

## ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕГРАДАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ИНЖЕКЦИОННЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ

Конников С. Г., Сverdлов М. И., Филипченко Ф. Я., Хазанов А. А.

Экспериментально с помощью электронно-зондового анализа в режиме тока, индуцированного электронным зондом (ТИЭЗ), исследованы особенности медленной деградации непрерывных инжекционных гетеролазеров в системе GaAs—Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As с оксидной изоляцией полосковой области протекания тока, происходящей со скоростью 0.05—0.2 кч<sup>-1</sup> при комнатной температуре.

Установлено, что в бездислокационных лазерах деградационный процесс начинается с зарождения темных линий <110> вдоль краев полосковой области, а заканчивается образованием темных пятен и линий <100> в пределах полосковой области.

Путем решения диффузионно-дрейфового уравнения для точечных дефектов, учитывающего рекомбинационно-стимулированную генерацию дефектов, показано, что образование темных линий на ТИЭЗ изображении связано с ускоренной миграцией точечных дефектов в неоднородном поле механических напряжений, вводимом в лазерный кристалл ступеньками в оксидном слое, пространственным разделением межузельных и вакансионных дефектов и их накоплением в областях экстремумов энергии взаимодействия точечных дефектов с упругим полем механических напряжений.

Несмотря на проведенные к настоящему времени многочисленные исследования по проблеме надежности и стабильности параметров непрерывных инжекционных гетеролазеров, она до сих пор остается одной из наиболее актуальных в области техники этого типа светоизлучающих приборов. Экспериментальные работы, проведенные в рамках этой проблемы, позволили выявить влияние на деградационное поведение приборов процессов образования «дефектов темных линий» из дислокаций и других кристаллографических нарушений [1], изменений, наблюдающихся на излучающих гранях [2], в электрических контактах и спае кристалла с теплоотводом [3]. Однако по мере конструктивно-технологического преодоления этих причин все более доминирующее значение в явлении деградации приобретают медленные процессы, происходящие в активной области гетеролазера и связанные с преобразованиями в ансамбле точечных дефектов, в частности, через рекомбинационно-стимулированные механизмы [4].

В настоящей работе приведены результаты, полученные при электронно-зондовых исследованиях в режиме тока, индуцированного электронным зондом (ТИЭЗ), медленной деградации непрерывных гетеролазеров в системе GaAs—Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As с оксидной изоляцией полосковой области протекания тока.

Лазерные диоды изготавливались из бездефектных двойных гетероструктур, выращенных жидкофазной эпитаксией при температуре 840—860 °С в кассетах с инжекционной прокачкой растворов. Активный слой ДГС Ga<sub>0.95</sub>Al<sub>0.05</sub>As легировался Si, инжекторы *p*- и *n*-Ga<sub>0.35</sub>Al<sub>0.65</sub>As — соответственно Ge и Te. Полосковая область протекания тока формировалась с помощью полоскового окна в слое SiO<sub>2</sub> толщиной 2000—3000 Å, нанесенного на поверхность гетероструктуры методом окисления моносилана при температуре 350 °С. Монтаж кристалла на теплоотвод осуществлялся с помощью пайки In или Sn—Pb припоями. Электронно-зондовые исследования лазерных диодов проводились на растровом электронном микроскопе типа РЭМ-200, обеспеченном режимом ТИЭЗ. Для проведения исследований лазерные кристаллы механически сни-

мались с теплоотвода, затем путем обработки в комбинации травителей с них удалялись диэлектрические и металлические слои. Обработки ТИЭЗ данных осуществлялась по методике, описанной в работе [5], с учетом наличия «точечно-подобных» дефектов. Отсутствие в гетероструктурах лазерных диодов дислокаций, дефектов упаковки и других кристаллографических нарушений контролировалось с помощью рентгеновской дифракционной топографии, микрокатодолюминесценции и ТИЭЗ.

