

## МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ (GaAs/AlGaAs)-ЛАЗЕРА С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ

М. М. Соболев, А. В. Гитцович, М. И. Папенцев,  
И. В. Кочнев, Б. С. Явич

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 22.04.1992. Принята к печати 24.04.1992)

Сообщается о результатах по исследованию с помощью вольт-фарадных измерений и метода DLTS процессов деградации лазерных двойных гетероструктур GaAs/AlGaAs с раздельным ограничением и с квантовой ямой, выращенных методом МОС гидридной эпитаксии. Исследовалось два типа лазерных структур: I тип — с  $p$ - $n$ -переходом, расположенным вблизи границы  $p$ -Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>As/ $n$ -Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As, и с квантовой ямой, не попадающей в слой объемного заряда при напряжении обратного смещения  $V_0 = 0$ , и II тип — с квантовой ямой, расположенной в слое объемного заряда при  $V_0 = 0$ . Установлено, что основным механизмом, приводящим к деградации структур I и II типа, является процесс рекомбинационно-стимулированного переползания дислокаций, связанный с поглощением точечных дефектов, расположенных на гетерогранице. Процесс переползания дислокаций сопровождается в структурах I типа генерацией дефектов As<sub>Ga</sub> и V<sub>Ga</sub>, а в структурах II типа — только V<sub>Ga</sub>. В структуре II типа, по-видимому, наблюдается переползание дислокаций со стороны  $p$ -эмиттера в  $n$ -волновод, сопровождающееся генерацией дефекта ME5, концентрация которого уменьшается по мере движения дислокации. При переползании дислокаций происходит также и генерация глубоких состояний в квантовой яме. В структурах I типа, по-видимому, процесс переползания дислокаций идет как со стороны  $n$ -, так и со стороны  $p$ -эмиттера, что в конечном итоге приводит к деградации лазера.

Повышение долговечности работы лазера на основе GaAs/AlGaAs с двойной гетероструктурой стимулировало большое число работ по исследованию процессов деградации в них [1-6]. В целом к настоящему времени достигнуто понимание по этой проблеме.

В работах [1-3] было показано, что основную роль при быстрой деградации лазеров могут играть процессы размножения дислокаций посредством механизма рекомбинационно-стимулированного переползания дислокаций (РСПД) и рекомбинационно-стимулированного скольжения дислокаций (РССД). Переползание дислокаций должно происходить за счет движения собственных точечных дефектов, в то время как скольжение главным образом обуславливается локальными напряжениями и нагревом, вызванным безызлучательной рекомбинацией. При этом роль и происхождение точечных дефектов, участвующих в процессе переползания дислокаций, до сих пор не ясна. Существует две модели образования дефектов: внутренняя и внешняя [1, 3]. Первая модель предполагает, что в ядре дислокации в процессе РСПД происходит образование вакансий V<sub>Ga</sub> и V<sub>As</sub> с равными темпами генерации. Вторая модель предполагает, что в дислокации происходит как поглощение существующих дефектов, например, междоузельного As, так и генерация антиструктурных дефектов As<sub>Ga</sub>, Ga<sub>As</sub> и V<sub>Ga</sub> в процессе РСПД. Источником большой концентрации точечных дефектов, как предполагать в работах [2, 7, 8], может служить гетерограница, дефекты на которой могут образовываться за счет локальной вариации стехиометрии в процессе роста гетероэпитаксиального слоя [2, 7].

Исследования деградационных процессов гетероэпитаксиальных лазерных структур проводятся обычно методами просвечивающей и растровой электронной

