

РАЗДЕЛ II. ФИЗИКА

УДК 535-3

DOI: 10.18384/2310-7251-2017-4-24-38

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИСТОЧНИКОВ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ БАКТЕРИЦИДНОГО ДИАПАЗОНА

**Бугаев А.С.^{1,2}, Шешин Е.П.¹, Озол Д.И.¹, Мье М.М.¹, Данилкин М.И.³,
Верещагина Н.Ю.³**

¹ *Московский физико-технический институт*

141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9, Российская Федерация

² *Московский государственный областной университет*

105005, г. Москва, улица Радио, д. 10А, Российская Федерация

³ *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН*

119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53, Российская Федерация

Аннотация. В последние десятилетия стремительно расширяется область применения ультрафиолетовых источников излучения. Они находят многочисленные бытовые, медицинские и промышленные применения, в особенности для обеззараживания воздуха, воды и поверхностей. Для этих целей наиболее эффективно УФ-излучение так называемого бактерицидного диапазона. Наибольшее распространение получили ртутные лампы низкого и среднего давления. Однако в настоящее время усилились тенденции к исключению ртути не только из бытового, но и промышленного оборота. Этим вызвана необходимость развития не содержащих ртути УФ-источников. Такими являются эксимерные лампы, УФ-излучающие светодиоды, а также представители нового направления – катодолюминесцентные УФ-источники, в особенности с автоэмиссионным катодом.

Ключевые слова: ультрафиолет, обеззараживание, бактерицидный диапазон, катодолюминесценция, автоэмиссия

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF UV-SOURCES OF GERMICIDAL RANGE

A. Bugaev^{1,2}, E. Sheshin¹, D. Ozol¹, M. Myo¹, M. Danilkin³, N. Vereschagina³

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (State University)*

Institutskii pereulok 9, 141700 Dolgoprudnyi, Moscow region, Russian Federation

© Бугаев А.С., Шешин Е.П., Озол Д.И., Мье М.М., Данилкин М.И., Верещагина Н.Ю., 2017.

² *Moscow Region State University
ul. Radio 10A, 105005 Moscow, Russian Federation*

³ *P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences
Leninsky prosp. 53, 119991 Moscow, Russian Federation*

Abstract. In recent decades the field of application of UV light sources has been rapidly increasing. They can be used for many purposes in everyday life, medicine, industry, especially for disinfection of air, water, and surfaces. The most efficient for this purpose is the UV radiation within the so-called germicidal range. The mercury-vapor low and medium pressure lamps are most widely used. However, nowadays a tendency has been promoted to withdraw mercury appliances not only from household usage, but from industry. This leads to a necessity of the development of mercury-free UV light sources such as excimer lamps and UV light-emitting diodes (UV-LEDs). Recently a new kind of lamps, so called cathodoluminescent UV light sources (especially with field emission cathodes), has been developed.

Key words: UV-light, disinfection, germicidal range, cathodoluminescence, field emission.

Источники ультрафиолетового (УФ) излучения широко распространены в медицине и промышленности. В последние годы особенно быстро растёт их применение для обеззараживания поверхностей, воздуха, воды, так как УФ-излучение эффективно воздействует на многие бактерии, вирусы, плесневые грибы. Наиболее эффективно излучение так называемого бактерицидного диапазона (~230–300 нм), лежащего в областях UV-B (280–320 нм) и UV-C (200–280 нм). Рассмотрим основные существующие в настоящее время источники, излучающие в основном именно в бактерицидном диапазоне (таким образом, за пределами данной статьи останутся вспышечные лампы, дейтериевые лампы и другие источники более широкого спектра).

Механизм воздействия УФ-излучения на микроорганизмы

Обеззараживание под действием УФ-излучения происходит за счет фотохимических реакций внутри микроорганизмов [4; 10]. При этом УФ-излучение в принципе воздействует на все молекулы клетки, но лишь биополимеры – белки мембран и нуклеиновые кислоты (особенно ДНК клеточного ядра) – поглощают его эффективно. Чувствительность протеинов, образующих мембраны, велика в диапазоне длин волн < 230 нм, более длинноволновое излучение воздействует на них очень слабо. Нуклеотиды же, образующие ДНК, имеют выраженный максимум поглощения УФ-излучения в диапазоне 250–270 нм (рис. 1). Так как удобнее работать с источниками излучения более длинноволнового диапазона, особенно при обеззараживании жидкостей (вода интенсивно поглощает излучение длиной волны < 230 нм), большинство используемых для обеззараживания УФ-источников воздействуют именно на ядра клеток или вирусов, разрушая их ДНК. Собственно говоря, именно поэтому такую обработку и называют не стерилизацией, а обеззараживанием – после разрушения клеточной ДНК (клеточная мембрана и иные структуры при этом не повреждаются или повреждаются слабо) бактерия может сохранить жизнеспособность (то есть метаболические процессы в ней не прекращаются), но более не способна размножаться. Отметим,

