

СИЛЬНАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, ВЫРАЩЕННОГО НА ПЛОСКОСТИ (110) GaAs

В.Я.Алешкин⁺¹), Б.Н.Звонков, Е.Р.Линькова, И.Г.Малкина,
Ю.Н.Сафьянов

⁺Институт физики микроструктур
603600 Н.Новгород, Россия

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

Поступила в редакцию 18 июля 1995 г.

Обнаружена сильная линейная поляризация фотолюминесценции (ФЛ) из $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($0,485 < x < 0,55$), выращенного МОС-гидридной эпитаксией на плоскости (110) GaAs . Для объяснения поляризации ФЛ выдвинута гипотеза о новом типе упорядочения в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$. В упорядоченной фазе атомы In и Ga располагаются в местах катионов не статистически, а в чередующихся попарно плоскостях (110). В ходе рентгенографических исследований были обнаружены сверхструктурные отражения, соответствующие двухслойной сверхрешетке $(\text{InP})_2(\text{GaP})_2$ с периодом $\sim 8\text{Å}$ вдоль направления [110], что подтверждает нашу гипотезу.

Хорошо известно [1], что $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($x \approx 0,5$), выращенный методом МОС-гидридной эпитаксии на плоскости (001) GaAs , имеет включения упорядоченной фазы. В упорядоченной фазе атомы In и Ga занимают места катионов в решетке не статистически, а в чередующихся плоскостях (111) или (111). В результате в этих включениях симметрия понижается от кубической $F43m$ до тригональной $R3m$ и вместо структуры с решеткой цинковой обманки образуется структура с решеткой типа CuPt [2]. Возможными являются и другие типы упорядочения [3,4]. Поскольку упорядоченная фаза $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ оптически анизотропна, а ширина ее запрещенной зоны меньше, чем в неупорядоченном твердом растворе, то упорядочение в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ приводит к поляризации фотолюминесценции (ФЛ). Однако, из-за наклона плоскостей упорядочения к плоскости роста на угол 55° степень поляризации ФЛ с плоскости роста в таких структурах не превышает 50%.

В настоящей работе обнаружена сильная линейная поляризация из $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($0,485 < x < 0,55$), выращенного МОС-гидридной эпитаксией на плоскости (110) GaAs . Степень поляризации ФЛ с плоскости роста близка к 100%. Для объяснения зависимости интенсивности ФЛ от поляризации выдвинута гипотеза о новом типе упорядочения в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$. В упорядоченной фазе атомы In и Ga располагаются в чередующихся попарно катионных плоскостях (110). Для проверки этой гипотезы были проведены рентгеноструктурные исследования. Были обнаружены сверхструктурные отражения, соответствующие двухслойной сверхрешетке $(\text{InP})_2(\text{GaP})_2$ с периодом $\sim 8\text{Å}$ вдоль направления [110], что подтверждает нашу гипотезу.

Эпитаксиальные слои $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($x = 0,485 \div 0,55$) были выращены при 650°C и скорости роста $\sim 10\text{Å}/\text{с}$ методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении. Источниками служили триметилиндия, триметилгаллия

¹) e-mail: aleshkin@ipm.aci-nnov.ru

и фосфин. Толщина слоев составляла $0,8 \div 2,2$ мкм. Слои были *n*- и *p*- типа с концентрацией носителей не более 10^{17} см^{-3} . В качестве подложки использовался *n*⁺-GaAs (АГЧО-1). Эпитаксиальные слои выращивались на плоскости (110).

Для возбуждения ФЛ использовались два лазера: HeNe ($\lambda = 633 \text{ нм}$) мощностью 40 мВт и Ar ($\lambda = 514 \text{ нм}$) мощностью 1 Вт. Излучение лазера фокусировалось в пятно диаметром $\sim 0,1 \text{ мм}$ на грань (110).

