PACS 42.55.Px; 42.60.Lh; 94.20wq

Оценка надежности гетеролазеров при их старении в процессе облучения потоком быстрых частиц

А.П.Богатов, А.А.Кочетков, В.П.Коняев

Приведены расчетные соотношения для оценки надежности гетеролазеров при их работе в условиях облучения, основанные на вероятностном анализе. В качестве физической причины выхода из строя приборов рассматривается накопление дефектов в их активной области.

***Ключевые слова**: гетеролазеры, дефекты, надежность, радиационное облучение.*

1. Введение

В настоящее время гетеролазеры (ГЛ) эффективно используются при решении широкого круга технических задач. Важное значение в ряде случаев имеет определение надежности ГЛ при естественном воздействии быстрых частиц, например в открытом космическом пространстве. Это в свою очередь требует разработки методов, позволяющих оценивать вероятность безотказной работы ГЛ в процессе радиационного облучения.

Ранее было показано, что эффективным методом определения ресурса работы непрерывных ГЛ является применение вероятностных оценок их «старения» (деградации) [1 – 6]. Ниже рассматривается подход, позволяющий оценивать надежность работы ГЛ в случае их деградации при одновременном влиянии на ее скорость как времени работы, так и доз облучения различными типами быстрых частиц.

Сложившееся к настоящему времени представление о статистике отказов ГЛ как о наиболее адекватном подходе к прогнозированию надежности основано на распределении Вейбулла (см., напр., работы [2, 5, 6] и ссылки в них). Кумулятивное распределение в рамках статистики Вейбулла выражается как $1 - R(x)$, где функция

$$R(x) = \begin{cases} \exp[-(x/\theta)^{\beta}] & \text{при} \;\; x \geqslant 0, \\ 0 & \text{при} \;\; x < 0; \end{cases} \tag{1}$$

$\theta, \beta > 0$ – численные параметры. В рамках этого подхода вероятность сохранения работоспособности ГЛ, например в течение времени работы $t \geqslant 0$, есть

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}\right], \tag{2}$$

тогда как вероятность отказа за это время составит $1 - R(t)$.

А.П.Богатов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: bogatov@sci.lebedev.ru
А.А.Кочетков, В.П.Коняев. ФГУП «НИИ "Полюс" им. М.Ф.Стельмаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3;
e-mail: vpkonyaev@mail.ru

Поступила в редакцию 7 декабря 2010 г.

Параметры распределения θ и β определяются исключительно эмпирически на основе испытаний серии гетеролазеров на отказ, вне связи их с какими-либо процессами, имеющими место в гетеролазере. Соответственно в ряде случаев некоторые очень важные условия работы гетеролазера остаются вне поля зрения. Это, например, работа ГЛ в условиях космического пространства, где остро стоит вопрос о его надежности. Данные условия характеризуются дополнительным (по отношению к земным условиям) воздействием проникающего космического излучения, что приводит к ускоренному старению ГЛ, повышая вероятность выхода его из строя. В связи с этим целью настоящей работы является анализ надежности ГЛ с точки зрения указанных дополнительных воздействий, исходя из физических представлений о его старении.

2. Распределение отказов

Вначале рассмотрим свойства распределения Вейбулла и физический смысл входящих в это распределение параметров. Согласно уравнению (2) вероятность отказа гетеролазера в течение достаточно малого интервала времени Δt (между t_0 и $t_0 + \Delta t$) есть

$$r(t_0)\Delta t = -\left.\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\right|_{t=t_0} \Delta t = R(t_0)\left(\frac{t_0}{\theta}\right)^{\beta-1}\left(\frac{\beta}{\theta}\right)\Delta t. \tag{3}$$

Для частных случаев $\beta = 1$ и $\beta = 2$ распределения плотности вероятности $r(t)$ (3) являются хорошо известными экспоненциальным и рэлеевским распределениями соответственно.

