

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ И ТРАНСПОРТ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК В КОРОТКОПЕРИОДИЧНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СВЕРХРЕШЕТКАХ

Иванов С. В., Копьев П. С., Некрасов В. Ю., Пахомов А. Г.,
Трухин В. Н., Ярошецкий И. Д.

Обнаружено нелинейное поглощение в полупроводниковой сверхрешетке GaAs—Al_xGa_{1-x}As. Исследование временной эволюции нелинейного поглощения позволило наблюдать релаксацию горячих носителей заряда и их транспорт в сверхрешетке.

В настоящей работе сообщается об обнаружении нелинейного поглощения в полупроводниковой сверхрешетке GaAs—Al_xGa_{1-x}As. Исследование временной эволюции нелинейного поглощения позволило наблюдать релаксацию горячих носителей заряда и их транспорт в сверхрешетке. Перпендикулярный транспорт в полупроводниковых сверхрешетках исследовался с помощью изучения кинетики фотолюминесценции в [1].

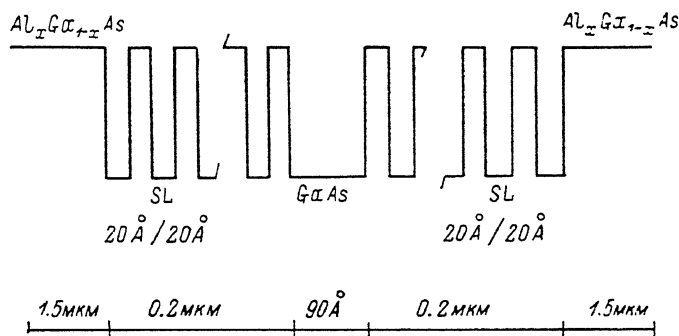


Рис. 1. Энергетическая диаграмма исследуемой структуры GaAs—Al_xGa_{1-x}As.

Исследованная структура, выращенная методом молекулярно-лучевой эпитаксии, состояла из 100 двойных слоев GaAs и Al_xGa_{1-x}As ($x \approx 0.4$) с периодом $d = 40 \text{ \AA}$ и квантовой ямы с шириной $d_{\text{GaAs}} = 90 \text{ \AA}$, расположенной в середине сверхрешетки (рис. 1).

Методика эксперимента заключалась в следующем. Образец возбуждался интенсивным импульсом света длительностью 25 пс с $\hbar\omega = 2.34 \text{ эВ}$, исследовался спектр поглощения сверхрешетки вблизи края поглощения первой мини-зоны с помощью пробного импульса, причем временная задержка пробного импульса света относительно интенсивного импульса накачки позволяла изучать эволюцию спектра поглощения во времени.

В качестве источника излучения служил YAG : Nd³⁺-лазер, работающий в режиме синхронизации мод. После усиления световой импульс расщеплялся на два: первый, преобразованный в кристалле KDP в импульс света с удвоенной частотой ($\hbar\omega_H = 2.34 \text{ эВ}$), служил источником возбуждения, второй преобразовывался в световой импульс с широким спектральным распределением

при прохождении кюветы с тяжелой водой. Временная задержка между пробным импульсом света и импульсом накачки осуществлялась изменением длины пути импульса накачки. Нулевая задержка определялась с помощью измерения корреляционной функции импульса накачки и пробного импульса посредством *ap*-конверсии в кристалле KDP. Спектральное распределение пробного импульса, прошедшего через образец, исследовалось с помощью двойного монохроматора ДФС-12.

На рис. 2 представлены спектральные зависимости оптической плотности исследуемого образца при возбуждении светом с $\hbar\omega = 2.34$ эВ. На кривой *a* отчетливо видна ступенька, которая обусловлена поглощением света при оптических переходах между первыми мини-зонами. При возбуждении образца