микроскопии [1, 5]. При деградации этих структур в режиме тока, индуцированного электронным зондом, наблюдаются так называемые «дефекты темных линий» (ДТЛ), являющиеся центрами безызлучательной рекомбинации, природа которых до сих пор не ясна. Происхождение ДТЛ связывается с образованием дислокационных петель, растущих при РССД и РСЖД. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней (DLTS), также как и  $C-V$ -измерения, применялись при исследовании процессов деградации [7, 9]. В [7] из анализа  $C-V$ -измерений было впервые установлено, что при деградации гетеролазерной структуры изменяется плотность состояний на границе. В [9] в спектрах DLTS при старении полосковых лазеров с двойной гетероструктурой, полученных протонной бомбардировкой, наблюдали образование электронной ловушки с энергией 0,89 эВ, идентифицируемой как дефект  $E3$ . Эта ловушка наблюдалась только в приборах, подвергнутых бомбардировке, и связывалась с нарушениями, вызванными протонами. Таким образом, до настоящего времени отсутствовали работы по спектроскопии дефектов с глубокими уровнями, в которых бы одновременно с исследованиями кинетики изменения плотности состояний на гетерогранице при деградации лазерной структуры наблюдали бы процесс генерации точечных дефектов, что позволило бы подтвердить тот или иной механизм перемещения дислокаций и установить роль точечных дефектов в процессах деградации.

В настоящей работе сообщается о результатах по исследованию процессов деградации гетеролазерных структур с квантовой ямой на основе GaAs/AlGaAs, проведенных с помощью вольт-фарадных измерений и метода DLTS.

## 1. Образцы и техника эксперимента

Лазерные двойные гетероструктуры с отдельным ограничением и с квантовой ямой были выращены методом МОС гидридной эпитаксии. Структура GaAs/AlGaAs состояла из двух широкозонных эмиттеров  $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$   $n$ - и  $p$ -типа, легированных Si и Mg до концентраций  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , прилегающих к ним волноводных слоев  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$  (толщиной 0,15 мкм) и квантовой ямы GaAs (толщиной 100 Å). Нами исследовались два типа лазерных структур: I тип — с  $p-n$ -переходом, расположенным вблизи границы  $p-Al_{0,5}Ga_{0,5}As/n-Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ , и с квантовой ямой, не попадающей в слой объемного заряда при напряжении обратного смещения  $V_0 = 0$ , и II тип — с квантовой ямой, расположенной в слое объемного заряда при  $V_0 = 0$ .

Измерения вольт-фарадных характеристик и спектров глубоких уровней проводились на спектрометре DL-4600 фирмы «BIO-RAD». Рабочая частота моста была 1 МГц, а уровень сигнала 150 мВ. Деградацию лазеров проводили в течение нескольких часов от начальной мощности  $P_0 = 100$  мВт до ее полного падения. Затем проводили  $C-V$ -измерения, откуда определяли распределение эффективной концентрации носителей по толщине образца при различных температурах. Предварительно образцы охлаждались до 80 К при условии разомкнутой цепи с  $V_0 = 0$ . Затем последовательно измерялись  $C-V$ -характеристики этих структур при различных температурах от 80 до 300 К. После этого проводили измерения DLTS-спектров образцов. Все измерения, так же как и охлаждение образцов, производили в темноте, чтобы исключить влияние эффекта остаточной фотопроводимости на получаемый результат. Положение  $p-n$ -перехода определяли в растровом электронном микроскопе JSM-50 с помощью метода тока, индуцированного электронным зондом. 4

## 2. Результаты и дискуссия

Результаты  $C-V$ -измерений гетеролазерных структур (рис. 1) показывают, что при понижении температуры измерения образца до  $T = 150$  К наблюдается рост толщины слоя объемного заряда  $W_0(T)$  при напряжении обратного смещения

