

И. А. СУХОИВАНОВ, канд. техн. наук, И. В. ЩЕРБАТКО

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-ПОДНЕСУЩЕЙ ПО ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ

Волоконно-оптические линии передачи СВЧ-поднесущей (в дальнейшем — ВОЛП СВЧ) по ряду параметров конкурируют с традиционными системами передачи таких сигналов на основе коаксиальных и волноводных трактов. Однако большим недостатком ВОЛП является невысокий коэффициент передачи СВЧ мощности от передатчика к приемнику. Одним из радикальных способов повышения этого параметра является улучшение согласования СВЧ линии с передающим модулем ВОЛП.

Цель работы — исследование влияния модулирующей мощности на эффективность сопряжения СВЧ тракта и ВОЛП. Активная составляющая импеданса лазерного диода (ЛД) лежит в пределах 3—20 Ом, кроме того, на СВЧ лазер обладает значительной реактивностью. Это приводит к необходимости создания специальных схем сопряжения СВЧ линий с лазерными излучателями. Схемы согласования строят либо в виде резонансных цепей, либо в виде трансформаторов сопротивлений.

Простейший вид согласования — включение резистора в СВЧ цепь последовательно с ЛД. Недостатком такого согласования является низкий КПД использования СВЧ мощности.

На рис. 1, а представлена эквивалентная схема ЛД на высоких частотах [1]. Здесь приняты следующие обозначения:  $R_0$  — сопротивление подводящих проводников и материала диода;  $C_{sc}$  — зарядовая емкость;  $C_d$  — диффузионная емкость активного слоя. Динамические характеристики ЛД описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{C_{es}}{\alpha} \frac{dV}{dt} + \frac{I}{\alpha} - \frac{N}{\tau} - GS; \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = GS - \frac{S}{\tau_w} + \beta \frac{N}{\tau}, \quad (2)$$

где  $V$  — напряжение на  $p$ - $n$ -переходе;  $I$  — плотность инжектируемого тока;  $\beta$  — коэффициент вклада от спонтанного излучения в моду;  $\tau$  — время жизни носителей тока;  $\alpha = qd$ ,  $a$  — заряд электрона,  $d$  —

толщина активной области;  $S$  — плотность фотонов;  $\tau_\omega$  — время жизни фотонов;  $G = \gamma(N - N_e)$ ,  $\gamma$  — оптический волноводный параметр,  $N_e$  — плотность носителей при нулевом усилении. При линеаризации системы (1) и (2) в приближении малого сигнала получаем зависимость для переменной составляющей тока:

$$i = V(1/R_1 + j\omega C_\Sigma) + \alpha G_0 S, \quad (3)$$

где

$$R_1 = (1/R_d + 1/R_4)^{-1}; R_d = 2\tau_k T / q\alpha N_0 —$$

малосигнальное сопротивление  $p$ — $n$ -перехода диода:

$$R_4 = R_d G_3 (\beta N_0 \gamma)^{-1}; G_3 = \alpha \beta G_0 N_0 / (\tau I_0 - N_0 \alpha);$$

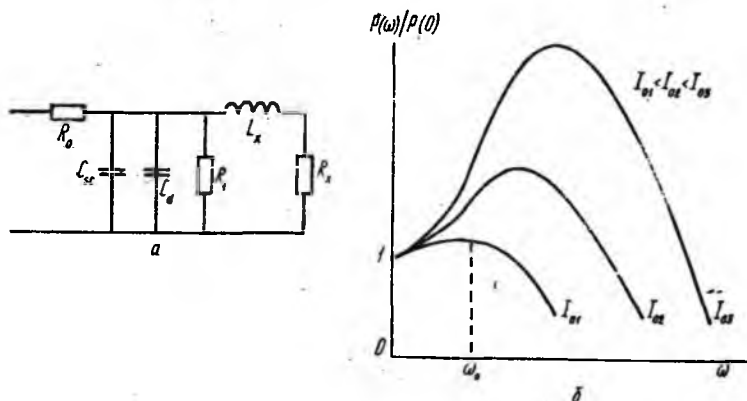


Рис. 1

величины с индексом ноль — стационарные значения переменных;  $C_\Sigma = C_d + C_{sc}$  — полная диодная емкость;  $C_d = \tau' R_d$ .

