РАДИОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, 2020, том 65, № 11, с. 1074–1078

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.86;621.37

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ ПРИ СРАЩИВАНИИ ДВУХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН, ОДНО ИЗ КОТОРЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАНО В МЕСТЕ СОЕДИНЕНИЯ

В. А. Гладких[a], В. Д. Власенко[a], *

[a] *Вычислительный центр Дальневосточного отделения РАН,*
ул. Ким Ю Чена, 65, Хабаровск, 680000 Российская Федерация

**E-mail: vlasenko@as.khb.ru*

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.
После доработки 18.03.2020 г.
Принята к публикации 27.03.2020 г.

Рассмотрены круглый и эллиптический (в месте соединения) в поперечном сечении два фрагмента волоконно-оптической линии передачи информации. Для одномодового режима работы получены аналитические выражения для потерь энергии при соединении двух таких фрагментов. Показано, что потери энергии возрастают при увеличении эксцентриситета и одновременно уменьшаются при увеличении волноводного числа.

DOI: 10.31857/S0033849420110066

ВВЕДЕНИЕ

Конструирование и практическое построение волоконно-оптических линий связи должно учитывать максимально возможную безопасность от внешних воздействий (механических, электромагнитного поля и окружающей среды) для получения и передачи информации с возможно меньшими потерями [1–6]. Потери энергии связаны также с материалом оптоволокна [7]. Поскольку оптоволоконные линии связи ввиду большой протяженности составляются из отдельных фрагментов, то также следует учитывать потери, возникающие при сращивании отдельных фрагментов [4, 8]. Все это в полной мере относится и к широко применяемым в современных исследованиях волоконно-оптическим датчикам. В частности, некоторые фрагменты волокна могут быть деформированы [9, 10].

Цель данной работы – анализ потерь, возникающих при сращивании двух волокон (в одномодовом режиме), одно из которых круглое в поперечном сечении, другое – эллиптически деформировано (только практически в торце для упрощения анализа).

1. ПОЛЕ В ОДНОМОДОВОМ ВОЛОКНЕ СО СТУПЕНЧАТЫМ ПРОФИЛЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

При соединении волокон потери $a_{\text{пот}}$ можно рассчитать по следующей формуле (см., например, [11]):

$$a_{\text{пот}(NA)} = 10\lg(NA_r/NA_c)$$

при рассогласовании апертур (см. далее формулу (6) и следующие) передающего и принимающего волокна, где NA_r, NA_c – числовые апертуры передающего и принимающего волокна, соответственно, или по [11]:

$$a_{\text{пот}(\rho)} = 10\lg\left([\rho_r/\rho_c]^2\right),$$

если радиус сердцевины ρ_r передающего волокна больше радиуса сердцевины ρ_c принимающего.

При стыковке маломодовых оптических волокон также существует довольно точный расчет вносимых потерь $a_{\text{пот}}$ [12]:

$$a_{\text{пот}} = 10\lg\left\{\frac{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{M_{\text{вх}}}\left[P_{lm}^{(\text{вх})}\right]^2}}{\sum\limits_{i=1}^{M_{\text{вх}}}\sum\limits_{j=1}^{M_{\text{вых}}}\eta_{mn}^2\left[P_{lm}^{(\text{вх})}\right]^2}\right\},$$

где $P_{lm}^{(\text{вх})}$ – мощность модовой компоненты LP_{lm} оптического сигнала, поступающего с выхода “передающего” волокна “слева” на вход “принимающего” волокна “справа”, $M_{\text{вх}}$ – общее число модовых компонентов оптического сигнала, поступающего на вход волокна “справа”, $M_{\text{вых}}$ – общее число мод, возбуждаемых в волокне “справа” модовой составляющей сигнала LP_{lm} заданного порядка, η_{mn} – коэффициент связи вводимой и возбуждаемой моды соответствующего порядка. Предлагаемая методика дает хорошее совпадение с экспериментом, но сложна практически.

В данной статье предложен алгоритм, построенный на простых основах электродинамики и гауссовом приближении для поля, позволяющий рассчитать потери в обобщенном виде – в зависимости от эксцентриситета деформированного торца одного из стыкуемых волокон и от волноводного числа.

