
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК.681.783;68.137

В.В. Бирюков¹, В.А. Грачев¹, Т.С. Лукоянова¹, А.Ю. Порошенков², А.С. Раевский¹

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ПОЛОСУ ПРОПУСКАНИЯ КАНАЛА АНАЛОГОВОЙ ВОЛС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Н. Новгород²

Приведены результаты измерения полного сопротивления лазерного излучателя в СВЧ-диапазоне. Описана схема экспериментальной установки. Представлены результаты эксперимента. Рассчитаны *RLC*-параметры лазерного диодного модуля и на их основе получены амплитудно-частотные характеристики. Исследовано влияние паразитных параметров лазерного излучателя на его частотную характеристику.

Ключевые слова: аналоговая волоконно-оптическая линия связи, лазерный излучатель, паразитные параметры, частотные характеристики лазерного излучателя.

Введение

В настоящее время наряду с системами передачи цифровых сигналов активно развиваются системы передачи широкополосных аналоговых сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Интерес к данным системам вызван необходимостью снижения потерь при передаче сигналов между удаленными СВЧ блоками и антеннами.

В технике оптических систем передачи наиболее часто благодаря своей относительной простоте используется прямая модуляция тока накачки лазера. В качестве источников модулированного оптического сигнала широко применяются одномодовые полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 1,55 мкм и выходной мощностью до 50 мВт.

Общее быстродействие лазерного излучателя с непосредственной модуляцией за счет управления током инжекции определяется не только технологическими особенностями структуры лазерного кристалла. Ограничение полосы модуляции в СВЧ-диапазоне вызвано паразитными электрическими эффектами, возникающие вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов, требуемых для его подсоединения к вводу модулирующего сигнала. Их необходимо учитывать при практической реализации прототипа ВОЛС. Знание данных параметров дает возможность оптимизировать схему драйвера для получения максимальной ширины полосы пропускания и минимальной неравномерности коэффициента передачи в ней [1].

Результаты исследований

Производители лазерных диодных модулей, отмечая в описании своей продукции основные электрические и оптические параметры модуля, не указывают ни полное сопротивление излучателя, ни его *RLC*-параметры, к которым относятся: сопротивление и емкость кристалла, индуктивность выводов, реактивные сопротивления корпуса излучателя. Необходи-

димо обладать информацией о данных параметрах, так как они оказывают существенное влияние на полосу пропускания аналогового волоконно-оптического тракта.

Для нахождения точных значений паразитных RLC -параметров лазерного диода существует метод, включающий в себя следующие основные этапы [2]:

- составление адекватной математической модели замещения ЛИ;
- оценка параметров элементов в полученной модели;
- составление системы уравнений, описывающей модель лазера;
- решение системы уравнений, описывающей полученную модель.

Схема замещения ЛИ показана на рис. 1. Она складывается из схемы замещения чипа лазерного диода (ЛД) и схемы замещения корпуса ЛИ [3].

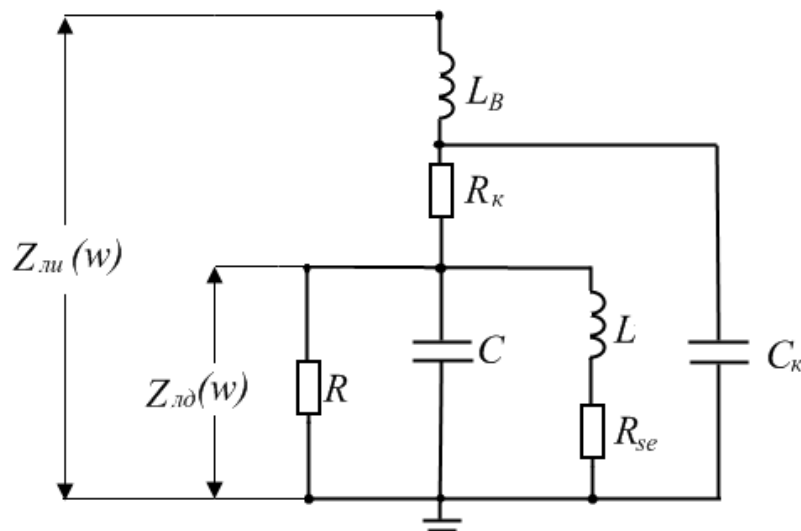


Рис. 1. Схема замещения лазерного излучателя

На рис. 1 введены следующие обозначения: $Z_{\text{ли}}(\omega)$ – комплексное сопротивление соответственно ЛИ; $Z_{\text{лд}}(\omega)$ – комплексное сопротивление соответственно чипа ЛД; C – диффузионная ёмкость чипа; R – сопротивление чипа; L – индуктивность чипа, обусловленное спонтанным излучением; R_{se} – сопротивление чипа, обусловленная спонтанным излучением; L_B – индуктивность выводов; R_K – сопротивление корпуса; C_K – емкость корпуса.