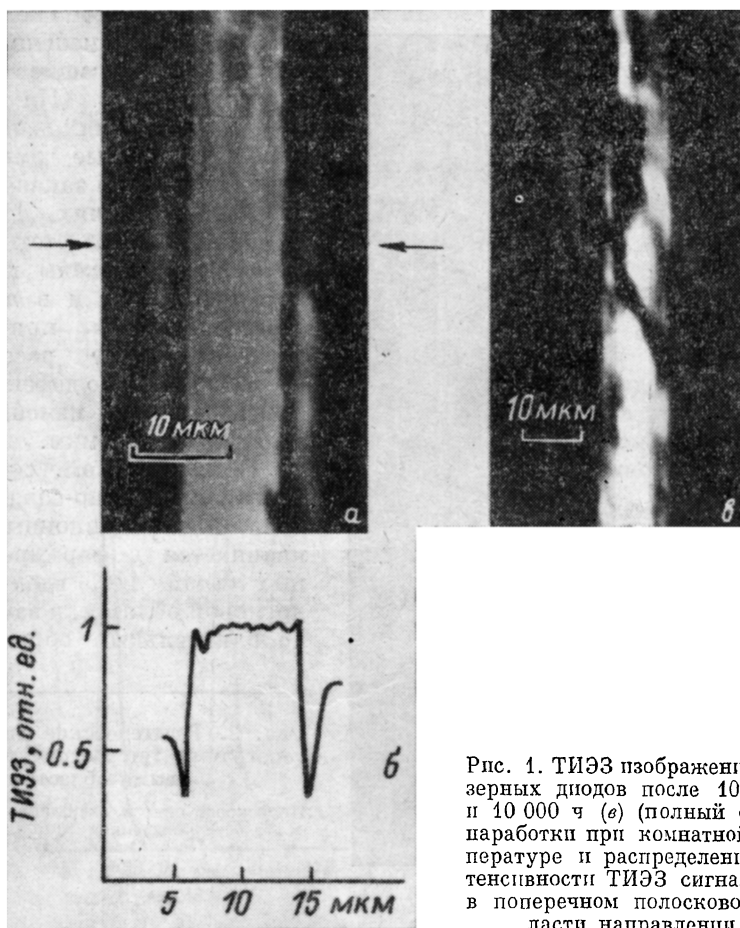


Рис. 1. ТИЭЗ изображения лазерных диодов после 1000 (а) и 10 000 ч (б) (полный отказ) парабтки при комнатной температуре и распределение интенсивности ТИЭЗ сигнала (в) в поперечном полосковой области направлении.

Особенности ТИЭЗ изображений лазерных диодов, при которых в ходе испытаний при комнатной температуре в режиме постоянной мощности в течение 1000—20 000 ч проявлялось монотонное увеличение тока накачки со скоростью  $R = \Delta J_n / J_n$ , равной 0.05—0.2 кч<sup>-1</sup>, зависели от степени деградации гетеролазера. На первом этапе, который составляет по времени для разных образцов 1000—5000 ч и характеризуется увеличением тока накачки до 50 %, характерным элементом контраста на ТИЭЗ изображениях являются две темные линии  $\langle 110 \rangle$ , расположенные по краям полосковой области и простирающиеся иногда через весь кристалл от грани до грани. Кроме того, вне полосковой области вблизи краев наблюдаются две светлые линии или широкие светлые полосы. Типичная микрофотография ТИЭЗ изображения деградирующего лазера и кривая распределения амплитуды ТИЭЗ сигнала в поперечном полосковой области направлении приведены на рис. 1, а, б. Анализ подобных микрофотографий свидетельствует о том, что темные линии  $\langle 110 \rangle$  зарождаются внутри полосковой области на некотором расстоянии от ее краев, затем по мере расширения они смыкаются с границами. Аналогичную эволюцию претерпевают и светлые линии, которые сначала также отделены от границ, но впоследствии, трансформируясь в широкие светлые полосы, сливаются с краями полосковой

области. Измерение экспериментальных зависимостей величины индуцированного тока  $J$  от ускоряющего напряжения  $U$  показывает, что рекомбинационно-активные дефекты, образующие темные линии  $\langle 110 \rangle$  на ТИЭЗ изображениях, локализованы в  $n$ -слое гетероструктуры (т. е. в инжекторе  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ) на расстоянии порядка 0.1 мкм от  $p$ - $n$ -перехода. Рекомбинационная «сила» дефектов в темных линиях составляет 10—15 мкм.