При механическом соединении двух фрагментов оптоволокна (с одинаковым показателем преломления при нормальном падении волны на поперечное сечение) для коэффициента прохождения $D_{1\to 2}$ из фрагмента 1 во фрагмент 2 (аналогично для $D_{2\to 1}$ в обратном направлении) имеем (во избежание отражения на границе соединения фрагментов применяется технологический прием – контакт происходит по возможности точечно и по центру):

$$D_{1\to 2} = P_2/P_1, \quad \left(D_{2\to 1} = P_1/P_2\right), \tag{1}$$

где P_1, P_2 (P_2, P_1) – соответственно передаваемая и получаемая фрагментами мощность энергии:

$$\begin{gathered} P_2 = \left(\oint_{\vec f} \vec S d\vec f\right)_2 = \int_{f_2} |S_2|\, df_2, \\ P_1 = \left(\oint_{\vec f} \vec S d\vec f\right)_1 = \int_{f_1} |S_1|\, df_1, \end{gathered} \tag{2}$$

где f_1, f_2 – площади поперечного сечения соответственно 1-го и 2-го соединяемых фрагментов, S_1, S_2 – значения векторов Умова–Пойнтинга в соответствующих фрагментах. При этом соответствующие потери энергии $a_{\text{пот}}$ (в децибелах) вычисляются по следующим формулам [8, 11]:

$$a_{\text{пот}(1\to 2)} = -10\lg D_{1\to 2}, \quad \left(a_{\text{пот}(2\to 1)} = -10\lg D_{2\to 1}\right). \tag{3}$$

Для поля рассматриваемого волновода в одномодовом режиме достаточно хорошей моделью может служить гауссово приближение [11] ($r^2 = x^2 + y^2$, ось z – вдоль распространения волны):

$$\begin{gathered} E_{\text{круг}} \equiv E_{\text{эл}} \sim C\exp\left(-r^2/2r_0^2\right) \to D_{1\to 2} = \\ = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_{f_2} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) df_2}{\int_{f_1} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) df_1}; \\ D_{2\to 1} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{\int_{f_1} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) df_1}{\int_{f_2} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) df_2}, \end{gathered} \tag{4}$$

где r_0 – радиус модового пятна волокна, $E_{\text{круг}}$, $E_{\text{эл}}$ – круговая (циркулярная) и эллиптическая поляризации. Поскольку соединяемые фрагменты по всей длине круглые в поперечном сечении, кроме эллиптически деформированного торца одного из соединяемых фрагментов, то внутри этих фрагментов поля совпадают – $E_{\text{круг}}$, $E_{\text{эл}}$, что и отражено в формуле (4).

2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭНЕРГИИ

2.1. Мощность энергии, проходящей через поперечное круговое сечение первого фрагмента

Пусть при соединении фрагмент 2 эллиптически деформирован в поперечнике и, таким образом, в месте соединения поперечное сечение фрагмента 1 – круг, а фрагмента 2 – эллипс. Тогда можно записать (C – постоянная):

$$\begin{gathered} P_{1(\text{круг})} = C\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\rho} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) r dr = \\ = C\pi r_0^2 \left\{1 - \exp(-\gamma)\right\}, \quad \gamma \equiv \rho^2/r_0^2, \end{gathered} \tag{5}$$

где ρ – радиус круга (радиус поперечного сечения 1-го волокна).

Как известно, волновод со ступенчатым профилем показателем преломления является одномодовым, если [5, 13]:

$$\begin{gathered} 0 < V \equiv (2\pi\rho/\lambda)\, NA = \\ = (2\pi\rho/\lambda)\sqrt{n_{\text{вол}}^2 - n_{\text{обл}}^2} < 2.405, \end{gathered} \tag{6}$$

где $n_{\text{вол}}$, $n_{\text{обл}}$ – показатели преломления волокна и оболочки соответственно, V – волноводное число (нормализованная частота), NA – числовая апертура, λ – длина волны. В соответствии с этой формулой для радиуса модового пятна можем воспользоваться выражением, справедливым при $V < 2.5$ [13, 14]:

$$r_0 \cong 0.4\lambda\Big/\sqrt{n_{\text{вол}}^2 - n_{\text{обл}}^2} \to \gamma = \frac{\rho^2}{r_0^2} = 0.16V^2, \tag{7}$$

