



является максимальным среди всех типов лазеров. Однако показатели качества луча ограничивают применение диодных лазеров, оставляя для них открытыми лишь некоторые специальные области.

Эффективность преобразования электроэнергии в энергию светового излучения зависит от толщины слоев полупроводникового материала. Для высокоэффективных диодов, которые используются в диодных лазерах, полная высота активной зоны диода не превышает одного микрометра; в то время как по горизонтали длина диода составляет от 50 до 500 мкм, в зависимости от конструкции лазера. Такая конструкция обеспечивает генерацию луча с эллиптическим поперечным сечением, с разным значением угла расходимости для осей плоскости распространения («быстрая» и «медленная» оси) [1]. Объединение отдельных излучателей в линейки и далее в каскады («стаки») – приводит к дополнительным сложностям в рассматриваемом вопросе. С одной стороны, образуется множество отдельных лучей асимметричного качества. Их необходимо свести вместе в один луч с симметричным сечением. Одно из решений данной проблемы кроется в использовании энергии диодных лучей для формирования нового луча с более высоким качеством.

**Особенности конструкции.** Для создания лазера прямого излучения на базе линеек лазерных диодов требуется система коллимации, преобразования и фокусировки лучей с возможностью ввода излучения в оптическое волокно. Анализ развития для системы диодных модулей удобно начать с рассмотрения вариантов оптической системы одиночного лазерного диода. Эволюцию развития данных систем можно проследить в статье [2], где рассматриваются одиночные линзы (по сути одиночные коллиматоры), а в качестве критерия выступает коэффициент ввода  $\eta$ , который определяется отношением мощности, попавшей в ведущую моду, к падающей мощности. Из представленных решений наибольшее распространение получила система из асферической линзы. Её главным преимуществом является налаженное производство в сочетании с отработанными технологиями подготовки поверхности и нанесения покрытий под поставленную задачу. Методика расчета достаточно быстрая: необходимо знать лишь угол расхождения входного пучка («быстрая» ось) и требуемый диаметр пучка после линзы.

Однако даже для одиночного диода во многих задачах помимо линзы–коллиматора становятся необходимы линзы фокусировки и так называемые системы преобразования пучка (beam shaper). Данные системы преобразуют входной пучок в пучок равномерной интенсивности любой формы и размера, по возможности компенсировав аберрации. Часто это достигается с помощью ци-

линдрической линзы или системы призм для компенсации разности распространения световых волн между быстрой и медленной осями. Еще одной частью оптической системы является коллиматор медленной оси. Он важен для сохранения яркости (количество энергии на единичный частотный интервал, излучаемой в единицу времени с единицы поверхности в единицу телесного угла). Подобно системе преобразования пучка, данный коллиматор часто представляет собой одну или несколько цилиндрических линз (для линеек и решеток лазерных диодов).

Таким образом, в общем виде оптическая система пучка лазерных диодов состоит из следующих частей: коллиматор быстрой оси (FAC), преобразователь пучка, коллиматор медленной оси (SAC) и фокусирующая линза. Для обеспечения надежности при эксплуатации и уменьшения количества составляющих прибегают к методам совмещения нескольких модулей в одном компоненте оптической системы. В качестве простого примера можно привести систему двух шариковых линз для ввода излучения одиночного диода в одномодовое волокно (достигнут коэффициент ввода около 75 %) [3]. Для систем диодных модулей используют похожие методы. Первым шагом являлось совмещение многих линз на одной подложке. К примеру, коллиматор медленной оси (SAC) чаще всего представляет собой монолитную решетку цилиндрических линз, предназначенных для коллимации отдельных излучателей модуля. Коллиматор быстрой оси (FAC) выполняется в виде одной цилиндрической линзы, часто прилегающей почти вплотную. Использование двух элементов позволяет управлять пучком от нескольких диодных излучателей как единым лучом. Для фокусировки используется асферическая линза. Развитием этой идеи являются примеры совмещения компонентов оптической системы или их объединение в монолитную линзовую систему управления излучением диодных модулей [4].

**Построение моделей.** В работе представлены результаты расчета и моделирования для линейки лазерных диодов для двух случаев. Система включает в себя два коллиматора и фокусирующую линзу. Главная разница заключается в форме первой коллимирующей линзы. Для моделирования применялся пакет программ ZEMAX [5].