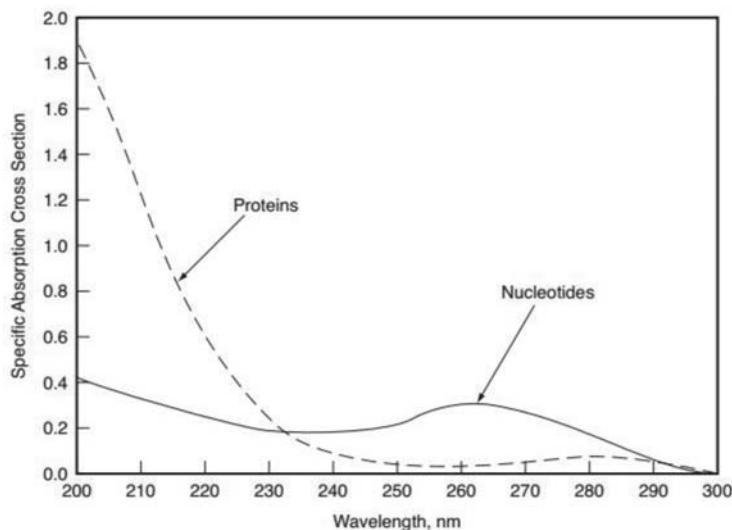


Рис. 1. Кривые поглощения УФ-излучения протеинами и нуклеотидами [4].

что в силу малых поперечных размеров клеток лишь не более 5% УФ-излучения, проходящего через отдельно взятую типичную бактериальную клетку, поглощается в ней – таким образом, клеточные мембраны и другие органеллы не могут послужить сколько-нибудь эффективной экранирующей защитой для ядер. Но с ростом размеров клеток чувствительность микроорганизмов ослабевает, поэтому стойкость плесневых клеток к УФ-облучению выше, чем у бактериальных.

Из графика на рис. 1 видно, что наиболее эффективны УФ-источники с длиной излучаемой волны около 265–270 нм (вообще говоря, разные микроорганизмы имеют различную чувствительность к УФ-облучению, в том числе и спектральную – однако качественно кривые чувствительности в большинстве случаев близки к кривой чувствительности нуклеотидов, что позволяет опираться на неё при выборе УФ-источников для практического применения). Однако источники излучения, как правило, имеют сложные спектры – либо широкие, либо с множеством линий, не всегда попадающих в область максимальной фоточувствительности клеток. Поэтому источники с разными спектрами при прочих равных имеют различную бактерицидную эффективность. Для её описания введено понятие относительной спектральной бактерицидной эффективности – безразмерная величина, свёртка спектра источника с кривой чувствительности. Бактерицидным потоком (измеряемым в ваттах) называется произведение мощности на безразмерную бактерицидную эффективность, бактерицидной отдачей – отношение бактерицидного потока к потребляемой УФ-источником электрической мощности. Так, спектр излучения ртутных ламп низкого давления имеет выраженный узкий пик на длине волны 253,7 нм, что достаточно близко к максимуму бактерицидной эффективности (рис. 2), и обеспечивает таким лампам высокую бактерицидную отдачу до 25–35%.

На этот пик приходится 82% излучаемой мощности, ещё 6,6% – на линию вакуумного ультрафиолета 184,9 нм, остальное – на несколько пиков слабой интенсивности от 260 до 600 нм. Такой спектр делает ртутные лампы низкого давления

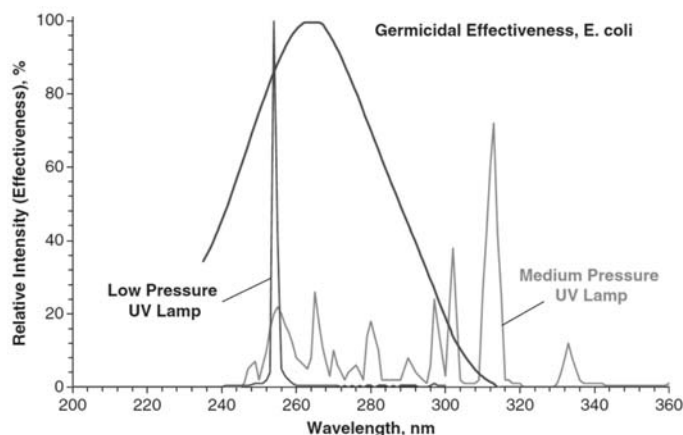


Рис. 2. Кривая бактериальной чувствительности *E. coli* к УФ-излучению и спектры ртутных ламп низкого и среднего давления [4].

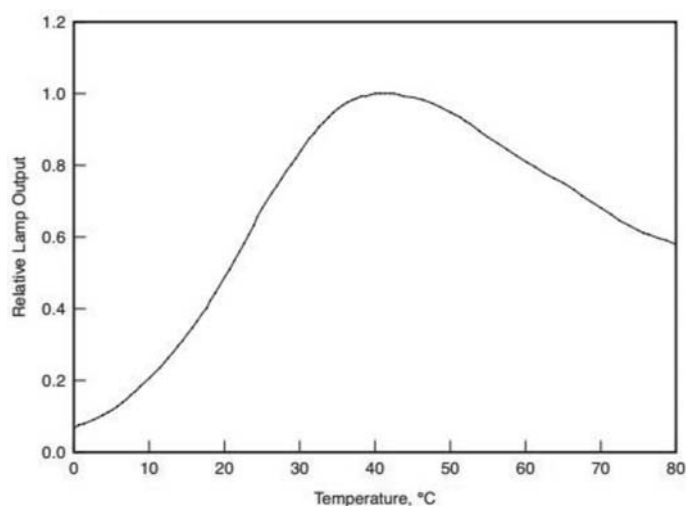


Рис. 3. Зависимость интенсивности свечения ртутной лампы низкого давления от температуры [10].

спектрально достаточно эффективными, и в целом наиболее эффективными из существующих на сегодняшний день источников, но их недостатками являются малая плотность излучаемой мощности и сильная зависимость мощности от температуры окружающей среды (рис. 3.), кроме того, линия 184,9 нм может приводить к генерации озона.

