

УДК 533.9.07; 537.52
EDN: WMUCAY

PACS: 32.30.Jc; 33.20.Ni; 42.72.Bj

**Современные источники вакуумного ультрафиолетового излучения:
состояние и перспективы (обзор)**

Э. А. Соснин, Д. А. Сорокин

Дано описание физических принципов и современной техники получения спонтанного вакуумного ультрафиолетового излучения для трёх случаев: формирование линейчатых спектров атомов, линейчатых спектров многозарядных ионов и континуальных спектров эксимерных молекул. Параметры источников излучения соотнесены с их приложениями – реальными и потенциальными. Представлены различные принципиальные схемы формирования вакуумного ультрафиолетового излучения: с использованием ВЧ-разрядов Н- и Е-типа; разряда в полой катодной тлеющей, барьерной и дуговой разрядов; высоковольтного наносекундного разряда в промежутках с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля; лазерные, разрядные и гибридные схемы для формирования излучения многозарядных ионов; возбуждение газовых мишеней в условиях гиротронного подогрева плазмы. Обзор охватывает уровень техники за последние 20 лет.

Ключевые слова: вакуумное ультрафиолетовое излучение, континуальный спектр, линейчатый спектр, спектр многозарядных ионов, экстремальный ультрафиолет.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-2-159-177

1. Введение

Вакуумное ультрафиолетовое излучение (ВУФ) отвечает диапазону длин волн от 200 до 10 нм (энергия кванта от 6,2 до 124 эВ). Эпитет «вакуумное» появился благодаря тому, что в указанном диапазоне длин волн начинается область сплошного поглощения излучения компонентами воздуха – кислородом и азотом – и поэтому спектральная аппаратура

для работы в указанной области требует вакуумирования оптических трактов. В постоянно обновляющемся стандарте ISO 21348 также используется термин «экстремальное ультрафиолетовое излучение» (ЭУФ) для диапазона $10 < \lambda < 121$ нм. Но поскольку ВУФ-излучение включает в себя ЭУФ как частный случай, далее мы будем пользоваться только акронимом «ВУФ». Также надо иметь в виду, что частично с коротковолновой границей ВУФ-излучения пересекается мягкое рентгеновское излучение, и нет общепринятых критериев разделения этих типов излучения. А поскольку некоторые источники излучения формируют как ВУФ, так и рентген, то далее в обзоре это не будет выделяться специально, а акцент будет сделан на ВУФ-излучении.

Угасший было интерес к использованию ВУФ-излучения в последние два десятилетия вновь разгорелся с новой силой, что связано с появлением новых материалов и необходимостью расширения арсенала по их синтезу и модификации, с потребностью лабораторной

Соснин Эдуард Анатольевич^{1,2}, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Сорокин Дмитрий Алексеевич^{1,2}, зав. лаб., к.ф.-м.н.¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634050, г. Томск, просп. Академический, 2/3.² Национальный исследовательский Томский
государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 4.04.2024

После доработки 15.04.2024

Принята к публикации 19.04.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9; 2.2.7

© Соснин Э. А., Сорокин Д. А., 2024

имитации космических условий на земле, что важно при подготовке космической техники, а также с переводом проекционной литографии в область коротких длин волн [1, 2]. Кроме того, с появлением новых источников излучения всегда появляются и новые концепции их применения. Всё это, а также отсутствие в научной литературе последних десятилетий синопсиса по источникам ВУФ-излучения, послужило основанием для написания данного обзора.

В настоящей работе мы кратко остановимся на принципах получения спонтанного ВУФ-излучения и рассмотрим некоторые примеры конкретных источников излучения, как промышленных, так и лабораторных, созданных за последние 20 лет.

2. Принципы получения ВУФ-излучения

Физические принципы получения ВУФ-излучения хорошо известны, поэтому опишем их лаконично. Если энергия электронов в среде достаточна для возбуждения атомов и если далее часть возбужденных атомов теряет полученную энергию через излучение, то это приводит к формированию линейчатых спектров. При этом интенсивность спектральных линий за счёт связанно-связанных переходов определяется концентрацией атомов в возбужденных состояниях n_i и вероятностью излучательного перехода на тот или иной подуровень $A_{i \rightarrow k}$. У некоторых химических элементов спектральные линии основных атомных переходов находятся в ВУФ-диапазоне (табл. 1), на чём и основана работа соответствующих источников линейчатого спектра (п. 3).

Таблица 1

Длины волн основных переходов для некоторых элементов в ВУФ-области спектра

Элемент	Длина волны, нм
As(I)	189,042; 197,262; 199,035
Ge(I)	197,088; 199,889
Hg(I)	184,959
I(I)	170,207; 178,267; 179,909; 183,038; 184,445; 187,641
Kr(I)	116,487; 123,584
P(I)	177,499; 178,287; 178,768
S(I)	180,734; 182,036; 182,626; 190,027; 191,408
Xe(I)	129,556; 146,962

Если энергия электронов в среде достаточна не только для возбуждения, но и для ионизации, то линейчатый спектр в ВУФ-диапазоне обогащается за счёт переходов однократно ионизованных атомов, потенциал ионизации которых превышает $\sim 6,5$ эВ, а также ионов с различной кратностью заряда, всегда имеющих потенциал ионизации, достаточный для формирования ВУФ-излучения. Так как в этом случае необходимо существенно увеличивать удельную мощность, рассеиваемую в среде, такие источники ВУФ-излучения собирательно называются высокотемпературными [3, 4]. К ним традиционно относят импульсные разряды с различной геометрией электродов и типичной температурой среды $T \geq 12000$ К, а также установки с горячей плазмой ($T > 10^6$ К). При повышенной температуре доля свободных электронов и ионов в плазме увеличивается, что вызывает рост доли рекомбинационных и тормозных процессов, которым отвечают свободно-связанные и свободно-свободные переходы, соответственно. Поэтому линейчатый спектр ВУФ-излучения переходит в сплошной (континуальный). Некоторые способы получения горячей плазмы для формирования ВУФ-излучения будут представлены в п. 5.

Ещё один путь получения ВУФ-излучения состоит в формировании возбуждённых молекул – эксимеров и эксиплексов (сокращения от англ. «excited dimer» и «excited complex») – димеров, состоящих либо из однотипных атомов (например, Xe_2^* , Kr_2^*), либо гетероядерных молекул (например, ArF^*). В отличие от химически устойчивых молекул, они существуют только в возбуждённом состоянии в течении 10^{-9} – 10^{-7} с, а их последующий спонтанный распад на отдельные атомы сопровождается высвечиванием характерных для данной молекулы континуумов в ультрафиолетовой и / или ВУФ-области спектра.

Обобщённая энергетическая диаграмма образования и распада возбужденных димеров инертных газов Xe_2^* , Ar_2^* и Kr_2^* дана на рисунке 1. Верхней части отвечают ионизованные состояния, образующиеся в процессе возбуждения. Нижняя часть диаграммы отвечает состоянию с минимальной энергией. Благодаря пересечениям кривых потенциальной энергии, соответствующим различным уровням

возбуждения, релаксация от верхней части диаграммы к нижней части происходит через последовательность сгруппированных состояний. Динамика релаксации такова, что она неизбежно приводит к безызлучательному заселению нижних состояний димеров (электронных и колебательных) и далее может быть преодолена только переходом на самую нижнюю отталкивательную (разлётную) потенциальную кривую. Благодаря этой особенности эффективность преобразования вводимой в среду энергии в излучение высока, и в спектре излучения присутствуют только определенные группы переходов.

На рисунке 1 в упрощенной форме также показаны различные варианты излучения эксимеров. При очень низких давлениях (доли Торр) в спектре доминирует резонансная линия атомов. Далее при повышении давления в спектре наблюдаются две широкие полосы – так называемые I-й и II-й континуумы. Первый образован переходами с высоколежащих колебательных уровней эксимера. Он прилегает к длинноволновой стороне резонансной линии. Второй континуум формируется переходами из нижних колебательных уровней возбужденного состояния и, соответственно, располагается на большем удалении от резонансной линии в длинноволновую область.

Он доминирует при давлениях более 100 Торр и выше (рис. 2). Наличие того или иного континуума не зависит от способа возбуждения инертного газа [6, 7]. Таким образом, изменяя давление газа, можно получать ВУФ-излучение с различными спектральными параметрами (табл. 2).

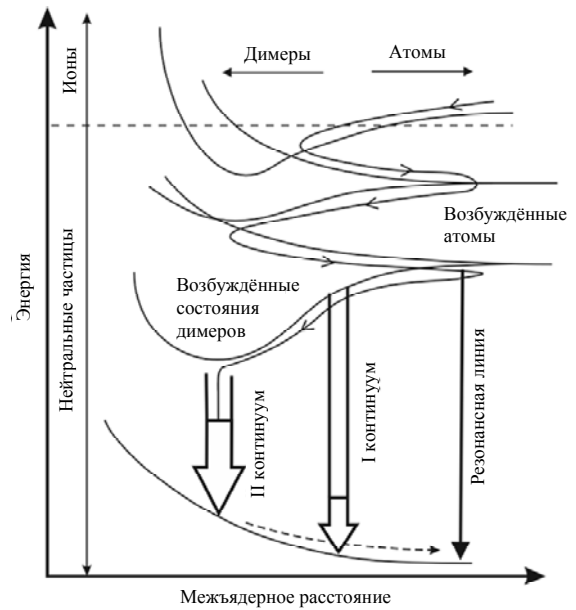


Рис. 1. Цепь реакций образования и распада димеров (восстановлено по [5, 6]). Сплошной линией со стрелками показана траектория безызлучательной релаксации верхних ионных и молекулярных состояний эксимеров

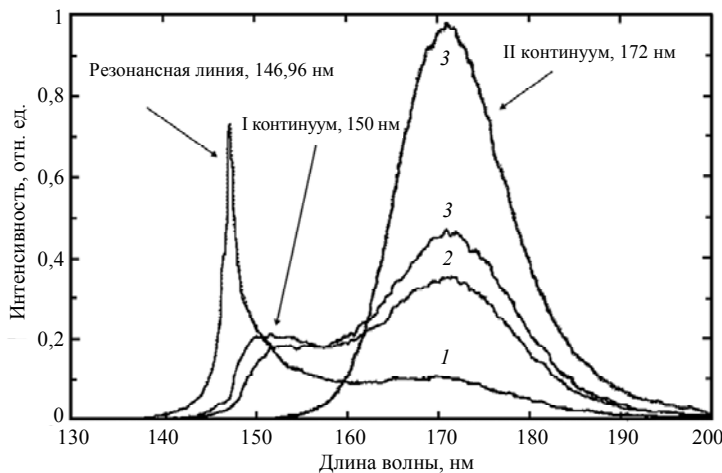


Рис. 2. Спектр излучения ксенона в барьерном разряде при различных давлениях: 1 – 37 Торр; 2 – 52 Торр; 3 – 75 Торр; 4 – 510 Торр (восстановлено по [7])

Таблица 2

Длины волн резонансного перехода и второго континуумов в различных инертных газах [8]

Элемент	Резонансный переход	Второй континуум (центр полосы)
He	60 нм	70–80 нм
Ne	74,4 нм	82 нм
Ar	106,7 нм	126 нм
Kr	123,6 нм	146 нм
Xe	147,0 нм	172 нм

Таблица 3

Максимумы наиболее интенсивных переходов различных эксиплексных молекул, отвечающих ВУФ-диапазону спектра [9]

R	X	Пиковые длины волн ВУФ-излучения молекулы RgX* на различных переходах, нм			
		D _{1/2} → X _{1/2}	B _{1/2} → X _{1/2}	C _{3/2} → A _{3/2}	D _{1/2} → A _{1/2}
Ne	F	106	108	110	111
Ar	F	185	193		
Ar	Cl		175		195
Ar	Br		165	172	183
Kr	I		190	195	228

В случае эксиплексных молекул механизм формирования излучения принципиально не меняется, но наиболее интенсивные полосы излучения как правило сдвигаются в УФ-диапазон, за исключением ряда переходов, перечисленных в таблице 3.

