

УДК 535.015

МЕТОД СЕЛЕКЦИИ РАДИАЛЬНЫХ МОД В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ С ПОМОЩЬЮ ТОНКОЙ ПОГЛОЩАЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ

© В. С. Терентьев, В. А. Симонов

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: terentyev@iae.nsk.su*

Предложен новый метод селекции поперечных мод оптического цилиндрического волокна с помощью тонкой поглощающей оболочки. Результаты расчётов в среде COMSOL® Multiphysics демонстрируют возможность селекции моды HE_{12} по потерям в многомодовом волокне на длине волны 1550 нм, при этом тонкая поглощающая оболочка (с толщиной 2,5–10 нм) располагается в окрестности минимумов компонентов полей $|E_{r,\varphi}|$. Радиус оболочки оптимизируется по минимуму величины погонных потерь α для данной моды, которые составляют сравнительно малую величину от $-0,02$ до $-0,06$ дБ/см в зависимости от параметров оболочки, при этом для остальных мод эта величина в десятки раз больше. Для аналитического описания приведена оценочная формула погонных потерь. Проведены поиски оптимальных радиусов поглощающей оболочки с точки зрения минимизации потерь селективируемой моды для различных коэффициентов поглощения и толщин оболочки. Показана слабая спектральная зависимость коэффициента погонных потерь для заданной толщины оболочки и коэффициента поглощения.

Ключевые слова: многооболочечное оптическое волокно, тонкая поглощающая оболочка, селекция мод.

DOI: 10.15372/AUT20250106

EDN: YZMYZR

Введение. Оптические волокна со структурой распределения коэффициента преломления по поперечному сечению, состоящей из нескольких оболочек, исследуются сравнительно давно, например брэгговские волокна с диэлектрическими непоглощающими оболочками [1, 2]. Одним из основных полезных свойств данного типа волокон является возможность создания условий распространения света по сердцевине из материала с низким коэффициентом преломления и даже из воздуха [3]. Меняя материалы оболочки, становится возможным придать различные оптические свойства таким волокнам. Наряду с непоглощающими слоями в качестве оболочек используются и слои с поглощением, например, металлические для возбуждения плазмонных мод [4] и создания оптических сенсоров [5, 6]. В частности, в [7] исследована структура с оболочкой из металлического слоя (меди) в стеклянном оптическом волокне с кварцевой оболочкой. Показана спектральная зависимость потерь от радиуса положения плёнки и длины волны. При этом медная оболочка толщиной 500 нм приводит к большим потерям как для основной, так и для возбуждаемой плазмонной модам. Потери для основной моды уменьшаются при увеличении радиуса оболочки, что очевидно вследствие уменьшения величины поля моды в области плёнки. Можно также упомянуть металлизированное покрытие оптических волокон толщиной около 1000 нм, внешнее по отношению к световедущей оболочке и наносимое с целью придания прочности и защиты волокну при высокой температуре или других неблагоприятных внешних условиях [8]. Однако в последнем случае оптическая связь с металлической оболочкой отсутствует.

Помимо приведённых способов, в данной работе предлагается новый метод селекции собственных поперечных мод оптического волокна с помощью тонкой поглощающей обо-

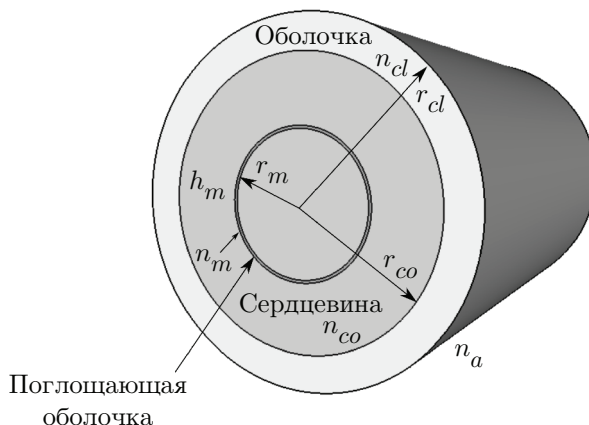


Рис. 1. Структура волокна с поглотящей металлической оболочкой: r — радиус, n — коэффициент преломления, h — толщина. Обозначения индексов: co — сердцевина, cl — оболочка, a — внешняя среда (воздух), m — металлическая плёнка

