А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко, Е. В. Букатый,
Квантовая электроника, 1989, том 16, номер 12, 2409–2412

«Квантовая электроника», **16**, № 12 (1989) УДК 621.373.826.038.823

А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко, Е. В. Букатый

МОЩНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ НА $\lambda=222$ нм ПРИ НАКАЧКЕ ГАЗОВОЙ СМЕСИ Ne(He)—Kr—HCl САМОСТОЯТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований генерации в смесях Ne(He) — Kr — HCl при накачке поперечным разрядом с УФ предыонизацией. Получено мощное излучение на $\lambda=222$ нм с КПД~0,5 % относительно энергии, запасаемой в емкостном накопителе, при активной длине лазера 20 и 60 см. Показано, что основным каналом образования молекул KrCl является ион-ионная рекомбинация, а высокие энергии генерации реализуются в смесях с буферным газом неоном при интенсивной предыонизации и мощности накачки свыше 1,5 МВт/см^3.*

1. В настоящее время электроразрядные эксиплексные лазеры на галогенидах благородных газов находят широкое применение в различных областях науки и техники. Для задач фотохимии и фотолитографии, требующих коротковолновых источников излучения, весьма перспективным является эксиплексный KrCl-лазер с длиной волны генерации 222 нм, который наряду с высокими энергетическими характеристиками [1—5] имеет (при добавках водорода) один из самых больших для эксиплексных лазеров на галогенидах благородных газов ресурс работы рабочей смеси [6, 7]. Однако реализация высоких энергетических параметров в KrCl-лазере затруднена тем, что при высокой концентрации криптона в оптимальных газовых смесях происходит быстрое контрагирование разряда; кроме того, KrCl-лазер обладает более высоким по сравнению с XeF-, KrF- и ArF-лазерами порогом генерации. Так, длительности импульсов лазерного излучения в [1—4] из-за контрагирования разряда не превышали 18 нс на полувысоте, а большие энергии излучения достигались, например, в [3] только при удельных мощностях накачки свыше 10 МВт/см^3 и $U_0/dN\geqslant 2\cdot 10^{-16}$ В·см^2, где U_0 — напряжение пробоя лазерного промежутка, d — межэлектродный зазор и N — концентрация частиц в рабочей смеси.

Из литературы известны различные версии относительно основного канала образования молекул KrCl*. В [2] полагалось, что молекулы KrCl* в основном (~80 %) образуются в результате гарпунной реакции

$$Kr^*+HCl\rightarrow KrCl^*+H. \quad (1)$$

В [1, 3] указывалось на возможность образования молекул KrCl* в результате ион-ионной рекомбинации

$$Kr^+ + Cl^-\rightarrow KrCl^*, \quad (2)$$

гарпунной реакции при взаимодействии атомов криптона в верхних метастабильных состояниях с HCl,

$$Kr^{**}+HCl\rightarrow KrCl^*+H, \quad (3)$$

и гарпунной реакции при взаимодействии атомов криптона, в том числе в нижнем метастабильном состоянии $^3P_2$, с возбужденными молекулами HCl*,

$$Kr^*(^3P_2)+HCl^*\rightarrow KrCl^*+H, \quad (4)$$

причем вклад гарпунной реакции и ион-ионной рекомбинации в образование KrCl* согласно [1] одного порядка.

В настоящей работе приведены результаты исследований влияния мощности накачки, интенсивности предыонизации и активной длины лазера на эффективность и энергию генерации на $\lambda=222$ нм. Работа является продолжением исследований [5, 7, 8], где, в частности, показано, что KrCl-лазер может эффективно работать при сравнительно малых мощностях накачки ($\sim 1{,}5$ МВт/см^3), а также получена энергия излучения 0,6 Дж на $\lambda=222$ нм при длительности импульса на полувысоте 40 нс и эффективности относительно запасаемой энергии $\sim 0{,}4$ %.