Первые хорошо разрешенные молекулярные спектры эксимера Ne₂* в области 50–110 нм были зарегистрированы ещё в 1930 г. [10], а к 1963 г. были открыты широкополосные непрерывные континуумы в других газах – Ne, Ar, Kr, H₂ [11–14]. Через 10 лет была получена излучение эксиплексных молекул XeO*, XeBr*, XeCl*, ArF*, KrCl*, KrF* [5].

Всё это стало научной базой для создания эксилламп – ВУФ-источников излучения на эксимерных молекулах [15–17], описания ю которых будет посвящен п. 4.

3. Источники линейчатого ВУФ-излучения

Источники линейчатого спектра (которые иногда называют резонансными лампами) обслуживают две актуальные потребности: 1) для калибровки спектральной аппаратуры необходимо иметь эталонные спектры линейчатого излучения с известной полушириной линий; 2) в ряде аналитических приложений, например, в хроматографии и газоанализе, необходимо иметь надёжные источники для фотоионизации газовых компонент, что также хорошо обеспечивается линейчатым ВУФ-излучением [18]. Хотя энергетическая светимость излучения таких источников как правило не превышает десятых или сотых долей мВт/см², но в указанных приложениях этого достаточно, лишь бы спектр излучения был линейчатым и отвечал ВУФ-области. Допол-

нительными требованиями к таким лампам являются стабильность их лучистого потока и гарантированный полезный срок службы.

Первоначально для получения линейчатых спектров применялись дуговой и тлеющий разряды, включая капиллярный разряд. Сегодня источники на капиллярном разряде также позволяют получать спектры многозарядных ионов Ne, Ar, Kr, Xe, в т. ч. в диапазоне $30 < \lambda < 400$ нм [19]. Но поскольку взаимодействие электродов и других элементов разрядной оснастки с рабочим газом изменяет спектральный состав излучения, в настоящее время для указанных выше приложений чаще используются т. н. безэлектродные ВУФ-лампы, в которых электроды размещаются на внешней поверхности колбы с газом, а возбуждение осуществляют ВЧ-разрядом на частотах 10^5 – 10^7 Гц. Принципиальные конструкции таких ламп показаны на рисунке 3(a–z). В зависимости от формы и расположения электродов ВЧ-разряд может быть индуктивным (рис. 3(a, б)) или ёмкостным (рис. 3(в, z)).

При индукционном способе возбуждения используют катушку-соленоид (индуктор), через которую пропускают переменный/импульсный ток (рис. 3(a, б)). Внутри индуктора создаётся переменное/импульсное магнитное поле, направленное вдоль оси индуктора. Оно индуцирует вихревое электрическое поле. Его силовые линии представляют собой концентрические окружности, благодаря чему ток в среде является замкнутым. А так как здесь определяющим фактором поддержания разряда является магнитное поле, описанный способ называют разрядом Н-типа. На низких частотах он иницируется плохо, так как вихревое электрическое поле падает с уменьшением частоты. Поэтому традиционно для осуществления разряда Н-типа применя-

ются ВЧ-частоты и для его обозначения используют термины «индукционный разряд» и «микроволновой разряд» [20].

При ёмкостном способе возбуждения переменное/импульсное напряжение подаётся на электроды, которые могут иметь плоскую (рис. 3(а)) или цилиндрическую (рис. 3(б)) форму. Поскольку система «электрод/плазма» при высокочастотном и сверхвысокочастотном возбуждении (как при наличии изолирующих электроды диэлектриков, так и без них) ведёт себя по отношению к переменному напряжению как ёмкость, отсюда и название – разряд Е-типа.

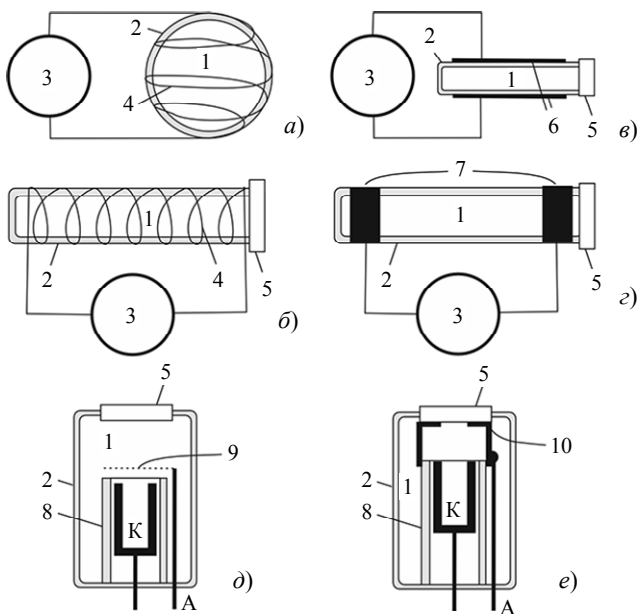


Рис. 3. Конструкции некоторых источников линейчатого ВУФ-излучения для разряда Н-типа (а, б), Е-типа (в, г) и тлеющего разряда в полой катоде (д, е): 1 – возбуждаемый объём; 2 – колба; 3 – генератор; 4 – индуктор; 5 – выходное окно; 6 – плоские электроды; 7 – кольцевые электроды; 8 – электроизоляционная трубка; 9 – кольцевой электрод; 10 – цилиндрический электрод с центральным отверстием; А – анод; К – катод. (Пояснения даны в тексте)

Газовой средой таких ламп обычно являются смеси буферного инертного газа (при давлении до 1–3 Торр) с рабочим веществом (см. табл. 1), которое переводится в газообразную форму разрядом до давления в диапазоне от 0,01 до 1 Торр. В качестве буферного газа часто используется аргон, т. к. атомно-эмиссионный спектр ArI не содержит спектральных линий в диапазоне длин волн 110–250 нм. Из-за низкого содержания паров элементов в разогретой среде ресурс таких ис-

точников хотя и выше ресурса электродных ламп, но всё же ограничен выделениями примесей из конструктивных элементов колбы.

Высокочастотное возбуждение также широко применяется для получения резонансных линий Kr (123,6, 116,5 нм), Xe (147, 129,5 нм), линии Лайман- α водорода (121,6 нм) и Ag (106,7, 104,8 нм). Изготавливать такие источники проще, чем лампы на парах элементов, но спектры излучения всё равно подвержены загрязнению за счёт резонансных линий O(I), N(I) и C(I) – элементов, источником которых служат чаще всего стенки колбы.

Эмпирически продолжительность работы τ безэлектродных ламп в зависимости от мощности разряда оценивается как $\tau \sim W^\alpha$, где $\alpha = 2 \div 3$ [21]. Поэтому для увеличения полезного срока службы мощность возбуждения стараются снижать. Для безэлектродных ламп ультрафиолетового и видимого диапазонов спектра это позволяет получать ресурс в несколько сотен тысяч часов. Но в случае ВУФ-ламп ресурс дополнительно ограничен потерей прозрачности материала выходных окон или колб под действием жёсткого ультрафиолета. Полезный срок службы в этом случае составляет от сотен до нескольких тысяч часов.

Отдельный вопрос, важный для разработки источников ВУФ-излучения, касается вывода излучения из разрядного объёма для проецирования его на целевые объекты. Его удалось частично разрешить, когда для вывода излучения стали использовать выходные окна из монокристаллов LiF и MgF₂, оптически прозрачных на $\lambda > 120$ нм. Также были разработаны новые сорта кварца, из которых можно делать либо выходные окна, либо готовые колбы. Для $\lambda > 160$ нм можно использовать как иностранные марки стекла (Suprasil Standard, GE 021, GE 214, Lithosil Q0/Q1, SQ1, Dynasil 1100), так и отечественную марку КУ-1. Они обладают различной стойкостью к действию ВУФ-излучения, что обусловлено как примесями, так и структурой наводимых излучением дефектов [22].

При низких энерговкладах в газовую среду и соблюдении технологии изготовления источника излучения даже в случае тлеющего разряда можно добиться приемлемых для практических приложений параметров ВУФ-источника линейчатого спектра, что реализо-

вано в лампах с полым катодом. Типичные конструкции таких ламп показаны на рисунке 3 (d, e). Они содержат колбу с окном для выхода излучения, анод и катод. Последний выполнен в форме полости, открытой со стороны выхода излучения. Катод может быть помещён в электроизоляционную трубку. Анод может иметь форму штыря, цилиндра или кольца, расположенного в непосредственной близости к открытому отверстию катода. В классических лампах полого катода (например, см. рис. 3(d)) при подаче постоянного напряжения на электроды формируется тлеющий разряд с формированием потока заряженных ионов буферного газа, бомбардирующих катод и выбивающих из него атомы металла. Далее атомы металла возбуждаются в результате столкновений с другими атомами. Как результат – формируется излучение света на соответствующих переходах атома металла. Форму анода лучше выбирать цилиндрической с отверстием для пропускания излучения (рис. 3(e)), соосной с катодом, чтобы между анодом и катодом формировалась собирающая электронная линза, повышающая плотность электронов и интенсивность излучательных переходов над прикатодной областью.

С точки зрения получения ВУФ-излучения наиболее интересными являются лампы полого катода, формирующие линейчатое излучение инертных газов и ртути. При этом для формирования интенсивного излучения важным является не выбивание атомов из катода, а высокая плотность электронов в прикатодной области, а также их энергия, достаточная для возбуждения и ионизации атомов буферного газа:

Например, лампа ЛГР-1 заполнена смесью гелия (10 Торр) и паров ртути ($\sim 10^{-2}$ Торр). При энергопотреблении на уровне 0,15 Вт такая смесь обеспечивает набор спектральных линий ртути в диапазоне $115 < \lambda < 200$ нм, причём в интервале $115 < \lambda < 230$ нм спектр формируется в основном ионными линиями ртути Hg(II), в частности на $\lambda = 132,1, 133,1, 164,9, 184,9$ и $194,2$ нм [23].

Другая лампа ЛГАК-1, заполненная смесью He-N₂-Kr при 1 % содержании N₂ и 0,2 % содержании Kr, давлении 40 Торр и потреблении порядка 0,5 Вт, обеспечивает атомарные переходы атомов в вакуумном диапазоне

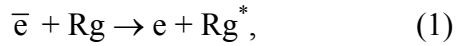
ультрафиолетовой области от 115 до 175 нм. Наиболее интенсивные переходы отвечают переходам Kr(I) – 116,5, 123,6 нм и N(I) – 149,2, 174,2 нм [24].

В настоящее время сроки службы ламп полого катода составляют примерно 1000 часов для ксеноновых и криптоновых ламп, а водородных – около 500 часов [25]. Замена стекла на керамические материалы позволяет повысить срок службы ВУФ-ламп полого катода до 5000 часов [26].

