

Самоформирование сеток квантовых нитей в пористых сверхрешетках InGaAs/GaAs

Л. К. Орлов¹⁾, Н. Л. Ивина

Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 8 апреля 2002 г.

На базе многослойных гетероэпитаксиальных структур с двумерным газом носителей заряда в слоях InGaAs путем самоформирования в процессе электрохимического травления образцов реализованы структуры, содержащие сетки одномерных квантовых нитей. Факт понижения размерности электронно-дырочной подсистемы, связанный с трансформацией спектра энергии носителей заряда из двумерного в квазиодномерный, продемонстрирован по сдвигу и сужению резонансных линий в спектре фотолюминесценции.

PACS: 78.66.–w

В последние годы наблюдается интерес к пористым системам как к матрицам, на основе которых могут быть сформированы новые объекты пониженной размерности [1]. Одна из таких идей, направленная на создание сетки квантовых проволок, связывается с заполнением пустот пористой диэлектрической матрицы веществом другого химического состава, имеющего металлический (Bi [2]) либо полупроводниковый (PbTe [1]) тип проводимости. В качестве исходной матрицы в последнее время, наряду с диэлектрическими материалами, предлагаются пористые нелегированные полупроводниковые материалы, наиболее часто используемые в изделиях микро- и нанoeлектроники. При анализе транспортных явлений диэлектрические свойства формирующей структуры нитей скелетной матрицы играют определяющую роль, поэтому на эксперименте при выборе последней предпочтение, вероятнее всего, будет отдаваться полупроводникам типа Si, GaAs, InP с большой шириной запрещенной зоны. Попытка реализовать рассмотренную идею на практике, однако, приводит к ряду проблем, обусловленных значительными трудностями выращивания внутри пор исходного кристалла проводящих полупроводниковых нитей с совершенной кристаллической структурой и соответственно высокими электрическими характеристиками. Трактровка результатов измерений также вызывает затруднения вследствие необходимости учитывать влияние на характеристики заполняющего поры материала заряженных состояний на хорошо развитой поверхности пористой структуры.

В настоящей работе мы обсуждаем другой путь изготовления системы сеток квантовых нитей, ос-

нованный на их самоформировании в процессе электролитического травления многослойных гетероэпитаксиальных структур, в которых уже реализованы слои нанометровой толщины с двумерным электронным газом. В качестве исходной кристаллической матрицы мы выбирали гетероэпитаксиальные многослойные квантовые структуры GaAs/InGaAs, выращенные в плоскости (100) и подробно исследованные ранее в работе [3]. Электролитическое травление такой структуры идет, главным образом, по наклонным плоскостям типа {111} [4], формируя на пересечениях последних со слоями InGaAs сетку нитей с высокоподвижным электронным газом, размерность которого зависит от ширины секущих плоскостей. Очевидно, что при определенном выборе режимов и скоростей травления можно получить в объеме GaAs матрицы структуры квазиодномерных InGaAs квантовых нитей, исследование которых представляет самостоятельный интерес в связи со специфическими оптическими и транспортными свойствами [5] обсуждаемых объектов. В то же время при изготовлении подобных структур важен выбор их тестирования, так как в итоге не должно оставаться никаких сомнений в том, что после окончания процесса травления мы будем иметь дело именно со структурой квантовых одномерных проводников, пусть и весьма сложной конфигурации.

Критерием формирования системы квантовых нитей в плоскости двумерного слоя InGaAs, не зависящим от конфигурации их расположения, могут служить особенности оптических спектров, в частности, спектров фотолюминесценции, анализ которых хорошо зарекомендовал себя ранее для тестирования других низкоразмерных объектов. Отчетливо наблюдаемая при температуре жидкого азота линия люминес-

¹⁾e-mail: orlov@ipm.sci-nnov.ru

центрации, связанная с рекомбинационными переходами двумерных носителей заряда в слоях полупроводниковой структуры, позволяет легко проследить по изменению положения и ширины спектральных линий возможную трансформацию спектра электронов, обусловленную понижением размерности системы в процессе электрохимического травления.

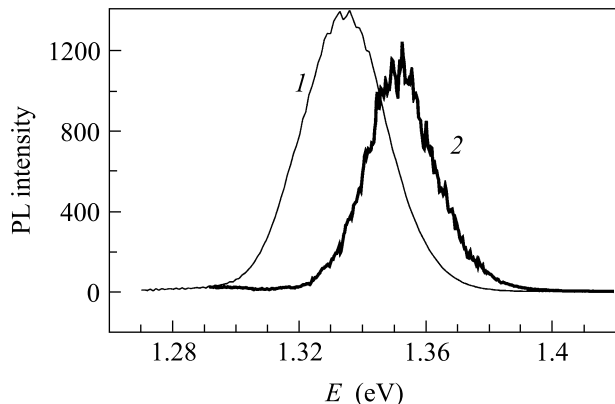


Рис.1. Спектры фотолюминесценции, снятые при $T = 77$ К от исходного образца СР InGaAs/GaAs до (кривая 1) и после (кривая 2) травления в течение 60 мин

