ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

С.З. Зайнабидинов, Ш.Х. Йулчиев, Х.Ж. Мансуров, А.Й. Бобоев, Ж.Н. Усмонов.

Қалай аралашма-эритмасидан суюқ фазали эпитаксия усули билан квант нуқтали $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ қаттиқ аралашмани олиш, шунингдек, уларни бошқариш, GaAs ва унинг асосидаги қаттиқ қоришмалардан эффектив ва арзон қуёш элементини олиш усули кўрсатилди.

***Калит сўзлар:** суюқ фаза, юпқа, нанокристал гетеротузилма, яримўтказгич, қаттиқ аралашма.*

Показана возможность получения твердого раствора $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии из оловянного раствора-расплава, также получения путем управления их параметрами эффективного и доступного солнечного элемента на основе GaAs и его твердых растворов.

***Ключевые слова:** жидкофазный, пленка, нанокристалл, гетероструктура, полупроводник, твёрдый раствор.*

The possibility of obtaining the solid solution $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ with quantum dots by liquid-phase epitaxy method from the tin solution-melt is shown, as well as controlling their production parameters, effective and accessible solar cell on basis of GaAs and its solid solutions.

***Key words:** liquid-phase, film, nanocrystal, heterostructures, semiconductor, solid solution.*

---

1. Введение

В связи с развитием нанотехнологий и актуальностью исследования нанообъектов, в частности, получение нанокристаллитов, т.е. полупроводниковых квантовых точек (КТ), представляет интерес как для фундаментальной физики, так и для потенциального применения в электронных и оптоэлектронных приборах.

Данная работа посвящена выращиванию и исследованию структурных и оптических свойств твердого раствора $(GaAs)_{1-x-y}(Ge_2)_x(ZnSe)_y$ с квантовыми точками ZnSe на основе GaAs. Интерес к этим объектам обусловлен их уникальными физическими свойствами, связанными с атомоподобным энергетическим спектром КТ и возможностью изготовления на их основе оптоэлектронных приборов [1].

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования квантовых точек при кристаллизации в процессе выращивания методом жидкофазной эпитаксии.

2. Теоретические предпосылки по выращиванию КТ методом жидкофазной эпитаксии

Выращивание эпитаксиальных структур с квантовыми точками (КТ) осуществлялось в процессе жидкофазной эпитаксии методом принудительного охлаждения. Суть используемого метода принудительного охлаждения состоит в том, что подложка лицевой поверхностью находится в контакте с насыщенным раствором-расплавом при выбранной температуре Т. За время т на лицевой поверхности подложки происходит кристаллизация эпитаксиального нанослоя с КТ. В этом случае движущей силой процесса кристаллизации является разность химических потенциалов атомов кристаллизуемого вещества в жидких (μ_L) и твердых (μ_S) фазах. Так как постоянная решетки материала квантовой точки a_2 ($a_{2,ZnSe}$=5.66 Å) существенно отличается от постоянной решетки базового полупроводника a_1 ($a_{1,(GaAs)1-x(Ge2)x}$ = 5.4595 Å), то на гетерогранице субкристаллитов (блоков) и эпитаксиальных слоев, при формировании КТ, возникают сдвиговые механические напряжения. Эти механические напряжения могут быть выражены через упругую энергию $U(x)$, приходящуюся на один атом квантовой точки с координатой x, где $0 \le x \le d/2$, d – диаметр основания квантовой точки. Тогда разность химических потенциалов будет определяться выражением [2]:

$$\Delta\mu_{ST} = \mu_L - \mu_S - U(x) = \Delta\mu - U(x) \quad (1)$$

При $U > \Delta\mu$ процесс кристаллизации меняется на процесс растворения, так как $\Delta\mu_{ST}$ становится отрицательной величиной. Равенство $U = \Delta\mu$ определяет максимально допустимые механические напряжения в квантовой точке. Параметры решетки базового полупроводника $a_{1,GaAsGe}$ и материала квантовой точки $a_{2,ZnSe}$ не зависят от температуры, максимальное значение диаметра

