

Исследование электронного спектра структур с квантовыми точками InGaN с помощью спектроскопии фототока

© Д.С. Сизов[†], В.С. Сизов, В.В. Лундин, А.Ф. Цацульников, Е.Е. Заварин, Н.Н. Леденцов

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

(Получена 14 февраля 2005 г. Принята к печати 1 марта 2005 г.)

С помощью спектроскопии фототока исследованы структуры с квантовыми точками InGaN/GaN. Динамический диапазон измерений составлял четыре порядка с сохранением отношения величины сигнала к уровню шума больше 10. В пределах погрешности измерений форма спектра не зависела от приложенного обратного внешнего смещения, в то время как спектр смещался в коротковолновую сторону, что объясняется влиянием эффекта Франца–Келдыша. Изменение температуры приводило к изменению формы спектра, причем этот эффект различен для структур, выращенных в различных режимах. Такое поведение может объясняться влиянием однородного уширения электронных состояний, статистикой носителей на уровнях квантовых точек, а также влиянием температуры на положение этих уровней.

1. Введение

Для полупроводниковых светоизлучающих структур с p - n -переходами, содержащих в активной области квантово-размерные внедрения, такие как квантовые ямы или квантовые точки (КТ), при измерении фототока (ФТ) с энергией фотона меньше ширины запрещенной зоны матрицы вклад в фототок дает только межзонное поглощение, происходящее в активной области. Это позволяет исследовать электронный спектр непосредственно активной области [1]. Иные методики измерения спектров поглощения, как правило, не позволяют точно отделить вклад пассивных областей, что снижает чувствительность эксперимента. Особенно критичны данные требования при исследовании структур, в которых излучение происходит из глубоко локализованных состояний, концентрация которых мала относительно состояний матрицы. Такой случай реализуется, например, в структурах с КТ. В то же время любое поглощение зависит от заселенности уровней, на которых осуществляется переход: в случае, если заселенность соответствующих уровней сравнима с 1, поглощение уменьшается, вплоть до смены знака — появления усиления в среде [2]. Кроме того, при измерении ФТ необходимо учитывать то, какая часть электронов и дырок, рожденных в процессе возбуждения ФТ, разделяется p - n -переходом, а какая рекомбинирует. Для структур с КТ при некоторых условиях возможно замедление экстракции носителей с локализованных уровней КТ и дальнейшее их переизлучение [1]. Времена выброса носителей из КТ экспоненциально возрастают с увеличением глубины локализации носителей заряда и уменьшением температуры [3]. В том случае, если времена выброса носителей становятся сравнимыми с временами излучательной рекомбинации, возможно переизлучение рожденных электронно-дырочных пар. Кроме того, возможно также замедление экстракции уже делокализованных носителей, что может приводить к

формированию избыточной заселенности вблизи активной области. В данной работе методом ФТ исследовались светодиодные структуры с квантовыми точками InGaN/GaN. Система полупроводниковых соединений нитридов III группы характеризуется большой шириной запрещенной зоны. Благодаря этому разрывы зон на гетерограницах также могут быть велики. В то же время сравнительно мало известно о кинетике релаксации и термической активации носителей, а также о статистике носителей в данной системе.

2. Эксперимент

Структуры, исследованные в данной работе, были выращены на установке AIX2000HT и содержали 5 слоев КТ InGaN средней толщиной 3 нм, разделенных барьерами GaN толщиной 7 нм. Более подробно устройство структуры описано в работе [4], однако в отличие от структур исследованных в [4], в одной из структур для усиления фазового распада, инициирующего образование КТ [5], применялся специальный технологический прием — прерывание роста. Это должно приводить к формированию КТ с большой глубиной локализации носителей. Фототок возбуждался при помощи газоразрядной ксеноновой лампы и измерялся посредством синхронного детектора SR810 DSP. Для измерения спектров ФТ при температуре выше комнатной (до 600 К) использовался резистивный нагреватель. В данном диапазоне температур ток со структур снимался посредством оловянного контакта. Для увеличения величины сигнала по отношению к уровню шума сигнал усреднялся в течение достаточно продолжительного промежутка времени, при этом устойчивость мощности лампы дополнительно контролировалась.