лочки. Основная идея данного метода коррелирует с близким по сути методом тонкой металлической плёнки для селекции продольных волоконных мод [9]. Для этого может быть использована тонкая металлическая оболочка с толщиной много меньше длины волны. При этом селектируемые моды являются практически идентичными модам невозмущённого волокна, т. е. с такой же структурой сердцевины и оболочки, но без металлической плёнки. Данный метод аналогичен методу селекции мод «шепчущей галереи» в микросферическом резонаторе [10]. Для радиальных мод с индексом выше 1 существует минимум поля в узлах мод. Однако для разных мод пространственное положение узлов по радиусу будет различным. Если разместить тонкую поглотящую оболочку (плёнку) в узлах поля, то тем самым можно практически не вносить поглощение для селектируемой моды и существенно повысить потери для всех других мод (уменьшить добротность). Аналогично и в случае направляемых мод оптического волокна. Являясь гибридными, в них существует продольная компонента поля для высших радиальных мод, и полного зануления в точке минимума поля быть не может. Следовательно, при размещении плёнки в узле поля всегда будут существовать потери на поглощение. Тем не менее есть возможность получить достаточно малые потери для выделенной моды и существенно большие для других мод.

Для демонстрации работоспособности предлагаемого метода селекции проведён расчёт собственных мод и их потерь методом конечных элементов с помощью COMSOL[®] Multiphysics для конкретного случая многомодового волокна со ступенчатым распределением коэффициента преломления, содержащего поглотящий слой в виде тонкой металлической плёнки.

Постановка задачи. Исследуемая структура схематично изображена на рис. 1. Оптическое волокно имеет радиус оболочки r_{cl} , радиус сердцевины r_{co} , коэффициенты преломления сердцевины n_{co} , оболочки n_{cl} и числовую апертуру $NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2}$, коэффициент преломления вне волокна n_a , длина волны излучения λ .

Для получения эффекта селекции на определённом радиусе r_m располагается дополнительная оболочка с поглощением, в качестве которой выбран поглотящий слой с толщиной h_m и комплексным коэффициентом преломления n_m .

Для определения радиального положения поглотящей оболочки необходимо минимизировать абсолютное значение электрического вектора поля в области плёнки. Очевидно, что основная мода HE_{11} не может быть селектирована с малыми потерями, так как не имеет зануления (знакопеременности) компонент поля вдоль радиуса. Плёнка будет быстро

