

Пикосекундная динамика фотолюминесценции гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми ямами

© В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Л.В. Гавриленко, З.Ф. Красильник, Д.И. Курицын, Д.И. Крыжков[†], С.В. Морозов

Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 26 декабря 2011 г. Принята к печати 27 декабря 2011 г.)

Представлены результаты экспериментального исследования субпикосекундной динамики релаксации фотоносителей в гетероструктуре In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs с квантовыми ямами. На основе исследования фотолюминесценции структуры методом ап-конверсии была определена скорость „остывания“ носителей в квантовой яме, а также время захвата носителей в яму, составляющее ~ 1 пс при 300 К и 6.5 пс при 10 К.

1. Введение

В настоящее время активно развиваются теоретические и экспериментальные исследования динамики носителей заряда в квантово-размерных наноструктурах с целью изучения фундаментальных свойств неравновесных носителей заряда [1,2] и создания на основе наноструктур различных приборов [3]. Фемтосекундная спектроскопия стала одним из основных методов исследования сверхбыстрых процессов, обусловленных различными механизмами рассеяния и последующей рекомбинации носителей заряда. Эта методика позволяет детально разобраться в физических процессах, управляющих динамикой носителей на всех этапах: от фотовозбуждения, последующей эволюции их состояний во времени до перехода к равновесному распределению [4–6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования пикосекундной и субпикосекундной динамики релаксации фотоносителей в гетероструктуре In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs с квантовыми ямами (КЯ), выполненного методом ап-конверсии (up-conversion).

Исследуемая гетероструктура была выращена методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металло-органических соединений) на подложке из полуизолирующего GaAs и содержала 50 напряженных квантовых ям In_{0.22}Ga_{0.78}As шириной 60 Å, разделенных барьерами из GaAs толщиной 500 Å. Структура специально не легировалась. Проведенные холловские измерения показали, что концентрация носителей заряда в квантовых ямах при комнатной температуре составляет < 10¹⁰ см⁻². Рассчитанная зонная диаграмма квантовой ямы приведена на вставке к рис. 1. Из расчета следует, что в квантовой яме имеется одна электронная подзона размерного квантования (*e1*) и две подзоны тяжелых дырок (*hh1*, *hh2*). Однако нужно принять во внимание, что структура выращена методом МОС-гидридной эпитаксии и при ширине ямы в 60 Å толщина переходного слоя, оцениваемая в 20 Å, оказывает заметное влияние на положение уровней размерного квантования. Из вида спектра пропускания (рис. 1) можно предположить,

что в квантовой яме присутствуют два электронных уровня (*e1*, *e2*) и два дырочных уровня (*hh1*, *hh2*) с энергиями разрешенных переходов *e1*–*hh1* и *e2*–*hh2*, равными 1.255 и 1.330 эВ соответственно.

2. Методика эксперимента

Кинетика фотолюминесценции (ФЛ) гетероструктуры GaAs/InGaAs была исследована при температурах *T* = 300 и при 10 К с субпикосекундным временным разрешением методом ап-конверсии [1]. В качестве источника фемтосекундного излучения использовался лазер Ti:Sapphire „Tsunami“ с длительностью импульса ~ 130 фс, мощностью в импульсе до 80 кВт и частотой повторения 80 МГц. Длина волны излучения лазера могла быть перестроена в диапазоне 750–950 нм. Сигнал фотолюминесценции регистрировался спектрометром FOG 100 (CDP Systems). Лазерный луч с помощью делителя 50/50 разделялся на два пучка, первый из которых пропускаться через линию задержки, а второй использовался для возбуждения ФЛ в образце. Сигнал ФЛ образца собирался оптической системой и смешивался с первым лучом на нелинейно-оптическом кристалле ВВО. В условиях, когда в нелинейном кристалле выполняется условие фазового синхронизма для излучения фемтосекундного лазера с частотой ω_{gate} и сигнала ФЛ на частоте ω_{PL} , происходила генерация излучения с частотой $\omega_{\text{sum}} = \omega_{\text{gate}} + \omega_{\text{PL}}$. Это излучение выделялось с помощью двойного монохроматора и детектировалось фотоэлектронным умножителем в режиме счета фотонов. Характерная длительность сигнала ФЛ в наших образцах составляла до 1.5 нс. Меняя с помощью линии задержки момент поступления лазерного импульса на нелинейный кристалл относительно начала сигнала ФЛ, можно было измерять кинетику сигнала ФЛ. Таким образом, установка позволяла измерять кинетику ФЛ в интервале длин волн 800–1800 нм и во временном интервале *t* = 0–1700 пс с временным разрешением 130 фс.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведен спектр фотолюминесценции при возбуждении непрерывным аргоновым лазером (кри-

