

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ КОЛЛИМАТОР НА ОСНОВЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Разработана математическая модель волоконно-оптического коллиматора, построенного на основе шариковой линзы и линзы в виде половины шарика. С помощью данной модели методом компьютерного моделирования исследовано влияние геометрических и физических параметров линзы на дивергенцию лучей коллиматора. Показано, что шариковая линза является почти идеальной для построения коллиматоров и обеспечивает апертурный угол излучения, близкий к теоретически возможному, определяемому из инварианта Штраубеля. Показано, что для разных показателей преломления существует оптимальный диаметр линзы, при котором достигаются наилучшие характеристики коллиматора. Для ламбертового источника излучения оптимальный диаметр линзы можно рассчитать, используя простые соотношения: формулы для тонкой линзы, инвариант Штраубеля и формулу для фокусного расстояния шариковой линзы.

Ключевые слова: волоконно-оптический коллиматор, коллиматор, оптическая линза.

V.N. SHAPAR, G.S. SVECHNIKOV

V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of the NASU, Kiev

FIBER-OPTIC COLLIMATOR BASED ON SPHERICAL OPTICS WITH LIMITING CHARACTERISTICS

Abstract - A mathematical model for fiber-optic collimator based on spherical and hemispherical lenses is developed. Using this model and computer simulation, we study the effect of geometric and physical lens parameters on divergence of collimated beams. A ball lens is shown to be almost ideal for collimator making; it ensures aperture angle close to that determined theoretically from Straubel's invariant. It is shown that there exists optimal lens diameter for different refractive indices at which the best collimator characteristics are achieved. For a Lambert source of radiation, the optimal lens diameter can be calculated using the following simple relations: formulae for a thin lens, Straubel's invariant and formula for focal distance of ball lens.

Key words: collimator, fiber-optic collimator, optical lens.

Вступлення

Волоконно-оптический коллиматор (ВОК) предназначен для преобразования расходящегося светового пучка с выхода волоконно-оптического кабеля в расширенный пучок параллельных лучей и относится к важным компонентам многих активных и пассивных устройств. Он широко используется в оптических сенсорах и устройствах обработки оптических сигналов, а также в компонентах оптической связи, таких как: модуляторы, аттенюаторы, трансмиттеры, оптические переключатели каналов, оптические изоляторы, циркуляторы, волоконно-оптические коннекторы с расширенным пучком и др.

При проектировании коллиматора основной задачей является получение минимальной расходимости лучей светового пучка на выходе устройства при минимальных оптических потерях. Для достижения указанной цели в расчетах должны быть учтены поперечные размеры и диаграмма направленности излучения источника. Однако на практике расчет коллиматора проводят упрощенно, т. е. подбирают линзу исходя из соображений допустимых размеров коллиматора. Такой упрощенный подход может привести к построению устройства с существенно заниженными характеристиками. Особенно большие ошибки могут иметь место при упрощенном расчете волоконно-оптических коллиматоров со световыми пучками малого диаметра (менее 1 мм).

Целью данной работы является разработка волоконно-оптического коллиматора с диаметром светового пучка 0,5 мм, предназначенного для использования в волоконно-оптических вращающихся соединителях [1,2]. Значительная часть работы посвящена теоретическим исследованиям влияния параметров линзы на угловую характеристику излучения коллиматора.

Для расчета и оптимизации конструкции в работе использован метод математического моделирования, опирающийся на физическую модель линзы со сферическими поверхностями в рамках геометрической оптики. Компьютерное моделирование устройства проведено с помощью составленной программы в среде программирования Matlab.

1. Оптическая схема коллиматора и его математическая модель.

Оптическая схема волоконно-оптического коллиматора приведена на рис. 1.

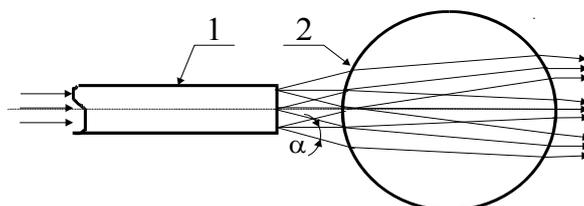


Рис. 1. Схематическое изображение волоконно-оптического коллиматора на основе шариковой линзы:

1 – световод; 2 – шариковая линза

Коллиматор состоит из отрезка оптического световода, оконцованого с одной стороны стандартным оптическим разъемом (на рисунке не показан) и сферической линзы, расположенной на общей оси со световодом на расстоянии от торца световода приблизительно равном фокусному расстоянию.

