

## О КИНЕТИКЕ ДЕГРАДАЦИИ В ЛАЗЕРАХ НА ОСНОВЕ InGaAsP/InP

Б.И. Махсудов, Е.И. Найдич, Ф.Х. Хакимов

*Дан анализ кинетики деградации при медленном постепенном процессе, обусловленном преобразованиями на уровне точечных дефектов. Показано, что сравнение с имеющимися экспериментальными данными позволяет предсказывать технический ресурс лазеров на 1,3 мкм порядка  $10^6$  ч.*

Кинетика роста порогового тока при испытаниях лазеров вследствие объемной деградации люминесценции может быть рассчитана на основе моделей, в которых предполагается протекание дефектных реакций в условиях рабочего режима лазера. Одним из важных факторов является концентрация избыточных носителей  $N_e$ , причем скорость образования безызлучательных центров (NR-центров) пропорциональна  $N_e^m$ . Показатель  $m$  определяется числом рекомбинационных актов, требуемых для образования одного NR-центра.

Согласно [1], дефектные реакции могут иметь вид:



где  $S$  — исходный неактивный центр;  $R$  — излучательный центр.

В реакции (1) предполагается расход  $R$ -центров в процессе деградации, и если их концентрация  $N_{S0}$  ограничена (модель с "ограниченным источником дефектов"), то имеет место деградация с насыщением. Развитием этой модели является модель с "растущим источником дефектов", когда предполагается приток  $S$ -центров в излучающую область (например, миграция точечных дефектов из прилегающих частей объема полупроводника) или модель с "постоянным источником дефектов", в которой, согласно (2),  $S$ -центры не расходуются. В качестве  $S$ -центров могут выступать дислокации, включения, границы фаз или другие образования, способные генерировать большое число точечных дефектов или примесных центров. Такая модель дает неограниченное нарастание порога. В реакции (3) расходуется излучательный центр и расчет дает неизбежный срыв генерации по исчерпанию запаса излучательных центров.

Уравнение рекомбинационного баланса, включающее два канала рекомбинации — излучательный и безызлучательный, можно представить в виде  $G = V_R + \alpha N_e N_{NR}$ , где  $G$  — объемная скорость накачки (в инжекционном лазере с тонким активным слоем она равна  $j/ed$ , где  $d$  — толщина),  $V_R$  — скорость излучательной рекомбинации,  $\alpha$  — коэффициент безызлучательной рекомбинации,  $N_{NR}$  — концентрация безызлучательных центров.

Выделим в правой и левой части пороговую составляющую  $G_t + G^* = (V_{Rt} + \alpha N_{et} N_{NR}) + V^*$ , где  $G_t$  — пороговая скорость накачки,  $G^*$  — сверхпороговая добавка к скорости накачки,  $V_{Rt}$  — скорость излучательной рекомбинации на пороге,  $V^*$  — скорость вынужденной излучательной рекомбинации. Величины  $G^*$  и  $V^*$  всегда равны друг другу и баланс сводится к пороговому условию:  $G_t = V_{Rt} + \alpha N_{et} N_{NR}$ .

Пока добротность резонатора не деградирует, рост порога происходит за счет роста канала безызлучательной рекомбинации, т.е. увеличения  $N_{NR}$ . При этом  $V_{Rt}$  не изменяется, т.к. она однозначно связана с уровнем усиления в резонаторе, необходимым для начала генерации. При неизменной добротности  $V_{Rt} = \text{const}$  и  $N_e = \text{const}$ . Функцией времени является только  $N_{NR}$ .

Примем, что изменение концентрации безызлучательных центров носит релаксационный характер; исходная величина равна  $N_{NR}^0$ , окончательная —  $N_{NR}^\infty$ , а скорость процесса имеет вид

$$dN_{NR}/dt = -\gamma N_e^m (N_{NR} - N_{NR}^\infty),$$

где  $\gamma$  — коэффициент, описывающий скорость рекомбинационно-стимулированной реакции. Тогда

$$\Delta G_t / G_t(0) = [a N_e / G_t(0)] (N_{NR}^\infty - N_{NR}^0) (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4)$$

где  $\tau = 1/\gamma N_e^m$  — характерное время реакции,  $G_t(0)$  — исходная пороговая скорость накачки.