[†] E-mail: krizh@ipm.sci-nnov.ru

вая 1) и спектр пропускания (кривая 2) исследуемой структуры. В спектре пропускания хорошо виден экситонный минимум около края перехода $e1-hh1$ (ему соответствует пик в спектре ФЛ). Стрелками на рисунке указаны энергии межзонных переходов в КЯ ($e1-hh1$, $e2-hh2$).

Кинетика люминесценции для разных длин волн при 300 К представлена на рис. 2, а. Для структуры была характерна интенсивная ФЛ в интервале энергий 1.204–1.425 эВ. Время жизни носителей в барьерах GaAs (1.425 эВ на рис. 2, а) и возбужденных подзонах КЯ (1.377, 1.3476 эВ) мало и определяется, по-видимому, захватом носителей на более глубокие состояния в КЯ. Время жизни носителей в основном состоянии в КЯ (1.239 эВ) составляло ~ 600 пс.

Для исследования процесса захвата носителей в КЯ и их последующего „остывания“ в яме была построена зависимость времени нарастания сигнала ФЛ от энергии фотона. Во всем интервале времен, от момента окончания действия импульса возбуждения ФЛ до характерного времени межзонной рекомбинации (~ 600 пс), концентрацию фотовозбужденных носителей можно считать постоянной. При этом кинетика ФЛ определяется перераспределением фотоносителей в барьерах, их захватом и „остыванием“ в квантовых ямах. Рост сигнала ФЛ во времени t на начальном этапе (рис. 2, б) хорошо описывается эмпирическим выражением $I_{PL}(t) = A[1 - \exp(-t/\tau_r)]$, где I_{PL} — интенсивность ФЛ, а τ_r — время нарастания ФЛ. Определенное из этого выражения время нарастания ФЛ как функция энергии фотона ФЛ представлено на рис. 3. Можно

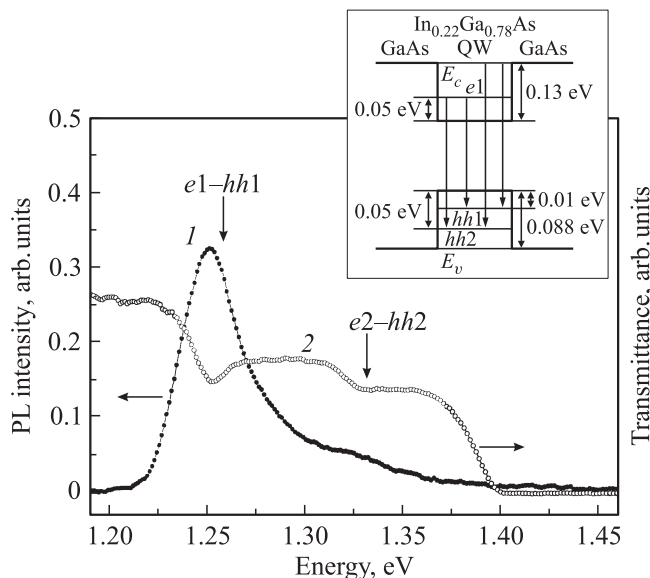


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции (PL) (1) и спектр пропускания (2) при $T = 300$ К гетероструктуры $In_{0.22}Ga_{0.78}As/GaAs$. Возбуждение фотолюминесценции непрерывным Ar^+ -лазером мощностью 100 мВт. Стрелками показаны энергии межзонных переходов в КЯ ($e1-hh1$, $e2-hh2$). На вставке — зонная диаграмма гетероструктуры.

