

02;04;07;12

Безоконная эксилампа вакуумного ультрафиолетового диапазона

© М.И. Ломаев, В.С. Скакун, В.Ф. Тарасенко,
Д.В. Шитц, А.А. Лисенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 10 января 2006 г.

Создана открытая с безоконной конструкцией эксилампа, предназначенная для получения излучения на димерах аргона ($\lambda \sim 126$ nm), криптона ($\lambda \sim 146$ nm) и ксенона ($\lambda \sim 172$ nm). На расстоянии 2 см от излучающей поверхности эксилампы с площадью $23 \times 23 = 529$ см² на $\lambda \sim 126$ nm получена плотность средней мощности излучения 1.6 мВт/см² и при средней мощности излучения ~ 0.8 W через площадку размером 23×23 см. Показано, что в импульсном разряде между анодом, покрытым диэлектриком, и катодом с малым радиусом кривизны реализуются высокие эффективности излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра.

PACS: 85.60.Jb

1. В настоящее время источники спонтанного излучения на основе излучения эксимерных или эксиплексных молекул (эксилампы) привлекают внимание многих исследователей и находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–3]. Для очистки поверхностей в микроэлектронике широко используются источники ВУФ-излучения, в том числе с открытой безоконной конструкцией [3]. При этом облучаемые образцы находятся в том же газе, который заполняет разрядный промежуток эксилампы. Подобные источники обычно применяются для возбуждения димеров аргона и криптона, так как излучение с длиной волны короче 150 nm поглощается во многих оптических материалах, а окна из кристаллов LiF, CaF₂ и MgF₂ дороги и обычно имеют малые размеры. Причем для эксилампы на димерах аргона ($\lambda \sim 126$ nm) только кристаллы LiF имеют малое поглощение.

Цель данной работы — исследовать условия, в которых реализуются высокие эффективности излучения димеров инертных газов, и создать

на этой основе широкоапертурную эксиллампу с размером излучающей области $23 \times 23 = 529$ см.

2. Исследования проводились на трех установках. Первая установка имела малые размеры и состояла из газоразрядной камеры, откачиваемой турбомолекулярным насосом до остаточного давления не менее 10^{-5} Торг, острейного катода, плоского анода, покрытого слоем кварца толщиной 3 мм. Разряд формировался в зоне между острием и поверхностью кварца, обращенной к острию. Расстояние между острием и поверхностью кварца составляло ~ 10 мм. Регистрация спектров излучения разряда, проходящего через пластину из фтористого лития LiF, осуществлялось вакуумным монохроматором VM-502 (Acton Research Corporation). Мощность излучения разряда в абсолютных единицах определялась с помощью калиброванного фотоприемника C8026 (Hamamatsu Photonics KK, Electron Tube Center) с фотоприемными головками H8025-126 nm и H8025-172 nm. Мощность излучения в случае Kr определялась при использовании фотоприемной головки H8025-126 nm с учетом показаний прибора и кривой спектральной чувствительности данной головки на $\lambda = 146$ nm. Возбуждение газа осуществлялось при подаче на электроды импульсного напряжения от генератора, формирующего импульсы напряжения отрицательной полярности с амплитудой до 10 kV и длительностью $\sim 2 \mu\text{s}$. Частота следования импульсов варьировалась в пределах от 15 до 70 kHz. Вводимая в газоразрядную плазму мощность зависела от сорта и давления газа, частоты и амплитуды импульсов напряжения и изменялась в зависимости от условий в пределах от десятков mW до единиц W. При проведении работы были использованы Ag, Kr, Xe при давлении от 15 до 760 Торг. В экспериментах были зарегистрированы обзорные спектры в диапазоне от 120 до 540 nm, а также, более подробно, спектры излучения в спектральных диапазонах, соответствующих $B-X$ переходам димеров газов Ag, Kr, Xe. При этом изменялись давление газов и мощность возбуждения, а измерялись мощности излучения и регистрировались вольт-амперные характеристики разряда. Кроме того, интегральная картина свечения разряда фотографировалась цифровым фотоаппаратом Olympus Camedia C-2020 Z. Вводимая мощность определялась по осциллограммам импульсов напряжения и тока разряда по методике, приведенной в работе [4]. Осциллограммы импульсов напряжения и тока регистрировались соответственно с помощью делителя напряжения и токового шунта на осциллографе TDS 3034.

Вторая установка состояла из камеры с окном из органического стекла, через которое осуществлялось фотографирование разряда. В камеру помещались четыре кварцевые трубки с внешним диаметром 23 mm, внутри которых располагались цилиндрические аноды. Катодом служили проволоки из стали, натянутые перпендикулярно кварцевым трубкам на расстоянии 1 cm друг от друга. Расстояние от проволочек до поверхности кварцевых трубок могло изменяться от 0 до 10 mm. На данной камере определялись оптимальное расстояние между катодом (стальными проволоками) и поверхностью кварцевых трубок, а также рабочие давления для различных газов и возможность одновременного пробоя всех зазоров между проволоками и поверхностью диэлектрика.