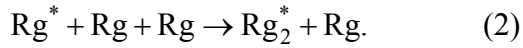
Стоит также отметить, что сохраняется интерес к ВУФ-излучению резонансной линии ртути ($\lambda = 184,95$ нм), формируемому классическим способом – в дуговом разряде амальгамной лампы низкого давления [27]. Это обусловлено тем, что указанное излучение по-прежнему рассматривается как перспективное для включения в процессы получения сверхчистой воды [28]. Практически важный аспект использования амальгамных ламп низкого давления состоит в совместном действии ВУФ- и УФ-излучения на длинах волн 184,95 и 253,65 нм, что нашло яркое проявление в задаче очистки воздуха от вредных примесей [29]. При этом ВУФ-излучение эффективно поглощается парами воды и кислородом, запуская цепочку реакций с образованием первичных радикалов и последующим образованием озона. В свою очередь озон хорошо поглощает УФ-излучение на длине волны 253,65 нм с образованием молекулы кислорода и атомарного кислорода, который вновь вступает в реакции. Благодаря этому комбинация ВУФ- и УФ-излучения позволяет эффективно окислять различные примеси. В настоящее время в России на станциях очистки сточных вод уже созданы и используются большие системы с производительностью 5 и 10 тыс. м³/ч, обеспечивающие удаление сероводорода и формальдегида из влажного воздуха [30, 31].

4. Эксимерные источники ВУФ-излучения

Не учитывая всю кинетику [6], упрощенно можно сказать, что формирование ВУФ-континуумов эксимерных молекул происходит в два этапа. На первом этапе требуется возбудить атомы инертного газа Rg (от англ. «Rare gas») электронным ударом



где \bar{e} – быстрый электрон, Rg^* – возбужденный атом инертного газа. И лишь потом в реакции трехчастичной ассоциации возникают эксимерные молекулы Rg_2^* :



Скорость реакции (2) пропорциональна квадрату концентрации атомов в основном состоянии, поэтому величина интенсивности и вид спектра излучения инертного газа сильно зависят от давления. При давлениях менее единиц Торр излучение формируется преимущественно за счёт резонансных переходов атомов инертного газа $Rg^* \rightarrow Rg + h\nu$, т. е. так же, как и в безэлектродных источниках линейчатого спектра. При повышении давления формируются I-й и II-й второй континуумы, интенсивность свечения которых возрастает кратно по сравнению с резонансным излучением (рис. 2). Поэтому ВУФ-континуумы эксимеров используются для решения задач, в которых необходима энергетическая светимость на уровне десятков-тысяч мВт/см², а монохроматичность излучения, свойственная источникам линейчатого спектра, не требуется. Это задачи фотохимического синтеза веществ, т. н. передового окисления органических веществ (от англ. *advanced oxidation processes*), аналитического приборостроения, изменения свойств поверхности, создания новых оптических материалов, имитации действия космического излучения на различные объекты, получения мутаций микроорганизмов, осушки природного газа и т. д. [32–37].

Типичные спектры эксимеров инертных газов показаны на рисунке 4.

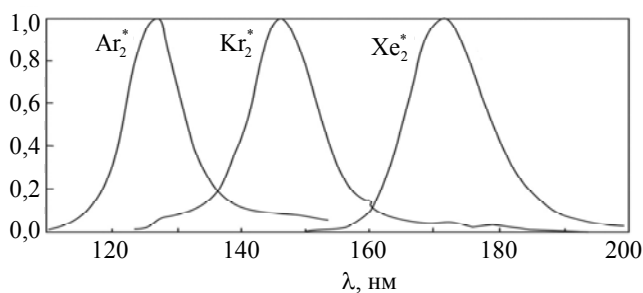


Рис. 4. Типичные спектры эксимеров инертных газов в барьерном разряде при давлениях более 130–200 Торр

Способы формирования ВУФ-континуумов эксимеров разнообразны [15]. Мы рассмотрим лишь два варианта: барьерный разряд (далее – БР) и объемный наносекундный разряд в промежутках с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля.

Эксилампы барьерного разряда сегодня получили наибольшее практическое применение. Первое авторское свидетельство на изобретение оптического прибора такого типа было получено в 1982 г. Г. А. Волковой с коллегами [38]. Конструктивно лампа состояла из отпаянной колбы с окном для вывода ВУФ-излучения и импульсного источника питания, т. е. являлась аналогом безэлектродной лампы планарного типа (рис. 3(в)), но для пробоя газа при повышенных давлениях использовались импульсы повышенного напряжения. Работа Волковой с коллегами была подхвачена группой авторов под руководством У. Когельшатца, которая за вторую половину 1980-х гг. разработала несколько конструкций эксиламп БР [39], а усилиями Т. Оппенлэндера и Г. Баума в конце 1990-х – начале 2000-х гг. ВУФ-эксилампы были введены в корпус передовых окислительных технологий [32, 37].

Различные конструкции эксиламп БР показаны на рисунке 5. Во всех случаях разряд зажигается в промежутке, содержащем один или два диэлектрических «барьера». Они ограничивают дозу энергии, вводимую в газ за один импульс, либо при смене знака напряжения, т.к. питание эксиламп БР может быть не только импульсным, но и знакопеременным. При этом при давлении рабочей среды десятки-сотни Торр в газовом промежутке реализуется специфическая форма разряда, состоящая из множества микрозарядов с плотностями тока в них от 0,1 до 1 кА/см² и временами протекания тока через них около единицы-десятки нс. Типичные для БР параметры неравновесной плазмы таковы: электронная температура $T_e = 1–10$ эВ, концентрация электронов $n_e \sim 10^{12}–10^{15}$ см⁻³, температура тяжелых частиц ≤ 100 °С. Величинами T_e , n_e можно управлять, варьируя геометрию разрядного промежутка, тип используемого диэлектрика, напряженность поля на барьерах и давление газа. Отчасти этим и объясняется разнообразие конструкций эксиламп БР – планарных (рис. 5(а, б)), коак-

сиальных (рис. 5(в, г)) и гибридных (рис. 5(д, е)).

В настоящее время наиболее популярной газовой средой для ВУФ-эксиламп является ксенон, что обусловлено весьма высокой эффективностью излучения II-континуума молекул Xe_2^* с максимумом на 172 нм, которая составляет 40 % [40]. Коаксиальные конструкции (рис. 3(в)) с этой средой широко применяются для очистки воды и инактивации

микроорганизмов, для чего используются прочные фотохимические реакторы, концепция которых была предложена Т. Опелэндером [41]. В этом случае целевая среда поступает во внутреннюю трубку 6, внутренний электрод 7 выполнен перфорированным, а внешний электрод 6 – сплошным, отражающим излучение. Это позволяет концентрировать излучение на оси трубки, индицируя те или иные реакции ВУФ-излучением.

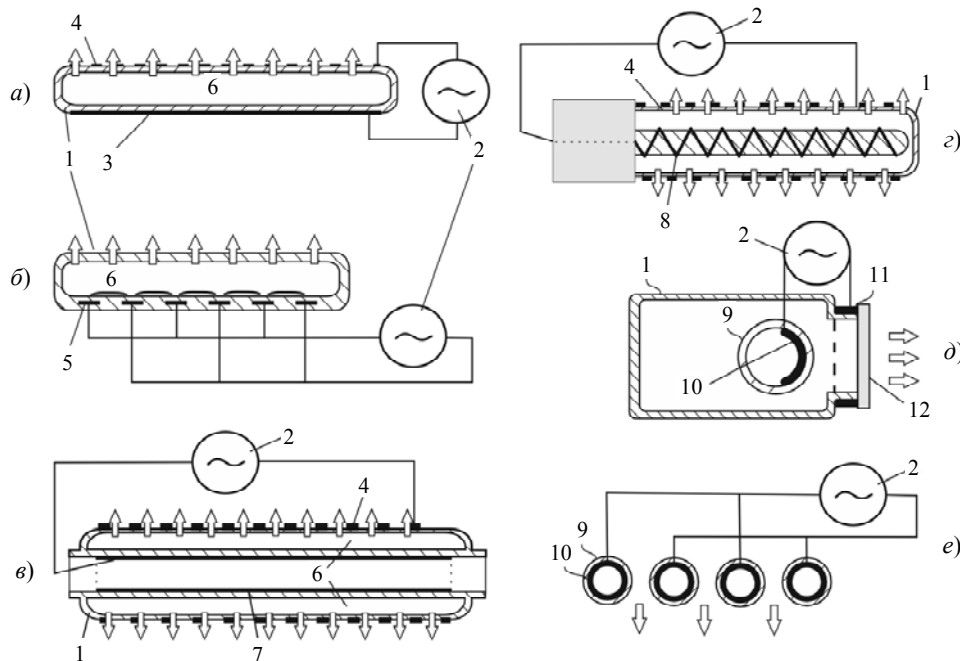


Рис. 5. Конструкции эксиламп барьерного разряда планарного (а, б), коаксиального (в, г) и гибридного (д, е) типов: 1 – колба; 2 – источник питания; 3 – сплошной плоский электрод-отражатель; 4 – перфорированный электрод; 5 – фольговый электрод, впаянный в стенку колбы; 6 – газовая среда; 7 – отражающий сплошной трубчатый электрод; 8 – внутренний спиральный или сетчатый электрод; 9 – диэлектрическая трубка; 10 – сегментированный (д) или трубчатый (е) электрод; 11 – кольцевой электрод; 12 – выходное окно. Направление вывода излучения показано белыми стрелками

Коаксиальные конструкции, показанные на рисунке 3(г), легли в основу производства линейки Xe_2 -эксиламп XERADEX [42], имеющих сроки службы от 1500 до 2500 часов в зависимости от условий эксплуатации. При сроке службы 2500 часов такая лампа обеспечивает энергетическую светимость в десятки мВт/см^2 .

Планарная геометрия (рис. 5(а, б)) используется как для непосредственного получения ВУФ-излучения возбужденных димеров ксенона, так и для замены флуоресцентных ламп дневного света. В первом случае уже

созданы плоские лампы размером 10×10 см, обеспечивающие среднюю мощность $\sim 31,5$ Вт на смеси Xe-Ne при давлении 550 Торр в форсированном режиме эксплуатации. Прогнозируется, что, обладая эффективностью преобразования электрической энергии в ВУФ-излучение ~ 20 % и плоским фронтом облучения эти лампы «впоследствии могут оказать существенное влияние на ВУФ-фотонику» [43].

Также различные конструкции эксиламп использованы в Институте сильноточной электроники СО РАН для разработки и при-

менения облучателей на их основе в 2003–2023 гг. [15, 16, 44].

Другое применение Хе₂-эксиламп – замена ртутьсодержащих флуоресцентных ламп на безопасные источники света. Например, существует линейка плоских прямоугольных панелей PLANON, вес которых варьируется от 400 г до 1,7 кг, а размеры светоизлучающей части составляют 231 на 174 мм и выше. Внутренняя оболочка панелей покрыта фосфором, обеспечивающим конверсию ВУФ-излучения молекул Хе₂^{*} в белый цвет. Продуцируемые ими интенсивные световые поля можно использовать, например, для освещения в кинематографии. Помимо высокой эффективности, по сравнению с ртутными люминесцентными лампами с горячим или холодным катодами, эти облучатели обеспечивают работу в широком диапазоне температур окружающей среды (от –25 до +85 °С) без заметного снижения интенсивности излучения.

Для задач, в которых требуется локальная засветка можно использовать конструкцию, показанную на рисунке 5(д). Такая лампа на возбужденных димерах ксенона обеспечивает энергетическую светимость от 4,5 до 30 мВт/см² при длине питающего кабеля, подходящего от лампы к источнику питания, 1,5 м. Полученные величины энергетической светимости были, по крайней мере, на 20 % выше аналогичных величин, полученных в источниках барьерного разряда других конструкций [45].

