

УДК 621.373.826.038.825.4

В.Н. ШМАРОВ

Национальный авиационный университет, Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНОЙ АНАЛОГОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Экспериментально исследованы режимы частотной модуляции для инжекционных лазеров полоскового типа, прошедших принудительное моделирующее старение в условиях складского хранения в нормальных условиях, в сравнении с новыми зарубежными аналогами.

частотная аналоговая модуляция, полупроводниковые лазеры, инжекционные лазеры полоскового типа, системы связи

Введение

В настоящее время инжекционные полупроводниковые лазеры широко используются в системах связи, средствах дистанционного зондирования, в измерительных приборах и системах для решения задач метрологии и спектроскопии. Особенную роль такие источники излучения приобретают в мобильных системах дистанционного зондирования и диагностики параметров сложных крупногабаритных поверхностей, не имеющих высокой чистоты обработки, но имеющие специальные защитные покрытия. Точностные характеристики и разрешающая способность таких средств определяется шириной спектра информационного сигнала, который формируется током инжекции лазера.

Частотная модуляция лазеров в режиме токовой накачки исследовалась ранее рядом авторов, в том числе и в работах [1 – 3].

Однако в подобных работах не исследованы спектры излучения лазеров с учетом старения их параметров после длительного складского хранения в нормальных условиях. Известно, что с течением времени параметры инжекционных лазеров меняются [4].

Нами исследовался режим частотной модуляции отечественных инжекционных лазеров с учетом эффекта старения, складское хранение которых составляло более пяти лет, и проведены сравнитель-

ные исследования с новыми экземплярами зарубежных аналогов.

Экспериментальные исследования частотной модуляции информационного сигнала в режиме токовой модуляции инжекционных лазеров

В инжекционных полупроводниковых лазерах переменный ток инжекции вызывает как амплитудную, так и частотную модуляцию. Такой режим излучения приводит к уширению или появлению тонкой структуры спектра генерируемой моды. Собственная резонансная частота f_k определяется, как известно [5], следующим выражением:

$$f_k = k \cdot c / (2n_s L), \quad (1)$$

где k – целое число; c – скорость света; n_s – эффективный показатель преломления активного волновода; L – длина резонатора.

Если определить применительно к полупроводниковому инжекционному лазеру понятие токовый коэффициент частотной модуляции $K_{\text{чм}}$ (исходя из причин ее появления), то его можно найти из отношения изменения частоты генерации лазера (т.е. девиации частоты) к амплитуде тока синусоидального информационного сигнала. В дифференциальной форме он определяется следующим выражением [6]:

$$K_{\text{чм}} = \frac{df_k}{dJ} = -f_k \left[\frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial N} \frac{dN}{dJ} + \left(\frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right) \frac{dT}{dJ} \right]. \quad (2)$$

В этом выражении отсутствуют временные характеристики лазера и описывается квазистационарное приближение, при котором постоянная времени изменения N и T значительно меньше времени изменения тока J . Такой достаточно медленный динамический режим характерен для установившегося температурного поля.

Температурный коэффициент

$$\left(\frac{1}{n_s} \frac{\partial n_s}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \right)$$

для лазера на GaAs примерно равен 10^{-4} град $^{-1}$ [7].

Из выражения (2) следует, что величина $K_{\text{чм}}$ зависит от изменений концентрации и температурного поля.

Экспериментально исследованы образцы полосковых инжекционных лазеров из арсенида галлия (промышленный аналог – ЛПН-1М) с азотным охлаждением, работающий в одномодовом режиме. Информационный сигнал формировался генератором, работающем в диапазоне до 1200 МГц. Выходная мощность фиксировалась с использованием предварительно прокалиброванного pin-диода.

Если предположить, что поле изменяется по закону

$$E(t) = E_0 [1 + M_{\text{ам}} \cos(2\pi f_m t + \Psi)] \times \cos(2\pi f_c t + \mu \sin 2\pi f_m t), \quad (3)$$

где μ – индекс частотной модуляции; $\mu = \Delta f_c / f_m$.

В этом случае нормированный спектр Фурье интенсивности P_n при частотной модуляции выражается, как известно [8], через функции Бесселя первого рода:

$$P_n = J_k^2(\mu) + M_{\text{ам}} [J_k(\mu) J_{k+1}(\mu) + J_{k-1}(\mu) \cos \Psi] + (M_{\text{ам}} / 2)^2 [J_{k+1}^2(\mu) + J_{k-1}^2(\mu) + 2 J_{k+1}(\mu) J_{k-1}(\mu) \cos 2\Psi], \quad (4)$$

где $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Радиочастотный спектр фиксировался на спектроанализаторе и при $M_{\text{ам}} \ll 1$ наблюдался симметричный спектр, что следует из выражения (4), так как в этом случае $J_k(\mu) = (-1)^k J_{-k}(\mu)$, а P_n пропорциональна величине $J_k^2(\mu)$.