Эквивалентная электрическая схема лазерного диода для модулирующих частот в упрощенном варианте представлена в виде параллельной RLC -цепочки, состоящей из активной, емкостной и индуктивной составляющих импеданса лазерного кристалла.

Индуктивность выводов L_B представляет собой индуктивность монтажных электрических соединений лазерного излучателя с внешними выводами.

Полный модулирующий ток возбуждается приложенным к цепи напряжением. Модуляция выходного оптического излучения вызывается только активной компонентой модулирующего тока, протекающей через активное сопротивление R . На высоких частотах общий ток модуляции уменьшается из-за блокирующего действия индуктивности L_B , причем часть общего тока ответвляется паразитной емкостью C . Необходимо учитывать также наличие элементов корпуса C_K . В результате эффективность модуляции быстро уменьшается с ростом частоты модуляции.

Выражение для нахождения комплексного сопротивления чипа ЛД имеет вид:

$$Z_{\text{лд}}(\omega) = \frac{R \cdot (j\omega L + R_{se}) / j\omega C}{(j\omega L + R_{se} + R) / j\omega C + R \cdot (j\omega L + R_{se})}. \quad (1)$$

Комплексное сопротивление ЛИ определяется по формуле:

$$Z_{\text{ЛИ}}(\omega) = \frac{Z_{\text{ЛД}}(\omega) + R_{\text{К}}}{j\omega C_{\text{К}} \cdot (Z_{\text{ЛД}}(\omega) + R_{\text{К}}) + 1} + j\omega L_{\text{В}}. \quad (2)$$

Для измерения полного сопротивления ЛИ была собрана установка на основе векторного анализатора цепей ZVA-40 фирмы Rohde&Schwarz. Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 2.

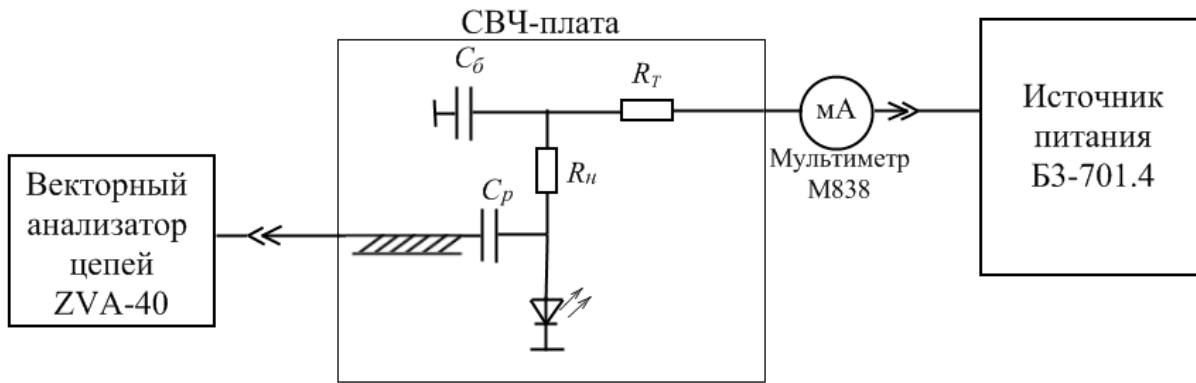


Рис. 2. Структурная схема лабораторной установки

СВЧ-плата содержит коаксиально-микростриповый переход, необходимый для соединения платы и векторного анализатора цепей с помощью коаксиального кабеля. С помощью векторного анализатора цепей производится измерение частотных зависимостей коэффициента стоячей волны (КСВ), активной и реактивной составляющих полного сопротивления. Необходимый ток накачки ЛИ определяется резисторами R_T , R_H и напряжением источника питания.

На рис. 3 представлена эквивалентная схема измеряемой цепи, которая совмещает в себе элементы схемы СВЧ платы, схему замещения ЛИ, монтажную емкость C_M и индуктивность соединительной линии L_M (индуктивность прямого отрезка проводника).

