

УДК 621.315

© 1991

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ДИФфуЗИОННОЙ ДЛИНЫ И СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЯХ p -GaAs

Р. И. Джиоев, К. В. Кавокин

Выполнен комплекс измерений кинетических параметров неравновесных электронов в слоях p -GaAs с использованием высокочастотной модуляции поляризации и интенсивности люминесценции фотоупругим кварцевым модулятором. При этом параметры, характеризующие пространственное распределение электронов в слое, определялись по зависимости отношения интенсивностей люминесценции в геометрии «на просвет» и «на отражение» от длины волны, а временные характеристики рекомбинации на поверхности и в объеме кристалла — по поляризации люминесценции в условиях оптической ориентации электронных спинов.

Диффузия и поверхностная рекомбинация неравновесных электронов широко исследуются по затуханию люминесценции при возбуждении узкими световыми импульсами [1, 2]. В нашей работе проведены измерения в стационарных условиях с использованием высокочастотной (26.6 кГц) модуляции поляризации и интенсивности люминесценции.

Исследовались «инверсные» структуры GaAs—Al_{0.6}Ga_{0.4}As—стекло [3]. Гетероструктура, выращенная методом жидкостной эпитаксии, легировалась Ge ($p=3\div 5\cdot 10^{18}$ см⁻³). Измерения проводились на образцах, полученных из одной структуры стравливанием слоя GaAs до толщины $d=5$ и 2.5 мкм. Все измерения выполнялись при комнатной температуре.

Параметры, характеризующие пространственное распределение электронов в слое GaAs, определялись по зависимости отношения интенсивностей люминесценции в геометрии «на просвет» и «на отражение» $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ от длины волны. Этот метод [4] основан на эффекте самопоглощения люминесценции. Как известно, в GaAs и других прямозонных полупроводниках коэффициент поглощения α может меняться на 3—4 порядка в пределах полосы краевой люминесценции и достигать на ее коротковолновом краю величин 10^4 см⁻¹ и более [4, 5]. Излучение, испускаемое при рекомбинации электронов в глубине слоя, выходит через обе его поверхности ослабленным самопоглощением. При стационарном возбуждении вблизи одной из поверхностей неоднородное пространственное распределение электронов, устанавливающееся в результате диффузии и рекомбинации, приводит к тому, что люминесценция «на просвет» проходит в поглощающей среде в среднем больший путь, чем люминесценция «на отражение». Величина $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$, близкая к единице в длинноволновой области спектра, где коэффициент поглощения мал, падает по мере роста α с уменьшением длины волны люминесценции λ . Таким образом, зависимость $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}(\lambda)$ содержит информацию о пространственном распределении неравновесных электронов в кристалле, которую можно извлечь, сравнивая измеренные значения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}(\lambda)$ с рассчитанными. При этом наибольшая чувствительность достигается, когда толщина слоя порядка диффузионной длины электронов.

Аналитически зависимость $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}(\lambda)$ выражается как

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{отр}}} = \frac{\int_0^d n(x) e^{-\alpha(\lambda)(d-x)} dx}{\int_0^d n(x) e^{-\alpha(\lambda)x} dx}, \quad (1)$$

где n — концентрация электронов, x — пространственная координата вдоль нормали к поверхности кристалла, d — толщина слоя.

Чтобы найти $n(x)$, необходимо решить уравнение диффузии для неравновесных электронов в соответствующих граничных условиях

$$\begin{aligned} Dn''(x) - \frac{n(x)}{\tau} &= 0, \\ Dn'(0) &= -I + S_0 n(0), \\ Dn'(d) &= -S_d n(d), \end{aligned} \quad (2)$$

где D — коэффициент диффузии, τ — время жизни, I — интенсивность накачки, S_0 и S_d — скорости рекомбинации на двух поверхностях слоя.

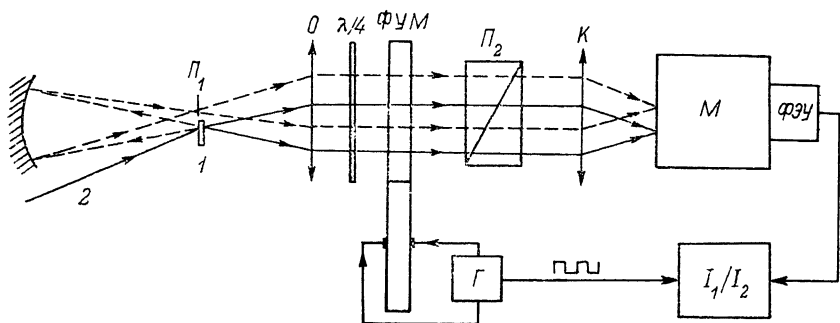


Рис. 1. Схема установки для измерения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$.