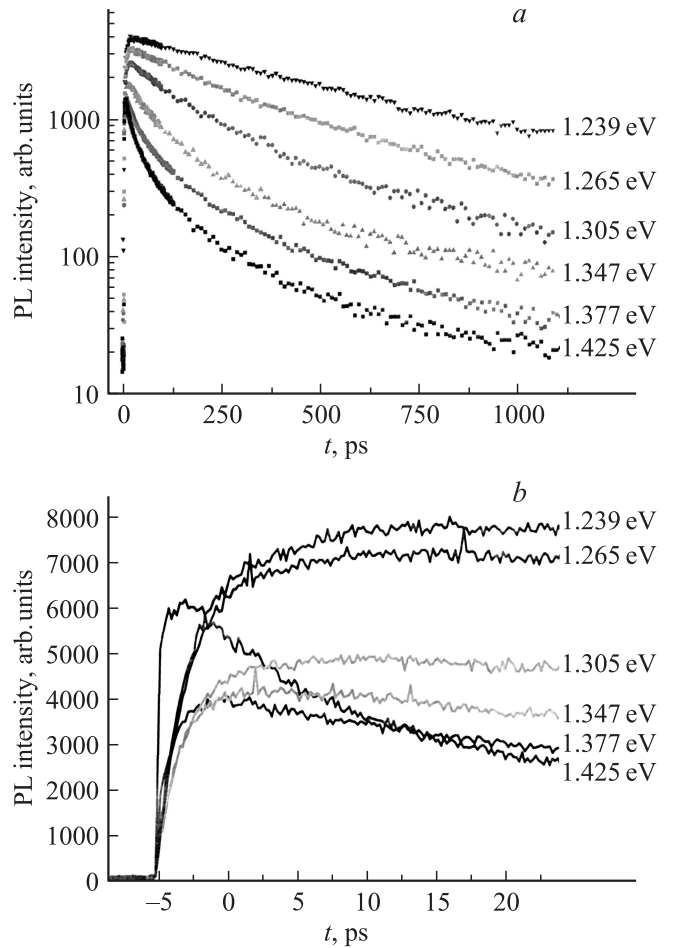


Рис. 2. Кинетика фотолюминесценции (PL) для различных длин волн гетероструктуры GaAs/InGaAs при $T = 300$ К (а) и начальные участки кинетических кривых (б). Возбуждение осуществлялось фемтосекундным лазером с энергией кванта излучения 1.55 эВ, средняя мощность ~ 180 мВт.

выделить три участка, отличающихся наклоном кривой зависимости τ_r от энергии. Первый участок, при энергиях ≥ 1.4 эВ, соответствует термализации носителей в барьерах GaAs. Второй участок в районе 1.375 эВ соответствует захвату носителей в яму (характерное время ~ 1 пс). Третий участок в интервале 1.2–1.35 эВ соответствует остыванию носителей в яме за счет испускания оптических и акустических фононов. Оценка характерной скорости остывания носителей в квантовой яме дает $\Delta E_{QD}/\Delta\tau_r \approx 98$ мэВ/пс (см. рис. 3). Была выполнена оценка скорости остывания носителей в КЯ за счет испускания оптических фононов, при расчете использовался стандартный подход [7]. При рассмотрении рассеяния электронов на полярных оптических фононах мы полагаем закон дисперсии фононов таким же, как в объемном GaAs. Кроме того, фононный газ полагался равновесным с температурой, соответствующей температуре кристалла. Полученный результат скорости остывания за счет испускания оптических фононов в первой подзоне размерного квантования дает величину,

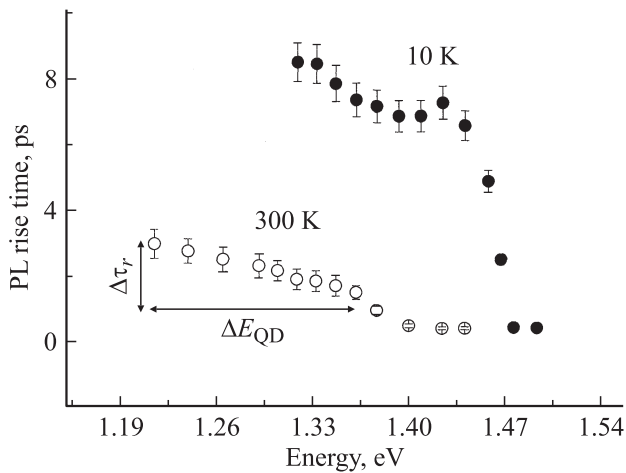


Рис. 3. Зависимость времени нарастания сигнала фотолуминесценции (PL) от энергии излучения при $T = 300$ и 10 К. Зависимости можно разделить на три участка, различающихся наклоном кривой: первый участок при энергиях ≥ 1.4 эВ при 300 К (≥ 1.47 эВ при 10 К) соответствует термализации носителей в барьерах GaAs; второй участок в районе 1.375 эВ при 300 К (1.46 эВ при 10 К) соответствует захвату носителей в яму; третий участок в интервале $1.2-1.35$ эВ при 300 К ($1.31-1.45$ эВ при 10 К) соответствует остыванию носителей КЯ. Скорость остывания носителей в яме определяется как $\Delta E_{QD}/\Delta\tau_r$.

