

Долговременная релаксация фотопроводимости в гетероструктурах n -InGaAs/GaAs со связанными квантовыми ямами при межзонном возбуждении

© В.В. Вайнберг[†], В.М. Васецкий⁺, Ю.Н. Гуденко⁺, В.Н. Порошин⁺, Н.В. Байдусь*, Б.Н. Звонков*

⁺ Институт физики Национальной академии наук Украины, 03680 Киев, Украина

* Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 15 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Экспериментально исследована кинетика фотопроводимости в гетероструктурах n -In_xGa_{1-x}As/GaAs с двойными связанными квантовыми ямами и δ -легированием в одной из них при межзонном возбуждении. Показано, что долговременный спад фотопроводимости, наблюдаемый в интервале температур от 10 до 70 К, обусловлен хаотическим потенциалом, связанным с флуктуациями состава в слоях квантовых ям.

1. Введение

Гетероструктуры InGaAs/GaAs с квантовыми ямами (КЯ) широко используются в современной электронике и оптоэлектронике (в разных типах транзисторов, источниках излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов и т.п.). Материал слоев, являющихся квантовыми ямами (InGaAs), относится к полупроводниковым твердым растворам, для которых характерно наличие флуктуаций состава. Как следствие этого, существует хаотический потенциал в плоскости квантовых ям.

Известен ряд эффектов в гетероструктурах InGaAs/GaAs, связанных с хаотическим потенциалом в КЯ: значительное рассеяние носителей заряда, приводящее к уменьшению их подвижности, аномальная температурная зависимость ширины полосы фотолюминесценции и зависимость ее интенсивности от мощности возбуждения, существование медленной компоненты в затухании люминесценции (см., например, [1–3]).

Наличие хаотического потенциала обычно приводит также к долговременной релаксации (ДР) фотопроводимости и остаточной проводимости, которые ранее наблюдались в различных объемных материалах и гетероструктурах SiGe/Si с квантовыми ямами [4–7]. В настоящей работе проведено экспериментальное исследование релаксации фотопроводимости при межзонном возбуждении в гетероструктурах InGaAs/GaAs с квантовыми ямами с целью обнаружения таких явлений. Объектом исследования являлись структуры с двойными квантовыми ямами с содержанием индия $x = 0.08–0.10$, которые были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений). Проведенное ранее для таких структур моделирование процесса роста показало наличие в них флуктуаций состава (концентрации индия и галлия) в плоскости квантовых ям и обусловленного ими потенциального рельефа [8].

2. Исследуемые структуры и методика эксперимента

Исследуемые гетероструктуры содержали 20 периодов двойных туннельно-связанных квантовых ям (ДКЯ) In_xGa_{1-x}As шириной 80 и 160 Å, разделенных барьерами из GaAs толщиной 780 Å. Толщина GaAs-барьера между связанными ямами составляла 50 Å. Широкие ямы специально не легировались, в то время как в узкие КЯ вводился в центр δ -слой донорной примеси Si с концентрацией $N_d \approx (1–3) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ на период. Структуры выращивались на полуизолирующей подложке GaAs (001) при температуре 530–580°C.

Холловские измерения показали, что при температурах выше 10 К все примеси являются ионизованными. Рассчитанная зонная диаграмма ДКЯ для электронов при температуре $T = 10 \text{ К}$ и их волновые функции приведены на рис. 1. Из расчета следует, что в ДКЯ

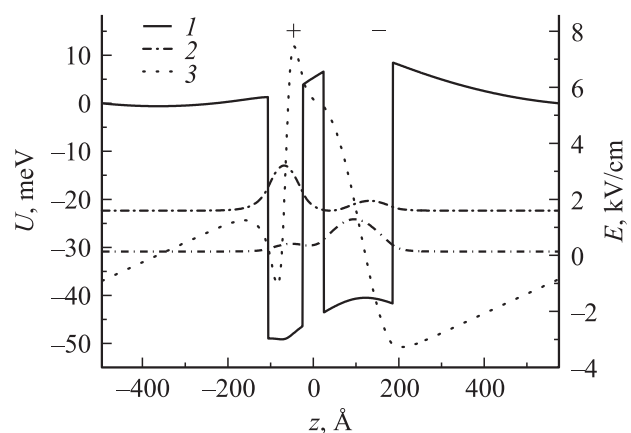


Рис. 1. Профиль одного периода потенциала дна зоны проводимости U (1), квадраты огибающих волновых функций электронов на уровнях размерного квантования (2) и величина встроенного электрического поля E (3) в направлении z , перпендикулярном слоям КЯ при $T = 10 \text{ К}$.