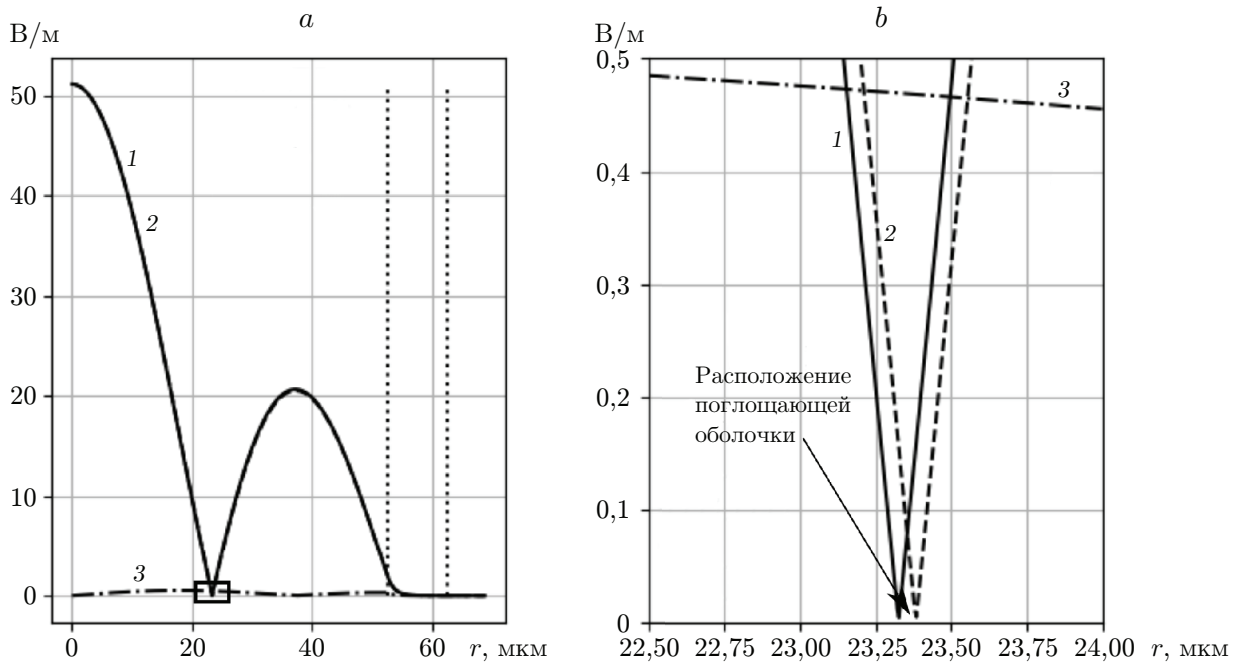


Рис. 2. Радиальные распределения: *a* — модуля полей моды HE_{12} и радиусов оболочек (пунктирные линии), *b* — области около минимумов $|E_r|$ и $|E_\varphi|$.
Обозначения: кривая 1 — $|E_r|$, кривая 2 — $|E_\varphi|$, кривая 3 — $|E_z|$

поглощать энергию для этой моды. Более подходят моды, имеющие знакопеременные значения компонент поля по радиусу. Радиальные индексы таких мод принимают значение 2 и более. В данной работе будет исследована селекция гибридной моды самого низкого порядка, удовлетворяющей поставленному условию и имеющей один ноль для компонент поля r и φ , — моды HE_{12} . На рис. 2, *a* показаны модули значений полей для этой моды. Параметры оптического волокна: $r_{cl} = 62,5$ мкм, $r_{co} = 52,5$ мкм, что соответствует широко распространённому многомодовому волокну с диаметрами сердцевины и оболочки 105/125 мкм, $n_{co} = 1,444$, $n_{cl} = 1,427$ ($NA = 0,22$), $n_a = 1$, $\lambda = 1550$ нм.

Компоненты E_r и E_φ полностью зануляются (так как меняют знак) при $r \approx 23,3$ мкм, как показано на рис. 2, *b*, однако $|E_z| \approx |E_z|_{\max}$ находится около своего максимального значения. Благодаря малой относительной величине $|E_z|_{\max}$, энерговыделение в плёнке может быть незначительным. Максимальная величина $|E_z|_{\max}$ имеет зависимость от характеристического параметра волокна $V = k_0 r_{co} NA$, и она тем меньше, чем выше V , при этом волновое число моды β стремится к $k_0 n_{co}$, где $k_0 = 2\pi/\lambda$ [11]. В случае многомодового волокна параметр V будет выше, чем для одномодового для той же NA за счёт большего r_{co} , что уменьшает $|E_z|_{\max}$ и снижает потери в плёнке. Конкретный радиус поглощающей оболочки, как следует из рис. 2, *b*, определить без численного расчёта сложно, так как две компоненты поля имеют минимумы, разнесённые в пространстве. Оптимальное с точки зрения потерь положение плёнки должно быть в окрестности этих минимумов.

Оценка потерь в поглощающей оболочке. Можно оценить степень поглощения и мнимую часть волнового вектора селектируемой моды, исходя из следующих простых соображений. Во-первых, невозмущённая и возмущённая плёнкой моды должны мало отличаться, так как размер плёнки предполагается минимальным, а интеграл перекрытия с плёнкой будет очень малым, что незначительно изменит как константу распространения β , так и соотношение электромагнитных полей в области плёнки. Во-вторых, мы

рассматриваем случай, когда плёнка расположена в области минимума $|E_r|$ и $|E_\varphi|$, в связи с этим их влияние можно считать несущественным и положить равным нулю. Тогда остаётся только z -компонента, которая не испытывает скачка на границе с плёнкой. Поэтому для оценки можно использовать $|E_z|_{\max}$ невозмущённой моды. Тогда электрическое поле в плёнке создаёт ток плотностью согласно формуле $|J| \approx |E_z|_{\max} \sigma_m$, где $\sigma_m = 4\pi \operatorname{Re}(n_m) \operatorname{Im}(n_m) / (c\lambda\mu_0)$ — объёмная проводимость, Re — действительная, а Im — мнимая части n_m , c — скорость света, μ_0 — магнитная постоянная; действующее значение тока $I = s_m |J| / \sqrt{2}$, где $s_m = \pi((r_m + h_m/2)^2 - (r_m - h_m/2)^2) \approx 2\pi r_m h_m$ — площадь поперечного сечения плёнки, электрическое сопротивление на пренебрежимо малой длине δz вдоль оси волокна: $R = \delta z / (s_m \sigma)$, отсюда омические потери в плёнке на этой длине можно получить как $\delta P = I^2 R$. Потери приведут к уменьшению полной мощности P_0 в моде $P(\delta z) = P_0 - \delta P$, где мощность подразумевается в смысле вектора Умова — Пойнтинга S : $P_0 = \frac{1}{2} \iint \operatorname{Re}(S_z) ds$, где S_z — z -компонента вектора, s — площадь поперечного