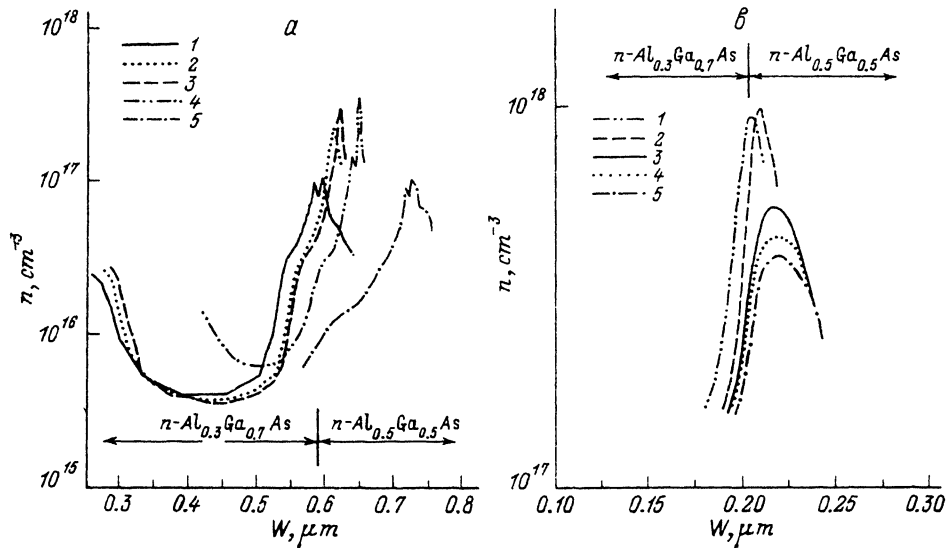


Рис. 1. Эффективные профили концентрации носителей заряда (GaAs/AlGaAs)-лазеров с квантовой ямой. *a* — структура I типа; *T*, К: 1 — 300; 2 — 220; 3 — 200; 4 — 150; 5 — 120. *b* — структура II типа; *T*, К: 1 — 300; 2 — 160; 3 — 130; 4 — 120; 5 — 80.

$V_0 = 0$ . Оказалось, что для структуры I типа измеряемые величины приращения толщины слоя объемного заряда  $\Delta W_0(T)$  (табл. 1) превышают более чем на порядок, значения,  $\Delta W_0(T)$ , которые были рассчитаны из предположения, что они связаны с температурным ходом изменения диффузионного потенциала. Аналогичные изменения в величинах  $\Delta W_0$  (рис. 1, *b*) происходят и при деградации прибора. Наиболее вероятной причиной таких изменений  $\Delta W_0$  от температуры при деградации могут быть интерфейсные состояния на гетерогранице  $p\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  при ее совпадении со слоем объемного заряда  $p\text{-n}$

Таблица 1

Параметры лазерных гетероструктур I и II типа при различных температурах и уровнях мощности излучения  $P$  после деградации

Тип структуры	<i>T</i> , К	До деградации		После деградации					
		$N_{ss} \times 10^{-12}, \text{см}^{-2}$	$W_0 \times 10^3, \text{мкм}$	$P=0.7P_0$		$P=0.4$	$P_0$	$P=0$	
				$N_{ss} \times 10^{-12}$	$\text{см}^{-2}$	$W_0 \times 10^3, \text{мкм}$	$N_{ss} \times 10^{-12}, \text{см}^{-2}$	$W_0 \times 10^3, \text{мкм}$	$N_{ss} \times 10^{-12}$
I	150	2.57	388	3.79	484	3.45	475	3.55	504
	160	—	—	—	—	—	—	3.28	439
	180	—	—	—	—	—	—	3.41	325
	200	2.99	266	—	—	—	—	3.66	280
	221	3.33	252	—	—	—	—	—	—
	300	3.37	230	3.56	232	3.66	234	3.73	236
II	80	0.191	190	0.215	205	—	—	0.231	221
	160	—	185	—	188	—	—	—	186
	200	—	183	—	185	—	—	—	183
	250	—	179	—	181	—	—	—	180
	300	—	175	—	176	—	—	—	176

перехода. Для структуры I типа это совпадение наблюдается, что контролировалось с помощью методов электронной микроскопии.

Влияние плотности состояний на гетерогранице  $N_{ss}$  на  $C-V$ -характеристику  $p-n$ -гетероперехода исследовалось в работах [7, 10, 11]. Из решения уравнения Пуассона были получены следующие соотношения:

$$\frac{1}{C^2} = - \frac{2(\epsilon_n N_d + \epsilon_p N_a)}{q \epsilon_n \epsilon_p N_d N_a} (V - V_0) - \frac{N_{ss}^2}{\epsilon_n \epsilon_p N_d N_a} \quad (1)$$

