

Экимерный KrCl-лазер ($\lambda = 223$ нм) на смеси He – Kr – HCl

А.М.Ражев, А.А.Жупиков, Е.С.Каргапольцев

Представлены результаты экспериментальных исследований зависимости параметров электроразрядного экимерного KrCl-лазера ($\lambda = 223$ нм) на смеси He – Kr – HCl от условий возбуждения и состава активной газовой среды. Для достижения максимальных значений энергии генерации и КПД KrCl-лазера на смесях с буферным газом гелием применялась система возбуждения, в которой использовалась схема LC-инвертора, с высоковольтным коммутатором на основе искрового разрядника РУ-65. Впервые в KrCl-лазере с активной средой на основе буферного газа He получена энергия генерации 320 мДж с КПД от запасенной в конденсаторах энергии 0.5 % при зарядном напряжении 30 кВ. Длительность импульсов излучения составила 22 ± 1 нс, а импульсная мощность – 15 МВт.

Ключевые слова: экимерный KrCl-лазер, активная среда.

1. Введение

Известно, что излучение газоразрядных экимерных лазеров дискретно, с относительно большими интервалами заполняет УФ диапазон спектра от 193 до 353 нм. Генерация получается на экимерных молекулах галогенидов инертных газов AgF (193 нм), KrF (248 нм), XeCl (308 нм), XeF (349–353 нм). Вследствие своей высокой эффективности, а также в связи со спецификой применений обычно используются AgF-, KrF- и XeCl-лазеры. Следует отметить, что, несмотря на высокие КПД и ресурс XeCl-лазера с длиной волны $\lambda = 308$ нм, наиболее широкое применение находят AgF- и KrF-лазеры с $\lambda = 193$ и 248 нм, т. е. с высокой энергией кванта (6.5–5 эВ). Данный параметр является наиболее важным для многих областей применений, к которым относятся микроэлектроника, фотолитография, медицина (офтальмология). Это связано с сильным поглощением таких длин волн лазерного излучения большинством веществ и фотохимическим механизмом взаимодействия, не приводящим к термическому разрушению и обеспечивающим субмикронную точность обработки поверхности материала.

Однако незаслуженно забытым является еще один экимерный лазер на молекулах KrCl* с длиной волны излучения 223 нм, которая находится между длинами волн 193 и 248 нм и также представляет значительный практический интерес. Эта длина волны больше 200 нм, что соответствует границе высокого пропускания многих оптических материалов типа кварца и началу поглощения, вносящего заметные потери излучения в оптических системах и приводящего к сложностям, связанным с качеством и лучевой прочностью отражающих покрытий.

Вместе с тем излучение с $\lambda = 223$ нм достаточно коротковолновое и по своему механизму воздействия на

различные материалы оказывается подобным излучению с $\lambda = 193$ нм. Поэтому для некоторых областей применения, таких как офтальмология (микрохирургия роговицы глаза), излучение с $\lambda = 223$ нм может быть достойной заменой используемого для этих целей излучения с $\lambda = 193$ нм, что согласуется со спектральными свойствами роговицы глаза [1]. Для таких применений лазер на KrCl должен иметь энергетические и временные параметры излучения, близкие к лазерам с $\lambda = 193$ и 248 нм, т. е. энергию генерации от ~ 500 мДж и выше и максимальный КПД, близкий к 1.0 %. Кроме того, важным параметром является стоимость эксплуатации лазера, которая в основном зависит от частоты смены газа и стоимости компонентов активной среды. Известно, что использование гелия в качестве буферного газа позволяет значительно снизить стоимость эксплуатации лазера, поэтому в настоящей работе решалась задача создания высокоэффективного газоразрядного экимерного KrCl-лазера с активной средой на основе буферного газа гелия.

