

Влияние увеличения дозы имплантации ионов эрбия и температуры отжига на фотолюминесценцию в сверхрешетках AlGaIn/GaN и эпитаксиальных слоях GaN

© А.М. Емельянов, Н.А. Соболев[¶], Е.И. Шек, В.В. Лундин, А.С. Усиков, Е.О. Паршин*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* Институт микроэлектроники и информатики Российской академии наук,
150007 Ярославль, Россия

(Получена 22 ноября 2004 г. Принята к печати 6 декабря 2004 г.)

Исследована фотолюминесценция при комнатной температуре в сверхрешетках AlGaIn/GaN и эпитаксиальных слоях GaN, имплантированных ионами эрбия с энергией 1 МэВ и дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и отожженных в аргоне. Интенсивность фотолюминесценции ионов Er^{3+} в сверхрешетке выше, чем в эпитаксиальном слое при температурах отжига 700–1000°C. Максимальное различие в интенсивностях для эпитаксиального слоя и сверхрешетки (~ 2.8 раза) и максимальная интенсивность фотолюминесценции сверхрешетки наблюдаются после отжига при 900°C. При увеличении температуры отжига до 1050°C интенсивность излучения, связанного с эрбием, в сверхрешетке существенно уменьшается, что может быть связано с термодеструкцией сверхрешетки.

Основное достоинство светоизлучающих структур на основе полупроводников, легированных редкоземельными (РЗ) элементами, заключается в узкой линии люминесценции и независимости длины волны излучения от температуры. Примесь эрбия вызывает наибольший интерес, поскольку длина волны излучения ($\lambda \approx 1.54 \text{ мкм}$) соответствует минимуму потерь и минимуму дисперсии в волоконно-оптических линиях связи. Для основного материала полупроводниковой электроники — монокристаллического кремния, характеризующегося относительно малой шириной запрещенной зоны, наблюдается сильное (до нескольких порядков величины) гашение интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) ионов Er^{3+} при увеличении температуры от 77 до 300 К. Экспериментально было установлено, что этот эффект ослабевает с ростом ширины запрещенной зоны и практически незначителен в GaN [1]. Поэтому легированные эрбием слои GaN и других III-нитридов интенсивно исследовались [2]. Однако оказалось, что интенсивность люминесценции ионов Er^{3+} в них недостаточно высокая. Это может быть связано с низкой эффективностью возбуждения люминесценции РЗ ионов в объемном полупроводнике, поскольку оптические переходы между f -состояниями частично запрещены правилами отбора. Авторы работы [3] теоретически показали, что на гетерогранице возбуждение f -электронов более эффективно, чем в объемном полупроводнике [3]. Недавно нами впервые наблюдался эффект увеличения интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} в сверхрешетках AlGaIn/GaN по сравнению с эпитаксиальными слоями GaN при дозе имплантации $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ [4]. Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния повышенной в 3 раза дозы имплантации ионов эрбия и температуры отжига на ФЛ в сверхрешетках и эпитаксиальных слоях.

Сверхрешетки $\text{Al}_{0.26}\text{Ga}_{0.74}\text{N}/\text{GaN}$ (толщина слоев 5 нм, 148 периодов) были выращены методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (MOCVD) на модифицированной установке Epiquip VP-50 RP с горизонтальным кварцевым реактором и графитовым держателем, имеющим индукционный нагрев. Рост начинался с осаждения низкотемпературного (500°C) слоя зародышеобразования AlGaIn на сапфировой подложке с ориентацией (0001) с последующим эпитаксиальным ростом при 1050°C и давлении 200 мбар. Структуры состояли из слоя зародышеобразования AlGaIn толщиной 20 нм, буферного слоя GaN толщиной 200 нм и сверхрешетки с ямами GaN и барьерами AlGaIn одинаковой толщины. Для сравнения в тех же режимах выращивались слои GaN, легированные Si, толщиной 3 мкм. Более подробно условия эпитаксиального роста описаны в [4]. Ионы эрбия с энергией $E = 1 \text{ МэВ}$ и дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ имплантировались при комнатной температуре. Согласно данным обратного резерфордовского рассеяния (RBS) протонов с энергией 230 кэВ аморфизации имплантируемого слоя не происходило. Отжиги проводились в диапазоне температур 700–1050°C с шагом 100°C и выдержкой при каждой температуре в течение 5 мин в потоке аргона. Фотолюминесценция возбуждалась излучением галогеновой лампы с длинами волн $\lambda > 360 \text{ нм}$, выделяемым полосовым фильтром из оптического стекла СЗС-24 [4]. Мощность излучения, сфокусированного линзовой системой на образце, во всех экспериментах поддерживалась постоянной и составляла $\sim 50 \text{ мВт}$. Для регистрации ФЛ в диапазоне 0.95–1.65 мкм использовались монохроматор МДР-23 и InGaAs-фотоприемник, работающий при комнатной температуре. Световой поток от галогеновой лампы модулировался прерывателем с частотой 36 Гц. Импульсы фототока приемника преобразовывались в переменное напряжение, которое регистрировалось с

[¶] E-mail: nick@sobolev.ioffe.rssi.ru

помощью селективного вольтметра. Разрешение системы составляло ~ 7 нм.