и

$$V_0 = E_g + \Delta E_c - kT \ln \frac{N_{cn} N_{vp}}{N_d N_a}, \quad (1a)$$

где  $V_0$  — диффузионный потенциал,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны материала  $p$ -типа,  $\Delta E_c = E_{cn} - E_{cp}$  — разрыв края зоны проводимости на гетерогранице,  $N_{cn}$  и  $N_{vp}$  — эффективные плотности состояний,  $\epsilon_n$  и  $\epsilon_p$  — диэлектрические постоянные,  $N_d$  и  $N_a$  — концентрации доноров и акцепторов в  $n$ - и  $p$ -слое. Из уравнений (1a) было определено напряжение отсечки:

$$V_{\text{int}} = V_0 - \frac{q N_{ss}^2}{2(\epsilon_n N_d + \epsilon_p N_a)}, \quad (2)$$

и так как у нас  $N_a \gg N_d$ ,

$$V_{\text{int}} = V_0 - \frac{N_{ss}^2}{2\epsilon_n N_d}. \quad (2a)$$

Эти соотношения действительны только при отсутствии диполя на гетерогранице. В табл. 1 приведены результаты расчета плотности состояний на  $p-n$ -гетерогранице с использованием соотношений (2) для  $T > 150$  К. Изменения  $C-V$ -характеристики, наблюдаемые при охлаждении ниже 150 К, связываются уже не только с плотностью состояний на гетерогранице, но и с вымораживанием носителей в  $n$ -волноводе и эмиттере на  $DX$ -центрах, концентрация которых того же порядка, что и концентрация мелких доноров [12]. Происходит уменьшение концентрации  $N_d - N_a$ , и граница слоя объемного заряда при  $V_0 = 0$  достигает  $n$ -эмиттера (рис. 1). Фактически происходит изменение структуры. В этом случае использование соотношений (2) уже некорректно. Как видно из табл. 1, определенная из соотношения (2) плотность состояний на гетерогранице с увеличением температуры имеет тенденцию к повышению, что объясняется ростом темпа эмиссии носителей с состояний на гетерогранице, распределенных по всей запрещенной зоне. Увеличивается плотность состояний на гетерогранице и при деградации структур I типа. С помощью соотношений Аррениуса были определены энергии термической активации  $E_a$ , изменение плотности состояний на гетерогранице  $\Delta N_{ss}$  при  $V_0 = 0$  и  $\sigma_a$  — сечение захвата носителей на эти состояния:

$$\frac{\Delta N_{ss}}{N_{ss}^*} = A \sigma_a \exp \left( - \frac{kT}{E_a} \right), \quad (3)$$

где  $N_{ss}^*$  — плотность состояний на гетерогранице при 300 К,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура, при которой определяя данное значение  $\Delta N_{ss}$ . Для структуры I типа до деградации были найдены величины  $E_a = 43$  мэВ и  $\sigma_a = 1.53 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>, после деградации —  $E_a = 122$  мэВ и  $\sigma_a = 9.27 \cdot 10^{-19}$  см<sup>2</sup>. Наблюдаемое увеличение энергии термической активации после деградации лазера, возможно, связано с изменением положения уровня Ферми, происходящим либо

