

04;07;12

## Импульсная KrCl эксилампа с плотностью мощности $1 \text{ kW/cm}^2$

© М.В. Ерофеев, М.И. Ломаев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко, Д.В. Шитц

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 18 января 2001 г.)

Приведены результаты исследования амплитудно-временных характеристик излучения однобарьерной импульсной KrCl эксилампы и определены условия, при которых достигаются максимальные светимости в УФ области спектра. Лучший результат в наших исследованиях был получен в смеси  $\text{Ne}:\text{Kr}:\text{Cl}_2=50:1:1$  (Торр), при возбуждении от комбинированной схемы Фитча были получены длительность импульса излучения на полувысоте 107 ns и удельная импульсная мощность  $E(0,0) = 1.1 \text{ kW/cm}^2$ .

### Введение

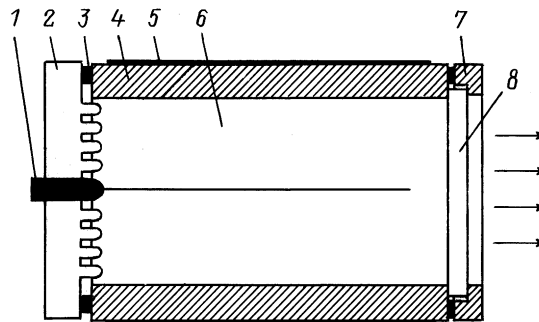
В последние годы вырос интерес к работам, посвященным созданию ультрафиолетовых ламп, возбуждаемых импульсным разрядом в инертных газах, в галогенах и их смесях [1–9]. Нередко применение таких источников, например в микроэлектронике, предполагает, что лампа излучает в диапазоне длин волн короче 250 nm и удельная импульсная мощность излучения (светимость) составляет десятки киловатт на квадратный сантиметр и выше. В настоящей работе приводятся результаты исследований амплитудно-временных характеристик излучения импульсной KrCl эксилампы однобарьерного типа, выполненные с целью определения условий, при которых достигаются максимальные светимости в УФ области спектра.

### Экспериментальные установки и методики измерений

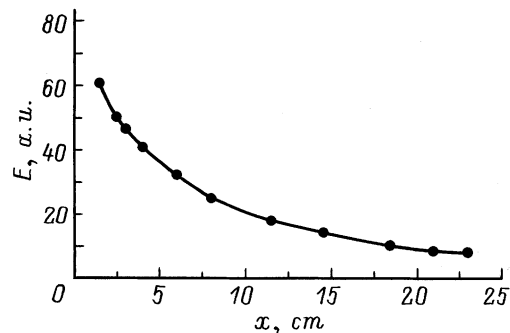
Конструкция излучателя эксилампы приведена на рис. 1. Разряд зажигается в промежутке между внутренним высоковольтным электродом 1 и диэлектрическим барьером (керамика,  $\epsilon \sim 1000$ ), выполненным в виде трубы с внутренним диаметром 7.8 см. С наружной поверхности керамической трубы накладывался электрод, который в процессе работы устройства заземлялся. В качестве внутреннего электрода использовалась проволока из нержавеющей стали как в виде штыря, так и в виде спирали с различными величинами шага и диаметра. Соответственно разрядный промежуток между электродами мог варьироваться от 2.6 до 3.6 см. Для вывода излучения использовалось кварцевое окно толщиной 1 см, имеющее пропускание 80% на длине волны 200 nm. На выходе лампы диаметр пучка составлял примерно 8 см и далее линейно увеличивался с удалением от выходного окна. Форма разряда зависела от конфигурации высоковольтного электрода и величины параметра  $pd$ . В оптимальных с точки зрения получения максимальной выходной мощности условиях разряд переходил из многоискровой формы в форму, состоящую

из множества конусов с основанием у керамической стенки лампы. Несмотря на видимую неоднородность разряда, освещенность (облученность  $E(x,r)$ ) на выходе лампы вдоль радиуса  $r$  меняется плавно и имеет колоколообразную форму. Облученность  $E$  на оси эксилампы от расстояния  $x$  от выходного окна показана на рис. 2.