3. Результаты и обсуждение

Известно, что электронный спектр структур с КТ InGaN может быть описан при помощи функции ошибок [5] и хвост состояний может быть аппроксимирован

[†] E-mail: Dsizov@pop.ioffe.rssi.ru

функцией Гаусса. Параметр дисперсии в данной функции может быть определен посредством исследования положения максимума излучения в зависимости от температуры. Данный подход подразумевает квазиравновесное распределение носителей во всем температурном диапазоне. В то же время длинноволновый хвост спектра фототока также может быть аппроксимирован функцией ошибок, но параметр дисперсии при этом может не совпадать с тем, что можно получить из температурных зависимостей положения максимума. В работе [5] данный параметр, полученный из ФТ, был существенно больше, чем ожидалось из исследования излучения, и это объяснялось сильным однородным уширением электронного спектра. Такое уширение соответствует временам релаксации порядка 10 фс, однако экспериментальные данные, полученные при исследованиях с временным разрешением, свидетельствуют о значительно больших временах релаксации в КТ [6]. Возможно, это связано с тем, что в этих работах исследовались структуры с существенно различающейся скоростью релаксации носителей.

С целью выяснения соответствия между спектрами ФТ и электронным спектром измерялся ФТ структур, содержащих КТ. Измерения проводились при температурах, изменявшихся в диапазоне от 300 до 600 К, с приложением обратного внешнего смещения и без смещения. Ранее нами исследовались спектры ФТ структуры с малой глубиной локализации носителей заряда, и повышение температуры не приводило к заметному изменению формы спектра ФТ [4]. Повышение чувствительности эксперимента и исследование КТ с большой глубиной локализации позволили наблюдать и анализировать изменения формы спектров ФТ в области длинноволновых хвостов.

На рис. 1 показаны спектры ФТ структуры с КТ с большой глубиной локализации носителей. Как видно из рисунка, приложение обратного смещения не изменяет формы спектра в пределах погрешности измерений, при этом наблюдается небольшой сдвиг спектра

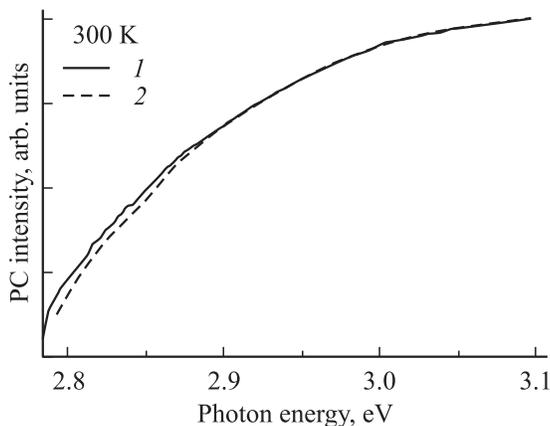


Рис. 1. Спектры фототока для структуры с квантовыми точками при обратном смещении $V = 0$ — кривая 1, $V = -3$ В — кривая 2.

