

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАГАСАННЯ В СВІТЛОВОДАХ З НАНОНЕОДНОРІДНОСТЯМИ

*Левандовський В. Г., к.ф.-м.н., доц.; Непочатих Ю. В.; Руденко С. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

У сучасній волоконній оптиці широко використовують матеріали з низьким рівнем оптичних втрат, що наближається до рівня власних втрат у матеріалі. Однак у процесах виготовлення та експлуатації світловодів у них можуть виникати нанонеоднорідності, що поглинають оптичне випромінювання. Це відбувається з різних причин: коливання температури за експлуатації, наявність легувальних добавок, дифузія гідроксильних груп ОН з опорної кварцової трубки у процесі створення оптичного волокна (ОВ), механічні напруження на границі з підкладкою, що виникають при нанесенні плівок [1, 2].

Оптичні властивості подібних структур досліджені нами на основі методу ефективної діелектричної проникності [3, 4]. У цій повідомленні представлені результати розрахунків загасання у ОВ з поглинальними нанонеоднорідностями в ОВ з ступінчастим профілем показника заломлення (це не принципово, але спрощує розрахунки).

Для аналізу відносної діелектричної проникності системи поглинальних центрів ε_d використано осциляторну модель Лоренца [5], яка має резонансний характер, а загасання характеризує уявна частина виразу:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_\infty + \frac{W}{1 - (\lambda/\lambda_m)^2 + i\Gamma \cdot (\lambda/\lambda_m)},$$

де $i = (-1)^{1/2}$, $\varepsilon_\infty = 1$, $W = 80$, $\Gamma = 0,05$, $\lambda_m = 1,38$ мкм, що відповідає першій гармоніці смуги поглинання ОН-групи [2].

Поглиналині нанонеоднорідності модельовані як кулі, розмір яких значно менший за довжину хвилі. Ці частинки або повністю складені з поглинальної речовини, або порожнисті, з поверхнею, вкритою поглинальною плівкою, що має комплексну діелектричну проникність ε_d (з піком резонансу при $\lambda = \lambda_m$). Для дослідження ефективної діелектричної проникності $\tilde{\varepsilon}_2$ такої системи використаний наступний вираз [1,5]:

$$\frac{\tilde{\varepsilon}_2 - \varepsilon_{20}}{\tilde{\varepsilon}_2 + 2\varepsilon_{20}} = f\alpha_i.$$

Тут $f = (4/3)\pi R^3 N_0$ — ступінь заповнення поглинальними включеннями радіусом R і концентрацією N_0 матричної системи з діелектричною проникністю ε_{20} , α_i ($i = 1,2$) — поляризованість нанонеоднорідностей.

Для даного випадку використані наступні вирази [5]:
для кулі з суцільної поглинальної речовини:

$$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_{20}}{\varepsilon_d + 2\varepsilon_{20}}; \quad (1)$$

для порожнистої кулі, з поверхнею, вкритою поглинальною плівкою:

$$\alpha_1 = \frac{(\varepsilon_d - \varepsilon_{20})(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_{20}) + f_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_d)(\varepsilon_{20} + 2\varepsilon_d)}{(\varepsilon_d + 2\varepsilon_{20})(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_d) + 2f_0(\varepsilon_d - \varepsilon_{20})(\varepsilon_1 - \varepsilon_{20})}, \quad (2)$$

де ε_1 — діелектрична функція нанопорожнин, f_0 — відносний об'єм внутрішньої частини нанопорожнин.

З урахуванням того, що навіть для загасання 1–10 дБ/км, уявну частину ефективної діелектричної проникності речовини світловода можна вважати малою величиною у порівнянні з дійсною частиною, використане перше наближення методу збурень.

Для розв'язання незбуреної задачі використане характеристичне рівняння [2] для лінійно поляризованих мод LP^{01} , отримане на основі рівнянь Максвелла з урахуванням того, що на границі серцевина-оболонка ОВ $r = a$. Це дало можливість одержати дисперсійні залежності коефіцієнта загасання $\alpha(\lambda)$ і фазового параметру $\beta(\lambda)$.