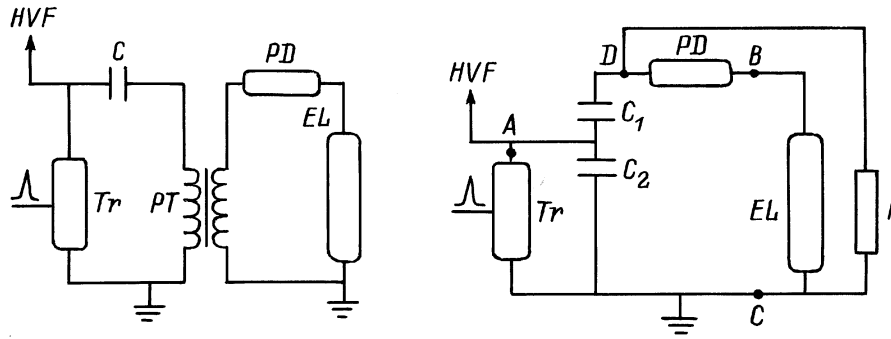
Использовались две схемы возбуждения эксиламп (рис. 3): схема Фитча с удвоением напряжения и в ряде



**Рис. 1.** Устройство импульсной KrCl лампы: 1 — внутренний (высоковольтный) электрод, 2 — диэлектрик, 3 — уплотнительная прокладка, 4 — керамическая трубка, 5 — внешний электрод, 6 — рабочий объем эксилампы, 7 — фланец, 8 — кварцевое выходное окно. Стрелки показывают направления выхода излучения. Светло-серые зоны — типичный вид разряда.



**Рис. 2.** Облученность  $E$  на оси эксилампы от расстояния от выходного окна.



**Рис. 3.** Схемы питания импульсной  $K_2CrCl$  эксилампы:  $HVF$  — к источнику постоянного высокого напряжения;  $PD$  — промышленный разрядник;  $R$  — зарядный резистор;  $C, C_1, C_2$  — накопительные емкости;  $Tr$  — тиратрон;  $EL$  — эксилампа;  $PT$  — импульсный трансформатор. Справа представлена схема Фитча, а слева — схема с импульсным трансформатором.

случаев схема с импульсным трансформатором (коэффициент трансформации мог варьироваться от 2 до 3). На конденсаторы  $C, C_1, C_2$  подавалось постоянное напряжение ( $HVF$  на рис. 3) от высоковольтного источника с регулируемым напряжением (до 25 kV), обеспечивающего частоту повторения импульсов до 20 Hz. Схема Фитча (справа) включала: накопительную батарею конденсаторов КВИ-3 с ударной емкостью  $\sim 2.2$  nF, зарядный резистор  $R$ , тиратрон ТГИ-1000/25, схему электропитания и генератор запуска тиратрона. Импульс высокого напряжения, формируемый при срабатывании тиратрона  $Tr$ , подается по коаксиальному кабелю на обострительный разрядник  $PD$  излучателя (промышленный разрядник типа РУ-26 или РУ-47). Индуктивность соединений батареи конденсаторов КВИ-3 и излучателя сделана минимально возможной для обеспечения минимальной длительности переднего фронта импульса напряжения на обострительном разряднике. В цепь перезарядки емкости устанавливался дроссель (точка  $A$ ). Также дроссель мог устанавливаться параллельно лампе (между точками  $B$  и  $C$ ).

Схема с импульсным трансформатором была построена на той же элементной базе, что и схема Фитча, исключая высоковольтный трансформатор  $PT$ .

Кроме того, нами использовалась комбинированная схема Фитча, в которой в целях увеличения амплитуды высокого напряжения на эксилампе после разрядника  $PD$  на схеме Фитча устанавливался импульсный трансформатор  $Tr$ .

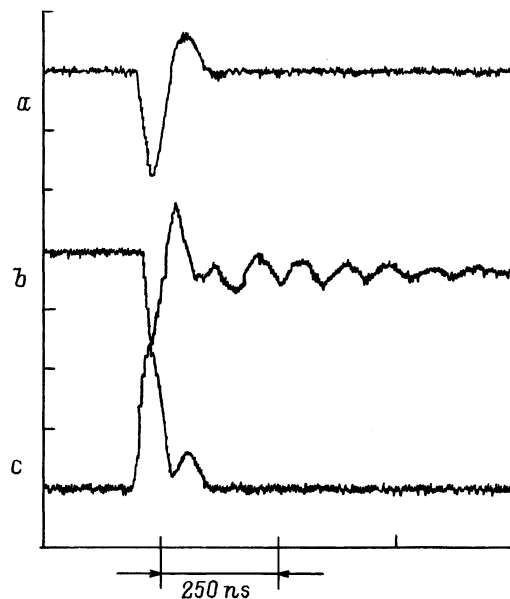
Значения тока и напряжения измеряли омическим шунтом и емкостным делителем напряжения (коэффициент деления  $5 \cdot 10^3$ ), сигналы с которых подавались на двухлучевой запоминающий осциллограф TDS-220. Импульсную мощность излучения в заданном интервале длин волн определяли с помощью вакуумного фотодиода ФЭК-22 СПУ с известной спектральной чувствительностью в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, сигнал с которого подавался на импульсный вольтметр или осциллограф. Спектральный состав излучения оперативно контролировался при помощи калиброванных светофильтров СЗС, БС и ЖС.

