

---

---

# СВОЙСТВА ОПТИЧЕСКИХ И ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

---

---

УДК 535.212

А. Б. ВЕСЕЛОВСКИЙ, П. И. ГУЗАЛОВ, В. В. КИРЬЯНОВА, А. С. МИТРОФАНОВ,  
Г. Д. ФЕФИЛОВ, В. Ю. ХРАМОВ

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЕТОДИОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ФОТОХРОМОТЕРАПИИ

Рассматривается современный подход к выбору светодиодных источников излучения, применяемых в фотохромотерапии. Приведены результаты исследований энергетических и пространственных характеристик светодиодных излучателей. Представлено описание разработанного физиотерапевтического аппарата.

*Ключевые слова:* излучение, светодиод, мощность излучения, облученность, фотохромотерапия.

Современные медико-технические требования к аппаратуре, используемой в фотохромотерапии, весьма обширны и сопряжены с выбором источников излучения; построением алгоритма работы аппаратуры, включающего анализ и выбор режимов и параметров ее функционирования; тщательной конструкторской проработкой схемно-технического решения и программного обеспечения, не говоря уже о вопросах надежности, безопасности, стоимости и т.п.

Один из важнейших параметров излучателей, используемых в фотохромотерапии, — мощность оптического излучения, применяемого при облучении. Основной проблемой при этом является повышение мощности излучения при уменьшении (или сохранении на низком уровне) потребляемой мощности и нагревания излучателя. Эти требования находятся в определенном противоречии, так как для увеличения мощности светового излучения необходимо потребление дополнительной электрической мощности, что неизбежно приводит к уменьшению КПД светодиода, т.е. к росту безызлучательных (тепловых) процессов [1, 2]. Решить данную проблему помогают современные технологии изготовления излучателей, а именно светодиодов. Задача разработчиков аппаратуры для фотохромотерапии — грамотно оценить характеристики излучателей и выбрать необходимый тип, что и является предметом исследования в настоящей статье.

Анализ энергетических характеристик современных светодиодов разных фирм-изготовителей (“Kingbright”, Тайвань, “Arlight”, Турция, “Cree”, США) показал, что мощность излучения ( $P$ ) сильно зависит от тока инжекции ( $I$ ). Типичная зависимость  $P(I)$ , полученная в результате экспериментальных исследований для синего светодиода (фирмы “Arlight”), приведена на рис. 1.

Как видно из графика, в области номинального тока 20 мА зависимость носит практически линейный характер и в первом приближении может быть описана функцией

$$P(I) = k I,$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от типа светодиода.

При увеличении тока инжекции до 60—80 мА наблюдается эффект насыщения, который в полной мере проявляется при  $I > 90$  мА. Поэтому повысить мощность светового излучения за счет увеличения тока инжекции можно лишь в некоторых случаях. При этом необходимо учитывать разогрев  $p$ — $n$ -перехода и кристалла в целом, что ведет к снижению квантового выхода и уменьшению срока службы светодиода [1]. Кроме того, в фотохромотерапии наличие тепла при проведении процедуры облучения часто бывает недопустимым, например, при термических ожогах, онкологических заболеваниях и т.п. По данным работы [1] при номинальных токах порядка 20 мА температура  $p$ — $n$ -перехода составляет 34—37 °С, при увеличении тока до 40 мА температура может достигать 50 °С, а при токах порядка 60 мА — 60—70 °С, т.е. даже может вызывать ожоги.