Впервые о получении генерации в электрическом разряде на переходах $B \rightarrow X$ молекулы KrCl* вблизи $\lambda = 223$ нм сообщалось в работах [2, 3]. В [2] в качестве активной газовой среды применялась смесь He – Kr – BCl_3 , которая возбуждалась двойным поперечным разрядом, а в [3] газовая смесь He – Kr – Cl_2 возбуждалась мощным поперечным разрядом и делалась попытка получения излучения с $\lambda = 223$ нм в режиме сверхсветимости. Однако эффективность этих лазеров оказалась очень низкой. В работе [4] было показано, что увеличить энергетические характеристики KrCl-лазера можно путем увеличения активного объема и запасаемой энергии, а также использования в качестве донора хлора молекул HCl. В данной работе на смеси He – Kr – HCl, возбуждаемой поперечным разрядом от низкоиндуктивного высоковольтного кабельного накопителя с УФ предыонизацией активной среды, была получена энергия генерации 100 мДж. При этом полное давление газовой смеси составило 3.8 атм, а зарядное напряжение – 50 кВ.

Максимальная энергия излучения для газоразрядного KrCl-лазера в гелийсодержащей активной среде была

А.М.Ражев, А.А.Жупиков, Е.С.Каргапольцев. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Лаврентьева, 13/3

Поступила в редакцию 3 июля 2003 г., после доработки – 6 сентября 2003 г.

достигнута в работе [5] и составила 740 мДж. В этом случае активный объем 0.5 л при давлении 5 атм возбуждался с помощью генератора Маркса, зарядное напряжение было равно 70 кВ, а КПД от запасенной энергии составил всего 0.09 %. Максимальный КПД КrCl-лазера с активной средой на основе буферного газа He был получен в работе [6] и оказался равным 0.35 % при энергии 50 мДж. Замена в этом лазере буферного газа He на Ne приводила к увеличению КПД до 0.8 %, а энергии – до 150 мДж.

Как следует из анализа литературных данных, существует небольшое число публикаций, посвященных исследованию газоразрядного КrCl-лазера ($\lambda = 223$ нм) с активной средой на основе буферного газа He. Лазеры с такой активной средой характеризуются низкой энергией излучения или КПД и высокими зарядными напряжениями. В связи с этим целью настоящей работы было создание высокоэффективного газоразрядного КrCl-лазера с максимально достижимой энергией излучения и активной средой на основе буферного газа He при использовании простой и надежной схемы возбуждения на основе стандартного высоковольтного коммутатора РУ-65.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах измерялись энергетические и амплитудно-временные характеристики импульсов напряжения, тока и излучения в наносекундном диапазоне времени. Для измерения энергии излучения использовались калориметр ИМО-3Н и пироэлектрический детектор PE50-BB (Ophir Optronics Ltd.), форма импульса излучения регистрировалась коаксиальным фотоэлементом ФЭК-22. Амплитудно-временные характеристики измерялись осциллографом Tektronix TDS 220. Импульсы напряжения исследовались с помощью калиброванных емкостных и омических делителей с точностью ± 2 %. Для измерения параметров импульсов тока применялся низкоиндуктивный омический шунт с сопротивлением 0.02 Ом. Точность измерений амплитуд напряжения и тока во всех экспериментах составляла 5 %.

Экспериментальная установка была подробно описана нами ранее в работе [7]. Отметим только, что электроды лазера в поперечном сечении имели профиль, близкий к профилю Чанга с шириной по основанию 30 мм. Расстояние между электродами было равно 2.2 см, длина активной среды составляла 60 см, поэтому активный объем при ширине разряда 0.8 см равнялся 105 см³. Автоматическая УФ предыонизация осуществлялась двумя рядами искровых промежутков, находящихся сбоку от основных электродов, с зазорами 2 мм. Камера герметизировалась плоскопараллельными пластинами из кварца КУ1, одна из которых служила выходным зеркалом резонатора. Вторым зеркалом резонатора было внешнее диэлектрическое зеркало с коэффициентом отражения 97 % на $\lambda = 223$ нм. Длина резонатора составляла 120 см. Через разрядный промежуток осуществлялась поперечная прокачка газовой смеси с помощью радиального вентилятора со скоростью около 8 м/с. Полный объем разрядной камеры с вентилятором был равен ~ 25 л.