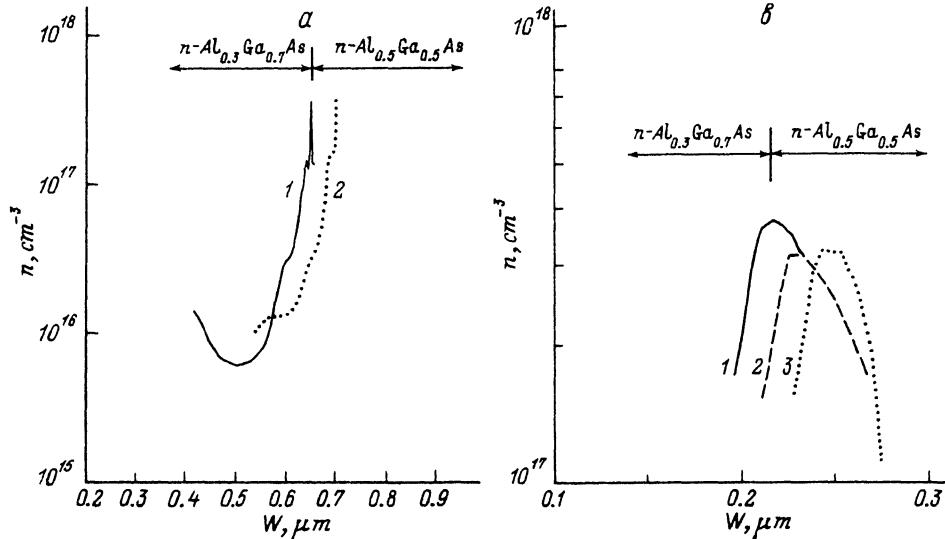


Рис. 2. Эффективные профили концентрации носителей заряда (GaAs/AlGaAs)-лазеров с квантовой ямой. *a* — структура I типа: 1 — до, 2 — после деградации; температура измерения — 150 К. *b* — структура II типа: 1 — до деградации, 2 — при потере 40% от первоначальной мощности, 3 — после деградации; температура измерения — 80 К.

из-за диффузии примеси, либо из-за изменения плотности состояний на гетерогранице.

На рис. 2*a, b* приведены результаты *C—V*-измерений гетеролазерной структуры с квантовой ямой, расположенной в области объемного заряда *p—n*-перехода с более высокой эффективной концентрацией носителей как в волноводе, так и в эмиттере. Для этой структуры характерно, что до деградации температурное изменение емкости при  $V_0 = 0$  определяется температурным изменением

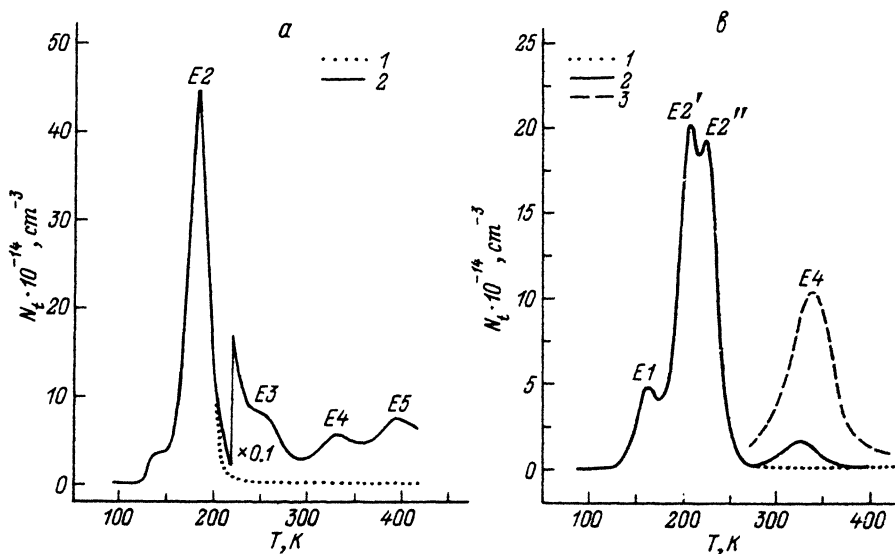


Рис. 3. DLTS-спектры (GaAs/AlGaAs)-лазеров с квантовой ямой. *a* — структура I типа: 1 — до, 2 — после деградации. *b* — структура II типа: 1 — до деградации, 2 — при потере 40% от первоначальной мощности, 3 — после деградации. Указаны номера уровней, их параметры приведены в табл. 2.