Исходный образец, выбранный нами для изучения, представлял собой выращенную методом МOCVD в плоскости (100) периодическую структуру $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$, содержащую в слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ двойные квантовые ямы общей толщиной $d_1 = 2d_{qw} + d_b = (2 \cdot 5 \text{ нм} + 5 \text{ нм})$ с содержанием (x) индия в тройном соединении около 25 ат.%. Двойные квантовые ямы отстояли одна от другой в матрице GaAs на расстояние примерно 0.07 мкм. Всего сверхрешетка содержала 10 периодов и имела электронный тип проводимости. Исходный спектр фотолюминесценции от квантоворазмерных слоев InGaAs, полученный при температуре $T = 77$ К с возбуждением от гелий-неонового лазера, приведен на рис.1 (кривая 1). Дальнейшая процедура создания наклонных плоскостей, линии пересечения которых с плоскостями слоев InGaAs и должны были сформировать систему проводящих квантовых нитей, проводилась стандартным методом электрохимического травления в растворе плавиковой кислоты с этиленом при плотностях токов 20–40 мА/см² и ультрафиолетовой подсветке. Очевидно, что по мере травления структуры поры будут растравливаться, а толщина поперечных перегородок будет уменьшаться, что должно проявиться в трансформации электронного спектра, в частности, в понижении его размерности вследствие эффекта дополнительного

пространственного ограничения двумерных электронов и дырок в плоскости (100) структуры. В спектрах фотолюминесценции переход от двумерной системы к одномерной будет сопровождаться соответствующей трансформацией наблюдаемых спектральных линий. Прежде всего, в спектре фотолюминесценции следует ожидать появления сдвига линии излучения в более высокоэнергетическую область спектра и уменьшение ширины спектральной линии вследствие резкого возрастания электронной плотности состояний в энергетических зонах.

Характерные спектральные кривые, полученные до и после травления образца в течение 60 мин, представлены на рис.1, где указанные выше особенности поведения линии фотолюминесценции проявляются достаточно отчетливо. Спектральный пик излучения от двумерных слоев InGaAs испытывает достаточно заметное смещение в коротковолновую область спектра. Зависимость сдвига линии фотолюминесценции от времени травления образца представлена на рис.2а. Предполагая, что сечение нити имеет

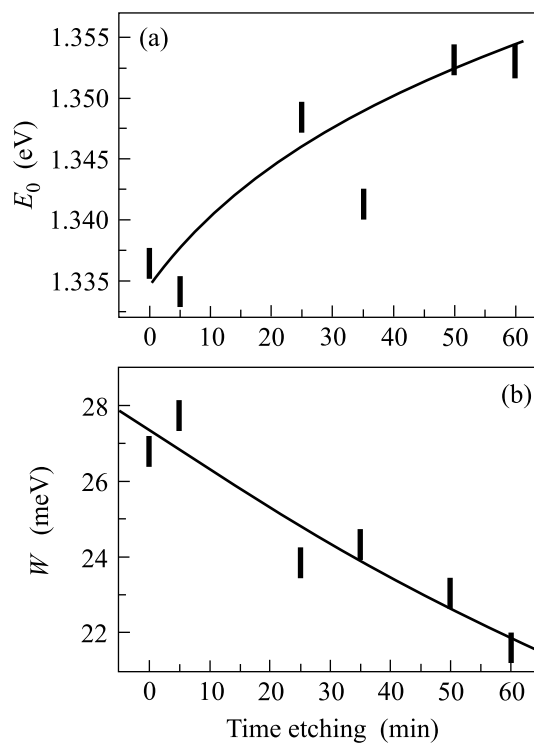


Рис.2. Зависимости положения максимума линии фотолюминесценции E_0 (а) и значения ее ширины W на полувысоте (б) от времени травления образца

вид прямоугольника, и используя простейшую формулу для спектра энергии электрона (дырки) в нити $E(n, k, p_z) = E_{g0} + p_z^2/2m_{e(h)} + \{\pi^2\hbar^2/2m_{e(h)}\}\{(n + 1/2)d_1^2 + (k + 1/2)d_2^2\}$, получим для дополнительного

сдвига линии люминесценции, связанного с введением при травлении дополнительного пространственного ограничения (d_2) в плоскости (100) структуры, выражение $\Delta E = \Delta E_e + \Delta E_h = \pi^2 \hbar^2 / 2d_2^2 (1/m_e + 1/m_h)$, где $m_{e(h)} = 0.06(0.4)m_0$ – эффективные массы электрона (дырки), соответственно. Сдвиг линии люминесценции на величину $\Delta E \approx 30$ мэВ соответствует ширине бокового сечения нити $d_2 \approx 15$ нм.

Вытравливание образца с напряженными слоями InGaAs в принципе может снимать часть накопленной в системе упругой энергии, смещая тем самым линию люминесценции в длинноволновую область спектра, занижая тем самым немного проведенную оценку боковых размеров нити. Проведенные рентгено-дифракционные исследования образца до и после травления показывают, однако, что накопленная в образце упругая деформация практически не меняется, то есть деформация слоев как в монокристаллическом образце, так и в пористой структуре остается приблизительно на одном уровне, практически одинаковым образом сказываясь на характеристиках энергетического спектра электронов в обеих системах.