равную примерно 36 мэВ/ 0.14 пс = 257 мэВ/пс, заметно большую, чем получено в эксперименте. Различие этих значений указывает на заметную роль процессов поглощения оптических фононов (как равновесных, так и неравновесных), которые замедляют процесс остывания.

Люминесцентные свойства гетероструктуры GaAs/InGaAs также были исследованы при низких температурах ($T = 10$ К). При $T = 10$ К линия ФЛ значительно уже, чем при 300 К, и сдвинута в область больших энергий (при низких температурах ширина запрещенной зоны GaAs увеличивается до 1.512 эВ). Интенсивность ФЛ, значительно превышает интенсивность люминесценции при 300 К. На рис. 4, *a* приведены кривые кинетики люминесценции для разных длин волн. Увеличение интенсивности ФЛ связано с подавлением некоторых механизмов безызлучательной рекомбинации носителей, что подтверждается увеличением наблюдаемого времени рекомбинации электронно-дырочных пар. Время жизни носителей в основном состоянии в КЯ составляло ~ 750 пс.

Для полученных кинетических кривых был проведен такой же анализ зависимости времени нарастания от энергии возбуждающего фотона, как и для кинетических кривых, измеренных при 300 К. При 10 К зависимость времени нарастания ФЛ от энергии возбуждающего фотона качественно такая же, как и при 300 К (рис. 3), и так же может быть разделена на три участка: релаксация носителей в барьерах GaAs (при энергиях > 1.475 эВ), захват в квантовую яму (в районе $1.440-1.475$ эВ) и остывание носителей в квантовой яме (при энергиях

< 1.440 эВ). Время захвата носителей в КЯ при 10 К составляет ~ 6.5 пс. По-видимому, это связано с подавлением некоторых механизмов захвата, действующих при комнатной температуре, например, таких как рассеяние носителей на акустических фононах. Отметим, что скорость остывания носителей в квантовой яме (интервал энергии ФЛ $1.34-1.4$ эВ) при понижении температуры уменьшается до 72 мэВ/пс.

Время нарастания ФЛ вблизи основного перехода $e1-hh1$ (1.319 эВ при $T = 10$ К) падает от 21 до 6.4 пс при увеличении мощности возбуждения от 1.35 до 180 мВт. Значительное уменьшение времени нарастания при увеличении мощности возбуждения, по-видимому, как и в работе [8], связано с конкуренцией электронно-дырочной и экситонной рекомбинации. Экситонная рекомбинация доминирует при малой концентрации носителей и характеризуется большим временем образования экситона за счет взаимодействия носителей и акустических фононов. При увеличении мощности накачки возрастает концентрация носителей и основным механизмом становится электронно-дырочная рекомбинация.

