

ФОКУСИРОВКА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ ПРИ ВНЕШНЕМ ТЕПЛОВИМ ВОЗДЕЙСТВИИ

*Глущенко А.Г., **Петропавловский В.М.

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

E-mail: *gag@pgati.da.ru,** ogpgop@rambler.ru

Из практики эксплуатации оптических волокон известен эффект точечного разрушения протяженного участка световода при интенсивных тепловых воздействиях, например, попадании в кабель молнии. Данное явление может быть объяснено локальным тепловым воздействием, приводящим к изменению оптических характеристик волокна, что вызывает эффект фокусировки излучения до интенсивностей, превосходящих порог разрушения материала. Преобладающим механизмом возникновения повреждений в волокне является тепловой механизм. При нагреве выше 1000°С резко возрастает показатель поглощения, однако, этот механизм не объясняет периодического характера разрушения волокна. Однако такой тип разрушений может возникнуть из-за того, что в сердцевине возникает фокусирующая тепловая линза и интенсивность излучения резко возрастает. Совместное воздействие - увеличение показателя поглощения и интенсивности света вызывает значительный рост выделяемого тепла, что может привести к разрушению волокна.

Считаем, что в начальный момент времени $t=0$ по периметру оболочки волокна радиусом b внешним источником выделяется энергия с интенсивностью теплового импульса на единицу длины Q . Изменение температуры в среде подчиняется дифференциальному уравнению, получающемуся из уравнения теплового баланса. В сферических координатах оно имеет вид:

$$\frac{\partial(\Delta T)}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(\Delta T)}{\partial r} + \frac{\partial^2(\Delta T)}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

где ΔT – рост температуры среды, r – радиальная координата, $D = k/(c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, k – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, ρ – плотность вещества.

С учетом принятых приближений случая решения уравнения (1) имеет вид:

$$\Delta T(r,t) = \frac{Q}{4\rho Dt} \exp\left(-\frac{r^2 + b^2}{4Dt}\right) \cdot I_0\left(\frac{rb}{2Dt}\right) \quad (2)$$

где I_0 – модифицированная функция Бесселя. Рост температуры приводит к изменению показателя преломления среды - $\Delta n = (\partial n / \partial T) \Delta T$. В обычных волокнах, в частности в кварце, показатель преломления n уменьшается ($\partial n / \partial T < 0$).

Пусть показатель преломления уменьшается от центра волокна к краю сердцевины в виде функции:

$$n(r) = \begin{cases} n_0 \left(1 - \Delta \frac{r^2}{a^2} \right), & r \leq a \\ n_0 (1 - \Delta), & r > a \end{cases} \quad (3)$$

где a – радиус сердцевины волокна, Δ – относительное изменение показателя преломления сердцевины $\Delta = (n_0 - n(a))/n_0$. Тогда в линейном приближении тепловое воздействие на показатель преломления волокна может быть представлено в виде (рис. 1):

$$n(r,t) = \begin{cases} n_0 \left(1 - \Delta \frac{r^2}{a^2} \right) \left(1 + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T(r,t) \right), & r \leq a \\ n_0 (1 - \Delta) \left(1 + \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T(r,t) \right), & r > a \end{cases} \quad (4)$$

Траектория луча, распространяющегося в градиентном волокне, описывается выражением:

$$r = r_0 \cos\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) + r_0 \frac{a}{\sqrt{2\Delta}} \sin\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) \quad (5)$$

из которого следует что, при распространении оптического излучения по волокну происходит его периодическая «фокусировка». Рассмотрим свет с гауссовым распределением интенсивности по сечению –

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/w^2),$$

где w – характерный размер гауссова пучка, I_0 – интенсивность на оси пучка. Для описания его распространения удобно использовать комплексный параметр пучка q , который вводится следующим образом:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - \frac{i\lambda}{\pi w^2}, \quad (6)$$

R – радиус кривизны волнового фронта. Разделяя действительную и мнимую части, выразим w в виде соотношения:

$$w = -\frac{P}{I \cdot \operatorname{Im}\left(\frac{1}{q}\right)} \quad (7)$$

Предположим, на входе в среду мы имеем плоскую волну ($R = \infty$), т.е. $q_1 = i\pi w^2/\lambda$. В фокусе фронт волны тоже будет плоским – $q_2 = i\pi v^2/\lambda$, где v – минимальный размер пучка. Параметры q_2 и q_1 связаны между собой через параметры лучевой матрицы среды:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D} \quad (8)$$

Матрица среды с квадратичным распределением показателя преломления имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) & \frac{a}{\sqrt{2\Delta}} \sin\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) \\ -\frac{\sqrt{2\Delta}}{a} \sin\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) & \cos\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Подставив q_1 , q_2 и элементы матрицы (9) в (8), получаем уравнение:

$$\frac{ipv^2}{I} = \frac{\frac{ipw^2}{I} \cos\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) + \frac{a}{\sqrt{2\Delta}} \sin\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right)}{-\frac{ipw^2}{I} \cdot \frac{a}{\sqrt{2\Delta}} \sin\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right) + \cos\left(\sqrt{2\Delta} \frac{z}{a}\right)} \quad (10)$$

Откуда минимальный размер пучка $v = (\lambda a)/(\pi w^2 \sqrt{2\Delta})$, координаты этих областей $z_m = 2\Delta a/\sqrt{2\Delta}$, расстояние между областями максимального сжатия пучка ~ 5 мм.

Обычно в градиентных волокнах $\Delta \sim 10^{-3} \div 10^{-2}$, что соответствует минимальному размеру пучка 15-50 мкм. В случае нагрева оболочки волокна до $T \sim 1000$ К Δ может составить 0,2 ÷ 0,3 и характерный размер пучка уменьшится до 3 – 5 мкм. .

Возрастание интенсивности за счет уменьшения размера пучка ($I = P/(\pi w^2)$), может привести к тепловому или электрическому пробою материала волокна. Поскольку такое возрастание происходит периодически, то возможен периодический пробой волокна через равные интервалы.

Таким образом, интенсивный нагрев наружного слоя оболочки волокна может привести к резкому уменьшению показателя преломления внешней части волокна. Это может привести к фокусировке света, направляемого этим волокном. Интенсивность на оси периодически возрастает на порядок и выше и при достаточно высоких мощностях излучения это может привести к периодическому пробою и разрушению волокна в ряде периодически расположенных по оси волокна точках.