Понижение размерности спектра носителей заряда в полупроводнике, в частности, переход от двумерной системы к квазиодномерной, приводит к изменению характера плотности состояний в энергетическом спектре. В структуре с двумерным электронным газом зависимость от энергии плотности состояний в двумерной зоне пропорциональна $\rho(E) \sim (E - E_n)^{1/2}$. Понижение размерности спектра электронов на единицу в процессе формирования в слоях структуры квантовых нитей приводит к более ярко выраженной энергетической зависимости плотности состояний в одномерной зоне вида $\rho(E) \sim (E - E_{nk})^{-1/2}$. Здесь E_n и E_{nk} – края энергетических подзон квантового слоя и квантовой нити, соответственно. Существенное повышение плотности состояний в окрестности краев энергетических зон должно приводить к обужению спектральных линий фотолюминесценции, с одной стороны, и повышению эффективности излучения, аналогично тому, как это имеет место в системе квантовых точек, с другой.

Для рассматриваемой структуры зависимость ширины линии люминесценции, измеряемая на ее полувысоте, от времени травления образца представлена на рис.2б. Нужно заметить, что исходная спектральная кривая 1 на рис.1 с достаточно большой шириной резонансной линии (~ 27 мэВ) с высокой точностью описывается гауссовой зависимостью. Это указывает на то, что ширина линии люминесценции не связана в данном случае с элек-

тронными процессами, а обусловлена исключительно разбросом параметров структуры (например, толщины квантовой ямы как в пределах одного, так и нескольких периодов сверхрешетки). Электрохимическое травление образца и образование пор (вообще говоря, разного диаметра) должно увеличивать статистическую неоднородность по толщине формируемых нанообъектов. Это, в свою очередь, с неизбежностью будет приводить к дополнительному уширению спектральных линий. Однако в процессе травления данного образца мы наблюдали последовательное уменьшение ширины линии от 27 до 21 мэВ. Данный факт указывает на то, что влияние эффекта дополнительного пространственного ограничения, проявляющегося в процессе формирования в образце структуры пересекающихся квантовых нитей, оказывается выраженным более сильно, чем влияние статистических неоднородностей, также возникающих в процессе травления.

На рис.3 представлена зависимость интегральной интенсивности линии фотолюминесценции от време-

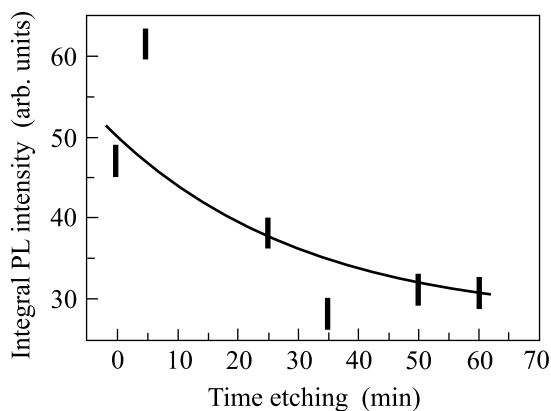


Рис.3. Зависимость интегральной интенсивности линий фотолюминесценции от времени травления образца

ни травления. Поведение данной кривой определяется двумя факторами. С одной стороны, ухудшение зеркальных характеристик поверхности структуры в процессе ее травления будет приводить к уменьшению интенсивности отраженного сигнала возбуждающего лазера и, как следствие, к увеличению доли поглощаемой в образце мощности, что способствует, в свою очередь, увеличению эффективности фотолюминесценции [4]. С другой стороны, уменьшение объема активного светоизлучающего слоя вследствие его вытравливания должно приводить к снижению эффективности излучения, что и наблюдается в нашем случае (рис.3).

Таким образом, исследование особенностей спектров фотолюминесценции от подвергнутых электрохимическому травлению многослойных гетероэпитаксиальных структур InGaAs/GaAs с квантовыми ямами убедительно демонстрирует возможность самоформирования в них в плоскости слоев InGaAs сеток квазиодномерных проводящих объектов, проявляющих свойства квантовых нитей.

В заключение авторы выражают глубокую признательность Н. А. Алябиной за оказанную помощь при подготовке образцов, Б. Н. Звонкову за предоставленные структуры и проф. Е. С. Дмидову (ННГУ) за плодотворные дискуссии.

Работа выполнялась при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований

(# 01-02-16778; # 01-02-06232 “мас”; # 02-02-06577 “мас”) и Научно-технической программы “Физика твердотельных наноструктур”.

-
1. В. Н. Богомолов, А. И. Задорожный, Т. М. Павлова и др., Письма в ЖЭТФ **31**, 406 (1980).
 2. А. Д. Грозав, Н. И. Лепорда, ФТТ **38**, 1924 (1996).
 3. Л. К. Орлов, Н. Л. Ивина, Р. А. Рубцова и др., ФТТ **42**, 537 (2000).
 4. Ю. Н. Бузынин, С. А. Гусев, Ю. Н. Дроздов и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **5**, 40 (1996).
 5. J. Voit, Rep. Progr. in Phys. **58**, 977 (1995).