Для случая лампы, омываемой водой, эта зависимость менее выражена, но тем не менее в холодных регионах, где температура воды может быть не выше 0,5 °С, особенно зимой, иногда возникают проблемы с зажиганием разряда в лампах. В любом случае, для работы таких ламп оптимальной является температура собственно лампы 30–40 °С, которая достигается в случае работы в стоячем воздухе температуры 25–27 °С. При этом лампа может терять до четверти своей мощности, когда температура воздуха опускается с 27 °С до 16 °С [4].

Недостаточная плотность мощности ($0,15\text{--}1\text{ Вт/см}^2$) и высокая температурная чувствительность приводят к тому, что часто используются намного менее спектрально эффективные (см. рис. 2.) и имеющие бактерицидную отдачу $10\text{--}16\%$, с меньшим ресурсом, но обладающие значительно большей «яркостью» (десятки Вт/см^2), ртутные лампы среднего давления.

Однако главным недостатком ртутных ламп является их экологическая опасность. Имеется риск попадания ртути в питьевую воду в случае разрушения оболочки лампы, отработанные лампы требуют специальной утилизации, чтобы избежать попадания ртути в окружающую среду. В настоящее время опасения по отношению к ртути вылились в ратификацию странами-членами ООН Минаматской конвенции о ртути [12]. В связи с этим весьма желательно создание и внедрение эффективных УФ-источников, не содержащих ртути. Рассмотрим основные из известных на сегодняшний день.

Эксилампы

Эксимерами называют возбуждённые двухатомные молекулы (димеры), состоящие из пар одинаковых атомов, формирующих химическую связь лишь в возбуждённом состоянии. Распад эксимера сопровождается испусканием кванта с энергией, характерной для молекул данного типа. Аналогичные возбуждённые молекулы, образованные разными атомами, называют эксиплексами. К эксилампам относят источники излучения, работающие на эксимерах и эксиплексах. Для формирования эксимеров, либо эксиплексов газовую смесь – инертные газы, галогены, или смесь инертных газов и галогенов – необходимо возбудить, обычно это делают, пропуская через газ электрический разряд. Распространены эксилампы барьерного и ёмкостного разрядов. Спектры для одной и той же газовой смеси для разных типов разрядов могут несколько отличаться, варьируются они и в зависимости от давления газа.

Длина волны эксилампы не поддаётся произвольному управлению, спектры необходимо выбирать из сравнительно ограниченного набора эксимерных молекул. У многих из них спектры чересчур широки и лежат не в бактерицидном диапазоне. Спектры нескольких эксимеров и эксиплексов – XeI^* , Cl_2^* и XeBr^* – имеют значительную долю излучения в пределах бактерицидного диапазона. КПД таких эксиламп обычно $\sim 5\%$, плотность излучаемой мощности для длин волн более 200 нм составляет несколько десятков мВт/см^2 [26], хотя для длин волн 180 нм и менее может быть больше – до $100\text{--}150\text{ мВт/см}^2$. Эксилампы требуют для поджига разряда значительно большего напряжения, чем ртутные лампы, они достаточно дороги – в несколько раз дороже ртутных ламп. Ресурс их составляет до 2500 часов.

Для наиболее спектрально привлекательного эксиплекса XeI получен КПД до $5,5\%$ и плотность мощности менее 10 мВт/см^2 [2]. Другие авторы сообщают о КПД до 13% [1] при использовании радиочастотного разряда ($13,56\text{ МГц}$), однако такая конструкция весьма сложна. При этом бактерицидная отдача эксиламп заметно меньше, чем у ртутных ламп низкого давления (менее 8%) [14].

Технологии эксиламп развиваются во всём мире более тридцати лет, и можно осторожно предположить, что эти устройства если и не достигли ещё сво-

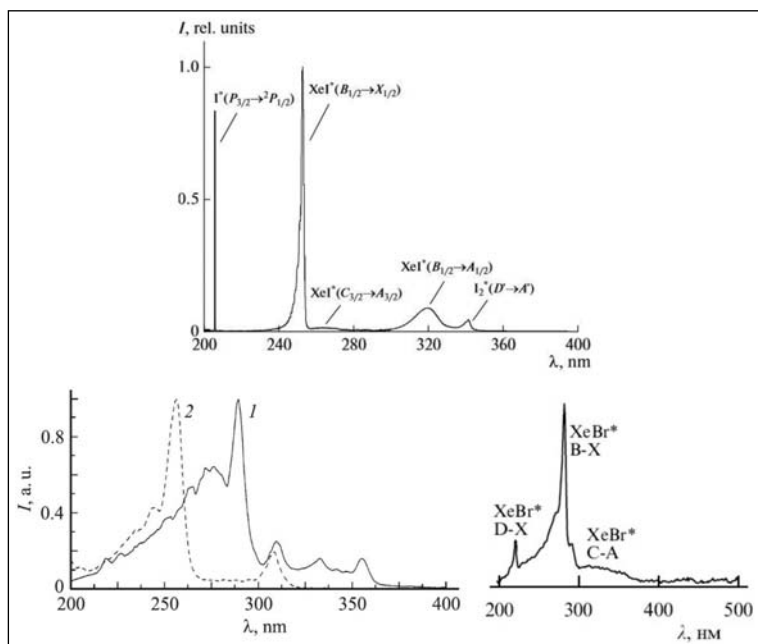


Рис. 4. Спектры нескольких эксиламп – XeI^* , Cl_2^* и XeBr^* [2; 26].

