

## Проявление эффекта Пёрселла в проводимости короткопериодных сверхрешеток InAs/AlSb

© М.С. Каган<sup>¶</sup>, И.В. Алтухов, А.Н. Баранов\*, Н.Д. Ильинская<sup>+</sup>, С.К. Папроцкий, Р. Тесье\*, А.А. Усикова<sup>+</sup>

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, 125009 Москва, Россия

\* Institut d'Electronique du Sud, Université Montpellier 2, 34095 Montpellier Cedex 5, France

<sup>+</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22 апреля 2013 г. Принята к печати 30 апреля 2013 г.)

Исследовался вертикальный транспорт в короткопериодных сверхрешетках InAs/AlSb с гетеропереходами II рода при комнатной температуре. Обнаружено возникновение отрицательной дифференциальной проводимости в режиме минизонной проводимости при перекрытии размерно-квантованных состояний в периодической системе квантовых ям. В режиме нерезонансного туннелирования обнаружено возникновение эквидистантных максимумов на вольт-амперной характеристике этих сверхрешеток, которые связываются с влиянием резонатора на оптические электронные переходы в квантовых ямах (эффект Пёрселла).

В последние годы большое внимание уделялось изучению структур InAs/AlSb с гетеропереходами II рода. К достоинствам этих структур относятся большой разрыв зон (до 1 эВ) и малая эффективная масса электронов ( $0.023m_0$  в InAs). Эти исследования направлены на разработку фотодетекторов среднего ИК (см., например, [1] и ссылки там) и ТГц [2] диапазонов, квантовых каскадных лазеров, работающих в диапазоне 2.3–5 мкм [3] и высокочастотных транзисторов на горячих электронах [4]. Сверхрешетки (СР) на основе InAs очень привлекательны и для исследования нелинейных явлений переноса [5]. Явления переноса детально исследовались в основном в СР на основе GaAs в связи с ожидаемым усилением блоховских волн, перспективным для генерации ТГц излучения (см., например, обзор [6]). Было найдено, что отрицательная дифференциальная проводимость этих СР вызывает образование электрических доменов, что препятствует наблюдению блоховских осцилляций. В данном сообщении представлены результаты исследования вертикального транспорта в короткопериодных СР InAs/AlSb.

Сверхрешетки InAs/AlSb, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии в университете Монпелье, Франция, содержали 60 периодов (4.5 нм InAs)(3.5 нм AlSb), расположенных между верхним контактным слоем  $n^+$ -InAs(Si) ( $n = 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) и подложкой  $n^+$ -InAs(Si) ( $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ). Квантовые ямы InAs в СР были легированы Si в концентрации  $(1-2) \cdot 10^{17}$  или же  $(5-6) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . С помощью сухого (ионного) травления и обычной фотолитографии изготовлены мезоструктуры.

Для подвода напряжения разработана конструкция в виде полосковой линии, заканчивающейся контактной площадкой. Перед нанесением металла (золота) пластинка с вытравленными мезами покрывалась диэлек-

триком (полиимид), так что подводящие электроды не имели коротких замыканий с подложкой.

Рисунок металлических контактов создавался методами взрывной фотолитографии и вакуумного термического испарения. Металлические контакты к структуре имели форму кольца, образуя распределенный резонатор на длину волны в свободном пространстве от 110 до 160 мкм. Вид резонаторной структуры показан на рис. 1. Кольцевой резонатор представляет собой фактически микрополосковую линию, свернутую в кольцо. В таких резонаторах возбуждаются так называемые моды „шпечущей галереи“. Электрическое поле волны направлено поперек слоев, а волна распространяется вдоль периметра кольца.

К образцу прикладывались импульсы прямоугольной или треугольной формы. Длительность импульсов варьировалась от 0.2 до 10 мкс. Треугольные импульсы позволяли регистрировать вольт-амперные характеристики при прямом и обратном ходе напряжения. Измерения проводились при азотной и комнатной температурах.