Параметры глубоких уровней лазерных гетероструктур

Номер глубокого уровня	Энергия, мэВ	Сечение захвата, см <sup>2</sup>	Идентификация	Природа	Литературный источник
<i>E</i> <sub>1</sub>	185	$2.23 \cdot 10^{-17}$			[17]
<i>E</i> <sub>2</sub>	475	$4.05 \cdot 10^{-13}$	<i>DX</i>	SiGa	
<i>E</i> <sub>2</sub> '	400	$1.51 \cdot 10^{-13}$	<i>DX</i>	SiGa	[14]
<i>E</i> <sub>2</sub> "	397	$1.7 \cdot 10^{-14}$	<i>DX</i>	SiGa	[14]
<i>E</i> <sub>3</sub>	363	$2.37 \cdot 10^{-16}$	<i>B</i>		[14]
<i>E</i> <sub>4</sub>	563	$3.49 \cdot 10^{-14}$	<i>ME5</i>	V <sub>Ga</sub> <sup>+</sup> ?	[13, 14]
<i>E</i> <sub>5</sub>	944	$5.48 \cdot 10^{-12}$	<i>ME6, EL2</i>	AsGa	[13]

диффузионного потенциала. И при ее охлаждении ниже 150 К область объемного заряда не распространяется в *n*-эмиттер за счет понижения  $N_d - N_a$  при вымораживании *DX*-центра. После деградации лазерной структуры II типа, как и для структуры I типа, наблюдалось увеличение  $W_0$  при  $V_0 = 0$  и  $T < 100$  К (рис. 2, а). Принимая во внимание результаты измерений в растровом микроскопе, а также наши данные, из которых следует, что край слоя объемного заряда граничит с квантовой ямой, и используя соотношения (1), мы определили изменения плотности состояний на гетерогранице в квантовой яме, являющейся активной областью (табл. 1).

На рис. 3, а, б приведены DLTS-спектры лазерных структур с квантовой ямой I и II типа до и после деградации. Видно, что после деградации в DLTS-спектрах помимо пика *E*<sub>2</sub>, связанного с *DX*-центром, появляются новые. Энергии термической активации и сечения захвата уровней, связанных с этими пиками, были определены из зависимости Аррениуса. Результаты этих измерений и их идентификация с известными уровнями представлены в табл. 2. Пик *E*<sub>5</sub> идентифицируется с хорошо известным уровнем *EL2*, который связывается с дефектом As<sub>Ga</sub>. Относительно пика *E*<sub>4</sub>, который близок по параметрам к уровню *ME5* [13] и обычно наблюдается в AlGaAs, выращенном методом молекулярно-пучковой эпитаксии, в настоящее время известно, что его концентрация увеличивается с ростом отношения плотности молекулярных потоков  $\gamma = I_{As} / (I_{Al} + I_{Ga})$  и уменьшается с увеличением температуры роста. На основании этих данных было высказано предположение [14], что уровень *ME5* связан либо с V<sub>Ga</sub>, либо с комплексом, в состав которого входит эта вакансия. Были проведены измерения профилей концентраций дефектов с глубокими уровнями методом приращения ширины области объемного заряда при варьировании импульса обратного напряжения. Концентрация глубоких уровней рассчитывалась при помощи соотношения

$$N_t(d) = n^*(W) \frac{W^2}{d\Delta d} \frac{\Delta C}{C}, \quad (4)$$

где  $n^*(W)$  — концентрация свободных носителей на краю области обеднения шириной  $W$ ,  $\Delta C$  — изменение емкости в момент времени  $t = 0_+$  после приложения импульса заполнения, который определяется из высоты пика DLTS,  $C$  — стационарная емкость обедненного слоя при соответствующих напряжениях обратного смещения,  $\Delta d$  — изменение толщины  $d$  при приложении импульса заполнения. Толщина  $d$  определяется из соотношения

$$d = (W - \lambda) = W - \frac{\sqrt{2\epsilon_0\epsilon (E_t - E_f - \Delta E_c)}}{q^2 N_d}, \quad (5)$$

