

## Расчет эффективности ввода оптического излучения DFB- и VCSEL-лазеров в стеклянный интегрально-оптический волновод

*Н.Д. Никифоров, М.М. Векишин*

*Кубанский государственный университет, Краснодар*

**Аннотация:** С использованием метода трассировки лучей произведен расчет эффективности ввода оптического излучения от полупроводниковых лазеров различных типов в интегрально-оптический ионообменный заглубленный волновод в стекле посредством оптических схем на основе линз сферической, полуцилиндрической и полусферической формы. Волновод изготовлен в стекле К-8 методом ионного обмена. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют о низкой эффективности ввода оптического излучения при использовании одиночных линз. Использование пары микролинз (коллимирующей и фокусирующей) позволяет значительно увеличить эффективность оптической связи. Расчетная эффективность стыковки VCSEL-лазера и интегрально-оптического волновода, связанных посредством пары полусферических микролинз, составила 79%. Эффективность ввода ограничена достаточной низкой апертурой самого стеклянного одномодового волновода – 0,12.

**Ключевые слова:** интегральная оптика, оптические волноводы, ионный обмен в стекле, VCSEL-лазер, метод трассировки лучей, ZEMAX

Разработка оптических схем – аналогов электронных микросхем, в которых передача информации и функции ее обработки осуществляются на оптическом уровне, является перспективным направлением развития. Благодаря изученным свойствам световой волны элементы интегральной оптики нашли широкое применение в современных системах волоконно-оптической связи. На их основе возможно создание высокочувствительных сенсоров различных физических величин и химико-биологических компонентов и процессов. Разработка и внедрение технологий производства интегрально-оптических схем имеет большое значение, как часть программы по модернизации оптического производства в России [1].

Вопрос эффективности ввода оптического излучения от передающего устройства в принимающее является одним из важнейших вопросов интегральной оптики. Эффективность стыковки волновода и источника определяется прежде всего конфигурацией оптической системы, через

которую проходит световой поток. Кроме того, важную роль играют параметры источника и передатчика оптического излучения. Согласование всех составляющих оптической системы позволяет достигать приемлемых результатов при моделировании оптической связи. Одним из наиболее распространенных способов согласования источника (приемника) со световодом служат сферические линзы. При линзовой системе нужна весьма точная фокусировка на торец волновода, т.к. даже незначительное смещение луча относительно выходного торца резко уменьшает эффективность ввода излучения [2].

Цель работы заключается в проведении моделирования ввода оптического излучения от DFB и VCSEL лазеров в ионообменный заглабленный интегрально-оптический волновод в стекле [3].

Для корректного расчета системы, состоящей из лазера, линзы и интегрально-оптического волновода, был использован метод двухуровневой трассировки лучей, доработанный с учетом волновых свойств светового потока.

Классический метод трассировки лучей опирается на законы геометрической оптики. К достоинствам данного метода относят достаточную реалистичность воссозданных объектов и способность реализации в компьютерных программах, что существенно упрощает расчеты в самых различных областях. Обычные системы оптического моделирования, основанные на трассировке лучей света для расчета выходных световых величин, работают с макрообъектами геометрии, что делает невозможным учет сложных физических эффектов. Для корректного расчета сложных оптических структур требуется расширить метод трассировки лучей, адаптировать его для работы с законами волновой оптики. Эффективно интегрировать специальные методы моделирования сложных оптических эффектов в базовые системы оптического

---

моделирования, основанные на трассировке лучей, позволяет двухуровневая трассировка лучей [4].

Метод трассировки луча и его расширение с учетом законов волной оптики нашел свое применение в инженерном программном обеспечении, используемом для моделирования оптических систем различной сложности. Одним из примеров таких программ является ZEMAX [5]. Расчет проводился в режиме физической оптики, что позволило рассмотреть световой поток не только с геометрической точки зрения, но и с волновой коррекцией метода трассировки луча, что позволяет получить максимально достоверные результаты моделирования [6]. Эффективность стыковки источника излучения и интегрально-оптического волновода была рассчитана для следующих оптических систем, состоящих из:

- 1) DFB-лазера, волновода и расположенной между ними полуцилиндрической линзы (первая схема) и пары полуцилиндрических линз (вторая схема);
- 2) VCSEL- лазера, волновода и расположенной между ними сферической линзы и (первая схема) и пары полусферических линз (вторая схема).