На рис. 1 приведены измеренные при 300 К спектры ФЛ сверхрешетки AlGaIn/GaN и эпитаксиального слоя GaN, имплантированных ионами эрбия дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, после отжига в температурном режиме $(700 + 800 + 900)^\circ\text{C}$. Спектры нормированы на максимальные значения интенсивности ФЛ в каждом образце. Наиболее интенсивный пик излучения с максимумом

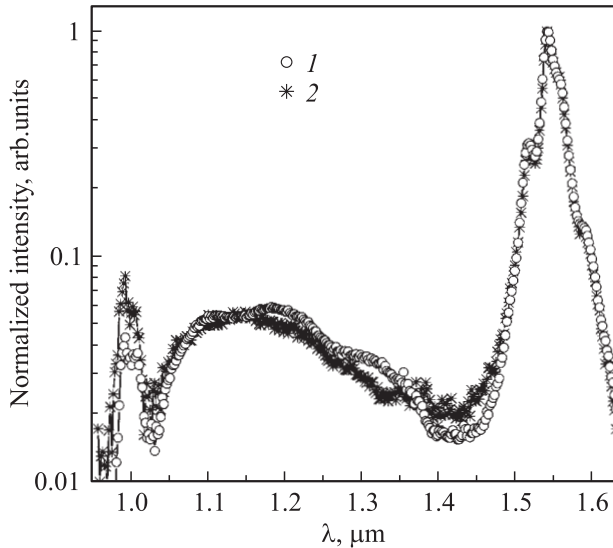


Рис. 1. Спектры ФЛ сверхрешетки (1) и эпитаксиального слоя (2) после отжига при $(700 + 800 + 900)^\circ\text{C}$, нормированные на максимальные значения интенсивности в каждом образце.

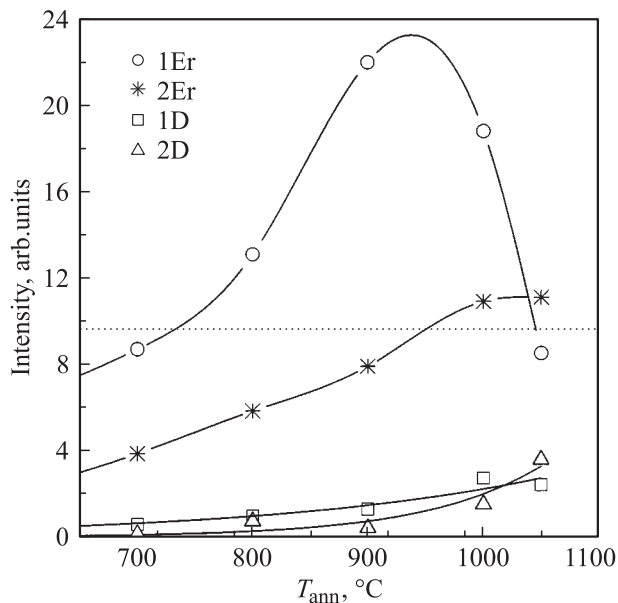


Рис. 2. Зависимости интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} при $\lambda = 1.542 \text{ мкм}$ (1Er и 2Er) и дефектов при $\lambda \approx 1.2 \text{ мкм}$ (1D и 2D) от температуры отжига для сверхрешетки (1Er и 1D) и эпитаксиального слоя (2Er и 2D).

на длине волны $\lambda = 1.542 \text{ мкм}$ обусловлен переходами ионов Er^{3+} из первого возбужденного состояния ($^4I_{13/2}$) в основное состояние ($^4I_{15/2}$).

Важно отметить, что форма спектров и положение максимумов для этих пиков в сверхрешетке и эпитаксиальном слое не различаются. Широкая полоса в области $1.05\text{--}1.4 \text{ мкм}$ с максимумом при $\lambda \approx 1.2 \text{ мкм}$ связана с ФЛ дефектов, введенных в процессе имплантации и последующих отжиге, поскольку подобная полоса наблюдалась после отжига эпитаксиальных слоев GaN, имплантированных ионами эрбия [4], неодима [5] и хрома [6]. Пик с максимумом на длине волны $\sim 0.994 \text{ мкм}$ обусловлен излучательными переходами из второго возбужденного состояния ионов Er^{3+} ($^4I_{11/2}$) в основное состояние ($^4I_{15/2}$). Форма пика и положение максимума, как и в случае переходов из первого возбужденного состояния в основное, для сверхрешетки и эпитаксиального слоя совпадают.

