

02:05:10

## Низкотемпературная фотолюминесценция твердых растворов InGaP, облученных тяжелыми ионами

© Д. Бхаттачарья, Д.А. Винокуров, Г.М. Гусинский,  
В.А. Елюхин, О.В. Коваленков, Р.Н. Кютт, Д. Марш,  
В.О. Найденов, Е.Л. Портной

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С-Петербург  
Glasgow University, Glasgow G12 8QQ, Scotland, UK

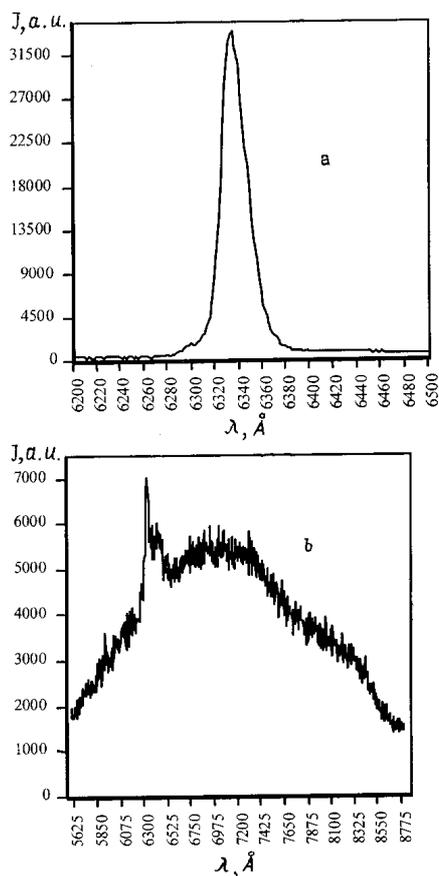
Поступило в Редакцию 3 марта 1998 г.

Анализ спектров фотолюминесценции (ФЛ) образцов твердых растворов In(0.5)Ga(0.5)P до и после имплантации их высокоэнергетичными ионами азота дозами  $10^{11} - 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  показывает, что в имплантированных (и отожженных) образцах ФЛ может быть результатом формирования фактически одномерных полупроводниковых структур на местах одиночных треков ионов.

В настоящее время большой интерес представляют исследования, направленные на создание наноструктур с большим отношением длины к диаметру. В представленной заметке приводятся результаты, полученные в подтверждение основной идеи, положенной в один из возможных методов создания таких структур — образование аморфизированных треков в местах прохождения одиночных тяжелых ионов в твердом растворе In(0.5)Ga(0.5)P с их последующей рекристаллизацией, сопровождающейся распадом [1,2]. Эпитаксиальные слои твердого раствора In(0.5)Ga(0.5)P, выращенного на подложках GaAs(100) методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, были выбраны для облучения по следующим причинам. Среди тройных твердых растворов соединений АЗВ5 с "прямой" зонной структурой твердые растворы In(0.5)Ga(0.5)P имеют наибольшее различие в постоянных решетки ( $a$ ) составляющих их соединений (InP  $a = 5.87 \text{ \AA}$ , GaP  $a = 5.45 \text{ \AA}$ ). Такое различие в постоянных решетки приводит к наличию у этих твердых растворов обширной зоны несмешиваемости, появляющейся в твердом растворе In(0.5)Ga(0.5)P при температуре 820–900 К [1,2]. Кристаллизация такого раствора при более низких

температурах в условиях, близких к термодинамическому равновесию, должна приводить к образованию двухфазного твердого раствора, в котором одна из фаз будет обогащена фосфидом индия, а другая — фосфидом галлия. Практически термодинамически равновесная кристаллизация может быть реализована при длительном термическом отжиге аморфизированного однофазного твердого раствора, в результате которого должен произойти процесс рекристаллизации с образованием двухфазного монокристаллического твердого раствора. Однако при рекристаллизации полностью аморфизированного твердого раствора, находящегося в зоне несмешиваемости, размер областей с разными составами будет иметь большой разброс. Поэтому для ограничения разброса в размерах этих областей эпитаксиальные слои твердого раствора  $\text{In}(0.5)\text{Ga}(0.5)\text{P}$  облучались высокоэнергетичными ионами в дозах, исключающих сплошную аморфизацию. Облучение ускоренными ионами проводилось на циклотроне ФТИ. В проведенных экспериментах для облучения использовались ионы азота (+3). Энергия ионов была выбрана равной  $3\text{ MeV}$ , что обеспечивало их проникновение на глубину, существенно большую толщин эпитаксиальных слоев, равных  $0.5\ \mu\text{m}$ . Дозы облучения варьировались в интервале  $10^{11} - 5 \cdot 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$ , что соответствует средним расстояниям  $300 - 50\ \text{A}$  между центрами аморфизированных областей, образованными треками одиночных ионов. Спектры фотолюминесценции измерялись при  $5\ \text{K}$  при накачке аргоновым лазером. Дополнительно проводился рентгеноструктурный анализ гетероструктур до имплантации и отжига, а также после этих процедур. Сравнение рентгенодифракционных кривых до и после имплантации и отжига подтверждают, что аморфизации подвергалась незначительная часть объема эпитаксиальных слоев. Таким образом, можно считать, что в среднем диаметр поперечного сечения треков ионов азота в твердом растворе  $\text{In}(0.5)\text{Ga}(0.5)\text{P}$  значительно меньше  $50\ \text{A}$ . Кроме того, те же рентгеноспектральные исследования показали, что проведенный отжиг существенно уменьшил изменение состава по толщине слоев, образовавшееся в процессе роста в изучавшихся гетероструктурах, что само по себе представляет большой интерес.

