

УДК 681.7.068

МИНИМИЗАЦИЯ ПОТЕРЬ В ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ, ПОСТРОЕННЫХ НА МИКРОЛИНЗАХ

Д.т.н. И.Ш. Невлюдов, Р.Ю. Аллахверанов, И.С. Хатнюк, Харьковский национальный университет радиоэлектроники

В статье приводится анализ вносимых потерь в оптических соединительных устройствах, построенных на микролинзах. На основе анализа физических процессов в соединительных устройствах, построенных на микролинзах, установлено, что расширение пучка в межлинзовом пространстве, снижая требуемый допуск на поперечное смещение, обуславливает необходимость прецизионной юстировки пучка света на торце входного конца волокна по пятну и по углу, что существенно усложняет конструктивно-технологическую реализацию соединительного устройства на микролинзах.

In article the analysis of insertion losses in optical connectors on microlenses of different constructions is presented. On the basis of physical processes analysis in connectors that set on microlenses, expansion of bunch is in interlens space, reducing the required admittance on transversal displacement, the necessity of exact tuning of light beam stipulates on the butt end of entrance fibre end on a spot and on a corner, that substantially complicates structural and technological realization of connector on microlenses.

Введение

Как показано в [1], использование микролинз в соединительных устройствах дает возможность на стыке ОВ расширить световой пучок до размеров (400 – 1000) мкм. Это снижает требования к радиальной несогласованности ОВ в десять раз. Однако микролинзы вносят дополнительные потери в оптические каналы связи, обусловленные ошибками изображения, в результате которых диаметр светового пятна, сфокусированного на торце приемного ОВ, превышает диаметр сердцевины. Соответственно, апертура сфокусированного пучка света превышает апертуру ОВ и вызывает дополнительные потери по "углу". Далее в статье мы проанализируем характеристики оптических систем, построенных на микролинзах.

1 Параметры оптической системы соединительного устройства, построенного на микролинзах, и компенсация оптических потерь по пятну и по углу

Рассмотрим оптическую систему, построенную на двух сферических линзах радиусов R_1 и R_2 с однородным распределением профиля показателя преломления n_1 и n_2 соответственно (рис. 1).

Расстояние l_1 от торца входного ОВ до центра входной линзы выберем равным f_1 , расстояние l_2 от торца выходного ОВ до центра выходной линзы – f_2 , где f_1, f_2 – фокусные расстояния входной и выходной линз соответственно.

Фокусное расстояние для сферической линзы с однородным распределением профиля показателя преломления определяется по формуле [2]:

$$f = \frac{nR}{2(n-1)} \quad (1)$$

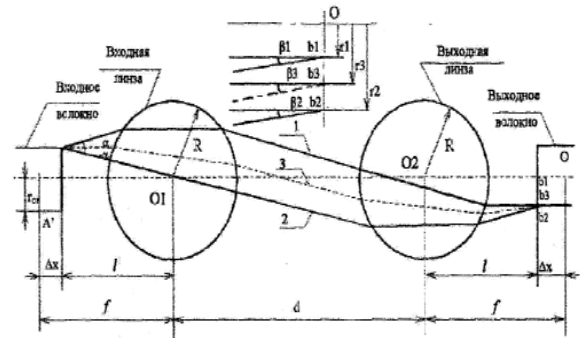


Рис. 1. Оптическая система соединительного устройства, построенного на микролинзах

Расстояние между линзами обозначим – через 0 . Для симметрии входа – выхода необходимо чтобы $R_1 = R_2$, $n_1 = n_2$ и, следовательно, $f_1 = f_2 = f$, $l_1 = l_2 = l$. Возьмем $d = 2f$.

Параметры оптической системы, указанные выше, являются оптимальными с точки зрения парааксиальности светового пучка и точечного источника света. Однако для рассматриваемых ОВ имеет место конечный поперечный размер источника (диаметр сердцевины 50 мкм) и угол расходимости светового пучка с числовой апертурой $NA = 0,2 - 0,24$, что составляет приблизительно $11-13^\circ$. Несмотря на небольшие отклонения параметров светового пучка от парааксиальности и источника света от точечного, эти отклонения в силу ошибок изображения оптических систем могут внести значительные оптические потери, превышающие 0,17 – 0,25 дБ.

