

Влияние диаметра фотовозбуждаемой области на пикосекундную релаксацию просветления тонкого слоя GaAs

© И.Л. Броневой, А.Н. Кривоносов

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук, 103907 Москва, Россия

(Получена 1 октября 1997 г. Принята к печати 10 октября 1997 г.)

Экспериментально обнаружено, что релаксация просветления GaAs, которое возникает при фотогенерации носителей заряда мощным пикосекундным импульсом света, замедляется при увеличении диаметра луча F . Релаксация просветления вызвана уменьшением концентрации носителей из-за рекомбинационной суперлюминесценции в GaAs. Получается, что при увеличении диаметра F скорость суперлюминесценции рекомбинации замедляется, хотя интенсивность суперлюминесцентного излучения должна возрастать. Это кажущееся противоречие объясняется с помощью теории.

Исследована релаксация просветления тонкого слоя GaAs. Просветление (увеличение прозрачности) возникло при фотогенерации электронно-дырочной плазмы (ЭДП) мощным импульсом света длительностью 14 пс. Просветление отображает изменение суммы заселенностей неравновесными носителями заряда энергетических уровней в валентной зоне и зоне проводимости, связанных прямыми оптическими переходами [1]. Опыты проводились при комнатной температуре T_R . Концентрация фотогенерируемой ЭДП была достаточной, чтобы возникла рекомбинационная суперлюминесценция. В работе [1] нами установлено, что когда фотогенерация ЭДП прекращается, то суперлюминесцентная рекомбинация за времена пикосекундного диапазона обеспечивает релаксацию концентрации ЭДП (соответственно, и просветления) до некоторого остаточного уровня. Согласно [1], когда остаточный уровень достигается, температура ЭДП T_c становится приблизительно равной комнатной T_R , суперлюминесценция затухает, и далее релаксация концентрации ЭДП и просветления происходит существенно медленнее, с характерным временем, сравнимым со временем спонтанной рекомбинации в GaAs ~ 1 нс.

При увеличении диаметра F фотовозбуждаемой области слоя GaAs должна возрастать интенсивность суперлюминесценции излучения, и можно было бы ожидать, что возрастет и скорость суперлюминесцентной рекомбинации носителей. Это ускорило бы "пикосекундную" релаксацию просветления до остаточного уровня. Однако в данной работе экспериментально обнаружено обратное — "пикосекундная" релаксация просветления до остаточного уровня замедлялась при увеличении диаметра F возбуждающего луча. Этот факт качественно объясняется с помощью теории [2].

Образец представлял собой гетероструктуру $Al_{0.22}Ga_{0.78}As-GaAs-Al_{0.4}Ga_{0.6}As$, с толщинами слоев 1.3–1.5–1.2 мкм и концентрацией примесей $< 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Ширина кривой дифракционного отражения рентгеновского луча, характеризующая степень дефектности кристаллической решетки GaAs, составляла 29 угл.с. Слои $Al_xGa_{1-x}As$ были прозрачными

для использовавшегося света. Просветление исследовалось по методике "excite-probe", как в [1]. Длительность возбуждающего (ex) и зондирующего (p) импульсов — 14 пс. Изменение интенсивности света по сечению возбуждающего и зондирующего лучей было приблизительно гауссовым. Зондирующий луч проходил через центральную часть фотовозбуждаемой области образца. Характеризующее просветление отношение $\lg(T^1/T^0)$ (T — прозрачность образца, индексы 1 и 0 означают соответственно наличие и отсутствие возбуждения) и средняя (по сечению луча) плотность энергии возбуждающего импульса D_{ex} рассчитывались по результатам измерений интегральных по времени энергий зондирующего и возбуждающего импульсов и диаметра возбуждающего луча F (на полувысоте распределения интенсивности). Спектры излучения (интегральные по времени), возникавшего при фотовозбуждении образца, измерялись как в [3].

