

Сравнение радиационной стойкости гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs и точками InAs при ионной имплантации

Н.В.Байдусь*, В.К.Васильев, Ю.А.Данилов, Б.Н.Звонков, П.Б.Мокеева

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

Н.А.Соболев

Университет Авейро, 3810-193 Авейро, Португалия

Исследовано влияние ионной имплантации на фотолюминесценцию и электрические свойства гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) InGaAs и квантовыми точками (КТ) InAs, выращенными методом МОС-гидридной эпитаксии. Впервые установлено, что электрические свойства слоев с КТ являются более стойкими к введению радиационных дефектов по сравнению с КЯ. Показано влияние эффекта каналирования на радиационное повреждение структур, содержащих КЯ и КТ. Для исследованного случая имплантации легких ионов деградация интенсивности ФЛ зависит от массы ионов только через плотность создаваемых ионами атомных смещений.

Введение

Одним из важных направлений применения ионной бомбардировки является изучение радиационной стойкости гетероструктур. Согласно литературным данным [1-4], рекомбинационные свойства квантово-размерных гетероструктур и приборов на их основе менее чувствительны к дефектообразующим облучениям в сравнении с объемными структурами. Как предполагается, этот эффект связан с большей локализацией экситона в квантовых точках (КТ) или квантовой яме (КЯ) и усиливается с понижением размерности. Вероятно, определенную роль играют также особенности перераспределения дефектов в полях упругих напряжений, созданными наноразмерными областями материалов, обладающих постоянной решетки, отличающейся от объемной.

Напряженные квантово-размерные слои сами могут оказывать сильное влияние на процессы миграции и комплексообразования дефектов, созданных ионной имплантацией. Например, они проявляют способность геттерировать одни дефекты, и отталкивать другие, являясь барьером, задерживающим миграцию дефектов в объеме полупроводника.

В результате радиационных воздействий на структуры с КТ и КЯ происходит изменение спектральных зависимостей ФЛ. Электронно-дырочные пары, генерированные лазерным возбуждением, рекомбинируют на дефектах, не успев захватиться на КТ (КЯ). В КТ (КЯ) формируются только связанные экситоны, которые более локализованы и стабильны в сравнении с рекомбинационными процессами на безызлучательных центрах вне КТ (КЯ). Различие между КЯ и КТ объясняется разной степенью локализации экситонов. В случае КЯ экситоны локализованы только по

* Тел.: +7-8312-656365; Fax: +7-8312-659366; E-mail: bnv@nifti.unn.ru

направлению роста, но не в плоскости $X\bar{Y}$. В этом случае вероятность безызлучательной рекомбинации сильнее зависит от наличия безызлучательных центров, так как экситоны могут свободно диффундировать в плоскости $X\bar{Y}$ и рекомбинировать на дефектах.

Методика эксперимента

В работе исследовались гетероструктуры на основе GaAs, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении, содержащие слои КТ InAs или КЯ InGaAs. Структуры облучались на ускорителе ИЛЮ-200 при комнатной температуре мишени. Минимально возможная доза облучения была $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Квантово-размерные объекты помещались на разной глубине от поверхности. Энергия облучения выбиралась с учетом глубины залегания слоя КТ или КЯ. Обычно энергия ионов подбиралась такой, чтобы слои КЯ (КТ) были расположены между максимумом профиля распределения дефектов и поверхностью. Для создания дефектов использовались протоны, ионы гелия или азота. Расчеты профиля распределения имплантированных ионов и образованных радиационных дефектов проводились с помощью программы TRIM. Примеры рассчитанных распределений концентраций дефектов и положение квантово-размерного слоя приведены на рис.1.

Облученные образцы исследовались методами спектроскопии фотолюминесценции при 77 К и измерений эффекта Холла по методике Ван-дер-Пау при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение

На рис.2 показаны типичные спектры ФЛ КЯ InGaAs и КТ InAs, а также их модификация в результате облучения разными ионами (H^+ , He^+ , N^+) с разными дозами. Дефекты, созданные ионным облучением, создают глубокие энергетические центры в запрещенной зоне полупроводника, что увеличивает безызлучательную рекомбинацию носителей и уменьшает интенсивность ФЛ.