основания (*d*) зарождающейся квантовой точки в данных условиях выращивания может быть определено из выражения $U\left(\frac{d}{2}\right)=\Delta\mu$ в виде [3]:

$$d=2\sqrt{\frac{\Delta\mu\left(a_1+a_2\right)a_1a_2N_S}{G\left(a_1-a_2\right)^2}} \quad (2)$$

где N_S – число атомов на единицу поверхности, G - модуль сдвига. Так как зародыши, образующиеся на гетерогранице субкристаллитов (блоков) эпитаксиальных слоев, представляют собой сферические сегменты, радиус кривизны которых соответствует радиусу гомогенного критического зародыша, образованного в жидкой фазе при тех же условиях кристаллизации, то расчет радиуса кривизны зародыша вычисляется по формуле:

$$r=\frac{2\sigma M}{\rho RT\ln\frac{C}{C_0}} \quad (3)$$

где s – межфазная поверхностная энергия в жидкой фазе, r, *M* – плотность и молярная масса вещества зародыша; *R* – универсальная газовая постоянная; *C*, C_0 – концентрации базового полупроводника (GaAsGe) и КТ (ZnSe) в перенасыщенном и равновесном растворах соответственно. Тогда высота *h* гетерогенного зародыша КТ будет определяться выражением:

$$h=r\left[1-\left(1-\frac{d^2}{\left(2r\right)^2}\right)\right] \quad (4)$$

В процессе роста зародыша КТ происходит увеличение механических напряжений в слое материала КТ (ZnSe), прилегающего к гетерогранице, до значений, соответствующих упругим постоянным объемного слоя GaAsGe. Из-за того, что напряжение в КТ имеет градиент, направленный по нормали к плоскости базового полупроводника, у основания КТ при $m_{ST} < 0$ образуется криволинейный фронт травления боковой поверхности КТ. Это, в свою очередь, изменяет условие локального равновесия фаз вблизи гетерограницы по сравнению с плоским фронтом травления [4].

Таким образом, при образовании механически напряженного, смачивающего слоя происходит формирование массивов квантовых точек в приповерхностной области базового полупроводника.

3. Образцы и методика эксперимента

Для экспериментальных исследований поверхностных состояний эпитаксиальные пленки с КТ ZnSe на основе твердого раствора $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ выращивались на технологической установке с вертикально расположенным кварцевым реактором. Эпитаксиальные пленки были получены на GaAs подложке с удельным сопротивлением 250 Ом·см и толщиной 350 мкм n-типа проводимости методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава (Sn−Si−ZnSe) в атмосфере очищенного палладием водорода. Начальная температура кристаллизации эпитаксиального слоя составляла 730 °С, скорость охлаждения раствора-расплава ~1 °С/мин. Выращенные слои имели толщину ~ 10 мкм, удельное сопротивление 0,1 Ом·см, р-типа проводимости. Исследования поверхности проводились с использованием промышленного атомно-силового микроскопа (АСМ) «Solver-NEXT«, позволяющего измерять рельеф поверхности, распределение потенциала по поверхности.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Рельеф поверхности эпитаксиальных пленок $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ изучался с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ). На рис. 1 показано трехмерное АСМ изображение эпитаксиальной пленки. Видно, что на поверхности образуются отдельные наноостровки различного