Рабочие смеси готовились непосредственно в лампе при последовательном напуске галогена ( $Cl_2, HCl$ ), инертного ( $Xe, Kr$ ) и буферного ( $Ne, He$ ) газов.

## Результаты и их обсуждение

В оптимальных смесях доля излучения в области длин волн  $\lambda < 260$  nm превышала 90%, что типично для  $K_2CrCl$  эксиламп.

Мы изучили вопрос о том, какая из схем питания ламп наиболее подходит для получения стабильных и одновременно мощных импульсов излучения. Наши исследования показали, что наиболее высокие значения выходной импульсной мощности могут быть получены при максимальных прикладываемых к барьеру напряжениях



**Рис. 4.** Типичные осциллограммы тока ( $a$ ), импульса напряжения на лампе ( $b$ ) и световой импульс ( $c$ ). Схема Фитча, зарядное напряжение 20 kV.

(что реализуется при использовании модифицированной схемы Фитча).

На рис. 4 показаны осциллограммы импульса напряжения на лампе (а), тока (b) и световой импульс (с), иллюстрирующие работу обычной схемы Фитча. Видно, что длительность импульса излучения по основанию совпадает с длительностью импульса тока.

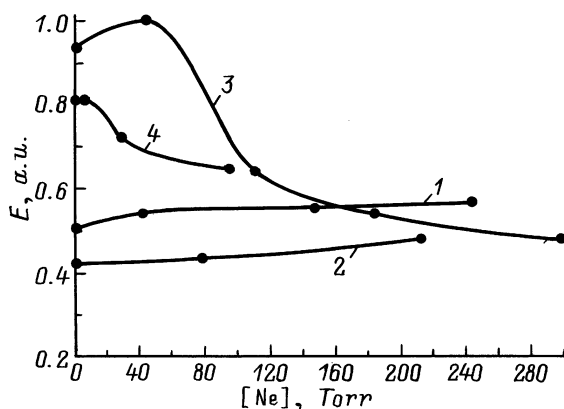
В ряде экспериментов наблюдалась нестабильность мощности излучения эксилампы. Основной причиной нестабильности светового импульса был временной разброс пробоя лампы относительно момента достижения максимального напряжения на выходе схемы Фитча (в точке D). Разброс величины импульсной мощности лампы может достигать 50%. Однако, используя разрядник PD, а также меняя давление газовой среды, нам удалось уменьшить нестабильность выхода излучения до 10%.

Установка параллельно лампе обострительных емкостей (85–400 pF) не приводило к увеличению импульсной мощности излучения. Это связано с тем, что эксилампа имеет свою собственную величину емкости.

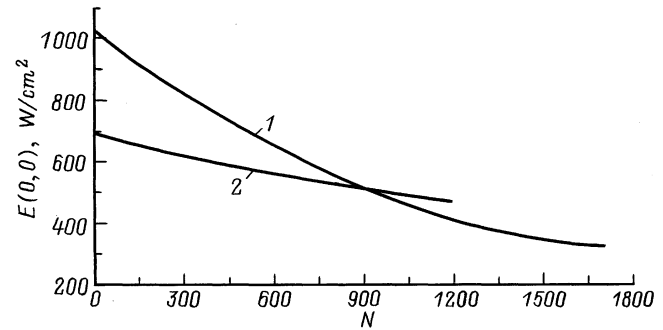
Форма разряда в лампе зависела не только от диаметра высоковольтного электрода, но от парциального давления компонентов тройной смеси, причем в сильной степени зависит от давлений Kr и галогенонесителя и значительно слабее зависела от давления буферного газа гелия или неона.

При одинаковых условиях по возбуждению смесей ( $U_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ) максимальная величина интенсивности излучения достигается при использовании буферного газа Ne. Объясняется это тем, что также как в KrCl и XeCl лазерах проводимость плазмы в смесях с неоном больше, чем в смесях с гелием.