Электрическая схема модели ЛД в приближении малого сигнала получается при анализе полного входного импеданса  $Z_d$  гетероперехода:

$$Z_d = R_0 + \frac{(j\omega L_x + R_x) R_1}{R_1 + (j\omega L_x + R_x) + j\omega C_\Sigma R_1 (j\omega L_x + R_x)}, \quad (4)$$

где

$$L_x = (G_0 G_3)^{-1}; R_x = G_3 L_x; G_3 = \beta / R_d + 1 / R_4.$$

Типичные оптические амплитудно-частотные характеристики плоскового ЛД при различных токах накачки показаны на рис. 1, б. Данная зависимость мощности модулированного оптического сигнала от частоты модуляции аппроксимируется выражением

$$P(\omega)/P(0) = \omega_0^2 / (\omega_0^2 - \omega^2) + j\beta\omega, \quad (5)$$

где

$$\omega = 2\pi f; \omega_0^2 = (I_0 - I_{пор}) / \tau_{сп} \tau_\phi I_{пор} \quad (6)$$

— циклическая частота собственного электрооптического резонанса;  $\beta = I_0 / \tau_{сп} I_{пор}$ ,  $I_{пор}$  — пороговый ток [2].

На частотах  $\omega < \omega_0$  реактивность  $Z_d$  носит индуктивный характер, а при  $\omega > \omega_0$  — емкостный.

Оценим корректность приближения малого сигнала. Переменная составляющая тока, модулирующая ЛД, дается выражением

$$I_n < 0,5 \Delta I / \sqrt{2} \left( 0,5 + \frac{1-m}{m} \right), \quad (7)$$

где  $\Delta I = I_0 - I_{\text{пор}}$ ,  $m$  — глубина модуляции. Положив  $m = 80\%$ , получим  $I_n = 0,472 \Delta I$  [3]. Приняв типичные значения  $\Delta I = 80$  мА и  $I = 38$  мА оценим мощности постоянного и переменного смещений, полагая, что электрическая энергия почти полностью преобразуется в тепловую на активном сопротивлении лазера,  $P_0 = I_0^2 R_L$ ,  $P_n = I_n^2 R_L$ . Выбрав значения  $R_L = 15$  Ом,  $I_0 = 130$  мА, получим  $P_0 = 250$  мВт,  $P_n = 24$  мВт. Таким образом, в большинстве практических случаев пренебрегать влиянием мощности модулирующего сигнала на параметры ЛД нельзя.

Оставаясь в рамках малосигнальной модели, качественно оценим влияние модулирующей мощности на импеданс ЛД. Одним из возможных механизмов данного влияния является тепловое действие переменной составляющей. Получить прямую зависимость температуры кристалла от модулирующей мощности затруднительно, поэтому рассмотрим зависимость вида  $Z_d(T)$ . Выражение (4) представим в виде  $Z_d = \text{Re}Z_d + j\text{Im}Z_d$  и рассмотрим отдельно активную и реактивную составляющие. Получим

$$\text{Re}Z = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2}; \quad \text{Im}Z_d = \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}, \quad (8)$$

где

$$a = R_1 R_x; \quad b = \omega L_x R_1; \quad c = R_1 + R_x - \omega^2 R_1 C_x L_x; \quad d = \omega (L_x + C_x R_1 R_x).$$

Подставляя в выражение для  $\text{Re}Z_d$  его составляющие и учитывая зависимость их величин от температуры, получаем, что  $\text{Re}Z_d = \text{Re}Z_{d0} - \text{Re}Z_d(T)$ , где температурно-зависимое слагаемое  $\text{Re}Z_d(T)$  на порядок меньше постоянной составляющей активной части импеданса —  $\text{Re}Z_{d0}$ . Следовательно, надо ожидать, что активная часть импеданса ЛД будет слабо зависеть от небольших колебаний температуры кристалла, которые вызываются модулирующей мощностью. По-видимому, это объясняется тем, что увеличение силы тока, вызванное тепловой генерацией носителей в материале полупроводника, несколько компенсируется увеличением сопротивления  $p$ — $n$ -перехода. В данном случае активная составляющая сопротивления уменьшается при увеличении температуры.