ТИЭЗ изображения полностью деградировавших гетеролазеров показаны на рис. 1, в. Здесь наряду с описанными выше темными линиями  $\langle 110 \rangle$  характерным элементом контраста являются многочисленные темные пятна, заполняющие всю полосковую область.

На некоторых микрофотографиях наблюдаются короткие темные линии  $\langle 100 \rangle$ , начинающиеся и заканчивающиеся на темных линиях  $\langle 110 \rangle$ . Дефекты, которым соответствуют темные пятна, расположены как в активном  $p$ -слое, так и в  $n$ -инжекторе гетероструктуры, причем в последнем случае расстояние от  $p$ - $n$ -перехода до дефекта 0.5 мкм. Сила дефектов изменяется в интервале 20—55 мкм.

Таким образом, согласно данным электронно-зондового анализа, деградационный процесс начинается с формирования темных линий  $\langle 110 \rangle$  вдоль краев полосковой области, а заканчивается дополнительным образованием на

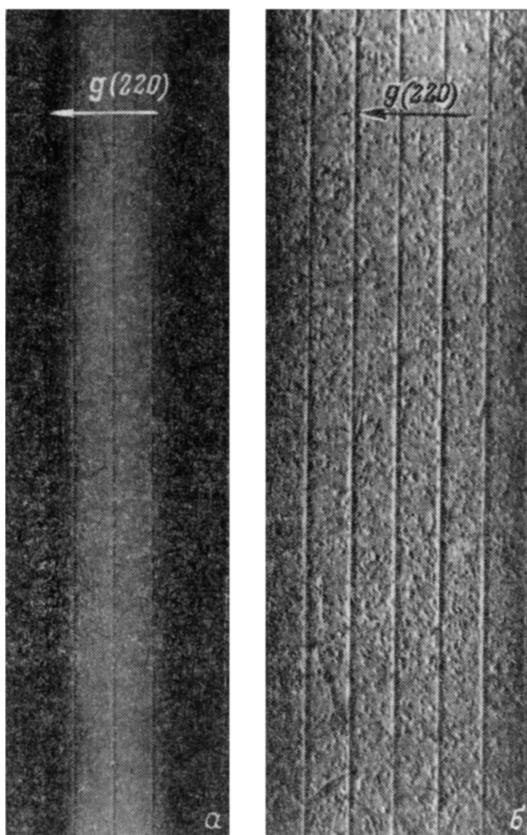


Рис. 2. Рентгеновские дифракционные топограммы гетероструктур с полосковыми областями.

Полосковое окно в оксидном слое: а —  $\text{SiO}_2$ ,  $\times 17$ , б — запыленное металлическими пленками,  $\times 17$ .

значительной ее площади темных пятен и линий  $\langle 100 \rangle$ . Учитывая отсутствие в лазерных диодах исходных кристаллографических дефектов, которые обычно служат центрами деградации, развитие темных линий и пятен можно связать с миграцией и накоплением точечных дефектов в некоторых стоках в условиях инжекции и рекомбинации неравновесных носителей [4]. Важную роль в этих процессах, как впервые отмечено в работе [6], должно играть упругое поле механических напряжений, существующее в объеме лазерного кристалла с полосковым окном в оксидном слое.