Штриховыми линиями изображен ход лучей люминесценции «на отражение». 1 — образец, 2 — возбуждающий луч.

Выписывая (2), мы учли, что ширина пучка возбуждающего света много больше, а глубина его проникновения в кристалл — много меньше толщины слоя и диффузионной длины электронов. Подставляя решение уравнения (2) в (1), получаем

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{отр}}} = e^{-\alpha d} \frac{(1 - \zeta)(e^{\alpha d} - e^{-d/L})/(1 + \alpha L) - (1 + \zeta)(e^{\alpha d} - e^{d/L})/(1 - \alpha L)}{(1 - \zeta)(e^{-\alpha d} - e^{-d/L})/(1 - \alpha L) - (1 + \zeta)(e^{-\alpha d} - e^{d/L})/(1 + \alpha L)}, \quad (3)$$

где $L = \sqrt{D\tau}$ — диффузионная длина электронов; $\zeta = S_d \tau / L$ — безразмерный параметр, характеризующий относительный вклад поверхностной рекомбинации. В дальнейшем этот параметр, относящийся к свободной поверхности GaAs, будем обозначать ζ_s , а относящийся к гетерогранице — ζ_i .

Оптическая схема установки для измерения $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ изображена на рис. 1. Образец 1 возбуждается лучом He—Ne лазера ($\lambda = 632.8$ нм). С помощью сферического вогнутого зеркала, установленного на двойном фокусном расстоянии от образца, люминесценция («на отражение») фокусируется над образцом и проходит через поляризатор П1. Люминесценция, выходящая с другой стороны образца («на просвет»), остается неполяризованной. Оба расходящихся пучка люминесценции преобразуются объективом О в параллельные. С помощью фазовой пластинки $\lambda/4$ пучок линейно-поляризованной люминесценции превращается в циркулярно-поляризо-

ванных. Четвертьволновые фазовые пластинки на диапазон сканирования спектра подбирались из слюды разной толщины. Далее оба пучка проходят через фотоупругий модулятор поляризации (ФУМ) — прямоугольный параллелепипед из плавленого кварца, испытывающий одноосную деформацию на частоте механического резонанса (работа ФУМ подробно описана в [6]). Амплитуда переменного фазового сдвига, создаваемого ФУМ для взаимно перпендикулярных линейно поляризованных компонент, подбиралась равной 105° [6] для длины волны, на которой производились измерения. После прохождения пучков через широкоапертурный линейный поляризатор P_2 с осью пропускания, ориентированной под углом 45° к оси деформации ФУМ, люминесценция «на отражение» оказывается модулированной по интенсивности на частоте механического резонанса ФУМ

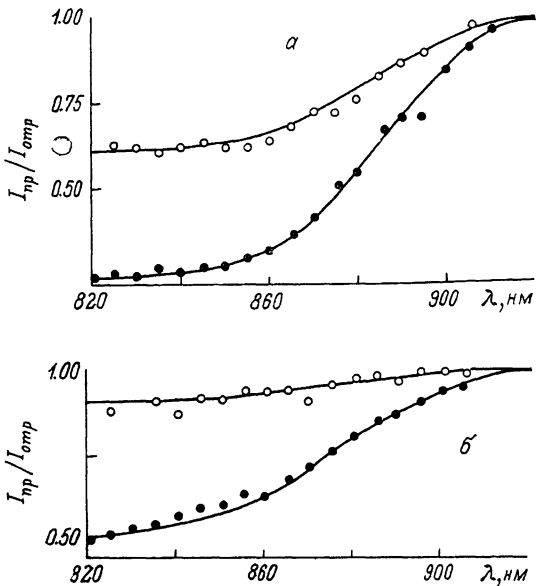


Рис. 2. Зависимость $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ от длины волны люминесценции λ для образцов с толщиной слоя GaAs $d=5$ (а) и 2.5 мкм (б).