Основными выявленными закономерностями ФЛ являлись следующие (см. рисунок). Во всех облученных указанными дозами ионов образцах возникало спектральное распределение с максимумом при  $705\ \text{nm}$  и шириной на половине высоты порядка  $150\ \text{nm}$ , на который налагался значительно уменьшенный по интенсивности, но сохранивший



Спектры фотолюминесценции твердого раствора  $\text{In}(0.5)\text{Ga}(0.5)\text{P}$  при 5 К до имплантации и отжига (a) и после имплантации ионами азота дозой  $5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  с последующим отжигом в течение 8 h при температуре  $410^\circ\text{C}$  (b)

свое положение, пик ФЛ необлученного материала (633.5 nm). Спектр ФЛ должен зависеть как от состава, так и от размеров рекристаллизованных областей. Наблюдаемый максимум спектрального распределения в имплантированных и отожженных образцах соответствует составу  $\text{In}(0.7)\text{Ga}(0.3)\text{P}$  объемного твердого раствора. Однако размеры и гео-

метрия рекристаллизованных областей не позволяют утверждать, что наблюдалась люминесценция от твердого раствора  $\text{In}(0.7)\text{Ga}(0.3)\text{P}$ . В соответствии с результатами работы [2], одним из двух находившихся в равновесии твердых растворов при температуре отжига должен быть твердый раствор  $\text{In}(0.9)\text{Ga}(0.1)\text{P}$ . Таким образом, спектр ФЛ в имплантированных и отожженных образцах может быть результатом формирования фактически одномерных полупроводниковых объектов на месте треков, образованных ионами азота. Достаточно большая ширина распределения может объясняться различием в размерах латентных треков ионов. Действительно, механизм образования латентного следа тяжелого иона в кристаллических структурах еще не изучен. Установлено, что по пути тяжелого иона происходит так называемый "кулоновский взрыв", приводящий к смещениям ионов решетки, созданию области разупорядочения, аморфизации, рекристаллизации и другим эффектам. Все эти процессы зависят как от типа иона и его энергии, так и от типа структуры [3]. Большинство процессов носят нелинейный характер. В работе [4] показано, что существует непропорционально большое уменьшение поперечных размеров треков при переходе от ионов урана (эллипс  $21.8 \times 18 \text{ nm}$ ) к ионам диспрозия ( $12 \times 4.5 \text{ nm}$ ). Поперечные размеры треков ионов азота, по-видимому, уже подвержены большим флуктуациям ввиду их малых размеров. Кроме того, возможны уже флуктуации плотности ионизации по длине трека. Для выяснения этих вопросов планируется повторение опытов с более тяжелыми ионами аргона.

Работа выполнена в рамках проекта 2-024/4 МНТП России "Физика твердотельных наноструктур".

## Список литературы

- [1] *Naidenov V.O., Gusinsky G.M., Elukhin V.A., Portnoy E.L., Marsh J.H.* // Abstr. of 10<sup>th</sup> Intern. Conf. on Surface Modification of Metals by Ion Beams. Gatlinburg, Tennessee, USA, 1997.
- [2] *Elukhin V.A., Portnoy E.L., Avrutin E.A., Marsh J.H.* // J. Cryst. Growth. 1996. V. 173. P. 69.
- [3] *Toulemonde M., Dufour C., Paumier E.* // Physical Review B. 1992. V. 46. N 22. P. 14 362.
- [4] *Vetter J., Scholz N., Angert N.* // Nuclear Instrum. and Methods in Phys. Res. 1994 B91. P. 129.