

05.3;02

Наноразмерные слои GaAs, полученные при импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава

© И.Е. Марончук, А.И. Марончук, А.В. Шорохов

Херсонский индустриальный институт, Херсон, Украина

Поступило в Редакцию 19 марта 1997 г.

Предложен новый способ получения наноразмерных слоев, основанный на импульсном охлаждении насыщенного раствора-расплава. Полученные слои исследовались с помощью фотолюминесценции, результаты свидетельствуют о высоком квантовом выходе люминесценции, а следовательно и высоком качестве выращенных слоев.

В работе [1] описан метод импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава, позволяющий получать субмикронные слои. В настоящей работе представлены спектры фотолюминесценции наноразмерных слоев и квантоворазмерных легированных сверхрешеток арсенида галлия, полученных этим методом.

При выращивании эпитаксиальных слоев методом импульсного охлаждения к тыльной стороне подложки, находящейся при температуре T_0 в термодинамическом равновесии с насыщенным раствором-расплавом, подводится пластина с температурой $T_1 < T_0$, называемая теплопоглотителем. В результате импульсного охлаждения подложки на ее лицевой поверхности происходит кристаллизация наноразмерного эпитаксиального слоя. Толщина получаемого слоя, как следует из рассмотрения процессов тепло- и массопереноса в неравновесных условиях, приведенного в [1], определяется температурой и толщиной теплопоглотителя в соответствии с выражением

$$d = \frac{M_1 \rho_2 D}{M_2 \rho_1 m} \int_0^{t_0} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} dt, \quad (1)$$

где m — тангенс угла наклона линии ликвидуса; $M_{1,2}$, $\rho_{1,2}$ — молярные массы и плотности GaAs и Ga; D — коэффициент диффузии мышьяка

в галлии; z — координата, направленная по нормали к поверхности подложки и отсчитываемая от фронта кристаллизации; t_0 — время роста.

Выращивание осуществлялось на подложках полуизолирующего GaAs с $\rho > 10^7 \Omega \cdot \text{см}$, ориентацией поверхности (100), прошедших стандартную обработку в полирующем травителе. Устройство, использовавшееся для выращивания, позволяло перемещать подложку между растворами-расплавами различных составов и получать как наноразмерные, так и объемные (в процессе принудительного охлаждения насыщенного раствора-расплава) эпитаксиальные слои на подложках размером $5 \times 10 \text{ мм}$.

Для наблюдения люминесцентных свойств наноразмерных слоев выращивались нелегированные структуры, содержащие одиночный наноразмерный слой GaAs, заключенный между двумя объемными слоями $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ толщиной порядка $2 \mu\text{м}$, аналогичные описанным в [2]. Сначала на подложке GaAs в процессе принудительного охлаждения насыщенного раствора-расплава выращивали объемный эпитаксиальный слой $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$. Затем методом импульсного охлаждения насыщенного раствора GaAs в расплаве галлия наращивали наноразмерный эпитаксиальный слой GaAs и на поверхности этого наноразмерного слоя методом принудительного охлаждения наращивали второй объемный слой состава $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$. Таким образом, единичный наноразмерный слой был заключен между двумя объемными слоями широкозонного твердого раствора.

Легированные сверхрешетки выращивали методом импульсного охлаждения, перемещая подложку между растворами-расплавами, содержащими примесь p -типа (германий) и n -типа (олово), и приводя ее в каждом положении в контакт с теплопоглотителем, имеющим температуру T_1 .

Фотолюминесценция полученных гетероструктур и сверхрешеток возбуждалась при температуре 77 К аргоновым лазером с интенсивностью от 40 до 500 W/cm^2 .

На рис. 1 представлен спектр фотолюминесценции наноразмерного слоя GaAs при интенсивности возбуждения 300 W/cm^2 . Слой был получен при температуре $T_0 = 700^\circ\text{C}$ с помощью теплопоглотителя, имеющего толщину $\delta = 3 \text{ мм}$ и температуру $T_1 = 660^\circ\text{C}$. Положение максимумов пиков хорошо согласуется с результатом расчета энергетических спектров частиц в потенциальной яме, произведенным в приближении эффективной массы. Полоса с максимумом в 1.538 eV

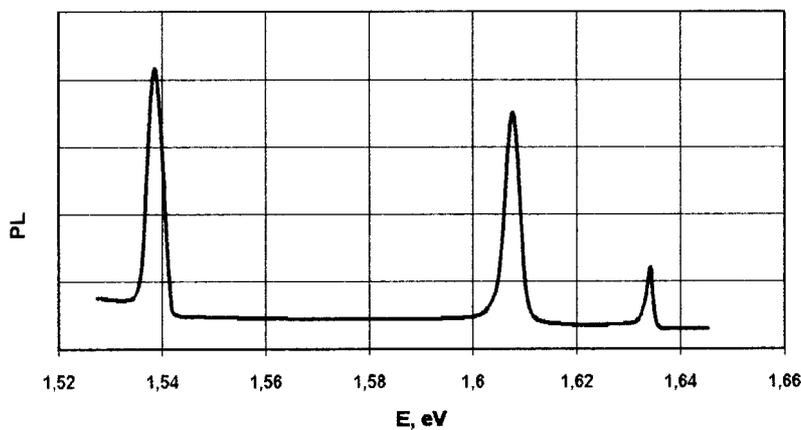


Рис. 1.