и результат запишется в виде

$$P_{1(\text{круг})}(V) = C\pi r_0^2\left\{1 - \exp(-0.16V^2)\right\}. \tag{8}$$

2.2. Мощность энергии, проходящей через поперечное эллиптическое сечение второго фрагмента

Согласно уравнению эллипса

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad \varepsilon \equiv \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad \left(b \le \rho \le a,\ \varepsilon \in (0,1)\right) \tag{9}$$

(a, b – соответственно большая и малая полуоси, ε – эксцентриситет) в этом случае, переходя к полярным координатам $x = r\cos\varphi$, $y = r\sin\varphi$, запишем

$$P_{2(\text{эл})} = C \int\limits_{x^2/a^2+y^2/b^2\le 1} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) r dr d\varphi =$$
$$= \left\{ r \le \frac{1}{\sqrt{\cos^2\varphi/a^2 + \sin^2\varphi/b^2}} \right\} =$$
$$= C\int\limits_0^{2\pi} d\varphi \left(\int\limits_0^{1/\sqrt{\cos^2\varphi/a^2+\sin^2\varphi/b^2}} \exp\left(-r^2/r_0^2\right) r dr \right) =$$
$$= \left\{ 1 - \frac{2}{\pi}\int\limits_0^{\pi/2} \exp\left\{ -\frac{b^2\left(1+\operatorname{tg}^2\varphi\right)}{r_0^2\left(b^2/a^2 + \operatorname{tg}^2\varphi\right)} \right\} d\varphi \right\} \times \tag{10}$$
$$\times C\pi r_0^2 = (z = \operatorname{tg}\varphi) =$$
$$= C\pi r_0^2 \left\{ 1 - \frac{2}{\pi}\int\limits_0^{\infty} \exp\left\{ -\frac{b^2\left(1+z^2\right)}{r_0^2\left(\dfrac{b^2}{a^2}+z^2\right)} \right\} \frac{dz}{1+z^2} \right\}.$$

Полагая равными объемы профилей, запишем

$$\pi ab = \pi\rho^2 \to ab = \rho^2 \to \varepsilon^2 =$$
$$= \begin{cases} 1 - \dfrac{\rho^4}{a^4} \\ 1 - \dfrac{b^4}{\rho^4} \end{cases} \to \begin{cases} a = \rho\left(1-\varepsilon^2\right)^{-1/4} \\ b = \rho\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/4} \end{cases}, \tag{11}$$

и с учетом (7) формула принимает вид

$$P_{2(\text{эл})}(\varepsilon, V) = C\pi r_0^2 \times$$
$$\times \left\{ 1 - \frac{2}{\pi}\exp(-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}) I(\varepsilon, V) \right\},$$
$$I(\varepsilon, V) \equiv \tag{12}$$
$$\equiv \int\limits_0^{\infty} \exp\left\{ -0.16V^2 \frac{\varepsilon^2\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1-\varepsilon^2+z^2)} \right\} \frac{dz}{1+z^2}.$$

Легко видеть, что

$$P_{2(\text{эл})}(0, V) = P_{1(\text{круг})}(V), \quad P_{2(\text{эл})}(1, V) = 0, \tag{13}$$

как и следовало ожидать.

2.3. Мощность энергии, проходящей через пересечение эллиптического сечения с круговым

Решим систему уравнений для определения точек пересечения соосных эллипса и окружности:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2 \\ \dfrac{x^2}{a^2} + \dfrac{y^2}{b^2} = 1 \end{cases} \to x_1 = -x_2 \equiv x_0 = \rho\frac{\sqrt{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}}{\varepsilon}, \tag{14}$$
$$y_1 = -y_2 \equiv y_0 = \sqrt{\rho^2 - x_0^2}.$$

Определим угол α – угол между радиусом, проведенным в точку пересечения с координатами (x_0, y_0), и осью x:

$$\cos\alpha \equiv \frac{x_0}{\rho} = \frac{\sqrt{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}}{\varepsilon} \to \alpha =$$
$$= \arccos\left\{ \frac{\sqrt{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}}{\varepsilon} \right\}. \tag{15}$$

