

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

### К РАСЧЕТУ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ С СВЧ-ПОДНЕСУЩЕЙ

Волоконно-оптические линии передачи СВЧ-поднесущей (ВОЛП СВЧ) по ряду параметров превосходят традиционные системы передачи СВЧ-сигналов. Так, например, величина затухания сигнала в световоде на 3—4 порядка меньше, чем в коаксиальном кабеле. Это позволяет создавать широкополосные ВОЛП большой длины.

При разработке ВОЛП СВЧ возникает задача увеличения коэффициента передачи по мощности от радиочастотного входа передатчика до выхода фотодетектора. Эта задача наиболее просто разрешима при использовании прямой (токовой) модуляции инжекционных лазеров.

Цель работы — создание простой методики расчета передаточных характеристик ВОЛП СВЧ, учитывающей не только электрические, но и технологические параметры лазерных излучателей.

Мощность СВЧ сигнала на выходе фотодетектора (без усилителя)  $P_{\text{вых}}$  связана с мощностью на входе передатчика  $P_{\text{вх}}$  простым соотношением  $P_{\text{вых}} = K_M \cdot P_{\text{вх}}$  (1), где  $K_M$  — коэффициент передачи по мощности. Он выражается через коэффициент преобразования фотодетектора  $S$ , коэффициент потерь оптической мощности в компонентах ВОЛП —  $\alpha$ , внешнюю дифференциальную эффективность лазерного диода —  $\eta$ , коэффициент отражения СВЧ-волны от входа лазера —  $\Gamma$ , сопротивления источника сигнала  $R_{\text{н}}$  и нагрузки  $R_{\text{н}}$  следующим образом:

$$K_M = (1 - |\Gamma|^2) (S\alpha\eta)^2 R_{\text{н}}/R_{\text{н}} \quad (2)$$

Оптимальное пассивное согласование лазерного диода (ЛД) с источником сигнала в полосе частот от  $\omega_a$  до  $\omega_b$  будет при условии

$$\begin{aligned} |\Gamma| &= \exp[-\pi(\omega_b - \omega_a)/R_0 C], \quad \omega_a < \omega < \omega_b \\ |\Gamma| &= 1, \quad \omega < \omega_a, \quad \omega > \omega_b. \end{aligned} \quad (3)$$

По оценкам [1], для обычного гетеролазера  $R_0 = 4$  Ом,  $C = 300$  пФ и, следовательно,  $|\Gamma|_{\min} = 0,518$  в полосе 600 МГц,  $|\Gamma|_{\min} = 0,674$  в полосе 1 ГГц. При согласовании импедансов выполняется условие  $R_i = R_n$ . В работе [2] дана более оптимистичная оценка значения  $|\Gamma| = 0,37$  для полосы 1,5 ГГц. Величина  $\eta$  определяется для одной грани кристалла и зависит от внутренних параметров лазера, а также от температуры. Зависит значение  $\eta$  лежит в области 0,1—0,3 Вт/А. В коэффициент оптических потерь  $\alpha$  входят потери на сопряжение излучатель — волокно —  $\alpha_1$ , фотодиод — волокно —  $\alpha_2$ , потери в материале световода и на стыках. Минимизация этих потерь наиболее важна, так как они входят в (2) во второй степени. Поэтому наиболее подходящей длиной волны излучения является 1,3 мкм.

Необходимо отметить, что при определении потерь излучения при вводе его в волокно могут возникать значительные погрешности, связанные с тем, что диаграмма направленности ЛД с модуляцией может отличаться от пространственного распределения излучения без модуляции [3]. При устранении оптической обратной связи, приводящей к нелинейным искажениям передаваемого сигнала, наиболее эффективно применение оптических изоляторов. Поэтому в  $\alpha$  необходимо учесть оптические потери в таких компонентах.

Обозначим через  $P_m$  мощность переменной составляющей оптического сигнала, причем в реальной ситуации  $P_m < P_{\text{вх}}$ . Определим, как влияют на  $P_m$  постоянная составляющая тока (ток смещения) —  $I_0$ , глубина модуляции —  $m$ , температура окружающей среды —  $T_c$  и тепловое сопротивление кристалла ЛД — окружающая среда —  $R_T$ . Таким образом, требуется построить модель ЛД и исследовать функцию  $P_m(m, I_0, T_c, R_T)$ . При этом сделаем предположение, что рабочие частоты модуляции лежат намного ниже частоты электрон фазового резонанса, который может значительно изменить вид модуляционной характеристики ВОЛП.