Влияние облучения ионами гелия на интенсивность ФЛ КТ и КЯ. Получены зависимости относительной интенсивности ФЛ КЯ и КТ от рассчитанной концентрации дефектов, созданных ионной имплантацией гелия с различными дозами (рис.3). Ионное облучение проводили в двух режимах. В первом случае никаких специальных мер для предотвращения каналирования не предпринимали, а образцы (с ориентацией (100)) располагались перпендикулярно ионному пучку. На рис.3 (кривые 1 и 2) показана зависимость относительного уменьшения интенсивности ФЛ КТ и КЯ от расчетной концентрации дефектов, созданных при облучении ионами гелия в плоскости, где располагается слой КТ или КЯ. Мы наблюдаем падение интенсивности ФЛ с увеличением концентрации дефектов, причем такое изменение на порядок величины больше для КЯ в сравнении с КТ.

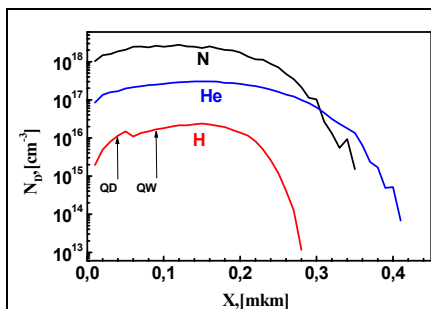


Рис. 1

Рассчитанный профиль распределения концентрации дефектов, созданных ионами с энергией, кэВ: 1 – азота, 100, 2 – гелия, 30, 3 – водорода, 20. Доза ионов $3 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2}$.

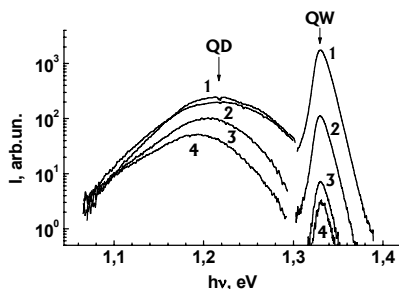


Рис. 2

Спектры ФЛ гетероструктур с КЯ и КТ, подвергнутых имплантации разных ионов с энергией, кэВ: 1 – необлученные образцы, 2 – H^+ -20, 3 – He^+ -30, 4 – N^+ -100. Доза ионов $3 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2}$.

Как было сказано выше, каналирование ионов приводит к большей глубине проникновения ионов и изменению профиля распределения дефектов. Программа TRIM позволяет рассчитывать распределение дефектов лишь в аморфной мишени, т.е. она не позволяет учесть его изменение при наличии каналирования. Для исключения каналирования были проведены контрольные опыты, в которых образец устанавливали на платформу под углом 70° к направлению распространения пучка ионов. Полученные результаты представлены на рис.3 (кривые 1' и 2'). В случае перпендикулярного падения ионов интенсивность ФЛ всегда больше для всех доз облучения, чем при падении под углом, что соответствует большей реальной концентрации дефектов в области слоя КТ (КЯ). Очевидно, при наличии каналирования концентрация дефектов в квантово-размерном слое уменьшается.

Следует заметить, что влияние каналирования на ФЛ гетероструктуры с КЯ значительно сильнее, чем для КТ.

Влияние массы ионов

На рис.4 представлены зависимости относительного гашения фотолюминесценции от расчетной концентрации дефектов в области слоев КЯ и КТ. При равных дозах тяжелые ионы сильнее влияют на деградацию ФЛ, чем легкие. Однако если принимать во внимание не вид ионов, а создаваемую ими концентрацию атомных смещений, то закономерности влияния дефектов на интенсивность ФЛ подчиняются ранее установленным закономерностям для ионов гелия. Слои с КТ более стойки к радиационным воздействиям, чем слои с КЯ, что проявляется в меньшей степени гашения интенсивности ФЛ КТ при той же концентрации дефектов в области квантово-размерного слоя по сравнению с КЯ.