Если речь идет о реакции преобразования S-центров с исходной концентрацией  $N_{S0}$ , то формула (4) принимает вид:

$$\Delta G_t / G_t(0) = (A - 1) (1 - e^{-T}), \quad (5)$$

где  $A \approx 1 + (a N_{e0} N_{S0} / G_0)$ ,  $T = \gamma N_{e0}^m t$ . Эта формула дает насыщающуюся деградацию. Расширим модель на случай постоянного и растущего источника дефектов. Модель с постоянным источником дефектов сводится к предыдущей модели предположением  $N_S = N_{S0} = \text{const}$ . Тогда имеем линейный рост порога  $\Delta G_t / G_t(0) = (A - 1) T$ .

Модель с "растущим источником дефектов" является модификацией первой модели в части формулировки скорости изменения концентрации S-центров. Пусть имеется приток этих центров со скоростью  $\Gamma$ . Тогда  $dN_S/dt = \gamma N_e^m N_S + \Gamma$ . В результате вместо формулы (5) получим

$$\Delta G_t / G_t(0) = (A - 1) [(1 + q) (1 - e^{-T}) + qT], \quad (6)$$

где  $q = \Gamma / \gamma N_e^m N_{S0}$  — скорость притока S-центров.

Иллюстрация этих вариантов поведения дана на рис. 1. Наиболее быстрый рост порога идет по линейному закону. На ограниченных участках кривой можно получить сублинейные зависимости со степенным законом.

С целью сопоставления с экспериментальными данными по кинетике деградации рассмотрим результаты, полученные в данной работе на образцах низкороговых зарощенных мезаполосковых лазеров (типа ВН) с длиной волны излучения 1,3 мкм. Испытания велись при 100 °С при мощности излучения 0,5 мВт в течение 60 ч. На рис. 2 показаны зависимость приращения порогового тока  $\Delta I(t)/I(0)$  и расчет по формуле (6). Экстраполированное значение ресурса (до 2-кратного увеличения порога) у данного лазера составляет  $2,3 \cdot 10^3$  ч при 100 °С ( $\sim 3,45 \cdot 10^5$  ч при 25 °С). На рис. 3 даны расчетные кривые по формуле (6) с параметрами  $q$  от 0 до 0,1. Параметр  $A$  принят равным 1,18 для подбора расчетных кривых к

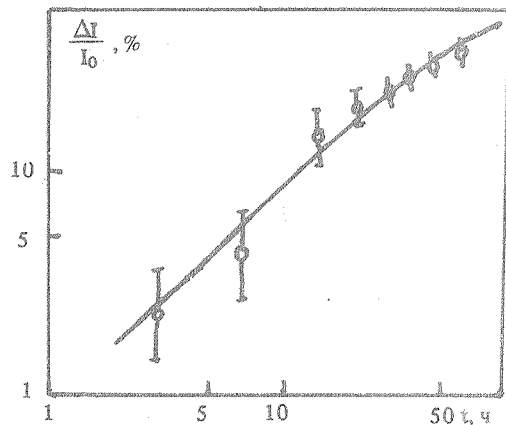
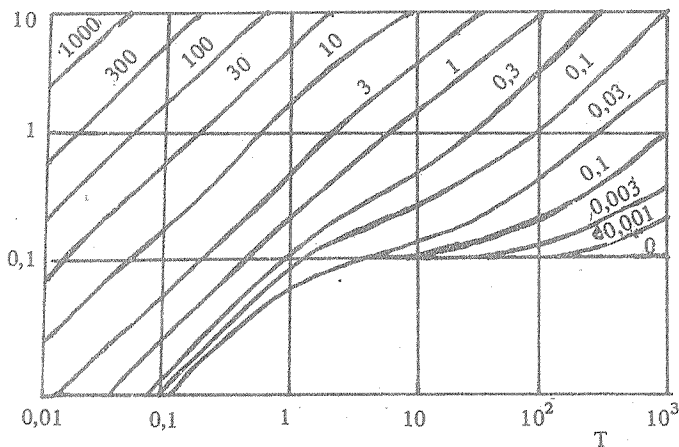


Рис. 1. Расчет кинетики роста порогового тока лазера согласно формуле (6) при  $A = 1,1$ ; значения  $q$  — указаны на рисунке.