сечения волокна и окружающей среды. При этом потери определяются мнимой частью $\beta = \operatorname{Re}(\beta) + i \operatorname{Im}(\beta)$ по формуле $P(\delta z) = P_0 \exp(-2|\operatorname{Im}(\beta)|\delta z) \approx P_0(1 - 2|\operatorname{Im}(\beta)|\delta z)$. Из этих двух уравнений для $P(\delta z)$ при $\delta z \rightarrow 0$ получается оценка на $\operatorname{Im}(\beta)$:

$$\operatorname{Im}(\beta) \approx \frac{2\pi^2 \operatorname{Re}(n_m) \operatorname{Im}(n_m) r_m h_m |E_z|_{\max}^2}{c\lambda\mu_0 P_0}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует закономерность изменения потерь для селективируемой моды в зависимости от параметров плёнки. По порядку величины данная оценка хорошо совпадает со значениями, полученными в численном счёте.

Удобно выражать величину погонных потерь α по мощности в дБ/см по формуле

$$\alpha = -2 \frac{10 \log_{10} e \text{ [дБ]}}{100 \text{ [см]}} |\operatorname{Im}(\beta)| = -0,0869 |\operatorname{Im}(\beta)| \left[\frac{\text{дБ}}{\text{см}} \right]. \quad (2)$$

Как следует из формул (1) и (2), величина погонных потерь зависит только от эффективных n_m поглощающего слоя, но не зависит от материала, из которого он изготавливается. В данной работе для демонстрации метода был выбран металлический слой, однако метод применим и для других материалов (например, легированных редкоземельными металлами стёкол), имеющих эффективные $\operatorname{Im}(n_m) < 0$ и $h_m \ll \lambda$. Слой при этом может иметь любые состав и структуру, например частично оксидированный или несплошной (островковый) металлический слой.

Моделирование селекции мод. Моделирование производилось методом конечных элементов в программном пакете COMSOL[®] Multiphysics в 2D-геометрии с использованием функции «Модовый анализ» модуля «Волновая оптика». Расчётная сетка в металлической плёнке четырёхугольная, имеющая пять элементов в радиальном направлении и $\left\lceil \frac{2\pi r_m n_{co}}{\lambda} 2 \right\rceil$ вдоль окружности. В остальных областях сетка треугольная, максимальный размер элементов задан $4\lambda/n$, где n — показатель преломления в соответствующей области, а на границах раздела сред максимальный размер элемента установлен как $\lambda/2n$.

В начале моделирования решалась задача поиска нескольких первых собственных мод (около 10) волокна без поглощающей оболочки с параметрами (см. рис. 2), среди которых находилась мода HE_{12} . У данной моды определялось положение минимума полей $|E_r|$ и $|E_\varphi|$ (или $|E_{x,y}|$ в декартовой системе координат) вдоль радиуса. Затем на этом радиусе размещалась поглощающая оболочка, после чего вновь производились поиск мод и определение целевой моды по виду пространственного распределения модуля поля, а также вычисление