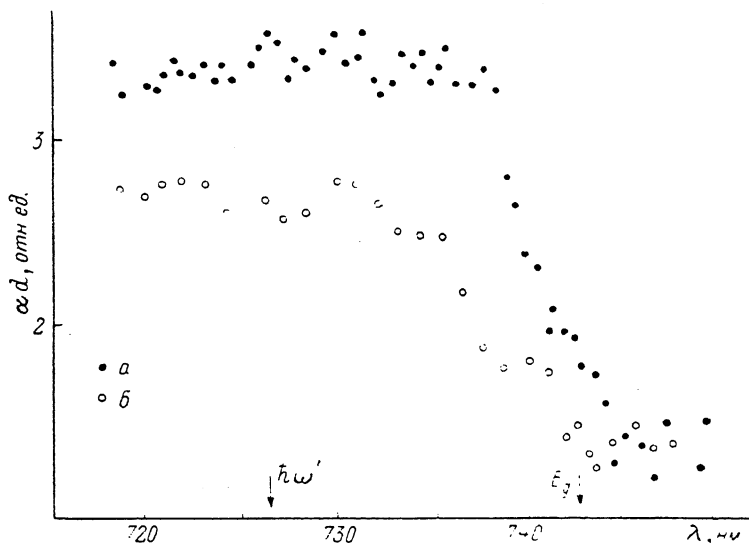


Рис. 2. Спектральная зависимость оптической плотности сверхрешетки GaAs—Al_xGa_{1-x}As при возбуждении светом с $\hbar\omega = 2.34$ эВ.

$T = 4.2$ К. I , МВт/см²: *a* — 0. *б* — 100.

наблюдается эффект просветления (рис. 2, б). Кинетика просветления и восстановления поглощения представлена на рис. 3 при различных энергиях кванта света пробного импульса. Наблюдаются смещение фронта нарастания просветления и его максимального значения в сторону больших времен задержки и увеличение длительности спада просветления с уменьшением энергии кванта зондирующего импульса, причем на кривой *в*, кроме быстрого спада, наблюдается и долговременная кинетика просветления образца, имеющая малую амплитуду. Следует отметить, что временная динамика пропускания пробного импульса света при энергии кванта выше характерной величины $\hbar\omega'$ совпадает с поведением кривой *a* (рис. 3).

Для объяснения полученных результатов рассмотрим вопрос о возникновении свободных носителей в сверхрешетке. Естественно было бы связать их появление с процессом захвата из буферной области Al_xGa_{1-x}As, так как буферный слой имеет толщину 1.5 мкм и при коэффициенте поглощения света с $\hbar\omega = 2.34$ эВ $\approx 10^4$ см⁻¹ свет должен полностью поглощаться в этом слое. Однако можно показать, что при интенсивности света $I \approx 100$ МВт/см² пропускание в буферной области значительно возрастает за счет заполнения состояний в зонах. Основным доказательством возникновения электронно-дырочных пар в сверхрешетке в основном путем их непосредственного возбуждения в ней является быстрое появление просветления сверхрешетки в области края поглощения (рис. 3), так как при захвате носителей из буферной области должна наблюдаться существенная задержка появления изменений в спектре поглощения за счет диффузии носителей в буферном слое [2].¹

¹ Так как буферные слои легированы, диффузия носителей в них подавлена.

В дальнейшем горячие носители охлаждаются в процессе взаимодействия с кристаллической решеткой. Очевидно, что уменьшение поглощения света в сверхрешетке в области края поглощения связано с заполнением первых мини-зон горячими носителями. Так как концентрация носителей велика, фермиевское распределение носителей устанавливается быстро (за время < 1 пс [3]). Временная эволюция просветления исследуемой структуры (рис. 3) обусловлена процессами энергетической релаксации носителей, диффузией с последующим захватом в яму и их рекомбинацией.

Заметим, что динамика просветления при энергии зондирующего света $\hbar\omega > \hbar\omega'$ (при которой энергия электронов в мини-зоне больше энергии оптического фонона $\hbar\omega_0$) полностью определяется процессом энергетической релаксации горячих носителей при взаимодействии с оптическими фононами. Максимальное значение просветления образца достигается при $t \approx 40$ пс, а последующий спад характеризуется временем ≈ 20 пс (рис. 3, а),² что свидетель-