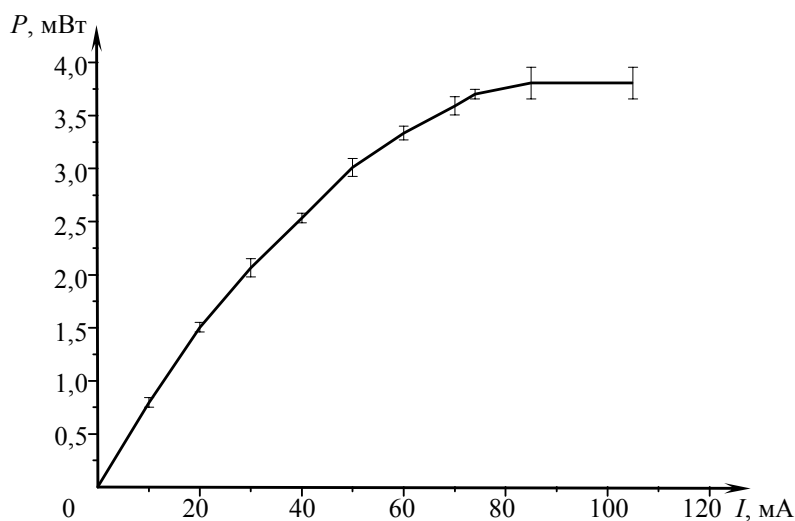


Рис. 1

Однако в фотохромотерапии не требуется сверхвысоких мощностей излучения, так как функциональные системы организма человека и на уровне клетки, и на уровне ткани работают при низких энергиях излучения [3]. Это позволяет использовать светодиоды в штатном режиме работы при токах, близких к номинальным, и избежать заметных температурных воздействий.

При исследовании энергетических характеристик следует обратить особое внимание на поверхностную плотность мощности излучения  $P_S$  (облученность), так как даже при сравнительно невысокой мощности излучения можно сфокусировать пучок в небольшое пятно на облучаемой поверхности, т.е. создать высокую плотность мощности, что приведет к ощутимому разогреву или даже ожогу.

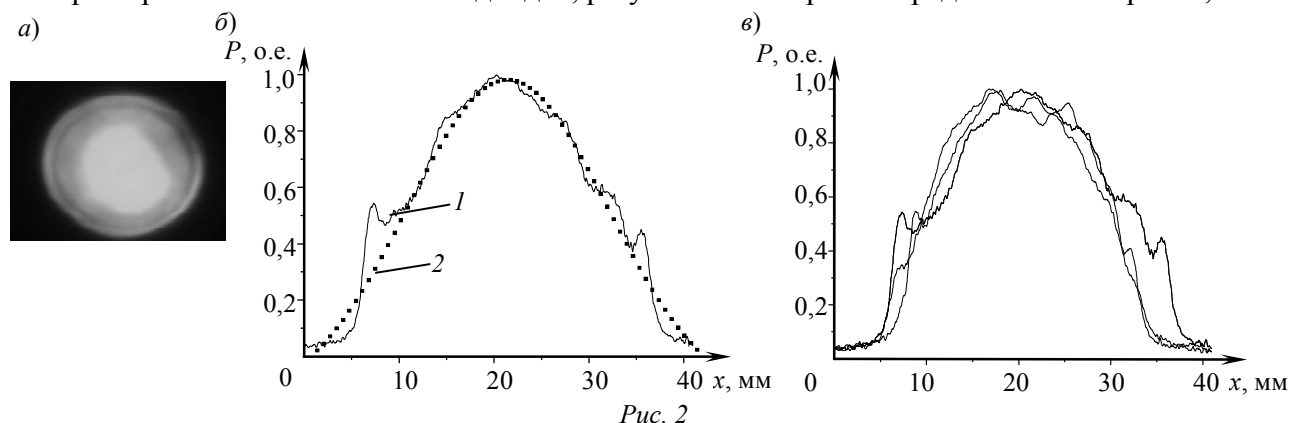
Используемые в фотохромотерапии значения облученности составляют, как правило, от 0,1 до 100...1000 мВт/см<sup>2</sup> [4, 5]. С этим параметром связаны главные показатели в фотохромотерапии — энергетическая экспозиция  $E_S$  и общая доза облучения  $E$ :

$$E_S = P_S t, \quad E = Pt,$$

где  $t$  — время облучения.

В связи с этим важно знать не только мощность излучения, но и площадь облучаемой поверхности, а также распределение мощности в пределах облучаемой зоны. Проведенные авторами экспериментальные исследования показали, что функция распределения мощности в пучке может носить сложный характер, с несколькими различными максимумами и минимумами, причем наибольший максимум может быть смещен относительно геометрической оси пучка.