В качестве приемника использовался интегрально-оптический волновод, изготовленный двухэтапным методом термического ионного обмена  $Ag^+Na^+$  стекле К8 с последующим заглаблением волноводного канала [3]. Выбор компонентов для моделирования оптической системы не является случайным. Построение систем стыковки с использованием цилиндрических и сферических линз является одним из наиболее часто используемых способов для уменьшения потерь при вводе оптического излучения в интегрально-оптическую схему (см. рис. 1). Подобные схемы стыковки находят свое применение для создания интегрально-оптических схем для систем телекоммуникаций.

---

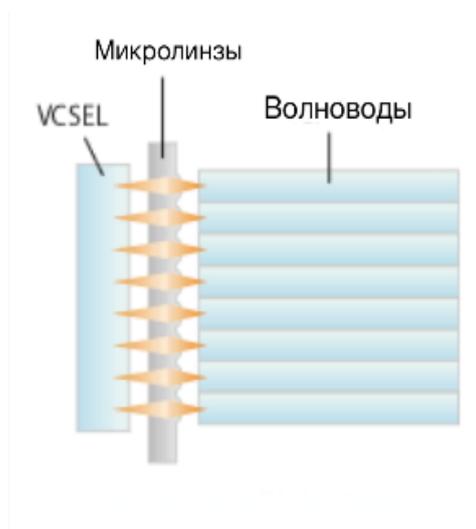


Рис. 1. – Схема стыковки VCSEL-лазеров с линейкой интегрально-оптических волноводов

Одними из наиболее широко распространенных устройств, использующих рассматриваемый принцип стыковки источника и приемника излучения, являются оптические трансиверы.

Популярным выбором для различных применений стали лазеры с распределенной обратной связью (DFB-лазеры). Данный тип лазеров отличается высокой температурной стабильностью частоты генерации [7].

Выбор VCSEL – лазера в качестве источника излучения обусловлен его широким применением в современных системах для высокоскоростной передачи данных по причине малой угловой расходимости, т.е. низкой апертуры, симметричной диаграмме направленности выходного оптического излучения, а также температурной стабильности [8]. В последние годы полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры находят все более широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа (например, оптических манипуляторах типа «мышь»), а также высокопроизводительных компьютерных системах [9].

В первую очередь был произведен расчет ввода оптического излучения от DFB-лазера в волновод с использованием полуцилиндрической линзы (см. рис. 2).

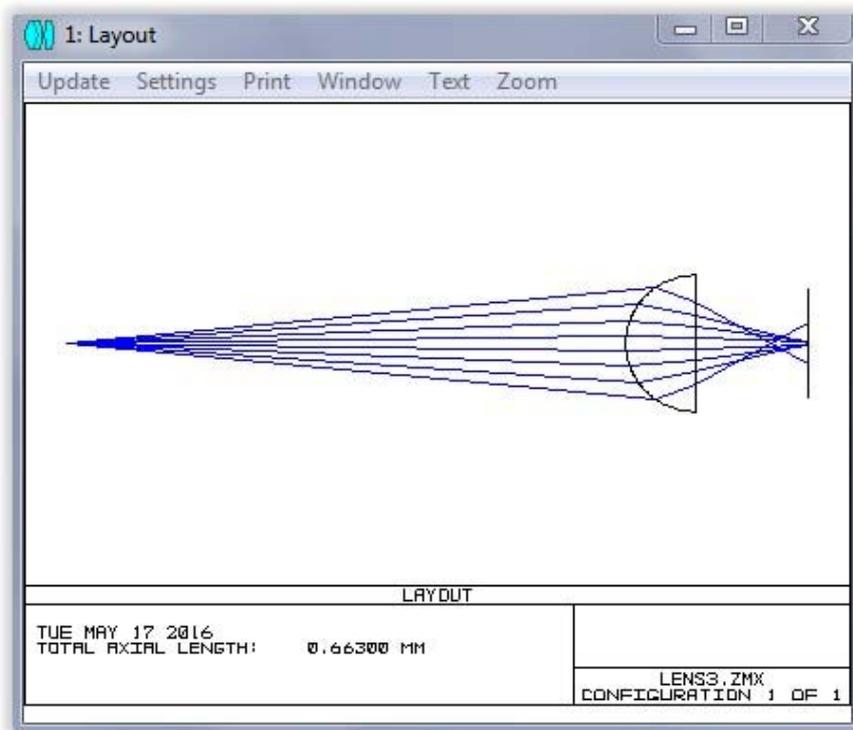


Рис. 2. – Схема стыковки источника и приемника с использованием полуцилиндрической линзы

Параметры линзы:

- Радиус кривизны – 62.5 мкм
- Диаметр – 125 мкм
- Показатель преломления – 1.5

Здесь и далее используется излучение с длиной волны 1310 нм, для DFB лазера в вертикальной плоскости (в горизонтальной плоскости угловой расходимостью можно пренебречь) задана угловая расходимость  $23^{\circ}$  ( $NA=0.4$ ), а для VCSEL -  $5.4^{\circ}$  ( $NA=0.1$ ) в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Для расчетов использовался интегрально-оптический волновод со следующими параметрами.