В математической модели коллиматора учтены все необходимые переменные параметры, влияющие на расходимость его лучей, а именно: - диаметр сердцевины световода; угловое распределение интенсивности лучей на выходе световода; радиус кривизны сферической поверхности линзы; показатель преломления линзы и расстояние торца световода от переднего края линзы. Приемник расположен на выходе линзы на расстоянии 0,01 мм от края линзы.

Методику проведения расчетов коллиматора можно условно разделить на несколько этапов, а именно:

- 1 – выбор системы координат и определение в данной системе местоположений торца кабеля и линзы;
- 2 – разбиение площадки торца кабеля на светоизлучающие элементарные площадки (зоны излучения) и определение начальных координат и направляющих косинусов лучей в каждой из указанных площадок;
- 3 – вывод математических соотношений, описывающих ход лучей в устройстве;
- 4 – проведение расчетов угловой расходимости лучей на входе линзы для заданных параметров показателя преломления n линзы, диаметра d световода и углового распределения лучей на выходе световода, варьируя радиусом кривизны сферической поверхности линзы и расстоянием торца световода от переднего края линзы;
- 5 – анализ полученных результатов и выбор оптимальной линзы с радиусом кривизны, обеспечивающим наименьшую расходимость лучей.

1.1. Направляющие косинусы входных лучей в декартовой системе координат.

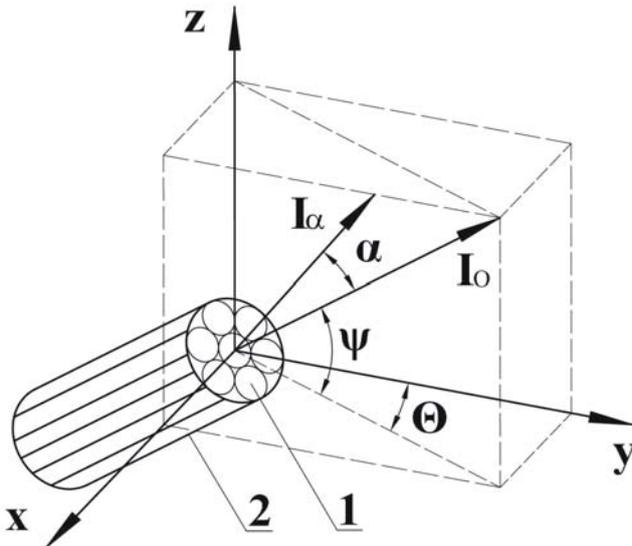


Рис. 2. Схема расположения торца волоконно-оптического световода в заданной декартовой системе координат.

1 – элементарная площадка излучения торца световода;
2 – световод; I_0 – луч, который распространяется вдоль оптической оси выхода световода; I_α – луч, который описывает световой конус вокруг оси I_0 .

образуют вокруг луча I_0 световой конус. Предельный апертурный луч светового конуса на выходе световода изображен на рис. 2 лучом I_α .

Направляющие косинусы l, m, n оптических лучей I_0 и I_α могут быть найдены в общем виде [4] и выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} m = 1 \\ l = \frac{\cos \psi \cdot \sin \Theta + \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \sin \Theta}{\cos \psi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta} \\ n = \frac{\tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \cos \psi + \sin \psi}{\cos \psi \cdot \cos \Theta - \tan \alpha \cdot \sin \varphi \cdot \sin \Theta - \tan \alpha \cdot \cos \varphi \cdot \sin \psi \cdot \cos \Theta} \end{cases} \quad (1)$$

Значение углов φ , θ , ψ , α и их знаки при проведении расчетов коллиматора определяются из следующих рассуждений.

Угол φ вращения луча I_α вокруг луча I_0 составляет 360° . За начало отсчета угла φ взята плоскость, в которой лежит вектор I_0 и его проекция на плоскость координат XOY.

Углы θ и ψ определяют угловое положение торца световода относительно оптической оси ВОК в двух плоскостях. В световодах с прямыми торцами, типичные значения углов θ и ψ не превышают $0,1^\circ$ и практически не влияют на результат расчетов. Следовательно, значения углов θ , ψ можно принять равными нулю, а уравнение (1) можно упростить.