Прототипом модели ЛД служил бескорпусный лазерный диод 32ДЛ-105 с длиной волны излучения 0,85 мкм, пороговым током  $I_n = 0,18$  А при  $T_0 = 296$  К и максимальной выходной мощностью 5 мВт. Зависимость  $P_m$  от глубины модуляции имеет вид  $P_m = P_0 m / (2 - m)$  (4), где  $P_0$  — постоянная составляющая оптической мощности ЛД при токе накачки  $I_0$ . Величина  $P_0$  выражается через  $\eta$ ,  $J_0$  и пороговый ток  $I_n$  следующим образом:  $P_0 = \eta(J_0 - J_n)$  (5). Пороговый ток весьма чувствителен к температуре ЛД. Если принять, что  $I_n$  экспоненциально зависит от изменения температуры  $\Delta T$ , то данный закон записывается как

$$I_n(\Delta T) = I_n(T_0) \exp((1 + \Delta T/T_1) \Delta T/T_0), \quad (6)$$

где  $T_0$  — начальная температура, относительно которой отсчитывается  $\Delta T$ ,  $T_1$  — величина, имеющая размерность температуры и определяемая экспериментальным путем.  $I_n(T_0)$  — пороговый ток при  $T = T_0$ . Приrost температуры обусловлен не только повышением температуры окружающей среды, но и током, протекающим через прибор. Поэтому:  $\Delta T = T_c - T_0 + R_T P_n$  (7), где  $P_n$  — электрическая мощность, рассеиваемая на ЛД в виде теплоты. Выражение (7) является приближенным, так как не учитывается нелинейный характер теплообмена, а выражение (6) при  $T_1 = 22.5$  описывает зависимость  $I_n(\Delta T)$  в интервале  $\Delta T = 20^\circ$  с точностью 5%. КПД лазерного диода невелик, поэтому будем считать, что  $P_n = I_0 U_0 + I_m^2 R_d$ , где  $U_0$  — напряжение на ЛД,  $I_m$  — переменная составляющая тока,  $R_d$  — дифференциальное сопротивление ЛД. Экспериментально определено, что для моделируемого прибора  $R_d = 4$  Ом. Учитывая, что  $U_0 = U_n + (I_0 - I_n) R_d$ , где  $U_n$  — пороговое напряжение, получаем

$$P_n = I_0 (U_n + (I_0 - I_n) R_d) + I_m^2 R_d, \quad (8)$$

где

$$I_m^2 = 0.5 (m / (2 - m))^2 (I_0 - I_n)^2. \quad (9)$$

Для моделирования зависимости  $P_m(m, I_0, T_c, R_T)$  была составлена программа на языке Фортран-4 для миниЭВМ Мера-60.

Время расчета одного варианта — 0,5 с.

На рис. 1 приведена зависимость  $P_m(m)$  при  $R_T = 40$  град/Вт,  $T_c = 296$  К,  $I_0 = 0.23$  А — 1 кривая; 0.22 А — 2; 0.21 А — 3; 0.20 А — 4. Очевидно, что существует некоторое оптимальное значение тока постоянного смещения, так как при больших величинах  $I_0$  происходит быстрая деградация ЛД и уменьшается его срок эксплуатации.

Весьма важным параметром оптического передатчика является тепловое сопротивление кристалла ЛД — окружающая среда. Значительные токи, протекающие через  $p-n$  переход разогревают кристалл ЛД, что приводит к экспоненциальному росту порогового

тока, падению выходной оптической мощности и изменению длины волны излучения. Термостабилизация передающего модуля, часто используемая в ВОЛП СВЧ для сдвига электрон-фотонного резонанса в область высоких частот, стабилизации длины волны излучения и выходной оптической мощности, иногда не эффективна из-за высокого температурного сопротивления  $R_T$ . Здесь вступают в противоречие два условия: высокая эффективность передачи СВЧ-мощности к излучателю и обеспечение оптимального теплового режима работы прибора. С точки зрения первого условия ЛД необходимо включать либо в микрополосковую линию, либо размещать в специальном СВЧ-корпусе, оптимизированном для вклю-

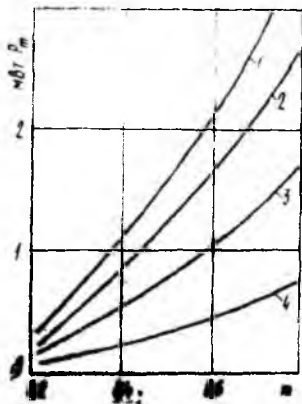


Рис. 1

чения в СВЧ-цепь. Второе условие требует либо применения радиатора большой площади (для 32 ДЛ — 105 — 50 см<sup>2</sup>), либо эффективный теплоотвод при помощи охлаждающего элемента с тепловым сопротивлением элемент—корпус ЛД 3—5 град/Вт, что затрудняет передачу СВЧ-сигнала без потерь.

Зависимость  $P_m(m)$  при различных тепловых сопротивлениях носит такой же характер, как и на рис. 1. Особенностью данной зависимости является более сильное влияние  $R_T$  на выходную мощность ЛД. На рис. 2 представлена зависимость  $P_m(R_T)$ . Кривые 1, 2, 3 и 4 отвечают различным  $m$ : 0,2, 0,4, 0,6 и 0,8 соответственно. Показательно, что увеличение  $R_T$  всего на 40 град/Вт снижает мощность выходного сигнала в 5 раз.