Потери рассчитываются путем прослеживания хода оптического луча через систему ОВ – линза – ОВ.

При параметрах оптической системы, выбранных оптимальными с точки зрения парааксиальности светового пучка и точечного источника света, получены следующие зависимости оптических потерь от радиуса линзы R при фиксированном показателе преломления n (рис. 2).

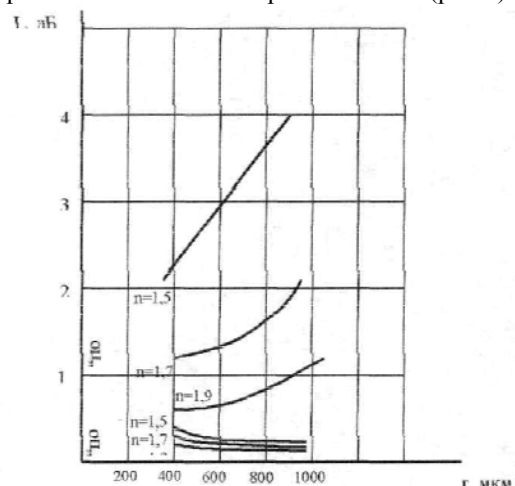


Рис. 2. Зависимость оптических потерь от радиуса линзы

С ростом показателя преломления n оптические потери по пятну и по углу убывают. Так, например, при $R = 400$ мкм, $n = 1,7$ оптические потери по пятну составляют 1,2 дБ, а по углу – 0,3 дБ. Суммарные оптические потери этом находятся на уровне 1,5 дБ. При $R = 1000$ мкм ($n = 1,7$) суммарные оптические потери составляют 2,1 дБ.

Оптические потери, приведенные выше, определяются aberrациями оптической системы и обусловлены конечными поперечными размерами сердцевины ОВ (объекта) и отклонениями светового пучка от параксиального.

Рассмотрим источники ошибок изображения, вносимых оптической системой.

Пусть плоскость объекта с осями x_0 и y_0 ортогонально пересекается в точке O с осью Z оптической системы (рис. 3). Изображение первого порядка по теории Гаусса лежит в некоторой другой плоскости (x_i, y_i) перпендикулярной к оси, на расстоянии z_i от O . Пусть фокусирующая система представлена плоскостью линзы (x_L, y_L) , параллельной плоскости объекта. Любая точка p_i в плоскости объекта, лежащая на расстоянии r_0 от оси, отобразится, согласно теории параксиальных лучей, в определенной точке p , в плоскости изображения на расстоянии Γ от оси. Возможная траектория такого луча указана на рис. 3 сплошной линией. Эта траектория пересечет плоскость линзы в некоторой точке M на расстоянии r_L от оси.

Действительная траектория, по которой идет луч, выходящий из p , отличается от изображенной на рис.3 траектории PMP_i . Это различие зависит от того, насколько угол, образуемый PM с осью, больше, чем это допускается параксиальными условиями. Действительная траектория указана на рис.3 пунктирной линией. Она дает точку изображения p_i , лежащую на расстоянии r_i от оси. Смещение p_i по отношению к p_i представляет собой полную поперечную aberrацию $\Delta r_i = r'_i - r_i$. Значение Δr можно выразить в виде степенного ряда, содержащего члены до третьего порядка включительно:

$$\Delta r_i \rightarrow r_0, r_L; r_0^2, r_L^2, r_0, r_L; r_0^3, r_0^2 r_L, r_0, r_L^2, r_L^3 \text{ и т.д.}$$



Рис. 3. Ход лучей в соединительном устройстве, построенном на микролинзах

Если r_0 и r_L малы, то $r_i = r'_i$ и, следовательно, разность Δr_i не должна зависеть от первой степени r_0 и r_L . Благодаря цилиндрической симметрии обычных

систем линз aberrация не зависит от членов четного порядка.