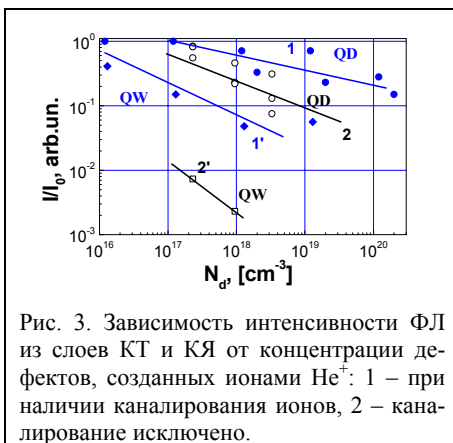


Рис. 3. Зависимость интенсивности ФЛ из слоев КТ и КЯ от концентрации дефектов, созданных ионами He^+ : 1 – при наличии каналирования ионов, 2 – каналирование исключено.

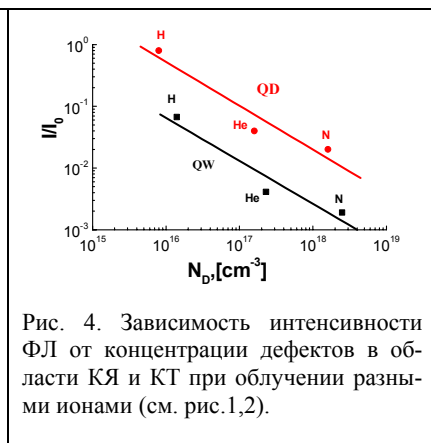


Рис. 4. Зависимость интенсивности ФЛ от концентрации дефектов в области КЯ и КТ при облучении разными ионами (см. рис. 1,2).

На уменьшение интенсивности ФЛ КТ при малых концентрациях созданных дефектов влияют не только дефекты в области квантово-размерного слоя, но и находящиеся на расстоянии диффузионной длины носителей заряда или первичных дефектов, которые в GaAs подвижны при комнатной температуре. Об этом свидетельствует обнаруженное уменьшение интенсивности ФЛ как от слоя КТ, так и от слоя КЯ даже в том случае, если квантово-размерный слой находится на глубине, где расчетная концентрация созданных облучением дефектов ничтожно мала. Однако и в этом случае наблюдается более сильное гашение интенсивности ФЛ от слоя КЯ по сравнению с КТ.

Влияние ионного облучения на концентрацию и подвижность электронов

Изучение влияния радиационных дефектов на концентрацию и подвижность носителей заряда в квантово-размерном слое проводилось на гетероструктурах, содержащих дельта-слой донорной примеси (кремний) на туннельном расстоянии от слоя КЯ или КТ. Если концентрация примеси в дельта-слое меньше чем плотность состояний в квантово-размерном слое, то в таких образцах должна наблюдаться проводимость по слою КЯ или прыжковая проводимость по слою КТ.

Поверхностная концентрация электронов в гетерослоях с КТ и КЯ до и после облучения ионами гелия

		КЯ	КТ	КТ
Необлученные образцы	n_s	$5,9 \cdot 10^{11}$	$4,1 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^{12}$
	μ	3831	1673	1504
He , $E = 60$ кэВ, $D = 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$	n_s	$5,9 \cdot 10^{10}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
	μ	436	431	1012

После имплантации ионов гелия наблюдается уменьшение подвижности и концентрации основных носителей заряда вследствие их захвата на глубокие энергетические уровни, созданные радиационными дефектами. Однако в случае слоя с КЯ концентрация основных носителей заряда уменьшается на порядок величины, а для гетероструктуры со слоем КТ всего в 2-3 раза.

При дальнейшем увеличении дозы ионов гелия измерение эффекта Холла становилось невозможным из-за значительного увеличения сопротивления образца, хотя спектры ФЛ удавалось измерить до максимальной дозы $D = 5,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Таким образом, результаты влияния радиационных дефектов на концентрацию носителей заряда в квантово-размерном слое также свидетельствуют о большей радиационной стойкости слоя с КТ.

Заключение

Установлено, что электрические свойства слоев с КТ являются более стойкими к введению радиационных дефектов в сравнении с КЯ, что проявляется в значительно меньшем влиянии ионного облучения на концентрацию и подвижность носителей заряда. На интенсивность фотолюминесценции влияют не только дефекты, находящиеся в области квантово-размерного слоя, но и находящиеся на расстоянии длины диффузии носителей заряда или первичных дефектов.