Распределение $r(t_0)$ характеризует условную вероятность события отказа, в котором условием служит вероятность $R(t_0)$ работоспособности образца к предшествующему моменту времени $t \leqslant t_0$. Вероятность v выхода из строя работающего образца за период от t_0 до $t_0 + \Delta t$ такова:

$$v = \frac{r(t_0)\Delta t}{R(t_0)} = -\frac{1}{R}\frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}t}\Delta t = \left(\frac{\beta}{\theta}\right) \times \left(\frac{t_0}{\theta}\right)^{\beta-1}\Delta t = FR(t_0)\Delta t, \tag{4}$$

где F – скорость выхода приборов из строя. Из равенства (4) следует, что для распределения Вейсбулла F в общем случае представляет собой степенную функцию времени t с показателем степени $\beta = 1$. Очевидно, что для $\beta = 1$ скорость отказов $F \equiv 1/\theta$ и не зависит от времени. Физически система (прибор, ГЛ), описываемая экспоненциальным законом распределения $r(t)$, вообще не испытывает старения параметров. Другими словами, вероятность перехода $1/\theta$ этой системы из одного состояния (исправного) в другое (неисправное) в единицу времени определяется только внутренними параметрами этой системы, которые в свою очередь не зависят от времени, т. е. не стареют. Хорошо известно, что этим свойством обладают такие элементарные системы, как атом или ядро, находящиеся в возбужденном состоянии. Вероятности их спонтанных переходов в основное состояние определяются соответствующими матричными элементами и мировыми постоянными и также не зависят от времени. В результате мы имеем дело с экспоненциальным законом распределения для этих элементарных систем, находящихся в возбужденном состоянии. Понятно, что если внутренние параметры системы стареют, то F увеличивается со временем и закон распределения (2) должен иметь показатель степени $\beta > 1$.

Если характеризовать старение ГЛ как накопление внутренних дефектов с некоторой эффективной условной скоростью q, то состояние деградации ГЛ ко времени t будет зависеть от полного количества этих накопленных дефектов с условной мерой Q. В качестве таких дефектов могут выступать дислокации в активной области, ее микроскопические дефектные участки, образовавшиеся за счет термоупругих и других механических напряжений, кластеры в виде скопления дефектов кристаллической решетки, например вакансии, междоузельные атомы, мигрировавшие из поверхности в глубь активной области, нарушения стехиометрии и т. д. Их условной мерой Q может служить, например, полное количество дефектов или полный объем, занимаемый дефектами, накопленными за время t работы ГЛ. Очевидно лишь то, что в процессе старения их мера растет со временем, например как

$$Q = qt. \tag{5}$$

Также очевидно, что чем больше количество накопленных дефектов, тем выше F. Однако каков конкретный вид этой зависимости, например степенной или какой-либо другой на данный момент времени, сказать трудно. Конечно, наиболее простым вариантом зависимости является линейный. Во всяком случае, при достаточно малых Q (что вполне допустимо для высококачественных и надежных ГЛ) функцию $F(Q)$ можно выразить в виде степенного ряда как разложение в ряд Тейлора, сохранив при этом m первых степеней:

$$F \approx F_0 + \sum_{n=1}^{m} a_n Q^n = F_0 + \sum_{n=1}^{m} a_n (qt)^n$$
$$= F_0 + \sum_{n=1}^{m} \alpha_n t^n, \tag{6}$$
$$a_n = \frac{1}{n!}\frac{\mathrm{d}^{(n)}F}{\mathrm{d}Q^{(n)}}\bigg|_{Q=0}, \quad \alpha_n = a_n (q)^n,$$

где F_0 – постоянное значение, не зависящее от Q, а значит, и от времени t. Понятно, что распределение Вейбулла реализуется, когда в правой части (6) доминирует какое-то одно из слагаемых, пропорциональное $t^{(\beta-1)}$.