(26.6 кГц), в то время как интенсивность неполяризованной люминесценции («на просвет») остается постоянной. Конденсор K фокусирует оба пучка люминесценции на входную щель монохроматора M . Регистрация прошедшего через монохроматор света осуществляется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) в режиме счета фотонов. Счетные импульсы с ФЭУ поступают на схему измерения отношения интенсивностей, аналогичную схеме измерения циркулярной поляризации, описанной в [7]. От опорной частоты с генератора G раскачки ФУМ вырабатываются строб-импульсы одинаковой длительности, поочередно открывающие два отдельных канала счета. За время экспозиции, необходимое для достижения заданной точности, в первом канале накапливается число импульсов N_1 , пропорциональное $I_{\text{пр}} + I_{\text{отр}}$, а во втором канале — N_2 , пропорциональное $I_{\text{пр}}$. При этом

$$\frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{отр}}} = \left(\frac{N_1}{N_2} - 1 \right)^{-1}.$$

В измеренную величину $I_{\text{пр}}/I_{\text{отр}}$ вводится поправка, учитывающая глубину модуляции интенсивности поляризованного пучка света.

Аналогичная оптическая схема была использована для измерения отношения интенсивностей двух пучков света, прошедших через два образца с разной толщиной слоя GaAs (5 и 2.5 мкм), т. е. для определения коэффициента поглощения $\alpha(\lambda)$.

На рис. 2 приведены результаты измерения $I_{пр}/I_{отр}$ (темные точки — при возбуждении через твердый раствор, светлые — при возбуждении со стороны свободной поверхности GaAs). Сплошные кривые рассчитаны по формуле (3). При расчете использованы значения коэффициента поглощения, измеренные на этих образцах. Хорошее согласие экспериментальных и расчетных зависимостей достигается при $L=4$ мкм, $\zeta_f = S_f/\tau = 4$, $\zeta_i < 0.1$.

Для определения времени жизни фотовозбужденных электронов были проведены эксперименты по измерению степени циркулярной поляризации рекомбинационного излучения с участием оптически ориентированных электронов в поперечном магнитном поле (эффект Ханле) [8]. Люминесценция возбуждалась со стороны гетерограницы циркулярно-поляризованным светом с энергией квантов $E_{kv} = 1.65$ эВ ($\lambda = 752.5$ нм). Чтобы уменьшить влияние рекомбинации на второй, свободной от AlGaAs поверхности, измерения выполнялись на исходной структуре с толщиной слоя GaAs $d=8$ мкм. Получено значение времени жизни $\tau = 3 \cdot 10^{-9}$ с.

По известным значениям L , τ и ζ_f можно вычислить коэффициент диффузии $D = L^2/\tau = 53$ см²/с и скорость рекомбинации на свободной поверхности $S_f = L\zeta_f/\tau = 5.3 \cdot 10^5$ см/с. Для скорости рекомбинации на гетерогранице можно получить оценку $S_i < 10^4$ см/с. Учет переизлучения может внести поправки в значения τ и D , однако это требует измерения квантового выхода люминесценции [9].

Следует отметить, что важные параметры слоев арсенида галлия, такие как коэффициент поглощения, время жизни фотовозбужденных электронов, их диффузная длина и скорость поверхностной рекомбинации, были измерены оптически в стационарном режиме одними и теми же техническими средствами (с использованием модуляции поляризации света). Определенные нами значения параметров согласуются с данными других авторов [10, 11].

Авторы благодарны В. Г. Флейшеру, стимулировавшему данную работу.

Список литературы

- [1] Hooft G. W., van Opdorp C. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 3. P. 1065—1070.
- [2] Nelson R. J. // J. Vac. Sci. Technol. 1978. V. 15. N 4. P. 1475—1477.
- [3] Antipas G. A., Edgecumbe J. // Appl. Phys. Letters. 1975. V. 26. N 7. P. 371—372.
- [4] Sell D. D., Casey H. C., Jr. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 2. P. 800—807.
- [5] Casey H. C., Jr., Sell D. D., Wecht K. W. // J. Appl. Phys. 1975. V. 46. N 1. P. 250—257.
- [6] Jasperson S. N., Shnaterly S. E. // Rev. Sci. Instr. 1969. V. 40. P. 761—767.
- [7] Кульков В. Д., Калевич В. К. // ПТЭ. 1980. № 5. С. 196—198.
- [8] Оптическая ориентация. Современные проблемы науки о конденсированных средах / Под ред. Б. П. Захарченя, Ф. Майера. Л.: Наука, 1989.
- [9] Toshihide Kuriyama, Takeshi Kamiya, Hisayoshi Yanai // Jap. J. Appl. Phys. 1977. V. 15. N 3. P. 465—477.
- [10] Andre J. P., Guittard P., Hallais J., Piaget C. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 55. N 2. P. 235—245.
- [11] Wicht D. R., Oliver P. E., Prentice T., Steward V. W. // J. Cryst. Growth. 1981. V. 55. N 2. P. 183—191.

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

Поступило в Редакцию
30 апреля 1991 г.