Как уже указывалось, при необходимости облучения на длинах волн короче 180 нм необходимо использовать кристаллические материалы окон. Но в задачах облучения больших целевых поверхностей или объёмов это неприменимо, и для её решения применяют т. н. безоконные конструкции (рис. 5(е)). При этом целевые объекты находятся непосредственно в рабочем газе, в котором осуществляется БР. Это позволяет исключить потери ВУФ-излучения при его транспортировке от лампы к целевому объекту. Например, в [46] была предложена безоконная эксилампа с апертурой излучающей области ~530 см². В отличие от конструкции, показанной на рисунке 5(е), БР формировался между барьерами и внешней сеткой, либо проволочками из нержавеющей стали (катод). Как результат было

продемонстрировано формирование континуумов инертных газов в диапазоне давлений от сотен Торр до атмосферы. Наибольшие энергетическая светимость и эффективность излучения была достигнута для молекул Хе₂^{*} при давлении 380 Торр, составляя 320 мВт/см² и ~45 % в полный телесный угол, соответственно. В случае Кг₂^{*} молекул при давлении 1 атм эффективность излучения составила ~25 %. Для молекул Аг₂^{*} энергетическая освещённость на расстоянии 2 см от поверхности лампы составила 1,6 мВт/см² при полной мощности ВУФ-излучения ~0,8 Вт.

Стоит отметить, что помимо БР для формирования ВУФ-континуумов инертных газов применяются и другие способы возбуждения. Так, в [47] была описана лампа полого катода марки Аг/СаF₂, разработанная специально для использования в фотоионизационных детекторах. При умеренном давлении аргона (~18 Торр) она формирует ВУФ-континуум с максимумом на $\lambda = 126$ нм и обеспечивает лучистый поток ~10¹³ фотонов/с.

Для оценки применимости эксимерных ламп в фотолитографии предпринималось несколько тестовых исследований. Было отмечено, что хотя эксилампы БР позволяют освещать большие площади целевых объектов, создать систему с высокими интенсивностью и равномерностью освещения сложно [48]. Для практической литографии необходимы более мощные «точечные» источники, в качестве которых могут выступать интенсивные источники на основе горячей плазмы (п. 5), либо эксилампы на основе диффузного разряда с предыонизацией убегающими электронами, хотя в этом случае вопрос до конца ещё прояснён. Последние формируют мощное ВУФ-излучение переходов гомо- и гетероядерных димеров инертных газов. Возбуждение в этом случае осуществляется высоковольтным наносекундным разрядом в промежутках с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля [49] – в газонаполненных диодах, выполненных в геометрии «остриё-плоскость» (см., например, рис. 6(а, б)) или «остриё-остриё» (см., например, рис. 6(в, г)). Для этого используют межэлектродные зазоры длиной от нескольких сантиметров до нескольких десятков

сантиметров, импульсы напряжения наносекундной длительности с амплитудой десятки сотни киловольт и скоростью нарастания $10^9\text{--}10^{13}$ В/с. Вследствие интенсивной предварительной ионизации во всем объеме высокоэнергетичными (в том числе убегающими) электронами и высокой скорости энерговода (удельные мощности возбуждения ~ 100 МВт/см³), в разрядном промежутке обеспечиваются условия для формирования неравновесной низкотемпературной плазмы, в которой с высокой эффективностью формируются возбужденные димеры инертных газов [50–52].

Так, для диффузного высоковольтного наносекундного разряда в чистых газах Ar, Kr и Xe при давлениях порядка атмосферного и выше было показано, что в спектральном диапазоне 120–850 нм основная доля энергии спонтанного излучения плазмы сосредоточена в полосах вторых континуумов гомоядерных димеров Ar_2^* , Kr_2^* и Xe_2^* с максимумами на длинах волн $\lambda = 126, 146$ и 172 нм, соответственно (см. рис. 7). При этом достигнутая пиковая плотность мощности излучения составила ~ 1 МВт/см³ для димера Xe_2^* при давлении 12 атм [53].

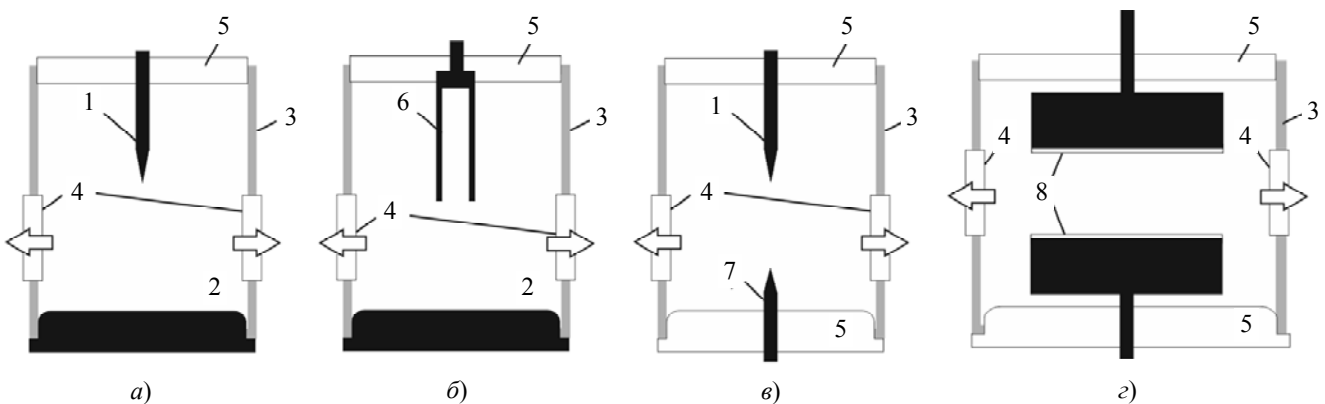


Рис. 6. Конструкции электродных узлов установок с высоковольтным наносекундным разрядом в промежутках с резко неоднородным распределением напряженности электрического поля: 1 – острый высоковольтный катод; 2 – плоский анод; 3 – разрядная камера; 4 – выходные окна; 5 – изолятор; 6 – трубчатый высоковольтный катод; 7 – острый анод; 8 – лезвийные электроды. Направление вывода излучения показано белыми стрелками

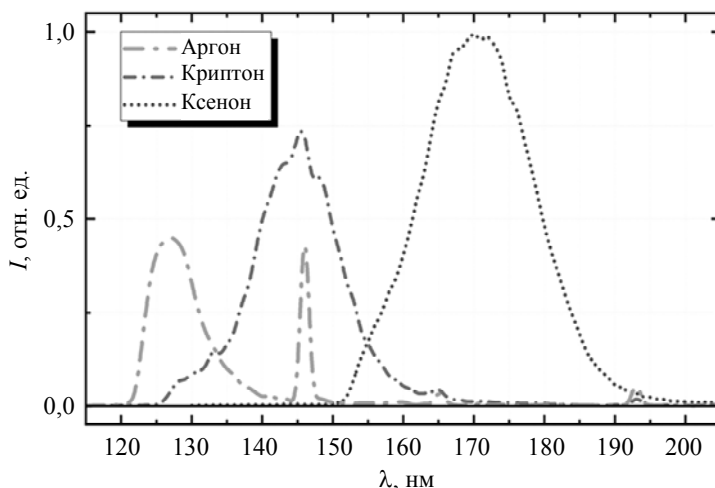


Рис. 7. Спектральное распределение энергии излучения плазмы диффузного высоковольтного наносекундного разряда в Ar, Kr и Xe при давлении 1,2 атм [51]

Таким образом, в зависимости от давления газа в диоде данный способ возбуждения позволяет получать мощные (сотни кВт) импульсы спонтанного ВУФ-излучения с длительностью от сотен до единиц наносекунд.

Выше упоминалось, что для ряда практических приложений представляют интерес устройства, обеспечивающие вынужденное ВУФ-излучение. Они должны быть более простыми и дешёвыми в производстве и эксплуа-

тации по сравнению с уже реализованными ВУФ-лазерами на основе инертных газов с накачкой электронным пучком [54, 55]. Поэтому в настоящее время как одна из альтернатив рассматривается способ создания активной среды, основанный на возбуждении чистого тяжелого инертного газа при давлении несколько атмосфер в протяженном промежутке с лезвийными электродами (рис. 6(в)) мощными наносекундными импульсами напряжения в условиях генерации высокоэнергетичных электронов [56]. Основное препятствие для его реализации – наступающая время от времени в этих условиях контракция разряда, вызывающая срыв процессов формирования возбужденных димеров инертных газов.

С другой стороны, известно о возможности получения ВУФ-излучения при электро-разрядном возбуждении смесей инертных газов, в результате чего в эмиссионном спектре разрядной плазмы наблюдаются полосы, обусловленные спектральными переходами гетероядерных димеров таких как He-Ne, Ar-Xe, Xe-Kr, Ar-Kr [57, 58]. Наибольший интерес представляет ситуация, когда доля более тя-

желого газа (например, Xe) в смеси (например, Ar-Xe или He-Xe) составляет $\sim 0,1\%$. В этом случае возбуждение, в том числе и диффузным разрядом приводит к возникновению в спектре излучения плазмы узких полос, локализованных в области, отвечающей резонансным атомным переходам чистых более тяжелых газов (в данном случае Xe) (см. рис. 8(а, б)) [59, 60]. При этом перспективность использования плазмы диффузного наносекундного разряда состоит в том, эффективное образование гетероядерных димеров происходит при более низких давлениях (порядка атмосферного), чем в случае чистых газов, а испускаемое ими узкополосное ВУФ-излучение является не менее мощным. Так, в [60] было получено усиление в полосе при возбуждении вблизи длины волны 147 нм (см. рис. 8(в)).

Перечисленные результаты указывают на перспективность использования плазмы диффузного разряда в смесях инертных газов для получения интенсивного спонтанного и вынужденного излучения в ВУФ-диапазоне спектра.

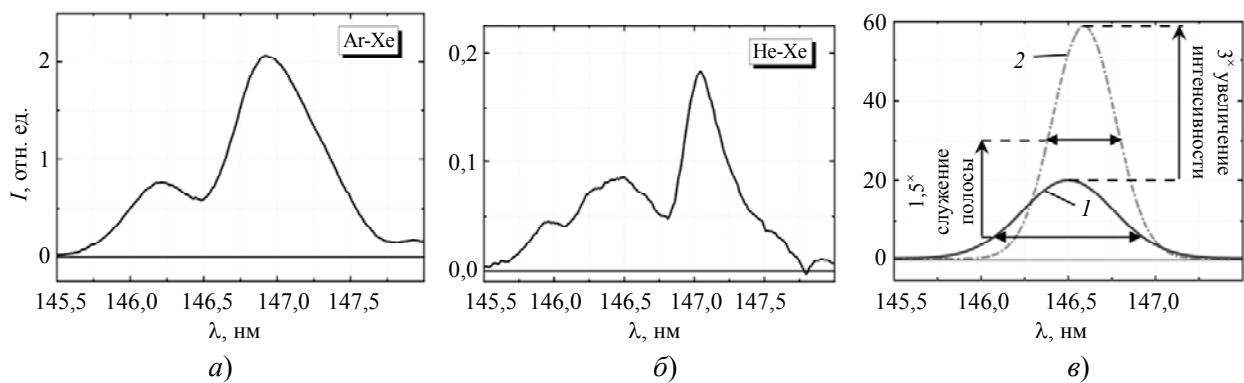


Рис. 8. Спектральное распределение энергии излучения в полосах гетероядерных димеров $ArXe^*$ и $HeXe^*$ плазмы диффузного высоковольтного наносекундного разряда в смесях Ar-Xe He-Xe при давлении 375 Торр и содержании Xe $\sim 0,1\%$ (а, б). Спектральное распределение энергии излучения гетероядерного димера $ArXe^*$ из плазмы диффузного разряда в смеси Ar-Xe (в): общее давление смеси 400 Торр; примесь Xe – 1%; $d = 10$ мм; высоковольтный катод – лезвие длиной 30 мм; заземленный анод – лезвие длиной 50 мм; выходные окна: 1 – окно из CaF_2 , 2 – окно из CaF_2 и Al зеркало

5. Высокотемпературные источники ВУФ-излучения

Для применения ВУФ-излучения в фотолитографии в диапазоне $10 < \lambda < 50$ нм в настоящее время необходимы источники, обеспечивающие высокий удельный энерго-вклад в небольшие объёмы рабочего вещества, такие, чтобы суммарный выход излучения со-

ставлял сотни Вт. Такое излучение от интенсивного «точечного» источника передаётся на систему зеркал, обладающих высоким коэффициентом отражения, и далее проецируется на узел маски и собственно на образцы с фоторезистом для получения чипа. В качестве зеркал чаще всего применяются брэгговские зеркала на атомно-гладких поверхностях с коэффициентом отражения Ru/Be зеркала на

11,2 нм ~72 % и многослойные Mo/Si зеркала с коэффициентом отражения на 13,5 нм ~71 % [61–63].