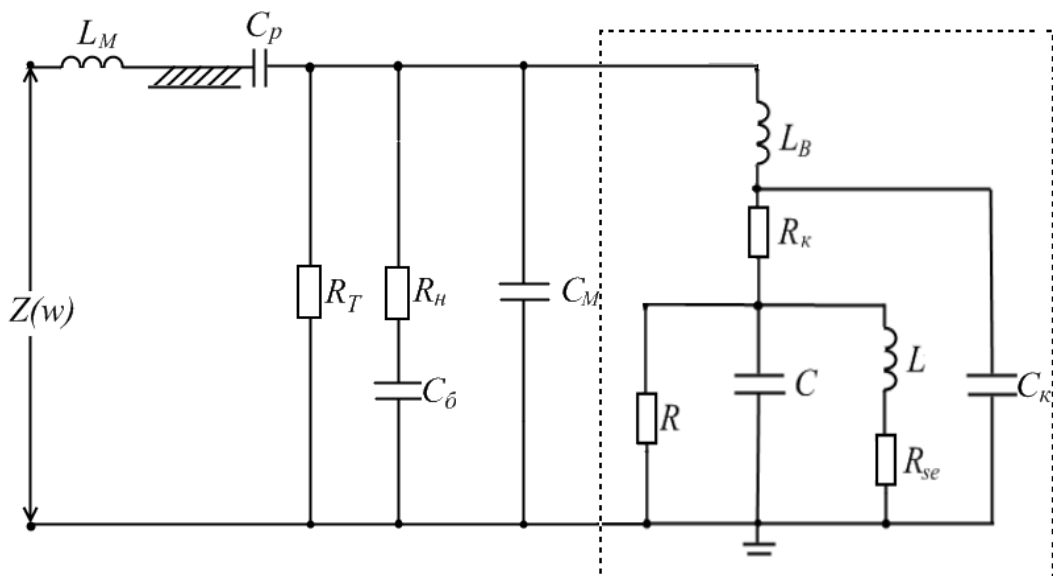


Рис. 3. Эквивалентная схема измеряемой цепи

Параметры L_M и C_M – «паразитные», их необходимо учитывать при подключении цепи к измерительному прибору и лазерного излучателя к драйверу. При расчетах используем их оценки: $C_M = 1,5$ пФ, $L_M = 2,6$ нГн. Некоторые параметры схемы известны: $R_T = 110$ Ом, $R_H = 50$ Ом, $C_0 = C_p = 100$ пФ, эффективная диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_{эф} = 3,06$, длина линии $l = 0,01$ м, волновое сопротивление линии $Z_B = 50$ Ом.

Для нахождения полного сопротивления измерительной схемы используем формулу преобразования сопротивлений вдоль линии передачи [4]:

$$Z_n(\omega) = Z_B \frac{Z_H + jZ_B \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_B + jZ_H \operatorname{tg}(\beta l)}, \quad (3)$$

где $\beta l = \sqrt{\varepsilon_{эф}} \frac{2\pi f}{c} l$ - электрическая длина линии.

Сопротивление нагрузки определяется следующим образом:

$$Z_H(\omega) = \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) \cdot R_T \cdot Z_{ЛИ}^*(\omega)}{\left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) \cdot R_T + Z_{ЛИ}^*(\omega) \left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) + R_T \cdot Z_{ЛИ}^*(\omega)}, \quad (4)$$

где $Z_{ЛИ}^*(\omega)$ - комплексное сопротивление ЛИ с учетом его подключения к драйверу. Оно вычисляется по следующей формуле:

$$Z_{ЛИ}^*(\omega) = \frac{Z_{ЛИ}(\omega) \cdot \frac{1}{j\omega C_M}}{Z_{ЛИ}(\omega) + \frac{1}{j\omega C_M}}. \quad (5)$$

Используя ранее записанные формулы (1) - (5), можем найти полное сопротивление цепи $Z(\omega)$, изображенной на рис. 3:

$$Z(\omega) = Z_n(\omega) + j\omega L_M. \quad (6)$$

Для нахождения точных значений RLC -параметров составим систему уравнений:

$$\begin{cases} Z(\omega_1, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_1(\omega_1) + j \operatorname{Im} Z_1(\omega_1) \\ Z(\omega_2, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_2(\omega_2) + j \operatorname{Im} Z_2(\omega_2) \\ \dots \\ Z(\omega_N, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_N(\omega_N) + j \operatorname{Im} Z_N(\omega_N) \end{cases}, \quad (7)$$

где $R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M$ - неизвестные величины, а $\omega_i, \operatorname{Re} Z_i(\omega_i), \operatorname{Im} Z_i(\omega_i)$ - измеряемые величины.