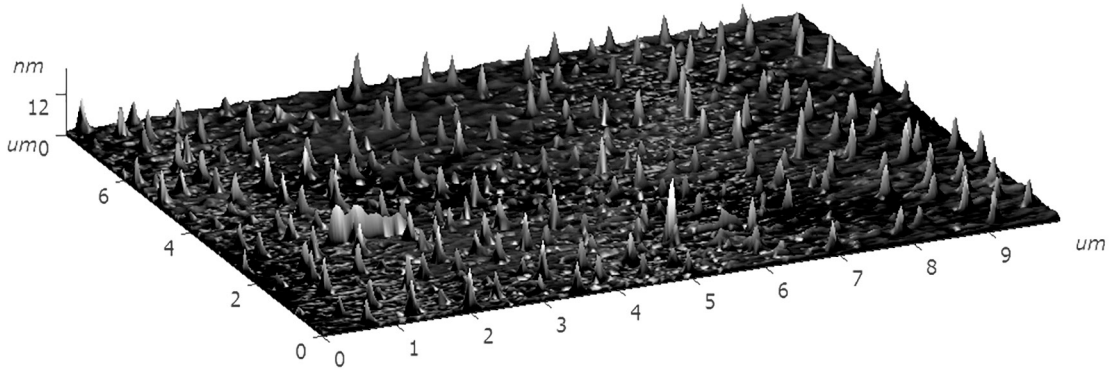

Рис. 1. ***АСМ изображение эпитаксиального слоя твердого раствора $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ трехмерные (а) и линейные (б) размеры среднего островка на поверхности пленки.***

размера. Анализ показал, что диаметр основания островков варьируется в интервале до 100 нм, а высота от 3 до 12 нм. При эпитаксиальном наращивании различных полупроводниковых материалов, энергия деформации, вызванная несоответствием параметров кристаллической решетки контактирующих полупроводников, является основным фактором для формирования самоорганизующихся трехмерных островков [5]. Поскольку рассогласование постоянных решеток для систем GaAs/ZnSe и GaAs/Ge (0,323%) одинаково, то возможно формирование квантовых точек как ZnSe, так и Ge на поверхности GaAs. В работе [6] было показано, что эпитаксиальные пленки $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$, выращенные на GaAs подложке имели совершенную монокристаллическую структуру с ориентацией (100). В пленке присутствовали когерентно расположенные нанокристаллиты от ZnSe с параметром решетки a_{ZnSe} = 5.667 Å и с размерами 59 нм по направлениям (100), соответственно, а также от Ge с параметром решетки a_{Ge} = 5.67 Å и размерами 44 нм по направлениям (100), соответственно. Заметим, что параметр решетки нанокристаллитов ZnSe в эпитаксиальной пленке ~ на 0,22% больше, чем его табличное значение, что, возможно, обусловлено деформацией кристаллической решетки эпитаксиальной пленки. Размеры наноостровков (квантовых точек), полученные исследованиями АСМ на поверхности пленки и нанокристаллитов, полученная рентгеновской дифракцией на эпитаксиальной пленке имели близкие значения. На основе этих данных, а также результатов структурных анализов исследованных структур можно сделать вывод о том, что наблюдаемые наноостровки на поверхности эпитаксиальных слоев обусловлены квантовыми точками ZnSe.

Таким образом, показана возможность получения твердого раствора $(GaAs)_{0.69}(Ge_2)_{0.17}(ZnSe)_{0.14}$ с квантовыми точками методом жидкофазной эпитаксии, а также, управляя их параметрами, возможность получения эффективного и доступного солнечный элемент на основе GaAs и его твердых растворов.

Работа выполнена по гранту № Ф2-68 Комитета по координации и развитию науки и технологий при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Литература:

1. Saidov A.S., Zainabidinov S.Z., Kalanov M.U., Boboev A.Y., Kutlimurotov B.R. Applied Solar Energy. 2015, Volume 51, Issue 3, pp 206-208.

2. Марончук И.Е., Марончук А.И., Кулюткина Т.Ф., Найденкова М.В., Чорный И.В. Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования/- № 12:- 97 (2005).

3. Леденцов Н.Н., Устинов В.М., Щукин В.А., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д., ФТП, 1998. 32, № 4. 385-411.

4. Марончук И.Е., Кулюткина Т.Ф., Марончук И.И., Быковский С.Ю. Жидкофазная эпитаксия и свойства наногетероструктур на основе соединений III-V. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2012. Том 10 № 1. С. 77-88.

5. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур.- М/: Физматлит: 2009.

6. Zainabidinov S.Z., Saidov A.S., Leiderman A.Yu., Kalanov M.U., Usmonov Sh.N. and Boboev A.Yu. Semiconductors, 2016, Vol. 50, No. 1, pp. 59–65.

Андижон давлат университети,
2018 йил 14 сентябрда қабул қилинган
(Тақризчи: проф. Р.Алиев)