

СПЕКТРОСКОПИЯ СЛОЕВ InAs в GaAs В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ СЛОЕВОГО К ТРЕХМЕРНОМУ РОСТУ

Б.Н.Звонков, Е.Р.Линькова, И.Г.Малкина¹⁾, Д.О.Филатов, А.Л.Чернов

Физико-технический институт при Нижегородском государственном университете
603600 Н.Новгород, Россия

Поступила в редакцию 28 января 1996 г.

В образцах с непрерывно возрастающей эффективной толщиной напряженного слоя прослежены изменения спектров фотолюминесценции и фотоэлектрических явлений при переходе от слоевого к трехмерному росту с образованием квантовых точек.

PACS 73.90.+f

Известно, что при достижении некоторой критической толщины напряженного слоя происходит переход от слоевого к трехмерному росту. Это отражается на электронном спектре эпитаксиальной структуры, и возникает возможность переходов между нуль-мерными состояниями, возникающими в трехмерных кристаллических образованиях. При этом субмонослойное покрытие дает узкую линию [1–3]. Трехмерные образования – квантовые точки (КТ), из которых каждая имеет сверхузкую (с полушириной порядка 0,1 мэВ [4]) линию, вместе дают широкую линию, форма которой соответствует распределению Гаусса из-за их большого количества и разброса по размерам [1]. Спектры эпитаксиальных структур GaAs , содержащих напряженный слой InAs , вблизи критической толщины должны сильно зависеть от параметров структуры: количества InAs , а также размеров и формы слоя и трехмерных образований, по-видимому, принимающих форму монослойных островков и ограненных пирамидок InAs , соответственно [5–7]. Однако момент возникновения трехмерных образований трудно установить экспериментально [1–3], поэтому подробных исследований изменения спектра в области перехода нет. (В особенности это относится к МОС-гидридной эпитаксии, при которой невозможны структурные исследования *in situ*.) Поэтому исследуемые образцы характеризуют эффективной толщиной слоя InAs , которую рассчитывают по скорости и времени роста последнего.

В данной работе прослежена эволюция спектров фотолюминесценции (ФЛ) структур InAs/GaAs в области перехода от слоевого к трехмерному росту при непрерывном увеличении эффективной толщины слоя InAs . Получены также первые данные фотоэлектрической спектроскопии КТ.

Структуры были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Для получения структур с плавно меняющейся эффективной толщиной слоя InAs условия роста были выбраны таким образом, что скорость роста слоя линейно зависела от расстояния от переднего края подложки вдоль направления газового потока. Таким образом были выращены клинообразные структуры с линейно изменяющейся от тонкого к толстому краю толщиной слоев. Угол клина обеспечивал шаг по толщине слоя InAs на 0.02 монослоя (МС) при перемещении на 1 мм.

¹⁾e-mail: maximov@nifti.nnov.su

1. *Эксперимент.* Структуры выращивали на разориентированных (с отклонением на 3° к плоскости (110)) и точно ориентированных (с отклонением от (001) менее 0.5°) подложках (001) GaAs. Источниками служили триметилгаллий, триметилиндий и арсин. Температура роста составляла 550 и 650° С, скорость роста InAs – 0.3–1.3 МС в секунду. Эффективная толщина слоев InAs – 0.6–2.2 МС. Поверх InAs были выращены: слой арсенида галлия 0.1–0.3 мкм, квантоворазмерный слой InGaAs (для повышения точности определения скорости роста арсенида индия) и 0.1–0.3 мкм GaAs. Концентрация носителей в эпитаксиальных слоях *n*-типа была $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$, *p*-типа – 10^{16} см^{-3} .

Фотолюминесценцию возбуждали гелий-неоновым лазером (633 нм). Уровень возбуждения составлял 10^{21} фотон/см²·с. Методика измерений фотопроводимости и конденсаторной фотоэдс в барьере на поверхности структуры приведена в работе [8]. Измерения проводились при 77 и 300 К.

2. *Фотолюминесценция.* На рис.1 представлена зависимость энергии максимума спектра ФЛ (а) и его полуширины (ширины на уровне половины максимальной интенсивности) (б) от эффективной толщины слоев InAs, выращенных на разориентированной подложке. При эффективной толщине слоя InAs менее 0.7 МС не было заметно никаких отличий от характерного для эпитаксиального слоя GaAs вида спектра. Наблюдалась основная линия с энергией максимума 1.508 эВ и акцепторная линия с энергией максимума 1.488 эВ.