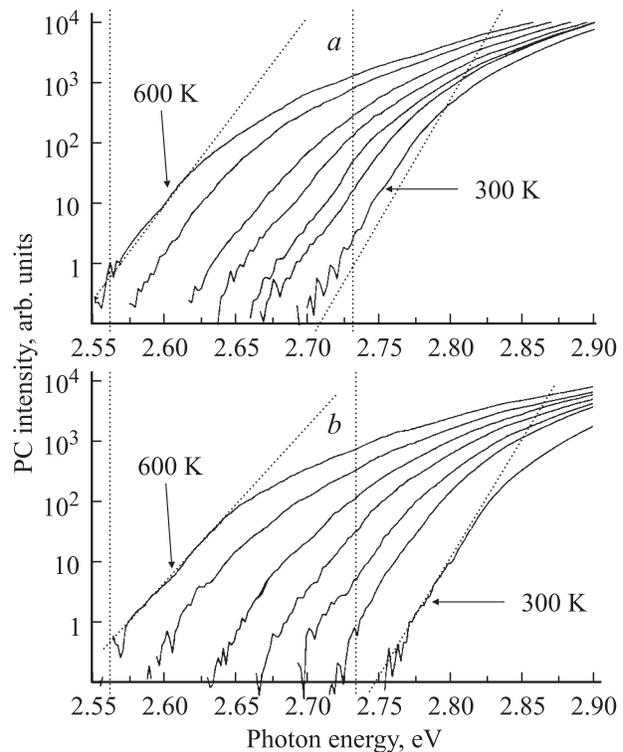


Рис. 2. Спектры фототока, измеренные при температуре от 300 до 600 К для структур, выращенных: *a* — без прерывания роста, стимулирующего фазовый распад InGaN, и *b* — с прерываниями роста.

в коротковолновую область, в то время как форма спектра остается неизменной. Так как фототок зависит от поглощения света и эффективности экстракции фотоиндуцированных носителей, это означает, что внешнее смещение несущественно влияет на оба эти процесса. Коротковолновый сдвиг спектра ФТ при приложении обратного смещения можно объяснить влиянием эффекта Франца–Келдыша [7]. В то же время увеличение температуры приводит к существенному „вытягиванию“ длинноволнового хвоста спектра (рис. 2). При аппроксимации спектра ФТ функцией Гаусса это соответствует увеличению параметра дисперсии. Данный феномен можно объяснить с различных позиций:

— повышение температуры приводит к увеличению однородного уширения уровней благодаря увеличению скорости взаимодействия носителей с фононами [5]. В этом случае времена выбросов много меньше времен рекомбинации, частота которой обычно составляет величину порядка 10^9 с⁻¹ [6];

— при сравнительно больших временах выброса носителей в квантовые точки с большой глубиной локализации, из-за замедления выброса носителей сравнительно велика вероятность их рекомбинации, что приводит к понижению эффективности ФТ в структурах с глубокими КТ. При увеличении температуры роль глубоких КТ возрастает из-за увеличения вероятности выброса [1];

— повышение температуры приводит к изменению электронного спектра структуры, что связано с различными зависимостями изменения электронно-оптических параметров GaN и InGaN различного состава.

В любом из перечисленных случаев отсутствие изменения формы спектра при приложении смещения свидетельствует о достаточно быстрой экстракции уже делокализованных носителей из активной области. Иными словами, это означает, что поля $p-n$ -перехода оказываются достаточно, чтобы быстро разделять делокализованные носители до того, как произойдет их рекомбинация в активной области.

Рассмотрим более подробно „вытягивание“ хвоста спектра ФТ для структур, выращенных при различных ростовых режимах. На рис. 2, *a* и *b* показаны спектры ФТ для структур, выращенных без прерывания роста, стимулирующего фазовый распад, и с таким прерыванием соответственно. Как видно, у второй структуры „вытягивание“ хвоста спектра с увеличением температуры более сильное. В соответствии с рассмотренной интерпретацией данное различие может быть вызвано:

— более сильным относительным увеличением скоростей выброса и захвата носителей в структуре второго типа (рис. 2, *b*). В случае, если скорость выброса составляет величину порядка 10 фс, это приводит к более сильному увеличению однородного уширения с температурой. В этом случае статистика носителей в активной области равновесна;

— в случае, если времена выброса много больше 10 фс, „вытягивание“ хвоста спектра может означать, что во второй структуре выброс сильно замедлен, что, как было рассмотрено выше, приводит к уменьшению вклада в ФТ более глубоких КТ. Этот случай соответствует уже неравновесной статистике носителей. В первой структуре (рис. 2, *a*) скорость выброса может быть изначально высока, и ее относительное изменение более слабо сказывается на спектрах ФТ;

— в первой структуре увеличение температуры может в меньшей степени изменять спектр состояний, нежели во второй. Изменение спектра состояний может быть вызвано, к примеру, различной чувствительностью встроенных полей к температуре для разных уровней размерного квантования [7]. Кроме того, это может быть вызвано различной скоростью уменьшения ширины запрещенной зоны с увеличением температуры для матрицы GaN и слоя квантовых точек InGaN.