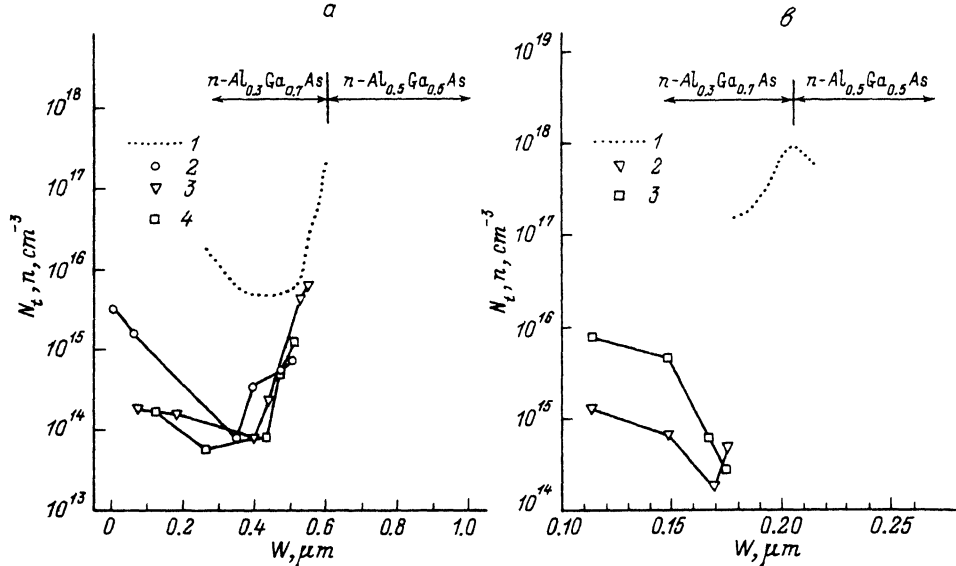


Рис. 4. Эффективные профили концентрации носителей заряда (1) и профили концентраций глубоких уровней (GaAs/AlGaAs)-лазеров с квантовой ямой. *a* — структура I типа после деградации: 2 — E5; 3 — E4; 4 — E3. *b* — структура II типа: 2 — E4 (при потере 40% от первоначальной мощности); 3 — E4 (после деградации).

где  $\lambda$  — расстояние между краем слоя обеднения и точкой пересечения уровня Ферми с глубоким уровнем,  $E_f$  — уровень Ферми,  $E_a$  — энергия активации глубокого уровня,  $\Delta E_c$  — разрыв зоны проводимости. В наших расчетах профиля концентрации последние величина была равна 0.18 эВ. Концентрационные профили глубоких уровней в гетеролазерных структурах I и II типа, рассчитанные с применением соотношений (4) и (5), показаны на рис. 4, *a, b*. Профили дефектов с глубокими уровнями в структурах I типа показывают, что концентрации максимальны вблизи гетерограницы. В структурах II типа, в которых эффективная концентрация носителей на порядок выше, чем в структурах I типа, концентрация дефектов с глубокими уровнями максимальна вблизи  $p$ - $n$ -перехода и падает при приближении к  $n$ -эмиттеру.

Таким образом, в наших исследованиях мы наблюдали, что в структурах I типа температурные изменения  $C$ - $V$ -характеристик и зависимостей  $n(W)$  обусловлены наличием на гетерогранице состояний с  $E_a = 43$  мэВ. После деградации энергия термической активации увеличивается и становится равной  $E_a = 125$  мэВ. При деградации в спектрах DLTS появляются новые пики, которые связываются с дефектами  $\text{As}_{\text{Ga}}$  и  $V_{\text{Ga}}$ . Концентрация этих дефектов ниже эффективной концентрации носителей. Профиль этих дефектов показывает, что максимум концентрации расположен вблизи гетерограницы. Для структур II типа, в которой переход расположен посередине волновода и включает в себя квантовую яму, а также имеет эффективную концентрацию свободных носителей на порядок выше, чем в структурах I типа, было получено, что температурные изменения  $C$ - $V$ -характеристик и зависимостей до деградации обусловлены температурными изменениями диффузионного потенциала. После деградации происходят сдвиг максимума в распределении эффективной концентрации носителей в сторону эмиттера и уменьшение его амплитудного значения, что определяется как изменение плотности состояний на гетерогранице в квантовой яме, так и на гетерогранице  $n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/n\text{-Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ . В спектрах DLTS появляется пик, связанный с дефектом  $V_{\text{Ga}}$ , концентрация которого ниже эффективной концентрации носителей и максимальна вблизи  $p$ - $n$ -перехода. Концентрация DX-центров в структурах

обоих типов не меняется. Кроме того, в структурах обоих типов после деградации с помощью метода тока, индуцированного электронным зондом, наблюдалось образование дефектов темных линий.

