

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ АНИЗОТРОПИЯ ПРОВОДИМОСТИ СВЕРХРЕШЕТОК GaAs КВАНТОВЫХ ПРОВОЛОК, ВЫРАЩЕННЫХ НА ФАСЕТИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ 311A

В.Я.Принц, И.А.Панаев, В.В.Преображенский, Б.Р.Семягин

Институт физики полупроводников СО РАН

630090 Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 4 июля 1994 г.

Продемонстрирована возможность выращивания латеральных сверхрешеток (ЛСР) GaAs квантовых проволок на поверхности 311A, имеющих сильную анизотропию дырочной проводимости вплоть до $T \approx 500$ К. Исследованы температурные зависимости проводимости, холловской подвижности и концентрации дырок в таких модулированно-легированных ЛСР.

Недавно в работах [1–3] была продемонстрирована возможность создания структур с квантовыми проволоками сверхмалых размеров, имеющих высокую степень совершенства. Структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхностях 311A GaAs подложек. В основе способа лежит свойство поверхности 311A расщепляться на высокоупорядоченный массив микроканалов высотой $10,2 \text{ \AA}$ и периодом 32 \AA [1]. Такая фасетированная структура поверхности сохраняется при гомоэпитаксиальном росте GaAs или AlAs. При гетероэпитаксиальном росте происходит заполнение микроканалов, например, исходной поверхности AlAs с последующим формированием фасеток GaAs, то есть массива GaAs проволок (рис.1).

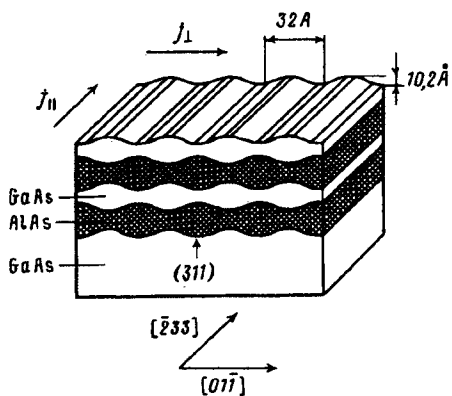


Рис.1

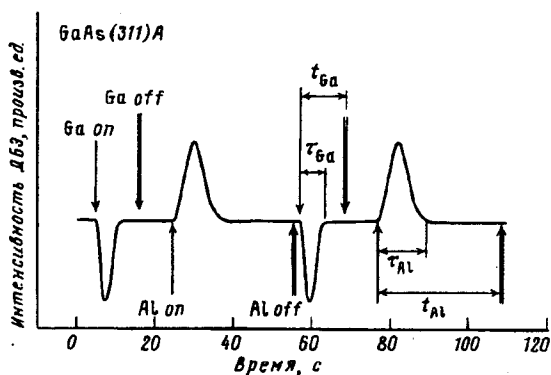


Рис.2

Рис.1. Схематичное изображение сечения многослойной латеральной сверхрешетки $21 \text{ \AA} \text{ GaAs} / 27 \text{ \AA} \text{ AlAs}$, выращенной на фасетированной поверхности 311A

Рис.2. Динамика интенсивности зеркального рефлекса картины дифракции быстрых электронов, записанная для направления, близкого к азимуту $[233]$, во время роста $21 \text{ \AA} \text{ GaAs} / 27 \text{ \AA} \text{ AlAs}$ ЛСР на 311A подложке. Скорости роста: $v_{\text{Ga}} = 1,0 \text{ мкм/ч}$; $v_{\text{Al}} = 0,315 \text{ мкм/ч}$; средние толщины слоев: $\tau_{\text{Ga}} \cdot v_{\text{Ga}} = \tau_{\text{Al}} \cdot v_{\text{Al}} = 10,2 \text{ \AA}$; $t_{\text{Ga}} \cdot v_{\text{Ga}} = 21 \text{ \AA}$; $t_{\text{Al}} \cdot v_{\text{Al}} = 27 \text{ \AA}$

Такой метод создания квантовых проволок прежде всего привлекателен возможностью получения высокопериодичных латеральных сверхрешеток (ЛСР)

квантовых проволок с предельно малыми диаметрами $\sim 20 \text{ \AA}$ и, следовательно, сильным разделением квантовых состояний ($> 0,2 \text{ эВ}$). Это в свою очередь позволяет надеяться не только на исследование квантовых явлений при комнатной температуре, но и на использование их для создания квантовых приборов, работающих при высоких температурах.