При анализе реактивной составляющей импеданса ЛД наиболее информативным параметром является частота электрооптического резонанса  $\omega_0$ . Резонанс системы, очевидно, будет при выполнении условия  $\text{Im}Z_d = 0$ . Учитывая выражение (8), приходим к условию:  $bc - ad = 0$ , из которого после подстановки необходимых величин получаем выражение

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_x C_x} - \frac{R_x^2}{L_x^2}. \quad (9)$$

Величины  $L_x$ ,  $C_x$  и  $R_x$  зависят от многих параметров, в частности от  $I_0$  и  $T$ . Выражение (9) после преобразования принимает вид

$$\omega_0^2 = \frac{\left(\frac{\gamma T}{\alpha} I_0 + \beta G_0 - N_0 \gamma\right)}{\tau(1 + \beta T C_{sc})} - \frac{(\alpha \beta G_0 N_0)^2}{(\tau I_0 - N_0 \alpha)^2}, \quad (10)$$

где  $B = 2k/q\alpha N_0$ ,  $k$  — постоянная Больцмана;  $T = T_0 + \Delta T$ ,  $\Delta T$  — прирост температуры относительно стационарного случая без модуляции (стационарная температура —  $T_0$ ).

Таким образом, полученное выражение (10) позволяет оценить изменение резонансной частоты при дополнительном нагреве ЛД. Заметим, что выражение (6) получается из (10) при предельном переходе к достаточно большому  $I_0$ .

На практике средне- и широкополосные ВОЛП СВЧ рассчитывают при условии, что рабочая частота меньше  $\omega_0$ , так как на резонансной частоте спектр собственных шумов ЛД имеет максимум, а на частотах, больших резонансной, спад частотной характеристики довольно значителен. Следовательно, для улучшения передаточных и шумовых свойств линии необходимо увеличивать частоту  $\omega_0$ , повышая  $I_0$  и уменьшая температуру ЛД.

Для проверки влияния входной модулирующей мощности на эффективность согласования СВЧ линии и лазерного излучателя была собрана экспериментальная установка, которая состояла из генератора Г4-37А, СВЧ-изолятора, измерительной линии и ВОЛП, к выходу которой подключался спектроанализатор С4-27. СВЧ ВОЛП включала в себя передающий, приемный модули и отрезок градиентного многомодового световода длиной 50 м. В передатчике использовался бескорпусный лазерный диод непрерывного действия — 32ДЛ-105 с длиной волны излучения 0,85 мкм. СВЧ сигнал через коаксиально-полосковый переход, разделительный конденсатор безындукционного типа и четвертьволновый трансформатор сопротивлений подавался на ЛД. Постоянное смещение обеспечивала развязывающая RLC-цепь. Схема выполнена на основе симметричной микрополосковой линии на диэлектрической подложке с  $\epsilon = 6$ , что позволило уменьшить габаритные размеры согласующего устройства и избежать значительных потерь СВЧ мощности на излучение. Реактивность ЛД компенсировалась подбором длины шлейфа, который представлял собой отрезок коаксиального кабеля. Шлейф включался на выходе трансформатора в точке питания ЛД. Качество согласования контролировалось по величине КСВ.

Приемный модуль ВОЛП СВЧ выполнен на основе высокоскоростного лавинного фотодиода ЛФД-2А, АЧХ которого достаточно линейна в исследуемом частотном диапазоне. Трансформация активной и компенсация реактивной составляющих в стационарном режиме без модуляции позволила снизить КСВ передатчика с 12 до 5, мощность зондирующего СВЧ сигнала не превышала 0,5 мВт. При увеличении модулирующей мощности с 20 до 200 мВт величина КСВ увеличивалась приблизительно линейно с 5 до 9,5, что свидетельствует об ухудшении согласования передатчика с СВЧ линией. Глубина модуляции

изменялась от единиц до 85 %. Компенсация реактивности излучателя в рабочем режиме с модуляцией ( $m \approx 40\%$ ) позволила стабилизировать КСВ в полосе 70 МГц на уровне 4. Значительная величина оптимизированного КСВ объясняется погрешностями измерения активного сопротивления ЛД и технологическими отклонениями в изготовлении цепи согласования. В процессе эксперимента было также подтверждено слабое влияние СВЧ мощности на активную составляющую импеданса, вариация которой во всем диапазоне мощностей не превышала 3 %.