2. Эксперименты по исследованию генерации проводились на двух установках. Активная длина лазера ЛИДА-КТ [9] составляла 60 см, межэлектродный зазор 3,6 см, ширина разряда $\sim 1{,}5$ см; активная длина лазера ДИЛАН [10] была 20 см, межэлектродный зазор 1,6 см и ширина разряда $\sim 0{,}4$ см. Ширина основного разряда определялась шириной разряда предыонизации между сетчатым электродом и установленным под сеткой дополнительным электродом [5, 9]. Мощность накачки изменялась за счет зарядного напряжения, а в лазере ДИЛАН также вследствие изменения накопительной и обострительной емкостей. Наряду с предыонизацией объемным разрядом в лазере ДИЛАН использовалась подсветка от 20 искровых промежутков, установленных за сетчатым электродом, интенсивность которой была в несколько раз меньше «объемной». Рабочие смеси, состоящие из буферного газа гелия или неона, рабочего газа криптона и галогеноносителя HCl, готовились в лазерной камере. Резонатором служили плоское глухое зеркало с покрытием из Al и плоскопараллельная кварцевая пластинка. Энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2Н, а форма импульса излучения — фотодиодом ФЭК-22 СПУ, сигнал с которого подавался на осциллограф 6ЛОР-04.

3. На рис. 1 показаны зависимости энергии излучения и КПД от зарядного напряжения, полученные на лазере с активной длиной 60 см в смеси Ne—Kr—HCl. Максимальная эффективность $\sim 0{,}5$ % достигалась при уменьшении зарядного напряжения до значения, при котором еще срабатывал искровой разрядник РУ-65. Мощность накачки при этом составляла $\sim 1{,}5$ МВт/см^2, а $U_0/dN \approx 10^{-16}$ В·см^2. Замена неона гелием при малых мощностях накачки приводила к уменьшению энергии излучения более чем на два порядка. На рис. 2 показаны зависимости энергии излучения и КПД от зарядного напряжения на лазере с активной длиной 20 см при накопительной и обострительной емкостях по 5 нФ. Видно, что генерация наблюдается как с неоном, так и с гелием, и ее эффективность в смесях с неоном достигает $\sim 0{,}5$ %.

На рис. 3 приведены осциллограммы импульсов излучения на молекулах XeCl* и KrCl*, полученные в указанных условиях. Импульсы генерации имеют подобную форму, а пиковые мощности излучения на $\lambda=308$ и 222 нм различаются всего на 20 %. Однако первый пик импульса генерации на молекулах KrCl* имеет меньшую длительность на полувысоте, а в максимуме второго пика мощность генерации на молекулах KrCl* в 2,3 раза меньше, чем на молекулах XeCl*. Отметим, что мощность генерации на молекулах XeCl* практически соответствует мощности накачки и что максимальная мощность накачки в этих экспериментах достигала ~ 10 МВт/см^3. Дальнейшее увеличение мощности накачки лазера ДИЛАН за счет увеличения емкости накопителя до $C_0 \approx C_1 \approx 10$ нФ приводило к срыву генерации на молекулах KrCl* из-за контрагирования разряда. По той же причине срывалась гене-

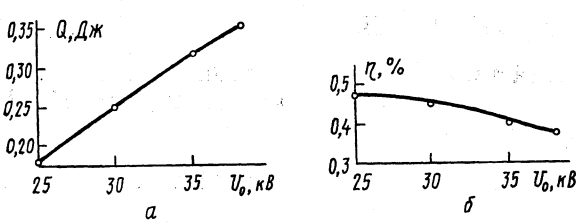

Рис. 1. Зависимости энергии лазерного излучения (*а*) и КПД относительно запасаемой энергии (*б*) от зарядного напряжения при активной длине лазера 60 см; смесь Ne:Kr:HCl=1000:40:1, $p=4{,}25$ атм

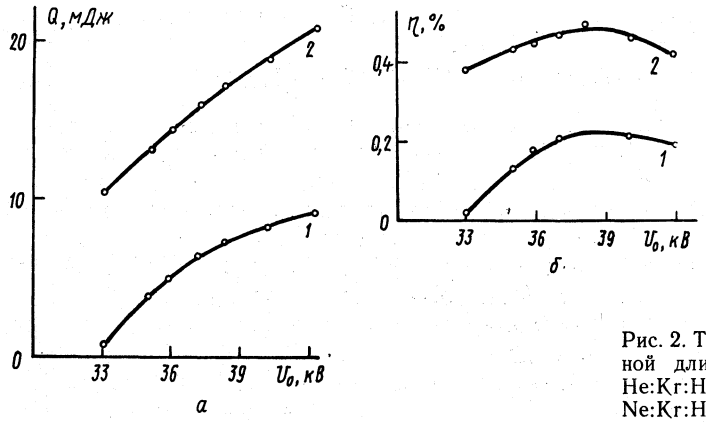

Рис. 2. То же, что и на рис. 1, при активной длине 20 см лазера на смесях He:Kr:HCl=700:50:1, p=3 атм (*1*) и Ne:Kr:HCl=750:45:1, p=4,25 атм (*2*)