Конечный поперечный размер объекта (ОВ) и расходящийся световой пучок могут быть рассмотрены с других позиций. При этом из-за конечного поперечного размера объекта (ОВ) – AB расходящийся из каждой точки на торце ОВ световой пучок 2α , отличный от параксиального, эквивалентен продольному расположению источников света вдоль главной оси оптической системы, что аналогично "размазыванию" источников света вдоль оси на отрезке CD (рис.4).

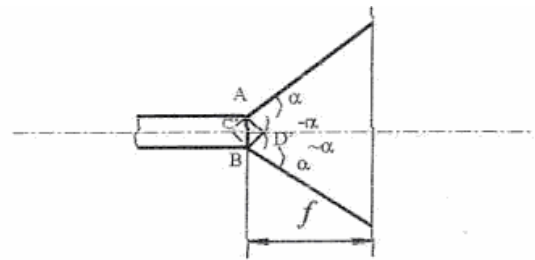


Рис. 4. Представление волокна как оптической системы с мнимым и действительным изображением

При такой трактовке часть источников света расположена между фокусом линзы и оптической системой и дает мнимое изображение, а часть источников света расположена за фокусом линзы и создает действительное изображение.

Сложность задачи состоит в том, что надо сфокусировать расходящийся световой пучок диаметром 50 мкм и одновременно удовлетворить условиям дальнейшего прохождения сигнала по ОВ без потерь. Это означает, что максимальный угол, с которым световой пучок поступает в выходное ОВ, должен быть не более чем значение $\arcsin(NA)$.

Таким образом, задача заключается в том, чтобы лучи, поступающие в выходное ОВ, не выходили за пределы радиуса световедущей жилы $r = 25$ мкм, и максимальный угол входа луча в выходе ОВ не превышал угол, определяемый числовой апертурой ОВ.

Если диаметр светового пучка при входе в выходное ОВ превышает диаметр сердцевины ОВ, будут оптические потери по пятну, а при превышении максимального угла входа луча в выходное ОВ значения $\arcsin(NA)$ – будут потери по углу. Фактически имеют место оба вида потерь.

При выбранном радиусе линзы R и показателе преломления n материала, из которого изготовлены линзы, имеют два параметра l и d , варьируя которые можно уменьшить ошибки изображения, вносимые оптической системой.

Рассмотрим оптическую систему с параметрами, выбранными оптимальными с точки зрения параксиального светового пучка и точечного источника света, при прослеживании хода лучей 1 и 2 в этой оптической системе получены точки B_1 и B_2 пересечения лучей 1 и 2 с плоскостью, проходящей через торцы выходного ОВ. Как показано на рис.1 "верхний" луч входит в ОВ ($BO_1 < r_{OB}$), в то время как "нижний" луч пересекает плоскость торца ОВ за пределами ОВ ($OB_2 > r_{OB}$) – отсюда видно, что максимальный размер светового пятна в плоскости торца выходного ОВ определяет

величина OB_2 , что обуславливает оптические потери по пятну.

При сдвиге торца входного ОБ вдоль главной оси оптической системы к входной линзе (в силу симметрии горца выходного ОБ к выходной линзе) расстояние OB_2 уменьшается на графике UB_2 , а расстояние OB_1 увеличивается на графике EB_1 .

Используя эту тенденцию, можно добиться при определении n и R выполнения следующих условий: $OB_1 \leq r_{OB}$, $OB_2 \leq r_{OB}$. Оба луча ("верхний" и "нижний") находятся в пределах сердцевины и диаметр светового пятна на торце выходного ОБ не будет превышать диаметр этой сердцевины (рис.5). Однако не при всех n и R можно добиться условия, чтобы диаметр светового пятна на торце выходного ОБ не превышал диаметр сердцевины, поэтому не при всех n и R можно найти то значение Δx (сдвига торца ОБ от оптимальных параметров с точки зрения паракисальности светового пучка и точечного источника света), при котором оба луча находятся в пределах сердцевины (рис.5).

При других n и R с изменением Δx расстояние OB_1 возрастает и при определенном Δx равно r_{OB} , в то время как расстояние OB_2 уменьшается, оставаясь больше, чем r_{OB} . Для этих значений n и R следует ожидать оптические потери по пятну, отличные от нуля.