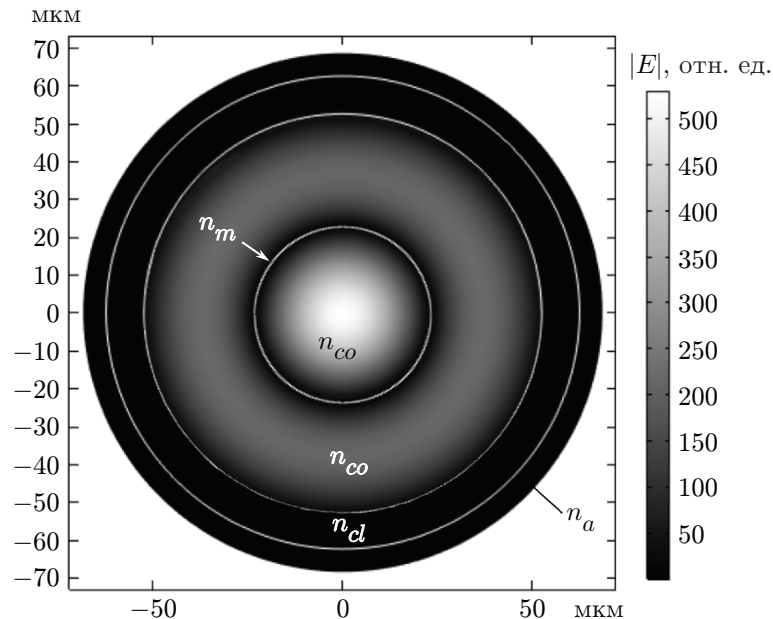


Рис. 3. Модуль поля моды HE_{12} с тонкой поглощающей оболочкой

коэффициентов погонных потерь α . Поскольку положение поглощающей оболочки неоптимально с точки зрения потерь, осуществлялась вариация её радиуса и поиск оптимума по минимуму $|\alpha|$. На рис. 3 показано распределение $|E|$ моды HE_{12} с оптимизированным радиусом поглощающей оболочки $r_m = 23,308$ мкм, $h_m = 2,5$ нм, $n_m = 3,68 - i4,61$ (титан), с эффективным коэффициентом преломления $n_{12} = \beta_{12}/k_0 = 1,443\,777 - i\,1,705\,475 \cdot 10^{-7}$, что соответствует $\alpha = -0,06$ дБ/см.

Помимо оптимальной точки для вышеуказанных параметров, более интересна зависимость α от толщины поглощающей оболочки, радиуса оболочки и её коэффициента поглощения. На рис. 4, а приведена расчётная зависимость погонных потерь оболочки с $h_m = 2,5$ нм от радиуса r_m и коэффициента поглощения материала оболочки χ , составляющего разные доли от $\text{Im}(n_m)$. Зависимость потерь от χ в оптимальных точках (треугольники), положение которых находилось квадратичной аппроксимацией по пяти расчётным точкам в окрестности максимума (пунктирные линии), близка к линейной согласно формуле (1). Аналогичное близкое к линейному изменение коэффициента потерь в оптимальных точках справедливо и для зависимости погонных потерь от толщины оболочки h_m при коэффициенте поглощения $\chi = \text{Im}(n_m)$ (рис. 4, b).

Из рис. 4, с следует, что поглощающая оболочка оказывает слабую дисперсионную зависимость на погонные потери в области 1500–1600 нм, однако происходит небольшое, почти линейное увеличение потерь с ростом длины волны. Данный эффект в основном определяется изменением $|E_z|_{\text{max}}$. При уменьшении длины волны как $|E_z|_{\text{max}}$, так и $|\alpha|$ уменьшаются, последний в минимуме составляет $\alpha = -0,045$ дБ/см для $h_m = 10$ нм на длине волны около 600 нм (дисперсионное изменение n_m не учитывалось). Такой сравнительно медленный характер изменения спектральной зависимости наблюдается несмотря на то, что минимумы компонент полей $|E_r|$ и $|E_\varphi|$ сдвигаются по радиусу, и оболочка располагается неоптимально, а также присутствует обратная зависимость от длины волны в формуле (1). На рис. 4, d продемонстрирована степень селекции поперечных мод. Если для первых двух мод, которые являются ортогональными поляризациями моды HE_{12} , погонные потери минимальны, то для любых других мод потери резко увеличиваются. Ближайшие к селектируемой моды имеют погонные потери в десятки раз выше. На рис. 4, d