На рис. 1 представлено изменение просветления со временем при плотности энергии импульса $D_{ex} = 56 D_{ex}^*$

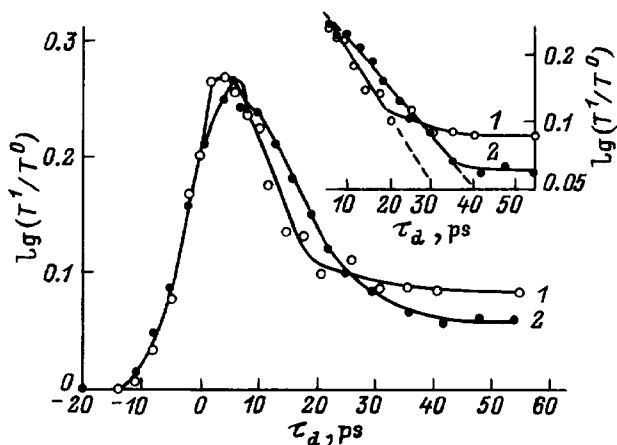


Рис. 1. Изменение просветления GaAs со временем задержки τ_d между возбуждающим и зондирующим импульсами при $\hbar\omega_{ex} = 1.485 \text{ эВ}$, $\hbar\omega_p = 1.568 \text{ эВ}$: 1 — $F = 0.2 \text{ мм}$, $f = 0.1 \text{ мм}$; 2 — $F = 0.7 \text{ мм}$, $f = 0.35 \text{ мм}$. На вставке — спад просветления в полулогарифмическом масштабе. Из кривых определено: $\tau_r = 19 \text{ пс}$ при $F = 0.7 \text{ мм}$; $\tau_r = 15 \text{ пс}$ при $F = 0.2 \text{ мм}$

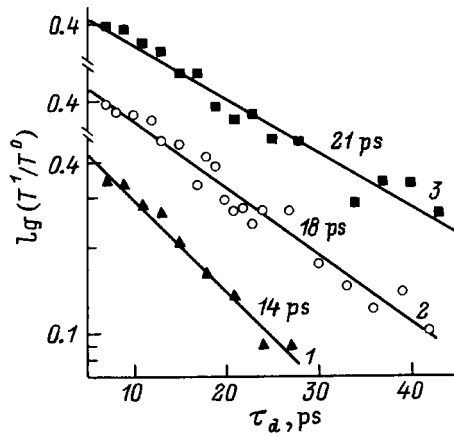


Рис. 2. Спад просветления GaAs со временем задержки τ_d между возбуждающим и зондирующим импульсами (в полулогарифмическом масштабе) при $f = 0.17$ мм, $\hbar\omega_{ex} = 1.513$ эВ, $\hbar\omega_p = 1.568$ эВ. F , мм 1 — 0.24, 2 — 0.35, 3 — 1.1. Указаны значения τ_r .

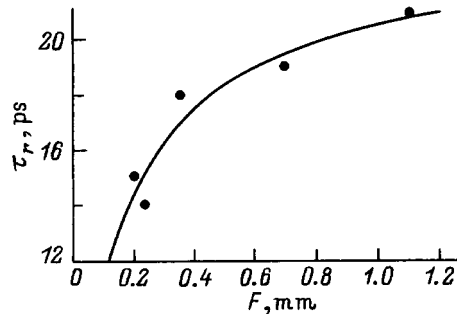


Рис. 3. Экспериментальная зависимость характерного времени релаксации τ_r от диаметра возбуждающего луча F при $\hbar\omega_p = 1.568$ эВ (точки). Сплошная линия — теоретическая зависимость $\tau_r = (2/3)(A + B\tau_p T_c^{1/2} E_g) \tau_h$; параметры A и B , подобранные для наилучшей аппроксимации экспериментальных данных, приведены в тексте.

(D_{ex}^* — нормировочная величина) и фиксированном отношении диаметров возбуждающего (F) и зондирующего (f) лучей, равном 2. При большем диаметре возбуждающего луча $F = 0.7$ мм просветление спадало со временем медленнее и достигало уровня остаточного просветления на ~ 15 пс позднее, чем при $F = 0.2$ мм. Остаточное просветление при диаметре $F = 0.7$ мм было меньше, чем при $F = 0.2$ мм. По спаду просветления мы определили характерное время τ_r "пикосекундной" релаксации просветления до остаточного уровня (см. вставку к рис. 1). На рис. 2 представлен спад просветления, измеренного уже при фиксированном диаметре f зондирующего луча. В обоих опытах по измерению релаксации просветления (рис. 1, 2) время τ_r возрастало при увеличении диаметра F по одному и тому же закону (см. рис. 3).