При бомбардировке поверхности (100) GaAs ионами наблюдается значительное влияние каналирования ионов на зависимость относительного гашения ФЛ от рассчитанного распределения дефектов для аморфной мишени. Влияние массы для исследованных легких ионов полностью объясняется при учете созданной ими концентрации атомных смещений.

Работа была выполнена при финансовой поддержке НАТО (SfP-973799 "Semiconductors"), РФФИ (01-02-16441).

Литература

- [1] Wellmann P.J., Schoenfeld W.V., Garcia J.M., Petroff P.M. //J. Electronic Materials. 1998. V.27. P.1030.
- [2] Leon R., Swift G.M., Magness B., Taylor W.A., Tang Y.S., Wang K.L., Dowd P., Zhang Y.H. //Appl. Phys. Lett. 2000. V.76. P.2074.
- [3] Sobolev N.A., Cavaco A., Carmo M.C., Grundmann M., Heinrichsdorff F., Bimberg D. //Phys. Stat. Solidi (b). 2001. V. 224. P.93.
- [4] Ribbat Ch., Sellin R., Grundmann M. and Bimberg D., Sobolev N.A., Carmo M.C. //Electronics Letters. 2001. V.37. P.174.
- [5] Karpovich I.A., Anshon A.V., Baidus N.V., Batukova L.M., Danilov Yu.A., Zvonkov B.N., Plankina S.M. //Semiconductors. 1994. V.28. P.63.

Comparative study of radioactive hardness into InGaAs quantum well and quantum dot heterostructures by ion implantation

**N.V.Baidus^{1*}, V.K.Vasilev, Yu.A.Danilov, B.N.Zvonkov¹, P.B.Mokeeva¹,
N.A.Sobolev²**

¹ *Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia*

² *Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal*

In the recent years, an enhanced radiation hardness of the quantum dot (QD) epitaxial structures and fully processed laser diodes as compared to the quantum well (QW) ones has been shown [1–4]. Still open questions are the influence on the radiation-induced degradation process (i) of the diffusion of the irradiation-induced mobile primary defects (vacancies and interstitials) in the strain fields created by the QWs and QDs with their possible subsequent capture at interfaces and (ii) of the nature of the primary damage, i.e. either isolated point defects or defect clusters produced by collision cascades. The former type of damage is typical of the electron irradiation and the latter of the ion bombardment and neutron irradiation. Nothing is known about the irradiation-induced modification of the electrical properties of the QD structures.

Influence of the implantation of the different mass ions on the luminescent and electrical properties of heterostructures containing InGaAs QWs and InAs QDs grown by MOCVD at atmospheric pressure has been investigated. Helium and nitrogen ions were implanted under channeling and non-channeling conditions. QWs and QDs were placed at various distances from the surface. The defect profiles were calculated by TRIM. The photoluminescence (PL) was measured upon above-bandgap excitation. The carrier concentration and mobility were measured by means of the Hall effect.

The enhanced radiation hardness of the QDs as compared to the QWs has been shown for the first time by the electrical measurements. The study of the influence of the radiation damage on the concentration and mobility of the charge carriers was carried out on heterostructures containing a silicon delta-layer placed within a tunneling distance from the QW or QD layer. In this kind of samples, the carriers supplied by the delta-layer are captured by the QW or QDs. Thus, either the conductivity in the QW plane or the hopping conductivity among the QDs is observed. After helium ion bombardment, a decrease of the concentration and mobility of the charge carriers was observed as a consequence of the carrier capture by irradiation-induced deep levels. Remarkably, the carrier concentration decrease in these samples is slower for the QDs than for the QWs.

The influence of the ion channeling on the radiation damage of QD and QW structures was investigated. It has been shown that the influence of the channeling is much stronger in the case of the QW structures than in that of the QDs.

We interpret the observed effects in terms of the above-mentioned diffusion and capture of the irradiation-induced mobile primary defects in the strain fields created by the QWs and QDs.

* Phone: +7-8312-656365; Fax: +7-8312-659366; E-mail: bnv@nifti.unn.ru