Площадь пересечения рассматриваемых соосных эллипса и окружности равна площади эллипса минус площади эллиптических сегментов при $x \ge x_0$, $x \le -x_0$ (начало сегмента $x \ge x_0$ при $x > 0$, прямая $x = x_0$, находится под углом 2α из центра) и плюс площади круговых сегментов (также при $x \ge x_0$, $x \le -x_0$ и под тем же углом из центра). Поскольку

$$x \ge x_0 \to r\cos\varphi \ge \rho\cos\alpha \to$$
$$\to r \ge \rho\left(\cos\alpha/\cos\varphi\right), \tag{16}$$

то получим ($\operatorname{tg}\alpha = (1-\varepsilon^2)^{1/4}$):

$$P_{1(\text{круг})\cap 2(\text{эл})} = P_{2(ell)} - 2C \times$$
$$\times \int\limits_{-\alpha}^{\alpha} d\varphi \left\{ \int\limits_{\rho\frac{\cos\alpha}{\cos\varphi}}^{1/\sqrt{\frac{\cos^2\varphi}{a^2}+\frac{\sin^2\varphi}{b^2}}} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) r dr \right\} + \tag{17}$$
$$+ \; 2C\int\limits_{-\alpha}^{\alpha} d\varphi \left\{ \int\limits_{\rho\cos\alpha/\cos\varphi}^{\rho} \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) r dr \right\}.$$

Путем несложных вычислений и с учетом (7) окончательно получим (где I взято из (12)):

$$P_{1(\text{круг})\cap 2(\text{эл})} = C\pi r_0^2 \times$$
$$\times \left\{ 1 - \frac{2}{\pi}\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\} I(\varepsilon, V) + \right.$$
$$+ \frac{2}{\pi}\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\} I_1(\varepsilon, V) -$$
$$\left. - \frac{2}{\pi}\exp(-0.16V^2)\arccos\left[\frac{\sqrt{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}}{\varepsilon}\right] \right\}, \tag{18}$$
$$I_1 = I_1(\varepsilon, V) \equiv$$
$$\equiv \int\limits_0^{\left(1-\varepsilon^2\right)^{1/4}} \exp\left\{ -0.16V^2 \frac{\varepsilon^2\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1-\varepsilon^2+z^2)} \right\} \frac{dz}{1+z^2}.$$

Легко видеть, что

$$\lim_{\varepsilon\to 0}\left\{ P_{1(\text{круг})\cap 2(\text{эл})}(\varepsilon, V) \right\} = P_{1(\text{круг})}(V),$$
$$P_{1(\text{круг})\cap 2(\text{эл})}(1, V) = 0, \tag{19}$$

как и следовало ожидать.

2.4. Влияние деформации поперечного сечения волокна на передачу энергии

Влияние деформации поперечного сечения волокна на передачу энергии, согласно (8) и (12), можно описать относительной величиной $\eta(\varepsilon, V)$:

$$\eta(\varepsilon,V) \equiv \frac{P_{2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}{P_{1(\text{круг})}(V)} = \frac{\left\{1-\frac{2}{\pi}\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\}I(\varepsilon,V)\right\}}{\left\{1-\exp(-0.16V^2)\right\}}, \tag{20}$$

которая при изменении эксцентриситета ε от 0 до 1 убывает от 1 до 0 согласно (13). Численные расчеты дают следующую графическую зависимость. Из рис. 1 видно, что величина η быстрее убывает при возрастании волноводного параметра V. Для расчетов выбраны следующие значения параметра V: $V_1 = 0.5$; $V_2 = 1$; $V_3 = 1.5$; $V_4 = 2$; $V_5 = 2.4$.