его технологического потолка, то уже приблизились к нему; в этом случае, по-видимому, эксилампы могут стать основным источником вакуумного ультрафиолета – в этом диапазоне их КПД достигает 40% и более. Не исключено применение в системах стерилизации непрямого облучения – например, за счёт создания в воде путём фотолиза радикалов OH^* под действием ВУФ-излучения (подобное воздействие может приводить и к разрушению молекул многих химических загрязнителей и органических молекул) [8]. К сожалению, столь коротковолновое УФ-излучение сильно поглощается водой, соответственно, проникающая способность его мала, и трудно обеспечить производительность установок выше $10 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Возможно также обеззараживание воздуха путём генерации озона. Но параметры эксиламп для широкомасштабного применения в качестве ламп бактерицидного диапазона не вполне приемлемы – в особенности плотность мощности и ресурс в сочетании с высокой стоимостью – что до сих пор сильно ограничивает их распространение.

УФ-излучающие светодиоды

Попытки создания светодиодов, излучающих в УФ-диапазоне $<360 \text{ нм}$, начались со второй половины 1990-х гг. [16]. К настоящему времени созданы различные типы диодов, излучающих в диапазоне от 200 до 400 нм. При этом работы по созданию диодов ближнего УФ-диапазона (380–400 нм) на основе InGaN (квантовые ямы с GaN барьерами) оказались весьма успешны, уже сейчас они могут считаться основными источниками для применения в этой спектральной области. Однако создать эффективный светодиод для коротковолновой области оказалось значительно сложнее. InGaN-структуры уже непригодны, поэтому для

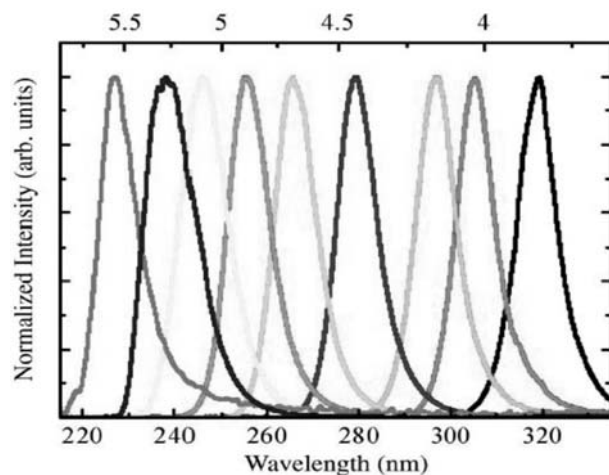


Рис. 5. Спектры УФ-светодиодов на основе AlGaIn [18].

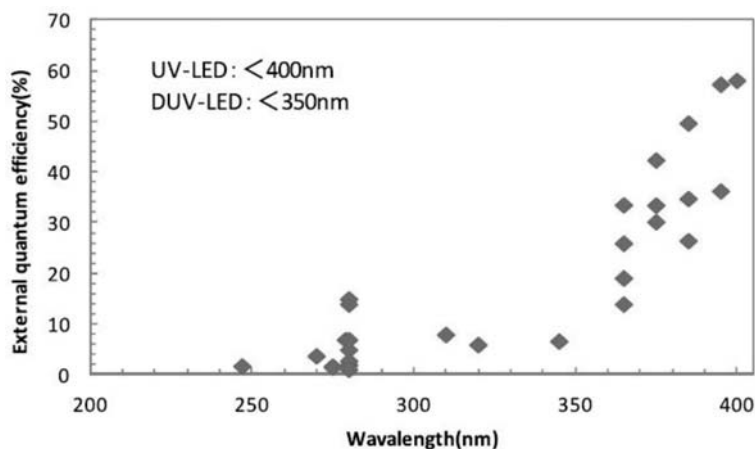


Рис. 6. Внешний квантовый выход УФ-светодиодов [13].

покрытия бактерицидного диапазона используются AlGaIn-структуры, позволяющие, в зависимости от соотношения нитридов AlN (210 нм в чистом виде) и GaN (365 нм в чистом виде), получать структуры с различной шириной запрещённой зоны, и, соответственно, излучение от 210 нм до 365 нм. Максимум излучения может быть расположен произвольно, но спектр всегда имеет одну и ту же форму и полуширину ~ 10 нм. (рис. 5).

Данный материал создаёт разработчикам ряд трудностей. Суммарный КПД светодиода определяется рядом факторов, среди которых эффективность инжекции носителей заряда (невелика в силу малой концентрации дырок в p-AlGaIn), внутренний квантовый выход (в AlGaIn более чувствителен к плотности дислокаций, чем в InGaIn), эффективность вывода излучения (мала из-за поглощения УФ-излучения контактным слоем p-GaN). Поэтому, несмотря на то, что диоды диапазона 260–280 нм впервые появились между 2002 г. и 2006 г., их эффективность многократно уступает светодиодам ближнего УФ-диапазона (см. рис. 6).

Подчеркнём, что на рисунке указаны значения не КПД, а лишь одного из определяющих его факторов. Отметим также, что приведены характеристики не только промышленно доступных, но и лучших лабораторных образцов.

В итоге КПД типичного УФ-светодиода бактерицидного диапазона составляет 0,1–1%, достигая у лучших лабораторных образцов 2% [18; 16]. При этом типичная мощность излучения единичного диода – 1-10 мВт, при весьма значительной стоимости.

