

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 535.31, 535.24; 535.6; 621.372

Л. И. Сотская, канд. физ.-мат. наук

РАСЧЕТ ПРОПУСКАНИЯ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ПАЛЛАДИЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ В АТМОСФЕРЕ ВОДОРОДА

Развит строгий метод интегральных уравнений для расчета мод микроструктурных оптических волокон (МОВ) с поглощающими покрытиями конечной толщины. На его основе исследовано влияние толщины палладиевого покрытия и внутренней структуры волокна на чувствительность пропускания МОВ к примеси водорода в атмосфере.

Сегодня интенсивно исследуются микроструктурные оптические волокна, волноводные области которых образованы наборами микроскопических воздушных каналов в диэлектрической среде (оболочке волокна). Хорошо известно, что все моды таких волокон вытекают из волноводного канала [1, 2]. В результате они могут эффективно взаимодействовать с покрытием волокна, которое служит для придания механической прочности волокну и фильтрации мод оболочки, а в некоторых случаях может использоваться как чувствительный элемент оптического сенсора [3, 4]. В данной работе исследованы некоторые эффекты, связанные с таким взаимодействием. Основное внимание уделено вопросу максимизации чувствительности пропускания МОВ с палладиевым покрытием к концентрации водорода в атмосфере.

Свойства вытекающих мод МОВ анализировались в [1, 2, 5–8]. Однако использованные при этом методы расчета не позволяли исследовать практически важный вопрос о влиянии толщины покрытия волокна на модовые характеристики. В настоящей работе это ограничение устранено путем обобщения строгого метода интегральных уравнений [5, 6].

Поперечное сечение рассматриваемых волокон представлено на рис. 1. Оно содержит n круговых включений в круговой оболочке радиуса A . Радиус и

диэлектрическая проницаемость l -го включения равны a_l и ε_l соответственно. Проницаемость оболочки равна ε_s . В области $A < \rho < B$ находится покрытие волокна. Оно имеет проницаемость ε_c . Волокно окружено однородной средой с проницаемостью ε_a . Величины ε_l ($l = 1, 2, \dots, n$), ε_c и ε_a предполагаются комплексными.

Для расчета модовых характеристик МОВ с покрытиями конечной толщины воспользуемся интегральными уравнениями относительно поперечных компонент магнитного поля [6]. Эти уравнения формулируются в областях включений и в области $\rho > A$ (см. рис. 1), а в остальном пространстве они являются прямыми квадратурными формулами [6]. Искомые функции представим в виде

$$H_j = \sum_{v=-\infty}^{\infty} C_{jv}^{(l)} J_v(\chi_l \rho_l) \exp(iv\varphi_l),$$

$$(l = 1, 2, \dots, n); \quad (1)$$

$$H_j = \sum_{v=-\infty}^{\infty} [F_{jv} J_v(\chi_c \rho) + G_{jv} H_v^{(2)}(\chi_c \rho)] \exp(iv\varphi_l),$$

$$(A < \rho < B); \quad (2)$$

$$H_j = \sum_{v=-\infty}^{\infty} D_{jv} H_v^{(2)}(\chi_a \rho) \exp(iv\varphi_l),$$

$$(\rho > B). \quad (3)$$

ваться в качестве чувствительного элемента датчика примеси водорода в атмосфере [9]. Воспользуемся моделью [10], в которой зависимость диэлектрической проницаемости палладия от концентрации водорода C дается формулой $\varepsilon_c(C) = f(C) \varepsilon_c(0)$, где $f(C)$ – некоторая вещественная нелинейная функция, не зависящая от параметров МОВ. Тогда нетрудно показать, что при оптимальном выборе длины отрезка волокна с палладиевым покрытием L из условия $2L \operatorname{Im} \beta = 1$, где β – постоянная распространения основной моды, относительное приращение интенсивности света на выходе волокна $\Delta I I^{-1}$, соответствующее приращению концентрации ΔC , составит $\Delta I I^{-1} = -\eta \Delta C (\partial f / \partial C)$. Здесь $\eta = [\operatorname{Im}(\varepsilon_c \partial \beta / \partial \varepsilon_c) (\operatorname{Im} \beta)^{-1}]_{C=0}$ – коэффициент,

связывающий чувствительность датчика с геометрией сечения МОВ.

Рис. 2 позволяет судить о возможностях максимизации $|\eta|$ за счет выбора параметров МОВ. При расчетах использованы значения $N_c = 2$; $\varepsilon_c(0) = -14,4 - i14,6$; $\lambda_0 = 0,62$ мкм; $a = K \cdot 1,43$ мкм; $\Lambda = K \cdot 8,54$ мкм; $A = K \cdot 61,5$ мкм. Множитель $K < 1$ учитывает изменение размеров МОВ при его локальной перетяжке (изготовлении тейпера [11]) в предположении сохранения подобия поперечного сечения волокна. Указанные значения соответствуют микроструктурным волокнам с большой площадью пятна моды, технология изготовления которых разработана в Мексиканском центре оптических исследований (Леон, Мексика) [7].

