

©1995 г.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ КОРОТКОПЕРИОДНОЙ СВЕРХРЕШЕТКЕ

*О.Э.Грешневикова, С.В.Иванов, П.С.Копьев,
В.Ю.Некрасов, В.Н.Трутин, И.Д.Ярошецкий*

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 19 декабря 1994 г. Принята к печати 21 декабря 1994 г.)

Исследована энергетическая релаксация неравновесных носителей заряда в короткопериодной полупроводниковой сверхрешетке. Путем обработки спектров поглощения исследуемых структур получена зависимость температуры электронно-дырочной плазмы от времени. Полученные результаты сопоставлены с данными по энергетической релаксации для структур с квантовыми ямами и объемного GaAs.

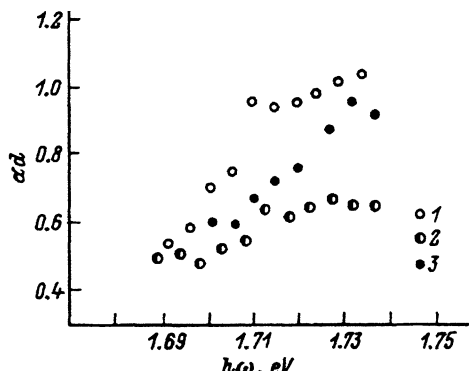
Настоящая работа посвящена исследованию энергетической релаксации неравновесных носителей заряда в короткопериодной полупроводниковой сверхрешетке $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, в которой реализуется блоховский транспорт носителей [1].

Исследованные структуры были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложке GaAs. Структура состояла из 100 двойных слоев $\text{GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с периодом $d_{QW} = 40 \text{ \AA}$, $x = 0.4$. Для проведения экспериментов подложка стравливалась методом селективного травления.

Эксперименты были выполнены с использованием пикосекундного лазера на YAG:Nd^{3+} по двухпучковой методике [1]. Образец возбуждался интенсивным импульсом света в области межзонных переходов, и исследовался спектр поглощения с помощью пробного импульса. Временная задержка пробного импульса относительно интенсивного импульса накачки позволяла исследовать эволюцию спектра поглощения сверхрешетки во времени.

На рис. 1 приведены спектральные зависимости оптической плотности сверхрешетки при различных временных задержках между пробным импульсом накачки. При возбуждении образца наблюдается падение коэффициента поглощения вблизи края поглощения сверхрешетки, т.е. просветление. Подробно это явление было описано в предыдущей

Рис. 1. Спектр оптической плотности полупроводниковой сверхрешетки GaAs/AlGaAs в отсутствие (1) и при возбуждении пикосекундными импульсами с различной задержкой между пробным импульсом и импульсом накачки t , пс: 2 — 0, 3 — 66. $T = 4.2$ К, интенсивность накачки 100 мВт/см^2 , энергия фотонов накачки 2.34 эВ .



работе [1]. Просветление обусловлено заполнением минизон неравновесными носителями. Временная зависимость изменения поглощения определяется процессами энергетической релаксации горячих носителей и их рекомбинацией.

Известно, что при достаточно высоких температурах носителей заряда ($T_c > 50 \text{ }^\circ\text{K}$) энергетическая релаксация в основном определяется эмиссией оптических фононов, а при низких температурах скорость энергетической релаксации меньше и определяется процессом взаимодействия носителей заряда с акустическими фононами. Так как время жизни носителей заряда в сверхрешетке имеет величину порядка 10^{-9} с [2], то в течение первых 100 пс изменение оптической плотности образца главным образом связано с охлаждением горячих носителей за счет взаимодействия с оптическими фононами.

Температура плазмы в сверхрешетке определялась путем обработки спектров поглощения (рис. 1). При этом были сделаны следующие предположения.

1. Плазма, содержащая электроны и дырки, характеризуется единой температурой. Считается [3], что температура электронов и дырок выравнивается за время меньше 10 пс.

2. Распределение неравновесных носителей — фермиевское с температурой T_c (которая в принципе может отличаться от температуры решетки T_a). Действительно, при концентрациях носителей $n > 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (в GaAs) за счет упругих межэлектронных столкновений за время порядка сотен фемтосекунд устанавливается фермиевское распределение носителей с температурой T_c [4], а так как наши измерения выполнены в пикосекундном масштабе времени, распределение носителей можно считать квазиравновесным — фермиевским.

Коэффициент поглощения α возбужденного образца связан с исходным α_0 соотношением

$$\alpha = \alpha_0(1 - f_e - f_h), \quad (1)$$

где f_e, f_h — функции распределения для электронов и дырок и

$$f_{e,h}(E) = [1 + \exp(E - F_{e,h}/kT_c)]^{-1}, \quad (2)$$

E — энергия электрона или дырки, $F_{e,h}$ — квазиуровень Ферми для электронов или дырок. Отметим, что соотношение (1) выполняется при условии $\hbar\omega > E_g + F_e + F_h$.

