

Внутризонная фотопроводимость гетероструктур InAs/GaAs с квантовыми точками, индуцированная межзонной подсветкой

© А.В. Антонов, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, Л.Д. Молдавская[¶], В.И. Шашкин

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

(Получена 25 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Исследуется эффект продольной внутризонной фотопроводимости в нелегированных гетероструктурах InAs/GaAs с квантовыми точками. Для заселения уровней квантовых точек носителями заряда используется оптическое межзонное возбуждение разной мощности и с разной длиной волны. В отсутствие межзонной подсветки фотопроводимость в среднем инфракрасном диапазоне не наблюдается. В то же время дополнительная подсветка структур излучением видимого или ближнего инфракрасного диапазона приводит к возникновению значительного сигнала фотопроводимости в среднем инфракрасном диапазоне (3–5 мкм), связанного с внутризонными переходами в квантовых точках. Сигнал наблюдается до температуры ~ 200 К. Использование оптической межзонной накачки позволяет увеличить сигнал внутризонной фотопроводимости по сравнению с аналогичными структурами, в которых для создания носителей на уровнях квантовых точек использовано легирование.

Для возникновения внутризонной фотопроводимости необходимым условием является наличие носителей заряда на связанных уровнях квантовых точек (КТ). В существующих фотоприемниках для заселения уровней КТ электронами обычно используется легирование либо непосредственно слоев КТ [1,2], либо барьерных слоев [3]. Роль легирования структуры будет различной в случаях вертикальной и продольной фотопроводимости. Вертикальная фотопроводимость наблюдалась и в нелегированных структурах с КТ, неравновесное заселение уровней КТ достигалось при инжекционном механизме протекания тока в сильных электрических полях порядка нескольких кВ/см [4]. Продольная фотопроводимость исследуется в значительно более слабых электрических полях, при этом роль эффектов инжекции из контактов незначительна.

Другой путь создания неравновесных носителей на уровнях КТ — это оптическое межзонное возбуждение электронно-дырочных пар. С одной стороны, такой способ дает большие возможности для исследования энергетического спектра носителей заряда и роли различных состояний в возникновении внутризонной фотопроводимости. Резонансное межзонное возбуждение может быть использовано как альтернатива изготовлению многих образцов с различным уровнем легирования. Заселенность определенных уровней может контролироваться изменением мощности и длины волны накачки. Такие исследования важны для оптимизации уровня легирования в фотоприемниках на КТ. С другой стороны, явление внутризонной фотопроводимости в среднем инфракрасном (ИК) диапазоне, появляющейся только при дополнительной межзонной подсветке, представляет самостоятельный интерес с точки зрения создания новых приборов. Фотоприемник, в котором процесс детектирования излучения среднего ИК диапазона контролируется дополнительной подсветкой в

ближнем ИК или видимом диапазоне, в отсутствие подсветки будет прозрачным для среднего ИК излучения. В отличие от обычного детектора, который всегда поглощает детектируемое излучение, такой прибор может быть интегрирован в оптический волновод и может измерять мощность излучения в определенные моменты времени, не препятствуя его прохождению в остальное время. Наиболее важным и интересным применением нам представляется возможность создания беспиксельного приемника пространственного изображения при использовании образца большой площади и сканирующего узкого пятна возбуждения.

Исследования внутризонных переходов, индуцированных межзонной подсветкой, в нелегированных структурах были сначала проведены в структурах с квантовыми ямами. Внутризонное поглощение при дополнительной оптической накачке в нелегированных структурах GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами было впервые получено в [5] при низкой температуре. Проведенные измерения внутризонного поглощения при оптической накачке в зону проводимости в нелегированных квантовых ямах GaAs/AlGaAs показали возрастание силы осциллятора в 25 раз по сравнению с легированными квантовыми ямами благодаря экситонным эффектам. В работе [6] было получено поглощение на длине волны 10 мкм на внутризонных электронных переходах в нелегированной структуре с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs, возникающее под действием подсветки ближним ИК излучением при комнатной температуре. Авторы [7] предложили и реализовали фотоприемник на квантовых ямах, основанный на этом принципе, с чувствительностью 4 мА/Вт при мощности накачки 50 мВт.

Фотоиндуцированное внутризонное поглощение света в нелегированных КТ InAs/GaAs, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, было показано в работе [8]. Авторы обнаружили внутризонное поглощение между уровнями КТ только для света, поляризованного

[¶] E-mail: lmd@ipm.sci-nnov.ru

в направлении роста, как для случая квантовых ям. Это связано с тем, что в работе исследовались линзообразные КТ, которые слабо чувствительны к нормально падающему свету. В [9] те же авторы исследовали зависимость фотоиндуцированного внутризонного поглощения КТ от энергии межзонной оптической накачки. Было показано, что амплитуда внутризонного поглощения зависит от мощности накачки и в использованных в эксперименте структурах максимальна при заселении уровней КТ через состояния смачивающего слоя.