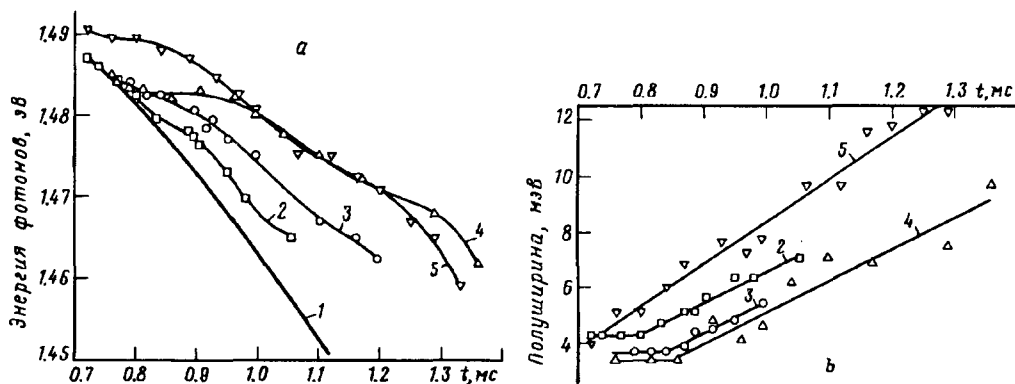


Рис.1. Зависимость энергии максимума (а) и полуширины (б) спектра ФЛ от эффективной толщины слоев InAs: кривая 1 – теоретическая для однородного слоя, рассчитанная по (1), 2, 4, 5 – в структурах *n*- и 3 – *p*-типа, выращенных при температуре 550° С (2, 3, 5) и 650° С (4) на разориентированной подложке. При выращивании структуры (5) сразу после осаждения слоя InAs перед началом осаждения покрывного слоя GaAs была сделана остановка роста на 3 мин. В это время поверхность слоя находилась в потоке арсина

При толщине слоя 0.7–0.8 МС на фоне излучения, обусловленного переходом с участием акцепторов (углерод), появляется узкая линия с полушириной 3.4–4.4 мэВ, интенсивность которой быстро растет с толщиной слоя. В образцах, выращенных без длительной выдержки поверхности напряженного слоя в арсине (кривые 2, 3, 4), линия сдвигается в сторону понижения энергии перехода. Можно предположить, что на этом участке излучение происходит при

переходах, связанных с монослоем InAs, постепенно покрывающим поверхность буферного слоя GaAs от одной ступени до другой. На разориентированной на 3° подложке расстояние между моноатомными ступенями равно 54 \AA . При послойном росте островки монослоя InAs вытянуты вдоль ступени [5]. Тогда, благодаря тому, что размеры волновой функции связанного в такой квантовой яме носителя превышают размеры островков в направлении движения ступеней, атомный слой, содержащий островки монослоя InAs, можно рассматривать как полный монослой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в котором x прямо пропорционален эффективной толщине InAs. Тогда энергию перехода можно рассчитать в приближении мелкой прямоугольной ямы по формуле

$$h\nu = E_g^{\text{GaAs}} - [\Delta E_c^2(x)m_c + \Delta E_v^2(x)m_v]t^2/2\hbar^2, \quad (1)$$

где $\Delta E_c(x)$ и $\Delta E_v(x)$ – разрывы зон в зоне проводимости и в валентной зоне, зависящие от состава $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, t – толщина монослоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Если считать разность ширины запрещенной зоны GaAs и напряженного InAs ΔE_g равной 1.02 эВ , а отношение $\Delta E_c/\Delta E_g = 0.8$ [9], положение максимума фотолюминесценции и расчетная энергия перехода хорошо согласуются между собой. Полуширина спектра на этом участке постоянна (рис.1б).

При эффективной толщине InAs более $0.8\text{--}0.9 \text{ МС}$ энергия переходов становится выше $h\nu$, рассчитанной по формуле (1) (рис.1а), а полуширина линии начинает расти (рис.1б). При увеличении эффективной толщины слоя до 2 МС (на рисунках не показано) она достигает 30 мэВ . Совершенно иначе ведет себя полуширина спектра ФЛ квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \approx 0.1$): в соответствующем диапазоне энергий фотонов она даже несколько уменьшается при увеличении толщины напряженного слоя.

Форма спектров, соответствующих этому интервалу толщин, хорошо описывается гауссианой.

Интересная особенность связана с температурной зависимостью полуширины спектра. Хотя интенсивность фотолюминесценции уменьшается с ростом температуры, при энергии максимума менее 1.45 эВ (77 К) фотолюминесценция наблюдается и при 300 К . Полуширина спектра при этом увеличивается не более, чем на 1 мэВ при изменении температуры от 77 до 300 К . Тогда как полуширина экситонного излучения квантовых ям $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.1 - 0.35$) растет в тех же условиях не менее, чем на 6 мэВ , так же, как в работе [10].