На рис. 2 представлены дифракционные рентгеновские топограммы гетероструктур, на поверхности которых нанесены слой  $\text{SiO}_2$ , содержащий полосковые окна шириной 15 мкм (а), а затем металлические пленки омических контактов, подвергшиеся термообработке (б). Наличие контраста на рентгеновских топограммах (бело-черного в первом случае и черно-белого — во втором) свидетельствует о существовании в объеме полупроводника в области полоскового окна неоднородной знакопеременной деформации, причина возникновения которой связана со ступеньками в оксидном и металлическом слоях. В соответствии с указанной на топограмме ориентацией вектора дифракции  $g$  черно-белый контраст означает, что в пределах полоскового окна полупроводниковый материал находится в состоянии деформации растяжения.

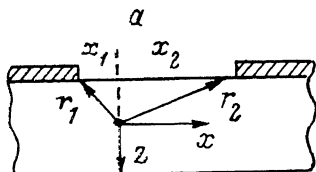
Влияние этой деформации на поведение точечных дефектов в полосковой области лазерных кристаллов может быть описано путем решения диффузионно-дрейфового уравнения, которое в общем случае имеет следующий вид [7]:

$$\partial N / \partial t = \nabla (D_{ij} \nabla N) - \nabla (N v), \quad (1)$$

где  $N(x, y, z, t)$  — концентрация точечных дефектов,  $D_{ij}$  — тензор коэффициентов диффузии,  $v$  — средняя скорость дрейфа диффундирующих дефектов под действием механических напряжений.

Ограничиваясь случаем одномерной изотропной диффузии, дополняя уравнение (1) членом, описывающим рекомбинационно-стимулированную генерацию точечных дефектов, и учитывая, что  $v = -\frac{D_{ij}}{kT} \frac{\partial E_{вз}}{\partial x}$ , где  $E_{вз}$  — энергия

взаимодействия точечных дефектов с полем напряжений, имеем



$$\frac{1}{D} \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{N}{kT} \frac{\partial^2 E_{вз}}{\partial x^2} + \frac{1}{kT} \frac{\partial E_{вз}}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{1}{D} G N_0. \quad (2)$$

Для энергии упругого взаимодействия точечного дефекта с внешним полем напряжений в работе [8] приведено следующее выражение:

$$E_{вз} = -\frac{4}{3} \pi r^3 e (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}), \quad (3)$$

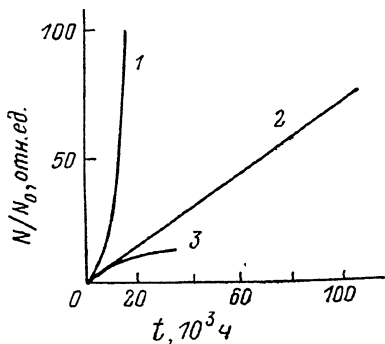
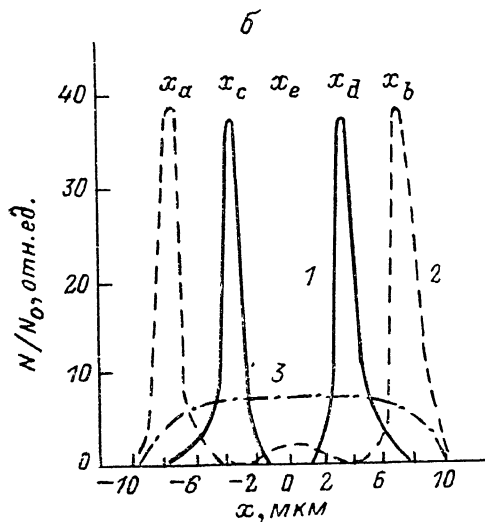


Рис. 3. Схематическое изображение полосковой области лазерного кристалла (а) и результаты расчета распределения точечных дефектов (б).

Рис. 4. Кинетика накопления точечных дефектов в процессе деградации лазеров. Скорость генерации,  $c^{-1}$ : 1, 2 —  $2 \cdot 10^{-7}$ , 3 — 0. Напряжения,  $дн/см^2$ : 1 — 0, 2, 3 —  $5 \cdot 10^8$ .