В работе [1] было экспериментально показано, что когда остаточное просветление достигается при диаметре

$F = 0.7$ мм, то соответствующее остаточному просветлению энергетическое распределение ЭДП при $T_c \simeq T_R$ можно приблизительно характеризовать условиями

$$n = p, \quad \mu_e = \mu_h \simeq E_g, \quad (1)$$

Здесь n и p — соответственно концентрации электронов и дырок, μ_e и μ_h — квазиуровни Ферми электронов и дырок, E_g — ширина запрещенной зоны. Условию (1) соответствует максимальная концентрация ЭДП, при которой еще нет инверсии заселенностей. В настоящей работе остаточное просветление уменьшалось при увеличении диаметра F (см. рис. 1). По-видимому, при малых диаметрах F суперлюминесценция затухает, и устанавливается остаточное просветление, когда некоторая инверсия еще сохраняется. Тот факт, что при разных диаметрах F суперлюминесценция заканчивается при разных уровнях остаточного просветления, подтвердили измерения зависимости просветления от времени (см. рис. 4) и излучения из образца при плотности энергии $D_{ex} = 12 D_{ex}^*$. Для диаметра $F = 0.2$ мм максимальное и остаточное просветление отличались незначительно. Ширина спектра излучения $\Delta(\hbar\omega)$ равнялась при этом 62 мэВ, что соответствует спонтанному излучению (см. [4]), т. е. суперлюминесценция при этом диаметре не разгоралась. Для диаметра $F = 0.7$ мм наблюдалась "пикосекундная" релаксация просветления до остаточного уровня, который лежал ниже, чем при $F = 0.2$ мм. При $F = 0.7$ мм ширина спектра излучения $\Delta(\hbar\omega) = 28$ мэВ. Более узкий спектр излучения при $F = 0.7$ мм подтверждал, что разгоралась суперлюминесценция [5]. Подчеркнем, что, хотя остаточное просветление и увеличивалось при уменьшении диаметра луча F (поскольку суперлюминесценция, по-видимому, затухала при более высокой концентрации ЭДП), для фиксированного F остаточное просветление практически не изменялось при изменении плотности энергии возбуждения D_{ex} (как наблюдалось нами и ранее [6,7]).

Обсудим "пикосекундную" релаксацию просветления. Поскольку энергия возбуждающего фотона $\hbar\omega_{ex}$ ненамного превышает E_g , то и температура фотовозбуждаемой ЭДП должна несильно превышать температуру решетки (например, в работе [2] при $\hbar\omega_{ex} = 1.52$ эВ

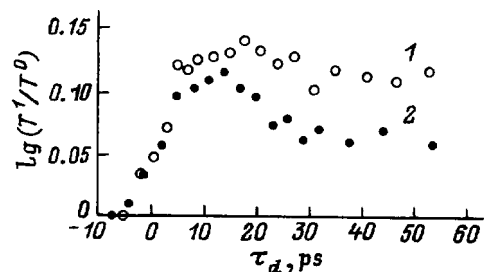


Рис. 4. Изменение просветления GaAs со временем задержки τ_d между возбуждающим и зондирующим импульсами при $\hbar\omega_{ex} = 1.485$ эВ, $\hbar\omega_p = 1.568$ эВ. F , мм: 1 — 0.2, 2 — 0.7.

температура ЭДП не превышала 470 К). В этом случае наблюдаемое изменение просветления отображает преимущественно изменение концентрации ЭДП (это подтверждают экспериментальные спектры просветления при разных температурах и концентрациях ЭДП [8], а также расчетные спектры, иллюстрирующие влияние изменения температуры и изменения концентрации ЭДП на просветление по отдельности [7]). Спад концентрации фотогенерированной ЭДП начинается через несколько пикосекунд после того, как интенсивность возбуждающего света прошла через максимум, когда началось охлаждение ЭДП [8]. При охлаждении происходит переход носителей заряда с более высоких на более низкие энергетические уровни, поддерживающий инверсию заселенностей. Возникающая за пикосекундные времена рекомбинационная суперлюминесценция [9,10] не дает существенно возражать полосе инверсии [1,11] и уменьшает концентрацию ЭДП по мере остывания ЭДП. Если пренебречь той малой долей концентрации ЭДП, при вычитании которой исчезает инверсия населенностей, то энергетическое распределение ЭДП во время остывания можно характеризовать условиями (1). Нетрудно установить, что в этом приближении концентрация ЭДП n должна изменяться с температурой пропорционально $T_c^{3/2}$, что подтверждают определенные из эксперимента значения n и T_c в работе [8]. Отметим, что наличие рекомбинационной суперлюминесценции приводит к дополнительному разогреву ЭДП (см. [2,12,13]). Этот разогрев должен замедлять охлаждение ЭДП по сравнению со случаем, когда суперлюминесценция отсутствует. Характерное время охлаждения ЭДП в GaAs при наличии суперлюминесценции было определено в теории [2]:

$$\tau_T \simeq (A + B\tau_p T_c^{1/2} E_g) \tau_h, \quad (2)$$

где $A = 6.2$, $B = 0.34$, $\tau_h \simeq 0.8$ пс — время охлаждения ЭДП за счет излучения ЛО-фононов; τ_T , τ_p и τ_h измеряются в пс, T_c — в К, E_g — в эВ. Первое слагаемое в выражении (2) учитывает разогрев ЭДП, связанный с тем, что энергия носителей заряда, участвующих в суперлюминесцентной рекомбинации, меньше средней энергии носителей в ЭДП. Второе слагаемое учитывает разогрев ЭДП из-за внутризонного поглощения суперлюминесцентного излучения. Время τ_p — это характерное время движения фотона суперлюминесценции в активной среде, пока фотон не покинет эту среду или не будет поглощен. Для исследуемого образца, обладающего волноводными свойствами, при малом количестве оптически чувствительных дефектов кристаллической решетки можно принять $\tau_p^{-1} \simeq c(\gamma + F^{-1})$, здесь γ — коэффициент внутризонного поглощения света, c — скорость света в среде.

Заметим, что теория [2] в основном описывает релаксацию ЭДП в полупроводниковом лазере с оптической накачкой, но выражение (2) по сделанному в [2] утверждению качественно справедливо для GaAs в отсутствие резонатора. Теория позволяет аппроксимировать экспонентой зависимость температуры ЭДП T_c от времени

при $T_c > T_R$. Результаты численного моделирования [13] подтверждают, что в центральной части фотовозбужденной области, где и исследуется просветление, допустимо аппроксимировать экспонентой уменьшение температуры ЭДП со временем с момента, когда возникает суперлюминесценция, и далее до достижения остаточного просветления.

Энергия фотона зондирующего света $\hbar\omega_p = 1.568$ эВ выбрана (согласно данным [8]) такой, что измеряемое просветление должно изменяться пропорционально концентрации n ЭДП. Поскольку $n \sim T_c^{3/2}$, для теории [2] характерное время измерявшейся релаксации просветления должно определяться выражением $\tau_r \simeq (2/3)\tau_T$. Получаемая теоретическая зависимость для τ_r описывает экспериментальные результаты, если принять, что $A = 8.5$, $B = 0.57$ (см. рис. 3). Полученное отличие подгоночных параметров A и B от теоретических вполне допустимо для предполагавшегося качественного согласия. Средние за время спада просветления до остаточного уровня значения $T_c = 400$ К и $n = 2.8 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$ были определены по зависимости просветления от n и T_c в работе [8]. Коэффициент $\gamma = 54$ см $^{-1}$ был оценен по концентрации n согласно [14].

Поясним, почему при увеличении F должно происходить замедление суперлюминесцентной рекомбинации, которое объясняет обнаруженное замедление "пикосекундной" релаксации просветления. При увеличении F области GaAs, где возбуждена ЭДП, вероятность внутризонного поглощения фотона суперлюминесцентного излучения возрастает. При этом по теории [2] разогрев ЭДП из-за внутризонного поглощения излучения уменьшает инверсию заселенностей и коэффициент усиления излучения α_ω настолько, что, хотя интенсивность суперлюминесценции B_ω при увеличении диаметра активной области GaAs возрастает, скорость стимулированной (суперлюминесцентной) рекомбинации $(dn/dt) \sim \int \alpha_\omega(n, T) B_\omega d\omega$ уменьшается (здесь ω — частота излучения, интеграл берется по спектральной полосе усиления).