Таблица № 1

Расчетные параметры оптического волновода

Интегрально-оптический волновод	
Материал подложки	Стекло К-8 ( $n = 1.5168$ )
Числовая апертура	0.12
Эффективный диаметр канала	8 мкм

С помощью режима физической оптики ПО Zemax при моделировании стыковки волновода с DFB-лазером через полуцилиндрическую линзу на длине волны 1.3 мкм эффективность оптической связи составила 6%.

Для расчетов с использованием VCSEL-лазера рассматриваются линзы сферической и полусферической формы. Это продиктовано тем, что в данном типе лазеров излучение расходится в горизонтальной и вертикальной плоскости. Параметры линз приняты такие же, как и у цилиндрических линз. Длина волны для всех дальнейших расчетов – 1.3 мкм.

Расчетный показатель эффективности стыковки для VCSEL-лазера составил 40% при использовании одиночной сферической линзы.

При использовании одиночной линзы сферической формы (или цилиндрической линзы для DFB-лазера), в системе наблюдается усиление влияния оптических aberrаций, механизм появления которых показан на рис. 3.

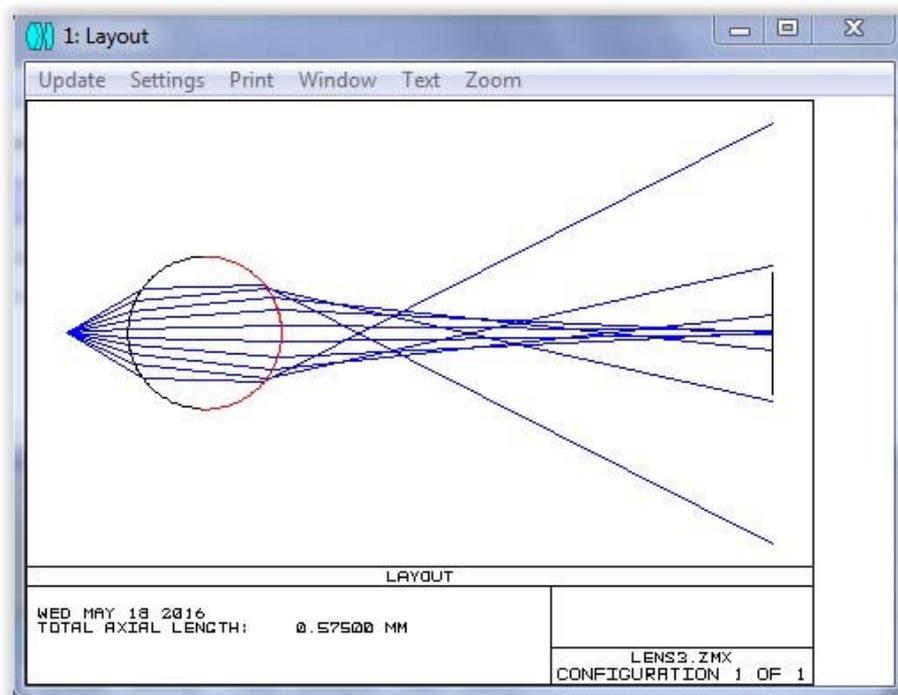


Рис. 3. – Картина оптических aberrаций

Сферическая aberrация системы линз объясняется тем, что её преломляющие поверхности встречают отдельные лучи широкого пучка под различными углами. Вследствие чего более удалённые от оптической оси лучи преломляются сильнее, нежели нулевые лучи, и образуют свои точки схода, удалённые от фокальной плоскости [10]. Поэтому при использовании одиночных сферической (для VCSEL-лазера) или цилиндрической (для DFB-лазера) линзы в плоскости изображения наблюдается не точка, а круг с броским ядром и ослабевающим по яркости ореолом.