Время наработки 2000 ч, напряжения  $5 \cdot 10^8$   $дн/см^2$ , скорость генерации  $10^{-9}$   $c^{-1}$ , коэффициент диффузии  $10^{-14}$   $см^2/с$ ; 1 — распределение межзольных дефектов в отсутствие напряжений.

величина  $-\frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$  представляет собой гидростатическое давление, создаваемое полем напряжений  $\sigma_{ij}$  в точке расположения дефекта,  $e = \Delta r / r$ , где  $r$  — радиус атома матрицы,  $\Delta r$  — изменение атомного радиуса, вызванное точечным дефектом ( $\Delta r < 0$  для вакансии,  $\Delta r > 0$  для межзольного атома).

Выражение для функции  $E_{вз}$  в случае поля напряжений  $\sigma_{ij}$ , образуемого в лазерном кристалле двумя близко расположенными ступеньками в слое  $SiO_2$  на поверхности (рис. 3, а), может быть получено следующим образом. В работе [9] методом конечных элементов решена задача определения смещений элементарного объема вдоль осей  $x$  и  $z$  (соответственно  $U$  и  $W$ ) поля напряжений полоскового окна:

$$U = 2S \left[ (AB - C) \ln \left( \frac{r_1}{r_2} \right) + A \left( \frac{x_1^2}{r_1^2} - \frac{x_2^2}{r_2^2} \right) \right], \quad (4)$$

$$W = S \left[ 2A \left( \frac{x_1 z}{r_1^3} - \frac{x_2 z}{r_2^3} \right) + 2C \left( \cos \frac{z}{r_1} - \cos \frac{z}{r_2} \right) \right]. \quad (5)$$

Здесь  $A = (1 + \nu)/2\pi E$ ,  $B = (3 - 4\nu)$ ,  $C = (1 + \nu)(1 - 2\nu)/2\pi E$  ( $E$  и  $\nu$  — модуль Юнга и коэффициент Пуассона полупроводника соответственно),  $S = \sigma t$ , где  $\sigma$  — напряжение в слое  $\text{SiO}_2$ ,  $t$  — толщина слоя, смысл остальных величин понятен из рис. 3, а.

Компоненты тензора деформаций вычисляются согласно работе [10] путем дифференцирования смещений по соответствующим координатам:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial W}{\partial z}. \quad (6)$$

Зная  $\varepsilon_{ij}$ , компоненты тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  можно получить с помощью соотношений Гука для изотропной среды, т. е. через коэффициенты Лама [10].

Произведя соответствующие вычисления и подставляя компоненты тензора  $\sigma_{ij}$  в (3), получим выражение для функции  $E_{zs}$  в плоскодеформированном случае

$$E_{zs} = \frac{E}{1 - 2\nu} \frac{4\pi r^3}{3} 2\sigma t A (1 - B) \left( \frac{x_1}{r_1^3} - \frac{x_2}{r_2^3} \right). \quad (7)$$

Диффузионно-дрейфовое уравнение (2) с функцией  $E_{zs}$  в виде выражения (7) решалось численно на ЭВМ в предположении пространственно-временного постоянства скорости рекомбинационно-стимулированной генерации точечных дефектов  $G$ . При этом для удобства решения начало координат совмещалось с центром полосковой области. В новых координатах  $x_1 = d - x$ ,  $x_2 = d + x$ ,  $r_1 = \sqrt{z^2 + (d + x)^2}$ ,  $r_2 = \sqrt{z^2 + (d - x)^2}$ . Результаты расчета пространственного распределения точечных дефектов в области полоскового окна и зависимости концентрации дефектов от времени наработки гетеролазера представлены на рис. 3, б и 4 соответственно. Анализ полученных данных приводит к следующим выводам.