Система из N комплексных уравнений распадается на $2N$ действительных уравнения. Следовательно, для определения восьми (в нашем случае) неизвестных величин достаточно произвести измерения активных и реактивных составляющих полных сопротивлений ЛИ на четырех частотах и, используя выражения (1)–(6), записать систему из четырех комплексных уравнений (7).

Система решается численными методами. В качестве начальных приближений искомым величинам используются их оценки. Возьмем уже ранее рассчитанные оценочные значения RLC -параметров из [2].

В эксперименте использовался лазерный диодный модуль LDI-DFB-1550, который может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Графики зависимостей активной и реактивной составляющих полного сопротивления от частоты при отсутствии тока накачки представлены на рис. 4, *а* и 4, *б* соответственно. Аналогичные зависимости были сняты при номинальном токе накачки ЛД $I = 68$ мА. Они приведены на рис. 5, *а*, *б*.

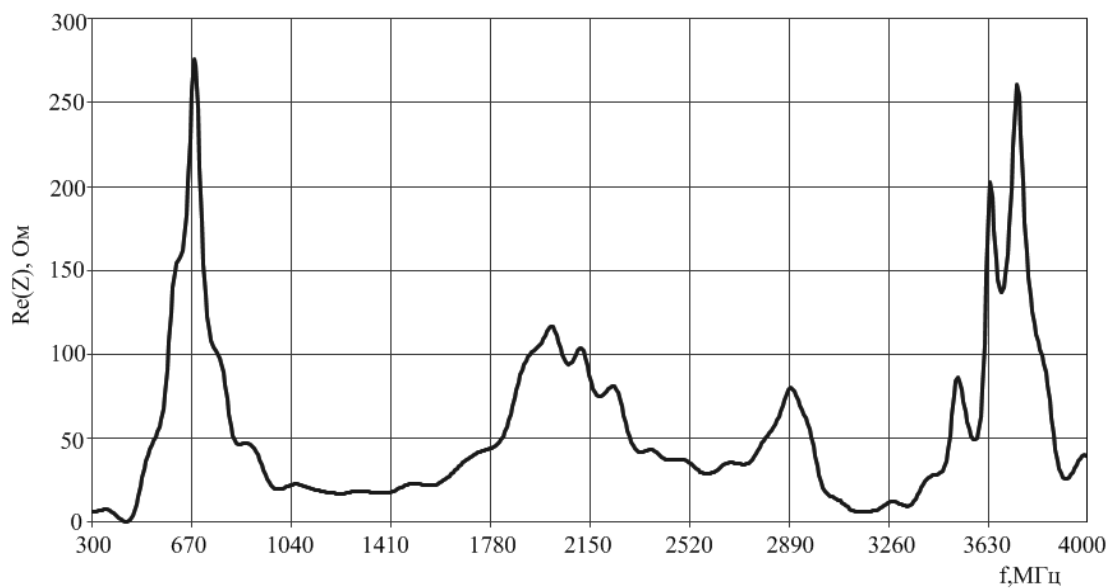
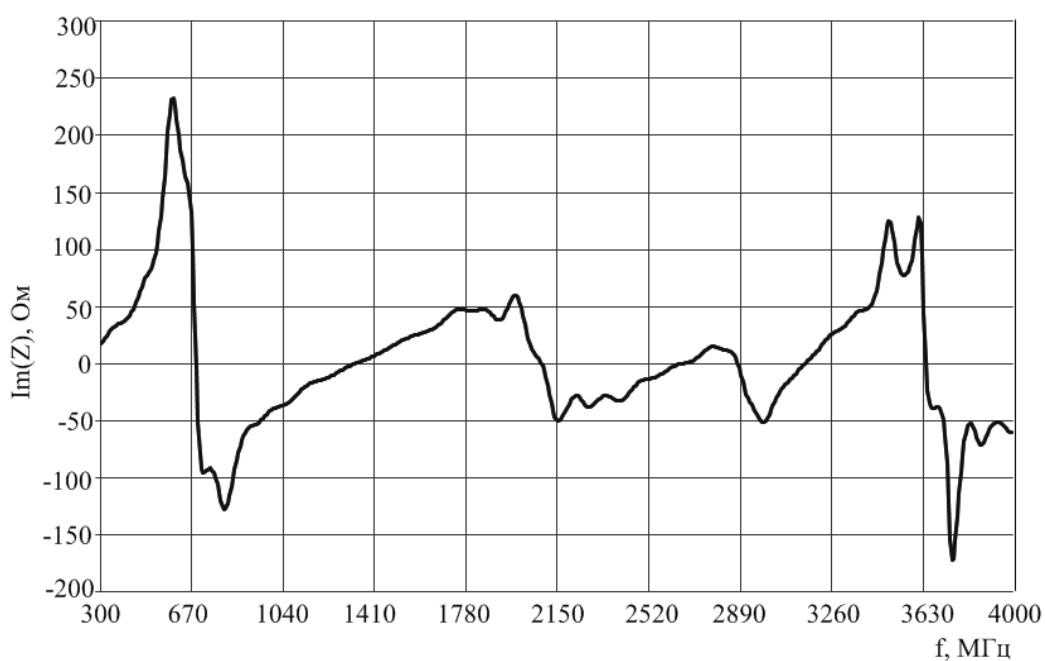
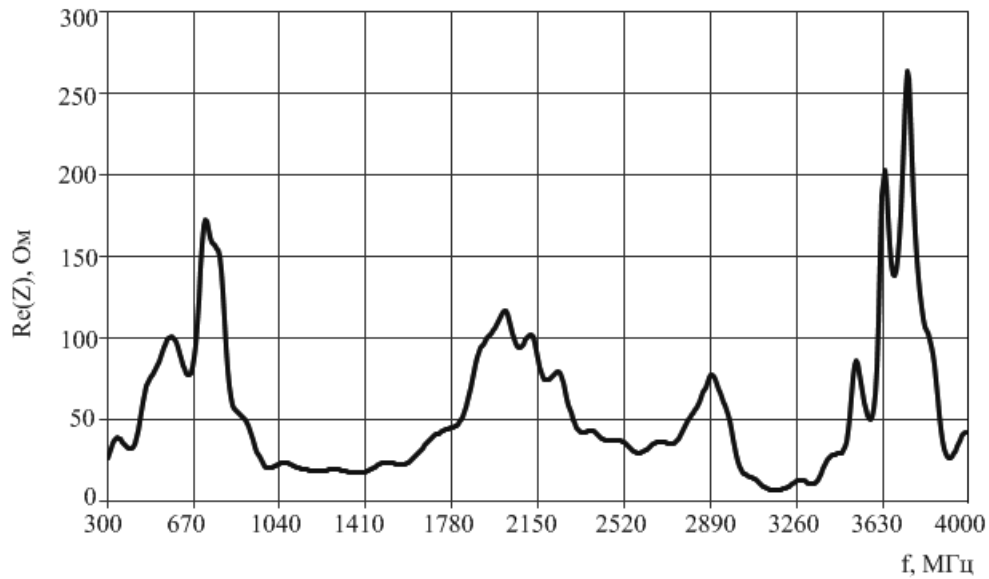
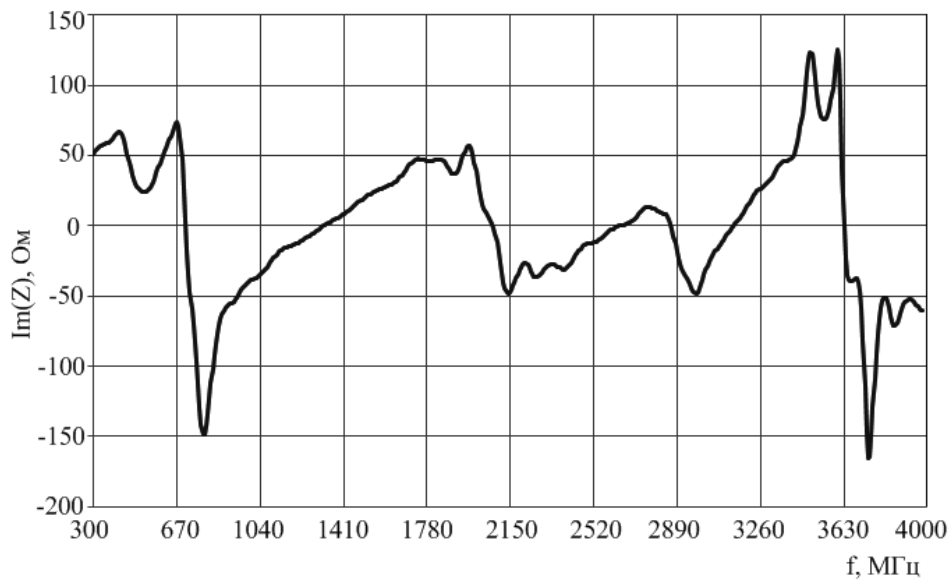
*а)**б)*