Нормировку результатов измерений интенсивности гармоник удобно провести, воспользовавшись следующим приемом. Известно, что функция Бесселя нулевого порядка первый раз обращается в нуль при $\mu = 2,4$. Если считать в первом приближении, что на некотором интервале μ переменные составляющие J (соответственно, переменные составляющие тока возбуждающего информационного сигнала) линейно связаны с μ , то тем самым найденные значения μ будут определять соответствующие значения переменных значений J . Это позволяет после проведения соответствующих расчетов $J_k^2(\mu)$ экспериментально провести сравнение их с измеренными спектроанализатором значениями интенсивностей гармоник, которые пронормированы на интенсивность на несущей частоте при отсутствии модуляции.

Результаты измерений девиации частоты с учетом вышеуказанной методики нормировки представлены на рис. 1. Исследования показали, что девиация частоты прямо пропорционально зависит от величины переменного тока информационного сигнала. При этом с ростом частоты модуляции крутизна этой зависимости падает, а максимальное значение девиации частоты при переменном токе накачки в пределах 1,1 – 1,2 от порогового значения достигает величин до 2,5 – 3,0 ГГц.

С учетом вышеизложенной методики определения выходного спектра излучения полупроводникового инжекционного полоскового лазера, работающего в режиме ЧМ, рассчитаны по результатам экспериментальных данных величины $K_{\text{чм}}$.

Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Из приведенных экспериментальных исследований и расчетов видно, что с ростом возбуждающего тока относительно порогового значения величина $K_{\text{чм}}$ незначительно падает. В целом зависимость коэффициента частотной модуляции от модулирующей частоты носит падающий характер и разделяется на три частотных области.

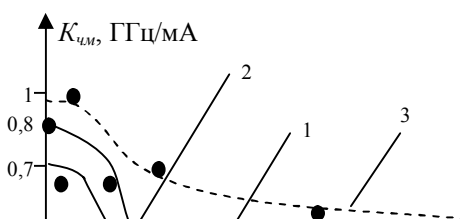
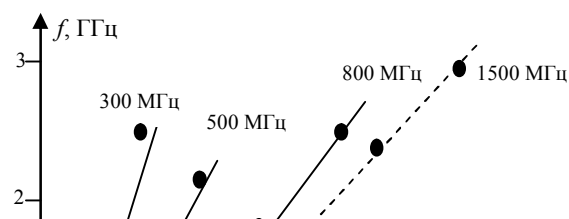


Рис. 1. Зависимость девиации частоты от тока накачки для полоскового инжекционного лазера; частоты модуляции

(1 ÷ 3 – отечественные, 4 – зарубежные лазеры):
1 – 300 МГц; 2 – 500 МГц;
3 – 800 МГц; 4 – 1500 МГц

В первой области частот (область низких частот примерно до частот 1 МГц) значение $K_{\text{чм}}$ слабо зависит как от модулирующей частоты, так и от соотношения J/J_n при малых изменениях последнего (в пределах 10%) и стремится к некоторой постоянной величине, которая определяет квазистационарный режим при заданных значениях J переменного значения тока накачки. Этот участок определяет одновременное влияние изменения температуры и концентрации носителей на эффективный показатель преломления $n_{\text{эфф}}$.

Область средних частот до 200 – 300 МГц характерна почти постоянным значением величины $K_{\text{чм}}$, причем в этой области частот крутизна функциональной зависимости $K_{\text{чм}} = F(f_m)$ существенно меньше по сравнению с ее значением в области низких частот, что физически соответствует стационарному установившемуся процессу генерации в области данных частот модуляции. Эта область частот характерна стационарным изменением $n_{\text{эфф}}$ от концентрации носителей до частот

$$f_p = \sqrt{(J/J_n - 1)/(\tau_c \tau_p)}.$$

Этот частотный предел определяет резонансное

Рис. 2. Зависимость коэффициента частотной модуляции от модулирующей частоты для полоскового инжекционного лазера с длиной волны излучения 0,85 мкм для тока накачки, превышающего пороговый ток (1 ÷ 2 – отечественные, 3 – зарубежные лазеры):
1 – в 1,4 раза; 2 ÷ 3 – в 1,2 раза

возбуждение релаксационных колебаний [9].