Оптические потери по углу изменяются незначительно (рис.6). Их можно скомпенсировать варьированием расстоянием между входной и выходной линзами.

Зависимость оптических потерь от радиуса линзы при постоянном показателе преломления n приведены на рис.7.

Оказывается, что при заданном n существуют значения параметра R , при которых оптические потери равны нулю.

Так, например, для $n = 1,5$ оптические потери отсутствуют при радиусе линзы $R = 380$ мкм, а для $n = 1,7$ – при $R = 550$ мкм.

При отклонении от вышеуказанных значений R при заданных n оптические потери возрастают. При значениях R в интервале 100 – 500 мкм ($n = 1,5$) и в интервале 200 – 800 мкм ($n = 1,7$) оптические потери для рассматриваемой оптической системы не превышают 0,1 дБ.

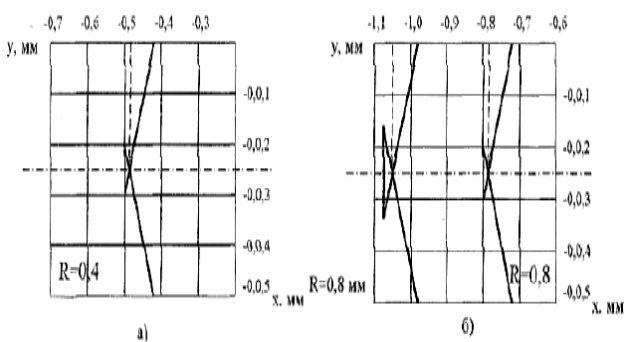


Рис. 5. Ход верхнего и нижнего лучей, при которых световое пятно не превышает сердцевину при радиусах линзы 0,4 мм (а), 0,6 и 0,8 мм (б)

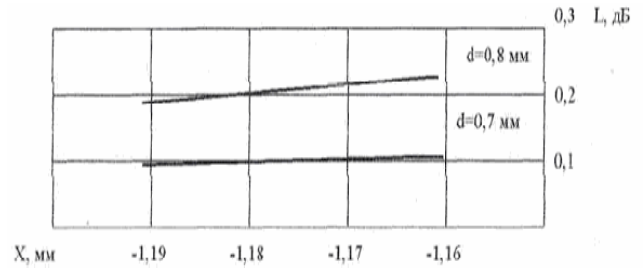


Рис. 6. Зависимость оптических потерь по углу от смещения при различных расстояниях между линзами

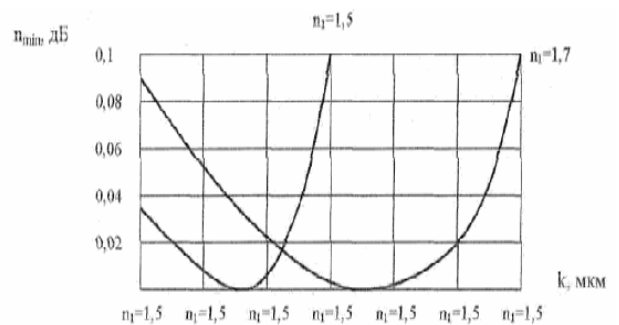


Рис. 7. Зависимость оптических потерь от радиуса линзы при различных показателях преломления

2 Закономерности параметров светового луча в пространстве между входной и выходной линзами в условиях минимальных оптических потерь

Рассмотрим некоторые закономерности параметров светового луча в пространстве между входной и выходной линзами в условиях минимальных оптических потерь, что соответствует оптимальным значениям l и d .

При фиксированном радиусе линзы R и числовой апертуре ОБ – NA с ростом показателя преломления радиус светового пучка в пространстве между линзами уменьшается (рис.8), а абсолютная величина угла выхода луча из входной линзы (или расходимость светового пучка) увеличивается (рис.9).

При радиусе линзы $R = 10$ мм расходимость пучка в пространстве между линзами лежит от 0,018 радиан ($n = 1,5$) до 0,021 радиан ($n = 1,9$).