Рис. 4. Частотные зависимости активной (*а*) и реактивной (*б*) составляющих полного сопротивления при отсутствии тока накачки



а)



б)

Рис. 5. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих полного сопротивления при номинальном токе накачки $I = 68$ мА

Измеренные значения реальных и мнимых частей полных сопротивлений лазерного излучателя сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения реальной и мнимой частей полного сопротивления

Частота, f , МГц		335,714	971,429	1535,714	1978,571	2700,00	3500,00	3800,00
Ток, мА	Часть	Сопротивление, Ом						
		0	Re(Z)	7,256	20,844	22,211	109,085	35,018
Im(Z)	28,488		-44,237	21,885	60,328	2,174	125,209	-79,861
68	Re(Z)	38,345	21,695	22,721	109,560	35,732	63,715	126,439
	Im(Z)	55,675	-45,678	21,996	57,142	2,501	123,640	-76,803

Результаты измерений полного импеданса лазерного излучателя, представленные в табл. 1, требуются для решения системы уравнений (7) относительно RLC -параметров лазера согласно описанной методике.

Для расчета значений RLC -параметров лазерного излучателя была написана программа в среде MatLab, выполняющая решение составленной системы уравнений. Используется встроенный алгоритм решения системы нелинейных уравнений, содержащих комплексные числа. Рассчитанные значения RLC -параметров лазерного излучателя представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета RLC -параметров лазерного излучателя

Ток, мА	Параметры						
	R , Ом	L , пГн	C , нФ	R_{se} , Ом	R_{κ} , Ом	C_{κ} , пФ	L_{β} , нГн
0	1	1,1	3	0,2	2,1	11	3
68	0,9	1,0	3	0,18	2,0	10	2

Определив RLC -параметры можно рассчитать частотную характеристику (ЧХ) лазерного излучателя. ЧХ модуляции лазерного диода представляет собой зависимость значения амплитуды импульса оптического излучения от частоты модуляции, отражает динамические свойства источника излучения и характеризует его инерционность. ЧХ имеет ограниченную верхнюю частоту. Граничная частота определяется как частота, на которой сигнал уменьшился в $\sqrt{2}$ раза, т.е. амплитуда сигнала с фотоприемника становится равной $A(f_{гр}) = A_0/\sqrt{2}$.

Для получения частотной характеристики ЛИ целесообразно подключить ЛИ к драйверу, что соответствует реальному режиму работы. В этом случае эквивалентная схема для расчёта ЧХ ЛИ будет иметь вид, изображенный на рис. 6.

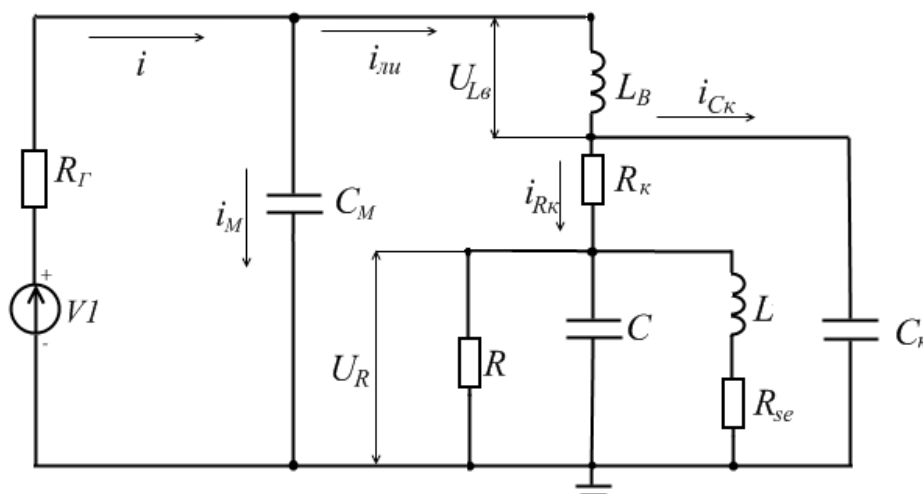


Рис. 6. Эквивалентная схема для моделирования ЧХ

Для расчета ЧХ ЛИ используем оценку внутреннего сопротивления драйвера из статьи [2], то есть будем считать, что $R_{\Gamma} = 35$ Ом.