С повышением частоты модуляции – область высоких частот – величина $K_{\text{чм}}$ сильно падает из-за увеличения реактивной составляющей тока модуляции и для частот модуляции более 600 – 700 МГц ее значение меньше 0,25. Этот спад можно уменьшить качественным согласованием лазерного излучателя с СВЧ возбуждающим контуром.

Была исследована функциональная зависимость $K_{\text{чм}}$ и для лазеров, генерирующих в области длин волн 1,3 мкм (непромышленные образцы на базе ДГС в системе InP-(InGa)AsP) с активным слоем около 0,3 мкм, и для лазеров с трехслойным волноводом с толщиной активного слоя около 0,07 мкм на базе InGaAsP. Этот диапазон соответствует минимуму дисперсии одномодовых волоконных световодов.

Пороговое значение тока для лазеров типа системы InP-(InGa)AsP находилось в пределах 150 мА, а пороговое значение тока для лазеров типа системы InGaAsP находилось в пределах 60 мА.

Результаты этих экспериментальных исследований представлены на рис. 3.

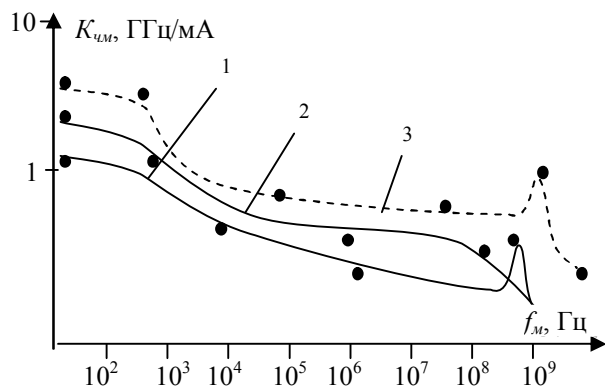


Рис. 3. Зависимость коэффициента частотной модуляции от частоты модулирующего сигнала для инжекционного лазера с длиной волны излучения 1,3 мкм; выходная мощность (1 ÷ 2 – отечественные, 3 – зарубежные лазеры): 1 – 7 МВт; 2 – 4,5 МВт; 3 – 7 МВт

Если сравнивать зависимости коэффициентов частотной модуляции от частоты модулирующего сигнала для лазеров с длиной волны излучения 1,3 мкм и с длиной волны излучения 0,85 мкм, то $K_{чм}$ для лазеров с длиной волны излучения 1,3 мкм почти в два раза больше $K_{чм}$, чем для лазеров с длиной волны излучения 0,85 мкм, хотя характеры этих зависимостей и АЧХ, измеренной с помощью измерительной системы Х1-43 (срис. 4), близки.

Следовательно, при обеспечении согласования полупроводникового лазера с внешним источником возбуждающего информационного СВЧ сигнала высокое значение индекса частотной модуляции можно достичь в широком диапазоне модулирующих частот – до 700 МГц.

Представляет большой интерес для практики исследовать связь частотной модуляции инжекционных лазеров с дифференциальными характеристиками их p - n перехода.

Как следует из уравнений (1), (2) дифференциальное сопротивление p - n перехода носит комплексный характер, активную составляющую которого можно представить в виде:

$$R = R_s + \Delta R = R_s + \eta k T / e I. \quad (5)$$

Ранее было показано, что девиация частоты инжекционных лазеров связана с изменениями эффек-

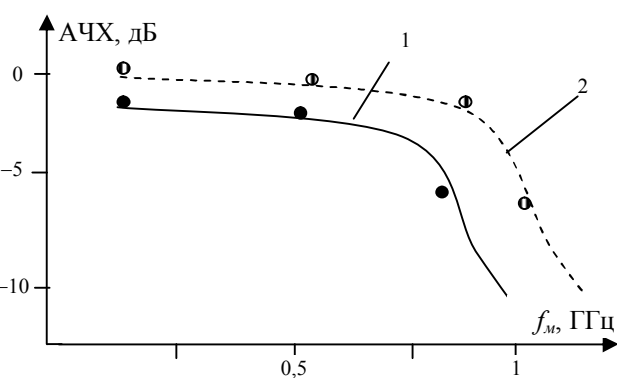


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики инжекционных лазеров: 1 – отечественные; 2 – зарубежные

тивного показателя преломления, который зависит от температуры и концентрации носителей. Если достигнута полная стабилизация усиления, что соответствует стабилизации квазиуровней Ферми в активной области, то второй член в уравнении (5) близок к нулю. Если этот член в уравнении (5) не равен нулю, то это значит, что ΔR полностью определяется избыточным значением концентрации носителей над его пороговым значением N_0 .