Конструкция третьей установки (разработанной эксилампы с открытой безоконной конструкцией) включает: 10 кварцевых трубок с внешним диаметром 23 mm, через которые осуществлялась прокачка воды; катод, выполненный из 21 стальной проволоки, которые натягивались перпендикулярно кварцевым трубкам. На проволоки подавались импульсы напряжения отрицательной полярности. Площадь излучающей поверхности эксилампы составляла $23 \times 23 = 529 \text{ cm}^2$. Данная эксилампа помещалась в камеру большого размера, которая заполнялась аргоном при давлении 1 atm с регулируемым содержанием паров воды и кислорода. Мощность излучения определялась при использовании фотоприемной головки Н8025-126 nm, которая располагалась в камере.

3. Особенностью коронного разряда является значительное усиление электрического поля вблизи острейшего электрода, поэтому даже при небольшой разности потенциалов между электродами вблизи острия, по-видимому, из-за появления у катода быстрых электронов [5], величина электрического поля достаточна для зажигания разряда. Для всех исследованных газов — Ar, Kr, Xe в данных условиях фиксируются широкие полосы излучения для Ar в диапазонах 115–135 nm с максимумом на длине волны $\sim 126 \text{ nm}$ соответственно для Kr 135–155 nm, 146 nm, для Xe 155–185 nm, 172 nm. Спектральная полуширина полос излучения для всех исследованных газов увеличивается при уменьшении давления газа и остается неизменной при варьировании мощности возбуждения в широких пределах — от десятков до нескольких сотен mW.

Наибольшая мощность излучения и эффективность в ксеноне достигаются при давлении 380 Torr и составляют соответственно $\sim 320 \text{ mW}$

и $\sim 45\%$ в полный телесный угол. В случае криптона наибольшие эффективности излучения достигались при давлении газа ~ 1 atm и составили $\sim 25\%$. Существенно (на порядок и более) меньшие эффективности излучения были получены для димеров аргона. Причиной низких интенсивностей излучения в Ar является наличие примесей в используемом газе. На их присутствие указывает большое число линий, регистрируемых в диапазоне 110–160 nm.

4. Приведенные выше результаты относятся к случаю зажигания одноострийной барьерной короны. В то же время для практического применения нужны источники излучения большой площади. На второй установке было реализовано одновременное зажигание коронных разрядов (до 60) по всей длине 4 кварцевых трубок для всех трех газов и определен оптимальный зазор между катодами и диэлектрической поверхностью. Испытания показали, что все импульсные коронные разряды стабильно зажигаются и имеют примерно равную интенсивность излучения. Наиболее стабильное зажигание всех промежутков

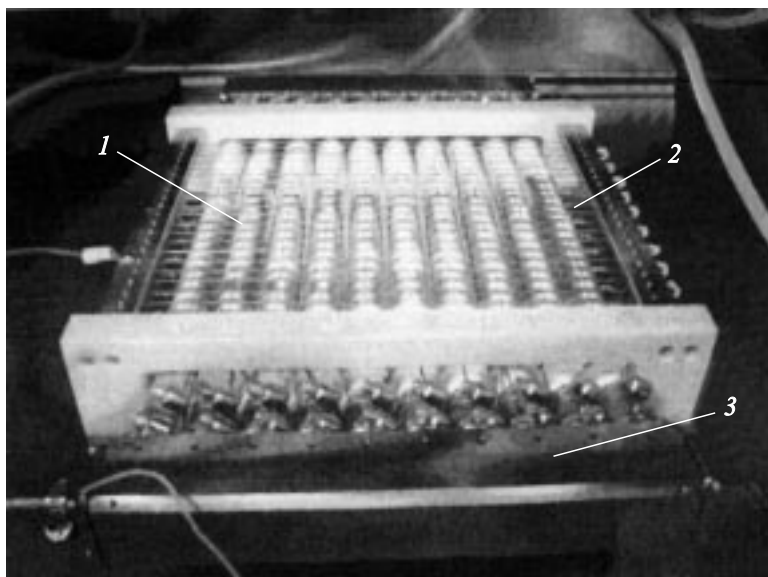


Рис. 1. Фотография эксилампы в рабочем режиме: 1 — кварцевые трубки, 2 — стальные проволоки, 3 — корпуса для равномерной прокачки воды.