Выясним, при каких условиях модуляция излучателя существенно повлияет на выходную оптическую мощность. Зависимости нормированной мощности от глубины модуляции:  $P_o(m)/P_o(0) = P_n(m)$  показаны на рис. 3. Анализ данных зависимостей пока-

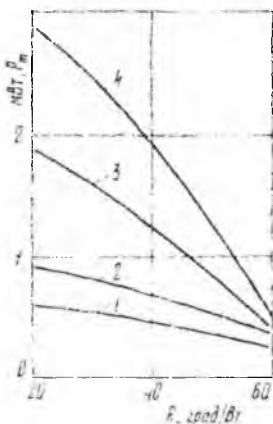


Рис. 2

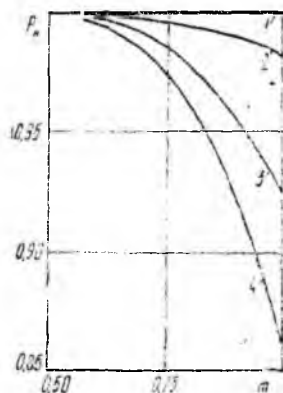


Рис. 3

зал, что для  $R_T < 100$  град/Вт —  $P_n(m) = 1$  (прямая 1). Кривые 2, 3, 4 соответствуют тепловым сопротивлениям 240, 260 и 280 град/Вт. Данный режим рассчитан для  $J_0 \gg J_n$ . Довольно ощутимое влияние глубины модуляции на выходную оптическую мощность объясняется тем, что модулирующий сигнал дополнительно разогревает активную область ЛД. Это может привести, в свою очередь, к тому, что зависимость  $P_m(m)$  окажется немонотонной и будет достигать оптимального значения при  $m < 1$ . На практике такой режим трудно реализуем. Однако проведенные нами эксперименты показывают, что при значительной мощности СВЧ-сигнала ( $P_{вх} > 15$  дБм) после насыщения значения  $P_m$  следует ее спад. Это свидетельствует о влиянии модулирующего сигнала с большой глубиной модуляции на параметры ЛД.

Строго говоря, исследование передаточных характеристик ВОЛП СВЧ требует комплексного подхода, который предусмат-

ривает рассмотрение электрических и оптических процессов во взаимосвязи. Поэтому пренебрегать такими явлениями, как чирпинг (динамическое изменение длины волны генерации), оптическая обратная связь и электрон-фотонный резонанс при полном анализе процессов в ВОЛП СВЧ нельзя.

Приведем пример приближенного определения передаточной характеристики ВОЛП СВЧ, разработанной на основе 32ДЛ — 105 и лавинного фотодиода ЛФД-2 на полосу частот — 0,45—0,8 ГГц. Резонансная частота излучателя при токах смещения больших 0,2 А лежит в области выше 1 ГГц. Выберем типичные параметры компонентов ВОЛП: чувствительность ЛФД — 4 А/Вт;  $R_T = 40$  град/Вт; коэффициент потерь лазер — волокно  $\alpha_1 = 0,6$ , волокно — фотодиод  $\alpha_2 = 0,7$ , погонные потери в волокне  $\alpha_n = 4$  дБ/км, длина линии  $l = 1$  км,  $\Gamma = 0,5$ ,  $\eta = 0,2$ ,  $R_n/R_n = 1$ . Подставив эти параметры в выражение

$$K_m = (1 - |\Gamma|^2) (S\alpha_1\alpha_2\alpha_n l \eta)^2 R_n/R_n, \quad (10)$$

получим  $K_m = -20$  дБ. Для достижения приемлемых интермодуляционных искажений выберем  $m = 0,6$  и ток постоянного смещения — 0,21 А. По графику рис. 1 (кривая 3) определяем  $P_m = 1$  мВт. Тогда мощность СВЧ-сигнала на выходе фотоприемника, согласно формуле (1), составит 10 мкВт. Теперь определим СВЧ-мощность, необходимую для достижения заданного режима:  $P_{вх} = I_m^+ R$ . В режиме согласования импеданса ЛД и линии  $R = 50$  Ом. Подставляя в (9) величины  $m$ ,  $I_0$  и  $I_n = 0,18$  А, получаем, что при  $T_c = 296$  °К —  $P_{вх} = 4$  мВт.

Таким образом, данная методика расчета передаточных характеристик позволяет учесть технологические параметры ЛД, а также условия модуляции. Приведенные соотношения могут быть использованы не только для аналоговых ВОЛП, но и для цифровых систем, а также будут полезными при создании автоматизированных систем проектирования волоконно-оптических устройств.

**Список литературы:** 1. Stephens W. E., Joseph T. R. A 1,3 Mm microwave fiber-optic link a directmodulated laser transmitter // I. Lightwave Technol. 1985. Vol. L T—3, № 2. P. 308—315. 2. Эффективное согласование СВЧ модулятора с лазерным диодом в заданной полосе частот гигагерцевого диапазона / А. А. Блисковичкий и др. / Квант. электроника. 1989. Т. 16. № 8. С. 1751—1753. 3. Пространственно-модуляционные характеристики излучения планарных полосковых гетеролазеров / Н. Д. Жуков, Г. Т. Микаэлян и др. / Письма в Журн. техн. физики. 1988. Т. 14, № 4. С. 364—368.

Поступила в редколлегию 20.03.90