Остаточна система рівнянь у першому наближенні методу збурень (з урахуванням малого внеску ефекту поглинання) набула наступного вигляду:

$$u\Delta u = a^2\alpha\beta; \quad v\Delta v = a^2 \left(\frac{4\pi^2}{\lambda^2} n_{20}n_2'' - \alpha\beta \right); \quad 2n_{20}n_2'' = \tilde{\varepsilon}_2'' \quad (3)$$

Тут $u = a\sqrt{(4\pi^2/\lambda^2)n_1^2 + \gamma^2}$, $v = a\sqrt{-(4\pi^2/\lambda^2)n_1^2 + \gamma^2}$ — радіальні фазові параметри, Δu , Δv — малі добавки, $n_1 = \sqrt{\varepsilon_1}$, $\tilde{\varepsilon}_2 = \tilde{\varepsilon}_2' + i\tilde{\varepsilon}_2''$, $n_2 = \sqrt{\tilde{\varepsilon}_2}$, $n_2 = n_{20} + in_2''$, $\gamma = \alpha + i\beta$ — стала поширення.

Система рівнянь (3) разом з відповідним характеристичним рівнянням дозволяє розв'язати задачу.

Результат розрахунків свідчить, що в околі $\lambda = 1,55$ мкм крило смуги поглинання ОН, максимум якої для окремого осцилятора відповідає значенню $\lambda = 1,38$ мкм, за ступеню заповнення включеннями $1 \cdot 10^{-8}$ дає додаткові втрати порядку $\delta\alpha \approx 0,003$ дБ/км для структури типу (1) і на один порядок більше для структури типу (2). Таку відмінність можна пояснити тим, що в досліджуваній матричній структурі існує зсув резонансного максимуму, пов'язаний з поглинанням на частоті Фреліха [5], значення якого залежить від товщини і показника заломлення поглинальної плівки. Виявлено, що коефіцієнти загасання у певному діапазоні частот можуть відрізнити

нятися на декілька порядків залежно від структури поглинальних нанонеоднорідностей. Слід відзначити, що даний підхід дозволяє дослідити вплив включень більш складної форми на оптичні втрати у ОВ.

Перелік посилань

1. Оптичні втрати в волоконних світловодах на основі кварцового скла в температурному діапазоні 300-1500 К / [Дворецький Д.А., Хонін В.Ф., Гур'янов А.Н. та ін.] // Наука і освіта. — 2013. — Ел № ФС77-48211. — С. 313-323. — *Бібліогр.: с. 323.*
2. Mendez A. Specialty Optical Fiber Handbook / Mendez A., Morse T.F. — Academic Press. — 2007. — 783 p. — *Бібліогр. в кінці розд.* — ISBN-13: 978-0123694065
3. Дамарацкій І. А. Моделювання на основі хвильової оптики процесів поглинання і розсіяння електромагнітних хвиль НВЧ діапазону в дисперсних системах / Дамарацкій І. А., Трунов П. А. // Наука і освіта. — 2013. — Ел № ФС77 – 48211. — С. 445-454. — *Бібліогр.: с. 454.*
4. Ефективна діелектрична проникність матричних дисперсних систем у наближенні диференціальної ефективного середовища / [Пустовіт В.М., Гаранина Л.В., Миронюк І.Ф., Шостак С.В.] // Радіофізика і радіоастрономія. — 1998. — Т.3, №4. — С. 441-445. — *Бібліогр.: с. 445.*
5. Bohren C.F. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / Bohren C.F., Huffman D.R. — John Wiley & Sons. New York-Chichester, Brisbane Toronto, Singapore. — 1983. — 640 p. — *Бібліогр.: с. 624-656 (531 назви) та в підрядк. прим.* — ISBN: 9780471293408

Анотація

Пропонується методика для розрахунку коефіцієнта поглинання в світловоді в наближенні першого порядку теорії збурень по варіації показника заломлення. Методом ефективної діелектричної проникності враховується структура поглинаючих нанонеоднорідностей.

Ключові слова: світловод, нанонеоднорідності, коефіцієнт поглинання, ефективна діелектрична проникність.

Аннотация

Предлагается методика для расчета коэффициента поглощения в световоде в приближении первого порядка теории возмущений по вариации показателя преломления. Методом эффективной диэлектрической проницаемости учитывается структура поглощающих нанонеоднородностей.

Ключевые слова: световод, нанонеоднородности, коэффициент поглощения, эффективная диэлектрическая проницаемость.

Abstract

A method for calculation of absorption coefficient in lightguide for first order perturbation theory for refraction indices variation is proposed. The structure of absorbing nanoirregularities is taken into account on the base of effective dielectric function method.

Keywords: lightguide, nanoirregularities, absorption coefficient, effective dielectric permittivity.