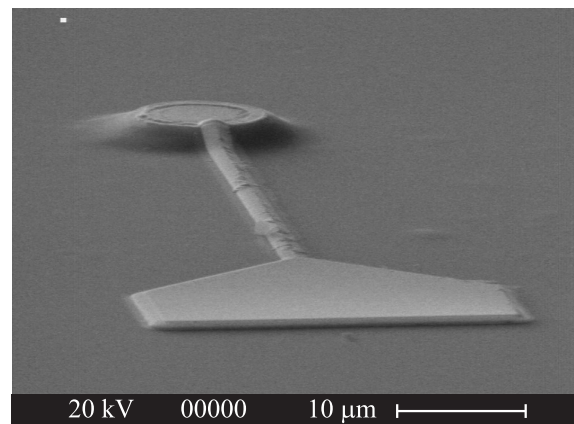
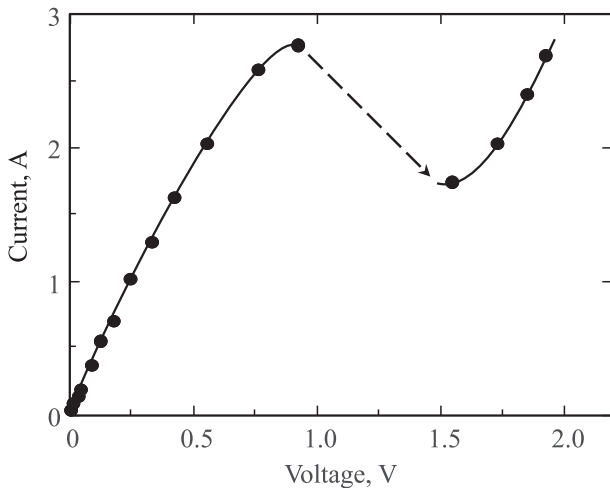


Рис. 1. Резонаторная структура с токоподводом.

<sup>¶</sup> E-mail: kagan@cplire.ru



**Рис. 2.** Вольт-амперная характеристика образца CP InAs/AlSb при 77 К. Прямоугольный импульс, согласованная нагрузка.

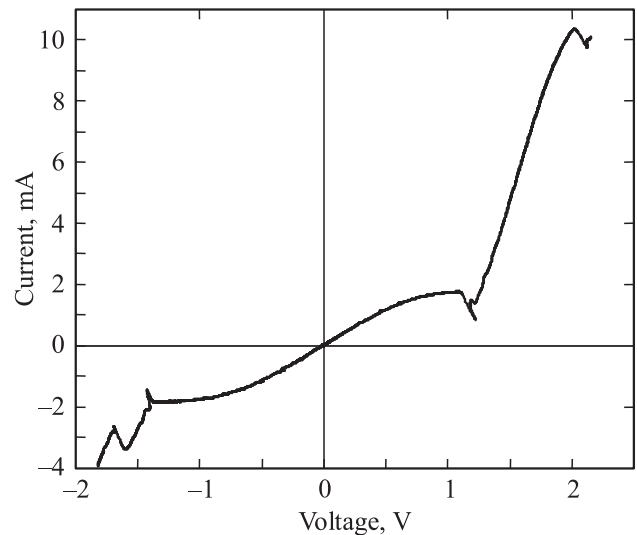
На рис. 2 приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) образца CP, на которой ясно виден участок отрицательной дифференциальной проводимости (ОДП). Разумеется, эта ОДП не может быть измерена непосредственно из-за образования электрических доменов. Можно наблюдать лишь скачок тока и напряжения между участками с положительной дифференциальной проводимостью (показанный стрелкой на рис. 2), связанный с конечной величиной сопротивления нагрузки. Наблюдаемая ОДП возникает при минизонной проводимости по известному механизму Esaki–Tsu из-за перекрытия основных состояний размерного квантования в соседних квантовых ямах (КЯ).

При малом сопротивлении нагрузки в том же интервале напряжений (см. начальный участок ВАХ при  $U \lesssim 1.5$  В на рис. 3 и 4) наблюдается насыщение тока. Это насыщение вызвано образованием статического домена, который образуется из-за флуктуационной неустойчивости однородного распределения электрического поля в образце с ОДП. Из рис. 3 видно, что насыщение тока наблюдается в обеих полярностях напряжения.

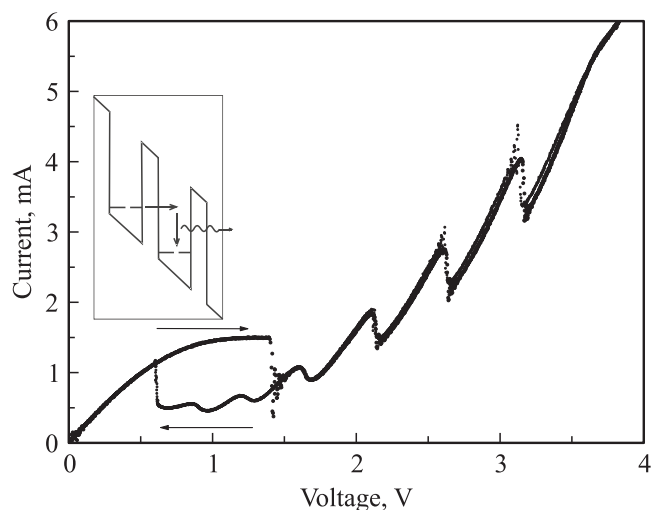
Для использованных в наших экспериментах CP InAs/AlSb оценка ширины минизоны дает 26 мэВ. Конец участка насыщения тока на ВАХ (рис. 4) соответствует  $1.4 \text{ В}/60 = 23 \text{ мВ}$  на один период CP (60 — число периодов). Это значит, что при дальнейшем увеличении напряжения расстояние между уровнями размерного квантования становится больше, чем ширина минизоны. Минизонная проводимость должна прекратиться, а протекание тока будет определяться нерезонансным туннелированием, схема которого показана на вставке к рис. 4. При этом ток должен монотонно расти с напряжением (см., например, [6,7] и ссылки там). Однако в области напряжений 1.5–4.5 В на вольт-амперной характеристике обнаруживаются несколько практически эквидистантных максимумов (рис. 4). Для данного об-