В данной работе приводятся результаты исследования продольной внутризонной фотопроводимости, индуцированной межзонной подсветкой в нелегированных гетероструктурах InAs/GaAs с КТ, при различных длинах волн и различной мощности межзонного возбуждения.

Структуры выращены методом металлоорганической газовой эпитаксии на установке „EPICUIP“ при пониженном давлении в реакторе. Использовались полужолирующие подложки GaAs (100). Активная область структур состоит из 5 слоев КТ InAs, разделенных барьерными слоями GaAs толщиной 80 нм. Рост каждого из слоев квантовых точек проводился при пониженной температуре, 480°C. Затем следовала продувка реактора водородом в присутствии арсина и зарощивание КТ тонким слоем GaAs при той же пониженной температуре. Низкотемпературный слой GaAs служит для консервации КТ при дальнейшем подъеме температуры. Затем в режиме прерывания роста температура поднималась до 600–620°C и проводился рост толстых барьерных слоев GaAs.

Для характеристики структур использовались методы спектроскопии фотолюминесценции и рентгеновской дифракции. Спектр фотолюминесценции структуры с КТ при температуре 77 К приведен на рис. 1. В качестве источника возбуждения применялся полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 660 нм. Фотолюминесцентное излучение детектировалось *p-i-n*-фотодиодом на основе InGaAs. В спектре присутствуют пики от смачивающего слоя (875 нм), а также от основного (1200 нм) и возбужденных (1100 и 1040 нм) состояний КТ. Время затухания фотолюминесценции от КТ составляет несколько наносекунд. На рис. 2 показан рентгенодифракционный спектр структуры с КТ. Для сравнения приведен спектр 10-слойной структуры, в которой рост КТ был остановлен на стадии образования смачивающего слоя. Спектры отражают периодическое расположение смачивающих слоев в обеих структурах, однако в структуре с КТ планарность слоев нарушена, что приводит к быстрому затуханию сателлитов.

Из выращенных структур были изготовлены макеты фотоприемников для исследования латеральной фотопроводимости. В отсутствие межзонной подсветки фотопроводимость в среднем ИК диапазоне не наблюдалась. В то же время дополнительная подсветка структур излучением видимого или ближнего ИК диапазона приводила к возникновению значительного сигнала фотопроводимости в среднем ИК диапазоне (3–5 мкм). Наблюдает-

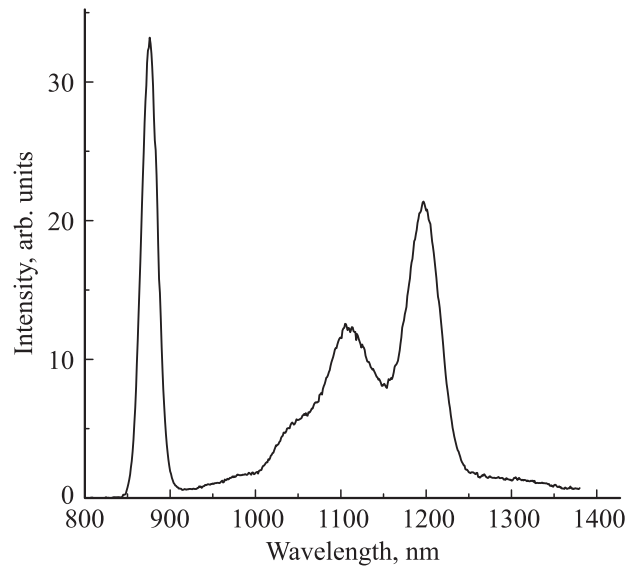


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции структуры с КТ при температуре 77 К.

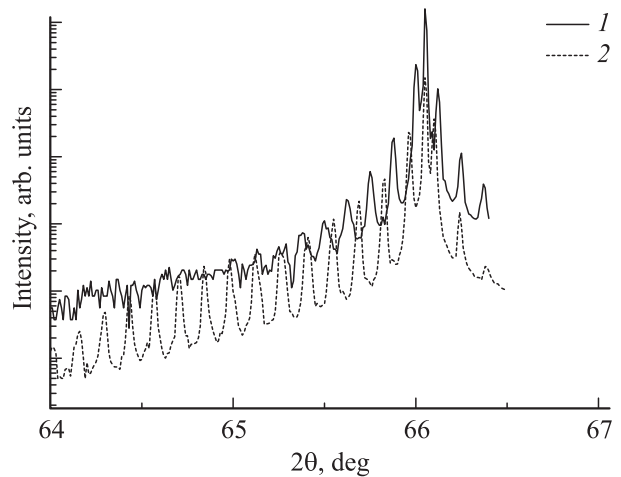


Рис. 2. Рентгенодифракционные спектры: 1 — структура с 5 слоями КТ, 2 — структура с 10 „смачивающими слоями“.