При увеличении парциального давления  $\text{Cl}_2$  до значений 2 Torr и выше вследствие процесса тушения  $\text{KrCl}^* + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{Kr} + \text{Cl} + \text{Cl}_2$  происходит снижение выхода



**Рис. 5.** Зависимость созданной KrCl лампой импульсной освещенности от давления буферного Ne, добавляемого в камеру лампы во время работы.  $U_0 = 23 \text{ kV}$ , схема Фитча,  $C_1 + C_2 = 8.8 \text{ nF}$ . Смесей Kr/HCl: 1 — 50/1 (153 Torr), 2 — 20/1 (63 Torr); Kr/Cl<sub>2</sub>: 3 — 40/1 (121.5 Torr), 4 — 80/1 (123 Torr).



**Рис. 6.** Зависимость импульсной удельной мощности излучения KrCl эксилампы от числа вспышек в бинарной смеси  $\text{KrCl}_2 = 50/1$  при давлении 105 (1) и 153 (2) Torr.  $U_0 = 26 \text{ kV}$ , схема Фитча,  $C_1 + C_2 = 8.8 \text{ nF}$ .

излучения. Кроме того, с увеличением концентрации хлора затрудняется формирование объемного разряда.

На рис. 5 представлена зависимость импульсной освещенности, создаваемой KrCl лампой, от давления буферного газа Ne, добавляемого в камеру лампы во время работы. Видно, что в смесях с  $\text{Cl}_2$  лишь относительно небольшие добавки Ne приводят к увеличению выходной мощности, а в смесях с HCl добавки Ne медленно увеличивают выходную мощность вплоть до значений давления 1 ат.

На рис. 6 показана зависимость импульсной удельной мощности излучения KrCl эксилампы от числа вспышек в смеси  $\text{Kr/Cl}_2 = 50/1$  при различных давлениях смеси. Как видно, время жизни смесей можно наращивать, увеличивая концентрацию  $\text{Cl}_2$ , но при этом разряд более неоднороден, что соответственно снижает выход излучения. Дальнейшее увеличение ресурса импульсной KrCl лампы может быть получено за счет слабой прокачки рабочей смеси через камеру и/или использования покрытий, нанесенных на внутренние поверхности лампы для уменьшения скорости ухода галлогена в гетерофазных реакциях и/или увеличения буферного объема лампы [4,5].

Лучший результат в наших исследованиях был получен в смеси  $\text{Ne:Kr:Cl}_2 = 50:1:1$  (Torr) при возбуждении от комбинированной схемы при ударной емкости  $C_1 = 2.2 \text{ nF}$  и  $U_0 = 23 \text{ kV}$ . При этом длительность импульса излучения на полувысоте составила 107 ns, а удельная импульсная мощность  $E(0,0) = 1.1 \text{ kW/cm}^2$ .

Оценки полной излучаемой в телесный угол  $4\pi$  мощности дают величину около 400 kW. При энергозапасе в накопительной емкости 2.32 J и с учетом того, что в газовую среду была вложена только одна треть запасенной энергии, эффективность KrCl лампы можно оценить примерно в 5% (относительно излучения в угол  $4\pi$ ).

В заключение отметим, что задача получения высокой импульсной мощности спонтанного излучения в газовых системах тяжелый инертный газ–галоген (в нашем случае система  $\text{Kr} + \text{Cl}_2(\text{HCl})$ ) разбивается на две: получение высоких удельных выходных характеристик мощности излучения из разрядной плазмы и достижение максимальной эффективности вывода излучения

из излучателя. Полученная эффективность КгСІ лампы позволяет надеяться на увеличение этого параметра при дальнейшей оптимизации схемы возбуждения и конфигурации лампы. Вторая задача может решаться путем использования специальных оптических элементов (зеркал, линз).

## Список литературы

- [1] Рулев Г.В., Саенко В.Б. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 21. С. 53–56.
- [2] Tarasenko V.F., Lomaev M.I., Panchenko A.N. et al. // SPIE Proc. 1998. Vol. 3349. P. 732–741.
- [3] Скакун В.С., Кривоносенко А.В., Ломаев М.И. и др. // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 3. С. 309–311.
- [4] Бойченко А.М., Скакун В.С., Соснин Э.А. и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 4. С. 344–348.
- [5] Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. и др. // Квантовая электрон. 1993. Т. 20. № 1. С. 7–15.
- [6] Василяк Л.М., Костюченко С.В., Красночуб А.В. и др. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 826–832.
- [7] Bollanti S., Clementi G., Di Lazzaro P. et al. // IEEE Trans. and Plasma Sci. 1999. Vol. 27. N 1. P. 211–218.
- [8] Ivanov V.V., Klopovskii K.S., Mankelevich Yu.A. et al. // Laser Physics. 1996. Vol. 6. N 4. P. 654–659.
- [9] Гаврилова Т.В., Аверьянов В.П. // Оптический журнал. 1995. № 9. С. 59–61.