Для подтверждения теплового механизма изменения параметров ЛД и КСВ при наложении модулирующего сигнала передающий модуль помещался в термостат. Искусственное повышение температуры кристалла ЛД приводило к реакциям, аналогичным мощностному воздействию: незначительному увеличению тока постоянного смещения и изменению КСВ передающего модуля. В пользу термального механизма вариации параметров ЛД свидетельствует также эффект снижения интегральной оптической мощности излучателя. Данный эффект является переходным процессом и заключается в том, что уровень выходной оптической мощности реагирует на ступенчатое скачкообразное увеличение СВЧ мощности также скачкообразно, но затем наблюдается спад вершины оптической интенсивности до некоторого значения по экспоненциальному закону. Аналогичной экспоненциальной стабилизацией отечает ЛД на ступенчатое изменение температуры. Примечательно, что периоды релаксации уровня излучения при мощностном и температурном воздействии на ЛД совпадают (в нашем случае период составлял около 12 с).

Модуляционная АЧХ экспериментальной ВОЛП СВЧ показана на рис. 2. Кривая 1 соответствует случаю, когда согласование активной составляющей импеданса производилось последовательным включением резистора  $R = 35$  Ом в СВЧ цепь передающего модуля вместо трансформатора, кривая 2 отражает случай согласования импедансов трансформатором с учетом мощностного воздействия СВЧ сигнала, а кривая 3 — без учета этого воздействия.

Таким образом, увеличение мощности СВЧ сигнала приводит к уменьшению активной и реактивной составляющих импеданса ЛД. Это свидетельствует о сдвиге частоты электрон-фотонного резонанса излучателя в область низких частот. Желательно избежать этого сдвига и работать в области нормальных реактивностей импеданса ЛД, так как это значительно улучшит шумовые параметры линии. Реактивность же легко компенсируется стандартными приемами.

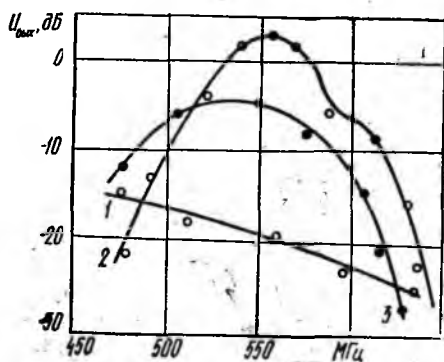


Рис. 2

Итак, при проектировании СВЧ ВОЛП необходимо учитывать влияние мощности модулирующего сигнала на эффективность сопряжения СВЧ и волоконного трактов. Основными методами достижения компромисса между увеличением глубины модуляции и улучшением согласования являются: ограничение модулирующей СВЧ мощности, применение температурно-зависимых компенсирующих реактивных элементов и охлаждение кристалла ЛД.

Список литературы: 1. *Высокочастотная аналоговая модуляция полупроводникового лазера* / Н. Н. Евтихийев, А. В. Лукашин, Г. Т. Пак, В. В. Поповичев // Квант. электроника. 1988. Т. 15, № 10. С. 2012—2015. 2. *Гауэр Дж.* Оптические системы связи : Пер. с англ. М., 1989. 504 с. 3. *Бахрах Л. Д., Блискавицкий А. А.* Применение лазеров и волоконнооптических систем для управления формированием СВЧ-сигналов и их распределения в антенных решетках // Квант. электроника. 1988. Т. 15, № 5. С. 879—914.

*Поступила в редколлегию 18.12.89*