Рис. 2. Расчетная кривая и экспериментальные точки (o) кинетики роста порога в лазере на основе InGaAsP/InP. Температура 100 °С; расчетные параметры:  $A = 1,8$ ;  $q = 0,01$ ;  $\tau = 100$  ч.

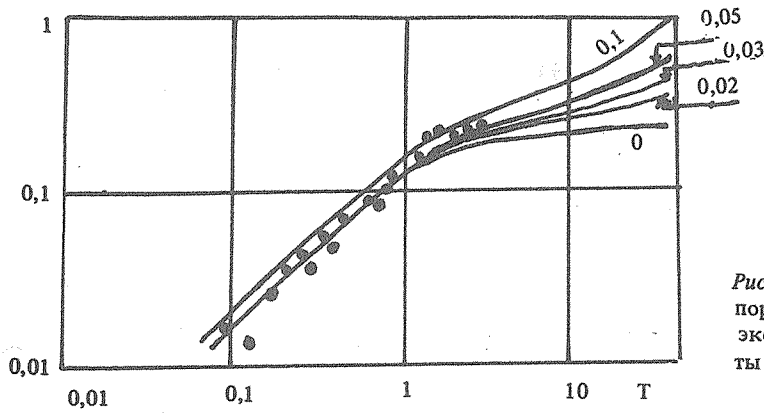


Рис. 3. Расчетные кривые кинетики приращения порогового тока при  $A = 1,18$ ;  $\tau = 6 \cdot 10^3$  ч и экспериментальные точки (●) для  $40^\circ\text{C}$  из работы /2/.

экспериментальным точкам, взятым из работы /2/ для лазеров типа ВН на диапазоне 1,3 мкм (температура испытаний  $40^\circ\text{C}$ ). В линейной области кривая с  $q = 0 \div 0,05$  удовлетворительно согласуется с экспериментальными точками. При  $T = 1$  опыт дает отклонение от линейного поведения на сублинейное (пропорциональное  $T^n$ , где  $n \approx 0,38$ , согласно /2/). Если следовать расчетной кривой с  $q = 0,05$ , то ресурс до 2-кратного превышения порога составляет  $T_1 = 83,4$  (при  $q = 0,03$   $T_1 = 131,3$ ; при  $q = 0,02$   $T_1 = 245,2$  и при  $q = 0,01$   $T_1 = 941,2$ ). Величина реального времени при  $T = 1$  в данном экспериментальном случае соответствует  $6 \cdot 10^3$  ч. Таким образом, предсказываемое значение ресурса составляет  $\sim 5 \cdot 10^5$  ч при  $40^\circ\text{C}$  ( $q = 0,05$ ); пересчет к  $22^\circ\text{C}$  дает ресурс около  $2 \cdot 10^6$  ч. По критерию 1,5-кратного превышения порога, использованного в /2/, отказ произойдет при  $T_{0,5} = 31,6$  ( $q = 0,05$ ), т.е. после наработки  $1,9 \cdot 10^5$  ч. Пересчет к  $22^\circ\text{C}$  дает при энергии активации  $E_a = 0,6$  эВ ресурс  $7,8 \cdot 10^5$  ч и к  $10^\circ\text{C}$  – ресурс  $2,22 \cdot 10^6$  ч (а не  $10^{10}$  ч, как было оценено в /2/ по степенному приближению). Если  $q = 0,02$ , то оценки ресурса для  $40^\circ\text{C}$ ,  $22^\circ\text{C}$  и  $10^\circ\text{C}$  будут соответственно  $5 \cdot 10^5$ ;  $2 \cdot 10^6$  и  $5,8 \cdot 10^6$  ч. При  $q = 0,01$  аналогичные оценки дают, соответственно,  $1,8 \cdot 10^6$ ,  $7,4 \cdot 10^6$  и  $2,1 \cdot 10^7$  ч. Из этих примеров видно, что прогноз ресурса после перегиба кинетической кривой существенно зависит от параметра  $q$  и в разобранным случае вероятные значения  $q$  составляют  $0,02 \div 0,05$ .

Авторы благодарны П.Г. Елисееву за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Елисеев П. Г. ФТП, 6, № 9, 1655 (1972).
2. Tsuji S. et al. Opto-Electron., 24, 25 (1985).

Поступила в редакцию 25 декабря 1986 г.