Эксперимент проводился следующим образом. Изображение светового пятна, формируемого светодиодом, регистрировалось на экране, установленном на расстоянии 10 см от плоскости регистрации, и передавалось на компьютер. Затем осуществлялись анализ и обработка изображения с помощью специальной программы AM Lab Hesperus v.3.0b. Интенсивность излучения пучка нормировалась по максимальному значению. Изображение светового пятна и распределение мощности излучения в поперечном сечении пучка для зеленого светодиода (фирмы “Arlight”) приведены на рис. 2, а, б соответственно. Измерения повторялись для четырех произвольно взятых светодиодов; результаты измерений представлены на рис. 2, в.



Аналогичные исследования, проведенные для синих светодиодов (фирмы “Arlight”), показали близкие результаты.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

— распределение мощности излучения в поперечном сечении пучка исследуемых светодиодов носит сложный характер;

— распределения мощности излучения, даже для светодиодов одного цвета и из одной партии (кривая 1, рис. 2, б), отличаются друг от друга, однако достаточно хорошо согласуются с гауссовым законом распределения (кривая 2).

Изложенные выше рассуждения относятся к единичным излучателям. На практике же очень часто, если не в большинстве случаев, необходимо облучать поверхности относительно большой площади. В связи с этим приходится либо удалять источник излучения от облучаемой поверхности, либо использовать несколько излучателей, конструктивно собранных в матрицу. При удалении излучателя площадь облучаемой поверхности увеличивается за счет расходимости пучка света, но при этом плотность мощности уменьшается. Для достижения эквивалентной дозы облучения необходимо увеличивать время облучения, что приводит к увеличению продолжительности процедуры, усложнению работы врача и снижению комфортности для пациента. Кроме того, эффект воздействия при одинаковой дозе облучения, но низкой плотности мощности и длительном времени облучения не всегда адекватен эффекту при высокой плотности мощности и малом времени облучения. Одним из действенных способов решения этой проблемы является создание светодиодных матриц.

Основная задача при разработке светодиодных матриц — достижение равномерного распределения плотности мощности излучения по облучаемой поверхности. Соответственно данные о распределении мощности в поперечном сечении единичного светодиода весьма важны.

Как отмечалось выше, распределения мощности в поперечном сечении пучка для зеленых и синих светодиодов (фирмы “Arlight”) достаточно хорошо, с погрешностью не более 20 %, соответствуют распределению Гаусса (см. рис 2, б). Это позволяет сформулировать практические рекомендации по созданию светодиодных матриц исследуемого типа (синих и зеленых матриц на базе светодиодов фирмы “Arlight”).

Во-первых, для расчета и моделирования распределения плотности мощности излучения по облучаемой поверхности, в первом приближении, можно воспользоваться гауссовым законом распределения мощности в поперечном сечении единичных излучателей.

Во-вторых, с учетом гауссова закона распределения мощности излучения указанную методику можно использовать для расчета и моделирования распределения плотности мощности при удалении от облучаемой поверхности на любое расстояние при заданной геометрии расположения светодиодов в матрице.

Рассматривая влияние неравномерности распределения плотности мощности излучения по облучаемой поверхности на терапевтический эффект, следует отметить, что по мере проникновения излучения в глубь живой ткани указанная неравномерность в значительной степени компенсируется за счет рассеяния в мутной среде, какой является живая ткань. Роль поверхностного эффекта в терапевтическом действии пока мало изучена [4] и остается проблемой дальнейших исследований, однако пренебрегать ею в настоящее время было бы некорректно [4].

На рис. 3 показан внешний вид сине-зеленой светодиодной матрицы, разработанной авторами настоящей статьи для облучения обширных ожоговых ран и очагов патологии, поясничных паравертебральных зон и др. Площадь матрицы приблизительно равна площади ладони, что удобно для врача.



Рис. 3

Светодиоды диаметром 5 мм одного цвета установлены в матрице на расстоянии 10 мм друг от друга (по центрам). Для обеспечения двухцветности светодиоды разных цветов установлены в шахматном порядке. Экспериментальные исследования характеристик светодиодной матрицы показали, что неравномерность распределения плотности мощности по облучаемой поверхности, расположенной на расстоянии 10 см от плотности регистрации, не превышает 20 % и соответствует расчетным данным в приближении гауссова распределения.

Матрицу можно держать в руке или закрепить на штативе. К преимуществам дистанционного метода облучения можно отнести следующие факторы:

- возможность исключения теплового воздействия;
- исключение вероятности инфицирования;
- более равномерное распределение плотности мощности излучения по облучаемой поверхности.

