и 3 нм (структура 2). В структуре 2 насыщение тока начинается сразу при пороговом напряжении, т.е. в этом случае образуется только статический домен. Отметим, что поскольку пороговое напряжение начала насыщения тока практически совпадает с напряжением образования движущихся доменов в структуре 1, т.е. соответствует максимуму исходной ВАХ однородного образца, то область сильного поля (для материала *n*-типа) в этом случае должна находиться у анода [6].

Другая ситуация возникает в СР InAs/AlSb (рис. 4). Сначала наблюдается насыщение тока, вызванное образованием статического домена и его расширением с ростом напряжения и только при дальнейшем увеличении напряжения начинается рост тока. В этом случае поле в статическом домене должно соответствовать минимуму

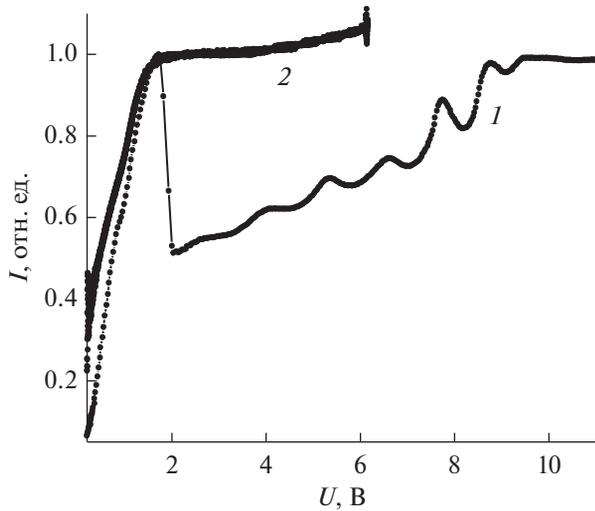


Рис. 3. ВАХ двух CP GaAs/AlAs с толщиной барьеров 2 нм (кривая 1) и 3 нм (кривая 2).

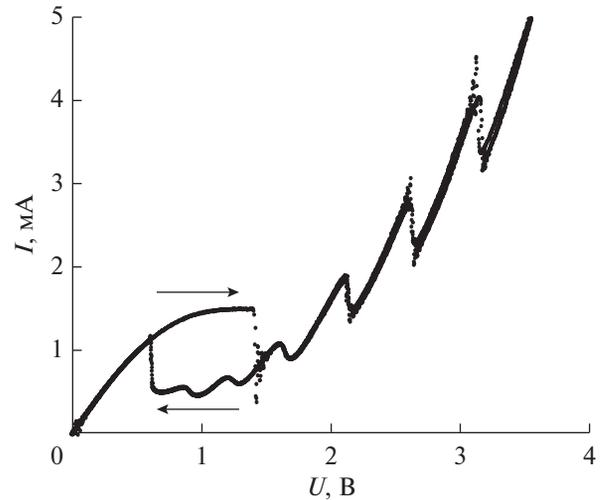


Рис. 4. ВАХ CP InAs/AlSb при $T = 300$ К.

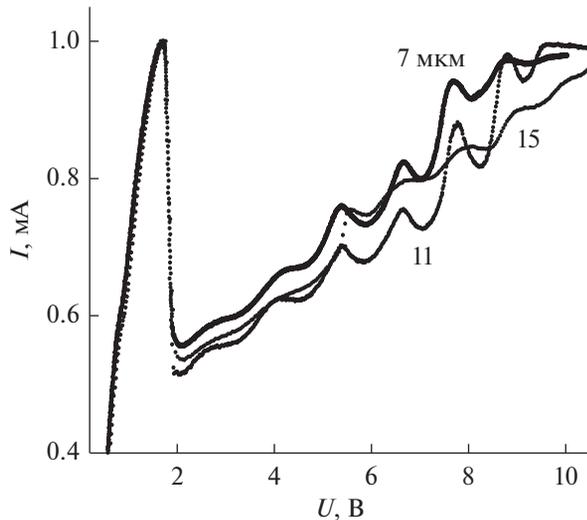


Рис. 5. ВАХ CP GaAs/AlAs для кольцевых резонаторов разного диаметра.

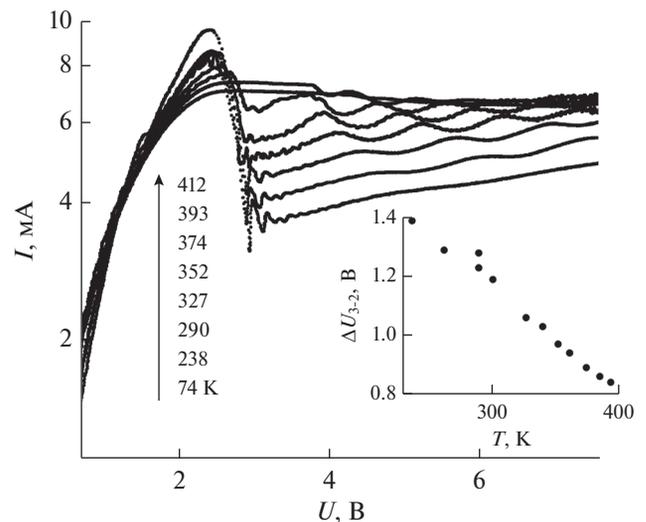


Рис. 6. ВАХ CP GaAs/AlAs при различных температурах. На вставке – разность напряжений третьего и второго максимума в зависимости от температуры.

