

04;07;12

## Мощная и эффективная KrCl эксилампа барьерного разряда

© М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

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

Поступило в Редакцию 16 августа 2001 г.

Исследовано влияние мощности и формы импульса накачки на характер разряда и эффективность излучения KrCl\* молекул ( $\lambda \sim 222$  nm). Показано, что при использовании барьерного разряда для возбуждения коаксиальных KrCl эксилламп из кварцевых трубок наибольшие эффективности излучения реализуются при формировании разряда в виде диффузных конусов. Создана эксилампа со средней мощностью излучения до 100 W.

1. В настоящее время эксилламп с возбуждением барьерным разрядом являются одними из наиболее простых и перспективных источников УФ и ВУФ излучения [1–8]. Однако эффективность преобразования вводимой в рабочую среду мощности в оптическое излучение в известных работах очень сильно отличается. Кроме того, в литературе отсутствуют либо противоречивы данные об оптимальных условиях накачки и об оптимальной форме филаментов в барьерном разряде. Так, в [4,5] нами отмечалось преимущество использования синусоидальной формы импульса напряжения частотой 22 kHz по сравнению с коротким высоковольтным импульсом длительностью  $50 \div 100$  ns для возбуждения Xe<sub>2</sub>, Kr<sub>2</sub>, KrCl и XeCl эксилламп барьерным разрядом. Основной причиной низкой эффективности в случае использования для возбуждения коротких (десятки наносекунд) высоковольтных импульсов напряжения было существенное увеличение необходимого для пробоя напряжения на газоразрядном промежутке. Это приводило к неоптимальным с точки зрения формирования эксиплексных молекул величинам приведенной напряженности электрического поля  $E/p$  в газоразрядной плазме ( $E$  — напряженность электрического поля,  $p$  — давление). С другой стороны, в работах [6,7] было продемонстрировано увеличение эффективности Xe<sub>2</sub> барьерной лампы при короткоимпульсном ( $250 \div 750$  ns) возбуждении по сравнению с импульсами возбуждения синусоидальной

формы при частотах следования импульсов десятки кГц. По мнению авторов [6], наблюдаемое увеличение эффективности излучения имеет место благодаря формированию оптимальной функции распределения электронов по энергии. В работе [7] отмечается, что для увеличения эффективности  $\text{Xe}_2^*$  эксилампы необходимо формировать однородный (диффузный) разряд с существенно меньшей плотностью электронов по сравнению с плотностью электронов, характерной для филаментов. Однородность разряда при этом обеспечивается вследствие крутого фронта импульса напряжения.

В настоящей работе проведены подробные исследования влияния мощности и формы импульса возбуждения, а также других параметров на эффективность излучения молекул  $\text{KrCl}^*$  при накачке барьерным разрядом, что позволило создать KrCl эксилампу со средней мощностью излучения до 100 W.