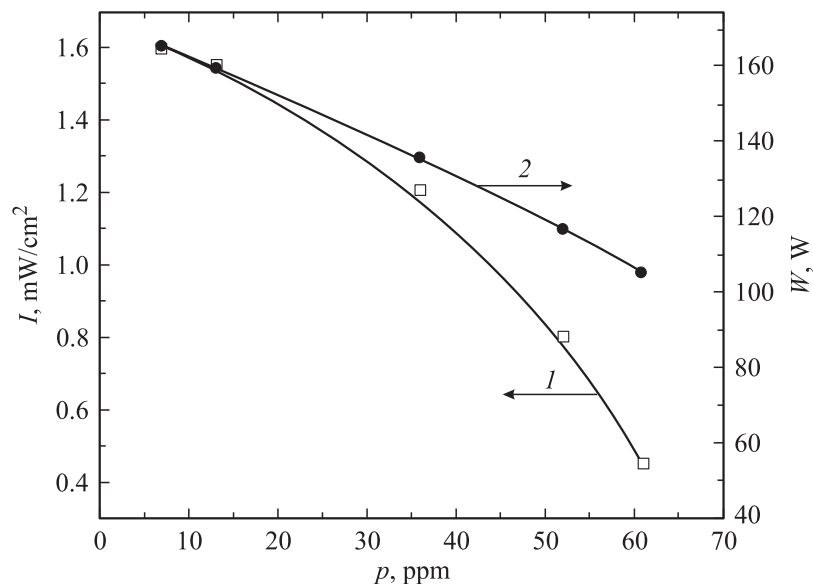


Рис. 2. Зависимость средней мощности излучения димеров аргона I (1) и средней мощности, потребляемой эксимером от сети, W (2) в зависимости от содержания паров воды и кислорода в аргоне p .

было получено при контакте металлических проволок с поверхностью кварцевых трубок.

Фотография эксимерной лампы в рабочем режиме, разработанной на основе проведенных исследований, приведена на рис. 1. На рис. 2 представлены зависимости полной мощности, потребляемой генератором от сети, и средней мощности излучения на длине волны $\sim 126 \text{ nm}$ от содержания примесей паров воды и кислорода в аргоне. Мощность, потребляемая генератором от сети, практически линейно возрастает с уменьшением концентрации примесей в аргоне. Это связано с увеличением среднего и импульсного тока разряда при уменьшении концентрации электроотрицательных газов (кислорода и паров воды). Плотность мощности излучения становится пропорциональной мощности накачки при содержании в аргоне кислорода и паров воды менее 10 частиц на миллион (ppm). Средняя мощность излучения, измеренная на

расстоянии 2 см от катода, достигала 1.6 mW/cm^2 . Полная мощность излучения через площадку размерами $23 \times 23 \text{ cm}$ на расстоянии 2 см от катода составила $\sim 0.8 \text{ W}$. Существенно более высокие средние мощности излучения можно реализовать на этой установке при заполнении камеры криптоном и ксеноном, но из-за высокой стоимости этих газов и больших размеров камеры такие эксперименты не проводились.

5. Таким образом, проведенные исследования продемонстрировали высокую эффективность излучения димеров аргона ($\lambda \sim 126 \text{ nm}$), криптона ($\lambda \sim 146 \text{ nm}$) и ксенона ($\lambda \sim 172 \text{ nm}$) при импульсном разряде между анодом, покрытым диэлектриком, и катодом с малым радиусом кривизны. Получены эффективности излучения на $\lambda \sim 146 \text{ nm} \sim 25\%$ и на $\lambda \sim 172 \text{ nm} \sim 45\%$.

Создана эксиллампа на основе импульсного коронного разряда с площадью излучающей поверхности $23 \times 23 = 529 \text{ cm}^2$. На $\lambda \sim 126 \text{ nm}$ на расстоянии 2 см от поверхности эксилампы получена плотность средней мощности излучения 1.6 mW/cm^2 и полная средняя мощность излучения $\sim 0.8 \text{ W}$. Показано, что мощность возбуждения при импульсном коронном разряде практически линейно увеличивается при уменьшении содержания в аргоне паров воды и кислорода.

Предполагается, что эксилампы подобной конструкции найдут широкое практическое применение. Данная конструкция излучателя может быть также использована для получения мощного и эффективного излучения на других молекулярных и атомарных переходах.

Работа выполнена при финансовой поддержке компании SEN ENGINEERING Co., LTD (Япония), МНТЦ (проект № 2706) и РФФИ (проект № 05-08-33621-а).

Список литературы

- [1] Eliasson B., Kogelshatz U. // IEEE Transactions on Plasma Science. 1991. V. 19. P. 309–329.
- [2] Ломаев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А. и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [3] Kogelshatz U. International Conference on Atomic and Molecular Lasers V. Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 272–286.
- [4] Ломаев М.И. // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 11. С. 1091–1095.
- [5] Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. // Physica scripta. 2005. V. 72. N 1. P. 41–67.