Наличие особенности в зависимостях энергии максимума и полуширины спектра фотолюминесценции от эффективной толщины слоя и, в особенности, отсутствие уширения спектра с ростом температуры указывают на переход к трехмерному росту, происходящий, когда эффективная толщина InAs на разориентированной подложке достигает $0.8\text{--}0.9 \text{ МС}$. Увеличение температуры от 550 до 650°C (рис.1а, кривая 4) не изменяет критическую толщину перехода. При увеличении температуры роста структур возрастает лишь энергия максимума спектров, соответствующих участку толщин, больших критической, что может быть связано с частичной десорбцией индия с поверхности подложки [11], в результате которой уменьшаются характерные размеры трехмерных образований. Увеличение времени выдержки поверхности слоя InAs в арсине от 6 с (рис.1, кривая 3) до 180 с (рис.1, кривая 5) приводит также к увеличению энергии максимума, однако полуширина спектра растет с толщиной уже во всем исследованном интервале, что свидетельствует об уменьшении

критической толщины перехода к трехмерному росту при увеличении времени выдержки до значений менее 0.7 мс.

3. *Фотоэлектрическая спектроскопия.* На рис.2 приведены спектры фоточувствительности (фотоэдс в поверхностном барьере, нормированной на число фотонов) слоя InAs, выращенного на точно ориентированной подложке. Насколько нам известно, ранее не было опубликовано данных фотоэлектрической спектроскопии КТ. Действительно, если КТ не находятся в области пространственного заряда, они не дают существенного вклада в фотопроводимость. Однако если толщина покровного слоя такова, что они оказываются в поле поверхностного барьера, наблюдается сильная линия в спектрах фотопроводимости и фотоэдс на поверхностном барьере, совпадающая с линией ФЛ по энергии максимума и также описываемая гауссианой. Кроме того, имеется ступенька, соответствующая, возможно, переходам в монослойном покрытии, остающемся в структуре и после образования КТ (показана стрелками на рис.2). При толщине, близкой к критической, край ступеньки соответствует 1.470 эВ на точно ориентированном образце и 1.480 эВ на разориентированном. Небольшой сдвиг края ступеньки к низким энергиям при увеличении эффективной толщины можно объяснить упругой деформацией в слое GaAs, находящемся в той же плоскости, что и трехмерные образования, и деформируемом последними: этот слой испытывает растяжение в направлении роста. Деформационные потенциалы при этом таковы, что растяжение приводит к уменьшению запрещенной зоны деформируемого слоя и, следовательно, изменяет энергию переходов в монослойной яме.

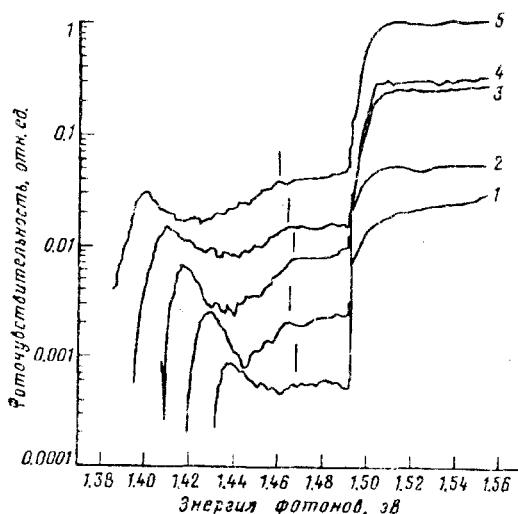


Рис.2. Спектр фоточувствительности слоя InAs, выращенного на точно ориентированной подложке. Увеличение номера кривой соответствует увеличению эффективной толщины InAs

Таким образом, исследование структур InAs/GaAs со слоями клинообразной формы позволило выявить особенности зависимости их спектров от эффективной толщины, связанные с переходом от слоевого к трехмерному росту.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-02-05610), программы ФТНС (грант 2-19/3) и INTAS (грант 93-1403).

1. N.N.Ledentsov, P.D.Wang, C.M.Sotomayor Torres et al., *Phys. Rev. B* **50**, 12171 (1994).
2. R.Schwabe, F.Pietag, M.Faulkner et al., *J. Appl. Phys.* **77**, 6295 (1995).
3. M.I.Alonso, Matthias Pg, K.Ploog et al., *J. Appl. Phys.* **78**, 1980 (1995).
4. Ж.И.Алферов, Д.Бимберг, А.Ю.Егоров и др., *УФН* **168**, 224 (1995).
5. V.Bressler-Hill, A.Lorke, S.Varma et al., *Phys. Rev. B* **50**, 8479 (1994).
6. J.Oshinovwo, M.Nishioka, S.Ishida et al., *Appl. Phys. Lett.* **65**, 1421 (1994).
7. Y.Nabetani, T.Ishikawa, S.Noda et al., *J. Appl. Phys.* **76**, 347 (1994).
8. В.Я.Алешкин, А.В.Аншон, Т.С.Бабушкина и др., *ФТП* **24**, 892 (1990).
9. X.Marie, J.Barrau, V.Brousseau et al., *J. Appl. Phys.* **69**, 812 (1991).
10. W.Z.Shen, W.G.Tang, S.C.Shen et al., *Appl. Phys., Lett.* **65**, 2728 (1994).
11. C.K.Peng, S.L.Tu, S.S.Chen et al., *Appl. Phys. Lett.* **66**, 2549 (1995).