Получить интенсивное ВУФ-излучение в указанном диапазоне спектра можно разными путями. Условно различают *разрядные* и *лазерные* источники.

Общим для разрядных систем является большая накапливаемая энергия – до нескольких десятков Дж – которая далее преобразуется в разряд того или иного типа в газовой среде низкого давления (чаще всего – в ксеноне) за несколько десятков наносекунд. Достижимая при этом пиковая мощность может превышать 1 МВт при величинах тока от единиц до десятков кА. Как результат плазма разряда подвергается сжатию, что реализуется чаще всего в капиллярном разряде и Z-пинчах. Однако из-за того, что энерговыделение происходит в небольших объемах, происходит неизбежная эрозия электродов и прочих элементов оснастки, что в перспективе ограничивает возможности технологии.

Лазерное возбуждение, в отличие от разрядного, позволяет концентрировать энергию возбуждения в небольшом объеме – на целевых мишенях, – что было весомым аргументом для его использования при разработке коротковолновых систем для фотолитографии. Поскольку время жизни в верхнем состоянии химического элемента обычно измеряется в пикосекундах, передача энергии атомам мишени в идеале должна быть максимально быстрой.

В настоящее время наибольшее распространение получила схема возбуждения, в которой парные импульсы излучения CO₂-лазера в глубоком вакууме действуют на расплавленные капли олова с размерами менее 1 мм (рис. 9(a)). Импульсы лазера синхронизируются с попаданием капли в фокус оптической системы, обеспечивая испарение материала капли, а затем и формирование облака многократно ионизованной плазмы. Проведенные исследования показали, что среди многозарядных ионов – O(VI), Xe(XI), Li(III), Sn(VIII–XIII) – для получения интенсивного спектра энергетически выгодно применять олово, что обусловлено высокой квантовой эффективностью электронных резонансных переходов плазмы на основе Sn, а также общей эффективностью выхода излучения [64]. Для формирования из-

лучения таких ионов плазму необходимо нагревать до температуры 20–40 эВ [65]. Пример спектра излучения, полученного в парах олова, дан на рисунке 10. И, хотя использование Sn закрепилось на коммерческом уровне, исследования оптических свойств других химических элементов, подвергнутых действию мощных лазерных полей, продолжают. Считается, что предпочтительными конфигурациями электронов для формирования плазмы многозарядных ионов, являются водородоподобные (1 электрон), неоноподобные (10 электронов) и никелеподобные (28 электронов) ионы.

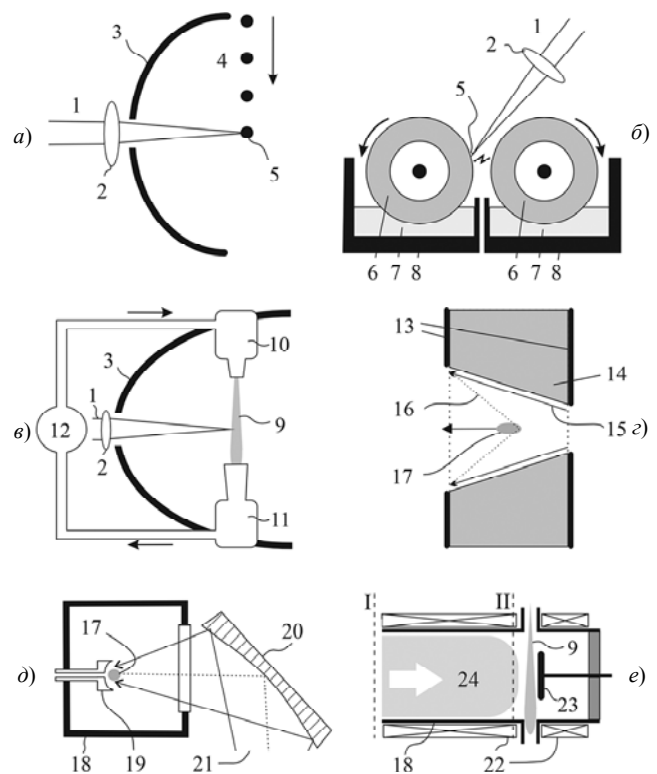


Рис. 9. Конструкции высокотемпературных источников ВУФ-излучения: 1 – лазерный пучок; 2 – фокусирующая; 3 – отражатель; 4 – капли расплава; 5 – тонкий слой расплава в месте фокусировки лазерного излучения; 6 – круглые вращающиеся электроды, один из которых заземлен, а второй – высоковольтный; 7 – жидкое олово; 8 – корпус ванны с теплообменником; 9 – газовая струя; 10 – сопло Лавала для напуска газа; 11 – газоприёмник; 12 – блок рекуперации газа; 13 – плоские электроды; 14 – керамика; 15 – поверхностный ток; 16 – ударная волна; 17 – плотная плазма; 18 – вакуумная камера; 19 – короткофокусное зеркало со встроенным соплом; 20 – ТГц-зеркало; 21 – поток ТГц-излучения; 22 – соленоиды продольного магнитного поля; 23 – вольфрамовая пластина для локализации воздействия; 24 – плазменный поток

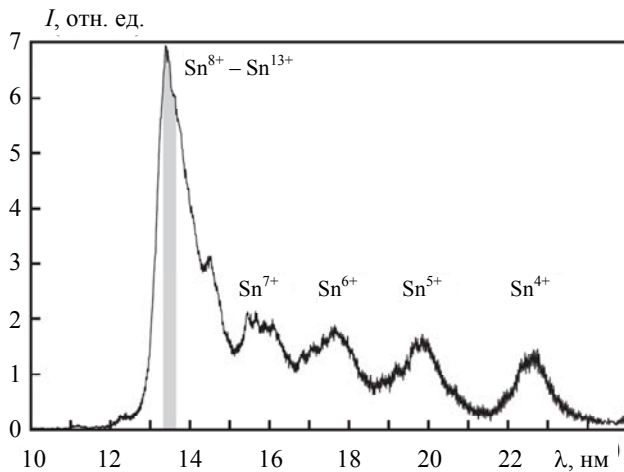


Рис. 10. Пример спектра многозарядной плазмы олова (восстановлено по [66]). Серым цветом выделен участок длин волн, перспективный для ВУФ-фотолитографии

Прогнозируется, что в будущем в лазерной схеме возбуждения станут всё чаще применяться мощные твердотельные лазеры среднего инфракрасного диапазона [67].

Помимо разрядных и лазерных, существует множество гибридных схем возбуждения, формирующих горячую плазму многозарядных ионов. Например, лазерная схема может быть дополнена разрядной. В [68] излучением K_rF- или Nd : YAG-лазеров (248 или 1064 нм) действовали на тонкий слой расплавленного олова на кромке одного из электродов, выполненных в форме вращающихся дисков и погруженных в ванны с жидким расплавом (рис. 9(б)). Лазерное излучение было инициатором разряда между электродами, подключённым к LC-генератору с двумя звеньями сжатия на магнитных ключах. Было показано, что использование Nd : YAG-лазера обеспечивает энергозатраты в плазму на уровне 60 кВт при частоте следования импульсов до 7 кГц, а мощность ВУФ-излучения в спектральной в $\Delta\lambda = 13,5 \pm 0,135$ нм составляет ~ 1000 Вт в пересчете на угол 2π ср.

Как отмечается в [69] перспективным способом получения ВУФ-излучения является разряд в сверхзвуковой струе ксенона высокого давления с возбуждением Nd : YAG-лазером с максимальной энергией излучения в фокусе $9 \cdot 10^{11}$ Вт/см². В этих условиях доминирующими в ВУФ-спектре излучения являются переходы ионов $\text{Xe}^{+10} \dots \text{Xe}^{+13}$, а ключевым фактором, определяющим ионизационный состав

плазмы, является плотность газовой струи. Эффективность преобразования лазерного излучения в ВУФ-излучение в окрестности $\lambda = 11,2$ достигает 1–4 %, что делает данный способ перспективным кандидатом для использования в фотолитографии. Поскольку плотность потока излучения, поглощенного поверхностью сопла, весьма велика, это ведёт к его нагреву и эрозии. Поэтому для повышения ресурса работы в патенте [70] излучающую ячейку оснастили газоприёмником, расположенным на оси газовой струи (рис. 9(в)). Такая конструкция, обеспечивая «перехват» тепловыделения в струе, заметно увеличивает срок службы сопла и устройства в целом. В целом, по сравнению с источником на ионах Sn, эта система при сравнимой эффективности, проще конструктивно и минимизирует загрязнение оптических элементов разлетающимися остатками вещества-мишени.

Другая гибридная схема, в которой гидродинамический эффект дополняет разрядное возбуждение, показана на рисунке 9(г). Здесь ток импульсного разряда (скорость нарастания $\Delta I/\Delta t \sim 10^{12}$ А/с, пиковая величина 30–50 кА) протекает по поверхности керамической разрядной полости и формирует сходящуюся ударную волну. В свою очередь она создаёт движущийся «сгусток» горячей плазмы. Это так называемый быстрый конический разряд – «родственник» разряда в цилиндрическом капилляре. В среде аргона низкого давления (0,6 Торр) он является источником ВУФ-излучения ионов Ag(IX), сосредоточенного в окрестности $\lambda \sim 11$ нм [71]. Эта спектральная линия излучается в течение первых 50–60 нс. При замене аргона на ксенон в ВУФ-спектре горячая плазма существует первые 150 нс и наиболее интенсивны переходы ионов Xe(XI) [72], излучающие в полосе $\Delta\lambda \sim 13$ –14 нм.

Хотя из-за сравнительно низкой интенсивности излучения источники излучения многозарядных ионов на основе капиллярного разряда и неприменимы в фотолитографии, как полагают авторы [73], они могут использоваться в аналитических целях, в т. ч. при создании микроскопов для исследования наноструктур, включая различные биообъекты.

Рассмотрим ещё один многообещающий подход для формирования мощных источни-

ков ВУФ-излучения многозарядных ионов. Он стал возможным сравнительно недавно благодаря прогрессу в создании мощных гиротронов терагерцевого диапазона частот, обеспечивающих импульсные мощности в несколько сотен кВт [74]. Такие гиротроны позволяют формировать разряды с сильнонеравновесной плазмой ($n_e \sim 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 100 \text{ эВ}$), параметры которой являются оптимальными для формирования многозарядных ионов [75].