К настоящему времени еще много неясностей в вопросах создания и исследования таких сложных структур, вплоть до утверждения об отсутствии расщепления поверхности $311A$ на массив микроканалов [4]. В пионерской работе [1] измеренная в модулированно-легированной латеральной сверхрешетке дырочная проводимость в плоскости слоев в направлении, параллельном проволокам σ_{\parallel} , всего в 1,3 раза превышала проводимость в перпендикулярном направлении, σ_{\perp} , при 77 К. Столь малая анизотропия проводимости при 77 К и ее отсутствие при 300 К делала неясной перспективу исследования квантовых явлений при высоких температурах и создания высокотемпературных квантовых приборов из данного материала.

Эпитаксиальные структуры, исследованные в настоящей работе, были выращены методом МЛЭ на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией $311A$ (разориентация $< 15'$). Поверхности A и B выявлялись предварительно химическим способом. Процесс эпитаксиального роста контролировался *in situ* с помощью измерения дифракции быстрых электронов на отражение с использованием 20 кэВ электронного пучка. Была выращена серия модулированно-легированных Be многослойных ЛСР, содержащих 75 периодов чередующихся слоев GaAs квантовых проволок и AlAs барьеров. Структуры были выращены на идентичных подложках, с одинаковой толщиной нелегированных AlAs барьеров и одинаковыми толщиной и уровнем легирования, легированных Be слоев AlAs. Средняя толщина нелегированных слоев AlAs была равна 27 \AA , а средняя толщина GaAs слоев последовательно изменялась от структуры к структуре в диапазоне от 21 \AA до 8 \AA .

В отличие от работы [4] нами наблюдались отчетливые особенности динамики интенсивности дифракционных рефлексов при гетероэпитаксиальном росте что свидетельствовало о расщеплении поверхности $311A$ на массив микроканалов. Как видно из рис.2, изменение интенсивности после открывания Ga заслонки, а затем возвращение интенсивности к исходному состоянию соответствует, с учетом скорости роста, осаждению на поверхности $311A$ в среднем шести $\{311\}$ монослоев материала, то есть $10,2 \text{ \AA}$, что подтверждает результаты работы [1]. Такое же изменение интенсивности наблюдается и при открывании Al заслонки. В нашем случае, в отличие от данных работы [1], наблюдалось изменение фазы осцилляций при гетероэпитаксиальном росте GaAs на AlAs и, наоборот, AlAs на GaAs. Это отличие может быть связано с выбором дифракционных условий. Циклы, связанные с изменением фазы поверхности $311A$ при гетероэпитаксиальном росте, наблюдались нами в широком диапазоне температур от 350°C до 640°C . Таким образом, представленные на рис.2 результаты подтверждают данные работы [1] и свидетельствуют об образовании массива квантовых проволок или латеральных сверхрешеток. Наблюдавшиеся нами зависимости более отчетливы и проявляются в большом диапазоне температур.

На рис.3 представлены результаты измерений температурной зависимости дырочной проводимости многослойной ЛСР со средней толщиной GaAs слоев 21 \AA и AlAs слоев 27 \AA . Структура содержала внутри три легированных Be

слоя AlAs толщиной 250 \AA , отделенных от ЛСР 50 \AA спейсерами. Из рис.3 хорошо видно, что отношение проводимости вдоль проволок и перпендикулярно

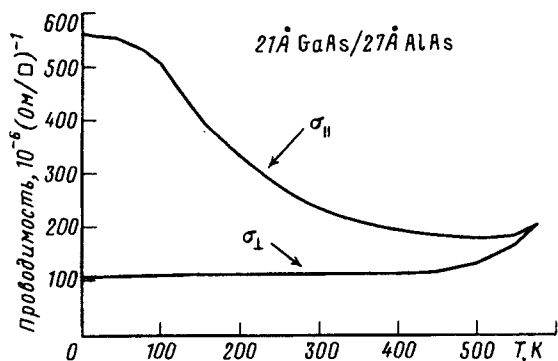


Рис.3. Температурные зависимости проводимости модулированно-легированных $21 \text{ \AA} \text{ GaAs}/27 \text{ \AA} \text{ AlAs}$ ЛСР, измеренные в направлениях, параллельном и перпендикулярном квантовым проволокам