Угол α всегда положителен. Его предельное значение выбирается из диаграммы направленности источника излучения из условия, что в диапазоне углов выше некоторого предельного угла излучается незначительное количество энергии, которой можно пренебречь (обычно менее 1% от всей энергии). В проведенных в данной работе расчетах принято, что источником излучения является косинусный излучатель, интенсивность лучей которого зависит от направления излучения по закону косинуса $I_\alpha = I_0 \cdot \cos(\alpha)$. С высокой точностью косинусному закону пространственного распределения интенсивности излучения отвечает полупроводниковый светодиод.

1.2. Процедура расчета апертурных лучей коллиматора.

После написания соответствующих математических уравнений [4] для определения хода лучей внутри и вне линзы, эффективность коллиматора рассчитывалась численным методом, как отношение количества световых лучей, распространяющихся в заданном апертурном угле и падающих на площадку заданного диаметра, ко всему количеству лучей, излучаемых торцом световода во всех направлениях с учетом их интенсивности.

Для определения интенсивности одного элементарного луча сделаем некоторые допущения. Торцы световода условно поделим на матрицу дискретных излучателей, каждый из которых представляет собой элементарную площадку круглого сечения одинакового диаметра, гексагонально-расположенных на торце световода. При разбиении торца на мелкие площадки каждую из площадок можно считать точечным источником, излучающим конический гомоцентрический пучок лучей.

Оптические пучки элементарных площадок разделим далее на n конических пучков с шагом $\Delta\alpha$ при вершине плоского угла круглого конуса, каждый из которых дополнительно разделим на g азимутных секторов. После разбиения конического пучка по указанной процедуре на элементарные лучи, можно вычислить интенсивность P_{elem} одного элементарного луча.

Для этого вычислим общую интенсивность P_{ik} всех лучей, которые распространяются между двумя круглыми коническими поверхностями с плоскими углами α_i и α_k из следующего математического соотношения [5]:

$$P_{ik} = 2\pi \cdot I_{ik} \cdot [\cos(\alpha_i) - \cos(\alpha_k)], \quad (2)$$

где α_i и α_k - плоские углы при вершине соответствующих конусов;

I_{ik} - интенсивность светового потока в направлении образующей конуса, угол которого определяется как среднее арифметическое между углами α_i и α_k .

Интенсивность одного луча определяется путем деления общей интенсивности P_{ik} всех лучей, что излучаются между заданными коническими поверхностями (в трубчатом конусе лучей), на количество азимутальных секторов g , на которое разделен световой конус

$$P_{elem} = P_{ik} / g \quad (3)$$

При достаточно мелком разбиении гомоцентрических пучков на световые конусы, а конусов на элементарные секторы, точность расчета коллиматора теоретически может быть сколько угодно высокой. Методом итераций установлено, что на практике для получения точности расчетов на уровне лучше 0,2% достаточно выбрать $g = 180$, $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_k = 0,05^\circ$.

1.3 Определение координат входных лучей.

При разбиении торца световода на элементарные площадки круглого сечения с гексагональным расположением площадок по торцу, координаты x_{ij} , y_{ij} , z_{ij} центров площадок можно определить из следующих соотношений [4]

$$\begin{cases} x_{ij} = x_0 + i \cdot D_e & \text{- для парных значений } j; \\ x_{ij} = x_0 + D_e / 2 + i \cdot D_e & \text{- для непарных значений } j; \\ y_{ij} = 0 \\ z_j = z_0 + j \cdot D_e \cdot \sqrt{3} / 2 \end{cases} \quad (4)$$

где j – номер ряда элементарных площадок вдоль оси OZ;
 i – номер элементарной площадки, расположенной в заданном ряде j вдоль оси OX;
 D_e - диаметр элементарной площадки.

