

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ НЕПРЕРЫВНЫХ ГЕТЕРОЛАЗЕРОВ

П.Г. Елисеев, А.А. Кочетков

На основе статистического анализа выведены выражения, описывающие изменение мощности лазерного излучения и порогового тока при деградации гетеролазеров.

Одним из перспективных подходов изучения деградационных процессов, происходящих в гетеролазерах, является статистический анализ изменения параметров [1-4]. Он позволил ввести в термоактивационное выражение для наработки начальное значение параметра и критерий отказа, а также определить условие проведения достоверных ускоренных испытаний гетеролазеров при повышенных температурах [3]. В настоящее время появилась актуальная необходимость учитывать в этом выражении значение тока накачки для режимов: стабилизации мощности лазерного излучения, постоянного во времени уровня возбуждения лазерной структуры.

В соответствии с принятым подходом термоактивационное выражение для наработки, учитывающее начальное значение параметра и критерий отказа, определяется следующим образом [3]:

$$t_\gamma = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT} + \frac{|m - x_k|}{c} + \sigma_0 z_0\right), \quad \gamma = 100 [1 - \Phi^*(z_0)], \quad (1)$$

где t_γ — величина гамма-процентного ресурса; τ_0 — характеристическое время; E_a — энергия активации; k — постоянная Больцмана; T — температура активной области; m — начальное значение параметра, по которому определен критерий годности; x_k — критерий отказа; c — постоянная; σ_0^2 — дисперсия распределения времени отказов; z_0 — аргумент нормальной функции распределения $\Phi^*(z_0)$.

Величина $\tau_0 \exp(E_a/kT)$ соответствует моменту испытаний, когда плотность дефектов, обусловленных деградацией и влияющих на скорость рекомбинации, становится сравнимой с количеством исходных дефектов активной области гетеролазера. Она зависит от уровня токовой накачки и мощности лазерного излучения:

$$\tau_0 = \tau_{01} \tau_2 \tau_3, \quad \tau_{01} = \text{const},$$

$$\tau_2^{-1} = (1/t) \int_0^t \tau_{02}^{-1} dt', \quad \tau_3^{-1} = (1/t) \int_0^t \tau_{03}^{-1} dt', \quad \tau_{02} = \tau_{02}(I), \quad \tau_{03} = \tau_{03}(P), \quad (2)$$

где τ_{02} и τ_{03} — характеристические времена для режимов постоянного тока накачки и постоянной мощности лазерного излучения; t — время ресурсных испытаний; P — мощность лазерного излучения; I — ток накачки.

Отметим, что в данной работе рассматривается старение при плотности мощности лазерного излучения не более 1 МВт/см^2 . В этом случае можно считать $\tau_3 \approx \tau_{03} = \text{const}$, так как мощность лазерного излучения практически не влияет на ресурсные возможности гетеролазеров. Влияние тока накачки обсуждалось в работах [2,5], в которых приведены степенная и экспоненциальная зависимости наработки от указанного параметра. Выбор определенного вида зависимости затруднен, поэтому в предлагаемой модели будут рассмотрены оба случая. Для степенной зависимости наработки от тока накачки ($\tau_{02} = \bar{I}_0^{-n}$, $n > 0$) величина τ_2 определяется с помощью следующего выражения:

$$\int \frac{dx}{\ln n x} = c^n \exp\left(\frac{\bar{I}_0}{c}\right) \frac{\tau_{02}}{\tau_{00}} t + \text{const}, \quad x = \frac{t}{\tau_0} \exp\left(\frac{\bar{I}_0}{c} - \frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где \bar{I}_0 – среднее значение тока накачки для рассматриваемой выборки лазеров в начальный момент времени; $\tau_{00} = \tau_{01}\tau_{02}\tau_{03} \exp(E_a/kT)$; $P = \text{const}$.

Уравнение (3) показывает, что предположение о степенной зависимости наработки от тока накачки не приводит к простой процедуре определения τ_2 . При нецелых n выражение (3) не может быть решено с помощью рекуррентного соотношения, что еще больше усложняет нахождение τ_2 .