Таким образом, большой ресурс (~10 000-30 000 часов) и неплохие спектральные характеристики УФ-светодиодов – хотя ширина спектра и является известным недостатком – нивелируются низким КПД, небольшой удельной излучаемой мощностью и высокой стоимостью. И хотя УФ-светодиоды не первый год привлекают внимание как возможная альтернатива ртутным лампам для обеззараживания воды (см., напр., [19]) и применения в пищевой промышленности [17], с технической точки зрения они смогут стать полноценной заменой ртутных ламп низкого давления лишь после повышения эффективности в 50–90 раз до 25-40%[3]. Для замены ртутных ламп среднего давления в высокопроизводительных проточных установках может быть достаточно и меньшего роста КПД (до ~10–20%), но необходима высокая плотность излучаемой мощности. Также необходимо снижение стоимости УФ-светодиодов как минимум на порядок для полноценной замены ртутных источников по технико-экономическим показателям.

Катодолюминесцентные источники

Катодолюминесцентный источник излучения представляет собой вакуумную лампу диодной или триодной схемы с электронной пушкой и экраном-анодом, на который нанесен катодолуминофор, светящийся под действием быстрых

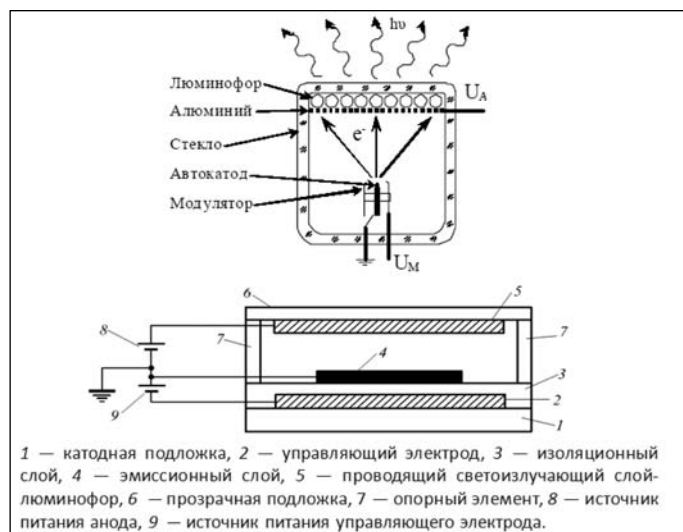


Рис. 7. Принципиальная схема катодолюминесцентного источника (а) и плоского облучателя (б).

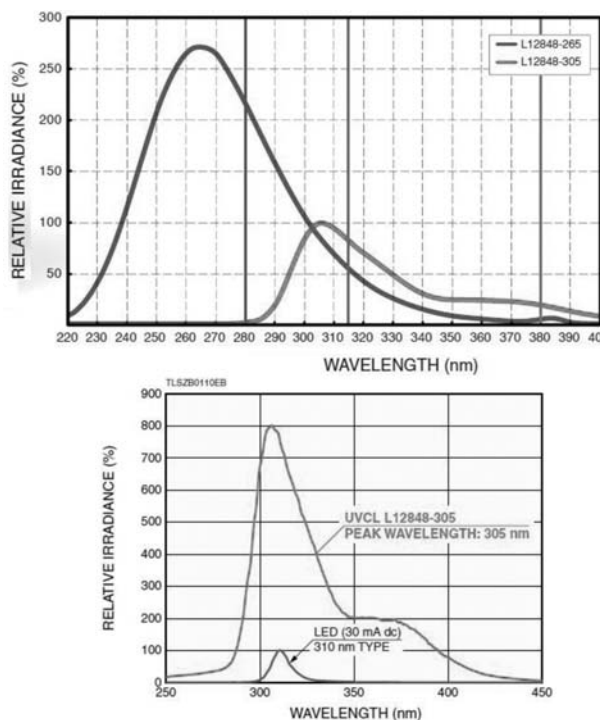


Рис. 8. Спектр катодолуминесцентных источников Hamamatsu двух типов (а) и в сравнении с УФ-светодиодом той же потребляемой мощности (б) [6].

электронов (энергией 5–30 кэВ). Схема такого источника приведена на рис. 7. Люминофор представляет собой порошок с размером частиц 15–50 мкм. Ряд конструкций таких ламп видимого света описан, например, в [23].

Так как спектр излучения лампы зависит только от использованного люминофора, на основе тех же конструкций могут быть созданы УФ-лампы путём замены люминофора. Фирмой Hamamatsu Photonics производятся для использования в лабораторных целях маломощные катодолуминесцентные УФ-источники двух типов – с максимумом длины волны ~315 нм и ~265 нм, то есть бактерицидного диапазона [6]. Их спектры приведены на рис. 8. Данный источник в силу выбора люминофора имеет широкий спектр, умеренный ресурс (заявлено 5000 часов) и небольшую эффективность – обусловленную, по-видимому, выбранным люминофором и использованием термокатода.

Наиболее эффективными катодолуминесцентные источники могут стать при использовании не термокатодов, требующих затрат энергии на их нагревание и обладающих сравнительно небольшим ресурсом, а автоэмиссионных катодов [5].

Автоэмиссионная лампа принципиально может стать новым уникальным источником ультрафиолета, поэтому создание таких источников излучения привлекает внимание многих исследовательских коллективов [8; 9; 20; 21; 24]. Автоэмиссионная лампа может быть создана в разных форм-факторах – например, плоских источников излучения (рис. 7б), пальчиковых ламп (рис. 7а), акси-

ального источника излучения и других. Основным преимуществом пальчиковых катодолюминесцентных ламп является возможность достижения максимальной яркости среди УФ-ламп. Плоские и аксиальные источники более удобны для обработки больших поверхностей или больших объёмов жидкостей или газов в проточных стерилизаторах.