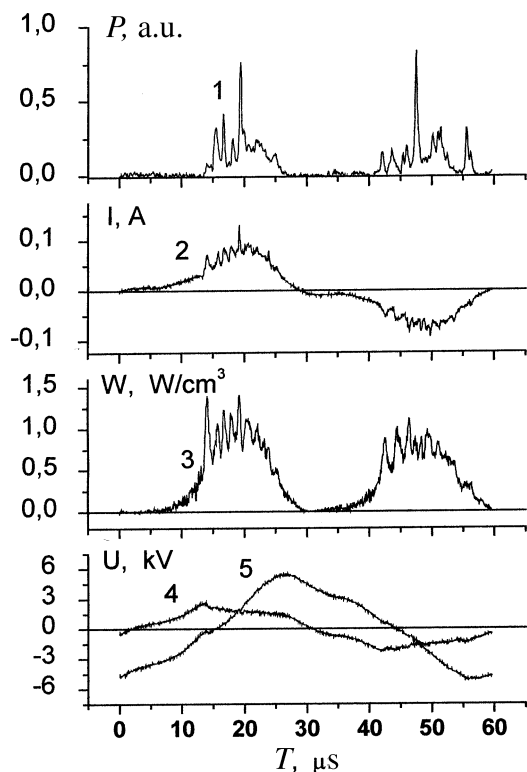
2. В экспериментах использовались коаксиальные кварцевые эксилампы традиционной конструкции с двумя барьерами и водяным охлаждением внутренней трубы [1,3]. Толщина зазора между кварцевыми трубками составляла  $6 \div 9$  мм, длина возбуждаемой области варьировалась от 5 до 75 см. Рабочие смеси приготавливались непосредственно в колбе лампы. Высокое напряжение подавалось на наружный электрод, изготовленный из металлической сетки. Мощность излучения определялась калиброванным фотоприемником ФЭК-22 СПУ. Мощность возбуждения определялась двумя способами — по известной методике вольт-кулоновских фигур [9,10] и посредством определения напряжения на газоразрядном промежутке с учетом падения напряжения на емкости лампы. Во втором случае имелась возможность определения также мгновенной мощности и вложенной к определенному моменту времени энергии возбуждения. Для возбуждения использовались два генератора, один из которых обеспечивал получение напряжения синусоидальной формы с частотой 17 кГц, а второй — одно- или двуполярных импульсов напряжения с длительностью по основанию  $\sim 2 \mu\text{s}$ , с изменяемой длительностью переднего и заднего фронта  $250 \div 1000$  ns при частоте следования импульсов  $10 \div 100$  кГц. Регистрация импульсов тока, напряжения, а также временной ход импульсов излучения осуществлялись соответственно с помощью токового шунта, делителя напряжения, ФЭК-22 СПУ и осциллографа TDS-220. В ряде случаев для определения падения напряжения на емкости эксилампы последовательно в цепь устанавливалась дополнительная емкость, сигнал с которой

также фиксировался на осциллографе TDS-220. Свечение разряда фотоаграфировалось с помощью цифрового фотоаппарата.

3. При проведении экспериментов предварительно была осуществлена оптимизация давления и состава смеси, состоявшей из Kг и Cl<sub>2</sub>. Лучшие результаты были получены для смеси Kг : Cl<sub>2</sub> = 200 : (1 ÷ 0.5) при полном давлении около 200 Torr. При уменьшении полного давления или содержания Cl<sub>2</sub> в смеси наблюдается все более однородный объемный разряд, однако мощность излучения при этом уменьшается. Повышение давления смеси или содержания Cl<sub>2</sub> в смеси приводит к контрагированию разряда посредством формирования ярко светящихся каналов, что также приводит к уменьшению мощности излучения.

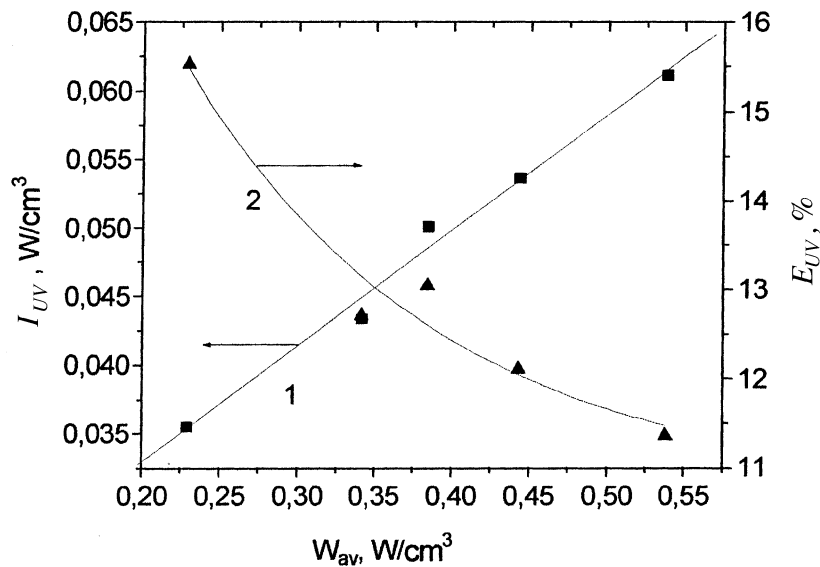
Как уже отмечалось, в работе были использованы генераторы, позволявшие формировать импульсы возбуждения различной формы. На рис. 1 приведены типичные примеры осциллограмм импульсов тока, напряжения на электродах лампы, импульс излучения на В–Х переходе молекулы KгCl\*, расчетные кривые мощности возбуждения и падения напряжения на газоразрядном промежутке в случае использования генератора импульсов синусоидальной формы. Подобные измерения были проведены при накачке двухполярными и однополярными импульсами длительностью около 2 μs, причем длительность фронта импульса напряжения генератора была 250 ns или ~ 1 μs. Также были проведены эксперименты при уменьшенном давлении рабочей смеси.