Допущение об экспоненциальной зависимости больше соответствует термоактивационному выражению для наработки: В этом случае удается получить аналитическое выражение, описывающее уменьшение величины τ_2 во времени:

$$\tau_{02} = \exp(-a\bar{I}_0), \quad a = \text{const} > 0,$$

$$\tau_2 = \tau_{02} \frac{t}{\tau_{00}} \exp\left(-\frac{t - \tau_{00}}{\tau_{00}}\right), \quad ac = 1, \quad (4)$$

$$\tau_2 = \tau_{02} \frac{t}{\tau_{00}} \left[\frac{t - \tau_{00}}{\tau_{00}} (1 - ac) + 1 \right]^{1/(ac-1)}, \quad ac < 1.$$

Экспериментальная проверка рассматриваемой статистической модели была проведена при температуре ~ 340 К в режимах постоянного тока накачки и постоянной мощности лазерного излучения. Было найдено, что в первом режиме среднее значение мощности лазерного излучения уменьшается при наработке в соответствии с (1):

$$\bar{P} = \bar{P}_0 - c_p \ln t + c_p \ln \tau_{00}; \quad \tau_{00} \approx 10\tau; \quad \bar{P}_0 = 1,22 \text{ мВт}; \quad c_p = 0,125 \text{ мВт}. \quad (5)$$

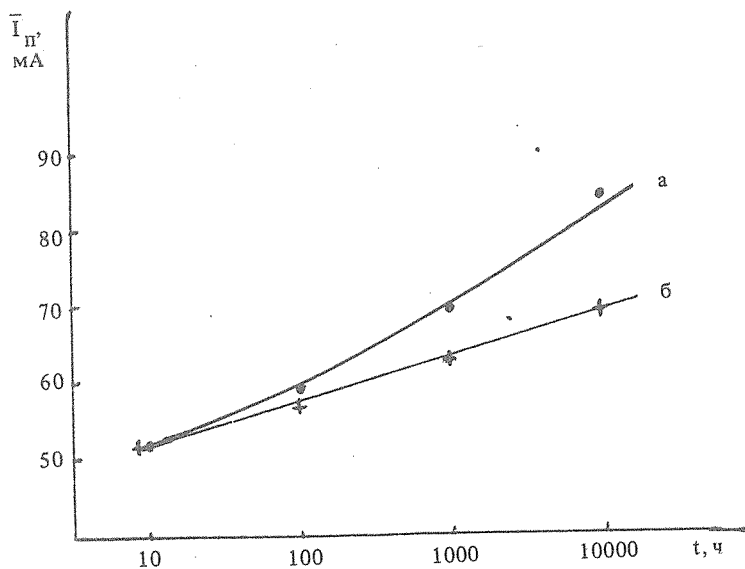


Рис. 1. Зависимость среднего значения (по образцам) порогового тока от времени при постоянной мощности (а) и постоянном токе накачки (б): точки – экспериментальные значения, сплошные линии соответствуют расчету по формулам (7) и (6). Испытания проведены на отдельных выборках (по 10 штук каждая) мезаполосковых AlGaAs гетеролазеров.

Ресурсные испытания гетеролазеров в режиме постоянной мощности показали (рис. 1), что зависимость $\bar{I}_П$ от времени в течение 10^4 ч с достаточной степенью точности описывается выражением (4) при $a = 0,2 \text{ мА}^{-1}$ и $c_p = 2,5 \text{ мА}$. Такие же значения параметров получены для постоянного уровня накачки. Таким образом, можно сказать, что предполагаемая модель позволяет оценивать изменение порогового тока для режимов постоянного тока накачки и постоянной мощности лазерного излучения:

$$\bar{I}_{\Pi} = \bar{I}_{\Pi 0} + c_{\Pi} \ln t - c_{\Pi} \ln \tau_{00}; \quad \tau_{00} = \tau_{01} \tau_{03} \exp(E_a/kT - a\bar{I}_0); \quad \bar{I}_0 = \text{const},$$

$$c_{\Pi} = 2,5 \text{ мА}, \quad a = 0,2 \text{ мА}^{-1}, \quad \tau_{00} \approx 10 \text{ ч.} \quad (6)$$

$$\bar{I}_{\Pi} = \bar{I}_{\Pi 0} + c_{\Pi} \ln t - c_{\Pi} \ln \tau; \quad \tau = t \left[\frac{t - \tau_{00}}{\tau_{00}} (1 - ac) + 1 \right]^{1/(ac-1)}. \quad (7)$$

Следует отметить, что представление τ_{02} в виде степенной функции не соответствует характеру деградации гетеролазеров, так как даже при $n = 3$ расчетная кривая для τ_{02} не совпадает с экспериментальными данными. Достаточно хорошее совпадение было получено для экспоненциальной зависимости τ_{02} от тока накачки, что позволяет сделать вывод о практической достоверности этой модели старения гетеролазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Joyce W. B., Dixon R. W., Hartman R. L. Appl. Phys. Lett., 28, 684 (1976).
2. Ettenberg M. J. Appl. Phys., 50, 195 (1979).
3. Елисеев П. Г. Кочетков А. А. Квантовая электроника, 10, 2118 (1983).
4. Tsuji S. et al. ОРТО, № 24, 25 (1985).
5. Mizuishi K. et al. J. Appl. Phys., 50, 6668 (1979).

Поступила в редакцию 14 января 1987 г.