[†] E-mail: vainberg@iop.kiev.ua

имеются две электронные подзоны размерного квантования. Нижняя подзона генетически связана с широкой квантовой ямой. Вторая подзона, расположенная выше первой примерно на 10 мэВ, связана с узкой ямой. Энергия Ферми составляет несколько мэВ, поэтому при данной температуре большая часть свободных электронов сосредоточена в широких (нелегированных) ямах. Как следствие этого, между ДКЯ имеется встроенное электрическое поле, создаваемое этими электронами и ионизованными примесями в узкой яме. Рассчитанное распределение поля в ДКЯ также приведено на рис. 1. Отметим, что с повышением температуры часть электронов переходит во вторую подзону и оказывается пространственно локализованной в узкой квантовой яме, что приводит к уменьшению величины встроенного поля.

Кинетика фотопроводимости гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ была исследована для длины волны возбуждающего излучения, равной 656 нм. В качестве источника излучения использовался полупроводниковый лазер с длительностью импульса ~ 8 мкс и временами нарастания и спада, равными ~ 10 нс.

Из структуры выкалывались образцы прямоугольной формы с размерами 3×9 мм. На поверхность образцов наносились и вжигались полосковые омические контакты из сплава Ga + Au на расстоянии 7–8 мм друг от друга. Исследуемый образец помещался в гелиевый криостат, в котором рабочая температура поддерживалась с точностью $\pm 10^{-3}$ К. Напряжение смещения (постоянное или в виде импульсов с длительностью до 150 мкс) подавалось на контакты. Его величина составляла 0–1000 В. Сигнал фотоотклика записывался с помощью цифрового осциллографа PCS500, соединенного с персональным компьютером.

3. Результаты и их обсуждение

Типичная осциллограмма импульса фотоотклика I гетероструктур на возбуждающее излучение представлена на рис. 2. Во время возбуждения наблюдается увеличение проводимости образца, т.е. положительная фотопроводимость. Она обусловлена возникновением неравновесных электронов и дырок при межзонном надбарьерном поглощении возбуждающего излучения, которое приводит к увеличению концентрации носителей тока в квантовых ямах. После выключения возбуждения наблюдается долговременная релаксация проводимости к своему „темновому“ значению. Анализ кривых релаксации показал, что они не могут быть описаны моноэкспоненциальной функцией с некоторой временной константой.

Обычно долговременную немоноэкспоненциальную релаксацию межзонной фотопроводимости в полупроводниках и полупроводниковых гетероструктурах связывают с наличием в них макроскопических потенциальных барьеров (хаотичного потенциального рельефа),

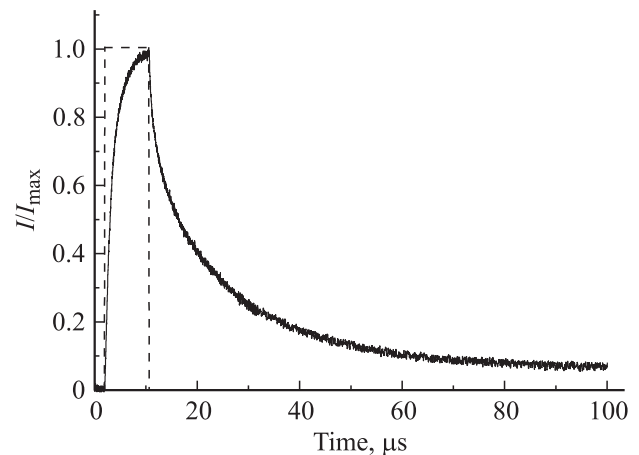


Рис. 2. Типичный вид нормированного на максимум импульса фотоотклика гетероструктуры I/I_{\max} . Штриховая линия — импульс фотовозбуждения.

связанных с различного рода неоднородностями (см., например, [9]). Ими могут быть флуктуации концентрации заряженных примесных центров, флуктуации состава и т.п. Они приводят к локализации и пространственному разделению возбужденных светом носителей. Рекомбинация носителей сопряжена с преодолением ими потенциального барьера (активационный или туннельный процесс), что приводит к их большому времени жизни. Релаксация сигнала фотопроводимости во времени $I(t)$ в этом случае описывается суперпозицией одноэкспоненциальных функций с разными временами релаксации τ (так называемая „растянутая“ экспоненциальная функция Кольрауша):

$$I(t) = I(t_0) \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\tau_{\text{av}}} \right)^\beta \right], \quad (1)$$

где t_0 — время, соответствующее выключению фотовозбуждения, τ_{av} — среднее (характерное) время релаксации, β — параметр, характеризующий разброс времен релаксации ($0 < \beta < 1$).