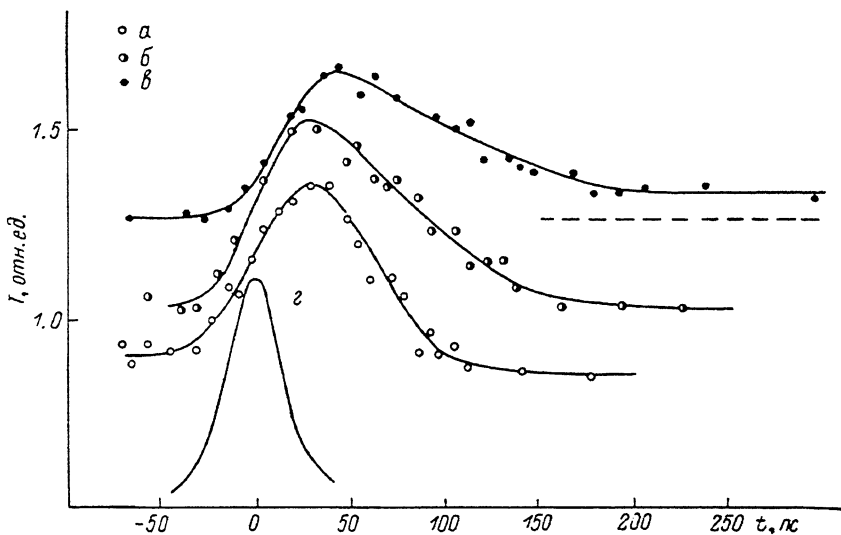


Рис. 3. Временная зависимость изменения пропускания сверхрешетки.

$\hbar\omega$, эВ: а — 1.735, б — 1.706, в — 1.688, $I_{\text{нжк}} = 100$ МВт/см²; г — корреляционная функция.

ствует о замедлении процесса охлаждения носителей при их взаимодействии с оптическими фононами по сравнению с темпом релаксации при низком уровне неравновесной концентрации носителей в GaAs. Полученное время релаксации ≈ 20 пс совпадает с результатами работ [4, 5], выполненных на GaAs и структурах с квантовыми ямами. Соответственно при $\hbar\omega < \hbar\omega'$ ход кривой будет определяться релаксацией носителей на акустических фононах, рекомбинацией и захватом их в квантовую яму. Так как первых два процесса имеют времена порядка 1 пс [6], быстрый спад просветления (рис. 3, в) ≈ 90 пс можно объяснить диффузией носителей в сверхрешетке и захватом их в квантовую яму. Диффузия носителей в сверхрешетке при реализованных в эксперименте уровнях возбуждения является амбиполярной, так как концентрация неравновесных носителей велика. В силу неравенства $m_e \ll m_h$ транспорт неравновесных носителей будет определяться тяжелыми дырками. Можно показать, что уменьшение концентрации носителей в сверхрешетке будет определяться экспонентой $\exp(-\pi^2 D_a t / 4L^2)$, где L — длина сверхрешетки, D_a — коэффициент амбиполярной диффузии. С учетом этого оценка D_a по экспериментальным данным дает величину ≈ 2 см²/с, т. е. коэффициент диффузии для тяжелых дырок ≈ 1 см²/с. Для оценки длины свободного пробега тяжелых дырок l воспользуемся соотношением, связывающим μ и τ [1],

² Время спада пропускания (рис. 3) определялось с учетом длительности импульса света.

$$\mu = \frac{e}{\hbar^2} d^2 \Delta \tau, \quad (1)$$

где τ — время релаксации носителей заряда по импульсу, $2\Delta = 23$ мэВ — ширина мини-зоны тяжелых дырок [7].

Используя найденную величину D_h , можно получить $l \simeq 130 \text{ \AA}$, что больше периода сверхрешетки. Это говорит о блоховском транспорте свободных носителей заряда в исследуемой сверхрешетке.

В заключение авторы выражают благодарность Н. Д. Ильинской за помощь в подготовке образцов.

Список литературы

- [1] Deveaud B., Shah J., Damen T. C., Lambert B., Chomette A., Regreny A. // IEEE Quant. Electron. 1988. V. QE-24. P. 1641—1651.
- [2] Miyoshi T., Yoshuobu A. // Japan. J. Appl. Phys. 1985. V. 24. N 1. P. L53—L55.
- [3] Knox W. H., Hirlimann C. B., Miller D. A., Shah J., Chemla D. S., Shank C. V. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 53. P. 1191—1193.
- [4] Shah J. // J. de Phys. 1981. V. C7. P. 445.
- [5] Shank C. V., Fork R. L., Yen R., Shah J., Greene B. I., Gossard A. C., Weisbuch C. // Sol. St. Commun. 1983. V. 47. P. 981—983.
- [6] Deveaud B., Chomette A., Lambert B., Regreny A. // Sol. St. Commun. 1986. V. 57. P. 885—889.
- [7] Deveaud B., Shah J., Damen T. C. // Phys. Rev. Lett. 1987. V. 58. P. 2582—2585.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
АН СССР
Ленинград

Получена 3.04.1989
Принята к печати 13.04.1989