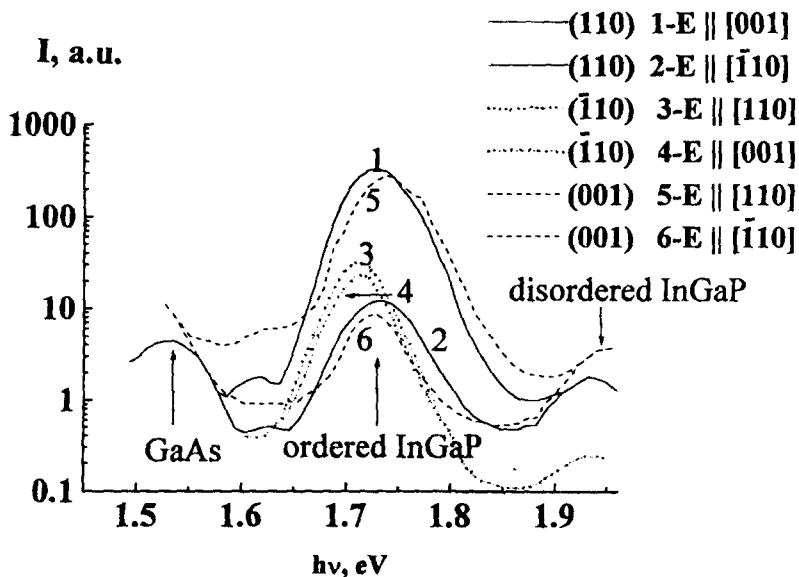


Рис.1. Спектры фотолуминесценции из $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{P}$ с трех различных граней (110) – кривые 1 ($E \parallel [001]$) и 2 ($E \parallel [110]$) ($\bar{1}\bar{1}0$) – кривые 3 ($E \parallel [110]$) и 4 ($E \parallel [001]$), (001) – кривые 5 ($E \parallel [110]$) и 6 ($E \parallel [\bar{1}\bar{1}0]$) для двух разных поляризаций в каждом случае

На рис.1 изображены спектры ФЛ, наблюдаемые при 77 К из $\text{In}_{0,52}\text{Ga}_{0,48}\text{P}$ с трех различных граней (110), ($\bar{1}\bar{1}0$), (001) для двух разных поляризаций в каждом случае. Направление наблюдения ФЛ всегда было близко к перпендикулярно к грани, с которой выходило излучение. Длинноволновый пик в спектрах соответствует ФЛ из *n*⁺-GaAs. Его интенсивность не зависит от поляризации. Для удобства спектры ФЛ, соответствующие различным направлениям наблюдения, смещены друг относительно друга вдоль оси ординат. Средний пик ($\hbar\omega = 1,73 \text{ эВ}$) соответствует люминесценции из упорядоченной фазы твердого раствора. Коротковолновый пик ($\hbar\omega = 1,94 \text{ эВ}$), так же как и длинноволновый, слабо зависит от поляризации. Мы полагаем, что он соответствует ФЛ из неупорядоченного твердого раствора. Из рисунка хорошо видно, что наблюдаемая с грани роста ФЛ из упорядоченного твердого раствора (кривые 1 и 2) сильно поляризована. Для энергии $\hbar\omega = 1,73 \text{ эВ}$ пик ФЛ, соответствующий направлению электрического поля $E \parallel [001]$ (кривая 1), примерно на полтора порядка выше пика, который соответствует $E \parallel [\bar{1}\bar{1}0]$ (кривая 2). В то же время, ФЛ с грани ($\bar{1}\bar{1}0$) слабо поляризована (кривая 3 и 4). Разница между кривыми 3 и 4 обусловлена точностью измерений

интенсивности ФЛ. Такая зависимость ФЛ от поляризации наблюдалась для всех исследованных образцов ($x = 0,485 \div 0,55$).

Из теории оптических свойств полупроводников со структурой цинковой обманки [5] известно, что сильная (100%) линейная поляризация ФЛ может иметь место в том случае, когда потолок валентной зоны образован состояниями тяжелых дырок с каким-либо выделенным направлением квазиимпульса p . Происходит это потому, что излучательные дипольные переходы между зоной проводимости и зоной тяжелых дырок запрещены при $E \parallel p$. Известно также, что потолок валентной зоны в квантовых ямах и сверхрешетках образован состояниями дырок с квазиимпульсами вдоль направления квантования движения (направления изменения потенциала для огибающей волновой функции).

Эти аргументы приводят нас к двум предположениям для объяснения поляризации ФЛ. Первое предположение состоит в том, что потолок валентной зоны в исследованных структурах образован состояниями тяжелых дырок. Второе предположение состоит в появлении потенциала для огибающей волновой функции, который изменяется в направлении $[\bar{1}10]$. Такого рода потенциал может появиться за счет расположения атомов In и Ga в чередующихся плоскостях $(\bar{1}10)$, то есть за счет упорядочения в направлении $[\bar{1}10]$.

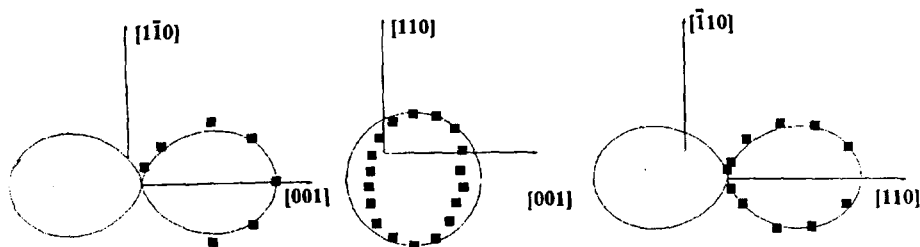


Рис.2. Зависимости интенсивности фотолуминесценции от направления вектора электрического поля. Левый рисунок соответствует ФЛ с грани (110) , средний - $(\bar{1}10)$, правый - (001)

Для проверки этих предположений были измерены зависимости интенсивности ФЛ от направления E для трех направлений наблюдения. На рис.2 приведены результаты этих наблюдений и расчетные зависимости, полученные из приведенных выше предположений. Видно хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими зависимостями.