На рис. 2 приведены зависимости интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} ($\lambda = 1.542 \text{ мкм}$) и связанных с имплантацией и отжигом дефектов (в максимуме распределения по длинам волн при $\lambda \approx 1.2 \text{ мкм}$) от температуры отжига T_{ann} для сверхрешетки AlGaIn/GaN и эпитаксиального слоя GaN, имплантированных ионами эрбия дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Как видно из рис. 2, интенсивность эрбиевой ФЛ в сверхрешетке выше, чем в монокристаллическом GaN при температурах отжига $700 \leq T_{\text{ann}} \leq 1000^\circ\text{C}$. Максимальная интенсивность в сверхрешетке достигается при $T_{\text{ann}} \approx 900^\circ\text{C}$, тогда как в эпитаксиальном слое при $T_{\text{ann}} \gtrsim 1000^\circ\text{C}$. При этом максимальное различие в интенсивностях ФЛ ионов эрбия в сверхрешетке и эпитаксиальном слое наблюдается после отжига при 900°C и составляет ~ 2.8 раза. При увеличении температуры отжига до 1050°C интенсивность эрбиевой ФЛ в сверхрешетке существенно уменьшилась, что может быть связано с термодеструкцией (размытием границ) слоев, образующих сверхрешетку. Интенсивность ФЛ дефектов в сверхрешетке и эпитаксиальном слое возрастает с ростом температуры.

На рис. 2 пунктирной линией отмечен максимальный уровень интенсивности ФЛ ионов эрбия, достигнутый в сверхрешетке при дозе имплантации $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Подробное описание результатов исследования при этой дозе опубликовано в [4]. Как видно из рисунка, увеличение дозы имплантации в 3 раза привело к увеличению максимальной интенсивности ФЛ в ~ 2.3 раза. Это позволяет предположить, что дальнейшее увеличение интенсивности эрбиевой ФЛ может быть достигнуто за счет дальнейшего увеличения дозы имплантации.

Таким образом, установлено, что при дозе имплантации ионов эрбия $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ имеет место увеличение (до 2.8 раз) интенсивности ФЛ ионов Er^{3+} в сверхрешетках по сравнению с эпитаксиальными слоями при одинаковых температурах постимплантационного отжига. Наблюдавшееся увеличение интенсивности,

во-видимому, обусловлено более эффективным возбуждением f -электронов вблизи гетерограниц, как это было предсказано теоретически в работе [3].

Авторы выражают благодарность В.И. Сахарову и И.Т. Серенкову за проведение RBS-измерений.

Работа частично поддержана Президиумом РАН (комплексная программа научных исследований Президиума РАН „Низкоразмерные квантовые структуры“).

Список литературы

- [1] P.N. Favennec, H. L'Harridon, D. Moutonnet, M. Salvi, M. Gauneau. *Jap. J. Appl. Phys.*, **29**, L524 (1990).
- [2] A.J. Steckl, J.M. Zavada. *MRS Bulletin*, **24**, 33 (1999).
- [3] G.G. Zegrya, V.F. Masterov. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3444 (1998).
- [4] N.A. Sobolev, A.M. Emel'yanov, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, E.I. Shek, A.I. Besyul'kin, W.V. Lundin, N.M. Schmidt, A.S. Usikov, E.E. Zavarin. *Physica B*, **340–342**, 1108 (2003).
- [5] E. Silkowski, Y.K. Yeo, R.L. Hengehold, R. Goldenberg, G.S. Pomrenke. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **422**, 69 (1996).
- [6] S. Kim, S.J. Rhee, D.A. Turnbull, E.E. Reuter, X. Li, J.J. Coleman, S.G. Bishop. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 231 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Influence of increasing Er ion implantation dose and annealing temperature on photoluminescence in AlGaIn/GaN superlattices and GaN epitaxial layers

*A.M. Emel'yanov, N.A. Sobolev, E.I. Shek, W.V. Lundin, A.S. Usikov, E.O. Parshin**

loffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Institute of Microelectronics and Informatics,
Russian Academy of Sciences,
150007 Yaroslavl', Russia

Abstract Photoluminescence in AlGaIn/GaN superlattices and GaN epitaxial layers implanted by Er ions with 1 MeV energy and $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ dose and annealed in argon has been investigated at room temperature. A photoluminescence intensity of Er^{3+} ions in the superlattices is higher than that in the epitaxial layers at a temperature over $(700–1000)^\circ\text{C}$ range. The maximum differences in intensity values (~ 2.8 times) and the maximum intensity in the superlattices are observed after annealing at 900°C . Photoluminescence intensity in the superlattices decreases essentially as an annealing temperature rises up to 1050°C . The effect can be caused by thermodestruction of superlattice.