Далее заметим, что на начальном этапе испытаний гетеролазеров всегда можно найти такой малый временной интервал t, при котором выполнено неравенство

$$F_0 >> \alpha_n t^n.$$

В этом временном интервале статистика отказов будет иметь распределение, близкое к экспоненциальному, поскольку F почти постоянно. Этот факт соответствует экспериментальным данным работы [6]. На практике такой временной интервал испытаний используют для «тренинга» лазеров с целью отбраковки заведомо непригодных образцов. Действительно, поскольку F_0 не зависит от времени, то его значение определяется исключительно количеством Q_0 тех «вмороженных» дефектов, которые, образовавшись в процессе изготовления лазера, присутствуют уже изначально.

Проанализируем случай старения ГЛ при воздействии проникающего излучения. Каждый i-й сорт проникающего излучения с интенсивностью $I^{(i)}$ создает свои дефекты $Q^{(i)}$, которые вносят аддитивный вклад в F, характеризуемый входящим в уравнение (6) индивидуальным коэффициентом $a_n^{(i)}$. Более того, скорость $q^{(i)}$, с которой образуются эти дефекты, тоже будет индивидуальна для каждого i-го типа воздействия. Естественно полагать, что $q^{(i)}$ пропорционально интенсивности воздействия $I^{(i)}$ с коэффициентом пропорциональности $\gamma^{(i)}$:

$$q^{(i)} = \gamma^{(i)} I^{(i)}. \tag{7}$$

В результате при комбинированном воздействии нескольких механизмов старения значения α_n , фигурирующие в (6), будут иметь следующий вид:

$$\alpha_n = \sum_i \alpha_n^{(i)}, \quad \alpha_n^{(i)} = a_n^{(i)} (\gamma^{(i)} I^{(i)})^n. \tag{8}$$

Окончательно для вероятности безотказной работы в течение времени t получим:

$$R(t) = \exp(-\xi), \tag{9}$$

где

$$\xi = t \sum_{n=1}^{m} \frac{\alpha_n}{n} t^n. \tag{10}$$

Формула (10) относится к уже отобранным образцам ГЛ, прошедшим через «тренинг», поэтому ξ не содержит члена первой степени по t, связанного с F_0. Каждый i-й член в сумме (8) для α_n определяется конкретным механизмом старения. Понятно, что первый и обязательно присутствующий член в этих суммах с $i = 1$ обусловлен работой лазера. Таким образом, $\gamma^{(1)}$ в (7) является коэффициентом пропорциональности между скоростью появления дефектов $q^{(1)}$ вследствие работы лазера и, например, током накачки лазера $I^{(1)}$.

В отсутствие проникающего излучения скоростью образования дефектов действительно управляет ток накачки. Он определяет как температуру, так и объемную плотность энергии лазерного излучения в резонаторе лазера, от которых в свою очередь зависит скорость образования дефектов, приводящих к катастрофической деградации и выходу ГЛ из строя [7]. По этой причине величину $\gamma^{(1)}$ в формуле (7) целесообразно рассматривать именно как коэффициент пропорциональности между $q^{(1)}$ и $I^{(1)}$. Остальные $q^{(i)}$ с $i \geqslant 2$ – это коэффициенты, характеризующие рост дефектов из-за существования проникающего внешнего излучения.

Наличие разных степеней времени t в формуле (10) приводит к тому, что совместное распределение (9) уже не является распределением Вейбулла. Тем не менее, если на практике полином ξ опять аппроксимировать лишь доминирующим членом степени n, то в результате будем иметь для R распределение Вейбулла (2) с целочисленным значением $\beta = n + 1$ и $\theta = (n/\alpha_n)^{1/n+1}$. В этой связи заметим, что использование дробных значений β для подгонки экспериментальных данных к распределению Вейбулла может быть результатом того, что ξ неудовлетворительно аппроксимируется только одним членом с конкретной степенью n, т. е. тем, что эффективное количество дефектов Q увеличивается как дробная степень времени t.