В системе уравнений (4) номерам рядов элементарных площадок излучения, расположенных в положительном направлении оси OZ (над плоскостью XOY на рис.2) присвоен знак плюс, а номерам рядов, расположенных под плоскостью XOY знак минус. Аналогично, номерам площадок, расположенных в каждом ряде в положительном направлении оси OX присвоен знак плюс, а площадкам, которые расположены в негативном направлении оси OX знак минус. С учетом сказанного индексам i, j присвоены следующие значения:

$$i = -m_i \div m_i; \quad j = -n_j \div n_j \quad (5)$$

Максимальное количество m_i рядов элементарных площадок и максимальное количество n_j элементарных площадок, расположенных на диаметре световода D_f определяются как целые числа из следующих уравнений:

$$m_i = \frac{D_f - D_e}{\sqrt{3} \cdot D_e}, \quad n_j = \frac{D_f - D_e}{2 \cdot D_e} \quad (6)$$

Для волоконного световода с круглым торцом во внимание берутся только те значения m_i и n_j , для которых выполняется условие

$$\sqrt{(x_{ij})^2 + (z_j)^2} \leq \frac{D_f - D_e}{2} \quad (7)$$

Условие (7) исключает возможность возникновения ошибки при разбиении торца световода на элементарные площадки и связанной с этим разбиением погрешности расчетов, имеющей место, когда периферийные участки круглых площадок выступают за пределы торца световода, в то время как их центры находятся в пределах торца.

При разбиении торца на площадки возможны два случая: - на диаметре световода размещается парное или непарное количество элементарных площадок. Заметим, что такая неоднозначность в структуре разбиения торца на элементарные площадки приводит к неоднозначному определению координат элементарных площадок на торце световода с помощью системы уравнений (4). Для снятия этого вопроса компьютерная программа составлена таким образом, чтобы в зависимости от соотношения между диаметром световода и диаметром элементарной площадки можно было автоматически определять максимальное количество площадок круглого сечения, которое вмещается на диаметре световода D_b , и если на диаметре световода при $i = 0; j = 0$ вмещается непарное количество площадок, то в уравнениях (4) принимается значение $x_0 = 0$, при парном количестве площадок компьютерной программой принимается значение $x_0 = D_e / 2$.

С целью наглядного восприятия на рис. 3 показана диаграмма расположения элементарных площадок для двух упомянутых выше случаев.

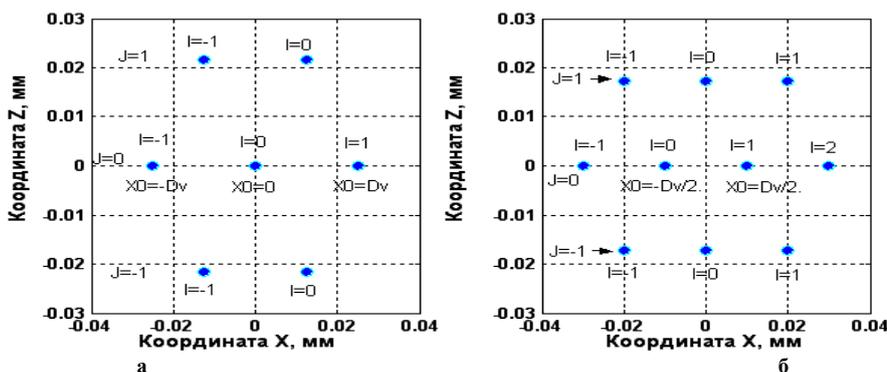


Рис. 3. Координаты расположения центров элементарных площадок круглого сечения на торце световода.
 а - для случая непарного количества площадок, расположенных на диаметре световода;
 б - для случая парного количества элементарных площадок, расположенных на диаметре световода.

Следует отметить, что при разбиении торца на элементарные площадки, диаметр которых выбирается меньше диаметра световода в $10^3 \div 10^4$ раз, ошибка в расчетах, обусловленная дискретностью разбиения торца не превышает доли процента.

2. Результаты компьютерного моделирования и их обсуждение.

По выше описанной методике были проведены расчеты коллиматоров на основе шариковых и полусферических линз с разными радиусами кривизны поверхности. Показатель преломления линз варьировался в широком диапазоне от $n=1,447$ (кварцевое стекло КУ-1) до $n=1,75$ (сапфир). Диаметр кабеля принят в расчетах равным 100 мкм. Числовая апертура NA кабеля принята равной $NA=0,19$ (типичное значение числовой апертуры многомодового кабеля). Расчеты проведены, как уже упоминалось выше, для диаметра светового пучка на выходе коллиматора 0,5 мм.

На рис. 4 приведены расчетные кривые зависимости относительной мощности излучения светового потока на выходе коллиматора от расстояния торца кабеля до переднего края линзы. Расчеты проведены для сферической линзы диаметром 1,912 мм (рис. 4а) и линзы диаметром 1,7 мм (рис. 4б). Показатель преломления обеих линз равен $n=1,516$.