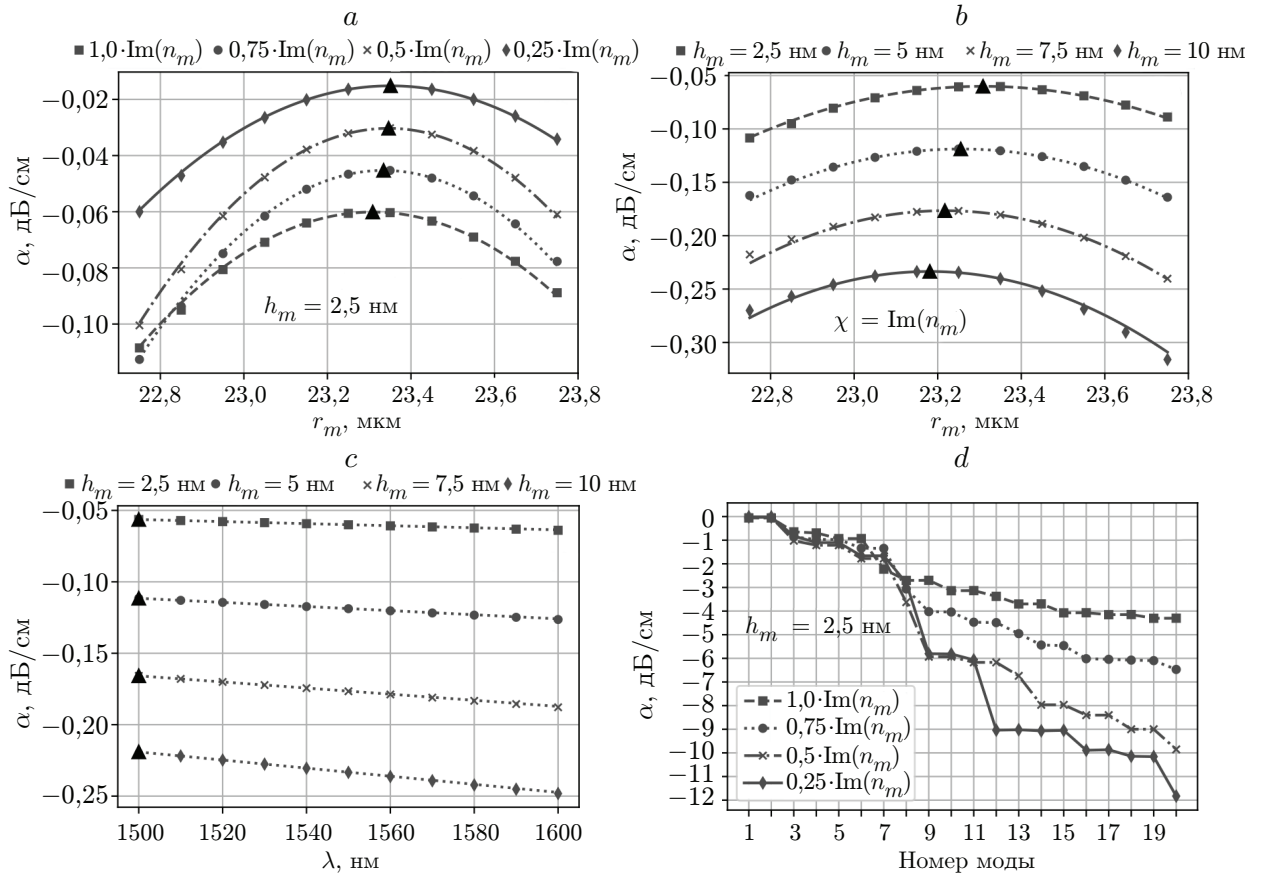


Рис. 4. Зависимости погонных потерь α : a — от r_m и χ при $h_m = 2,5$ нм; b — от r_m и h_m при $\chi = \text{Im}(n_m)$; c — от h_m и длины волны λ при $\chi = \text{Im}(n_m)$; d — от номера найденных мод для оптимальных r_m , $h_m = 2,5$ нм и различных χ , $\lambda = 1550$ нм

представлены потери для первых 20 мод при различных χ оболочки. Обращает на себя внимание обратная зависимость по потерям для мод с индексом выше 7. До этого момента относительная величина потерь высших мод явно не коррелирует с относительной величиной χ . Однако, начиная с 8-й моды, наблюдается обратное соотношение, т. е. потери для больших значений χ становятся меньше. Возможно, это связано с фактором возбуждения плазмонных мод, которые могут иметь большее поглощение из-за резонансного возбуждения плазмонных колебаний в плёнке с меньшим поглощением. Следует отметить, что порядок найденных мод может меняться для различных χ , что оказывает некоторое влияние на вид зависимостей. Данные эффекты нужно исследовать отдельно, с более глубоким анализом возбуждаемых мод, что выходит за рамки этой работы. Важным является факт, что потери для этих мод намного превосходят потери для селективируемых мод.

Обсуждение результатов моделирования. Результаты моделирования демонстрируют возможность селекции поперечных мод в оптических волокнах с помощью тонкой поглощающей оболочки. Абсолютная величина коэффициента погонных потерь селективируемой моды определяется конфигурацией компонент полей и параметрами поглощающей оболочки согласно формуле (1). Потери тем меньше, чем меньше $|E_z|_{\max}$, что показано для моды HE_{12} . Радиальные моды более высокого порядка (HE_{1q} , $q > 2$) имеют больше нулей для компонент $|E_{r,\varphi}|$, расположенных дальше по радиусу. Для этих радиусов $|E_z|$ может существенно уменьшиться относительно максимального значения, и при расположении в них поглощающей оболочки потери для селективируемой моды можно уменьшить.

