

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ
В СИСТЕМЕ $In-Ga-As-P$
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОЙ ЭПИТАКСИИ

И.Н. Арсентьев, Н.А. Берт,
А.В. Васильев, Д.З. Гарбузов,
Е.В. Журавкевич, С.Г. Конников,
А.О. Косогов, А.В. Кочергин,
Н.Н. Фалеев, Л.И. Флакс

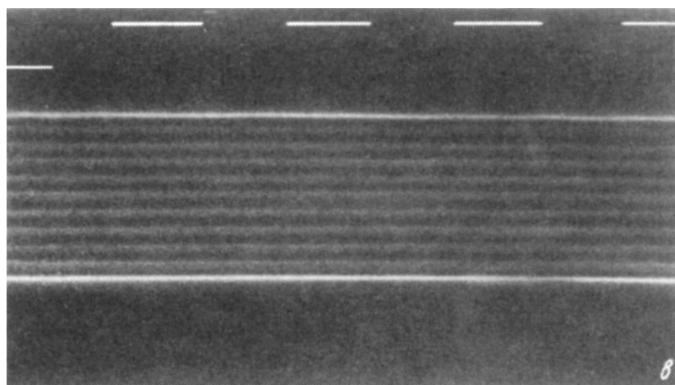
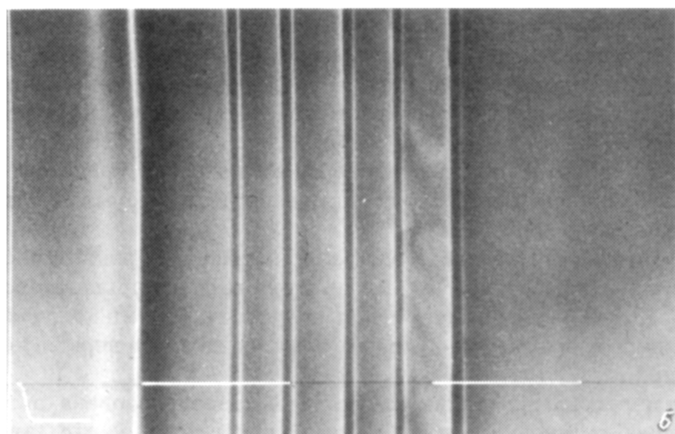
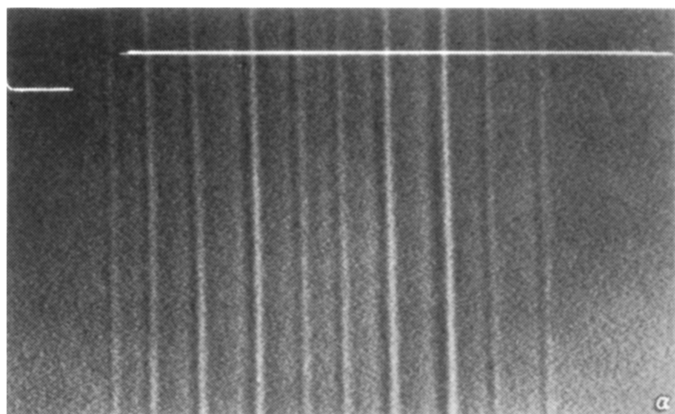
В работе [1] была впервые продемонстрирована возможность получения методом жидкостной эпитаксии периодических многослойных гетероструктур с периодом в несколько сот ангстрем. В специально разработанной авторами [1] вращающейся системе рост тонких слоев $InGaAsP$ осуществлялся при быстром прохождении подложки под пересыщенным расплавом, размеры которого в направлении движения были сравнимы с размерами подложки. В более поздних работах [2, 3] нами было показано, что при использовании специальной ростовой ячейки с узкой выходной щелью в системах $InGaAsP/GaAs$ и $InGaAsP/InP$ в обычных горизонтальных сдвиговых кассетах при поступательном движении подложки могут быть изготовлены гетероструктуры, в состав которых входят слои с толщинами порядка 100 Å.

Результаты, приводимые в данном сообщении, свидетельствуют о том, что разработанный нами простой вариант жидкофазной эпитаксии может быть применим для получения не только одиночных квантово-размерных структур, но и многослойных периодических структур.