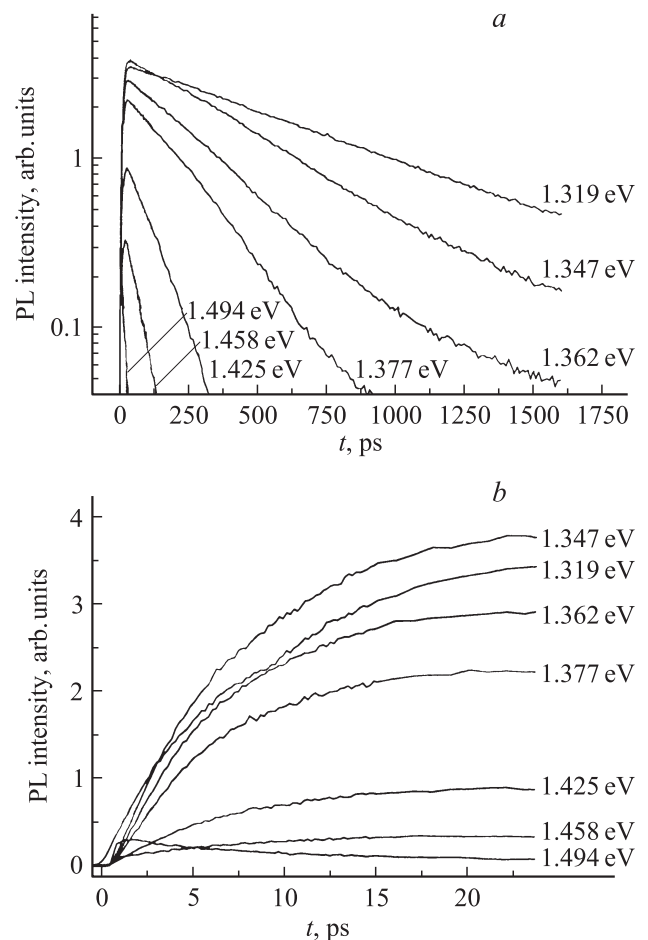


Рис. 4. Кинетика фотолуминесценции (PL) для различных длин волн гетероструктуры GaAs/InGaAs при $T = 10$ К (*a*) и начальные участки кинетических кривых (*b*). Возбуждение осуществлялось фемтосекундным лазером с энергией кванта излучения 1.65 эВ, средняя мощность ~ 180 мВт.

В нашей работе оценка времени захвата и скорости остывания носителей в КЯ выполнялась на основе анализа зависимости времени нарастания люминесценции от энергии фотона. Такой метод не является общепринятым. Обычно время захвата определяется по времени нарастания сигнала люминесценции основного перехода КЯ. В простейшем случае, как, например, в работе [5], время захвата носителей в КЯ определяют через время нарастания сигнала люминесценции основного перехода КЯ, таким образом, не разделяя собственно время захвата носителей и время их остывания в КЯ. В работе [6] для определения времени захвата носителей измерялись времена нарастания люминесценции основного перехода в КЯ при энергии кванта возбуждающего излучения больше и меньше ширины запрещенной зоны барьеров КЯ. В первом случае время нарастания ФЛ основного перехода ямы определяется временем захвата носителей и временем остывания носителей в яме; во втором случае — только временем оставания. Из разностей этих времен и определяется время захвата носителей.

4. Заключение

Методом ап-конверсии исследована кинетика ФЛ гетероструктуры $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ с субпикосекундным разрешением. Определено время захвата носителей в КЯ, составившее ~ 1 пс при 300 К и 6.5 пс при 10 К. По-видимому, это связано с подавлением некоторых механизмов захвата, действующих при комнатной температуре, например, рассеяния носителей на акустических фононах. Определены скорости остывания фотоносителей в квантовой яме.

Авторы благодарны Б.Н. Звонкову за выращенные структуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных исследований президиума РАН „Экстремальные световые поля и их приложения“, „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и гранта РФФИ № 10-02-01195-а.

Список литературы

- [1] A. Othonos. *J. Appl. Phys.*, **83**, 1789 (1998).
- [2] V.M. Axt, T. Kuhn. *Rep. Progr. Phys.*, **67**, 433 (2004).
- [3] J. Wang, H.C. Schweizer. *IEEE J. Select. Topics Quant. Electron.*, **3**, 218 (1997).
- [4] W.H. Fan, S.M. Olaizola, J.-P.R. Wells, A.M. Fox, T. Wang, P.J. Parbrook, D.J. Mowbray, M.S. Skolnick. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3052 (2004).
- [5] L.V. Dao, M.B. Johnston, M. Gal, L. Fu, H.H. Tan, C. Jagadish. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 3408 (1998).
- [6] P.W.M. Blom, C. Smit, J.E.M. Haverkort, J.H. Wolter. *Phys. Rev. B*, **47**, 2072 (1993).
- [7] В.Ф. Гантмахер, И.Б. Левинсон. *Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках* (М., Наука, 1984).

- [8] A. Amo, M.D. Martin, L. Viña, A.I. Toropov, K.S. Zhuravlev. *Phys. Rev. B*, **73**, 035 205 (2006).

Редактор Л.В. Шаронова

Picosecond dynamics of photoluminescence in a GaAs/InGaAs quantum well heterostructure

V.Ya. Aleshkin, A.A. Dubinov, L.V. Gavrilenko, Z.F. Krasilnik, K.I. Kuritsyn, D.I. Kryzhkov, S.V. Morozov

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract Carrier relaxation and capture processes in a $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well heterostructure are investigated by means of time-resolved spectroscopy. Basing on the results of up-conversion photoluminescence investigation we determined the carrier cooling rate in quantum well and the capture time which was 1 ps at room temperature and 6.5 ps at 10 K.