3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

3.1. Часть потерь энергии при передаче из фрагмента 1 во фрагмент 2

Согласно (3), (8) и (18) имеем

$$a_{\text{пот}(1\to2)}(\varepsilon,V) = -10\lg\left\{\frac{P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}{P_{1(\text{круг})}(V)}\right\} = -10\lg\left\{\frac{P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}{\left[1-\exp(-0.16V^2)\right]}\right\}; \tag{21}$$

$$P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}(\varepsilon,V) = \left\{1-\frac{2}{\pi}\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\}I + \frac{2}{\pi}\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\}I_1 - \frac{2}{\pi}\exp(-0.16V^2)\arccos\left[\frac{\sqrt{1-\sqrt{1-\varepsilon^2}}}{\varepsilon}\right]\right\},$$

$$I_1 = I_1(\varepsilon,V) \equiv \int\limits_0^{(1-\varepsilon^2)^{1/4}} \exp\left\{-0.16V^2\frac{\varepsilon^2\sqrt{1-\varepsilon^2}}{(1-\varepsilon^2+z^2)}\right\}\frac{dz}{1+z^2},$$

где $I = I(\varepsilon, V)$ определено в (12).

3.2. Часть потерь энергии при передаче из фрагмента 2 во фрагмент 1

Согласно (3), (12) и (18) имеем

$$a_{\text{пот}(2\to1)}(\varepsilon,V) = -10\lg\left\{\frac{P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}{P_{2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}\right\} = -10\lg\left\{\frac{P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}(\varepsilon,V)}{\left[1-\exp\left\{-0.16V^2\sqrt{1-\varepsilon^2}\right\}I(\varepsilon,V)\right]}\right\}, \tag{22}$$

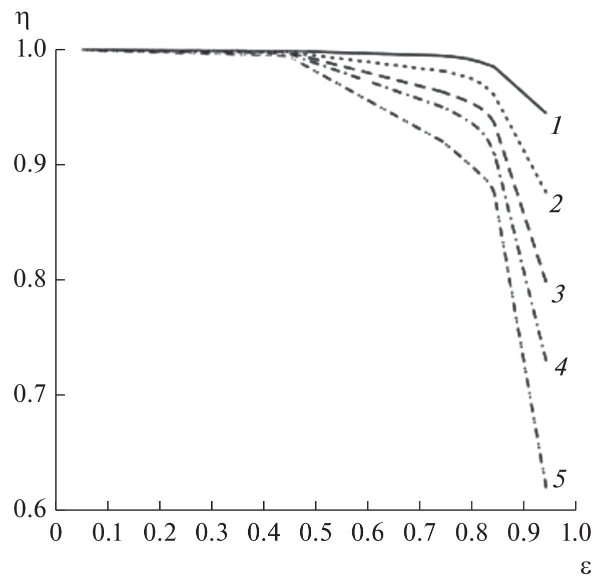

Рис. 1. Зависимость величины η от эксцентриситета ε при различных значениях волноводного параметра $V = 0.5$ (*1*), 1 (*2*), 1.5 (*3*), 2 (*4*), 2.4 (*5*).

где $I = I(\varepsilon, V)$ также определено в (12), а $P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}$ берется из (21).

3.3. Полные потери энергии при соединении фрагментов 1 и 2 волоконной линии

Выражения для потерь энергии, рассчитанные на основах электродинамики, в направлениях $1 \to 2$ и $2 \to 1$ не совпадают, и это связано с тем, что на самом деле выражения (21), (22) являются составляющими полных потерь. Действительно, для стыкуемых фрагментов волноводной линии справедлива формула для потерь энергии $a_{\text{пот}}$ [15, 16]:

$$a_{\text{пот}} = -10\lg\left\{\frac{\left|\iint E_{\text{круг}}E_{\text{эл}}rdrd\varphi\right|^2}{\iint\left|E_{\text{круг}}\right|^2 rdrd\varphi\iint\left|E_{\text{эл}}\right|^2 rdrd\varphi}\right\}. \tag{23}$$

В нашем случае согласно (4), (5), (12) и (18) имеем

$$a_{\text{пот}} = -10\lg\left\{\frac{\left|P_{1(\text{круг})\cap2(\text{эл})}\right|^2}{P_{1(\text{круг})}P_{2(\text{эл})}}\right\},$$

так что в соответствии с (21), (22) окончательно получаем

$$a_{\text{пот}}^{\text{полн}}(\varepsilon,V) = a_{\text{пот}(1\to2)}(\varepsilon,V) + a_{\text{пот}(2\to1)}(\varepsilon,V). \tag{24}$$

Численные расчеты дают графическую зависимость, представленную на рис. 2.

