

УДК 538.9

ЭЛЕКТРОННЫЙ ТРАНСПОРТ В СВЕРХРЕШЕТКАХ InAs/AlSb С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ДОМЕНАМИ

© 2022 г. И. В. Алтухов^a, С. Е. Дижур^a, М. С. Каган^a, *, С. К. Папроцкий^a, Н. А. Хвальковский^a,
Н. Д. Ильинская^b, А. А. Усикова^b, А. Н. Баранов^c, Р. Тесье^c

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

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

^cИнститут электроники и систем университета Монпелье,
рю де Сент-Прист, 860, Монпелье, 34090 Франция

*E-mail: kagan@cplire.ru

Поступила в редакцию 02.03.2022 г.

После доработки 02.03.2022 г.

Принята к публикации 10.03.2022 г.

Исследована обнаруженная ранее серия квазипериодических по напряжению максимумов на вольт-амперных характеристиках сверхрешеток (СР) InAs/AlSb при напряжениях в области образования доменов. Изучена эволюция этих осцилляций в СР InAs/AlSb с разной шириной квантовых ям (КЯ). Найдено, что в СР с широкими КЯ периодические изменения тока связаны с перескоками границы домена в соседнюю квантовую яму. Предположено, что существенно больший период осцилляций в СР с узкими КЯ связан со значительным увеличением максимального поля в треугольном домене, из-за чего становятся возможными туннельные переходы между соседними КЯ, сопровождающиеся испусканием оптических фононов.

DOI: 10.31857/S0033849422070026

ВВЕДЕНИЕ

Исследован туннельный электронный транспорт в сверхрешетках (СР) InAs/AlSb с электрическими доменами при комнатной температуре. Ранее [1] на вольт-амперных характеристиках (ВАХ) при напряжениях выше порога образования доменов была обнаружена серия максимумов, почти эквидистантных по напряжению. Домены возникали из-за наличия отрицательной дифференциальной проводимости в СР [2]. Для выяснения происхождения этих максимумов были изучены СР InAs/AlSb с разной толщиной квантовых ям.

1. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Сверхрешетки InAs/AlSb, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии, находились между сильно легированными ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) подложкой и верхним контактным слоем n^+ -InAs. Сверхрешетки были легированы мелкими донорами в концентрации $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Изучались СР (60 периодов) с одинаковыми барьерами (3.5 нм AlSb), но с разной шириной квантовых ям (КЯ): 4, 5 и 6 нм. К образцам прикладывались треуголь-

ные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5...10 мс. Вольт-амперные характеристики восстанавливались из зависимостей напряжения и тока от времени. Измерения проведены при комнатной температуре.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1а–1в приведены вольт-амперные характеристики трех СР InAs/AlSb с толщиной квантовых ям 6, 5 и 4 нм соответственно. При сравнительно слабых напряжениях имеет место резонансное туннелирование по нижней минизоне с линейным начальным участком. Резкое падение тока при некотором пороговом напряжении вызвано образованием движущихся доменов (см., например, [3, 4] и ссылки там). Расчет дисперсионных характеристик СР показал, что ширина первой минизоны в нашем случае около 26 мэВ. Таким образом, при напряжениях U выше 1.5 В в соседних КЯ снимается перекрытие первых минизон в соседних КЯ и проводимость осуществляется за счет нерезонансного туннелирования с релаксацией носителей на акустических фононах, что должно приводить к монотонному росту