На рис. 3 показана аппроксимация экспериментальных кривых релаксации фотопроводимости исследованных гетероструктур „растянутой“ экспоненциальной функцией (1). Видно, что в координатах $\ln\{I(t_0)/I(t)\}$ — $\ln(t - t_0)$ кривые хорошо линейризуются во всем временном интервале в соответствии с (1). Полученные при этом значения характерного времени релаксации τ_{av} и параметра β для разных температур и напряжений смещения (напряженности приложенного латерального электрического поля), приведены на рис. 4 и 5. Видно, что величина β не очень чувствительна к изменению температуры или величины поля и лежит в интервале от ~ 0.5 до ~ 0.7 . Напротив, время релаксации фотопроводимости зависит от температуры, причем в интервале от ~ 15 до ~ 40 К зависимость является

экспоненциальной, $\tau_{av} \propto \exp(E_a/kT)$, т.е. процесс релаксации имеет термоактивационный характер. Этот факт и вид кинетики релаксации фотопроводимости в виде „растянутой“ экспоненциальной функции (1) позволяют утверждать, что механизм наблюдаемой при этих температурах ДР связан с существованием в гетероструктурах $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ флуктуаций потенциала края энергетических зон в квантовых ямах. Эти флуктуации, скорее всего, обусловлены флуктуациями состава (концентраций атомов индия и галлия) в плоскости квантовых ям. Отметим, что энергия активации процесса релаксации, определенная из температурной зависимости τ_{av} , получается равной $E_a \approx 2.5$ мэВ. Это значение E_a по порядку величины совпадает с рассчитанной для исследованных гетероструктур амплитудой потенциального рельефа, вызываемого флуктуациями состава квантовых ям [8].

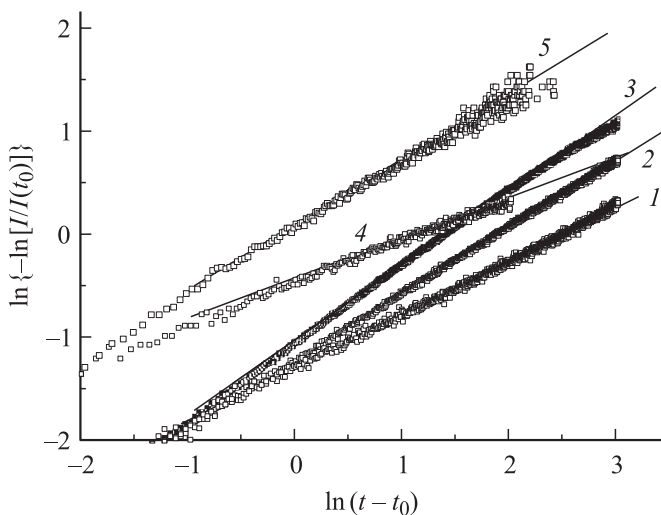


Рис. 3. Кривые релаксации фототока при $E = 70$ В/см и температурах $T = 10$ (1), 20 (2), 50 К (3), при $T = 10$ К и $E = 630$ (4), 1000 В/см (5).

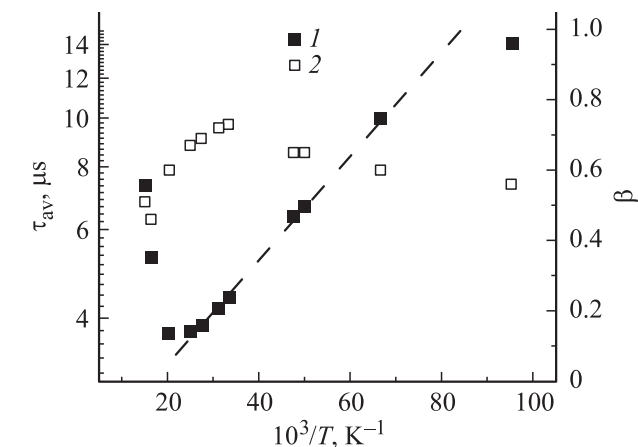


Рис. 4. Температурная зависимость характерного времени релаксации фотопроводимости τ_{av} (1, логарифмический масштаб) и параметра β (2). $E = 70$ В/см.