представляет собой неразрешенные пики, образованные рекомбинацией электронов и тяжелых и легких дырок, находящихся в первом квантовом состоянии. Полосы с максимумами в 1.607 и 1.634 eV обусловлены переходами между вторым электронным квантовым уровнем и вторыми уровнями тяжелых и легких дырок. Расстояние между энергетическими уровнями позволяет определить толщину наноразмерного слоя — 14 nm, что совпадает с результатом расчета по формуле (1) для указанных технологических параметров (см. [1], рис. 1).

На основании фотолюминесцентных исследований в различных точках поверхности образцов установлено, что неоднородность получаемых слоев не превышает 1 nm на площади 0.5 cm^2 .

На рис. 2 приведены спектры фотолюминесценции сверхрешетки, содержащей 25 чередующихся слоев *n*- и *p*-типа, полученных при температуре 750°C с помощью теплопоглотителя, имевшего толщину 3 mm и температуру 715°C , легированных соответственно Sn и Ge (уровень легирования — $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), при интенсивности возбуждения 40 (кривая 1), 100 (кривая 2) и 200 (кривая 3) W/cm^2 .

Фотолюминесценция наблюдается в интервале от 1.15 до 1.8 eV. В длинноволновой области спектра фотолюминесценция обусловлена рекомбинацией через непрямую в реальном пространстве запрещенную

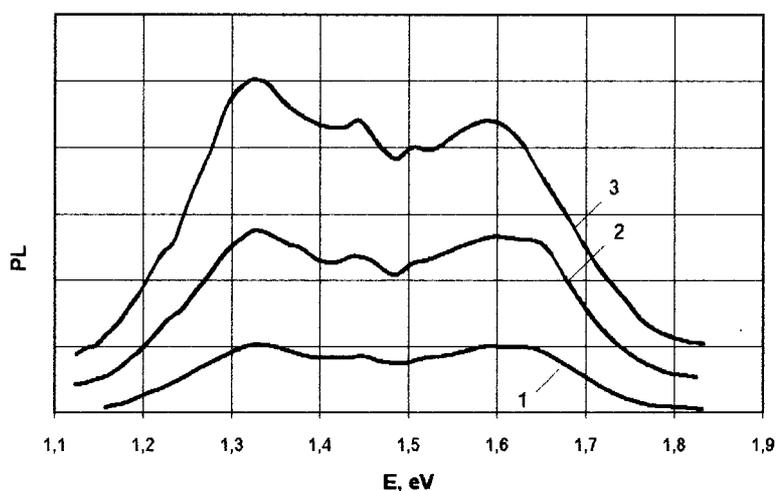


Рис. 2.

зону между электронами вблизи дна подзон зоны проводимости и пространственно разделенными с ними дырками в валентной зоне. Высокая интенсивность фотолюминесценции в этой области спектра связана с тем, что время жизни возбужденных носителей существенно увеличивается за счет пространственного разделения электронов и дырок. Благодаря этому даже при эффективной ширине запрещенной зоны, меньшей, чем ширина запрещенной зоны арсенида галлия E_g , сохраняется высокая скорость электронно-дырочной рекомбинации. Большая ширина полосы в области $E < E_g$ объясняется суммированием вкладов рекомбинации носителей из нескольких подзон [3].

В длинноволновой области интенсивность фотолюминесценции возрастает с увеличением уровня возбуждения линейно, а в коротковолновой области — сублинейно.

Фотолюминесценция в коротковолновой области спектра с энергией $E > E_g$ обусловлена "вертикальной рекомбинацией" электронов и дырок из подзон в зоне проводимости и валентной зоне. Сублинейная зависимость интенсивности фотолюминесценции от уровня возбуждения в этой области спектра связана с тем, что опустошение возбужденных

состояний в верхних подзонах происходит как путем ”вертикальной рекомбинации”, так и путем термолизаии на нижние подзоны с последующий туннельной рекомбинацией пространственно разделенных носителей.

Высокий уровень интенсивности фотолюминесценции наноразмерных структур и легированных сверхрешеток, получаемых методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава, свидетельствует о низкой концентрации в них точечных дефектов, создающих центры безызлучательной рекомбинации. Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой однородности параметров структур на площади образцов 0.5 cm^2 .

Список литературы

- [1] *Кулюткина Т.Ф., Марончук И.Е., Шорохов А.В.* // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. В. 20. С. 1–5.
- [2] *Алферов Ж.И., Андреев В.М., Воднев А.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 18. С. 1089–1093.
- [3] *Херман М.* Полупроводниковые сверхрешетки / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 240 с.