Следовательно, для устойчивости оптической системы с минимальными потерями при соединении необходимы сферические линзы с большим радиусом ($R = 1000$ мкм) и малым показателем преломления ($n = 1,6$). Как было показано выше, сферические линзы с однородным показателем преломления более просты в изготовлении, обладают сферической симметрией, что упрощает монтаж, и имеют относительно небольшую оптическую толщину, положительно влияющую на устойчивость оптической системы. Это делает применение сферических линз наиболее желательным. Поэтому принято решение построить оптическую систему в первую очередь на их основе.

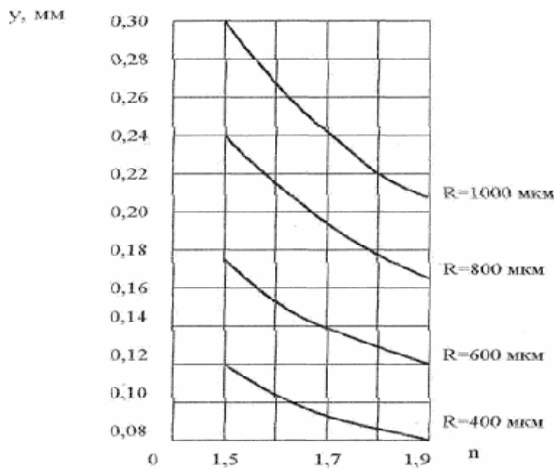


Рис. 8. Зависимость радиуса светового пятна от показателя преломления при различных радиусах линз

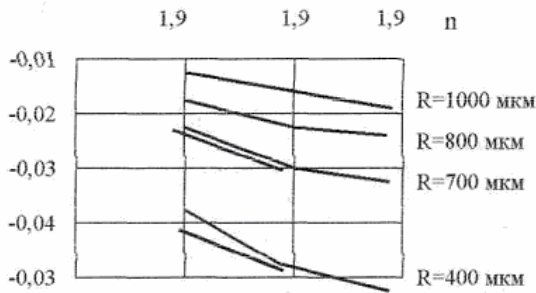


Рис. 9. Зависимость угла расходимости светового пучка от показателя преломления для линз с различными радиусами

Расчетным путем из условий оптической расходимости пучка и минимальных потерь за счет различных aberrаций определены:

- радиус линзы $R = 400$ мкм для стекла с показателем преломления $n = 1,5$;
- расстояние торец волокна – поверхность линзы $l = 182$ мкм (из условия минимальных потерь по пятну);
- расстояние между поверхностями линз в системе соединения $d = 300$ мкм (из условий минимальных потерь по углу).

К конструкции наконечника ОВ, оснащенного сферической линзой, предъявляются следующие требования:

- стеклянная сфера радиусом $R = 400$ мкм должна быть закреплена на торце наконечника ОВ на расстоянии торец – ОВ – поверхность шара, равном 182 мкм, при совпадении оси волокна с центром шара;
- размер линзовой оправы должен быть таким, чтобы контуры оправы или крепящих ее деталей не превышали размеров наконечника ОВ, имеющего диаметр 2,5 мм. Если этого не удастся достичь, то максимальный размер диаметра наконечника не должен превышать 3,8 мм;
- в креплении микролинзы должна быть предусмотрена возможность юстировки для точного совмещения оси волокна с центром шара, либо перед закреплением линзы в оправе на наконечнике, либо в процессе эксплуатации (в последнем случае узел

юстировки одновременно является креплением линзы на наконечнике).

Исходя из этих требований, разработано несколько вариантов линзового модуля (линза в оправе) [1].

Оправа–шайба. В этой конструкции оправы выполнена в форме шайбы, показанной на рис. 10 – 12.