К полупроводниковому лазеру подводится модулирующее напряжение от генератора со стабильной амплитудой, равной $U_0 = 1,8$ В, и периодически изменяющейся частотой.

Амплитудно-частотной характеристикой электрической цепи называют модуль ее

комплексной частотной характеристики (КЧХ), то есть модуль коэффициента передачи (передаточной функции).

Коэффициент передачи цепи определяет реакцию цепи на внешнее воздействие и равен отношению выходной величины (напряжение, ток) к входной величине (напряжение, ток), которые выражены в комплексной форме. Передаточная функция по напряжению определяется по формуле:

$$K_U(j\omega) = U_{\text{вых}}(j\omega)/U_{\text{вх}}(j\omega), \quad (8)$$

где $U_{\text{вых}}(j\omega) = U_R(j\omega)$, $U_{\text{вх}}(j\omega) = U_0$. При этом полное комплексное сопротивление цепи, изображенной на рис. 6, будет определяться по формуле:

$$Z(\omega) = Z_{\text{ли}}^*(\omega) + R_{\Gamma}. \quad (9)$$

Для оценки влияния паразитных элементов корпуса на ширину полосы пропускания лазерного излучателя построим на одном графике две кривые, рассчитанные при разных значениях RLC -параметров. В качестве первого примера используем значения, взятые из табл. 2, при токе, равном 68 мА. Для второго варианта используем произвольные меньшие значения RLC -параметров корпуса. Было выяснено, что при внесении изменений в значения параметров элементов чипа лазерного диода (C , L , R , R_{se}) практически не происходит изменение АЧХ, а существенное влияние оказывают величины параметров корпуса: C_k , L_B , и R_k .

Графики зависимости модуля КЧХ в логарифмическом масштабе от частоты модуляции при ток, равном 68, при двух вариантах значений параметров корпуса показаны на рис. 7.