В экспериментах применялась высоковольтная система возбуждения, в которой использовалась схема LC-инвертора, с автоматической предыонизацией УФ излучением искр сбоку (рис.1). Эта схема состояла из накопительных конденсаторов C_1 и C_2 и двух обостряющих кон-

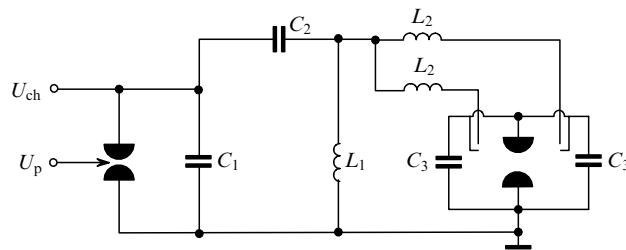


Рис.1. Электрическая схема лазера:

U_{ch} – зарядное напряжение, U_p – напряжение поджига, $C_1 = 48$ нФ, $C_2 = 102$ нФ, $C_3 = 15$ нФ, $L_1 = 2.5$ мкГн, $L_2 = 1$ мкГн $\times 39$.

денсаторов C_3 . В качестве высоковольтного коммутатора применялся стандартный искровой разрядник типа РУ-65. Конденсаторы C_1 и C_2 представляли собой батареи конденсаторов емкостью 2.7 нФ каждый (TDK UHV-6A) и имели емкость 48 и 102 нФ соответственно. После срабатывания разрядника и смены полярности напряжения на C_1 последовательно включенные конденсаторы C_1 и C_2 перезаряжались на два конденсатора C_3 и их ударная емкость становилась равной 33 нФ. Конденсаторы C_3 набирались из конденсаторов емкостью 1.3 нФ с пробойным напряжением 40 кВ (TDK UHV-8A), которые располагались непосредственно на разрядной камере с двух сторон от нее. Каждая емкость C_3 после оптимизации была равна 15 нФ.

Конденсаторы C_3 заряжались от C_1 и C_2 через 78 дросселей с индуктивностью 1 мкГн каждый, установленных для одновременного срабатывания искровых промежутков УФ предыонизации. Поэтому полная индуктивность всех параллельно включенных дросселей была равна ~ 13 нГн. Зарядная индуктивность $L_1 = 2.5$ мкГн. Доработка схемы LC-инвертора была связана с использованием в ней стандартного коммутатора РУ-65, со снижением индуктивности разрядного контура и введением индуктивности в обратный токопровод для достижения максимальной эффективности передачи энергии из накопительного в разрядный контур, включающий в себя активную среду.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В экспериментах исследовалась зависимость энергии лазерного излучения от содержания Кг и HCl в активной среде на основе буферного газа He. На рис.2,а приведены зависимости энергии излучения E от процентного содержания HCl в активной среде при различном процентном содержании Кг. Из данных зависимостей следует, что максимальная энергия достигается при содержании HCl, равном 0.1 %. На рис.2,б показана зависимость энергии излучения E от процентного содержания Кг в активной среде. Максимальная энергия E достигается при содержании Кг, равном 15 %. В результате было получено оптимальное соотношение компонентов газовой смеси – He : Кг : HCl = 84.9 : 15 : 0.1. Полное оптимальное давление зависело от зарядного напряжения и изменялось от 2.4 до 4.0 атм в диапазоне зарядных напряжений от 20 до 32 кВ.

На рис.3 представлены осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда J и мощности излучения P КrCl-лазера для зарядного напряжения 30 кВ. Видно, что задержка между началом