И в полосе частот до 700 МГц, где можно с достаточной для практики достоверностью пренебречь температурными и резонансными всплесками, девиация частоты и остаточное сопротивление ΔR связаны между собой следующим соотношением [10]:

$$\frac{\partial f}{\partial I} = \frac{efN_0}{2nkT} \frac{\partial n}{\partial N} \Delta R. \quad (6)$$

Сопротивление R_s можно определить по методике, изложенной в работе [11].

Оценки величин, входящих в уравнение (5), дают следующие значения:

$$\frac{\partial n}{\partial N} = (2-3) \cdot 10^{-21} \text{ см}^3; N_0 = (4-5) \cdot 10^{-17} \text{ см}^{-3}; n = 3,6.$$

Тогда уравнение (5) определяет линейную зависимость девиации частоты от величины остаточного сопротивления для различного типа лазерных диодов с наклоном в пределах $(800 - 1500) \text{ МГц} \cdot \text{мА}^{-1} \cdot \text{Ом}^{-1}$.

Такая методика позволяет оптимизировать мето-

дику выбора инжекционного лазера для обеспечения нужного значения девиации частоты по остаточному сопротивлению p - n перехода.

Заключение

Экспериментально исследованы режимы частотной модуляции для инжекционных лазеров полоскового типа, прошедших принудительное моделирующее старение в условиях складского хранения в нормальных условиях, в сравнении с новыми зарубежными аналогами.

Исследования показали, что девиация частоты информационного сигнала прямо пропорциональна величине переменной составляющей тока и может достигать 3 ГГц при превышении тока накачки над пороговым его значением в пределах до 1,2.

С повышением частоты модуляции величина индекса частотной модуляции (токового значения частотной модуляции) сильно падает из-за увеличения реактивной составляющей тока модуляции и может достигать значение меньше 0,25. Спад этого параметра можно существенно уменьшить путем качественного согласования лазерного излучателя с СВЧ возбуждающим контуром. И, как показали выполненные экспериментальные исследования, при обеспечении оптимального согласования полупроводникового лазера с внешним источником возбуждающего информационного СВЧ сигнала значение индекса частотной модуляции можно достигать модулирующих частот до 700 МГц. На зарубежных образцах можно достичь высоких значений индекса частотной модуляции в диапазоне модулирующих частот до 1,5 – 2,0 ГГц.

Проведенные исследования позволяют разработать инженерную методику оперативного выбора инжекционного лазера, прошедшего моделирующий режим старения, для обеспечения нужного значения девиации частоты, измеряя остаточное сопротивление p - n перехода.

Литература

1. Yamamoto Y. Frequency modulation of lasers // IEEE J. QE-16. – 1980. – № 7. – P. 1251 – 1258.
2. Yamamoto Y., Kimura T. Lasers // IEEE J. QE-17. – 1981/ – № 5. – P. 919 – 929.
3. Kobayashi S., Yamamoto Y., Kimura T. Frequency modulation of injection lasers // IEEE J. QE-18. – 1982. – № 3. – P. 582 – 589.
4. Богатов А.П., Елисеев П.Г. Исследование параметров инжекционных лазеров // Квантовая электроника. – 1985. – Т. 12, № 4. – С. 344 – 356.
5. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры: Перевод с англ. / Под ред. Л.А. Ривлина. – М.: Радио и связь, 1990. – 320 с.
6. Salate R.P. The sine wave information signal // Applied Phys. – 1979. – V. 20, № 11. – P. 39 – 52.
7. Goldberg L., Taylor H.L., Weller J.F. Lasers // Electron. Letters. – 1981. – V. 17, № 5. – P. 497 – 505.
8. Харкевич А.А. Спектры и анализ. – М.: ГИФМЛ, 1962. – 236 с.
9. Kobayashi S., Yamamoto Y., Kimura T. Lasers and fluctuations // Electron. Letters. – 1981. – V. 17, № 7. – P. 350 – 359.
10. Dutta N.K., Olsson N.A. Lasers // J. Appl. Phys. – 1984. – V. 56, № 23. – P. 2167 – 2177.
11. Елисеев П.Г., Охотников О.Г., Пак Г.Т. Инжекционные лазеры // Квантовая электроника. – 1980. – № 7. – С. 1670 – 1688.
12. Олейник В.И., Олейник Е.И., Шмаров В.Н. Режимы частотной модуляции для инжекционных лазеров полоскового типа // Сборник научных трудов 1-й международной конференции «Современные технологии ресурсо-энергосбережения». – К.: ДАЛПУ. – 1997. – С. 4.

Поступила в редакцию 1.03.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.