Далее был произведен расчет ввода оптического излучения в волновод посредством оптической схемы с использованием двух полуцилиндрических (для DFB-лазера) линз и двух полусферических линз (для VCSEL), см. рис.4. Характеристики использованных коммерчески доступных микролинз фирмы SUSS MicroOptics (Швейцария) приведены ниже.

Таблица № 2

Параметры оптических микролинз

Массив микролинз, [SUSS MicroOptics SMO399920]	
Материал подложки	Кварцевое стекло (n = 1.4585)
Толщина подложки	0.9 мм
Диаметр линзы	240 мкм
Радиус кривизны	330 мкм
Коническая постоянная	0
Числовая апертура	0.17
Шаг (расстояние между линзами в массиве)	250 мкм

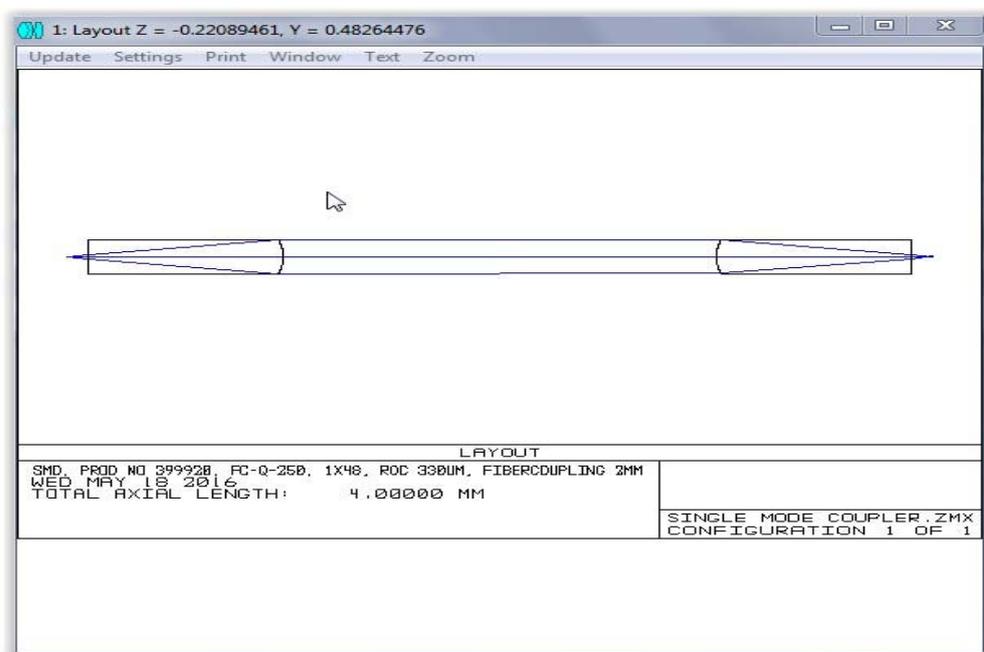


Рис. 4 – Смоделированная оптическая система с использованием двух микролинз

Текущая схема существенно улучшила результаты, зафиксированные при стыковке ОВ с источником излучения с использованием одиночной линзы. Показатель эффективности оптической связи, полученный при использовании в качестве источника VCSEL-лазера, составил 79% против 40% в случае использования одиночной сферической линзы. Картина полученного фокального пятна можно наблюдать на рис. 5.

При использовании в качестве источника излучения DFB-лазера расчетное значение эффективности стыковки с применением пары полуцилиндрических линз составило 37%.