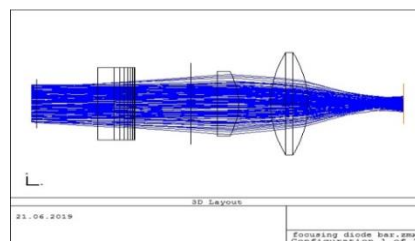


Рисунок 1 – Моделирование хода излучения линейки лазерных диодов для системы с биконической линзой

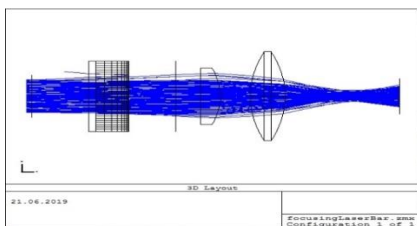


Рисунок 2 – Моделирование хода излучения линейки лазерных диодов для системы с тороидальной линзой

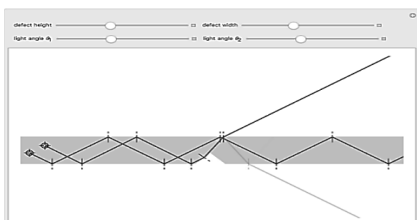


Рисунок 3 – Модель распространения двух лучей в оптическом волокне при механическом дефекте треугольной формы

На «рис. 1» и «рис. 2» показаны две системы ввода излучения в оптическое волокно. Несмотря на прогресс в области оптики полупроводниковых лазеров, более надежным является использование специализированных коннекторов вместо линзовых систем (например, SMA-905).

При разработке диодного лазера прямого излучения необходимо анализировать возможные дефекты оптического волокна [6]. Модель рассматривает распространение света при полном внутреннем отражении, когда внешняя среда

имеет более низкий показатель преломления, чем сердцевина. Однако свет все еще может преломляться через границу, если угол между светом и границей больше критического угла. Оптические волокна обычно покрыты другим материалом для увеличения критического угла и защиты сердцевины. Пример моделирования распространения лучей в сердцевине волокна показан на «рис. 3».

**Выводы.** В работе представлены результаты использования моделей для выяснения нюансов конструирования диодного лазера. Проанализированы линзовые системы коллимации и фокусировки излучения. для последующего его ввода в волокно. Также уделено внимание анализу возможных дефектов оптических волокон и их влиянию на распространение излучения.

#### Литература

1. Брокман Р. Диодные лазеры – экономическое чудо // Фотоника. – 2009. – № 4. – С. 8–11.
2. Андриевский А., Андриевский В.Ф. Лазерные диодные модули: ввод излучения в волокно и фиксация деталей модулей // Фотоника. – 2017. – № 3. – С. 74–79.
3. Fadhali M., Zainal J., Munajat Y. etc. Coupling and Attachment of Single Mode Fiber into Laser Diode Transmitter // Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications. – 2008. – V. 2. – №. 4. – pp. 183–188.
4. Mitra T., Bagschik K., Kalkusinski A. Monolithic Fiber Coupler for High Power Diode Laser Bars // Proc. of SPIE. – 2017. – V. 10090. – № 10090X–2.
5. Geary, J.M. Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples. Published by Willmann–Bell, Inc., 2002. – 464 p.
6. Powers J.P. An Introduction to Fiber Optic Systems. – Irwin Professional Publishing, 1996. – 340 p.

УДК 577.345:615.831

### РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРОМ ДЛЯ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ПОВЕРХНОСТИ ЖИВЫХ ТКАНЕЙ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 405 НМ

Вяжевич Г.И.<sup>1,2</sup>, Фёдорцев Р.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Научно-технический центр «ЛЭМТ» БелОМО  
Минск, Республика Беларусь

Фототерапия как один из видов лечения пациентов предусматривает дозированное воздействие солнечного света, или света с определенными длинами волн от искусственных источников, таких, как лазеры, светоизлучающие диоды, флуоресцентные лампы, дихроичные лампы, или же очень яркого света, имеющего полный спектр дневного света, в течение определённого, предписанного врачом, времени, а иногда также и в строго определённое время суток.

Фотодинамическая терапия (ФДТ) является результатом комбинированного действия трех компонентов – фотосенсибилизатора (ФС), света и кислорода. ФДТ представляет собой двухступенчатый процесс: фотосенсибилизирующий

препарат применяется местно или системно, после чего производится облучение светом соответствующей длины волны. При фотодинамической терапии наиболее часто используются порфирины в сочетании с красным светом (600–700 нм), а также сенсибилизаторы – фталоцианины, хлорофины, пурпурины, порфины, различные красители, обладающие фотодинамическими свойствами, сочетания красителей и наночастиц и другие [1].

Многочисленные экспериментальные исследования показали высокую эффективность воздействия ультрафиолетового излучения на участки кожи при заболеваниях волчанки, вызываемой микобактерией туберкулеза, сепсисом, злокачественные раковые опухоли и пр. [1].