В заключение отметим, что современные светодиоды выпускаются в различных вариантах [6—8]: основную группу составляют светодиоды в стандартных выводных корпусах круг-

лого или овального сечения диаметром от 3 до 5 мм с двумя выводами; вторую группу составляют светодиоды в корпусе квадратного сечения с четырьмя выводами для монтажа в отверстия; в третью группу входят светодиоды для поверхностного монтажа. Выпускаемые светодиоды различаются мощностью излучения, цветовой гаммой (белого или монохромного излучения, многоцветные), углами свечения, формой линзы, способом монтажа кристалла на подложке-радиаторе, способом отвода тепла и количеством кристаллов в одной конструкции (однокристалльные и многокристалльные).

Светодиоды исключительно долговечны: срок их службы достигает 100 тыс. ч, что почти в 100 раз больше, чем у лампы накаливания, и в 5—10 раз больше, чем у люминесцентной лампы. Однако следует помнить, что срок службы непосредственно зависит от типа светодиода, подаваемого на него тока, температуры охлаждения кристалла, состава и качества кристалла, компоновки и сборки облучателя в целом. Срок службы мощных светодиодов короче, чем маломощных. Снижение мощности излучения светодиодов разных цветов с повышением температуры не одинаково: AlGaInP- и AeGaAs-светодиоды, т.е. красные и желтые, характеризуются более существенным падением мощности, а InGaN-светодиоды, т.е. зеленые, синие и белые, — менее существенным. При уменьшении мощности излучения светодиода на 30 % и более светодиод для фотокриотерапии считается непригодным и его следует менять.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуберт Ф. Е. Светодиоды / Пер. с англ.; Под ред. А. Э. Юновича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
2. Юнович А. Э. Проблемы развития светодиодной промышленности в России // Междунар. конф. „Светодиоды: чипы, продукция, материалы, оборудование“, 12 апр. 2012 г. М.: Крокус экспо, 2012.
3. Веселовский А. Б., Кирьянова В. В., Митрофанов А. С., Петрищев Н. Н., Фефилов Г. Д., Янтарева Л. И. Тенденции развития, разработка и исследование физиотерапевтической аппаратуры для фотокриотерапии // Оптические и лазерные технологии: Сб. статей / Под ред. В.Н. Васильева. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С. 149—164.
4. Аграфонов Ю. В., Выговский Ю. Н., Гаткин Е. Я., Дорогобид Я. С., Кручинин Л. Е., Малов А. Н., Малов С. Н., Молоцко В. Ю., Тимина О. О., Феценко В. С., Феценко Л. В. Физика лазерной биостимуляции. М.: НТФ Медиа, 2000. 77 с.
5. Карандашов В. И., Петухов Е. Б., Зродников В. С. Фототерапия (светолечение): Руководство для врачей / Под ред. Н. Р. Палеева. М.: Медицина, 2001. 392 с.
6. Туркин А. Н. Мощные светодиоды Cree для освещения: основные преимущества и перспективы применения // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 2. С. 14—17.
7. Звонарев Е. П. Ультраяркие светодиоды компании Cree // Новости электроники. 2009. № 9 (73). С. 13—18.
8. Елисеев И. В. Обзор светодиодной продукции компании Cree // Там же. 2009. № 9 (73). С. 5—12.

#### Сведения об авторах

- Андрей Борисович Веселовский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики;  
E-mail: avesel@mail.ru
- Павел Иркинович Гузалов** — канд. мед. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра физиотерапии и медицинской реабилитации, Санкт-Петербург;  
E-mail: guzalov@mail.ru
- Вера Васильевна Кирьянова** — д-р мед. наук, профессор; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра физиотерапии и медицинской реабилитации, Санкт-Петербург;  
E-mail: kiryanova\_vv@mail.ru

- Андрей Сергеевич Митрофанов** — канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: mitrofanov-1941@mail.ru
- Георгий Дмитриевич Фефилов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; E-mail: fg1319@mail.ru
- Валерий Юрьевич Храмов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра лазерной техники и биомедицинской оптики; заведующий кафедрой; E-mail: khramov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой лазерной  
техники и биомедицинской оптики

Поступила в редакцию  
26.04.13 г.