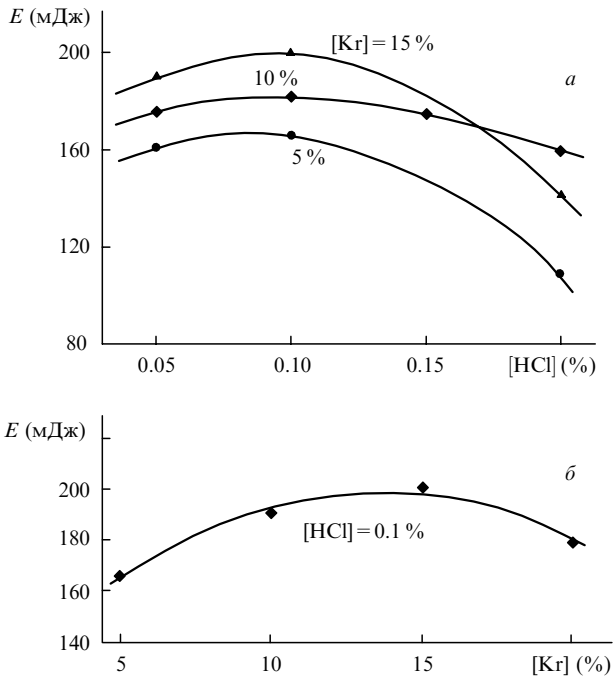


Рис.2. Зависимости энергии излучения E от содержания HCl при разном содержании Kr (а) и от содержания инертного газа Kr при содержании HCl, равном 0.1 % (б), для $U_{ch} = 24$ кВ.

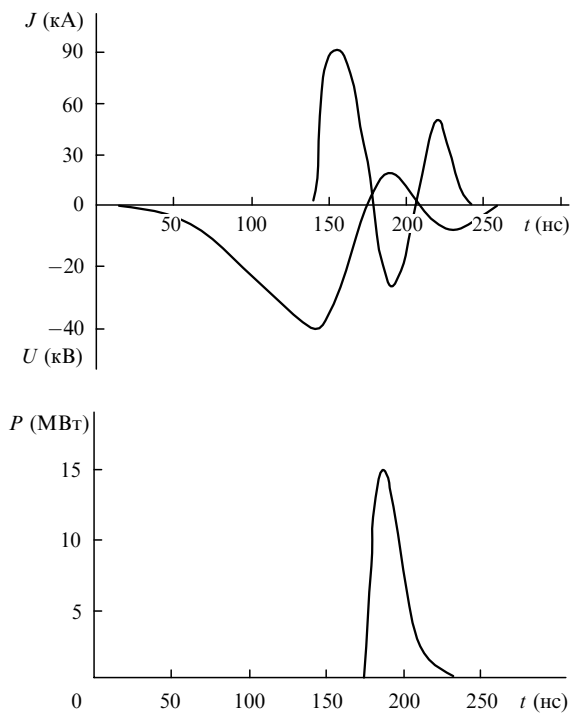


Рис.3. Осциллограммы импульсов тока разряда J , напряжения на разрядном промежутке U и мощности лазерного излучения P для смеси состава He : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1, $p = 3.8$ атм, $U_{ch} = 30$ кВ.

импульса УФ предыонизации и началом импульса тока равна 140 нс, при этом напряжение на обостряющей емкости достигает 40 кВ. Таким образом, эффективность передачи энергии из накопительного контура в разрядный составила $\sim 35\%$. Длительность импульса тока по основанию была равна 40 нс, задержка между началом импульса тока разряда и началом импульса излучения – 35 нс. Импульс излучения имеет колоколообразную форму и длительность 22 ± 1 нс на полувысоте.

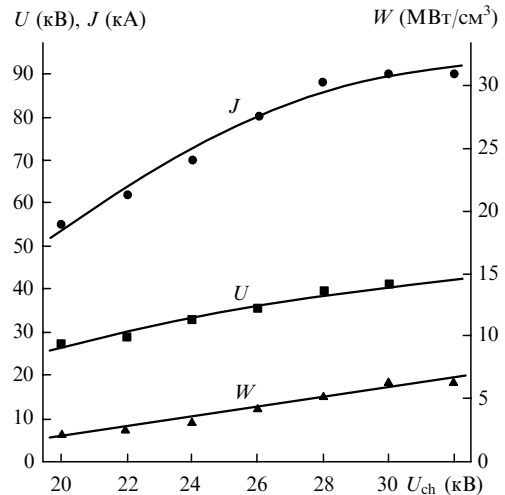


Рис.4. Зависимости напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда J и удельной мощности накачки W от зарядного напряжения U_{ch} для смеси состава He : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1.