рация на молекулах KrCl* при оптимальном емкостном накопителе ($C_0 \approx C_1 \approx 5$ нФ), но при уменьшении интенсивности предыонизации. Уменьшение мощности накачки в 2 раза за счет уменьшения емкости накопителя ($C_0 \approx C_1 \approx 3$ нФ) приводило к уменьшению мощности и энергии генерации на молекулах KrCl почти на порядок, тогда как мощность и энергия генерации на молекулах XeCl* практически не изменялись, а эффективность возрастала примерно в 1,5 раза.

Для определения основного канала образования молекул изучалось поведение спонтанного излучения на λ=222 нм при изменении величины U_0/dN при накачке разрядом, который контролируется электронным пучком. Подобные эксперименты проводились ранее для выяснения основного канала образования молекул XeCl* и XeF* [11]. С увеличением зарядного напряжения от нуля до статического пробивного напряжения для KrCl-лазера была получена зависимость, подобная наблюдаемой в [11]. При разряде без ионизационного размножения (ток разряда повторял ток электронного пучка) энергия, вкладываемая в активную среду от разряда, не давала увеличения мощности спонтанного излучения на λ=222 нм, а при накачке разрядом с ионизационным размножением мощность излучения возрастала пропорционально энерговкладу.

4. Обсудим полученные результаты. Как видно из рис. 1, KrCl-лазер эффективно работает при малых U_0/dN ($\sim 10^{-16}$ В·см^2) и мощностях накачки свыше 1,5 МВт/см^2 лишь при достаточно большой активной длине лазера, составляющей 60 см в лазере ЛИДА-КТ [9] и 90 см в лазере ЛИДА-101 [5], а также при обеспечении объемного разряда накачки. Из-за большого содержания криптона в оптимальных лазерных смесях KrCl-лазера необходимо использовать эффективные системы предыонизации. В лазерах с малой активной длиной также достигаются высокие энергии излучения и эффективности (см. рис. 2, 3), но в этом случае следует увеличивать мощность накачки. В KrCl-лазере при обеспечении достаточной мощности накачки и формировании объемного разряда эффективность генерации увеличивается с уменьшением U_0/dN из-за улучшения согласования импеданса генератора накачки с сопротивлением лазерного промежутка.

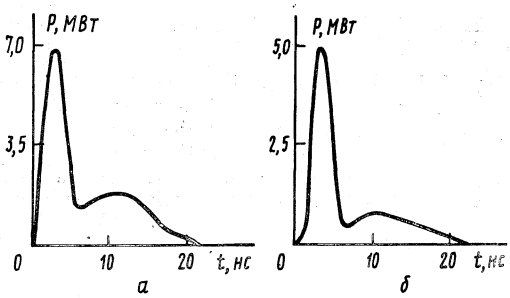

Рис. 3. Осциллограммы импульсов генерации на молекулах XeCl* в смеси Ne:Xe:HCl=750:10:1 (*а*) и KrCl* в смеси Ne:Kr:HCl=750:45:1 (*б*) при p=4,25 атм и U_0=40 кВ

Основным каналом образования молекул KrCl* является ионная рекомбинация в присутствии третьей частицы:

$$Kr^+(Kr_2^+) + Cl^- + Ne(He) \rightarrow KrCl^* + (Kr) + Ne(He). \quad (5)$$

Это утверждение основывается на следующих фактах: а) интенсивность спонтанного излучения молекул KrCl* не изменяется при накачке несамостоятельным разрядом без ионизационного размножения, хотя энерговклад в активную среду при этом возрастает, в то время как в разряде с ионизационным размножением при увеличении концентрации положительных ионов наблюдается увеличение интенсивности излучения на $\lambda=222$ нм; б) энергия диссоциации молекул HCl* велика (4,43 эВ), что влечет за собой из-за недостатка энергии $Kr^*(^3P_2)$ малую вероятность реакции (1); в) при высоких давлениях (оптимальные давления для KrCl-лазера лежат в диапазоне 4—6 атм) скорость трехчастичной реакции (5) больше, чем двухчастичной (2) [12]; г) существенно более высокие (примерно в 2 раза) энергии излучения на $\lambda=222$ нм в смесях с неоном, чем в смесях с гелием (рис. 2). Известно, что в неоне функция распределения электронов по энергиям сдвинута по сравнению с гелием в сторону больших энергий [2], поэтому в смесях с неоном разрядный ток примерно в 2 раза больше и соответственно больше концентрация положительных ионов в разряде. Сравнение энергий, получаемых на молекулах XeCl*, KrCl*, XeF* и KrF* с буферными газами гелием и неоном, показывает, что энергия излучения XeCl- и KrCl-лазеров при замене гелия неоном увеличивается примерно вдвое, тогда как энергия излучения XeF- и KrF-лазеров меняется незначительно. В настоящее время доказано, что для электроразрядных XeF- и KrF-лазеров в заселение верхнего лазерного уровня вносят сравнимый вклад реакции (1) и (5), а для XeCl-лазера основной является реакция (5) [11, 12].

5. Таким образом, нами получена мощная эффективная генерация на $\lambda=222$ нм. Показано, что при использовании интенсивной предыонизации KrCl-лазер может работать с КПД $\sim 0{,}5\,\%$ при мощности накачки свыше 1,5 МВт/см^3, причем основным каналом образования молекул KrCl* является ион-ионная рекомбинация.

1. R. S. Sze, P. B. Scott. *Appl. Phys. Letts*, **33**, 419 (1978).
2. R. S. Sze. *IEEE J.* **QE-15**, 1338 (1979).
3. E. Armandillo, A. Luches, V. Nassisi, M. R. Perrone. *Appl. Phys. Letts*, **42**, 860 (1983).
4. J. E. Andrew, P. E. Dyer, P. J. Roebuck. *Optics Comms*, **49**, 189 (1984).
5. С. В. Мельченко, А. Н. Панченко, В. Ф. Тарасенко. *Письма в ЖТФ*, **12**, 171 (1986).
6. T. J. McKee, D. J. James, W. S. Nip, R. W. Weeks, C. Willis. *Appl. Phys. Letts*, **36**, 943 (1980).
7. В. В. Грузинский, К. М. Дегтяренко, В. К. Шалаев, Т. Н. Копылова, В. С. Верховский, В. Ф. Тарасенко, С. В. Мельченко. *ЖПС*, **38**, 559 (1983).
8. В. С. Верховский, С. В. Мельченко, В. Ф. Тарасенко. *Квантовая электроника*, **8**, 417 (1981).
9. В. Ф. Тарасенко, А. Н. Панченко, С. В. Мельченко, Н. С. Белокриницкий, М. П. Антоненко, Ю. И. Ступак, Г. А. Волошина, О. А. Ткачук. *Квантовая электроника*, **14**, 2450 (1987).
10. М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко. *Квантовая электроника*, **15**, 1978 (1988).
11. Ю. И. Бычков, А. И. Горбатенко, И. Н. Коновалов, В. Ф. Лосев, В. Ф. Тарасенко. *Квантовая электроника*, **6**, 2103 (1979).
12. И. Мак-Даниель, У. Нигэн. Газовые лазеры.— М.: Мир, 1986.

Институт сильноточной электроники
СО АН СССР, Томск

Поступило в редакцию
15 марта 1989 г.

A. N. Panchenko, V. F. Tarasenko, E. V. Bukatyi.

High-power laser action at $\lambda=222$ nm under pumping by a self-sustained discharge in the Ne(He)—Kr—HCl gas mixture.

Results are presented of experimental studies of the laser action in Ne(He)—Kr—HCl mixtures pumped by a transverse discharge with the UV preionization. The high-power radiation has been obtained at $\lambda=222$ nm with the efficiency of $\sim 0.5\%$ with respect to the energy stored in a capacitive accumulator, the active laser length being 20 and 60 cm. It is shown that ion-ion recombination is the basic channel of the KrCl* molecule formation and high lasing energies are realized in mixtures with the neon buffer gas under intensive preionization and pumping power higher than 1.5 MW/cm^3.