Факторы, влияющие на снижение погонных потерь, заключаются в повышении величины характеристического числа V волокна либо снижении NA при фиксированных геометрических размерах.

В отличие от селекции мод в микросферическом резонаторе [10] данная конфигурация многомодового волокна имеет очень низкую спектральную селективную способность, обусловленную слабой спектральной зависимостью соотношения $|E_z|_{\max}^2/\lambda$, однако при этом не учитывалась спектральная зависимость n_m в формуле (1), которая для некоторых веществ может сильно изменять зависимость $\alpha(\lambda)$.

Существенное влияние на потери селектируемых мод могут оказывать вариация радиуса оболочки вдоль волокна, а также изгиб волокна, что накладывает определённые условия на изготовление и эксплуатацию данного вида волокон.

Существуют также моды TE_{0q} , $q > 1$, у которых компоненты $E_{r,z} = 0$, т. е. при размещении поглощающей оболочки в области минимума $|E_\varphi|$ погонные потери α будут значительно меньше (на порядки) в соответствии с формулой (1). Для мод TM_{0q} существует $E_z \neq 0$, и потери будут сравнимы с таковыми для мод HE_{1q} .

Заключение. Результаты расчётов в среде COMSOL® Multiphysics демонстрируют возможность селекции моды HE_{12} по потерям в многомодовом волокне. Из расчётов следует, что ключевым условием для высокой степени селекции, которое необходимо выполнить, является тонкая поглощающая оболочка (с толщиной 2,5–10 нм), располагающаяся в окрестности минимумов компонентов полей $|E_{r,\varphi}|$. Однако данный метод может быть работоспособным и для более толстых поглощающих оболочек или даже для оболочек с переменным поглощением по толщине, что наиболее приближено к практике. Расчёты показывают, что при оптимизации радиуса оболочки на минимум величины погонных потерь α для данной моды они могут составлять сравнительно малую величину (от –0,02 до –0,06 дБ/см) в зависимости от параметров оболочки, при этом для остальных мод эта величина в десятки раз больше. Приведённая аналитическая формула для погонных потерь даёт хорошее приближение и её можно использовать для оценочных расчётов степени селекции, если известно распределение мод невозмущённого световода. Проведены поиски оптимальных радиусов поглощающей оболочки с точки зрения минимизации потерь селектируемой моды для различных коэффициентов поглощения и толщин оболочки. Слабая спектральная зависимость коэффициента погонных потерь для заданной толщины оболочки и коэффициента поглощения показывает возможность селекции в широком спектральном диапазоне.

Возможная область применения метода тонких оболочек с поглощением, вероятно, может быть связана с оптической сенсорикой, например, может служить основой сенсора переменного электромагнитного поля, так как очевидно, что такие оболочки могут нагреваться и изменять параметры селектируемых мод, а также основой изгибных сенсоров. Кроме этого, возможно применение в оптических телекоммуникационных системах на основе многомодовых волокон в качестве селектора мод при демультиплексировании, а также в качестве сенсора на основе модовой интерференции (типа модового интерферометра Маха — Цандера [12]). Примечательно, что создание поглощающей оболочки может быть эквивалентно методу световедущей сердцевины одномодового волокна. Другими словами, в некоторых специальных случаях, если это технологически обосновано, тонкая поглощающая оболочка может заменить одномодовую световедущую сердцевину, делая стержневое волокно одномодовым.

Практическая реализация данного метода на основе неметаллического поглощающего слоя представляется возможной на основе существующей технологии изготовления брэгговских волокон [13]. В рамках той же технологии изготовления брэгговских волокон возможно применение металлов, температура плавления которых близка к таковой для материала сердцевины, например золота [14]. Для титана и других металлов (например,

никеля) способ может заключаться в использовании двухслойного стеклянного капилляра, внешний слой которого имеет коэффициент преломления n_{cl} , а внутренний — n_{co} и соответствующие размеры, диаметр отверстия равен r_m . На внутреннюю поверхность канала данной структуры можно нанести тонкий поглощающий слой, например, методом осаждения из коллоидного раствора [15], а полость капилляра заполнить жидкостью с коэффициентом преломления n_{co} . Другая возможная реализация предполагает нанесение методом вакуумного осаждения металлического слоя толщиной h_m на стеклянный стержень из материала сердцевины радиусом r_m . Сверху можно осадить двухслойный капилляр (внешний слой с n_{cl} , а внутренний — с n_{co}) методом нагрева и вытяжки. Подобным способом делают револьверные волокна [16] или волоконные объединители накачки.