Верхние кривые получены для световых лучей падающих на площадку диаметром 0,5 мм во всем угловом диапазоне распространения лучей. Нижние кривые получены для лучей падающих на площадку диаметром 0,5 мм с ограниченными углами падения $\beta \leq 2^\circ$. Кривые получены с учетом и без учета оптических потерь, связанных с френелевским отражением лучей на поверхностях линз.

Из приведенных рисунков нетрудно видеть, что линза диаметром 1,912 мм обеспечивает гораздо более высокие характеристики коллиматору. В коллиматоре с линзой диаметром 1,912 мм сосредоточено в световом пучке на диаметре 0,5 мм около 82% всей энергии лучей с углами падения $\beta \leq 2^\circ$ (без учета оптических потерь Френеля), в то время как в коллиматоре с линзой диаметром 1,7 мм только 65% от энергии всех лучей.

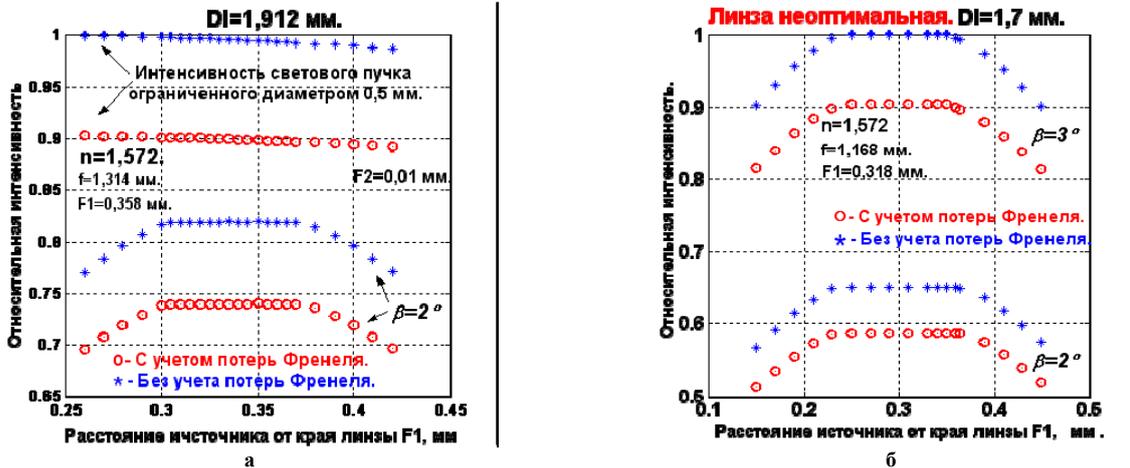


Рис. 4. Зависимость относительной интенсивности излучения на выходе волоконно-оптического коллиматора с шариковой линзой от расстояния F1 источника до края линзы. а – для линзы диаметром 1,912 мм; б – для линзы диаметром 1,70 мм.

На рис. 5а и 5б приведены зависимости относительной интенсивности лучей от расстояния источника до края линзы для полусферических линз.

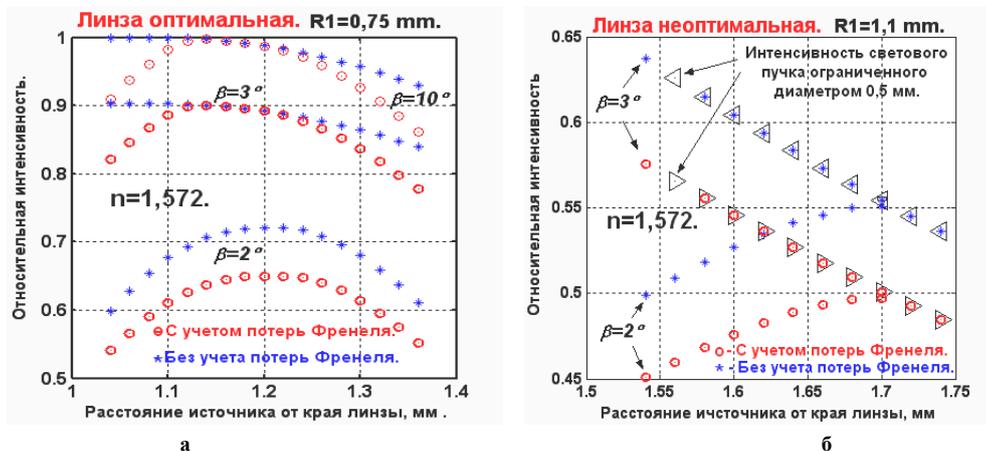


Рис. 5. Зависимость относительной интенсивности излучения на выходе волоконно-оптического коллиматора с плоско-выпуклой линзой (полусфериком) от расстояния источника до края линзы. а – для линзы с радиусом R1 кривизны поверхности R1=0,75 мм; б – для линзы с радиусом кривизны поверхности R1=1,10 мм