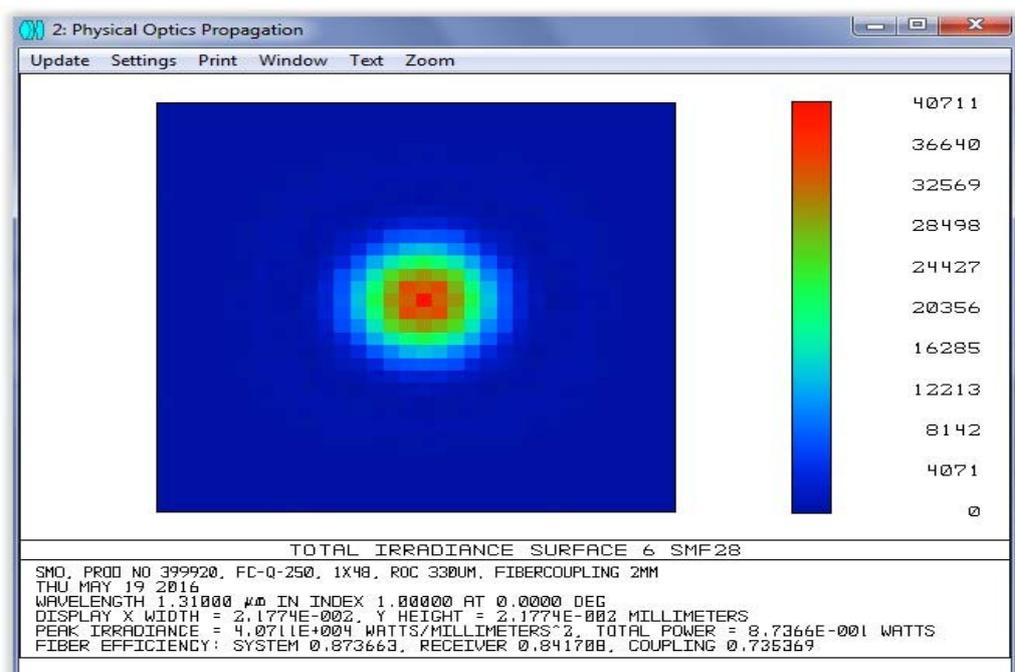


Рис. 5 – Картина фокального пятна

Таким образом, средствами режима «Физической оптики» ПО Zemax, использующего алгоритм двухуровневой трассировки лучей с волновой коррекцией, произведен расчет эффективности ввода оптического излучения от DFB-лазера в интегрально-оптический стеклянный заглабленный ионообменный волновод в стекле посредством цилиндрической линзы, пары

полуцилиндрических линз, а также от VCSEL-лазера в аналогичный волновод, но с использованием одиночной сферической микролинзы и пары полусферических микролинз.

В результате моделирования получен высокий показатель оптической связи для системы, состоящей из VCSEL – лазера, пары полусферических линз в качестве системы стыковки, и интегрально-оптического ионообменного волновода в стекле.

### Литература

1. Петров С.Н. Современное оптическое производство и некоторые тенденции его развития // Инженерный вестник Дона, 2009, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2009/141](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2009/141).

2. Бутусов М.М. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение, 1987. 328 с.

3. Векшин М.М., Никитин В.А. Физико-математическое моделирование многоэтапных процессов формирования одномодовых интегрально-оптических волноводов в стекле К-8 методом ионного обмена // Инженерный вестник Дона. 2016. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3818](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3818)

4. Волобой А.Г., Галактионов В.А., Жданов Д.Д. Технология оптических элементов в компьютерном моделировании оптико-электронных приборов // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2011. № 6. С. 46-56.

5. Leading Optical and Illumination Design Software – Zemax. URL: [zemax.com](http://zemax.com).

6. Exploring physical optics propagation in OpticStudio. URL: [customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-physical-optics-propagation-in-opticstudio](http://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-physical-optics-propagation-in-opticstudio).

7. Kaminow I. Optical fiber telecommunications components, components, IVA-A. Academic Press, 2002. 876 p.



8. Michalzik R. VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Springer, 2013. 560 p.

9. Szweda R. VCSEL applications diversify as technology matures // III-Vs Review. 2006. Vol.19. pp. 34-38.

10. Веденов А.Н. Малоформатная фотография. Л.: Лениздат, 1959. 675 с.

### References

1. Petrov S.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus). 2009. №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2009/141](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2009/141).

2. Butusov M.M. Volokonnaya optika i priborostroenie [Fiber optics and instrument making] . L.: Mashinostroenie, 1987. 328 p.

3. Vekshin M.M., Nikitin V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3818](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3818)

4. Voloboy A.G., Galaktionov V.A, Zhdanov D.D. Informazionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve. 2011. № 6. pp. 46-56.

5. Leading Optical and Illumination Design Software – Zemax. URL: [zemax.com](http://zemax.com).

6. Exploring physical optics propagation in OpticStudio. URL: [customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-physical-optics-propagation-in-opticstudio](http://customers.zemax.com/os/resources/learn/knowledgebase/exploring-physical-optics-propagation-in-opticstudio).

7. Kaminow I. Optical fiber telecommunications components, components, IVA-A. Academic Press, 2002. 876 p.

11. Michalzik R. VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Springer, 2013. 560 p.

12. Szweda R. III-Vs Review. 2006. Vol.19, pp. 34-38.

13. Vedenov A.N. Maloformatnaya fotografiya [Small-size photography]. L.: Lenizdat, 1959. 675 p.