мую фотопроводимость мы связываем с внутризонными переходами электронов со связанных состояний в КТ в состояния непрерывного спектра. С увеличением мощности межзонной накачки интенсивность сигнала внутризонной фотопроводимости возрастала до некоторого уровня насыщения, связанного с заполнением состояний КТ. На рис. 3 показаны спектры фотопроводимости, полученные с помощью фурье-спектрометра Инфралом ФТ-801, работающего в диапазоне 2–18 мкм. Спектры записаны при температуре 80 К при дополнительной подсветке красным лазером и белым светом.

Межзонное возбуждение с разной энергией осуществлялось с помощью перестраиваемого непрерывного титан-сапфирового лазера Matisse. Максимальный сигнал внутризонной фотопроводимости наблюдается при

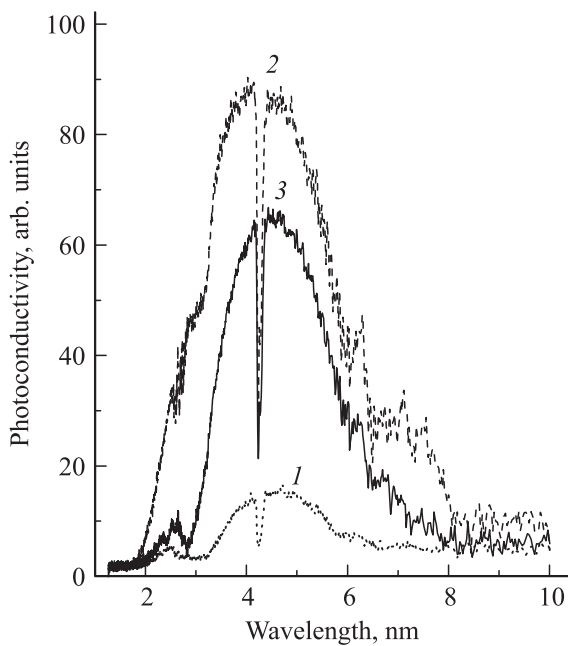


Рис. 3. Продольная фотопроводимость нелегированной структуры с КТ при дополнительной различной межзонной подсветке: 1, 2 — белый свет меньшей (1) и большей (2) интенсивности; 3 — красное лазерное излучение.

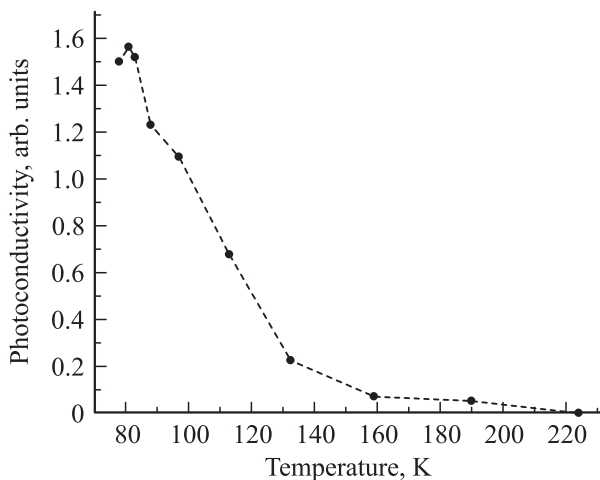


Рис. 4. Температурная зависимость фотопроводимости на длине волны 4 мкм.

межзонном возбуждении с энергией, большей ширины запрещенной зоны GaAs. Однако при резонансной накачке на уровень смачивающего слоя (860 нм) сигнал падает менее чем на 20%, несмотря на значительное уменьшение поглощения, что свидетельствует об эффективности захвата носителей с уровня смачивающего слоя на уровни КТ.

На рис. 4 приведена температурная зависимость внутризонной фотопроводимости на длине волны 4 мкм при дополнительной межзонной подсветке в диапазоне температур 77–220 К. Сигнал наблюдается до температу-

ры порядка ~ 200 К. Возможность повышения рабочих температур является одним из важных преимуществ фотоприемников с КТ по сравнению с фотоприемниками на основе структур с квантовыми ямами, для работы которых требуется охлаждение до криогенных температур. Благодаря снижению рассеяния на фононах кристаллической решетки в системах с КТ возможно значительное возрастание времени жизни фотовозбужденных электронов и уменьшение темнового тока [10]. Однако пока в большинстве реализованных фотоприемников на КТ рабочие температуры не превышают 150 К. Отметим, что в нашей структуре фотопроводимость сначала растет с температурой (участок кривой от 77 до 81 К). В ближайшее время мы планируем исследовать низкотемпературную часть зависимости фотопроводимости в диапазоне 4–77 К.