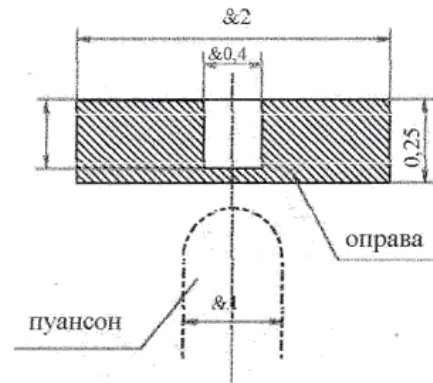


Рис. 10. Шайба для соединительного устройства, построенного на микролинзах

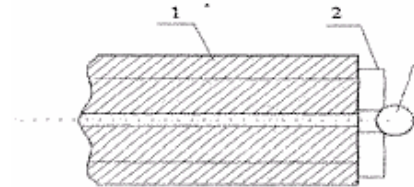


Рис. 11. Наконечник ОВ с шайбой 1 и микролинзой 2

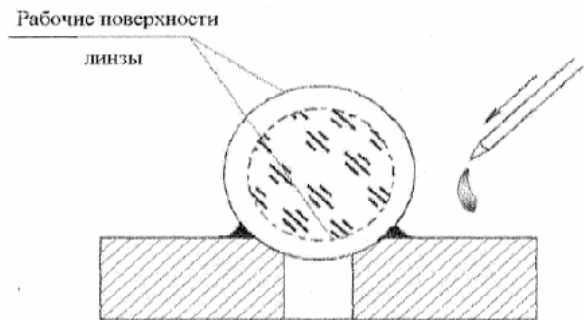


Рис. 12. Приклеивание микролинзы к оправе ОВ

Размеры шайбы не превышают диаметр наконечника ОК, который равен 2,5 мм, и допускают, возможность радиальной и осевой юстировки. Последняя обеспечивается "запасом" толщины шайбы (0,25 мм), которая выбрана с учетом одновременного выполнения гнезда под линзу и получения размера l с малой погрешностью (± 1 мкм) методом холодного прессования. Центральный канал полностью пропускает световое пятно, диаметр которого на линзе не менее 150 мкм. Шайба выполнена из ферромагнитного металла (имеющего возможность намагничивания) для облегчения юстировки линзы. На рис.11 показан наконечник ОВ – линза в оправе, состоящий из

собственно наконечника L , оправы 2, микролинзы 3 и собирающийся в следующем порядке:

- отбор сферических микролинз на отсутствие видимых дефектов снаружи (царапины, сколы и пр.), внутри (включения размером более 30 мкм) и на размер шара $R = 400 \text{ мкм} \pm 5 \text{ мкм}$ с помощью оптического микроскопа, имеющего увеличение 100...200 раз;

- приклеивание линзы к оправе эпоксидной смолой или клеем при горизонтальном положении оправы под микроскопом (рис.12), Основное внимание при выполнении этой операции требуется при дозировке капельки клея, которая подносится на кончике иглы к микролинзе. Количество клея или смолы должно быть достаточным, чтобы обеспечить прочность соединения, удержание клея в узкой конической плоскости силами поверхностного натяжения и исключение затекания клея на рабочие поверхности микролинзы;

- установка оправы на торец наконечника и радиальная юстировка ее по ОВ. Юстировка состоит в поперечных перемещениях оправы по торцу наконечника и выборе положения, соответствующего коаксиальности световых пятен от двух пучков: лазер–волокно–экран и лазер–волокно–линза–экран. На экране нанесена координатная сетка. Оправа на торце наконечника при юстировке удерживается за счет магнитного притяжения;

- приклеивание оправы к торцу наконечника производится после окончания юстировки.

Измерение потерь в такой системе, а также проверка прочности клеевого соединения модуль–наконечник выявили следующие недостатки:

- имеется возможность затекания клея или эпоксидной смолы на торец ОВ или на поверхность сферы, обращенную к торцу волокна, что увеличивает неконтролируемые потери;

- прочность клеевого соединения не обеспечивает надежное крепление линзы в оправе и модуля на торце наконечника;

- микролинза оказывается обращенной наружу и незащищенной от ударов, контактов с твердыми поверхностями.

От этих недостатков свободен "безклеевой" вариант линзового модуля [1].

На рис.13 показана конструкция "безклеевой" механического крепления микролинзы к наконечнику, линза 4 находится в двойной оправе, состоящей из шайбы 3 и гильзы 2, надетой на наконечник ОК 1. В данной конструкции шайба 3 выполняет ту же функцию, как и в первом варианте, фиксируя поверхность шара на расстоянии от торца волокна. Но она является "плавающей". Ось ОВ с центром шара совмещается с помощью гильзы 2.