разца расстояние между этими максимумами составляет  $\sim 8.3 \text{ мВ}$  в расчете на один период CP.

Наблюдаемые максимумы не могут быть связанными с перекрытием основного состояния в КЯ с возбужденным состоянием в соседней КЯ, так как разность энергий между основным и первым возбужденным уровнем размерного квантования в нашем случае (узкая КЯ и малая эффективная масса) больше, чем 0.4 эВ (рассчитанные волновые функции для двух первых уровней размерного квантования и схема энергетических уровней приведены на рис. 5). Такое перекрытие может достигаться только при напряжении почти на порядок больше использованных в наших опытах. Отметим, что в работе [7] наблюдались особенности на ВАХ CP GaAs/AlGaAs, которые авторы связывали с резонансным туннелиро-



**Рис. 3.** Вольт-амперная характеристика резонаторного образца CP InAs/AlSb в двух полярностях напряжения.  $T = 300 \text{ К}$ .



**Рис. 4.** Вольт-амперная характеристика CP InAs/AlSb с кольцевым резонатором.  $T = 300 \text{ К}$ . На вставке — схема нерезонансного туннелирования в CP.

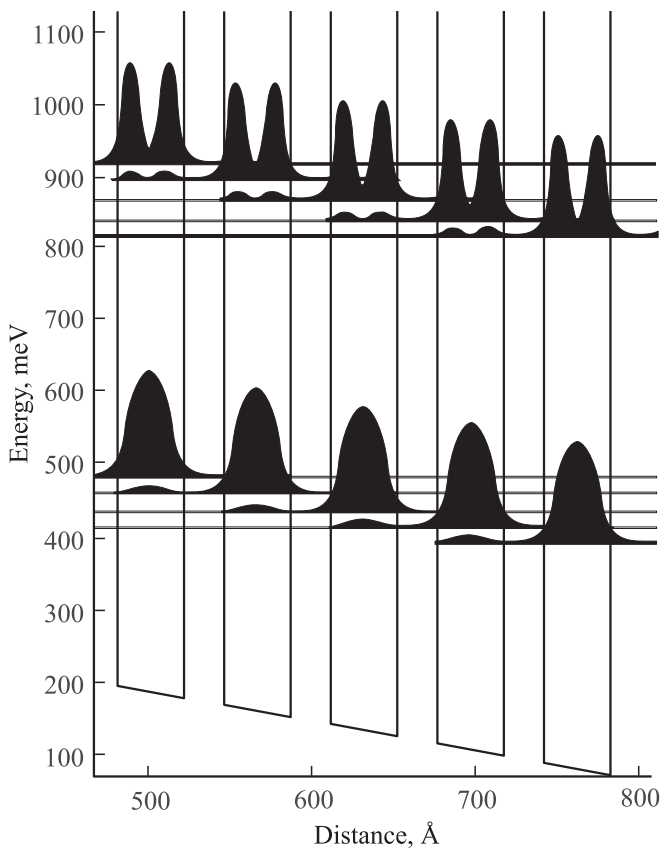


Рис. 5. Энергии и волновые функции CP InAs/AlSb; 40 кВ/см.  $T = 300$  К.

ванием через несколько периодов CP. В отличие от указанной работы в наших сверхрешетках пришлось бы допустить, во-первых, возможность туннелирования через 10–13 периодов CP, а во-вторых, эти максимумы были бы не эквидистантными по напряжению [6]. Эти максимумы нельзя объяснить и нерезонансным туннелированием с испусканием оптического фонона, так как его энергия в InAs составляет  $\sim 30$  мэВ.