Из наших данных следует, что основным механизмом, приводящим к деградации структур I и II типа, является процесс рекомбинационно-стимулированного переползания дислокаций, связанный с поглощением точечных дефектов, расположенных на гетерогранице. Процесс переползания дислокаций сопровождается в структурах I типа генерацией  $As_{Ga}$  и  $V_{Ga}$ , а в структурах II типа — только  $V_{Ga}$ . Эти различия обусловлены, по-видимому, тем, что в структуре II типа, где концентрация легирующей примеси в  $n$ -волноводе и эмиттере примерно на порядок выше, чем в структуре I типа, и вероятность генерации  $As_{Ga}$  дефекта крайне мала. Еще в работе [15] было показано, что при концентрации донорной примеси  $N_d \gg 10^{17}$  см<sup>-3</sup> концентрация  $As_{Ga}$  в GaAs резко уменьшается. Кроме того, известно [16], что при повышении концентрации легирующей донорной примеси Si в соединениях  $A^{III}B^V$  происходит сильное замедление движения дислокаций в результате геттерирования их Si, а при легировании акцепторной примесью — ускорение движения дислокаций. Эти обстоятельства, по-видимому, приводят к тому, что в структуре II типа наблюдается переползание дислокаций со стороны  $p$ -эмиттера в  $n$ -волновод, сопровождающееся генерацией дефекта  $ME5$ , концентрация которого уменьшается по мере движения дислокации. При переползании дислокаций происходит также и генерация глубоких состояний в квантовой яме. В структурах I типа процесс переползания дислокаций идет как со стороны  $n$ -, так и со стороны  $p$ -эмиттера, что в конечном итоге приводит к деградации лазера.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] P. M. Petroff. J. Appl. Phys., **45**, 3899 (1974).
- [2] P. M. Petroff. In: Semiconductors a. Semimetals, **22**, 379 (1985).
- [3] E. C. Madhava-Menon, P. M. Petroff, R. G. Waters. Appl. Phys. Lett., **54**, 2683 (1989).
- [4] K. Fukagai, Sh. Ishikawa, K. Endo, T. Yuasa. Japan. J. Appl. Phys., **30**, L371 (1991).
- [5] R. B. Martins, P. Henoc, B. Akamatsu, J. F. Palmier. J. Appl. Phys., **70**, 554 (1991).
- [6] М. И. Свердлов, Т. В. Торчинская, В. Я. Филипченко. Квантовая электроника, **88**. Киев (1990).
- [7] E. S. Yang. J. Appl. Phys., **45**, 3801 (1974).
- [8] G. M. Blom. J. Cryst. Growth., **36**, 125 (1976).
- [9] D. V. Lang., R. L. Hartman, N. E. Schumaker. J. Appl. Phys., **47**, 4986 (1976).
- [10] J. P. Donnelly, A. G. Milnes. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-14**, 63 (1967).
- [11] Y. W. Choi, C. R. Wie, K. R. Evans, C. E. Stuts. J. Appl. Phys., **68**, 1303 (1990).
- [12] P. M. Mooney. J. Appl. Phys., **67**, R1 (1990).
- [13] Sh. Naritsuka, K. Yamanaka, M. Mihara, M. Ishii. Japan. J. Appl. Phys., **23**, L112 (1984).
- [14] P. K. Bhattacharya, S. Dhar. In: Semiconductors a. Semimetals. **26**, 143 (1988).
- [15] J. Lagowski, H. S. Gatos, J. M. Parsey, M. Kaminsku, W. Walukiewicz. Appl. Phys. Lett., **24**, 287 (1982).
- [16] I. Yonemaga, K. Sumino. J. Appl. Phys., **65**, 85 (1989).
- [17] C. E. Wood, T. M. Kerr, T. D. McLean, D. I. Westwood, J. D. Medland, S. Blight, R. Davies. J. Appl. Phys., **60**, 1300 (1986).

Редактор: Л. В. Шаронова