Типичный подход для конверсии СВЧ-излучения в горячую плазму можно условно представить как двухэтапный процесс. Вначале с помощью вакуумно-дугового источника в вакуумной камере создаётся плазма паров химического элемента. Она поступает в открытую магнитную ловушку и за время пролёта через ловушку дополнительно подогревается СВЧ-излучением гиротрона. Этим обеспечивается дополнительная ионизация ионов с последующим спонтанным высвечиванием. Использование миллиметрового излучения и миниатюрных вакуумно-дуговых плазмогенераторов позволяет создавать излучающие области с поперечными размерами $\sim 1 \text{ мм}$ и плотностью плазмы до 10^{14} см^{-3} , благодаря чему до 10 % СВЧ-излучения преобразуется в излучение в диапазоне от 7 до 15 нм. Например, при инъекции олова из вакуумно-дугового разряда в такой системе была получена мощность излучения 50 Вт на 13,5 нм в полосе $\pm 1 \%$ [76].

Повышение частоты нагревающего излучения до ТГц величин позволит получать параметры плазмы, необходимые для создания «точечного» источника ВУФ-излучения. Пример экспериментальной установки для формирования ВУФ-излучения «точечной» плазмы с ТГц-возбуждением потока газа, показан на рисунке 9(д). В [77, 78] с её помощью возбуждали аргон. Излучение гиротрона (100 кВт, 0,67 ТГц) направляли в вакуумную камеру и фокусировали до уровня 40 МВт/см^2 вблизи центра короткофокусного зеркала. Через сопло диаметром 15 мкм в середине зеркала в камеру напускали аргон с расходом $\sim 10^{20}$ частиц/с. Мощность терагерцовой волны и параметры подачи газа были настроены таким образом, чтобы выполнялись условия пробоя вблизи фокуса параболического зеркала

ла в газовой струе с масштабом неоднородности потока порядка 1 мм. В этом случае разряд формируется у узкой «точечной» области. Исследования показали, что такая схема обеспечивает мощность ВУФ-излучения «точечных» областей до 10 кВт в диапазоне $112 < \lambda < 180 \text{ нм}$.

Следует отметить, что возбуждение газовых мишеней в условиях гиротронного подогрева плазмы также может использоваться для получения как линейчатого, так и молекулярного спектров ВУФ-излучения. Например, в [79] СВЧ-излучение с частотой 28 ГГц и мощностью до 5 кВт использовали для поддержания разряда в водороде в открытой магнитной ловушке в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР-разряд). В этих условиях в диапазоне $\lambda = 120 - 160 \text{ нм}$, отвечающего линии Лайман- α водорода (121,6 нм) и молекулярным переходам водорода, была достигнута мощность излучения 0,75 Вт при эффективности 20 %.

Ещё один способ получения ВУФ-излучения в случае газообразных мишеней состоит в том, что инжектируемый в вакуумную камеру плазменный сгусток с высоким энергосодержанием (10–100 кДж) разгоняют в магнитном поле до скоростей $\sim 10^7 \text{ см/с}$, а затем либо сталкивают с таким же встречным потоком, либо со струёй целевого газа [80–82]. В частности, сталкиваясь с газовыми струями плазменные сгустки способны отдавать им свою кинетическую энергию, которая преобразуется в тепловую энергию плазмы. Схема такой установки показана на рисунке 9(е). Генерируемый ускорителем плазменный поток с энергосодержанием $\sim 50 \text{ кДж}$ транспортируется по плазмопроводу с нарастающим магнитным полем с индукцией от 1 Тл вблизи места старта I до 2 Тл в целевой зоне II, где воздействует на газовую струю азота или неона, сформированную плоским соплом Лавалья вблизи вольфрамовой пластины, локализуя зону взаимодействия. Максимальная плотность частиц в струе $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Показано, что образующаяся в месте столкновения плазма является мощным источником мягкого рентгеновского и вакуумного ультрафиолетового излучения в спектральных диапазонах $\lambda = 3 - 30 \text{ нм}$ в случае азотной струи и 10–60 нм – в случае неоновой струи. Полная энергия из-

лучения составила ~ 2 и ~ 3 кДж, соответственно. Проведенные исследования закладывают научные основы для создания компактных источников рентгеновского и ВУФ-излучения на основе конверсии кинетической энергии плазменных потоков.

6. Заключение

Хотя ВУФ-фотоника и не является молодой отраслью, в последние 20 лет она получила второе дыхание. Этому способствовали несколько обстоятельств: сохраняющийся запрос на ВУФ-источники излучения, применяемые в аналитическом приборостроении, появление коммерческих эксиламп и потребность в коротковолновом излучении в фотолитографии. Проведенный обзор литературы свидетельствует, что исследования и разработки в области ВУФ-фотоники в Российской Федерации ведутся не менее активно, чем за рубежом. Более того, по ряду направлений (формирование ВУФ-излучения в системах с возбуждением электронно-циклотронным резонансом, при воздействии лазерного излучения или плазменных потоков на газовые струи, а также в диффузном высоковольтном наносекундном разряде) российские разработки занимают лидирующие позиции.

На данный момент переход к серийному выпуску мощных источников ВУФ-излучения тормозится материальными факторами: необходима разработка новых конструктивных материалов, стойких как к тепловой эрозии, так и к излучению. Это мешает переходу от экспериментальных установок к промышленным образцам и, одновременно, стимулирует новые прикладные исследования.

Если в условиях импортозамещения в стране появятся новые промышленные модели источников ВУФ-излучения это неизбежно приведёт к расширению ассортимента приложений ВУФ-излучения и простимулирует новые научные исследования, направленные на поиск новых приложений.

Ещё одно актуальное направление разработок, о котором стоит упомянуть – получение лазерной генерации на эксимерных молекулах инертных газов. Традиционно такую генерацию получали, применяя накачку электронным пучком, что ограничивало как возможности создания технологии, так и воз-

можности её применения. Но если будут созданы ВУФ-лазеры с упрощенной схемой накачки, то интерес к этой теме со стороны промышленности снова вернётся.

Авторы выражают надежду, что представленные в данном обзоре результаты позволят разработчикам осознанно выбирать объекты и предметы для последующих экспериментальных исследований и проектирования опытных образцов.

Работа выполнена в рамках
Государственного задания ИСЭ СО РАН,
проект № FWRM-2021-0014.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко В. И., Черкашина Н. И., Манаев В. А., Сидельников Р. В. / Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2018. № 11. С. 83.
2. Beckers J., van de Ven T., van der Horst R., Astakhov D. I., Vanine V. / Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 14. P. 2827.
3. Зайдель А. Н. Шрейдер Е. Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. – М.: Наука, 1976.
4. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд., доп. – М.: Наука, 1966.
5. Excimer Lasers / Ed. by Ch. K. Rhodes. – Berlin-Heidelberg-N.Y.: Springer-Verlag, 1979.
6. Герасимов Г. Н., Крылов Б. Е., Логинов А. В., Щукин С. А. / Успехи физических наук. 1992. Т. 162. № 5. С. 123.
7. Gellert B., Kogelschatz U. / Appl. Phys. B. 1991. Vol. 52. № 1. P. 14.
8. Boichenko A. M., Tarasenko V. F., Yakovlenko S. I. / Las. Phys. 2000. Vol. 10. № 6. P. 1159.
9. Cassasa M. P., Golde M. F., Kvaran A. / Chem. Phys. Lett. 1978. Vol. 59. № 1. P. 51.
10. Hopfield J. J. / Astrophys. J. 1930. Vol. 72. P. 133–145.
11. Tanaka Y. / J. Opt. Soc. Amer. 1955. Vol. 45. P. 710.
12. Wilkinson P. G., Tanaka Y. / J. Opt. Soc. Amer. 1955. Vol. 45. P. 344.
13. Takamine T., Suda T., Tanaka Y. / Sci. Pap. I.P.S.R. (Tokyo). 1939. Vol. 35. P. 447.
14. Tanaka Y., Zelikoff M. / J. Opt. Soc. Amer. 1954. Vol. 44. P. 245.
15. Бойченко А. М., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применения. – Томск: STT, 2011.
16. Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. / Фотоника. 2015. № 1. С. 60.
17. Соснин Э. А., Авдеев С. М., Тарасенко В. Ф., Скакун В. С., Шитц Д. В. / Приборы и техника эксперимента. 2015. № 3. С. 5.