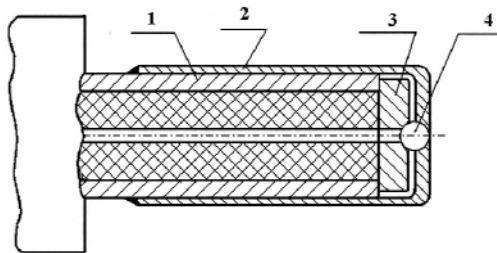


Рис. 13. Безклеевое соединительное устройство с микролинзой

Центровка микролинзы относительно оси волокна является жесткой и осуществляется за счет плотной посадки гильзы на наконечник, наружная поверхность которого предварительно уже отъюстирована относительно оси световолокна.

Микролинза в данной конструкции защищена от внешних воздействий, не нужны клеи и эпоксидные смолы, и отпадают связанные с этим потери от затекания их на торец волокна и поверхность микролинзы. С другой стороны, качество жесткой юстировки в этой конструкции полностью зависит от точности изготовления линзы, соосности гнезда и внутренней цилиндрической поверхности гильзы, а также соосности посадочной поверхности ВОК диаметром 2,5 мм и оси ОВ.

Полученные в данной конструкции потери оказываются недопустимо высокими. Однако указать их точную причину (френелевские потери при переходе границ раздела, поглощение в материале линзы или несовпадение оси волокна и центра шара) невозможно из-за непрямого юстирования линзы по ОВ. Кроме того, передача усилий на "плавающую" оправу через контакт гильзы с микролинзой нежелательна, так как при этом не исключается возможность повреждения последней.

3 Оправа микролинзы типа "гнездо"

Рассмотрение как положительных, так и отрицательных сторон предыдущих вариантов показывает, что необходимо сочетать в конструкции модуля соединителя точность установки микролинзы как по оси ОВ так и относительно его торца. Этого можно достичь, если "плавающая" оправа будет закреплена на торце наконечника ОВ, после юстировки ее по оси ОВ. Если разделить и сделать независимыми друг от друга операции крепления оправы на торце и крепления микролинзы в оправе и, наконец, если отказаться от склеивания и перейти к механическому креплению как оправы на торце, так и микролинз в оправе.

Такие требования удается одновременно удовлетворить в оправе типа "гнездо", показанной на рис.14. Оправа представляет собой шайбу диаметром 2,3 мм и толщиной 1,13 мм, с каналом по центру для прохода светового пучка и гнездом для микролинзы, которая фиксируется в нем стопорным разрезным пружинным кольцом. Расстояние $l = 0,182 \text{ мм}$ между линзой и торцом волокна по технологии холодного "допрессования" шарового гнезда обеспечивается с допусками $\pm 0,002 \text{ мм}$. Сферическая линза диаметром $0,800 \pm 0,005 \text{ мм}$ свободно помещается в гнездо диаметром $0,9 \pm 0,02 \text{ мм}$ и жестко фиксируется в нем постоянным усилием трения пружинного кольца в стенке гнезда.

Таким образом, линза оказывается закрытой в оправе, защищенной со всех сторон, и открытой только по двум цилиндрическим каналам вдоль оси оправы для входа светового пучка диаметром до 0,5 мм и выхода диаметром до 0,4 мм. Появляется возможность юстирования микролинзы в оправе относительно оси ОВ с последующим закреплением модуля на торце наконечника ОВ точечной сваркой.

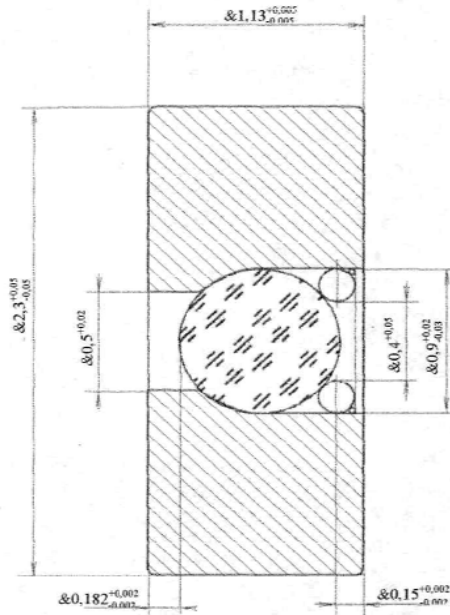


Рис. 14. Оправа микролинзы типа "гнездо"

Кроме отмеченного преимущества такая конструкция позволяет осуществить в будущем снижение френелевских потерь на поверхностях перехода из одной среды в другую методами "просветления оптики" или иммерсии, дополнительной возможностью такого модуля является, также компенсация "воздушной линзы".