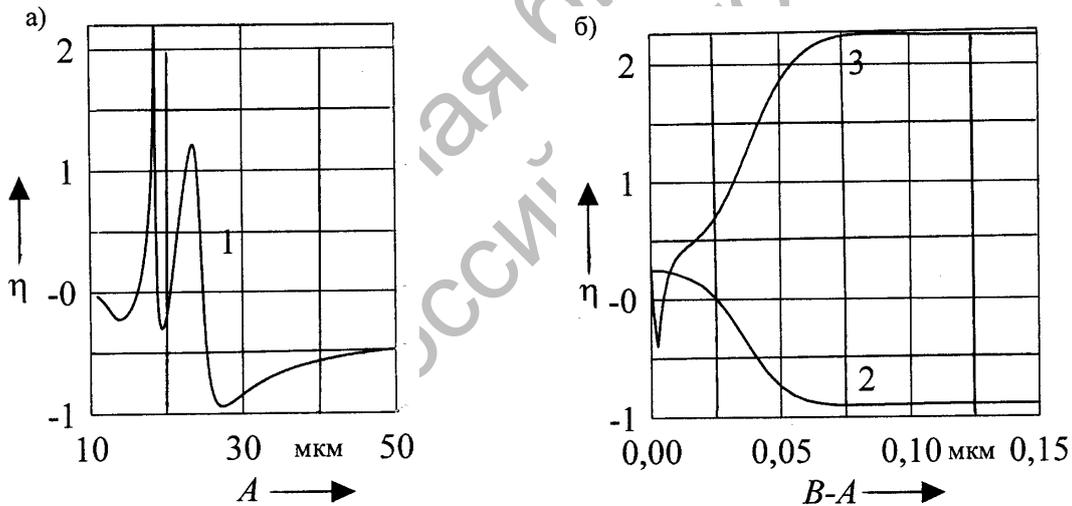


Рис. 2. Зависимости коэффициента чувствительности η от радиуса оболочки МОВ (а) и от толщины палладиевого покрытия (б): 1 – зависимость $\eta(A)$ при $B - A = 0,2$ мкм; 2 и 3 – зависимости $\eta(B - A)$ при значениях $A = 18,58$ мкм и $A = 27,18$ мкм, соответствующих абсолютным минимуму и максимуму зависимости 1

Зависимость $\eta(A)$ на рис. 2 построена в представляющем практический интерес диапазоне $0,2 \leq K \leq 1,0$. Она соответствует случаю $B - A \rightarrow \infty$, т. к. пленка палладия толщиной $0,2$ мкм не прозрачна. Эта зависимость, в отличие от аналогичных зависимостей для стандарт-

ных одномодовых волокон с палладиевым покрытием [10], является немонотонной. Ее вид объясняется вытеканием основной моды МОВ из волноводного канала, что приводит к возникновению стоячих волн между включениями и покрытием. Кривые 2 и 3 (см. рис. 2)

иллюстрируют связь коэффициента η с толщиной покрытия для экстремальных точек зависимости $\eta(A)$. Слабо выраженные максимумы $|\eta|$ наблюдаются при $B - A = 0,080$ мкм и $B - A = 0,087$ мкм для кривых 2 и 3 соответственно, а при $B - A \rightarrow 0$ коэффициент η обращается в нуль. Представленные результаты позволяют заключить, что известные датчики с палладиевыми покрытиями толщиной несколько нанометров [9, 10] обладают сравнительно низкой чувствительностью, которая может быть повышена более чем на порядок за счет оптимизации структуры МОВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation / T. P. White [etc.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2002. – Vol. 19, № 10. – P. 2322–2330.
2. Multipole method for microstructured optical fibers. II. Implementation and results / B. T. Kuhlmey [etc.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2002. – Vol. 19, № 10. – P. 2331–2340.
3. **Окоси, Т.** Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси. – Л. : Энергоатомиздат, 1990. – С. 43–46.

4. Fringe generation with non-uniformly coated long-period fiber gratings / I. Del Villar [etc.] // Opt. Express. – 2007. – Vol. 15, № 15. – P. 9326–9340.

5. **Sotsky, A. B.** Modes of capillary optical fibers / A. B. Sotsky, L. I. Sotskaya // Opt. Commun. – 2004. – Vol. 230, № 1–3. – P. 57–69.

6. **Сотский, А. Б.** Метод интегральных уравнений в теории микроструктурных оптических волокон / А. Б. Сотский, Л. И. Сотская // ЖТФ. – 2004. – Т. 74, вып. 2. – С. 32–40.

7. Large mode area holey fibers with a few air channels in cladding: modeling and experimental investigation of the modal properties / V. P. Minkovich [etc.] // J. Opt. Soc. Am. B. – 2004. – Vol. 21, № 6. – P. 1161–1169.

8. Comparison of different methods for rigorous modeling of photonic crystal fibers / M. Szpulang [etc.] // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14, № 12. – P. 4699–5714.

9. Modeling of holey fiber tapers with selective transmission for sensor applications / V. P. Minkovich [etc.] // J. Lightwave Technol. – 2006. – Vol. 24, № 11. – P. 4319–4328.

10. Microstructured optical fiber coated with thin films for gas and chemical sensing / V. P. Minkovich [etc.] // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14, № 18. – P. 8413–8418.

11. In-line highly sensitive hydrogen sensor based on palladium-coated single-mode tapered fibers / J. Villatoro [etc.] // IEEE Sensors Journal. – 2003. – Vol. 3, № 4. – P. 533–537.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 08.05.2008

L. I. Sotskaya **Calculation of the transmittance of microstructured optical fibers with palladium cover in hydrogen atmosphere**

The rigorous method of integral equations for calculation the modal properties of microstructured optical fibers with absorbing covers of finite thickness has been developed. The influence of palladium cover thickness and the microstructured fiber inner structure on the sensitivity of the fiber transmittance to hydrogen concentration in atmosphere has been investigated.