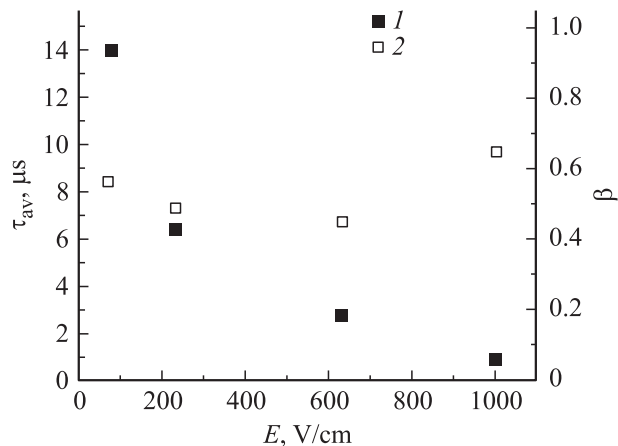


Рис. 5. Зависимость характерного времени релаксации фотопроводимости τ_{av} (1) и параметра β (2) от величины латерального электрического поля. $T = 10$ К.

Из рис. 5 видно сильное уменьшение времени релаксации фотопроводимости с ростом приложенного латерального электрического поля. Причиной этого, на наш взгляд, является изменение полем формы потенциального рельефа, которое облегчает преодоление носителями барьеров.

При температурах выше 40 К уменьшение времени релаксации τ_{av} с ростом T сменяется его быстрым ростом (рис. 4). Также становится зависящей от температуры величина параметра β (она уменьшается с ростом T). Это указывает на то, что при этих температурах имеет место другой, отличный от рассмотренного, механизм ДР фотопроводимости.

4. Заключение

В заключение отметим, что в исследованной гетероструктуре при отсутствии светового возбуждения существует разделение зарядов в виде избытка свободных электронов в широких квантовых ямах и такого же числа положительных ионов примесей в узких ямах, которое создает встроенное электрическое поле. Это поле стремится своим действием на возбуждаемые светом носители скомпенсировать разделение зарядов. Фотодырки увлекаются в ямы с избытком электронов, где и происходит их рекомбинация. Как следствие этого, величина встроенного поля уменьшается. Восстановление равновесного распределения носителей в ДКЯ и соответствующего ему встроенного электрического поля происходит за счет перехода части электронов из узких квантовых ям в широкие ямы.

Авторы выражают благодарность проф. О.Г. Сарбею за обсуждение результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и ФФИ Украины (совместный проект 10-02-00501а и 11-02-90454 Укр.ф._а. и Ф40.2/057).

Список литературы

- [1] Н.В. Байдусь, В.В. Вайнберг, Б.Н. Звонков, А.С. Пилипчук, В.Н. Порошин, О.Г. Сарбей. ФТП, **46**, 649 (2012).
- [2] F. Martelli, A. Polimeni, M. Gurioli, M. Colocci, A. Bosacchi, S. Franchi. Phys. Rev. B, **53**, 7421 (1996).
- [3] F.Y. Tsai, C.P. Lee, O. Voskoboynikov, H.H. Cheng, Jinxi Shen, Yasuo Oka. J. Appl. Phys., **89**, 7875 (2001).
- [4] L.C. Tsai, C.F. Huang, J.C. Fan, Y.H. Chang, Y.F. Chen, W.C. Tsai, C.Y. Chang. J. Appl. Phys., **84**, 877 (1998).
- [5] T.T. Chen, W.S. Su, Y.F. Chen, P.W. Liu, H.H. Lin. Appl. Phys. Lett., **85**, 1526 (2004).
- [6] А.А. Ронасси, А.К. Федотов. Вестн. БГУ, сер. 1, № 2, 8 (2010).
- [7] A.S. Dissanayake, J.Y. Lin, H.X. Jiang. Phys. Rev. B, **48**, 8145 (1993).
- [8] Н.В. Байдусь, С.В. Хазанова, В.Е. Дегтярев. Матер. совещ. „Нанофизика и наноэлектроника“ (Н.Новгород, Изд-во ИФМ РАН, 2011) т. 2, с. 531.
- [9] М.К. Шейнкман, А.Я. Шик. ФТП, **10**, 209 (1976).

Редактор Л.В. Шаронова

Long-term decay of photoconductivity in n -InGaAs/GaAs heterostructures with coupled quantum wells under band-to-band excitation

V.V. Vainberg⁺, V.M. Vasetskii⁺, Yu.N. Gudenko⁺,
V.N. Poroshin⁺, N.V. Baidus^{*}, B.N. Zvonkov^{*}

⁺ Institute of Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03680 Kyiv, Ukraine

^{*} Physico-Technical Research Institute
of Nizhny Novgorod State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The kinetics of photoconductivity in the n -In_xGa_{1-x}As/GaAs heterostructures with double coupled quantum wells and δ -doping in one of them has been investigated experimentally under the conditions of band-to-band excitation. It is shown that the long-term decay of photoconductivity observed in the range 10–70 K is caused by a chaotic potential formed by composition fluctuations in the quantum well layers.