Наблюдения интегральной картины свечения разряда показали следующее. При пониженном давлении (около 100 Torr и ниже) и накачке двухполярными и однополярными короткими импульсами формируется объемный разряд без филаментов. При накачке синусоидальными импульсами и давлении смеси 200 Torr в эксилампе наблюдаются объемный разряд и разряд, состоящий из диффузионных филаментов. При оптимальном давлении (около 200 Torr) и накачке двухполярными и однополярными импульсами формируется разряд, состоящий из филаментов. В этом случае филаменты состоят из двух диффузных конусов, обращенных друг к другу, между которыми наблюдается более яркая перемычка, длина которой и интенсивность излучения в видимой области спектра зависят от давления смеси, мощности накачки, частоты следования импульсов и формы импульса. При использовании крутых фронтов импульса напряжения наблюдается уменьшение длины и яркости перемычки между конусами и остаются только два диффузных конуса.



**Рис. 1.** Осциллограммы импульсов излучения на В–Х переходе молекулы  $\text{KгCl}^*$  (1), тока (2), напряжения на электродах лампы (5), расчетные кривые удельной мощности возбуждения (3) и падения напряжения на газоразрядном промежутке (4) в случае использования генератора импульсов синусоидальной формы.

Измерения средней мощности УФ излучения и эффективности показали, что наибольшие эффективности излучения (до  $11 \div 15\%$ ) относительно вложенной в плазму энергии реализуются при накачке импульсами с короткой длительностью фронта, когда разряд состоит из диффузных конусов (рис. 2). Возбуждение однополярными импульсами по сравнению с двухполярными приводило лишь к незначительному



**Рис. 2.** Зависимости удельной средней мощности излучения (1) и эффективности (2) от удельной средней мощности возбуждения при использовании двухполярного генератора импульсов напряжения с длительностью переднего и заднего фронтов  $\sim 250$  ps.

уменьшению эффективности излучения (на  $5 \div 10\%$ ). Увеличение длительности переднего и заднего фронта импульса напряжения также приводило к некоторому снижению максимальной эффективности излучения (на  $\sim 10\%$ ). При использовании оптимальных условий накачки на эксилампе с длиной возбуждаемой области 47 см и зазором между кварцевыми трубками 9 мм была получена средняя мощность излучения до 100 W. Замена импульсного генератора на генератор импульсов синусоидальной формы дала дальнейшее уменьшение эффективности излучения (до  $8 \div 11\%$ ), однако это снижение также было не очень существенным ( $\sim 25\%$  относительно оптимума). Наименьшие эффективности были получены при уменьшении рабочего давления. Так, при давлении 100 Torr и накачке от импульсного источника максимум эффективности не превышал 4%. Основной причиной данного отличия