Конечно, коэффициенты полинома α_n могут быть установлены только из эксперимента, поскольку, как уже было отмечено, в настоящий момент нет полного понимания конкретной физической природы зависимости $\mathrm{FR}(Q)$. Тем не менее очевидно, что в эту зависимость в качестве параметров войдут величины, характеризующие такие условия работы ГЛ, как, например, температура хладопровода, а в качестве аргументов – значения $I^{(i)}$.

Рассмотрим теперь возможность определения коэффициентов α_n из экспериментальных данных, полученных при испытаниях ГЛ на надежность в присутствии проникающего излучения. Если изначально опираться на статистику Вейбулла, то в принципе можно воспользоваться экспериментальными данными по средней наработке лазера на отказ (ожидаемый срок службы) T и по дисперсии этой величины $\overline{\delta T^2}$, которые определятся как

$$T \approx \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} t_k r(t_k) \approx \frac{\theta}{\beta}\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right), \tag{11}$$

$$\overline{\delta T^2} \approx \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(t_k - T)^2 r(t_k)$$

$$\approx \theta^2\left[\frac{2}{\beta}\Gamma\left(\frac{2}{\beta}\right) - \frac{1}{\beta^2}\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)\right], \tag{12}$$

где N – число образцов ГЛ, участвующих в испытаниях; t_k – время выхода из строя k-го образца; $\Gamma(...)$ – гамма-функция.

Из (11) и (12) можно видеть, что T и $\overline{\delta T^2}$ независимы, поэтому, зная их значения из эксперимента, можно найти вначале β, используя соотношение

$$\frac{\overline{\delta T^2}}{T^2} \approx \left[2\beta\frac{\Gamma(2/\beta)}{\Gamma(1/\beta)} - 1\right]\left[\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)\right]^{-1}, \tag{13}$$

а затем и θ из (11) с помощью уже известного значения β.

Для экспериментальных значений T и $\overline{\delta T^2}$, найденных в измерениях как в присутствии проникающего излучения, так и в его отсутствие, можно выделить отдельно каждую величину $\theta^{(i)}$.

Как уже было отмечено выше в рамках статистики Вейбулла, вследствие различных механизмов F характеризуется степенной зависимостью с тем же показателем степени и, следовательно, значением β. Это, конечно, жесткое требование, и оно означает, что отношение $\overline{\delta T^2}/T^2$ одинаково для всех типов старения, поэтому в формулах (6) индекс суммирования по n отсутствует. В этом случае мы опустим n, заменив в формулах степень n на $\beta - 1$.

Испытывая ГЛ поочередно в условиях каждого из воздействий, характеризуемого эталонной интенсивностью $I_0^{(i)}$, можно указанным выше способом найти $\theta_0^{(i)}$, а затем и $\gamma^{(i)}$, фигурирующее в (7), согласно соотношению

$$\gamma^{(i)} = (\beta - 1)[\theta_0^{(i)}]^{-\beta}[I_0^{(i)}]^{1-\beta}. \tag{14}$$

Окончательное значение θ для совместного распределения и произвольных интенсивностей воздействия $I^{(i)}$ имеет следующий вид:

$$\theta = \left[\sum_i \theta_0^{(i)^{-\beta}}\left(\frac{I^{(i)}}{I_0^{(i)}}\right)^{\beta-1}\right]^{-1/\beta}. \tag{15}$$

Таким образом мы можем полностью определить двухпараметрическое (θ и β) распределение Вейбулла (2), а значит, вероятность отказа для ГЛ в присутствии источников внешнего облучения с произвольной комбинацией интенсивностей $I^{(i)}$.

Помимо жестких требований к возможности описания надежности в рамках статистики Вейбулла и в условиях комбинированного облучения, о которых говорилось выше, следует также отметить некоторые экспериментальные трудности, связанные с измерениями T и $\overline{\delta T^2}$. Они обусловлены тем, что время, необходимое для их достаточно точного измерения, велико, поскольку возможный диапазон изменения $\overline{\delta T^2}/T^2$ в рамках статистики Вейбулла мал и при изменении β от 1 до ∞ составляет согласно (13) $0.71 \lesssim \overline{\delta T^2}/T^2 < 1$. Это время должно быть заведомо больше T, что особенно проблематично в случае высоконадежных ГЛ, для которых T даже в режиме ускоренной деградации при повышенных температурах может превышать несколько лет. В этом отношении, по-видимому, может оказаться полезным нахождение величин α_n, непосредственно входящих в уравнение (6) для F. Экспериментальным образом можно найти $F(t_k)$:

$$F(t_k) \approx \frac{\Delta N_k}{N(t_k)\Delta t}, \tag{16}$$

где ΔN_k – число вышедших из строя образцов в интервале времени от t_k до $t_k + \Delta t$; $N(t_k)$ – число работающих образцов к моменту времени t_k. Заметим, что в силу практической важности параметра F для его измерения часто используют специально введенную единицу 1FIT, равную 10^{-9} ч$^{-1}$. При достаточном числе измерений $F(t_k)$ для временной последовательности t_k можно найти зависимость $F(t)$ путем интерполяции значений $F(t_k)$ полиномом некоторой степени m и таким образом определить коэффициенты α_n. Далее, находя $\tilde{\alpha}_n^{(i)}$ для каждого конкретного случая облучения с эталонной интенсивностью $I_0^{(i)}$, как описано выше, нетрудно найти и полином ξ, фигурирующий в (9), для определенных условий работы ГЛ, характеризуемых значениями $I^{(i)}$:

$$\xi = t\sum_{n=1}^{m}\frac{1}{n}t^{n}\left[\sum_{i}\tilde{\alpha}_{n}^{(i)}\left(\frac{I^{(i)}}{I_{0}^{(i)}}\right)^{n}\right]. \tag{17}$$

Таким образом, вероятность R безотказной работы в течение времени t выразится соотношением (9), в котором ξ определяется уравнением (17).

3. Заключение

В работе найдены зависимости вероятности безотказной работы гетеролазеров как функции времени и интенсивности проникающего облучения. Подход, использованный для определения этих зависимостей, основан на том обстоятельстве, что физической причиной выхода гетеролазера из строя является накопление в нем дефектов. На основе тестовых испытаний образцов предложены способы определения численных коэффициентов, характеризующих скорость старения ГЛ. Показано, что распределение Вейбулла, часто используемое для описания статистики отказов гетеролазера, при одновременном воздействии нескольких механизмов старения не всегда является адекватным.

1. Елисеев П.Г., Кочетков А.А. *Квантовая электроника*, **10** (10), 2118 (1983).
2. Елисеев П.Г. *Квантовая электроника*, **13** (9), 1749 (1986).
3. Кочетков А.А., Коняев В.П, Сорокин В.М., Твердов С.В. *Квантовая электроника*, **23** (2), 112 (1996).
4. Кочетков А.А., Коняев В.П. *Квантовая электроника*, **31** (5), 417 (2001).
5. Jun-ichi Hashimoto, Ichiro Yoshida, Michio Murata, *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1), 66 (1997).
6. Ling Bao, Jun Wang, Mark DeVitto, Dapeng Xu, Damian Wise, Paul Leisher, Mike Grimshaw, Weimin Dong, Shiguo Zhang, Kirk Price, Daming Li, Chendong Bai, Steve Patterson, Rob Martinsen. http://www.nlight.net/nlight-files/file/technical_ papers, p.1 – 10, January, 2010.
7. Мифтахутдинов Д.Р., Богатов А.П., Дракин А.Е. *Квантовая электроника*, **40** (7),589 (2010).