Для определения типа упорядочения в слоях $In_xGa_{1-x}P$, выращенных на подложке (110) GaAs, нами проведено рентгеновское исследование на дифрактометре ДРОН-2 (CuK_{α} -излучение) образца толщиной $\sim 2\mu m$ и составом $x \approx 0,52$. Упорядочение в твердых растворах по плоскостям $(\bar{1}10)$, одновременно с упорядочением по плоскостям (110) и (001) , присуще упорядочению по типу CuAuI. Такое упорядочение наблюдалось в эпитаксиальных слоях $Al_xGa_{1-x}As$, выращенных на подложке (110) GaAs [6]. При этом типе упорядочения плоскости, содержащие только атомы Al, чередуются с плоскостями, содержащими только атомы Ga, то есть образуется однослойная сверхрешетка $(AlAs)(GaAs)$. На дифракционной картине от такого слоя присутствуют сверхструктурные отражения с индексами $2n \pm 1, 2n \pm 1, 2n$ или $2n, 2n, 2n \pm 1$, которые запрещены в неупорядоченной структуре (сфалеритовой решетке).

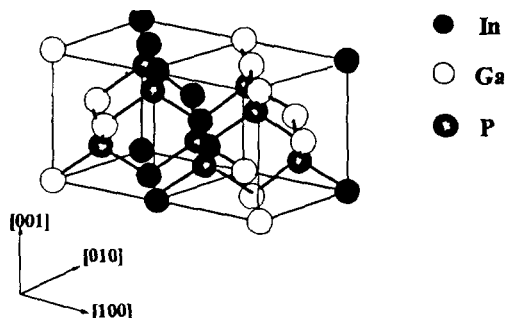


Рис.3. Расположение атомов в упорядоченной фазе $\text{In}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{P}$

Сверхструктурные отражения с индексами, характерными для упорядочения по типу CuAuI , не были обнаружены. Было сделано предположение, что в исследуемом слое возможно упорядочение по типу двухслойной сверхрешетки $(\text{InP})_2(\text{GaP})_2$, когда две соседние плоскости $(\bar{1}10)$, содержащие только атомы In, чередуются с двумя плоскостями, содержащими только атомы Ga (см. рис.3). При таком упорядочении на дифракционной картине должны присутствовать сверхструктурные отражения с индексами $h \pm 1/2$, $k \mp 1/2$, $\pm l$. Нами были зарегистрированы сверхструктурные отражения $\frac{3}{2}\frac{1}{2}1$, $\frac{1}{2}\frac{3}{2}1$, $\frac{3}{2}\frac{1}{2}\bar{1}$, и $\frac{1}{2}\frac{3}{2}\bar{1}$, подтверждающие сделанное предположение. Следовательно, в исследуемых слоях $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенных на подложке (110) GaAs, формируется двухслойная сверхрешетка $(\text{InP})_2(\text{GaP})_2$ с периодом $\sim 8 \text{ \AA}$ вдоль направления $[\bar{1}10]$.

В заключение отметим, что энергия излучательного перехода из упорядоченной фазы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ ($\hbar\omega = 1,73 \text{ эВ}$) в наших образцах меньше энергии излучательных переходов из упорядоченной фазы с решеткой CuPt ($\hbar\omega \approx 1,8 \text{ эВ}$). Тогда как в работе [3] при рассмотрении аналогичного упорядочения в плоскости (110) было предсказано обратное соотношение между этими энергиями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 93-02-1.1721 и 95-02-05610), Программы физики твердотельных наноструктур (2-19/3) и INTAS (93-1403).

1. A.Mascarenhas, S.Kurtz, A.Kibbler, and J.M.Olson, *Phys. Rev. Lett.* **63**, 2108 (1989).
2. T.Kanata, M.Nishimoto, H.Nakayama, and T.Nishino, *Phys. Rev.* **B45**, 6637 (1992).
3. A.Franceschetti and A.Zunger, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 2990 (1994).
4. S.R.Kurts, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 4130 (1993).
5. Оптическая ориентация под ред. Б.П.Захарченя и Ф.Майера Л.: Наука, 1989; **41**, 8240 (1990).
6. T.S.Kuan, T.F.Kuech, W.J.Wang et al., *Phys. Rev. Lett.* **54**, 201 (1985).