

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.3>

УДК: 620.169.1

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ СУПЕРЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДИОДОВ

Ф.М. Маковеев

АНТАРЕС
410012, г. Саратов
ул. им. Радищева А.Н., 27

Статья поступила в редакцию 16 июня 2023 г.

Аннотация. Суперлюминесцентные диоды (СЛД) применяются, главным образом, в оптической когерентной томографии и в волоконно-оптических гироскопах, где требуются источники с малой длиной когерентности и относительно высокой мощностью излучения. СЛД являются, как правило, наименее надежным, при этом крайне важным для обеспечения работоспособности, устройством, входящим в состав упомянутых приборов. В статье изучается вопрос оценки ресурсной надежности СЛД для анализа возможности повышения точности приборов на их основе при длительной эксплуатации. Работа представляет собой краткий обзор достижений в области анализа ресурса квантовых оптических полупроводниковых устройств, получение общего представления о надежности суперлюминесцентных источников излучения, изменения их параметров в результате деградации, рассмотрение путей решения проблем, связанных с их спектральной деградацией.

Ключевые слова: суперлюминесцентный диод, надежность, ресурсные испытания, $1/f$ шум, уравнение Аррениуса.

Автор для переписки: Маковеев Федор Михайлович, makoveev33@gmail.com

Введение

Известно, что суперлюминесцентные источники излучения представляют собой инжекционный полупроводниковый лазер, у которого на стенках активного канала отсутствуют отражающие поверхности (резонатор Фабри-Перо), чем достигается низкое значение коэффициента отражения. Как правило, на них наносятся поглощающее покрытие с одной стороны (либо скол торцевой грани под углом, вносящим потери) и просветляющее, с другой, что приводит к однократному прохождению излучения через активную среду и, в результате, подавляет генерацию вынужденного излучения, вносящего когерентную составляющую в выходной спектр излучения [1]. Тогда, для получения сопоставимой мощности с полупроводниковыми лазерными источниками и при одинаковой длине активного канала, в СЛД необходимо компенсировать потерю вклада вынужденного излучения повышением тока инжекции, что приводит к сокращению их срока службы.

1. Неразрушающий контроль

1.1. $1/f$ шум как метод оценки надежности

В 80-х годах прошлого столетия активно поднимался вопрос о неразрушающей оценке надежности полупроводниковых приборов. Один из таких методов обсуждался в работах [2] [3].

Большой толчок к развитию этого направления дало исследование р-п переходов полупроводниковых диодов Т.Т.М. Крейнпенинга в 1980 году [4]. Результаты его работы показали, что при низкой частоте фликкер-шум ($1/f$ шум) обратно пропорционален времени жизни неосновных носителей или, что тоже самое, пропорционально скорости контактной рекомбинации. Это явление может прямо указывать на наличие кристаллографических дефектов и глубоких центров рекомбинации.

Примечательно, что данную зависимость можно наблюдать при достаточно больших токах из-за возрастающих флуктуаций сопротивления

между областью базы (шириной более диффузионной длины) и металлургическим контактом. Соответственно, чем выше ток, тем выше и граничная частота, после достижения которой, белый шум преобладает над $1/f$ шумом.

Спектр шума $1/f$ может (при сравнительно больших токах) выражаться следующим образом:

$$S_v = \frac{\alpha I^2 R_S^2}{f N_{eff}},$$

где α – эмпирическая константа порядка 10^{-3} ; R_S – последовательное сопротивление (зависит от качества контактов); N_{eff} – количество «эффективных» носителей заряда в области сильных электрических полей; f – частота.

Спектральную плотность шума S_v эмпирически можно найти с помощью полосового фильтра с центральной частотой f деленной на полосу пропускания f_{bw} . Такой метод, по сравнению с измерением последовательного сопротивления напрямую, имеет преимущество в виде большей чувствительности.

В работе [2] показан пример исследования надежности лазерных диодов с помощью нахождения спектральной плотности $1/f$ шума. Спектральная плотность шума была найдена для двух групп лазерных диодов. Первая группа работала при низких токах смещения ($I = 20 \mu A$), вторая – при высоких ($I = 5 mA$). Кроме того, автором был применен метод верификации результатов на основе работы [5]. Полученные им результаты несколько озадачивают, так как плотность шума S_v при меньшем токе оказалась значительно выше у всех образцов (указано около 70 штук), что может говорить о наличии высокого уровня белого шума в выходном спектре даже не смотря на малую частоту ($f = 2,5 Hz$). Тем не менее, в большинстве случаев, результаты обеих групп согласуются между собой, а также согласуются с результатами эксперимента. Таблица с количественной оценкой S_v представлена в работе для каждого образца отдельно.

1.2. Уравнение Аррениуса для экстраполяции эмпирических результатов

Существуют другие подходы к оценке надежности без применения разрушительных воздействий. В следующем методе предлагается проводить испытание в течение короткого периода времени и экстраполировать полученные результаты для определения примерного срока жизни испытуемого изделия. Например, сообщается о модифицированном для данных условий уравнение Аррениуса. Изначальное уравнение Аррениуса, как формула температуры, была преобразована в работе [6] Дж. Блэком для описания долговечности соединений металл – полупроводник:

$$\frac{\omega t}{MTTF} = AJ^2 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$

где $MTTF$ – медианное время на отказ; A – константа, включающая в себя некоторые физические свойства металлов; J – плотность тока; E_a – энергия активации; k – константа Больцмана; T – температура пленки металла; ω и t – ширина и толщина пленки металла, соответственно.

После чего, с помощью данной формулы стала возможна также оценка и полупроводниковых соединений. Преобразованная формула для полупроводников представлена в работе [7]:

$$MTTF = AJ^{-n} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right),$$

где: A – константа; J – плотность тока; n – показатель тока; T – температура перехода.

Данный метод хорошо подходит для испытаний при малых токах и температурах, что обычно требует большого количества времени и увеличивает соотношение сигнал/шум. Немаловажное значение здесь играет нахождение энергии активации. Более высокая энергия активации указывает на вероятность большего срока службы и обычно она находится в пределах 0,47 - 1,7 эВ.

В дополнение к уравнению Аррениусу была предложена авторегрессионная модель скрытой периодичности (ARHP – auto regression-hidden periodicity). Данная модель предполагает рассмотрение отдельно суммы

сезонных (S_t) и остаточных (ε_t) составляющих данных во временном ряду вида [8]

$$y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t, = 1, 2, \dots,$$

где T_t – трендовая составляющая; S_t – сезонная составляющая; ε_t – остаточная составляющая

2. Анализ ресурсных испытаний

Существует ряд работ по исследованию надежности суперлюминесцентных диодов [9][10], в том числе отечественных [11][12][13].

В работе [9] представлены результаты ускоренного испытания на долговечность в течение 5000 часов InGaAsP суперлюминесцентного диода. Долговечность диодов была оценена при помощи формулы:

$$P(t) = P_0 \exp(-\beta t),$$

где P_0 – начальное значение мощности излучения; β – коэффициент деградации; t – время работы.

Коэффициент деградации рассчитан по упомянутому ранее уравнению Аррениуса. Здесь, а также в дальнейших рассмотренных работах, критерием отказа признается спад выходной мощности, либо повышение тока инжекции (в зависимости от того какой режим выбран для испытания: с автоматическим контролем тока, либо автоматическим контролем мощности) на 50%.

Исследования на температурную устойчивость [10] показывают, что сильнее зависимы от температуры окружающей среды источники с малой длиной активного канала. Очевидно, что с ростом температуры растет и инжекционный ток, либо, при неизменном токе, падает мощность излучения. Кроме того, результаты показывают, что при изменении температуры изменяется не только выходная мощность излучения, но также и центральная длина волны и, вместе с тем, величина FWHM (full width at half maximum), то есть полуширина спектра. Стало быть, при повышении температуры вклад вынужденного излучения еще больше уменьшается, а спонтанного возрастает и наоборот.

Между тем, авторы не рассматривали такой процесс как старение или деградация кристалла суперлюминесцентного диода. В работе [11] представлены результаты ускоренного старения при повышенных температурах 8 образцов СЛД. Успешно применен метод расчета времени жизни каждого образца согласно уравнению Аррениуса.

В работе [12] были проведены ресурсные испытания, в том числе при различных температурах окружающей среды. В данном исследовании более основательно установлена связь между длиной активного канала СЛД, температурой окружающей среды и спектром его выходного излучения. Эксперимент показал, что при малой длине активного канала мощность излучения падает значительно даже при температуре 25°C и сравнительно небольшой наработке. Образцы отработали 5000 часов при воздействии температур 25, 55 и 70 °C, благодаря чему, было рассчитано медианное время жизни СЛД.

В работе [13] представлены результаты измерения спектральных характеристик квантоворазмерных СЛД после продолжительной работы. В ходе данных испытаний было выявлено различное поведение образцов СЛД при деградации от партии к партии. Одни образцы имели постоянный спад мощности на всем протяжении испытаний, другие демонстрировали сначала рост мощности, а затем, к концу испытаний, ее падение. Обнаружены и образцы с постоянным и непрекращающимся ростом мощности (т.н. «молодеющие»). Также разобраны механизмы возникновения деградации в каждом случае. Подробнее о механизмах деградации можно узнать из работ [14][15], здесь же обсуждается лишь их влияние на практике. При одних механизмах образцы стареют, при других – молодеют. Кроме того, было замечено, что механизмы деградации могут зависеть от температуры, и, следовательно, от температуры может зависеть и то, молодеть будут СЛД или стареть. Таким образом, выявлено, что критерий отказа в виде спада 50% выходной оптической мощности не всегда может дать соответствующий результат. В результате был предложен симметричный критерий для молодеющих образцов:

$$P(t) = \frac{3}{2} P_0,$$

где $P(t)$ – мощность излучения, при которой фиксируется отказ СЛД; P_0 – начальное значение мощности излучения.

Также рассмотрен критерий отказа по спектральным параметрам. Предложено следующее соотношение:

$$\Delta S(t) = 40\%,$$

где $\Delta S(t)$ – сдвиг спектра выходного излучения, при котором фиксируется отказ СЛД.

Результаты показывают, что спектральный срок службы заметно ниже мощностного, причем в режиме автоматического контроля тока он еще ниже, чем в режиме автоматического контроля мощности.

3. Обсуждение

В настоящее время широко распространены модули СЛД способные автоматически компенсировать потерю мощности излучения за счет постепенного увеличения тока инжекции, а также модули охлаждения, стабилизирующие температуру кристалла СЛД [16]. И то и другое решение имеет свои недостатки, например, применение модулей Пельтье для стабилизации температуры кристалла приведет к заметному увеличению мощности потребления прибора, а увеличение тока инжекции для компенсации потери мощности излучения приведет к сокращению «мощностного» срока службы.

Насколько известно, проблема деформации спектра и центральной длины волны все еще до конца не решена на практике. Например, центральная длина волны напрямую входит в формулу масштабного коэффициента K волоконно-оптического гироскопа (ВОГ)

$$K = \frac{4\pi RL}{\lambda c},$$

где λ – центральная длина волны источника излучения.

ВОГ широко применяются в авиационной, ракетно-космической технике, в системах ориентации морских объектов, при построении навигационных систем для исследования состояния нефте- и газопроводов и, как показывает ряд исследований проводившихся последние 20 лет [17][18][19][20][21], эта технология развивается, находит более широкое применение за счет улучшения точностных характеристик, вытесняет другие типы гироскопов за счет дешевизны, технологичности и массо-габаритных показателей, а также имеет перспективы в будущем. Применение методов компенсации сдвига центральной длины волны в результате продолжительной работы позволило бы добиться большей точности и надежности этих устройств.

Заключение

За последние десятилетия вопрос ресурсной надежности активно исследовался, были найдены методы определения срока службы для устройств, прошедших краткосрочные испытания и для устройств, не подвергавшихся повышенным нагрузкам вообще, с относительно высокой точностью. Хорошо изучены механизмы деградации и их влияние на выходные параметры изделий, а также способы компенсации негативных последствий в ходе их продолжительной работы.

Литература

1. Alphonse, G.A. (1989). Superluminescent diode (U.S. Patent No. 4,821,276).
2. Ko Y. U. et al. Current–voltage and low-frequency noise analysis of heterojunction diodes with various passivation layers // *Thin Solid Films*. – 2016. – Т. 598. – С. 109-114.
3. Hu G. et al. An improved method and experimental results of noise used as reliability estimation for semiconductor lasers // *Optics & Laser Technology*. – 2003. – Т. 35. – №. 6. – С. 481-483.
4. Kleinpenning T. G. M. 1f Noise in pn diodes // *Physica B+ C*. – 1980. – Т. 98. – №. 4. – С. 289-299.

5. Konczakowska A. Quality and 1/f noise of electronic components //Quality and Reliability Engineering International. – 1995. – Т. 11. – №. 3. – С. 165-169.
6. Black J. R. Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices //Proceedings of the IEEE. – 1969. – Т. 57. – №. 9. – С. 1587-1594.
7. Huang J. S. Temperature and current dependences of reliability degradation of buried heterostructure semiconductor lasers //IEEE Transactions on device and materials reliability. – 2005. – Т. 5. – №. 1. – С. 150-154.
8. Wang L. et al. SLD constant-stress ADT data analysis based on time series method //2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. – IEEE, 2009. – С. 1313-1317.
9. Kashima Y., Matoba A., Takano H. Performance and reliability of InGaAsP superluminescent diode //Journal of lightwave technology. – 1992. – Т. 10. – №. 11. – С. 1644-1649.
10. Chao D., Ma J., Li X. Research on the reliability of SLD through accelerated life testing //2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. – IEEE, 2009. – С. 1263-1267.
11. Мамедов Д. С. и др. Исследование характеристик излучения маломощных суперлюминесцентных диодов в диапазоне температур -55 С...+ 93 С //Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – №. 7. – С. 593-596.
12. Лобинцов П. А., Мамедов Д. С., Якубович С. Д. Ресурсные испытания суперлюминесцентных диодов //Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – №. 2. – С. 111-113.
13. Андреева Е. В. и др. Изменение выходных характеристик широкополосных суперлюминесцентных диодов в ходе продолжительной работы //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 7. – С. 595-601.

14. Холин А.А. Ластовкин А. А., Климов А. Н., Мартынов А. В., Лебедев В. А. Термостабилизация лазерного диодного модуля с помощью элементов Пельтье. XII Всероссийская школа для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям: Сборник докладов. – 2020. – С.152-158.
15. Waters R. G. Diode laser degradation mechanisms: a review //Progress in Quantum Electronics. – 1991. – Т. 15. – №. 3. – С. 153-174.
16. Eliseev P. G. Optical strength of semiconductor laser materials //Progress in quantum electronics. – 1996. – Т. 20. – №. 1. – С. 1-82.
17. Schmidt G. T. INS/GPS technology trends, advances in navigation sensors and integration technology //NATO RTO Lecture series. – 2004. – Т. 232.
18. Измайлов Е. А. Современные тенденции развития технологий инерциальных чувствительных элементов и систем летательных аппаратов //Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2010. – №. 1. – С. 30-43.
19. Schmidt G. T. INS/GPS technology trends. Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology. – NATO RTO-EN-SET-116-2011, 28–29 March 2011, Bagneux, France, 2011. – С. 1-24.
20. Passaro V. M. N. et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 10. – С. 2284.
21. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии //Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. – №. 2 (109). – С. 3.

Для цитирования:

Маковеев Ф.М. К вопросу оценки надежности суперлюминесцентных диодов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.9.3>