

К. т. н. В. Б. КАТОК, к. ф.-м. н. В. Г. ЛЕВАНДОВСКИЙ

Украина, г. Киев, Науч.-инж. центр
линейно-кабельных сооруженийДата поступления в редакцию
14.09 1998 г.

Оппонент к. т. н. Т. В. МАКАРОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ В СВЕТОВОДАХ
С ВКЛЮЧЕНИЯМИ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ

Предлагается методика моделирования потерь в световоде с произвольным профилем показателя преломления в приближении первого порядка теории возмущений по вариации показателя преломления.

A new model of simulation of propagation losses in lightguide with arbitrary refraction indices profile for first order perturbation theory of refraction indices variation is proposed.

Современная волоконная оптика широко использует материалы с низким уровнем оптических потерь, который приближается к уровню собственных потерь в материале (в кварцевом стекле 0,1 дБ/км на длине волны $\lambda=1,55$ мкм). Однако в процессах изготовления и эксплуатации могут образовываться поглощающие электромагнитное излучение дефекты. Этому способствует целый ряд причин: наличие легирующих добавок и их диффузия, диффузия гидроксильных групп ОН из опорной кварцевой трубки в процессах MCVD (модифицированный метод химического осаждения из газовой фазы) и VAD (осевой метод осаждения из газовой фазы), механические напряжения на границе с подложкой, возникающие при нанесении пленок, образование микротрещин в поверхностном слое световода и диффузия в эти полости групп ОН, радиационное воздействие (электронное, гамма-облучение и т. д.), электрическое поле и достаточно мощные световые потоки [1–3]. В результате воздействия перечисленных факторов возможно образование неоднородного (в общем случае) в пространстве профиля поглощающих дефектов.

В настоящей работе смоделированы оптические свойства подобных структур на основе метода эффективной диэлектрической проницаемости для матричной дисперсной системы, используемого ранее в задачах такого типа [4, 5]. Проводились расчеты затухания в световоде с произвольным профилем показателя преломления, содержащем слой с поглощающими включениями сложной структуры.

Диэлектрическая проницаемость системы поглощающих атомов (ϵ_d) записывалась на основе осцилляторной модели Лоренца, которая имеет резонанс-

ный характер, а затухание характеризуется мнимой частью:

$$\epsilon_d = \epsilon_\infty + \frac{W}{1 - (\lambda/\lambda_m)^2 + i\Gamma(\lambda/\lambda_m)}, \quad (1)$$

где $\epsilon_\infty=1$, $W=80$, $\Gamma=0,05$, $\lambda_m=1,38$ — параметры лоренцевской кривой, выбранные соответствующими первой гармонике линии поглощения ОН-группы [4, 5]; $i=(-1)^{1/2}$.

Поглощающие включения моделировались как сферические частицы (хотя можно учесть и другие формы [4, 5]) размерами, намного меньшими длины волны, полностью заполненные поглощающим веществом с комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ_d (с резонансным пиком при $\lambda=\lambda_m$), либо с пленкой из такого поглощающего вещества. Для моделирования эффективной диэлектрической проницаемости вещества световода ($\tilde{\epsilon}_2$) использовалось дипольное приближение, хотя в дальнейшем предполагается учесть процессы кластеризации:

$$\frac{\tilde{\epsilon}_2 - \epsilon_{20}}{\tilde{\epsilon}_2 + 2\epsilon_{20}} = f\alpha_j; \quad f = (4/3)\pi R^3 N_0, \quad (2)$$

где f — степень заполнения поглощающими включениями радиусом R и концентрацией N_0 матричной системы с диэлектрической проницаемостью ϵ_{20} ;

α_j — поляризуемость микрополостей ($j = 1, 2$).

Для микрополостей, заполненных гидроксильными группами, (тип 1) можно использовать известное выражение [4]

$$\alpha_2 = \frac{\epsilon_d - \epsilon_{20}}{\epsilon_d + 2\epsilon_{20}}, \quad (3)$$

а для двухслойной сферы с тонкой пленкой (тип 2) поляризуемость выглядит следующим образом:

$$\alpha_1 = \frac{(\epsilon_d - \epsilon_{20})(\epsilon_1 + 2\epsilon_{20}) + f_0(\epsilon_1 - \epsilon_d)(\epsilon_{20} + 2\epsilon_d)}{(\epsilon_d + 2\epsilon_{20})(\epsilon_1 + 2\epsilon_d) + 2f_0(\epsilon_d - \epsilon_{20})(\epsilon_1 - \epsilon_{20})}, \quad (4)$$

где ϵ_1 — диэлектрическая функция микрополостей;
 f_0 — относительный объем внутренней части микрополости.