Для изготовления таких структур была использована автоматизированная установка, управляемая вычислительным комплексом ДВК-ЗМ. В соответствии с программой управляющая система выработывала электрические сигналы, которые задавали скорость движения подложки под ростовыми щелями, время ее остановок в нейтральных положениях и общее число проходов под щелями, равное числу периодов гетероструктуры. Эти сигналы подавались на линейный электромагнитный двигатель, приводящий в движение шток, управляющий положением подложки в кассете. Описываемая система позволяла осуществлять движение подложки с заданной скоростью в диапазоне скоростей от 0.01 до 1.5 м/с.

В рассматриваемых ниже экспериментах подложка с постоянной скоростью проходила под двумя ростовыми щелями, содержащими расплавы различного состава, останавливалась в нейтральном положении (время остановки 30 с), а затем этот процесс многократно повторялся.

В качестве подложки при выращивании многослойных структур были использованы пластины InP (100) и (111) и пластины $GaAs$ с ориентацией (111). Температура расплавов в процессе



роста оставалась постоянной, и пересыщение во всех случаях составляло около 10°C .

Исследование толщины, планарности слоев и периода структуры проводилось с помощью регистрации сигнала вторичных электронов в электронном микроскопе EM-420 („Филипс“), снабженном растровой приставкой. При этих исследованиях получение контраста обеспечивалось за счет предварительного травления скола структур в травителе $K_3[Fe(CN)_6]:KOH$ в течение нескольких секунд. За счет большой скорости травления в этом травителе на месте расположения слоев, обогащенных *As*, образуются канавки, которые соответствуют зонам слабого сигнала и выглядят как темные полоски на телевизионном изображении скола. На рис. 1, а,б приведено изображение сколов двух структур с чередованием слоев *InGaAsP* - *InP* и *InGaAsP* - *InGaP*, выращенных на подложках *InP* и *GaAs* с ориентацией (111). Светлые полосы соответствуют слоям *InP* и *InGaP*, а темные - слоям четверных соединений, толщины которых для этих двух структур были соответственно около 100 и 300 Å.¹

Слои *InP* и *InGaP* в этих структурах были выращены при тех же скоростях движения подложки, что и для четверных соединений, и разница в толщинах слоев, составляющих каждую структуру, отражает разницу в скоростях роста соответствующих соединений на подложках с ориентацией (111). Эксперименты с использованием подложек *InP* с ориентацией (100) показали, что вследствие эффектов подтравливания слоев четверных соединений получение периодических структур в этом случае представляет собой более сложную задачу. Уменьшение эффектов подтравливания может быть достигнуто при использовании в качестве широкозонного слоя не слоев *InP* и *InGaP*, а четверных соединений, также содержащих *As*. Изображение скола такой периодической структуры, выращенной на подложке *InP* (100), показано на рис. 1,в.

¹ Еще более светлые узкие полоски на границах слоев, наблюдающиеся в ряде случаев, связаны с высокой эффективностью генерации вторичных электронов на вертикальных стенках, образующихся при травлении структур с сильным химическим различием слоев, входящих в их состав [4].

Рис. 1. Изображение во вторичных электронах поперечных сколов структур: а - слои $In_{0.7}Ga_{0.3}As_{0.66}P_{0.34}$ и *InP*, выращенные на подложке *InP* (111); б - слои $In_{0.2}Ga_{0.8}As_{0.6}P_{0.4}$ и $In_{0.51}Ga_{0.49}P$, выращенные на подложке *GaAs* (111); в - слои $In_{0.7}Ga_{0.3}As_{0.66}P_{0.34}$ и $In_{0.8}Ga_{0.2}As_{0.42}P_{0.58}$, выращенные на подложке *InP* (100). Размеры меток: а,б - 0.5 мкм; в - 0.25 мкм. Периодические структуры заключены между подложкой (на фотографии - справа) и толстыми верхними слоями *InP* или *InGaP*.