является существенная разница в удельной мощности возбуждения в объеме, занимаемом филаментами, и при объемном разряде. Эта разница может достигать 2 порядков и более, так как объем, занимаемый филаментами, как было определено в данных экспериментах, во столько же раз меньше полного газоразрядного объема, принимаемого в расчет при определении удельной мощности возбуждения. Сопоставление величин приведенной напряженности электрического поля  $E/p$ , удельной мощности возбуждения на единицу объема и "на одну частицу", эффективности для условий проводившегося эксперимента, а также тлеющего разряда [11] приводит к следующим результатам. Во-первых, при сравнимых величинах эффективности  $\sim 12\text{--}14\%$  в тлеющем и барьерном с наличием филаментов разрядах имеют место близкие значения  $E/p \sim 8 \div 10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ , удельной мощности возбуждения на единицу объема около десятков  $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$  и на одну частицу  $\sim (10 \div 50) \cdot 10^{-18} \text{ W}$ . При этом для барьерного разряда в расчет принимается объем, занимаемый филаментами. Во-вторых, при существенно более низкой эффективности ( $\sim 4\%$ ) в объемном барьерном разряде (без регистрируемых филаментов) удельные мощности возбуждения составляют  $0.3 \div 3 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-3}$  и  $\approx (0.2 \div 2) \cdot 10^{-18} \text{ W}$  на одну частицу. Отметим, что величины  $E/p$  при этом составляют  $\geq 15 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ . При накачке от генератора синусоидальных импульсов снижение эффективности также связано с вкладом части энергии в объемный разряд.

Значения энергии, вложенной в плазму в течение одного периода в единицу объема в барьерном разряде, в значительной мере зависят от удельной емкости барьеров из кварцевых трубок, которая обычно составляет  $\sim 0.25 \text{ pF} \cdot \text{cm}^{-2}$ . Поэтому для реализации высоких эффективностей излучения при возбуждении барьерным разрядом необходимо использовать разряд, состоящий из диффузных филаментов.

4. Таким образом, нами проведено исследование влияния мощности и формы импульса возбуждения, а также других условий при накачке барьерным разрядом на эффективность излучения молекул КrCl\*. Впервые показано, что наличие филаментов (пространственных зон с высокой удельной мощностью возбуждения) в барьерном разряде является необходимым условием получения высокой эффективности работы КrCl эксилампы на основе барьерного разряда, поскольку при формировании однородного разряда во всем объеме удельная мощность возбуждения существенно меньше оптимальной. На основе полученных

данных создана КrCl эксилампа со средней мощностью излучения в УФ области с максимумом на 222 nm до 100 W.

Авторы благодарят МНТЦ (проект № 1270) и LLNL (контракт В5066095) за поддержку данной работы.

## Список литературы

- [1] *Eliasson B., Kogelschatz U.* // IEEE Trans. on Plasma Science. 1991. V. 19. P. 309–323.
- [2] *Zhang J.-Y., Boyd I.W.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 80. P. 633–638.
- [3] *Скакун В.С., Фомин Е.А., Тарасенко В.Ф.* и др. // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 10. С. 146–150.
- [4] *Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А.* и др. // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 2–3. С. 277–285.
- [5] *Boichenko A.M., Skakun V.S., Sosnin E.A.* et al. // Laser Phys. 2000. V. 10. N 2. P. 540–552.
- [6] *Vollkommer F., Hitzschke L.* // Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Symp. LS-8, Graifswald, Germany, 30<sup>th</sup> August–3<sup>rd</sup> September. 1998. P. 51–60.
- [7] *Mildron R.P., Carman R.J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. V. 34. P. L1–L6.
- [8] *Зверева Г.В., Герасимов Г.Н.* // Оптика и спектроскопия. 2001. Т. 90. № 3. С. 376–383.
- [9] *Manley T.C.* // Trans. Electrochem. Soc. 1943. V. 84. P. 83–96.
- [10] *Falkenstein Z., Coogan J.J.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 817–825.
- [11] *Panchenko A.N., Sosnin E.A., Tarasenko V.F.* // Optics Commun. 1999. V. 161. P. 249–252.