Периодические максимумы на ВАХ мы связываем с влиянием резонатора за счет эффекта Пёрселла [8]. Этот эффект заключается в увеличении интенсивности спонтанного излучения в резонаторе по сравнению с интенсивностью спонтанного излучения в свободное пространство. Для вычисления интенсивности излучения в резонаторе надо интенсивность спонтанного излучения умножить на коэффициент Пёрселла:  $F_p = (3/4\pi^2)(\lambda^3/V)Q$  ( $\lambda$  — длина волны в материале,  $Q$  — добротность резонатора,  $V$  — модовый объем). Если положить добротность  $Q = 100$ , то в нашем случае  $F_p \approx 10^3$ . В кольцевых резонаторах добротность мод шепчущей галереи обычно на порядки больше и может достигать величин более  $10^7$  (см., например, работу [9]). Это значит, что энергия, отдаваемая электроном за счет излучения на резонансной частоте, может стать сравнимой с энергией, уносимой при испускании акустических фононов. За счет этого вблизи резонансных

частот должен наблюдаться дополнительный рост тока. В кольцевом резонаторе эти частоты соответствуют целому числу волн на периметре кольца, а разность энергий кванта в соседних резонансах должна совпадать с энергией кванта основной моды с  $\lambda \approx \pi D$  ( $D$  — диаметр кольца). Для образца, данные для которого приведены на рис. 4, наружный диаметр кольца составлял 14 мкм и наблюдаемая разность напряжений между максимумами с хорошей точностью коррелирует с энергией кванта с частотой нашего резонатора ( $\sim 8$  мэВ).

Авторы выражают благодарность А.А. Андронову, А.В. Андрианову, И.Н. Ясевичу, М.В. Якунину и В.Т. Долгополову за ценные дискуссии и обсуждение результатов. Авторы также признательны М.В. Якунину за проведенную оценку ширины мини-зоны в CP InAs/AlSb.

Работа поддержана грантами РФФИ 11-02-00611, 12-02-31828, программами РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и „Современные проблемы радиофизики“ и грантами Министерства науки 2012-1.5-12-000-1009-014 и 2012-1.4-12-000-1024-008.

## Список литературы

- [1] J. Hoffmann, T. Lehnert, D. Hoffmann, H. Fouckhardt. *Semicond. Sci. Technol.*, **24**, 065 008 (2009); Jie Guo et al. *Infr. Phys. Technol.*, **52**, 124 (2009); J.B. Rodriguez, E. Plis, G. Bishop et al. *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 043 514 (2007).
- [2] L.L. Li et al., *Microelectronics J.*, **40**, 812 (2009).
- [3] A.N. Baranov, N. Bertru, Y. Cuminal, G. Boissier, C. Alibert, A. Joullié. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 735 (1997); A.A. Popov, V.V. Sherstnev, A.N. Baranov, C. Alibert, Y.P. Yakovlev, *Electron. Lett.*, **34**, 1398 (1998); J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, A.N. Baranov. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 111 118 (2007).
- [4] T. Daoud, G. Boissier, J. Devenson, A.N. Baranov, R. Teissier. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **193**, 012 014 (2009).
- [5] M.S. Kagan, I.V. Altukhov, A.N. Baranov, N.D. Il'inskaya, S.K. Paprotskiy, V.P. Sinis, A.A. Usikova. *Acta Phys. Polon.*, **119**, 210 (2011).
- [6] A. Wacker. *Phys. Reports*, **357**, 1 (2002).
- [7] А.А. Андронов, Е.П. Додин, Д.И. Зинченко, Ю.Н. Ноздрин. *ФТП*, **43**, 248 (2009).
- [8] E.M. Purcell. *Phys. Rev.*, **69**, 681 (1946).
- [9] T.J. Kippenberg, A.L. Tchebotareva, J. Kalkman, A. Polman, K.J. Vahala. *Phys. Rev. Lett.*, **103**, 027 406 (2009).

Редактор Т.А. Полянская

## **Purcell effect apparent in vertical transport in short-period superlattices InAs/AlSb**

*M.S. Kagan, I.V. Altukhov, A.N. Baranov\*,  
N.D. Il'inskaya<sup>+</sup>, S.K. Paprotskiy,  
R. Teissier\*, A.A. Usikova<sup>+</sup>*

Kotel'nikov Institute of Radio Engineering  
and Electronics, Russian Academy of Sciences,  
125009 Moscow, Russia

\* Institut d'Electronique du Sud,  
Université Montpellier 2,  
34095 Montpellier Cedex 5, France

<sup>+</sup> Ioffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** The vertical transport in short-period type-II InAs/AlSb superlattices was studied. The negative differential conductivity was observed in a miniband transport regime as the result of overlapping confined states in a periodic quantum well structure. Several equidistant maxima appeared on current–voltage characteristics of the superlattices were found in the non-resonant tunneling regime. They are shown to be due to the influence of optical cavity on optical transitions within quantum wells (Purcell effect).