Ранее мы исследовали внутризонную фотопроводимость в аналогичных структурах, в которых для создания носителей заряда на уровнях КТ использовалось селективное легирование δ -слоями Si, расположенными на расстоянии 2.5 нм перед каждым слоем КТ [11]. Сравнение чувствительности легированной и нелегированной структур показало, что использование оптической межзонной накачки для создания носителей на уровнях КТ позволяет на порядок увеличить сигнал внутризонной фотопроводимости по сравнению с легированной структурой. Таким образом, чувствительность легированных фотоприемников на КТ в принципе может быть значительно повышена при оптимизации легирования.

Итак, исследован эффект продольной внутризонной фотопроводимости в нелегированных структурах с КТ. Носители заряда на уровнях КТ создаются путем оптического межзонного возбуждения электронно-дырочных пар. Сигнал внутризонной фотопроводимости в диапазоне 3–5 мкм наблюдается до температуры ~ 200 К. Использование оптической межзонной накачки позволяет увеличить сигнал внутризонной фотопроводимости по сравнению с характерным для аналогичных структур, в которых для создания носителей на уровнях КТ использовано легирование.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-02-97121-р_поволжье_a) и Министерства образования и науки РФ (ГК № 16.552.11.7007).

Список литературы

- [1] P. Vines, C.H. Tan, J.P.R. David, R.S. Attaluri, T.E. Vanderfelde, S. Krishna. Proc. SPIE, **7113**, 71130J (2008).
- [2] L. Chu, A. Zrenner, G. Böhm, G. Abstreiter. Appl. Phys. Lett., **76**, 1944 (2000).
- [3] D. Pal, E. Towe. J. Vac. Sci. Technol., **23**, 1132 (2005).
- [4] L. Fu, Q. Li, P. Kuffner, G. Jolley, P. Gareso, H.H. Tan, C. Jagadish. Appl. Phys. Lett., **93**, 013 504 (2008).
- [5] M. Olszakier, E. Ehrenfreund, E. Cohen, J. Bajaj, G.J. Sullivan. Phys. Rev. Lett., **6**, 2997 (1989).
- [6] D. Delacourt, D. Papillon, J.P. Pocholle, J.P. Schnell, M. Papuchon. Electron. Lett., **26** (5), 277 (1990).

- [7] V. Berger, E. Rosencher, N. Vodjdani, E. Costard. Appl. Phys. Lett., **62**, 378 (1993).
- [8] S. Sauvage, P. Boucaud, F.H. Julien, J.-M. Gerard, J.-Y. Marzin. J. Appl. Phys., **82** (7), 3396 (1997).
- [9] S. Sauvage, P. Boucaud, J.-M. Gerard, V. Thierry-Mieg. J. Appl. Phys., **84** (8), 4356 (1998).
- [10] P. Martyniuk, A. Rogalski. Bull. Polish Acad. Sci. Technical Sci., **57** (1), 103 (2009).
- [11] Л.Д. Молдавская, Н.В. Востоков, Д.М. Гапонова, В.М. Данильцев, М.Н. Дроздов, Ю.Н. Дроздов, В.И. Шашкин. ФТП, **42** (1), 101 (2008).

Редактор Л.В. Шаронова

Intraband photoconductivity of InAs/GaAs quantum dot heterostructures, induced by interband illumination

A.V. Antonov, V.M. Daniltsev, M.N. Drozdov, Yu.N. Drozdov, L.D. Moldavskaya, V.I. Shashkin

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

Abstract The effect of lateral intraband photoconductivity induced by the interband illumination in undoped InAs/GaAs heterostructures with quantum dots has been observed and investigated. Optical interband excitation at different wavelengths and pump powers was used for population of quantum dot levels with charge carriers. The photoconductivity in the mid-infrared range was not observed in the absence of the interband illumination. Additional illumination of the structures with radiation of the visible or near infrared range resulted in a significant signal of photoconductivity in the mid-infrared range, associated with intraband transitions in quantum dots. The photoconductivity signal in the range of 3–5 μm has been observed up to temperatures around 200 K. It has been shown that use of optical interband pumping for creation of charge carriers in the levels of quantum dots allows substantial increase of the intraband photoconductivity in comparison with that in similar structures in which doping is used for this purpose.