Принимая во внимание, что даже для затухания 1–10 дБ/км мнимую часть эффективной диэлектрической проницаемости вещества световода мож-

но полагать малой величиной по сравнению с действительной частью, для решения использовалось первое приближение метода возмущений. В этом случае на основе соотношения взаимности для скалярного волнового уравнения можно поправку для постоянной распространения моды связать с возмущением эффективной диэлектрической проницаемости моды, протекающей через поперечное сечение области возмущения градиентного (в общем случае) световода.

Пусть ψ_1 и β_1 — поле и постоянная распространения моды одного волновода с профилем показателя преломления $n_1(r)$, а ψ_2 и β_2 соответствуют волноводу с $n_2(r)$ (r — радиальная координата). Обе моды удовлетворяют скалярному волновому уравнению типа

$$(\nabla_t^2 + k^2 n_j^2 - \beta_j^2) \psi_j = 0, \quad (j = 1, 2); \quad (5)$$

$$\nabla_t^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi_i}{\partial \varphi^2},$$

где ∇_t — оператор Лапласа для поперечных координат;
 k — волновое число.

Умножим первое из этих уравнений на ψ_2^* , а второе на ψ_1^* и проведем интегрирование по неограниченной площади поперечного сечения S_∞ . Далее с учетом известной теоремы Стокса второй интеграл в правой части преобразуется в криволинейный интеграл на бесконечности, который обращается в нуль, т. к. ψ_1, ψ_2 и их первые производные экспоненциально уменьшаются до нуля для направляемых мод. Если профиль показателя преломления и (или) форма поперечного сечения одного световода незначительно отличается от соответствующих параметров другого, то в большинстве случаев можно считать, что поперечные поля мод этих световодов идентичны, т. е. $\psi_1 \approx \psi_2$.

Исключением являются лишь поляризационные поправки к скалярной постоянной распространения, для вычисления которых требуются поправки более высоких порядков к ψ_1 , получаемые либо разложением собственных функций волновода в ряд, либо использованием функций Грина.

Следует отметить, что хотя поля мод возмущенного и невозмущенного световода можно считать одинаковыми, предположить, что постоянные распространения этих мод равны, нельзя, т. к. зависимость поля возмущенного световода от продольной координаты (z) пропорциональна $\exp(-\beta z)$. В случае слабонаправляющих световодов можно считать

$$\beta_1^2 - \beta_2^2 \approx 2kn_m(\beta_1 - \beta_2); \quad n_1^2 - n_2^2 \approx 2n_m(n_1 - n_2),$$

предполагая, что n_m — максимальный показатель преломления в возмущенном и невозмущенном световодах. В результате получим выражение, связывающее постоянную распространения возмущенного (β_1) и невозмущенного (β_2) световодов:

$$\beta_1 = \beta_2 + k \frac{\int_{S_\infty} (n_1 - n_2) \psi^2 dS}{\int_{S_\infty} \psi^2 dS}. \quad (6)$$

Здесь интеграл в числителе не равен нулю в области, в которой параметры возмущенного и невозмущенного световодов различны.

Рассмотрим более простой случай, когда в некотором слое (например, сердцевине световода) вследствие возмущения диэлектрической функции ($\tilde{\epsilon}_2 - \epsilon_{20}$) происходит изменение показателя преломления на мнимую величину δn (не зависящую от r), т. е. $n_1(r) = n_2(r) + \delta n$. Поскольку в данном случае δn является мнимой величиной, то и поправка к β_2 также будет мнимой, т. е. будем определять добавку к коэффициенту поглощения $\delta\alpha$. Эта добавка обусловлена наличием поглощающих примесей в цилиндрическом слое световода с произвольным профилем показателя преломления.

Учитывая, что плотность мощности невозмущенной моды, протекающей через волноводный слой площадью поперечного сечения S_α ,

$$\eta = \frac{\int_{S_\alpha} \psi^2 dS}{\int_{S_\infty} \psi^2 dS}, \quad (7)$$

из (6) получим окончательно

$$\delta\alpha = \eta \delta n, \quad (8)$$

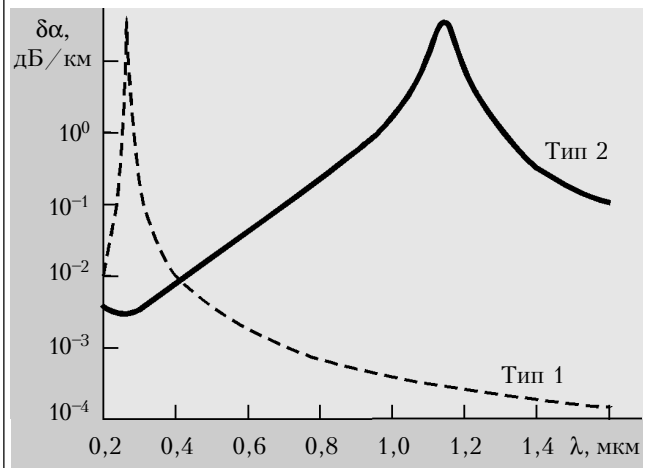
где η — доля мощности, распространяющаяся в цилиндрическом слое с поглощающими включениями.