1. При наличии в объеме лазерного кристалла упругого поля от двух близко расположенных ступенек в оксидном слое межузельные и вакансионные дефекты в ходе деградации пространственно разделяются и распределяются неоднородно в области полоскового окна, накапливаясь в точках (на самом деле в линиях) экстремумов зависимости  $E_{zs}(x)$ , которые играют в этом случае роль стоков точечных дефектов. Положение точек экстремумов в принятых координатах можно найти, продифференцировав выражение (7) и приравняв производную к нулю. Соответствующие вычисления приводят к следующим результатам:

$$x_{a,b} = \pm \sqrt{z^2 + d^2 + 2z \sqrt{z^2 + d^2}}, \quad x_{c,d} = \pm \sqrt{z^2 + d^2 - 2z \sqrt{z^2 + d^2}}. \quad (8)$$

Здесь  $z$  — расстояние от поверхности структуры до активного слоя лазера,  $d$  — полуширина полоскового окна.

Подставляя в (8) реальные значения параметров лазерного кристалла  $z = 2.0$  мкм,  $d = 5$  мкм, получаем  $(x_b - x_a)$  — расстояние между точками накопления вакансионных дефектов 14.0 мкм,  $(x_d - x_c)$  — расстояние между точками накопления межузельных дефектов 6 мкм. Сопоставление этих величин с ТИЭЗ данными на рис. 1, а показывает их хорошее совпадение (15 и 6.5 мкм между светлыми и темными линиями соответственно) и свидетельствует, таким образом, в пользу рассматриваемой модели. Из этих результатов следует также важный вывод о том, что в лазерном кристалле в процессе деградации дефекты, имеющие вакансионную природу, не образуются или (последнее менее вероятно) скопления вакансий не обладают рекомбинационно-активными свойствами.

2. Темп накопления точечных дефектов в стоках и соответственно скорость деградации лазеров зависят как от величины упругих напряжений  $\sigma$ , так и от скорости рекомбинационно-стимулированной генерации дефектов  $G$ . Если в качестве критерия деградации прибора принять величину  $N/N_0 = 100$  (рис. 4), то видно, что существование неоднородно распределенных упругих напряжений в полосковой области лазера приводит к увеличению скорости деградации примерно в 10 раз, ограничивая тем самым время наработки гетеролазера

уровнем 20 тыс. ч. При скорости генерации точечных дефектов  $G=0$  процесс возрастания их концентрации в стоках связан с перераспределением исходных дефектов и не приводит к существенному накоплению. Таким образом, обязательным условием объемной деградации непрерывных гетеролазеров является генерация новых точечных дефектов, по-видимому, межузельного типа. Наблюдаемые экспериментально значительные различия в скоростях деградации лазеров, изготовленных в условиях серийного производства, могут быть связаны с невоспроизводимостью величин  $\sigma$  и  $G$ .

3. Приведенные выше количественные оценки, основанные на решении диффузионно-дрейфового уравнения (2), получены при условии, что величина коэффициента диффузии точечных дефектов  $D$  при комнатной температуре составляет  $\sim 10^{-13} - 10^{-14}$  см<sup>2</sup>/с, т. е. диффузия дефектов, как и их генерация, является рекомбинационно-стимулированной. Если рассматривать диффузию собственных точечных дефектов (самодиффузию) в GaAs, энергия активации которой, по некоторым данным, составляет 1 эВ [11], то для достижения коэффициентом  $D$  величины  $10^{-13}$  см<sup>2</sup>/с необходимо рекомбинационно-стимулированное снижение энергии активации примерно на 0.7 эВ. Заметим, что эта величина приближенно соответствует энергетическому положению глубоких уровней, через которые осуществляются безызлучательные рекомбинационные процессы [12].