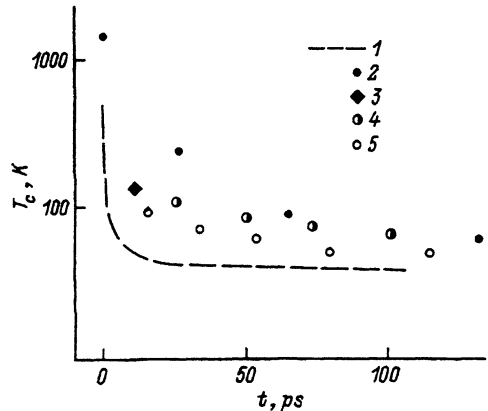


Рис. 2. Изменение температуры носителей T_c во времени. 1 — GaAs, низкий уровень возбуждения [8]; 2 — GaAs/AlGaAs, $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, данная работа; 3 — GaAs, $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [9]; 4 — GaAs/AlGaAs, $d_{QW} = 50 \text{ \AA}$, $n = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [6]; 5 — GaAs/AlGaAs, $d_{QW} = 25 \text{ \AA}$, $n = 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ [5].

С помощью ЭВМ проводилась подгонка расчетной кривой по формуле (1), при этом учитывалось, что T_c и $F_{e,h}$ связаны между собой соотношением, определяющим концентрацию электронов и дырок в минизонах, а также зависимость ширины запрещенной зоны от концентрации носителей. Таким образом была получена зависимость температуры плазмы от времени (рис. 2). Видно, что в начале скорость энергетической релаксации носителей максимальна и температура носителей заряда резко падает в течение первых десятков пикосекунд. Ниже уровня 100 К падение температуры носителей заряда замедляется, что характерно для процесса взаимодействия носителей с акустическими фононами. Представляет интерес сопоставить полученные результаты с данными, имеющимися в литературе для объемного полупроводника GaAs и структур с квантовыми ямами. Для сравнения на рис. 2 приведены зависимости изменения температуры неравновесных носителей от времени для объемного GaAs при низких и высоких уровнях возбуждения, а также для структур с квантовыми ямами. Из рис. 2 следует, что существует общая закономерность — уменьшение скорости энергетической релаксации носителей заряда при увеличении уровня возбуждения. Причиной этого замедления является экранирование электрон-фононного взаимодействия и розогрев оптических фононов. Оценки показали, что уменьшение скорости энергетической релаксации носителей заряда в основном обусловлено розогревом фононов. При этом происходит эффективный обратный процесс поглощения неравновесных фононов электронами.

Было проведено количественное сравнение с результатами, полученными в других работах по исследованию охлаждения электронно-дырочной плазмы в объемном GaAs и в различных низкоразмерных структурах на основе систем GaAs/GaAlAs [5-7]. Для этого мы воспользовались соотношением, определяющим скорость энергетической релаксации за счет взаимодействия электронов и дырок с оптическими фононами и нашли среднее время жизни оптического фонона. Из полученной зависимости температуры электронно-дырочной плазмы от времени мы оценили среднее время жизни оптического фонона: $\tau_0 \sim 5 \text{ пс}$. В работах [5-7] время жизни оптических фононов при таких же уровнях возбуждения составляет от 1 до 7 пс.

В заключение отметим, что полученные данные свидетельствуют об отсутствии существенных изменений в процессе релаксации энергии горячих носителей при высоком уровне возбуждения в короткопериодной сверхрешетке по сравнению с аналогичным процессом в квантовых ямах и в объемном материале. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (контракт № 94-02-05903-а).

Список литературы

- [1] С.В. Иванов, П.С. Копьев, В.Ю. Некрасов, А.Г. Пахомов, В.Н. Трухин, И.Д. Ярошецкий. ФТП, **23**, 1564 (1989).
- [2] С.В. Иванов, П.С. Копьев, В.Ю. Некрасов, А.Г. Пахомов, В.Н. Трухин, И.Д. Ярошецкий. В сб.: *Тез. докл. XII Всес. конф. по физике полупроводников* (Киев, 1990) ч. 2. С. 10.
- [3] H. Polland, W. Ruhle, J. Kuhl, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **35**, 8273 (1987).
- [4] St.M. Goodnick, P. Lugli. *Phys. Rev. B*, **38**, 10135 (1988).
- [5] J. Ryan, R.A. Taylor, A.J. Turberfield, J.M. Werlock. *Surf. Sci.*, **170**, 511 (1986).
- [6] R.W.J. Hollering, T.T.J.M. Berendschot, H.J.A. Blyssen, P. Wyder, M.R. Leys, J. Wolter. *Sol. St. Commun.*, **57**, 527 (1986).
- [7] C.V. Shank, R.L. Forle, R. Yen, J. Shan. *Sol. St. Commun.*, **47**, 981 (1983).
- [8] *Semicond. Probe by Ultrafast Laser Spectr.*, ed. by Alfano (Acad. Press, 45, Inc., 1984).
- [9] R.F. Leheny, Jagodeep Shah, R.L. Fork, C.V. Shank, A. Migus. *Sol. St. Commun.*, **31**, 809 (1979).

Редактор Л.В. Шаронова

Energy relaxation of hot carriers in a short-period semiconductor superlattice

O.E.Greshnevikova, S.V.Ivanov, P.S.Kop'ev, V.Yu.Nekrasov, V.N.Trukhin, I.D.Yaroshetski

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