Как и в случае с шариковой линзой, имеется линза с кривизной поверхности, обеспечивающая коллиматору более высокие характеристики. На рис. 5 это линза с радиусом кривизны поверхности $R_1=0,75$ мм. Аналогичные расчеты были проведены для других диаметров и радиусов кривизны линз. По полученным из этих расчетов данным были построены кривые максимальной относительной интенсивности светового потока на выходе коллиматора для линз разного диаметра.

На рис. 6 приведены данные максимальной относительной интенсивности светового потока на выходе коллиматора, полученные для двух значений показателя преломления линз $n=1,516$ и $n=1,572$.

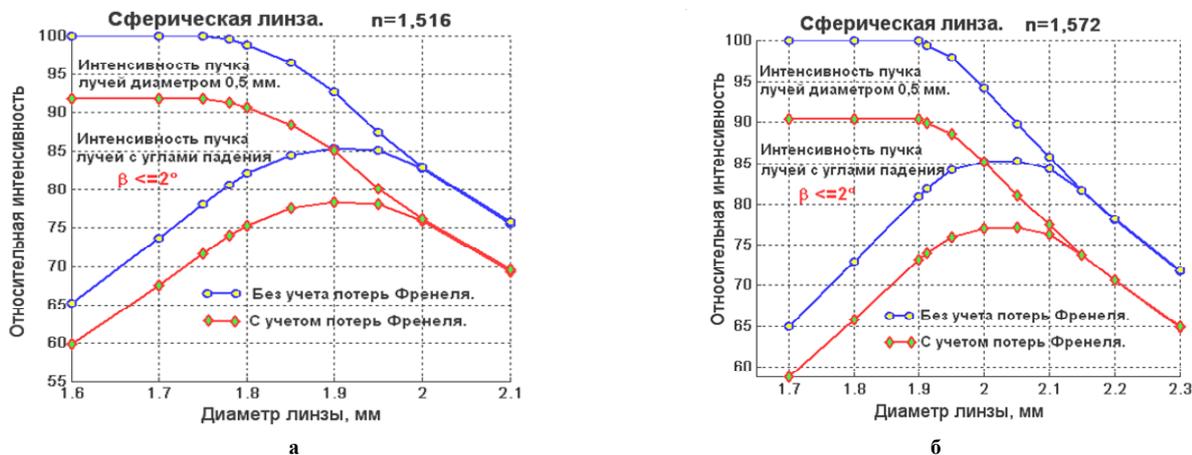


Рис. 6. Зависимость максимальной относительной интенсивности лучей светового пучка на выходе коллиматора от диаметра шариковой линзы.
 а – для линзы с показателем преломления $n=1,516$;
 б – для линзы с показателем преломления $n=1,572$.

Из рис. 6 видно, что для разных показателей преломления существует свой оптимальный диаметр линзы, при котором достигается минимальная дивергенция лучей на выходе коллиматора при минимальных оптических потерях. На рис. 6а это линза, диаметр которой равен около 1,8 мм. На рис. 6б оптимальный диаметр линзы равен 1,9 мм.

Сравнивая полученные результаты для линз с разным показателем преломления можно видеть, что для разных показателей преломления достигается одинаковый результат, если не учитывать френелевские потери на отражение на поверхностях линзы. Для непросветленных линз меньшие потери обеспечивают линзы с меньшим показателем преломления.

Из рис. 4 и рис. 5 видно также, что шариковая линза обеспечивает коллиматору меньшую расходимость лучей по сравнению с линзой в виде половины шарика. Для наглядного представления сказанного на рис. 7 приведены характеристики углового распределения интенсивности лучей светового потока на выходе коллиматора с шариковой линзой и линзой в виде половины шарика с оптимальным радиусом кривизны сферической поверхности. Кривые получены для разных расстояний $F1$ торца волоконного световода от края линзы.