ВАХ первоначально однородного образца, а домен сильного поля должен находиться у катода. Какой именно статический домен должен образоваться, катодный или анодный, зависит от условий на контактах [6].

Обсудим теперь причину появления максимумов на ВАХ, наблюдавшихся как в CP GaAs/AlAs, так и InAs/AlSb. На рис. 5 показаны ВАХ CP GaAs/AlAs с различным диаметром кольцевого электрода (7, 11 и 15 мкм). Видно, что период этих максимумов практически не меняется, т.е. положение максимумов на ВАХ не зависит от частоты терагерцового резонатора. Отметим также, что в структурах, в которых было зарегистрировано возбуждение резонатора, периодические макси-

мумов не наблюдались [4]. Однако период максимумов заметно менялся при изменении температуры. На рис. 6 приведены ВАХ CP GaAs/AlAs при температурах от 74 до 412 К, а на вставке – разность напряжений третьего и второго максимума в зависимости от температуры.

Мы связываем происхождение этих максимумов с туннельными переходами между КЯ в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов. Поскольку скорость движения доменов должна совпадать с дрейфовой скоростью электронов в области слабого поля (вне домена), то можно оценить время пролета домена, соответствующее измеренным значениям тока. Для напряжений от порогового до выхода ВАХ на

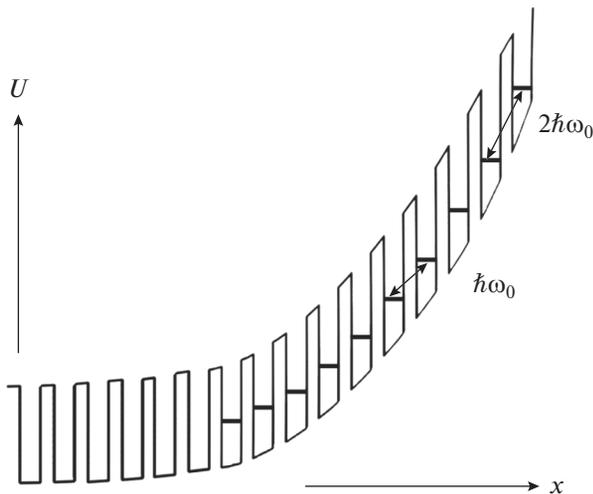


Рис. 7. Схема туннельных переходов внутри домена с испусканием оптических фононов.

насыщение это время составляет $\sim 20\text{--}40$ пс, тогда как время формирования домена должно быть порядка максвелловского времени релаксации, которое при уровне легирования $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, по крайней мере, на порядок короче. Поэтому можно считать что домен движется полностью сформированным. Тогда максимальное поле в домене можно оценить с помощью уравнения Пуассона, считая сверхрешетку сплошной средой. И наконец, можно оценить разность потенциалов и, соответственно, разность потенциальных энергий между соседними квантовыми ямами в вершине треугольного домена. Такая оценка (безусловно, очень грубая) показывает, что эта разность оказывается порядка 200 мэВ при напряжении на образце 10 В и соответствует энергии нескольких оптических фононов. Тогда объяснение наблюдаемых максимумов сводится к следующему. При напряжениях, когда разность энергий основных уровней размерного квантования является кратной энергии оптического фонона $\hbar\omega_0$, туннельный переход между соседними КЯ происходит с испусканием нескольких оптических фононов. При выходе из этого резонанса туннельный ток должен сильно уменьшаться. Естественно, основной вклад в туннельный ток в домене должны давать КЯ вблизи максимума поля, так как на них падает основное напряжение. Этот процесс пока-

зан на рис. 7. При этом мы не рассматриваем возбужденные состояния в КЯ, так как следующий за основным возбужденный уровень в исследуемых СР расположен выше основного на 0.4–0.6 эВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При комнатной температуре были исследованы короткопериодные СР GaAs/AlAs и InAs/AlSb в условиях образования электрических доменов. При прямой и обратной развертке напряжения наблюдали гистерезис тока и серию максимумов на ВАХ, почти эквидистантных по напряжению. Гистерезис интерпретирован как переход между режимами с движущимся и статическим доменом. В последнем случае на ВАХ появлялся участок с насыщением тока. Обнаружена сильная асимметрия времен перестройки доменных режимов: переход от движущегося к статическому домену происходит за время меньшее 100 нс, а время обратного перехода ~ 100 мкс.

Рост тока при напряжении выше порогового свидетельствует о треугольной форме дипольного домена, обусловленной полным опустошением доноров внутри домена. Максимумы на ВАХ объяснены туннельными переходами между квантовыми ямами в треугольном домене, сопровождающимися испусканием оптических фононов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 16-29-09626, 16-29-03135) и программы РАН “Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wacker A. // *Physics Reports*. 2002. V. 357. № 1. P. 1.
2. Bonilla L.L., Grahn H.T. // *Rep. Prog. Phys.* 2005. V. 68. № 3. P. 577.
3. Каган М.С., Алтухов И.В., Баранов А.Н. и др. // *ФТП*. 2013. Т. 47. № 11. С. 1489.
4. Алтухов И.В., Каган М.С., Папроцкий С.К. // *Письма в ЖЭТФ*. 2016. Т. 103. № 2. С. 128.
5. Суриц Р.А. // *ФТП*. 1973. Т. 7. № 8. С. 1035.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Миронов А.Г. Доменная неустойчивость в полупроводниках, М.: Наука, 1972.