Конструкция наконечника ОВ, оснащенного сферической микролинзой в оправе типа "гнездо", показана на рис.14. Она состоит из следующих деталей: 1 – оправа микролинзы; 2 – микролинза; 3 – стопорное пружинное кольцо.

УДК 65.001

МОДЕЛЬ ВЫБОРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОФИСА ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЕКТАМИ

Д.т.н. Л.И. Нефёдов¹, д.т.н. В.Е. Овчаренко², к.т.н. Ю.А. Петренко¹, к.т.н. Т.В. Плугина¹, В.А. Щеголь³

1. Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
2. Государственное предприятие Научно-исследовательский технологический институт приборостроения, г. Харьков
3. Государственное предприятие "Производственное объединение "Южный машиностроительный завод", г. Днепропетровск

В статье рассматривается задача выбора программного обеспечения офиса по управлению проектами. Рассмотрены бизнес-процессы офиса по управлению проектами. Предлагается математическая модель выбора комплекса программных средств с учетом требований бизнес-процессов.

In clause the task of a choice of the software of office on management of the projects is considered. The business - processes of office on management of the projects are considered. The mathematical model of a choice of a complex of software is offered in view of the requirements of business - processes.

После юстировки по ОВ оправа микролинзы приваривается точечной лазерной сваркой к торцу наконечника. Наконечник, оснащенный микролинзой, может без каких-либо дополнительных изменений быть использован в штатном разьеме типа "гнездо".

Выводы

Теоретические и экспериментальные исследования принципов построения соединительного устройства на сферических микролинзах показали, что расширение пучка в межлинзовом пространстве до 0,4 – 1,0 мм, снижая требуемый допуск на поперечное смещение, обуславливает необходимость прецизионной юстировки пучка света на торце входного конца волокна по пятну и по углу, что существенно усложняет конструктивно-технологическую реализацию соединительного устройства на микролинзах. Для построения экономичных, качественных, удобных в эксплуатации оптических соединительных устройств на микролинзах, необходима разработка в ближайшем будущем принципиально-новых конструктивно-технологических решений, которые позволят свести к минимуму вносимые в оптические каналы связи соединителями потери, существенно упростить конструкцию, повысить надёжность соединителей на микролинзах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Джаллорензи Т.Г. Исследования и техника систем оптической связи: Волоконная оптика //ТИИЭР. – 1998. – т. 66. – № 7. – с. 29–72.
2. Вейнберг В.Б., Саттаров Д.К. Оптика световодов. – С-Пб.: Машиностроение, 1997. – 319 с.
3. Адамс М. Введение в теорию оптических волноводов / Пер. с англ под ред. И.Н.Сисаяна. – М.: ФЕНИКС, 2000. – 512с.
5. Волоконная оптика и приборостроение /М.М.Бутусов, С.Л.Галкин, С.П.Оробинский, Б.П.Пал. – С-Пб.: Машиностроение, 1997. – 327 с.

Постановка проблемы и анализ публикаций.

Офису по управлению проектами необходимо обрабатывать динамичную информацию на каждом этапе отдельного проекта. Эти этапы определяют бизнес-процессы офиса, каждый из которых подразделяется на бизнес-процедуры. Бизнес-процедуры - группа процессов с четкими зависимостями, которые выполняются в одной и той же последовательности в каждом проекте, и определяют бизнес-операции офиса.

Проведенный анализ литературы [1-5] показал, что на сегодняшний день не уделяется достаточного внимания научному обоснованию выбора программно-технического обеспечения для автоматизации бизнес-процессов, бизнес-процедур и бизнес-операций офиса по