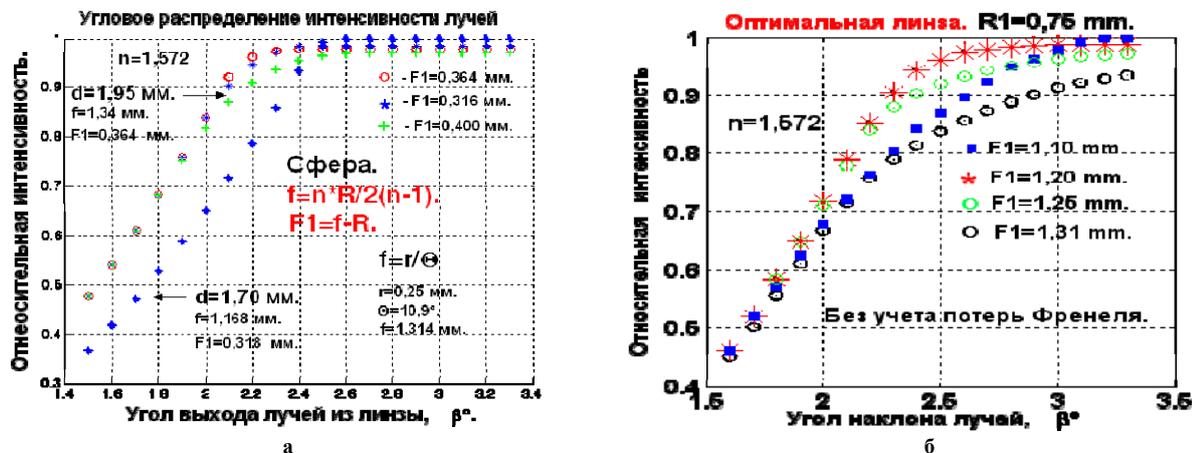


Рис. 7. Угловое распределение интенсивности светового пучка на выходе коллиматора.
 а - с шариковой линзой;
 б - с плоско-выпуклой линзой (полусферик).

Из рис.7 нетрудно видеть, что для сферической линзы в предельном угле $\beta=2,2^\circ$ сосредоточено более 96% энергии всех лучей, в то время как для полусферической линзы только 85%. Количество энергии лучей на уровне 96% полусферическая линза дает только в угле $\beta=2,5^\circ$.

В заключение предложим простой, но достаточно точный способ расчета оптимального диаметра шариковой линзы, который базируется на простых соотношениях: инварианте Штраубеля и формуле для определения фокусного расстояния шариковой линзы.

В соответствии с инвариантом Штраубеля [3, с.36] входная и выходная числовые апертуры расширяющегося светового пучка связаны между собой зависимостью

$$n_1 \cdot r_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot r_2 \cdot \sin \alpha_2, \quad (8)$$

где n_1 и n_2 - показатели преломления среды на входе и выходе оптической системы;

r_1 и r_2 - радиусы светового пучка на входе и выходе оптической системы;

α_1 и α_2 - апертурные углы входного и выходного лучей.

Отсюда минимальный угол лучей α_2 , который может быть получен на выходе коллиматора, составляет при выбранных параметрах $r_1 = 0,05$ мм, $r_2 = 0,25$ мм, $\alpha_1 = 11^\circ$ примерно $2,18^\circ$. Задачей является найти идеальную линзу, которая обеспечит расходимость лучей коллиматора не выше указанных $2,18^\circ$.

Суть наших рассуждений сводится к следующему. Если мы используем источник радиусом r_1 с апертурой излучения α_1 и расширяем его до радиуса r_2 с помощью идеальной тонкой линзы с фокусным расстоянием f , то необходимое фокусное расстояние оптимальной линзы можно получить из следующего соотношения

$$r_2 = f \cdot \sin \alpha_1. \quad (9)$$

Из (9) находим для принятых значений $r_2 = 0,25$ мм и $\alpha_1 = 11^\circ$ значение $f = 1,310$ мм.

Далее воспользуемся формулой фокусного расстояния шариковой линзы

$$f = \frac{n \cdot R}{2 \cdot (n - 1)}, \quad (10)$$

где n - показатель преломления линзы;

R - радиус линзы.