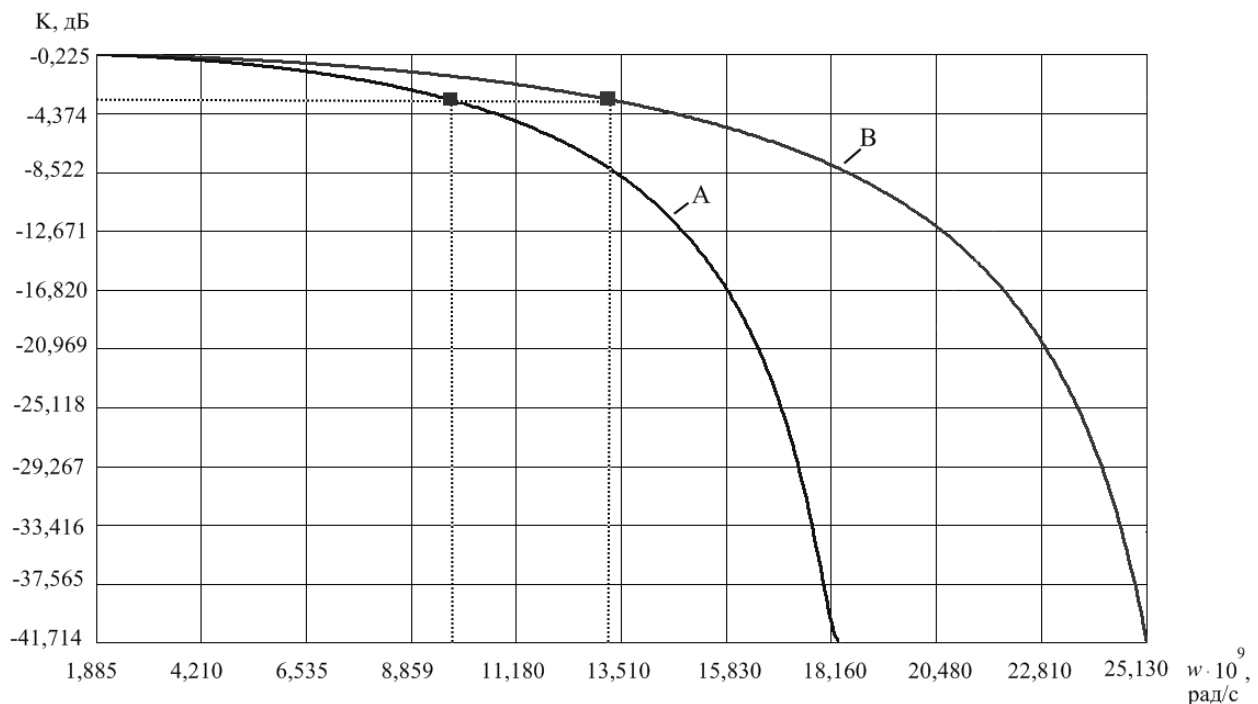


Рис. 7. Рассчитанные амплитудно-частотные характеристики лазерного излучателя

На рис. 7: кривая А получена при $C_k = 10$ пФ, $L_B = 2$ нГн, $R_k = 2$ Ом; кривая В — при $C_k = 5$ пФ, $L_B = 1$ нГн, $R_k = 1$ Ом.

Из рис. 7 видно, что по уровню минус 3 дБ верхние частоты полосы пропускания составляют $f = 1,471$ ГГц (кривая А) и 2,001 ГГц (кривая В). Таким образом, уменьшение индуктивности выводов с 2 нГн до 1 нГн, уменьшение контактного сопротивления с 2 Ом до 1 Ом и уменьшение емкости корпуса с 10 пФ до 5 пФ приводит к увеличению полосы пропускания по уровню на 530 МГц.

Выводы

В данной работе проведены измерения полного сопротивления лазерного излучателя в СВЧ-диапазоне. Описана схема экспериментальной установки. Представлены результаты эксперимента.

Рассчитаны *RLC*-параметры лазерного диодного модуля и на их основе получены амплитудно-частотные характеристики. Исследовано влияние паразитных элементов корпуса на полосу пропускания лазерного излучателя. Существенное ограничение на ширину полосы модуляции полупроводниковых одномодовых лазеров накладывают паразитные элементы корпуса, наибольший вклад из которых дает индуктивность выводов.

Для расширения полосы пропускания лазерного излучателя, а следовательно и увеличения скорости передачи информации, необходимо компенсировать или исключить наличие паразитных электрических эффектов, возникающих вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов.

Библиографический список

1. Шантырь, В.А. Передача радиоастрономических сигналов от антенны радиотелескопа в аппаратное помещение обсерватории по волоконно-оптическим линиям: Сообщения ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2012. №186. – 28 с.
2. Новиков, Н. С. Влияние *RLC*-параметров лазеров на скорость передачи информации мощных оптических передатчиков / Н. С. Новиков, И. В. Крюкова, Н. Н. Чуковский // Наука и образование (электронное издание). 2012. 77-30569/352332. №3. С. 1-11. <http://technomag.edu.ru/doc/352332.html>
3. Тсанг, У. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / У.Тсанг. – М.: Радио и связь. 1990. – 455 с.
4. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

Дата поступления
в редакцию: 03.06.2014

V.V. Biryukov¹, V.A. Grachev¹, T.S. Lukoyanova¹, A.Y. Poroshenkov², A.S. Raevskii¹

THE INFLUENCE OF PARASITIC PARAMETERS LASER OSCILLATORS ON BANDWIDTH OF ANALOG FIBER TRANSMISSION LINE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Scientific research Institute of measuring systems n.a. J.E. Sedakov, N. Novgorod²

Purpose: Determination of parasitic *RLC*-parameters of the laser oscillator and the calculation of its frequency response.

Design/methodology/approach: The used methodology is based on the exact calculation of parameters equivalent circuit the laser oscillator using experimentally determined frequency dependencies of the real and imaginary parts impedance of the laser oscillator.

Findings: Knowledge of parasitic parameters the laser oscillator enables optimization of driver circuit for maximum bandwidth and minimum uneven gain in it.

Research limitations/implications: These results provide a starting point for further studies of the effect *RLC*-parameters of the laser oscillator on the frequency characteristics of the transmitting optical module analog fiber optic link.

Originality/value: Investigated the effect of the parasitic parameters of laser oscillator on its bandwidth by modulation of the pump current.

Key words: analog fiber transmission line, the laser oscillator parasitic parameters, frequency characteristics of the laser oscillator.