При увеличении F ширина спектра усиления света должна уменьшаться из-за вышеуказанного уменьшения инверсии заселенностей. Различие в ширине спектров усиления при разных диаметрах F (и слабо различающейся концентрации ЭДП) должно привести к концен-

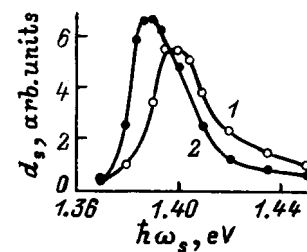


Рис. 5. Спектры средней (по фотовозбуждаемой площади образца) плотности d_s энергии импульса излучения из GaAs при $\hbar\omega_{ex} = 1.485$ эВ. F , мм: 1 — 0.2, 2 — 0.7.

трации суперлюминесценции в более длинноволновой области при большем F . Это подтверждают спектры излучения из образца, измеренные при $D_{\text{ex}} = 56 D_{\text{ex}}^*$ (см. рис. 5). Ширина (на полувысоте) спектров $\Delta(\hbar\omega)$ приблизительно соответствует оценке по теории [5] той ширины спектра суперлюминесценции, когда уменьшение $\Delta(\hbar\omega)$ при увеличении усиления достигает насыщения.

Итак, экспериментально обнаруженное в настоящей работе замедление "пикосекундной" релаксации просветления при увеличении диаметра F фотовозбужденной области GaAs объясняется, по-видимому, механизмом замедления суперлюминесцентной рекомбинации, основанном на теории [2] и качественно изложенном выше.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 95-02-05871) и ГКНТ России.

Авторы приносят глубокую благодарность Ю.Д. Калафати за подробное обсуждение работы и ценные советы.

Список литературы

- [1] N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, E.G. Dyadyushkin, V.A. Mironov, S.E. Kumeikov, V.I. Perel'. Sol. St. Commun., **72**, 625 (1989).
- [2] Ю.Д. Калафати, В.А. Кокин. ЖЭТФ, **99**, 1793 (1991).
- [3] I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov, V.I. Perel'. Sol. St. Commun., **94**, 805 (1995).
- [4] А.П. Леванюк, В.В. Осипов. УФН, **133**, 427 (1981).
- [5] L.W. Casperson. J. Appl. Phys., **48**, 256 (1977).
- [6] И.Л. Броневои, Р.А. Гадонас, В.В. Красаускас, Т.М. Лифшиц, А.С. Пискаускас, М.А. Синицын, Б.С. Явич. Письма ЖЭТФ, **42**, 322 (1985).
- [7] N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, V.A. Mironov, S.E. Kumeikov, V.I. Perel'. In: *Mode-Locked Lasers and Ultrafast Phenomena*, ed. by G.B. Altshuler. [Proc. SPIE, **1842**, 70 (1992)].
- [8] И.Л. Броневои, С.Е. Кумеиков, В.И. Перель. Письма ЖЭТФ, **43**, 368 (1986).
- [9] D. Hulin, M. Joffre, A. Migus, J.L. Oudar, J. Dubard, F. Alexandre. J. de Physique, **48**, 267 (1987).
- [10] Н.Н. Агеева, И.Л. Броневои, Е.Г. Дядюшкин, Б.С. Явич. Письма ЖЭТФ, **48**, 252 (1988).
- [11] I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov, T.A. Nalet. Sol. St. Commun., **98**, 903 (1996).
- [12] N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, V.A. Mironov, S.E. Kumeikov, V.I. Perel'. Sol. St. Commun., **81**, 969 (1992).
- [13] Yu.D. Kalafati, V.A. Kokin, H.M. Van Driel, G.R. Allan. In: *Hot Carriers in Semiconductors*, ed. by Karl Hess et al. (Plenum Press, N.Y., 1996) p. 587.
- [14] J.S. Blakemore. J. Appl. Phys., **53**, R123 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

The influence of photoexcited region diameter on picosecond relaxation of the bleaching of the GaAs thin layer

I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov

Institute of Radioengineering and Electronics,
Russian Academy of Sciences,
103907 Moscow, Russia

Abstract It has been obtained experimentally that the relaxation of GaAs bleaching which arises at photogeneration of charge carriers under a powerful picosecond light pulse, slows down with the beam diameter (F) increase. The bleaching relaxation is caused by a carrier density decrease that is because of the recombination superluminescence in GaAs. It turns out that the superluminescence recombination rate slows down as the diameter F increases inspite of the fact that the superluminescence radiation intensity must increase. That apparent contradiction has been explained with the use of theory.

Fax: (095) 203-8414 (Bronevoi)

E-mail: bil@mail.cplire.ru (Bronevoi)