Величина δn определяется эффективной диэлектрической проницаемостью $\tilde{\epsilon}_2$, рассчитанной согласно (2):

$$\delta n = (\tilde{\epsilon}_2)^2 - (\epsilon_{20})^2. \quad (9)$$

Для расчета плотности мощности невозмущенной моды использовался вариационный метод, адаптированный для такого рода задач [6]. В результате проведенного численного моделирования получены дисперсионные зависимости коэффициента затухания световодов с разными профилями показателя преломления, толщиной и расположением поглощающих слоев, размерами и концентрацией включений, толщиной поглощающих пленок в частотах и параметрами элементарных осцилляторов.

На рисунке приведены зависимости, характеризующие величину добавки к коэффициенту погло-



щения для включений в сердцевине волокна диаметром 8,5 мкм с поляризуемостью микрополостей типов 1 и 2 (см. (3) и (4)), содержащих гидроксильную группу ОН ($1 \cdot 10^{-7}\%$ мас.) в случае параболического профиля показателя преломления с $n_m = 1,468$. Здесь видно, что в окрестности $\lambda = 1,55$ мкм крыло полосы ОН, максимум которой для отдельного осциллятора соответствует $\lambda = 1,38$ мкм, дает дополнительные потери порядка $\delta\alpha \approx 0,0003$ дБ/км для структуры включений типа 1 и на два порядка больше для структуры типа 2 — микрополостей с поглощающей пленкой. Такое различие объясняется тем, что в исследуемой матричной структуре наблюдается смещение резонансного максимума, связанное с поглощением на частоте Фрëлиха [4, 5], величина которого зависит от толщины поглощающей пленки, параметров поглощающих дефектов и показателя преломления поглощающего слоя в световоде. При этом коэффициент затухания в определенном диапазоне частот может отличаться на несколько порядков в зависимости от структуры поглощающих включений.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Вихров С. В., Левандовский В. Г., Чайка Г. Е. Роль электронной подсистемы в механизме формирования состава бинарных соединений // Теор. и эксперим. химия. — 1990. — №1. — С. 78–81.
2. Левандовський В. Г., Смоляр В. О., Чайка Г. Е. Взаємодія електронів середніх енергій з твердими тілами. (Огляд) // Укр. фіз. журнал. — 1996. — Т. 41, №10. — С. 976–990.
3. Chaika G. E., Grechko G. E., Levandovskii V. G. Manyphonon processes of defect creation in surface region of semiconductors, initiated by electrons // Functional materials. — 1995. — Vol. 2. — P. 169–172.
4. Grechko L. G., Levandovskii V. G., Motrich V. V., Reshetnyak V. Yu. Absorption of electromagnetic radiation by surface modes in nonhomogeneous media // Ibid. — P. 194–200.
5. Grechko L. G., Levandovskii V. G., Motrich V. V., Reshetnyak V. Yu. The electromagnetic radiation absorption with heterogeneous systems // Absorption science and technology. — 1996. — Vol. 14. — P. 102–111.
6. Gomilko A., Malyuga V. Variational method for analysis of wave propagation in inhomogeneous optical fibers // First international conference on «Mathematics in communications». England, Loughborough University, 1998. — To be published.

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И СИСТЕМЫ

В журнале представлена разносторонняя информация о последних достижениях в области микроэлектроники, раскрываются основные достоинства последних разработок таких известных фирм, как Analog Devices, Texas Instruments, National Semiconductor, Hewlett Packard, Motorola, Siemens, Raychem, Mitel, Pace, AIM, Schroff, Maxdata и др.

Неполный перечень рубрик журнала:

- ◆ проблемы качества электронных компонентов и систем;
- ◆ полупроводниковые датчики физических величин;
- ◆ усилители;
- ◆ аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи;
- ◆ микропроцессоры и микроконтроллеры;
- ◆ средства коммуникации;
- ◆ промышленная электроника;
- ◆ поверхностный монтаж и конструктивные элементы.

Материалы в журнале представлены в виде аналитических обзоров, прогнозных статей, описания конкретных технических решений и рекомендаций к применению, информационных листов. На страницах журнала можно также ознакомиться с материалами международных выставок и научно-технических семинаров.

Подписаться на журнал можно через отделение связи или в офисе фирмы *VD MAIS*.

Подписной индекс — 40633.

Приглашаются к сотрудничеству предприятия и фирмы, заинтересованные в размещении рекламы на страницах журнала.

Адрес редакции:

Украина, г. Киев,
ул. Владимирская, 101
т/ф (044) 227-13-56, 227-13-89,
227-22-62, 227-52-81
факс (044) 227-36-68

Адрес для переписки:

Украина, 252033, г. Киев-33, а/я 942,
ул. Владимирская, 101
НПФ VD MAIS