Для рассмотренных структур, по данным рентгеновской дифрактометрии, среднее содержание In в слоях InGaN у второй структуры оказалось меньше, чем у первой: 10 и 13% соответственно, несмотря на то что положения максимумов излучения у данных структур при комнатной температуре были почти одинаковы: 2.8 эВ. Такое структурное различие может объяснить причину различия оптических свойств рассмотренных структур с изменением температуры с различных позиций. В структурах, выращенных при одних ростовых параметрах, может играть значительную роль однородное уширение

уровней. В результате квазиравновесное распределение носителей имеет место даже при низких температурах. В структурах же, выращенных при других параметрах, однородное уширение может быть пренебрежимо мало, а квазиравновесная статистика носителей устанавливается при достаточно высоких температурах. Поэтому для выяснения того, какой именно механизм поглощения и экстракции носителей присутствует в структурах с КТ InGaN, требуются дополнительные экспериментальные данные.

Заключение

Нами изучены спектры фототока структур с квантовыми точками InGaN, полученные при высокой чувствительности измерений. Приложение внешнего смещения не изменяет форму спектра в пределах чувствительности. Это означает, что экстракция фотоиндуцированных носителей не зависит от поля $p-n$ -перехода, а зависит от других параметров, к которым можно отнести скорости термических выбросов носителей из квантовых точек и скорость туннельных процессов (если таковые существуют). В то же время форма спектра существенно изменяется с изменением температуры: наблюдается „вытягивание“ хвостов спектров с увеличением температуры, причем у структуры с более сильным фазовым распадом в активной области этот эффект сильнее.

Авторы выражают благодарность М.А. Яговкиной и В.И. Ильиной за их вклад в экспериментальную часть работы.

Работа была поддержана грантами, финансируемыми РФФИ.

Список литературы

- [1] P.W. Fry, I.E. Itskevich, S.R. Parnell, J.J. Finley, L.R. Wilson, K.L. Schumacher, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick, M. Al-Khafaji, A.G. Cullis, M. Hopkinson, J. Clark, G. Hill. *Phys. Rev. B*, **62**, 16 784 (2000).
- [2] M. Kubal, E.S. Jeon, Y.-K. Song, A.V. Nurmikko, P. Kozodoy, A. Abare, S. Keller, L.A. Coldren, U.K. Mishra, S.P. DenBaars. *Appl. Phys. Lett.*, **70** (19), 2580 (1997).
- [3] L.V. Asryan, R.A. Suris. *Semicond. Sci. Technol.*, **11**, 554 (1996).
- [4] Д.С. Сизов, В.Е. Заварин, В.В. Лундин, А.В. Фомин, А.Ф. Цацульников., Н.Н. Леденцов. *ФТП*, **39** (4), 492 (2005).
- [5] P.G. Eliseev. *J. Appl. Phys.*, **93**, 5404 (2003).
- [6] I.L. Krestnikov, N.N. Ledentsov, A. Hoffmann, D. Bimberg, A.V. Sakharov, W.V. Lundin, A.F. Tsatsul'nikov, A.S. Usikov, Zh.I. Alferov, Yu.G. Musikhin, D. Gerthsen. *Phys. Rev. B*, **66**, 155 310 (2002).
- [7] S.F. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, T. Mukai, S. Nakamura. *J. Appl. Phys.*, **88**, 5153 (2000).

Редактор Т.А. Полянская

**Studying the electron spectrum
of structures with InGaN quantum dots
using the spectroscopy of photocurrent**

*D.S. Sizov, V.S. Sizov, V.V. Lundin, A.F. Tsatsul'nikov,
E.E. Zavarin, N.N. Ledentsov*

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia