

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОДНОЧАСТОТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ
С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ СТАРЕНИЯ**

В.И. Олейник, Е.И. Олейник, к.т.н., проф. В.Н. Шмаров
(представил д.т.н., проф. В.И. Карпенко)

Проведены измерения шумовых параметров инжекционных полупроводниковых лазеров в диапазоне частот 150 – 5 кГц.

Введение. Создание мобильных средств дистанционного контроля и технической диагностики, обладающих высокими точностными характеристиками и разрешающей способностью, для целей определения параметров формы крупногабаритных поверхностей промышленных изделий связано с применением одночастотных полупроводниковых лазеров с токовой накачкой. Для достижения низких погрешностей измерения и высокой разрешающей способности при определении параметров формы сложных поверхностей определяющее значение имеет уровень флуктуаций лазерных источников излучения.

Особое значение для практики имеют флуктуации одночастотных полупроводниковых лазеров с токовой накачкой, которые позволяют в режиме амплитудной и частотной модуляции достигнуть уровня модулирующих частот до 700 мг Гц и выше. Однако с течением времени параметры таких лазеров могут существенно меняться, в том числе и флуктуации интенсивности излучения [1, 2].

Флуктуационные характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров, работающих в одночастотном режиме, определяют их шумовые свойства.

Различными авторами проводились широким фронтом исследования шумовых характеристик полупроводниковых инжекционных лазеров. Ранее исследования проводились в диапазоне частот от 10^4 до 10^9 Гц рядом авторов, в том числе и в работах [3, 4].

Однако в этих работах отсутствуют результаты исследований по влиянию эффектов старения на изменение шумовых параметров лазеров.

Нами исследованы флуктуационные параметры инжекционных по-

лупроводниковых лазеров, работающих в одночастотном режиме, после пятилетнего складского хранения в нормальных условиях.

Корреляционные свойства шумовых характеристик одночастотных инжекционных полупроводниковых лазеров. Одночастотные полупроводниковые лазеры инжекционного типа обладают широким диапазоном модулирующих частот. Это позволяет их с успехом использовать в информационно-измерительных системах для реализации высокого пространственного и временного разрешения. В этих системах весьма важными характеристиками являются стабильность излучения зондирующего сигнала и шумовые параметры информационного сигнала.

Для многочастотного режима излучения лазера с внешним резонатором и с числом продольных мод более 5 характерна линейно-падающая зависимость низкочастотных флуктуаций мощности инжекционных лазеров от частоты. И в радиочастотном спектре флуктуаций мощности имеется сигнал биений мод внешнего резонатора. Но даже при настройке лазера на одну моду излучения спектр флуктуации мощности полностью определяется спектром шума самого лазера, что можно объяснить независимостью спектра НЧ флуктуаций мощности в области низких частот от ширины спектра излучения лазера, работающем в стационарном режиме при малых (в пределах 5 – 10%) превышении тока накачки относительно его порогового значения [3]. В этом диапазоне частот флуктуации мощности определяются фликкер-шумом тока накачки и в стационарном режиме излучения хорошо описываются уравнением:

$$\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{f^\alpha} \quad (1)$$

и в режиме стационарной генерации $\alpha = 0,5 - 1$ в значительной степени зависят от отношения тока накачки к пороговому току J/J_p .

Представляет определенный интерес для практики оценить параметры физической модели лазера для определения влияния флуктуаций напряжения на лазере на флуктуации интенсивности его излучения в области низких частот и прежде всего для одночастотного режима излучения лазера, как наиболее приемлемого для решения поставленных задач в рамках данной работы. Исходя из результатов работы [4], скоростные уравнения можно преобразовать к виду, более удобному для практики и проведения анализа физических источников флуктуаций излучения:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{i}{e} - \frac{n}{\tau_s} - G(n - n_m)p + F_m; \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = G(n - n_m)p + \beta \frac{n}{\tau_s} - \frac{p}{\tau_p} + F_p. \quad (3)$$

Применяя закон Ома для схемной модели лазерного диода (закон для внешней цепи – ранее описанной модели лазерного диода) в виде

$$V_0 = I (R_s + R_L) + V_j \quad (4)$$

и простых математических выражений, описывающих вольт-амперную характеристику диода, в виде:

$$n = n_0 \exp (eV_j / 2kT); \quad V = iR_s + V_j \quad (5)$$

получим замкнутую систему уравнений (2) – (5), где n – число электронов в усиливающей среде; p – число фотонов в генерируемой моде; i – ток накачки; $g = G (n - n_m)$ – коэффициент усиления; и F_p – случайные силы, обусловленные наличием ланжевенских источников средние значения которых равны нулю, так что $\langle F_m \rangle = \langle F_p \rangle = 0$ [5].

Из выражений (2) – (4) и (5) следует, что флуктуации напряжения на лазере равны

$$V_0 - V_i = (V_0 - V) \frac{R_s + R_L}{R_L}. \quad (6)$$

В выражении (6) величина $(V_0 - V)$ представляет собой шумовую ЭДС, обусловленную флуктуационными процессами в лазере и не зависящую от параметров внешней цепи. Следовательно, флуктуации тока накачки связаны с флуктуациями интенсивности излучения лазера [6].

Действительно, шумовая компонента тока накачки, как следует из выражения (6), замыкается через реактивные элементы лазерного диода, емкостная составляющая которых является неизменной. В тоже время индуктивное сопротивление можно изменять в определенных пределах, что приведет к изменению флуктуаций тока накачки.

Следовательно, как следует из выражения (6) изменение индуктивного сопротивления R_L , стоящего в знаменателе и в числителе при малом значении $R_s \ll R_L$, почти не влияет на величину флуктуации интенсивности излучения лазера. И поэтому шумовые характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров определяются шумовой ЭДС, которую можно оценить из соотношения

$$\bar{V}_f^2 = 2 \frac{(V_0 - V)^2}{\Delta f}, \quad (7)$$

в то время как частотные зависимости спектральной плотности флуктуаций интенсивности излучения лазера можно оценить как

$$\ddot{M}_f^2 = 2 \frac{\Delta P^2}{P^2} \frac{1}{\Delta f}, \quad (8)$$

где P – интенсивность излучения; ΔP – эффективное значение флуктуаций интенсивности излучения в полосе анализа Δf для используемого в

эксперименте анализатора спектра типа СК4-13 с временем усреднения, которое несколько превышает величину $100/\Delta f$.

Результаты исследований частотных зависимостей спектральной плотности флуктуаций интенсивности излучения лазеров канального и полоскового типа с длиной волны излучения 0,85 мкм и лазера полоскового типа с длиной волны излучения 1,3 мкм представлены на рис. 1.

Экспериментальные исследования были проведены с использованием результатов, изложенных в работе [7].

Измерения проводились с применением методики корреляционного анализа сигналов анализаторов спектра, на вход которого поступают сигналы от многофункционального усилителя-коррелометра. Такой усилитель включает в себя два низко шумящих усилителя с независимыми регулировками усиления, регулируемый фазовращатель, который устанавливается в канале фото приемного тракта, и блок коммутации, с помощью которого можно фиксировать каждый входной сигнал, их сумму и разность. На один вход многофункционального усилителя-коррелометра подаются сигналы от фотоприемника типа ФД-21КП, а на другой – от лазерного диода через трансформатор для снижения шумового сопротивления до единиц Ом (5 – 6 Ом). Каналы калибровались перед измерениями: измерительные – с использованием генератора ГЗ-39, фото приемный канал – с использованием лампы накаливания для получения “белого” света.

Определенные по заданной методике комбинации сигналов от лазерного диода и фотоприемника, которые при заданной разности фаз (0 и 90°), позволяют оценить синфазную и квадратурную составляющие коэффициента корреляции флуктуаций излучения полупроводникового лазера и флуктуаций фототока, который пропорционален флуктуациям интенсивности излучения лазера.

Из рис. 1 видно, что частотная зависимость спектральной плотно-

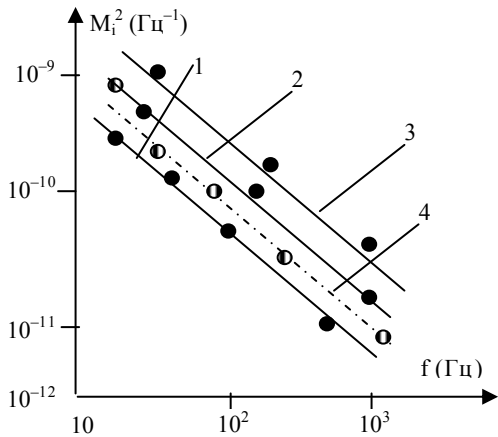


Рис. 1. Зависимость спектральной плотности флуктуаций интенсивности излучения лазера: 1 – при токе накачки 45 ма для отечественных лазеров; 2 – при токе накачки 55 ма для отечественных лазеров; 3 – при токе накачки 60 ма для отечественных лазеров; 4 – при токе накачки 50 ма для зарубежных лазеров

сти флуктуаций излучения лазера в диапазоне частот до 3 – 5 кГц имеет линейно-падающий характер с постоянной крутизной для каждого типа лазера. Причем для лазера с длиной волны 1,3 мкм крутизна этой зависимости несколько выше, чем крутизна для лазера с длиной волны 0,85 мкм. Такие графики удовлетворительно подчиняются соотношению

$$\ddot{M}_f^2 = K \frac{1}{f^\alpha}, \quad (9)$$

где величина K для каждого типа лазера является постоянной и лежит в пределах $(1,3 - 1,5) \cdot 10^{-8}$, $\alpha = 0,80 - 0,95$. Уровни флуктуаций на низких частотах (10 – 30 Гц) более чем в 100 раз выше уровней флуктуаций интенсивности излучения лазеров на частотах более 1 кГц.

Анализируя выражения (8) и (9), можно утверждать, что их графические зависимости очень близки и описываются уравнением, подобным уравнению (9), но следует ожидать более крутой частотной зависимости спектральной плотности шумовой ЭДС, пропорциональной величине $1/f^\beta$, причем величина β может лежать в пределах 0,6 – 1,2 [8].

Коэффициент корреляции флуктуаций напряжения на инжекционном лазере описывается выражением

$$K_{\text{кф}} = \overline{\delta V_{\text{л}} \delta P \left(t + \frac{\varphi_i}{2\pi f} \right)} / \left(\sqrt{\delta V_{\text{л}}^2} \sqrt{\delta P^2} \right), \quad (10)$$

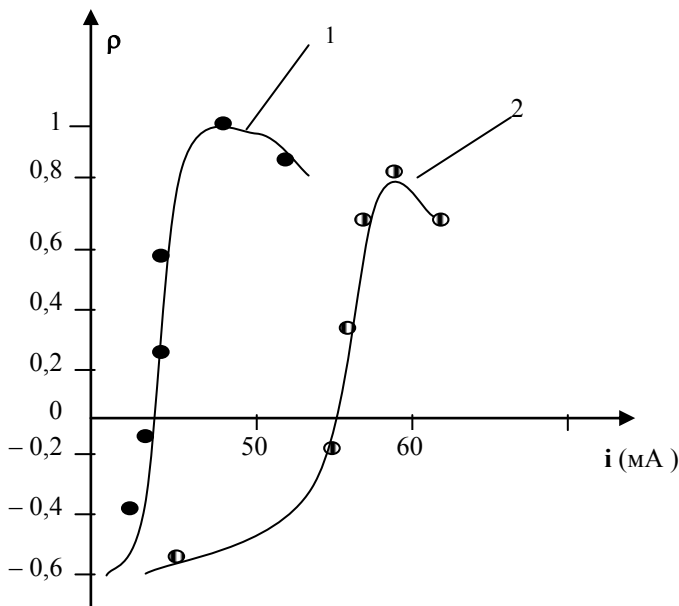
где φ_i – разность фаз, которая устанавливается в каналах измерения.

При проведении экспериментальных исследований по определению коэффициента корреляции определялась его синфазная компонента при нулевой разности фаз и квадратурная компонента при разности фаз в измерительных каналах, равной 90° . Выполненные исследования показали, что квадратурные компоненты – некоррелированные и их коэффициент корреляции равен нулю. Результаты исследований представлены на рис. 2 – 4.

Исследования показали, что во всех экземплярах лазеров всех типов имеется сильная корреляция синфазных компонент, при этом при переходе через порог генерации знак коэффициента корреляции этих компонент может изменяться на противоположный. Эти обстоятельства указывают на то, что в этих точках накачки флуктуации напряжения и флуктуации интенсивности лазера могут быть как синфазны, так и противофазны. В некоторых типах лазеров такая смена знака может происходить как области частот, где доминирует фликер-шум – до 150 Гц, так и в области частот белого шума – более 4 – 5 кГц.

При всем этом зависимость коэффициента корреляции для синфазных компонент для всех типов лазеров является индивидуальной, характерной только для данного экземпляра. Это указывает на определяющее влияние

идентичности материалов и регламентируемых технологий изготовления лазера на взаимосвязь флуктуаций основных параметров источников питания лазеров на флуктуации их интенсивности, а также на существенное



влияние источников шума на основные выходные параметры излучения полупроводниковых лазеров.

Рис. 2. Корреляционные зависимости синфазной составляющей флуктуаций интенсивности излучения лазеров от тока накачки:
1 – для экземпляра № 1 отечественного лазера на частоте около 5 кГц;
2 – для экземпляра № 2 отечественного лазера на частоте около 5 кГц

Следовательно, источниками шума могут быть: флуктуации времени жизни фотонов в резонаторе являются причиной возникновения фликер-шума; доминирующие флуктуации времени спонтанной рекомбинации; флуктуации порогового тока; флуктуации активных элементов схем питания и модуляции.

Если рассмотреть причины возникновения источников шума при выборе режима накачки, то следует заметить, что:

- ниже порога генерации возникновение фликер-шума обязано влиянием флуктуаций напряжения на лазере и флуктуациями интенсивности излучения из-за флуктуации времени спонтанной рекомбинации;
- выше порога генерации основное влияние оказывают флуктуации времени жизни фотона в резонаторе и флуктуации параметров по-

лупроводникового лазера, которые определяют коэффициент усиления среды и пороговый ток.

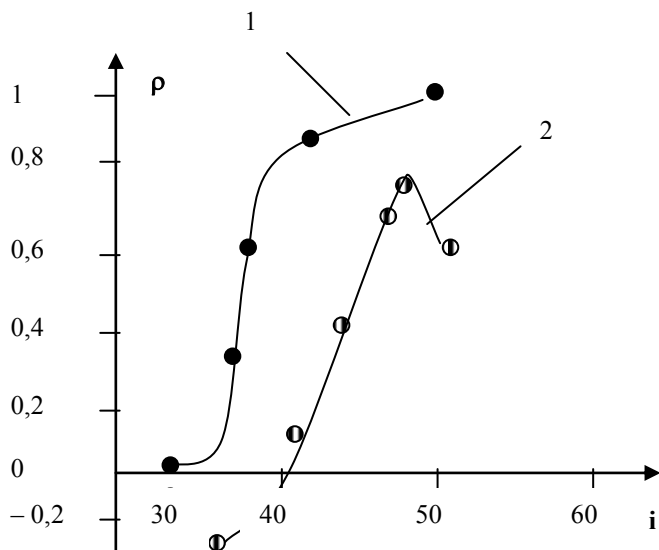


Рис. 3. Корреляционные зависимости синфазной составляющей флуктуаций интенсивности излучения лазеров от тока накачки: 1 – для экземпляра № 3 отечественного лазера на частоте около 130 Гц; 2 – для экземпляра № 4 отечественного лазера на частоте около 130 Гц

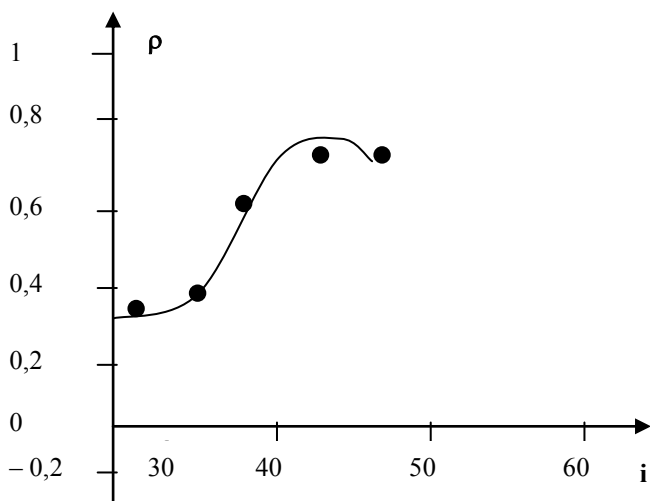


Рис. 4. Корреляционные зависимости синфазной составляющей

флуктуаций интенсивности излучения лазеров
от тока накачки на частоте около 5 кГц

Заключение. Выполненные исследования показали, что источники флуктуаций интенсивности полупроводникового инжекционного лазера удовлетворительно описываются предложенной физической моделью. Физическая модель опирается на скоростные уравнения и закон Ома для внешней цепи с учетом параметров полупроводникового лазера.

При этом флуктуации питающего напряжения связаны с флуктуациями интенсивности излучения лазера, которые могут быть как синфазны, так и противофазны, а смена знака коэффициента корреляции происходит в диапазоне частот 150 – 5 кГц.

Частотный спектр шума зависит от отношения рабочего тока к пороговому току и для каждого экземпляра лазера, прошедшего моделирующий режим старения, различен. Поэтому критерием отбора лазеров для оптимизации их шумовых параметров основным их параметром может быть дифференциальное сопротивление и чем оно выше, тем выше флуктуации напряжения, а коэффициент корреляции флуктуации напряжения и флуктуаций интенсивности выходного излучения всегда положителен.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.*
2. *Стрэттон Д.А. Теория электромагнетизма. – М.: Гостехиздат, 1948. – 410 с.*
3. *Елисеев П.Г. Введение в физику полупроводниковых лазеров. – М.: Наука, 1983. – 387 с.*
4. *Семенов Б.И. Потенциал рассеянного поля // Радиотехника и электроника. – Т. 10, № 11. – 1965. – С. 147 – 152.*
5. *Harder C., Karz J., Margalit S., Shacham J., Yariv A. // IEEE J. QE-18. – 1982. – V. 18, № 5. – P. 333.*
6. *Иванов А.П., Топорец А.С. Исследование отраженного потока // Журнал технической физики. – Т. 26, вып. 3. – 1956. – С. 631 – 640.*
7. *Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. – М.: Наука, 1975. – 385 с.*
8. *Шмаров В.М. Сучасні інформаційні та енергозберігаючі технології життєзабезпечення людини // Зб. наук. праць. – К.: ФАДА-ЛТД. – 1999. – Вип. № 6. – С. 486 – 489.*

Поступила 3.09.2004

ОЛЕЙНИК Владимир Игоревич, старший научный сотрудник НПО „Метрология”. Область научных интересов – лазерные измерительные системы.

ОЛЕЙНИК Евгений Игоревич, зам. директора по научной работе научно-производственного предприятия. Область научных интересов – лазерные измерительные системы.

ШМАРОВ Валерий Николаевич, канд. техн. наук, профессор, генеральный директор
«Укрспецэкспорт». Область научных интересов – лазерные измерительные системы.