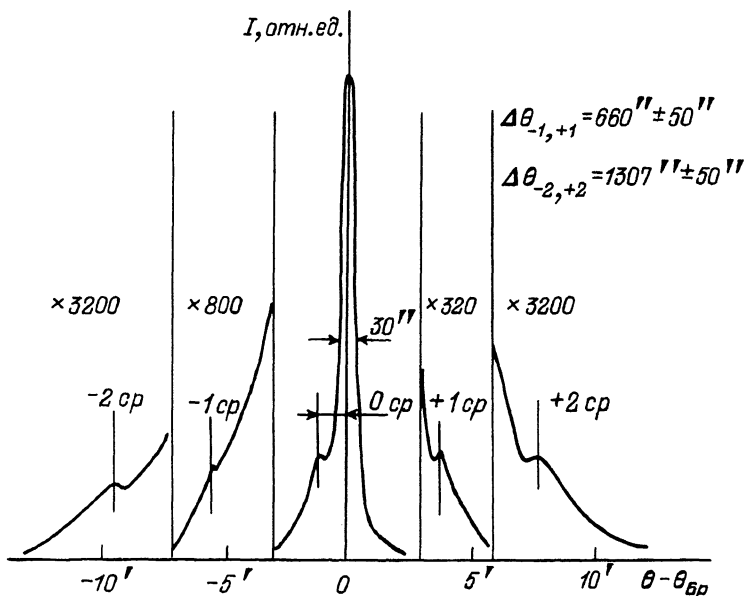


Рис. 2. Кривая дифракционного отражения (КДО) структуры $In_{0.7}Ga_{0.3}As_{0.66}Po_{0.34} - In_{0.9}Ga_{0.2}As_{0.42}Po_{0.58}$, изображение скола которой приведено на рис. 1, в.

изо-

Рентгенодифракционные измерения параметров периодических структур (ПС) проводились на двухкристальном дифрактометре, собранном на базе гониометра ГУР-8. Кривые дифракционного отражения (КДО) снимались в геометрии ($\pi_1 - \pi_2$), где π_1 - порядок отражения рентгеновского излучения кристаллом-монохроматором, π_2 - исследуемым кристаллом. В качестве кристалла-монохроматора использовался совершенный монокристалл Ge на симметричном отражении (111) излучения SiK_{α_1} . В зависимости от ориентации исследуемых образцов записывались КДО на отражениях (111), (222) или (200) при одновременном ($\theta - 2\theta$) угловом сканировании исследуемого образца и детектора.

Известно, что при дифракции рентгеновского излучения на периодических структурах на КДО помимо основных максимумов, соответствующих отражению от подложки и всего объема периодической структуры, характеризуемого некоторым средним параметром рассогласования, появляются сателлиты, которые расположены симметрично относительно основного максимума ПС на угловых расстояниях, определяемых периодом чередования слоев в ней [5].

На рис. 2 приведена КДО структуры с подложкой InP (100), поперечный скол которой показан на рис. 1,в. В хорошем соответствии с данными рис. 1,в период структуры, определенный по угловым расстояниям между сателлитами первого ($+1$ CP) и второго порядка ($+2$ CP), составляет около 500 Å.

Несмотря на существенно более низкое качество картин КДО (большая ширина линий, высокий уровень фона) для рассматриваемых жидкофазных структур по сравнению с аналогичными кривыми для $AlGaAs$ сверхрешеток [5, 6], изготовленных молекулярной или газофазной эпитаксией, сам факт их получения, так же как и результаты электроннозондовых исследований сколов структур, позволяют заключить, что разработанный метод жидкофазной эпитаксии может быть использован для получения не только квантоворазмерных лазеров с одной ямой, но и с набором квантовых ям в активной области.

Л и т е р а т у р а

- [1] Резек Е.А., Нолоньяк N., Вояк Ir. В.А. and Stillman G.E. - Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, N 4.
- [2] Чудинов А.В., Чалый В.П., Свелокузов А.Е., Васильев А.В., Тер-Мартirosян А.Л., Гарбузов Д.З. - ФТП, 1987, т. 21, в. 7, с. 1217-1222.
- [3] Алфёров Ж.И., Арсентьев И.Н., Вавилова Л.С., Гарбузов Д.З., Красовский В.В.- ФТП, 1984, т. 18, в. 9, с. 1655-1659.
- [4] Гоулдстейн Дж., Ньюберн Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лившин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, т. 1, М.: Мир, 1984.
- [5] Leymuller A., Krishna P., Esaki L. - J. Appl. Cryst., 1977, v. 10, p. 1-6.
- [6] Конников С.Г., Коваленков О.В., Погребницкий К.Ю. - ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1745-1749.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
12 января 1988 г.