Спектр излучения автоэмиссионной лампы зависит от выбранного люминофора, поэтому для создания автоэмиссионного ультрафиолетового источника излучения актуальной является задача поиска новых широкозонных люминесцентных материалов. Судя по литературе [6; 8; 9; 20; 21], разработчики автоэмиссионных катодолюминесцентных источников использовали в качестве катодолюминофоров вещества в известной мере случайные. Неудивительно, что при таком подходе трудно добиться высокой эффективности и ресурса люминофора (который должен выдерживать длительную бомбардировку электронами в вакуумной колбе, не разрушаясь и не загрязняя вакуум). Поэтому следует подчеркнуть, что задача создания семейства катодолюминофоров разных длин волн, обладающих необходимыми свойствами – эффективностью не менее 5%, ресурсом не менее 5000 часов – является одной из ключевых при разработке катодолюминесцентных УФ-источников. Такие люминофоры в настоящее время не производятся промышленно, но в литературе имеются данные о многих потенциально подходящих составах.

Теоретический потолок энергетической эффективности катодолюминофоров составляет 36–40% [25]. Достигнутый на практике – 25% (в синей области спектра, в более длинноволновой он меньше). Поэтому можно ожидать, что в УФ-области достижимы величины ~30%. Для практического применения пригодны уже катодолюминофоры с КПД 5–10%, если их спектры удовлетворительны, а стойкость высока. Поскольку веществ, могущих служить катодолюминофорами, потенциально очень много, а спектры их разнообразны – можно ожидать и отыскания люминофора с высокой бактерицидной спектральной эффективностью. Выявлено несколько перспективных семейств люминофоров, потенциально обладающих эффективностью до 20% и более, что превышает типичный КПД ртутных УФ-ламп среднего давления ~10–15%.

В качестве примера укажем на тетраборат лития, активированный серебром [24]. Катодолюминофоры могут иметь самые разнообразные спектры, как широкие сплошные, так и узкие линейчатые, поэтому принципиально возможно создание люминофора с высокой спектральной бактерицидной эффективностью, сопоставимой с таковой у ртутных ламп низкого давления, или даже превосходящей её. Так как ранее УФ-катодолюминофоры соответствующего диапазона целенаправленно не разрабатывались, поле для исследований огромно, но и результаты в случае успеха трудно переоценить.

Одним из возможных направлений создания УФ-катодолюминофоров с заданным спектром является применение квантовых точек (КТ). Спектр КТ – полупроводниковых нанокристаллов – зависит от размеров нанокристалла, причём спектр отдельно взятого нанокристалла представляет собой единственную очень узкую линию [7]. Таким образом, принципиально возможно создание лю-

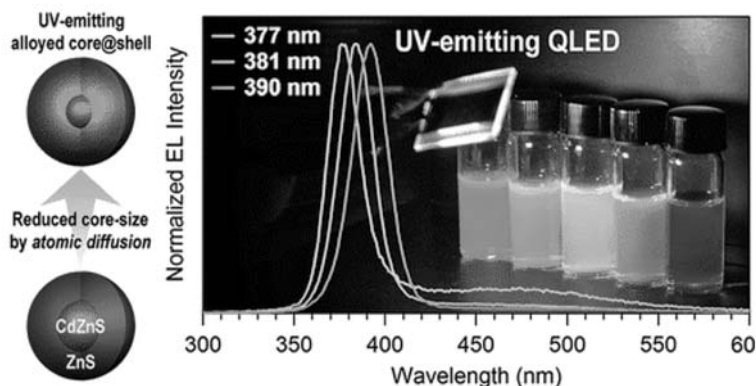


Рис. 9. Квантовые точки УФ-диапазона (по данным [10]).

минофора, излучающего одну спектральную линию шириной 1–2 нм. Проверено экспериментально (для КТ в диапазоне излучения 470–680 нм), что многооблучечные КТ могут служить и катодолюминофорами, эффективно возбуждаясь электронами и демонстрируя яркость свечения, сопоставимую с классическими катодолюминофорами той же спектральной области [14], то есть КПД их ~10–20% даже при квантовом выходе, далёком от 100%. КТ, излучающие на длинах волн <300 нм, пока, насколько нам известно, ещё не синтезированы, но исследования в этом направлении ведутся, и уже получены КТ со спектральным максимумом в районе 370 нм [10] (см. рис. 9). Вполне вероятно, что путём подбора вещества нанокристаллов и совершенствования технологии в ближайшие годы их длина излучения будет доведена до 260–280 нм.

Таким образом, катодолюминесцентные УФ-источники могут обеспечить произвольный спектр излучения в бактерицидном диапазоне, достичь спектральной эффективности, превосходящей ртутные лампы низкого давления при сопоставимой с ними (или превосходящей) плотности излучаемой мощности, приблизиться по спектральной эффективности к ртутным лампам низкого давления при превосходящей их плотности мощности. Такие автоэмиссионные УФ-источники будут обладать высоким ресурсом (10 000 – 50 000 часов), малой стоимостью, высокой надёжностью и стабильностью работы в широком диапазоне температур, и при полной экологической безопасности смогут полноценно заменить ртутные лампы для всех применений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ametepé J., Peng S., Manos D. Ultraviolet discharges from a radio-frequency system for potential biological/chemical applications // *Chinese Physics B*. 2017. Vol. 26. № 8. P. 083302.
2. Avdeev S.M. et al. XeI barrier discharge excilamp // *Optics and Spectroscopy*. 2013. Vol. 115. № 1. pp. 28–36.
3. Beck S.E. et al. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy // *Water research*. 2017. Vol. 109. pp. 207–216.
4. Bolton J.R., Cotton C.A. *The ultraviolet disinfection handbook*. American Water Works Association, 2011.
5. Egorov N., Sheshin E. *Field Emission Electronics*. Springer, 2017.