18. Будович В. Л., Шляхов А. Ф. / Успехи химии. 1989. Т. 58. № 8. С. 1354.
19. Соболев И. И., Шевелько А. П., Якушев О. Ф., Найт Л. В., Турли Р. С. / Квантовая электроника. 2003. Т. 33. № 1. С. 3.
20. Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинов Ф. В. Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. – Долгопрудный: Интеллект, 2012.
21. Казанцев С. А., Хуторицков В. И. Источник линейчатого спектра на основе высокочастотного разряда. – СПб.: Изд-во С.-Петербургского университета, 1995.
22. Schreiber A., Kuhn V., Arnold E., Schilling F.-J., Witzke H.-D. / Journal of Physics D: Applied Physics. 2005. Vol. 38. № 17. P. 3242.
23. Карташева М. А., Крылов Б. Е., Левина О. В., Мурашева Л. А., Тялков В. А., Шилина Н. В. / Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 11. С. 73.
24. Карташева М. А., Крылов Б. Е., Левина О. В., Невяжская И. А., Тялков В. А. / Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 67.
25. Невяжская И. А., Тялков В. А., Шилина Н. В., Шилов В. Б. / Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 8. С. 108.
26. Budovich V. L., Budovich D. V., Polotnyuk E. V. / Tech. Phys. 2006. Vol. 51. № 4. P. 529.
27. Василяк Л. М., Дроздов Л. А., Костюченко С. В., Соколов Д. В., Кудрявцев Н. Н., Собур Д. А. / Прикладная физика. 2010. № 6. С. 70.
28. Zoschke K., Bornick H., Worch E. / Water Res. 2014. Vol. 52. P. 131.
29. Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., Hampson R. F., Hynes R. G., Jenkin M. E., Rossi M. J., Troe J. / Atmos. Chem. Phys. 2004. Vol. 4. P. 1461.
30. Bryukov M. G., Vasilyak L. M., Vasiliev A. I., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N. / Journal Physical Chem. A. 2020. Vol. 124. № 39. P. 7935.
31. Богомоллов М. В., Брюков М. Г., Васильев А. И., Василяк Л. М., Касаткин Е. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Левченко Д. А., Собур Д. А., Стрельцов С. А. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 165.
32. Oppenländer T. Photochemical Purification of Water and Air. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003.
33. Doi T., Yamamoto T. / Materials. 2020. Vol. 13. № 9. P. 2206.
34. Takahashi N., Kuwae H., Maeda S., Kawamura M., Tezuka A., Shoji S., Mizuno J. / Coatings. 2021. Vol. 11. № 4. P. 411.
35. Зверева Г. Н., Кирцидели И. Ю. / Оптический журнал. 2021. Т. 88. № 8. С. 67.
36. Ахмедов А. Ю., Ерофеев В. И., Ерофеев М. В., Истомин В. А., Коровин С. Д., Медведев Ю. В., Полягалов Ю. И., Орловский В. М., Сергеев О. А., Соснин Э. А., Степанов В. П., Тарасенко В. Ф. / Патент на изобретение RU 2284850. Бюллетень изобретений. 2006. № 28.
37. Oppenländer T. / Journal of Environmental Engineering and Science. 2007. Vol. 6. № 3. P. 253.
38. Волкова Г. А., Кириллова Н. Н., Павловская Е. Н., Подмошенский И. В., Яковлева А. В. / А. С. № 972249. Бюллетень изобретений. 1982. № 43.
39. Kogelschatz U. / Pure Appl. Chem. 1990. Vol. 62. № 9. P. 1667.
40. Al-Gharabli S., Engeßer P., Gera D., Klein S., Oppenländer T. / Chemosphere. 2016. Vol. 144. P. 811.
41. Waizenegger K., Oppenlaender T. / Offenlegungsschrift DE 19507189. Anmeldetag: 02.03.1995. Offenlegungstag: 12.09.1996.
42. https://www.radium.de/sites/default/files/2019-01/20180607_Xeradex_Flyer_EN_Druck_ohne.pdf
43. Park S. J., Herring C. M., Mironov A. E., Cho J. H., Eden J. G. / APL Photonics. 2017. Vol. 2. № 4. P. 041302.
44. Авдеев С. М., Орловский В. М., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. / Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 8. С. 31.
45. Авдеев С. М., Бураченко А. Г., Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. / Приборы и техника эксперимента. 2020. № 4. С. 156.
46. Ломаев М. И., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф., Шитц Д. В., Лисенко А. А. / Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 13. С. 74.
47. Будович В. Л., Дубакин А. Д., Крылов Б. Е., Полотнюк Е. Б. / Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 123.
48. Tanabe H., Seki Y., Yano J., Ushioda J., Ogura Y. / Proc. SPIE. 1996. Vol. 2726. P. 253.
49. Runaway electrons preionized diffuse discharges / Ed. by Tarasenko V. F. – Nova Science Publishers Inc., 2014.
50. Бакиев Е. Х., Ломаев М. И., Панченко А. Н., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф., Кришнан М., Томпсон Д. / Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 7. С. 605.
51. Бакиев Е. Х., Ломаев М. И., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф. / Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 6. С. 576.
52. Панченко А. Н., Белоплотов Д. В., Кожевников В. В., Ломаев М. И., Сорокин Д. А., Тарасенко В. Ф. / Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 7. С. 649.
53. Ломаев М. И., Месяц Г. А., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф., Бакиев Е. Х. / Квантовая электроника. 2007. Т. 37. № 6. С. 595.
54. Hughes W. M., Shannon J., Hunter R. / Applied Physics Letters. 1974. Vol. 24. № 10. P. 488.
55. Тарасенко В. Ф., Поизнер Б. Н. Импульсные лазеры на плотных газах: физика процессов и экспериментальная техника. – Томск: Изд. Томского университета, 1992.
56. Бойченко А. М., Яковленко С. И. / Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 12. С. 1176.
57. Krylov V., Gerasimov G., Morozov A., Arnesen A., Hallin R., Heijkenskjold F. Energy transfer studies in krypton xenon mixtures excited in a cooled DC discharge / The European Physical Journal D. 2000. Vol. 8. № 2. P. 227.
58. Gerasimov G. N., Volkova G. A., Hallin R., Zvereva G. N., Heijkenskjold F. / Optics and Spectroscopy. 2000. Vol. 88. № 6. P. 814.
59. Ломаев М. И., Сорокин Д. А., Тарасенко В. Ф. / Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 3. С. 226.
60. Сорокин Д. А., Ломаев М. И., Тарасенко В. Ф. / Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 5. С. 437.
61. Andreev S. S., Gaponova S. V., Gusev S. A., Haidl M. N., Klunov E. B., Prokhorov K. A., Polushkin N. I., Sadova E. N., Salashchenko N. N., Suslov L. A., Zuev S. Yu. / Thin Solid Films. 2002. Vol. 415. P. 123.
62. Chkhalo N. N., Salashchenko N. / AIP Advances. 2013. Vol. 3. № 8. P. 082130.

63. Зуев С. Ю., Плешков Р. С., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Свечников М. В., Чхало Н. И., Schafers F., Sertsu M. G., Sokolov A. / Журнал технической физики. 2019. Т. 89. Вып. 11. С. 1779.
64. O'Sullivan G., Li B., D'Arcy R., Dunne P., Hayden P., Kilbane D., McCormack T., Ohashi H., O'Reilly F., Sheridan P., Sokell E., Suzuki Ch., Higashiguchi T. / J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 2015. Vol. 48. P. 144025.
65. Jonkers J. / Plasma Sources Sci. Technol. 2006. Vol. 15. P. S8.
66. Виноходов А. Ю., Кривцун В. М., Лаи А. А., Борисов В. М., Якушев О. Ф., Кошелев К. Н. / Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 1. С. 81.
67. Versolato O. O., Sheil J., Witte S., Ubachs W., Hoekstra R. / J. Opt. 2022. Vol. 24. P. 054014.
68. Борисов В. М., Борисова Г. Н., Виноходов А. Ю., Захаров С. В., Иванов А. С., Кирюхин Ю. Б., Мищенко В. А., Прокофьев А. В., Христофоров О. Б. / Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 8. С. 720.
69. Chkhalo N. I., Garakhin S. A., Lopatin A. Ya., Nechaev A. N., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Tsybin N. N., Zuev S. Yu. / AIP Advances. 2018. Vol. 8. № 10. P. 105003.
70. Абрамов И. С., Голубев С. В., Нечай А. Н., Перакалов А. А., Полковников В. Н., Салащенко Н. Н., Смертин Р. М., Чхало Н. И., Шапошников Р. А. / Патент на изобретение RU 2808771. Бюллетень изобретений. 2023. № 34.
71. Antsiferov P. S., Dorokhin L. A., Koshelev K. N. Extreme ultraviolet radiation of transient plasma in fast conical discharge / J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 165601.
72. Анциферов П. С., Дорохин Л. А., Кильдиярова Р. Р. / Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 125. Вып. 4. С. 457.
73. Самохвалов А. А., Сергушичев К. А., Елисеев С. И., Бронзов Т. П., Большаков Е. П. / ЖТФ. 2022. Т. 92. Вып. 8. С. 1213.
74. Братман В. Л., Литвак А. Г., Суворов Е. В. / Успехи физических наук. 2011. Vol. 181. № 8. P. 867.
75. Водопьянов А. В., Голубев С. В., Зорин В. Г., Разин С. В., Сидоров А. В., Скалыга В. А., Шалашов А. Г. / Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 8–9. С. 822.
76. Водопьянов А. В., Голубев С. В., Мансфельд Д. А., Николаев А. Г., Савкин К. П., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И., Юшков Г. Ю. / Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. Вып. 2. С. 103.
77. Glyavin M. Yu., Golubev S. V., Izotov I. V., Litvak A. G., Luchinin A. G., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V. / Applied Physics Letters. 2014. Vol. 105. P. 174101.
78. Водопьянов А. В., Глявин М. Ю., Голубев С. В., Лучинин А. Г., Разин С. В., Сафронова М. И., Сидоров А. В., Фокин А. П. / Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. Вып. 4. С. 10.
79. Лапин Р. Л., Голубев С. В., Скалыга В. А., Изотов И. В., Боханов А. Ф., Киселёва Е. М., Выбин С. С. Вакуумное ультрафиолетовое излучение непрерывного электронного циклотронного резонансного разряда / Прикладная физика. 2023. № 1. С. 33.
80. Костюшин В. А., Позняк И. М., Топорков Д. А., Бурмистров Д. А., Журавлёв К. В., Лиджигорьев С. Д., Усманов Р. Р., Цыбенко В. Ю., Немчинов В. С. / Приборы и техника эксперимента. 2023. № 6. С. 28.
81. Гаврилов В. В., Еськов А. Г., Житлухин А. М., Кочнев Д. М., Пикуз С. А., Позняк И. М., Рязанцев С. Н., Скобелев И. Ю., Топорков Д. А., Умрихин Н. М. / Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 7. С. 606.
82. Топорков Д. А., Бурмистров Д. А., Гаврилов В. В., Житлухин А. М., Костюшин В. А., Лиджигорьев С. Д., Пушина А. В., Пикуз С. А., Рязанцев С. Н., Скобелев И. Ю. / Физика плазмы. 2023. Т. 49. № 8. С. 807.

PACS: 32.30.Jc; 33.20.Ni; 42.72.Bj

Modern sources of vacuum ultraviolet radiation: state and prospects (a review)

E. A. Sosnin^{1,2} and D. A. Sorokin^{1,2}

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk, 634055, Russia

² Tomsk State University
36 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

Received 4.04.2024; revised 15.04.2024; accepted 19.04.2024

The description of the physical principles and modern techniques for obtaining spontaneous vacuum ultraviolet radiation is given for three cases: the formation of linear spectra of atoms, linear spectra of multicharged ions and continuous spectra of excimer molecules. The parameters of the radiation sources are correlated with their applications – real and potential. The following schematics diagrams of the formation of vacuum ultraviolet radiation are described: H-type and E-type high frequencies discharges; discharge in a hollow cath-

ode; glow, barrier and arc discharges; high-voltage nanosecond discharge with a sharply inhomogeneous distribution of electric field strength in gap; laser, discharge and hybrid systems for multicharged ions formation; excitation of gas targets under conditions of gyrotron plasma heating. The review covers the state of the art over the last 20 years.

Keywords: continuous spectrum, extreme ultraviolet, linear spectrum, multicharged ion spectrum, vacuum ultraviolet radiation.