Для заданного показателя преломления линзы n из (10) находим искомый диаметр D_l линзы. Для $n = 1,572$ имеем $D_l = 1,907$ мм. Для $n = 1,516$ диаметр линзы составляет $D_l = 1,78$ мм.

Сравнивая результаты, полученные простейшим методом расчета диаметра оптимальной линзы, используя выражение инварианта Штраубеля и формулу для фокусного расстояния шариковой линзы, с результатами, полученными путем сложного компьютерного моделирования, нетрудно видеть, что имеется практически идеальное совпадение данных для диаметра оптимальной линзы, рассчитанных разными методами.

Кроме того, сравнивая результаты расчетов углового распределения лучей по интенсивности (см. рис. 7) с рассчитанным значением предельного минимального возможного угла излучения по инварианту Штраубеля, можно также видеть, что угол $\beta = 2,2^\circ$ излучения коллиматора с оптимальной шариковой линзой практически совпадает с апертурным углом $\beta = 2,18^\circ$, полученным из инварианта Штраубеля.

Коллиматор, построенный на основе полусферической линзы заметно превышает указанные $2,2$ градуса.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Шариковая линза является практически идеальной для построения волоконно-оптических коллиматоров.
2. Коллиматоры, построенные на основе иных двояковыпуклых линз со сферическими поверхностями, в том числе с плоско-выпуклой поверхностью уступают по характеристикам коллиматорам, построенным на основе шариковой линзы.
3. Для каждого заданного показателя преломления существует оптимальный диаметр шариковой линзы, при котором достигаются наилучшие характеристики коллиматора.
4. Для ламбертового источника с косинусной характеристикой излучения оптимальный диаметр шариковой линзы может быть найден из простых соотношений – инварианта Штраубеля и формулы для фокусного расстояния шариковой линзы.

Литература

1. Шапар В. М. Малогабаритный багатоканальный оптический обортовий з'єднувач з волоконно-оптичним кільцевими перетворювачами / В. М. Шапар, С.В. Свечніков // Космічна наука і технологія, Додаток. – 2003. – Т.9. – № 2. – С. 36-40.

2. Шапарь В. Н. Многоканальный оптический вращающийся соединитель для РЛС космического базирования / В. Н. Шапарь, С.В. Свечников, П.Ф. Олексенко // Космічна наука і технологія. Додаток. – 2003. – Т 9. – № 2. – С. 30-35.
3. Вейнберг В.Б. Оптика световодов / Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. – Л.: Машиностроение, 1977. – 320 с.
4. Шапар В.М. Оптичний погоджувальний пристрій для багатоканального оптичного обертвого з'єднувача з волоконно - оптичними джгутами / В.М. Шапар // МНТЖ "ОЕІЕТ". – 2008. – № 1(15). – С. 197-205.
5. Эпштейн М.И.. Измерения оптического излучения в электронике / М.И. Эпштейн. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.

References

1. Shapar V. M. , Svechnikov S.V. Malohabarytnyi bahatokanalnyi optychnyi obertovyi ziednuvach z volokonno-optychnym kiltsevymu peretvoriuvchamy. Kosmichna nauka i tekhnolohiia, Dodatok. 2003. Issue 9. Volume 2. P. 36-40.
2. Shapar' V. N. , Svechnikov S.V., Oleksenko P.F. Mnogokanal'nyj opticheskij vrashhajushhijsja soedinitel' dlja RLS kosmicheskogo bazirovaniya. Kosmichna nauka i tehnologija, Dodatok. 2003. Issue 9. Volume 2. P. 30-35.
3. Vejnberg V.B., Sattarov D.K. Optika svetovodov. Leningrad. Mashinostroenie. 1977. 320 p.
4. Shapar V.M. Optychnyi pohodzhuvalny prystrii dlja bahatokanalnoho optychnoho obertovoho ziednuvacha z volokonno - optychnymy dzhhutamy. "OEIET". 2008. Issue 15. P. 197-205.
5. Jepshtejn M.I.. Izmerenija opticheskogo izluchenija v jelektronike. Moskow. Jenergoatomizdat. 1990. 254 p.

Рецензія/Peer review : 14.5.2013 р.

Надрукована/Printed :19.6.2013 р.

Рецензент: д.ф.-м.н., чл.- корр. НАН України В.С.Лысенко
(Заведуючий відділом ІФП ім. В.Е.Лашкарева НАНУ)