6. Hamamatsu Photonics. UVCL (Ultra Violet Cathode emitting Light source). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/1001/3068/index.html> (дата обращения: 24.09.2017).
7. Klimov V.I., ed. Nanocrystal Quantum Dots (2nd Ed.). CRC Press, 2010.
8. Kominami H. et al. Cathodoluminescence of ZnAl₂O₄ Phosphor for the Application of UV Emission Devices // Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), 2010, 23rd International. pp. 30–31.
9. Kominami H., Nakanishi Y., Hara K. Cathodoluminescent properties of ZnO-based phosphors for UV emission // Vacuum Nanoelectronics Conference, 2009. IVNC 2009. 22nd International, pp. 67–68.
10. Kowalski W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 501 p.
11. Kwak J. et al. High-power genuine ultraviolet light-emitting diodes based on colloidal nanocrystal quantum dots // Nano letters. 2015. Vol. 15. № 6. P. 3793–3799.
12. Minamata Convention on Mercury. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mercuryconvention.org/> (дата обращения: 24.09.2017)
13. Muramoto Y., Kimura M., Nouda S. Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp // Semiconductor Science and Technology, 2014. Vol. 29. № 8. P. 084004.
14. Ozol D.I. Preliminary study of cathode ray tube phosphors on the basis of nanocrystal quantum dots // 29th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC), 2016, Vancouver, BC, 2016, pp. 1-2.
15. Schalk S. et al. UV-Lamps for disinfection and advanced oxidation–lamp types, technologies and application // IUVA news, 2005. Vol. 8. № 1. pp. 32–37.
16. Seong T.Y. et al. III-Nitride based light emitting diodes and applications. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
17. Shin J.Y. et al. Fundamental characteristics of deep-UV light-emitting diodes and their application to control foodborne pathogens // Applied and environmental microbiology, 2016. Vol. 82. № 1. pp. 2–10.
18. Shur M.S., Gaska R. Deep-ultraviolet light-emitting diodes // IEEE Transactions on electron devices. 2010. Vol. 57. № 1. pp. 12–25.
19. Song K., Mohseni M., Taghipour F. Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review // Water research, 2016. Vol. 94. pp. 341–349.
20. Yanagihara M. et al. Vacuum ultraviolet field emission lamp consisting of neodymium ion doped lutetium fluoride thin film as phosphor // The Scientific World Journal. 2014.
21. Yanagihara M. et al. Vacuum ultraviolet field emission lamp utilizing KMgF₃ thin film phosphor // APL Materials. Vol. 2. 2014. № 4. P. 046110.
22. Zoschke K. et al. Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment—a review // Water research. 2014. Vol. 52. P. 131–145.
23. Бугаев А.С. и др. Катодолюминесцентные источники света (современное состояние и перспективы) // Успехи физических наук. 2015. Т. 185. № 8. С. 853–883.
24. Верещагина Н.Ю. и др. Катодолюминесцентные источники УФ-излучения // XIII Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL-2017, Томск.
25. Левшин В.Л. и др. Исследование катодолюминесценции цинксulfидных и некоторых других люминофоров // Труды Физического института им. П.Н. Лебедева. 1963. Вып. 23. С. 64–135.
26. Тарасенко В.Ф., Соснин Э.А. Эксилампы барьерного разряда: история, принцип действия, перспективы // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 10. С. 58–65.