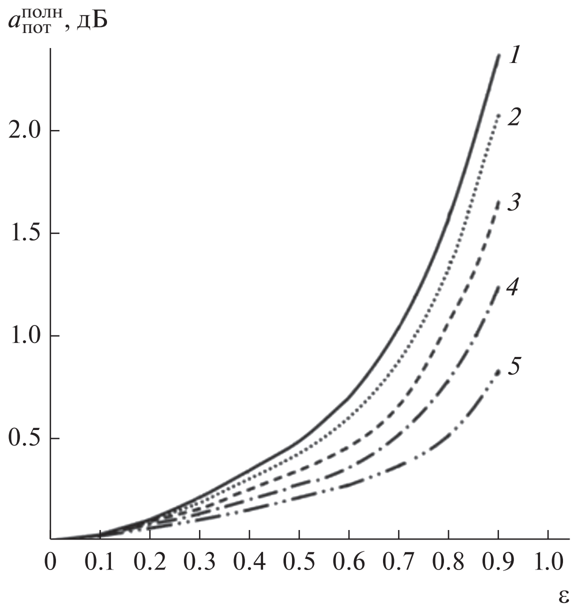

Рис. 2. Зависимость полных потерь энергии $a_{\text{пот}}^{\text{полн}}$ от эксцентриситета ε при различных значениях волноводного параметра $V = 0.5$ (*1*), 1 (*2*), 1.5 (*3*), 2 (*4*), 2.4 (*5*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, можно сделать выводы, что в результате эллиптической деформации торца одного из двух сращиваемых фрагментов:

– величина $\eta(\varepsilon, V)$ убывает при возрастании эксцентриситета и одновременно быстрее убывает при возрастании параметра V;

– полные потери энергии $a_{\text{пот}}^{\text{полн}}$ увеличиваются при возрастании эксцентриситета и при этом одновременно уменьшаются при возрастании волноводного параметра.

При большой деформации полные потери увеличиваются с уменьшением волноводного числа V. Это может быть связано с тем, что в инфракрасной области с увеличением λ возрастают потери и согласно (6) возрастает волноводное число V. Это также может быть связано с тем, что в одномодовом волокне с уменьшением ρ площадь пятна моды уменьшается вместе с волноводным числом V, что приводит на выходе из волокна к увеличению расхождения пучка и тем самым к увеличению потерь.

Приведенные данные помогут выбрать подходящий одномодовый режим для практических применений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мидвинтер Дж.* Волоконные световоды для передачи информации. М.: Радио и связь, 1983.
2. *Окоси Т., Окамото К., Оцу М. и др.* Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. *Чео П.К.* Волоконная оптика: Приборы и системы. М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. *Семенов Н.А.* Оптические кабели связи: Теория и расчет. М.: Радио и связь, 1981.
5. *Убайдуллаев Р.Р.* Волоконно-оптические сети. М.: ИТЦ Эко-Трендз, 2000.
6. *Маркузе Д.* Оптические волноводы. М.: Мир, 1974.
7. *Дмитриев А.Л.* Оптические системы передачи информации. Учебное пособие. СПб: СПбГУИТМО, 2007.
8. *Унгерн Х.Г.* Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.
9. *Адамс М.* Введение в теорию оптических волноводов. М.: Мир, 1984.
10. *Снайдер А., Лав Дж.* Теория оптических волноводов. М.: Радио и связь, 1987.
11. *Воронин В.Г., Наний О.Е., Туркин А.Н. и др.* Интегральные потери в элементах волоконно-оптических линий связи. М.: МАКС Пресс, 2012.
12. *Бурдин А.В., Жуков А.Е., Прапорщиков Д.Е.* // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 4. С. 60.
13. *Листвин В.Н., Трещиков В.Н.* // Фотон – экспресс. 2012. № 7. С. 30.
14. *Гладких В.А.* // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 4. С. 557.
15. *Franco M.A.R., Vasconcellos L.C., Machado J.M.* // Revista Científica Periódica – Telecomunicações. 2004. V. 7. № 1. P. 54.
16. *Буров Н.В, Лин Дж., Ромашова В.Б.* // Фотоника. 2018. Т. 12. № 1. С. 16.