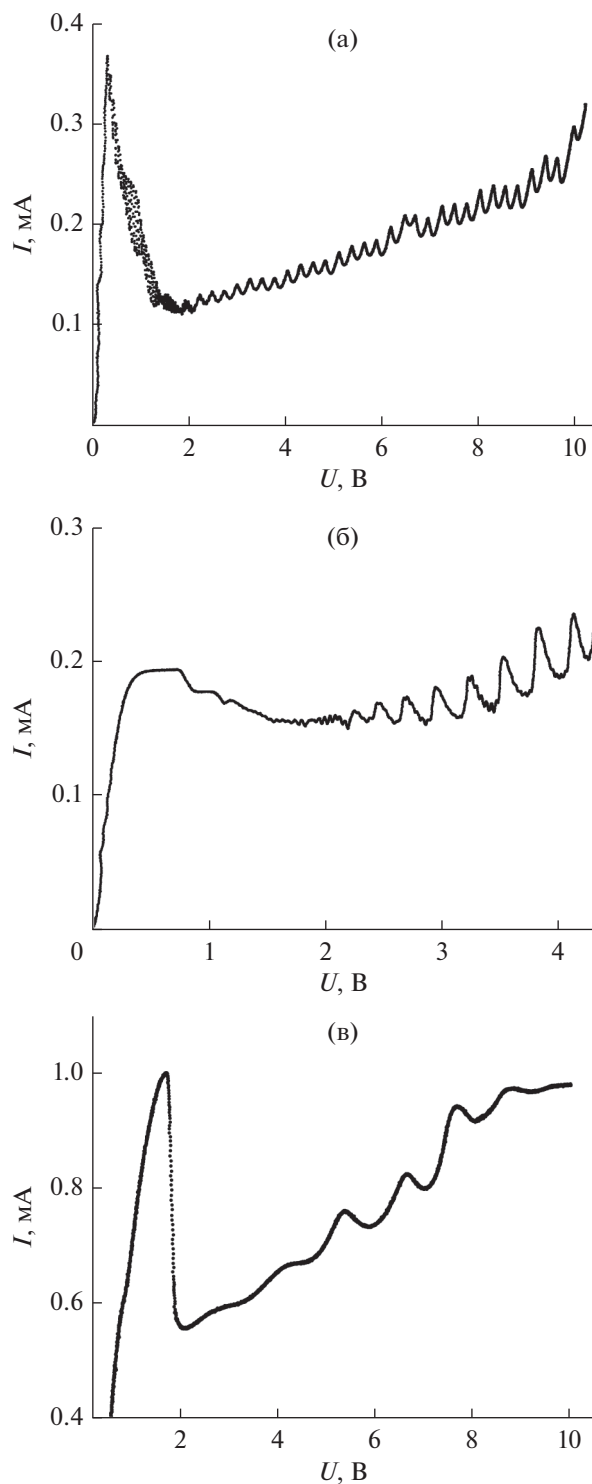


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики сверхрешеток InAs/AlSb с разной толщиной КЯ: $W_{\text{КЯ}} = 6$ (а), 5 (б) и 4 нм (в), и одинаковой толщиной барьеров: $W_{\text{б}} = 3.5$ нм.

тока. Рост тока (в среднем), наблюдаемый при напряжениях выше порогового, свидетельствует о треугольной форме дипольного домена [2]. Происхождение треугольной формы движущегося до-

мена вызвано следующим. Для того чтобы обеспечить перепад между областями сильного и слабого поля (вне и внутри домена), необходим достаточно большой заряд на границах (“стенках”) домена. Как показывают оценки [1], этот заряд должен быть примерно на порядок больше, чем уровень легирования в наших СР. Поэтому отрицательный заряд на одной из границ домена (в одной КЯ) создается свободными электронами, а положительный заряд на другой границе – положительно заряженными донорами (концентрация которых на порядок меньше необходимой для формирования границы домена). Из-за полного опустошения доноров и появляется линейный участок зависимости поля от координаты внутри домена. С ростом напряжения увеличивается как длина домена, так и величина максимального поля в нем. При $U > 1.5$ В на вольт-амперных характеристиках на фоне роста тока наблюдается ряд квазипериодических по напряжению осцилляций. Период этих осцилляций по напряжению для образцов, ВАХ которых приведены на рис. 1а и 1б, соответствует расширению домена на один период СР, т.е. периодические изменения тока в СР с квантовыми ямами 5 и 6 нм связаны с перескоками границы домена в соседнюю квантовую яму. Совершенно другая картина наблюдается для СР с толщиной КЯ 4 нм (см. рис. 1в). Период осцилляций по напряжению здесь значительно больше, чем в предыдущих образцах и не соответствует перескокам границы домена между соседними КЯ. Причина этого, по нашему мнению, заключается в том, что при увеличении ширины КЯ растет энергетическое расстояние между уровнями размерного квантования в КЯ и, соответственно, растет максимальное поле в домене. Мы объясняем эти максимумы тем, что туннельные переходы между КЯ в треугольном домене сопровождаются испусканием оптических фононов. Максимальное поле в домене можно оценить с помощью уравнения Пуассона, считая СР сплошной средой, а также оценить разность потенциальных энергий между соседними КЯ в вершине треугольного домена. Такая оценка (безусловно, очень грубая) показывает, что в узкой КЯ эта разность оказывается больше энергии оптического фонона. Тогда происхождение максимумов сводится к следующему. При напряжениях, когда разность энергий основных уровней размерного квантования является кратной энергии оптического фонона, туннельный переход между соседними КЯ происходит с испусканием 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.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2021-667).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 20-02-00624, 20-52-16304). При проведении исследований использована уникальная научная установка “Крио-интеграл” (УНУ #352529), функционирование которой финансируется Министерством науки и высшего

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Папроцкий С.К., Алтухов И.В., Каган М.С. и др. // РЭ. 2019. Т. 64. № 10. С. 1025.
2. Esaki L., Tsu R. // IBM J. Res. Develop. 1970. V. 14. № 1. P. 61.
3. Wacker A. // Phys. Rep. 2002. V. 357. № 1. P. 1.
4. Bonilla L.L., Grahn H.T. // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. № 3. P. 577.
5. Сурис Р.А. // ФТП. 1973. Т. 7. № 8. С. 1035.