REFERENCES

1. Ametepe J., Peng S., Manos D. [Ultraviolet discharges from a radio-frequency system for potential biological/chemical applications]. In: *Chinese Physics B*, 2017, vol. 26, № 8, P. 083302.
2. Avdeev S.M. et al. [XeI barrier discharge excilamp]. In: *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 115, no. 1, pp. 28–36.
3. Beck S.E. et al. [Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy]. In: *Water research*, 2017, vol. 109, pp. 207–216.
4. Bolton J.R., Cotton C.A. *The ultraviolet disinfection handbook*. American Water Works Association, 2011.
5. Egorov N., Sheshin E. *Field Emission Electronics*. Springer, 2017.
6. *Hamamatsu Photonics. UVCL (Ultra Violet Cathode emitting Light source)*. Available at: <http://www.hamamatsu.com/us/en/product/category/1001/3068/index.html> (accessed: 24.09.2017)
7. Klimov V.I., ed. *Nanocrystal Quantum Dots*. CRC Press, 2010.
8. Kominami H. et al. [Cathodoluminescence of ZnAl₂O₄ Phosphor for the Application of UV Emission Devices]. In: *Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, 2010, 23rd International, pp. 30–31.
9. Kominami H., Nakanishi Y., Hara K. [Cathodoluminescent properties of ZnO-based phosphors for UV emission]. In: *Vacuum Nanoelectronics Conference*, 2009, IVNC 2009, 22nd International, pp. 67–68.
10. Kowalski W. *Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 501 p.
11. Kwak J. et al. [High-power genuine ultraviolet light-emitting diodes based on colloidal nanocrystal quantum dots]. In: *Nano letters*, 2015, vol. 15, no. 6, P. 3793–3799.
12. *Minamata Convention on Mercury*. Available at: <http://www.mercuryconvention.org/> (accessed: 24.09.2017).
13. Muramoto Y., Kimura M., Nouda S. [Development and future of ultraviolet light-emitting diodes: UV-LED will replace the UV lamp]. In: *Semiconductor Science and Technology*, 2014, vol. 29, no. 8, P. 084004.
14. Ozol D.I. *Preliminary study of cathode ray tube phosphors on the basis of nanocrystal quantum dots // 29th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, 2016, Vancouver, BC, 2016, pp. 1-2.
15. Schalk S. et al. [UV-Lamps for disinfection and advanced oxidation–lamp types, technologies and application]. In: *IUVA news*, 2005, vol. 8, no. 1, pp. 32–37.
16. Seong T.Y. et al. *III-Nitride based light emitting diodes and applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
17. Shin J.Y. et al. [Fundamental characteristics of deep-UV light-emitting diodes and their application to control foodborne pathogens]. In: *Applied and environmental microbiology*, 2016, vol. 82, no. 1, pp. 2–10.
18. Shur M.S., Gaska R. [Deep-ultraviolet light-emitting diodes]. In: *IEEE Transactions on electron devices*. 2010, vol. 57, no. 1, pp. 12–25.
19. Song K., Mohseni M., Taghipour F. [Application of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs) for water disinfection: A review]. In: *Water research*, 2016, vol. 94, pp. 341–349.
20. Yanagihara M. et al. [Vacuum ultraviolet field emission lamp consisting of neodymium ion doped lutetium fluoride thin film as phosphor]. In: *The Scientific World Journal*. 2014.
21. Yanagihara M., et al. [Vacuum ultraviolet field emission lamp utilizing KMgF₃ thin film phosphor]. In: *APL Materials*, 2014, vol. 2, no. 4, P. 046110.

22. Zoschke K. et al. [Vacuum-UV radiation at 185 nm in water treatment—a review]. In: *Water research*, 2014, vol. 52. pp. 131–145.
23. Bugaev A.S. et al. [Cathodoluminescence light sources (status and prospects)] In: *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences], 2015, vol. 185, no. 8, pp. 853–883.
24. Vereshchagina N.Yu. et al. [Cathode-luminescent light sources of UV-radiation]. In: *XIII international conference on pulsed lasers and laser applications AMPL*, 2017, Tomsk.
25. Levshin V.L. et al. [Investigation of cathodoluminescence of zinc sulfide and some other phosphors]. In: *Trudy Fizicheskogo instituta im. P.N. Lebedeva* [Proceedings of the P.N. Lebedev Physical Institute], 1963, no. 23, pp. 64–135.
26. Tarasenko V.F., Sosnin E.A. [Excilamps of the barrier discharge: history, principle of operation, prospects] In: *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology]. 2012, vol. 79., no. 10, pp. 58–65.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бугаев Александр Степанович – доктор физико-математических наук, академик РАН, заведующий кафедрой, Московский физико-технический институт; старший научный сотрудник, Московский государственный областной университет;
e-mail: bugaev@cplire.ru;

Шешин Евгений Павлович – доктор физико-математических наук, профессор, Московский физико-технический институт;
e-mail: sheshin.ep@mipt.ru;

Озол Дмитрий Игоревич – ассистент, Московский физико-технический институт;
e-mail: ozol.mipt@gmail.com;

Мье Маунг Маунг – аспирант, Московский физико-технический институт;
e-mail: mmmmipt307@gmail.com;

Данилкин Михаил Игоревич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физический институт им П.Н. Лебедева РАН;
e-mail: mihhail.danilkin@ya.ru;

Верещагина Наталья Юрьевна – аспирант, Физический институт им П.Н. Лебедева РАН;
e-mail: ilthar@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexandr S. Bugaev – academic of the RAS, doctor of physico-mathematical sciences, head of the Department, Moscow Institute of Physics and Technology; senior researcher, Moscow Region State University;
e-mail: bugaev@cplire.ru;

Evgenii P. Sheshin – doctor of physico-mathematical sciences, full professor at the Moscow Institute of Physics and Technology;
e-mail: sheshin.ep@mipt.ru;

Dmitry I. Ozol – assistant lecturer at the Moscow Institute of Physics and Technology;
e-mail: ozol.mipt@gmail.com;

Myo Maung Maung – postgraduate student at the Moscow Institute of Physics and Technology;
e-mail: mmmmipt307@gmail.com;

Mikhail I. Danilkin – candidat of physico-mathematical sciences, senior researcher at the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: mihhail.danilkin@ya.ru;

Natalia Yu. Vereschagina – postgraduate student at the P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences;
e-mail: ilthar@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Бугаев А.С., Шешин Е.П., Озол Д.И., Мье М.М., Данилкин М.И., Верещагина Н.Ю. Современные направления развития источников УФ-излучения бактерицидного диапазона // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2017. № 4. С. 24–38.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-4-24-38

FOR CITATION

Bugaev A.S., Sheshin E.P., Ozol D.I., Myo M.M., Danilkin M.I., Vereschagina N.YU. Modern trends in the development of UV-sources of germicidal range. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*. 2017. no. 4. pp. 24–38.
DOI: 10.18384/2310-7251-2017-4-24-38