Финансирование. Работа выполнена в рамках тем государственного задания Института автоматики и электрометрии СО РАН «Разработка элементов и исследование характеристик лазерных и сенсорных систем на основе структурированных волоконных световодов, микрорезонаторов и гибридных схем» (FWNG-2024-0015) и «Разработка новых технологий и аппаратных средств лазерной микрообработки и гибридного послыйного формообразования с заданными фазовыми и структурными свойствами. Оптимизация характеристик лазерных гравиметров с использованием гибридных технологий» (FWNG-2024-0020) с использованием вычислительного комплекса с лицензированным ПО COMSOL® Multiphysics ЦКП «Спектроскопия и оптика» (ИАиЭ СО РАН).

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeh P., Yariv A., Marom E. Theory of Bragg fiber // JOSA. 1978. **68**, N 9. P. 1196–1201.
2. Guo S., Albin S., Rogowski R. Comparative analysis of Bragg fibers // Opt. Exp. 2004. **12**, Iss. 1. P. 198–207. DOI: 10.1364/OPEX.12.000198.
3. Matějčec V., Kasik I., Podrazky O., Barton I. Bragg Fibers for Absorption-Based Sensing // Conf. Papers in Sci. 2015. **2015**, Iss. 1. 954539. DOI: 10.1155/2015/954539.
4. Сидоров А. И., Тисленко В. Возбуждение волноводных мод в плазмонном волноводе, сформированном электронным лучом в стекле // Оптика и спектроскопия. 2022. **130**, вып. 11. С. 1745–1748. DOI: 10.21883/OS.2022.11.53783.3072-22.
5. Popescu V. A., Puscas N. N., Perrone G. Efficient light absorption in a new Bragg fiber-based plasmonic sensor // JOSA B. 2015. **32**, Iss. 3. P. 473–478. DOI: 10.1364/JOSAB.32.000473.
6. Deng H., Chen Y., Panoiu N. C. et al. Surface modes in plasmonic Bragg fibers with negative average permittivity // Opt. Exp. 2018. **26**, Iss. 3. P. 2559–2568. DOI: 10.1364/OE.26.002559.
7. Ramadas V., Azman M. F., Ibrahim S. A. Numerical analysis of metal-layer in optical fiber clad // AIP Conf. Proc. 2020. **2203**. 020009. DOI: 10.1063/1.5142101.
8. Li Y., Hua Z., Yan F., Gang P. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization // Opt. Fiber Technol. 2009. **15**, Iss. 4. P. 391–397. DOI: 10.1016/j.yofte.2009.05.001.
9. Терентьев В. С., Симонов В. А. О частотной селекции излучения волоконного лазера с отражательным интерферометром // Автометрия. 2011. **47**, № 4. С. 41–48.
10. Terentyev V., Simonov V. Mode Selection Method in Spherical Optical Cavities with Thin Metal Film // Photonics. 2023. **10**, Iss. 7. 789. DOI: 10.3390/photonics10070789.
11. Дианов Е. М., Прохоров А. М. Лазеры и волоконная оптика // Успехи физических наук. 1986. **148**, № 2. С. 289–311. DOI: 10.3367/UFNr.0148.198602c.0289.

12. **Симонов В. А., Ризк Х. А.** Измерение показателя преломления жидкости с помощью модового интерферометра Маха-Цендера на основе утонённого волокна // Фотон-Экспресс. 2023. **190**, спецвып. 6 «Фотон-Экспресс-Наука-2023». С. 296–297. DOI: 10.24412/2308-6920-2023-6-296-297.
13. **Aleshkina S., Likhachev M.** All-glass hybrid fibers for dispersion management // JOSA B. 2021. **38**, Iss. 12. P. F115–F121. DOI: 10.1364/JOSAB.437891.
14. **Chourasia R. K., Katti A.** Bragg Fibers. Cham: Springer, 2024. 172 p.
15. **Гусев А. И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2005. 416 с.
16. **Bufetov I. A., Kosolapov A. F., Pryamikov A. D. et al.** Revolver Hollow Core Optical Fibers // Fibers. 2018. **6**, Iss. 2. 39. DOI: 10.3390/fib6020039.

Поступила в редакцию 13.11.2024

После доработки 13.11.2024

Принята к публикации 10.01.2025