На рис.4 показана зависимость напряжения на разрядном промежутке U , тока разряда J и удельной мощности накачки W от зарядного напряжения U_{ch} . При увеличении U_{ch} от 20 до 32 кВ напряжение U увеличивается приблизительно с такой же скоростью от 27 до 41 кВ. При этом ток разряда J быстро растет при увеличении тока накачки от 55 до 90 кА. Аналогично работе [7] были проведены оценки зависимости удельной мощности накачки от зарядного напряжения. Оценки показали, что при изменении зарядного напряжения от 20 до 32 кВ удельная мощность накачки увеличивалась от 2.2 до 6.3 МВт/см³.

Высокая мощность накачки и малая длительность ввода энергии позволили получить высокую эффективность KrCl-лазера в активной среде на основе буферного газа He. На рис.5 представлена зависимость энергии излучения E и полного КПД KrCl-лазера η от зарядного напряжения U_{ch} . Полученные результаты показывают, что с ростом зарядного напряжения энергия излучения также растет почти по линейному закону. При этом полный КПД лазера в зависимости от запасенной энергии изменяется незначительно во всем диапазоне изменения

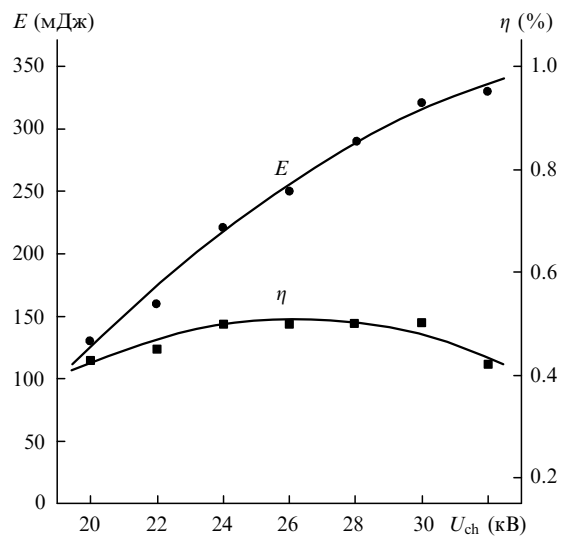


Рис.5. Зависимости энергии излучения E и полного КПД KrCl-лазера η от зарядного напряжения U_{ch} для смеси состава He : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1 .

зарядного напряжения. В результате проведенных экспериментальных исследований удалось впервые достичь энергии генерации 320 мДж с КПД, равным 0.5 % для активной среды на основе буферного газа гелия. КПД лазера от вложенной энергии составил ~ 1.3 %. Мощность при длительности импульса на полувысоте 22 ± 1 нс была равна 15 МВт.

4. Заключение

В настоящей работе создана эффективная система возбуждения эксимерного KrCl-лазера, в которой используется схема LC-инвертора, на основе искрового разрядника РУ-65, обеспечивающая режим работы с удельной мощностью накачки до 6 МВт/см³. Впервые в газовой смеси состава He : Kr : HCl = 84.9 : 15 : 0.1 при полном дав-

лении 3.8 атм и зарядном напряжении 30 кВ получена энергия генерации 320 мДж с КПД от запасенной в конденсаторах энергии 0.5 %. Длительность импульсов излучения составила 22 ± 1 нс, а импульсная мощность – 15 МВт.

1. Bagayev S.N., Razhev A.M., Chernikh V.V., Zhupikov A.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3908**, 138 (2000).
2. Ishchenko V.N., Lisitsyn V.N., Razhev A.M. *Opt. Commun.*, **21** (1), 30 (1977).
3. Waynant R.W. *Appl. Phys. Lett.*, **30** (5), 234 (1977).
4. Sze R.C., Scott P.B. *Appl. Phys. Lett.*, **33** (5), 419 (1978).
5. Andrew J.E., Dyer P.E., Roebuck P.J. *Opt. Commun.*, **49** (3), 189 (1984).
6. Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31** (7), 1231 (1995).
7. Жупиков А.А., Ражев А.М. *Квантовая электроника*, **24** (8), 683 (1997).