им сильно изменяется при изменении температуры T от $4,2$ до 500 K и равно $5,5$ при 77 K , $2,3$ при 300 K и $1,3$ при 500 K , что существенно выше анизотропии проводимости, наблюдаемой в работе [1]. Другим интересным фактом является различный характер температурных зависимостей проводимостей. Как видно из рисунка, проводимость в плоскости слоев в направлении, параллельном проволокам, возрастает с уменьшением температуры, а в направлении, перпендикулярном им, практически не зависит от температуры. Чтобы получить информацию о латеральном транспорте дырок в такой структуре, были измерены холловская подвижность и концентрация дырок в диапазоне температур $4,2 \div 300 \text{ K}$. Измерения были выполнены на образцах, имеющих геометрию холловского мостика с отдельными потенциальными и токовыми контактами. В одних образцах направление тока совпадало с направлением проволок, в других они были перпендикулярны друг другу. Результаты измерений свидетельствуют о сильной анизотропии холловской подвижности: при уменьшении температуры от 300 K до $4,2 \text{ K}$ подвижность дырок вдоль проволок возрастает от 150 до $1000 \text{ cm}^2/\text{В-с}$, проходя через максимум при 77 K ($1300 \text{ cm}^2/\text{В-с}$), в то время как в направлении, перпендикулярном проволокам, подвижность мала ($200 \text{ cm}^2/\text{В-с}$ при $4,2 \text{ K}$) и слабее зависит от температуры. Относительно большая подвижность дырок вдоль проволок с диаметром $\sim 30 \text{ \AA}$ свидетельствует о достаточно хорошем качестве гетерограниц GaAs/AlAs [5]. При средней толщине GaAs , равной 21 \AA , широкие области GaAs имеют размер 31 \AA , а узкие – 10 \AA . Низкая подвижность дырок в поперечном направлении и характер ее температурной зависимости могут свидетельствовать о том, что транспорт дырок в поперечном направлении определяется или туннелированием дырок [6, 7] между проволоками, или же сильным рассеянием дырок на шероховатостях границ [5] узких 10 \AA областей GaAs , связывающих проволоки. В пользу первого предположения свидетельствуют результаты, полученные на ЛСР, содержащей более тонкие слои GaAs (средняя толщина слоев 14 \AA). В данных структурах узкие области GaAs , соединяющие проволоки, имеют размер $\sim 3 \text{ \AA}$. Качественное поведение проводимостей $\sigma_{||}$ и σ_{\perp} в этом образце было такое же, как и в предыдущем, но возросла анизотропия проводимости при комнатной температуре. Отметим, что концентрация дырок, полученная из холловских измерений, не зависела от ориентации образца и совпадала со слоевой концентрацией, полученной из измерения $C - V$ профиля.

Полученные результаты отражают уникальность данного квантового объекта: наличие достаточно сильной локализации дырок при тонких AlAs барьерных слоях, создающих, однако, высокий потенциальный барьер 0,55 эВ [8]; глубокое залегание квантовых уровней (тонких минизон): так, при толщине квантовой ямы 20 Å основной энергетический уровень отстоит от дна валентной зоны всего на расстоянии 0,1 эВ [8]; малая вероятность туннелирования дырок с тяжелой массой.

Приведенные нами результаты измерений анизотропии дырочной проводимости свидетельствуют о перспективности структур, содержащих ЛСП квантовых проволок, выращенных на поверхностях 311 Å, для создания высокотемпературных электронных квантовых приборов. В заключение отметим, что для получения совершенных квантовых проволок сверх малого диаметра без соединительных слоев необходимо специально оптимизировать условия роста. Выращенные нами структуры со средней толщиной GaAs 10 Å и 8 Å имели уже существенно меньшую анизотропию и низкую подвижность, что свидетельствует о росте проволокообразных кластеров [9].

Авторы благодарны Д.И.Лубышеву за обсуждение и интерес к работе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-15181).

-
1. R.Nötzel, N.N.Ledentsov, L.Daweritz et al., *Phys. Rev. B* **45**, 3507 (1992).
 2. R.Nötzel, N.N.Ledentsov, L.Daweritz et al., *Phys. Rev. Lett.* **67**, 3812 (1991).
 3. R.Nötzel, N.N.Ledentsov, L.Daweritz, and K.Ploog, *Surf. Sci.* **267**, 209 (1992).
 4. O.Brandt, K.Kanamoto, Y.Tokuda, and N.Tsukada, *Phys. Rev. B* **48**, 17599 (1993).
 5. H.Sakaki, T.Noda, K.Hirakawa et al., *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1934 (1987).
 6. R.Tsu and L.Esaki, *Appl. Phys. Lett.* **22**, 562 (1973).
 7. E.E.Mender, W.I.Wang, R.Ricco, and L.Esaki, *Appl. Phys. Lett.* **47**, 415 (1985).
 8. D.A.Contreras-Solorio, V.R.Velasco, and F.Garcia-Moliner, *Phys. Rev. B* **47**, 4651 (1993).
 9. Ж.И.Алферов, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков и др., *ФТП* **26**, 1715 (1992).