REFERENCES

- Pavlenko V. I., Cherkashina N. I., Manaev V. A. and Sidelnikov R. V., Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, № 11, 83 (2018) [in Russian].
- Beckers J., van de Ven T., van der Horst R., Astakhov D. I. and Banine V., Applied Sciences **9** (14), 2827 (2019).
- Zeidel A. N. and Schrader E. Ya., Vacuum spectroscopy and its application, Moscow, Nauka, 1976 [in Russian].
- Zeldovich Ya. B. and Raiser Yu. P., Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena, 2nd ed., Moscow, Nauka, 1966 [in Russian].
- Excimer Lasers (Ed. by Ch. K. Rhodes), Berlin-Heidelberg-N.Y., Springer-Verlag, 1979.
- Gerasimov G. N., Krylov B. E., Loginov A. V. and Shchukin S. A., Phys. Usp. **35** (5), 400 (1992).
- Gellert B. and Kogelschatz U., Appl. Phys. B. **52**, 14 (1991).
- Boichenko A. M., Tarasenko V. F. and Yakovlenko S. I., Laser Physics **10** (6), 1159 (2000).
- Cassasa M. P., Golde M. F. and Kvaran A., Chem. Phys. Lett. **59** (1), 51 (1978).
- Hopfield J. J., Astrophys. J. **72**, 133 (1930).
- Tanaka Y., J. Opt. Soc. Amer. **45**, 710 (1955).
- Wilkinson P. G. and Tanaka Y., J. Opt. Soc. Amer. **45**, 344 (1955).
- Takamine T., Suda T. and Tanaka Y., Sci. Pap. I.P.S.R. **35**, 447 (1939).
- Tanaka Y. and Zelikoff M., J. Opt. Soc. Amer. **44**, 245 (1954).
- Boychenko A. M., Lomaev M. I., Panchenko A. N., Sosnin E. A. and Tarasenko V. F., Ultraviolet and vacuum-ultraviolet excilamps: physics, technology and applications, Tomsk, STT, 2011 [in Russian].
- Sosnin E. and Tarasenko V., Photonics, № 1 (49), 60 (2015).
- Sosnin E. A., Avdeev S. M., Tarasenko V. F., Skakun V. S. and Schitz D. V., Instruments and Experimental Techniques **58** (3), 309 (2015).
- Budovich V. L. and Shlyakhov A. F., Uspekhi Khimii **58** (8), 1354 (1989).
- Sobel'man I. I., Shevel'ko A. P., Yakushev O. F., Knight L. V. and Turley R. S., Quantum Electronics **33** (1), 3 (2003).
- Ultraviolet technologies in the modern world / ed. Karmazinov F. V., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Dolgoprudny, Intellect, 2012 [in Russian].
- Kazantsev S. A. and Khutorshchikov V. I., A source of a linear spectrum based on a high-frequency discharge, St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg University, 1995 [in Russian].
- Schreiber A., Kuhn B., Arnold E., Schilling F.-J. and Witzke H.-D., Journal of Physics D: Applied Physics **38** (17), 3242 (2005).
- Kartasheva M. A., Krylov B. E., Levina O. V., Murasheva L. A., Tyapkov V. A. and Shilina N. V., Journal of Optical Technology **84** (11), 777 (2017).
- Kartasheva M. A., Krylov B. E., Levina O. V., Nevyazhskaya I. A. and Tyapkov V. A., Journal of Optical Technology **84** (3), 214 (2017).
- Nevyazhskaya I. A., Tyapkov V. A., Shilov V. B. and Shilina N. V., Journal of Optical Technology **79** (8), 521 (2012).
- Budovich V. L., Budovich D. V. and Polotnyuk E. B., Technical Physics **51** (4), 529–531 (2006).
- Vasilyak L. M., Drozdov L. A., Kostyuchenko S. V., Sokolov D. V., Kudryavtsev N. N. and Sobur D. A., Applied Physics, № 6, 70 (2010) [in Russian].
- Zoschke K., Bornick H. and Worch E., Water Res. **52**, 131 (2014).
- Atkinson R., Baulch D. L., Cox R. A., Crowley J. N., Hampson R. F., Hynes R. G., Jenkin M. E., Rossi M. J. and Troe J., Atmos. Chem. Phys. **4**, 1461 (2004).
- Bryukov M. G., Vasilyak L. M., Vasiliev A. I., Kostyuchenko S. V. and Kudryavtsev N. N., Journal Physical Chem. A. **124** (39), 7935 (2020).
- Bogomolov M. V., Bryukov M. G., Vasiliev A. I., Vasilyak L. M., Kasatkin E. M., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N., Levchenko D. A., Sobur D. A. and Streltsov S. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **7** (2), 165 (2019) [in Russian].
- Oppenländer T., Photochemical Purification of Water and Air, Weinheim, WILEY-VCH Verlag, 2003.
- Doi T. and Yamamoto T., Materials **13** (9), 2206 (2020).
- Takahashi N., Kuwae H., Maeda S., Kawamura M., Tezuka A., Shoji S. and Mizuno J., Coatings **11** (4), 411 (2021).
- Zvereva G. N. and Kirtsedeli I. Yu., Journal of Optical Technology **88** (8), 454 (2021).
- Akhmedov A. Yu., Erofeev V. I., Erofeev M. V., Istomin V. A., Korovin S. D., Medvedev Yu. V., Polygalov Yu. I., Orlovsky V. M., Sergeev O. A., Sosnin E. A., Stepanov V. P. and Tarasenko V. F., Patent RU 2284850, Bulletin of inventions № 28 (2006) [in Russian].
- Oppenländer T., Journal of Environmental Engineering and Science **6** (3), 253 (2007).
- Volkova G. A., Kirillova N. N., Pavlovskaya E. N., Podmoshenskii I. V. and Yakovleva A., A. S. № 97224, Bulletin of inventions № 41 (1982) [in Russian].
- Kogelschatz U., Pure Appl. Chem. **62** (9), 1667 (1990).

40. Al-Gharabli S., Engeßer P., Gera D., Klein S. and Oppenländer T., *Chemosphere* **144**, **811** (2016).
41. Waizenegger K. and Oppenländer T., *Offenlegungsschrift DE 195 07 189*. Offenlegungstag: 12.09.1996.
42. https://www.radium.de/sites/default/files/2019-01/20180607_Xeradex_Flyer_EN_Druck_ohne.pdf
43. Park S.-J., Herring C. M., Mironov A. E., Cho J. H. and Eden J. G., *APL Photonics* **2** (4), 041302 (2017).
44. Avdeev S. M., Orlovskii V. M., Panarin V. A., Pechenitsin D. S., Skakun V. S., Sosnin E. A. and Tarasenko V. F., *Russian Physics Journal* **60** (8), 1298 (2017).
45. Avdeev S. M., Burachenko A. G., Panarin V. A., Skakun V. S., Sosnin E. A. and Tarasenko V. F., *Instruments and Experimental Techniques* **63** (4), 611 (2020).
46. Lomaev M. I., Skakun V. S., Tarasenko V. F., Shitz D. V. and Lisenko A. A., *Technical Physics Letters* **32** (7), 590 (2006).
47. Budovich V. L., Dubakin A. D., Krylov B. E. and Polotniuk E. B., *Instruments and Experimental Techniques* **61** (1), 136 (2018).
48. Tanabe H., Seki Y., Yano J.-I., Ushioda J. and Ogura Y., *Proc. SPIE* **2726**, 253 (1996).
49. Runaway electrons preionized diffuse discharges / Ed. by V. F. Tarasenko, Nova Science Publishers Inc., 2014.
50. Baksht E. Kh., Lomaev M. I., Panchenko A. N., Rybka D. V., Tarasenko V. F. and Krishnan M., *Thompson J., Quantum Electronics* **35** (7), 605 (2005).
51. Baksht E. Kh., Lomaev M. I., Rybka D. V. and Tarasenko V. F., *Quantum Electronics* **36** (6), 576 (2006).
52. Panchenko A. N., Beloplotov D. V., Kozhevnikov V. V., Lomaev M. I., Sorokin D. A. and Tarasenko V. F., *Quantum Electronics* **51** (7), 649 (2021).
53. Lomaev M. I., Mesyats G. A., Rybka D. V., Tarasenko V. F. and Baksht E. Kh., *Quantum Electronics* **37** (6), 595 (2007).
54. Hughes W. M., Shannon J. and Hunter R., *Applied Physics Letters* **24** (10), 488 (1974).
55. Tarasenko V. F. and Poizner B. N., *Pulsed lasers on dense gases: physics of processes and experimental technique*, Tomsk, Publishing house of Tomsk University, 1992 [in Russian].
56. Boichenko A. M. and Yakovlenko S. I., *Quantum Electronics* **36** (12), 1176 (2006).
57. Krylov B., Gerasimov G., Morozov A., Arnesen A., Hallin R. and Heijkenskjold F., *The European Physical Journal D* **8** (2), 227 (2000).
58. Gerasimov G. N., Volkova G. A., Hallin R., Zvereva G. N. and Heijkenskjold F., *Optics and Spectroscopy* **88** (6), 814 (2000).
59. Lomaev M. I., Sorokin D. A. and Tarasenko V. F., *Opt. Atmos. Okeana* **25**, 226 (2012) [in Russian].
60. Sorokin D. A., Lomaev M. I. and Tarasenko V. F., *Atmospheric and Oceanic Optics* **29**, 471 (2016).
61. Andreev S. S., Gaponova S. V., Gusev S. A., Haidl M. N., Klunov E. B., Prokhorov K. A., Polushkin N. I., Sadova E. N., Salashchenko N. N., Suslov L. A. and Zuev S. Yu., *Thin Solid Films* **415**, 1232002 (2002).
62. Chkhalo N. N. and Salashchenko N. N., *AIP Advances* **3** (8), 082130 (2013).
63. Zuev S. Y., Pleshkov R. S., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Svechnikov M. V., Chkhalo N. I., Schäfers F., Sertsu M. G. and Sokolov A., *Technical Physics* **64** (11), 1688 (2019).
64. O'Sullivan G., Li B., D'Arcy R., Dunne P., Hayden P., Kilbane D., McCormack T., Ohashi H., O'Reilly F., Sheridan P., Sokell E., Suzuki Ch. and Higashiguchi T., *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **48**, 144025 (2015).
65. Jonkers J., *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**, S8 (2006).
66. Vinokhodov A. Yu., Krivtsov V. M., Lash A. A., Borisov V. M., Yakushev O. F. and Koshelev K. N., *Quantum Electronics* **46** (1), 81 (2016).
67. Versolato O. O., Sheil J., Witte S., Ubachs W. and Hoekstra R., *J. Opt.* **24**, 054014 (2022).
68. Borisov V. M., Borisova G. N., Vinokhodov A. Yu., Zakharov S. V., Ivanov A. S., Kiryukhin Yu. B., Mishchenko V. A., Prokofev A. V. and Khristoforov O. B., *Quantum Electronics* **40** (8), 729 (2010).
69. Chkhalo N. I., Garakhin S. A., Lopatin A. Ya., Nechay A. N., Pestov A. E., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Tsybin N. N. and Zuev S. Yu., *AIP Advances* **8** (10), 105003 (2018).
70. Abramov I. S., Golubev S. V., Nechai A. N., Perekalov A. A., Polkovnikov V. N., Salashchenko N. N., Smertin R. M., Chkhalo N. I. and Shaposhnikov R. A., Patent RU 2808771, *Bulletin of inventions № 34* (2023) [in Russian].
71. Antsiferov P. S., Dorokhin L. A. and Koshelev K. N., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 165601 (2018).
72. Antsiferov P. S., Dorokhin L. A. and Kildiyarova R. R., *Optics and Spectroscopy* **125**, 476 (2018).
73. Samokhvalov A. A., Sergushichev K. A., Eliseev S. I., Bronzov T. P., Bolshakov E. P., Getman D. V. and Smirnov A. A., *Technical Physics* **67** (8), 1029 (2022).
74. Bratman V. L., Litvak A. G. and Suvorov E. V., *UFN* **181** (8), 867 (2011).
75. Vodopyanov A. V., Golubev S. V., Zorin V. G., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A. and Shalashov A. G., *Radiophysics and Quantum Electronics* **46**, 737 (2003).
76. Vodopyanov A. V., Golubev S. V., Mansfeld D. A., Nikolaev A. G., Savkin K. P., Salashchenko N. N., Chkhalo N. I. and Yushkov G. Yu., *JETP Letters* **88** (2), 95 (2008).
77. Glyavin M. Yu., Golubev S. V., Izotov I. V., Litvak A. G., Luchinin A. G., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A. and Vodopyanov A. V., *Applied Physics Letters* **105**, 174101 (2014).
78. Vodopyanov A. V., Glyavin M. Yu., Golubev S. V., Luchinin A. G., Razin S. V., Safronova M. I., Sidorov A. V. and Fokin A. P., *Tech. Phys. Lett.* **43**, 186 (2017).
79. Lapin R. L., Golubev S. V., Skalyga V. A., Izotov I. V., Bokhanov A. F., Kiseleva E. M. and Vybin S. S., *Applied Physics, № 1*, 33 (2023) [in Russian].
80. Kostyushin V. A., Poznyak I. M., Toporkov D. A., Burmistrov D. A., Zhuravlev K. V., Lidzhigoryaev S. D., Usmanov R. R., Tsybenko V. Yu. and Nemchinov V. S., *Instruments and experimental technique* **66**, 920 (2023).
81. Gavrilov V. V., Eskov A. G., Zhitlukhin A. M., Kochnev D. M., Pikuz S. A., Poznyak I. M., Ryazantsev S. N., Skobelev I. Yu., Toporkov D. A. and Umrikhin N. M., *Plasma Phys. Rep.* **46**, 689 (2020).
82. Toporkov D. A., Burmistrov D. A., Gavrilov V. V., Zhitlukhin A. M., Kostyushin V. A., Lidzhigoryaev S. D., Pushina A. V., Pikuz S. A., Ryazantsev S. N. and Skobelev I. Yu., *Plasma Phys. Rep.* **49**, 1000 (2023).