4. Из полученной с помощью количественного электронно-зондового анализа величины рекомбинационной силы дефекта  $\gamma$  можно оценить концентрацию центров безызлучательной рекомбинации  $N_i$  в темных линиях. Известно [13], что сила дефекта определяется как  $1/L^2$  или  $1/D\tau$ , где  $D$  и  $\tau$  — коэффициент диффузии и время жизни неравновесных носителей заряда соответственно. Поскольку  $\tau = (N_i \sigma_i v_i)^{-1}$ , получаем  $N_i = \gamma D / \sigma_i v_i$ . Принимая  $\sigma = 5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>2</sup>,  $v_i = 10^7$  см/с,  $D = 10^{-3}$  см<sup>2</sup>/с, имеем  $N_i = (2 \div 3) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. При таких концентрациях точечных дефектов начинается конденсация их в кластеры или дислокационные петли, которые образуют, по-видимому, структуру темных пятен.

Согласно приведенным результатам, процесс медленной деградации непрерывных инжекционных гетеролазеров с оксидной изоляцией полосковой области феноменологически может быть описан на основе следующих модельных представлений.

Генерированные в ходе работы прибора точечные межузельные дефекты под влиянием неоднородных упругих напряжений ускоренно диффундируют в направлении областей, где имеет место максимальное значение деформации растяжения кристаллической решетки полупроводника. Сосредоточиваясь преимущественно в этих областях, выполняющих роль стоков, точечные дефекты распределяются неоднородно в области полоскового окна. Постепенно концентрация дефектов в стоках возрастает, затем достигает, очевидно, критической величины, при которой начинаются процессы образования макродефектов (кластеров, петель) и темных линий  $\langle 110 \rangle$  вдоль краев полоскового окна. Области, из которых межузельные точечные дефекты ушли в стоки, дают на ТИЭЗ изображения светлые линии или полосы. Образование в дальнейшем темных пятен и линий  $\langle 110 \rangle$  связано или с разрастанием темных линий  $\langle 110 \rangle$ , или с накоплением точечных дефектов в локальных стоках, обусловленных флуктуациями содержания алюминия в твердых растворах в плоскости гетерограниц.

Таким образом, один из путей влияния на скорость деградации непрерывных гетеролазеров состоит в контроле неоднородных упругих напряжений, вводимых в лазерный кристалл конструктивными элементами полосковой области протекания тока или бокового ограничения излучения.

#### Список литературы

- [1] Petroff P., Hartman R. Z. // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 10. P. 3899—3903.
- [2] Yuasa T., Ogawa M., Endo K., Yonezu H. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 1. P. 119—120.
- [3] Kressel H., Ettenberg M., Zadany I. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. N 12. P. 305—308.
- [4] Lang D. V., Kimerling L. C. // Phys. Rev. Lett. 1974. V. 33. N 8. P. 489—492.

- [5] Свердлов М. И., Филиппченко В. Я., Чернов О. Л. // ФТП. 1986. Т. 20. В. 5. С. 799—805.
- [6] Goodwin A. R., Kirkby P. A., Davies I. G. A., Baulcomb R. S. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 34. N 5. P. 647—649.
- [7] Абдуллаев Г. Б., Джафаров Т. Д. Атомная диффузия в полупроводниковых структурах. М., 1981. 15 с.
- [8] Предводителей А. А., Тягунина Н. А., Зиненкова Г. М., Бушуева Г. В. Физика кристаллов с дефектами. М., 1986. 180 с.
- [9] Kirkby P. A., Selway P. R. // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 7. P. 4567—4579.
- [10] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости. М., 1965. 202 с.
- [11] Холлан Л., Холлейс Дж., Брайс Дж. // Актуальные проблемы материаловедения. М., 1983. С. 20.
- [12] Imai H., Isozumi K., Takusagawa M. // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. N 8. P. 489—492.
- [13] Donolato C. // Optik. 1978. V. 52. N 1. P. 19—36.

Научно-исследовательский институт  
знакосинтезирующей электроники  
«Волга»  
Саратов

Получена 25.06.1990  
Принята к печати 7.07.1990

