

Планарная эксилампа на хлоридах инертных газов с накачкой поперечным самостоятельным разрядом

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко

Приведены конструкция и параметры излучения источника УФ и ВУФ спонтанного излучения – эксилампы, работающей на молекулах хлоридов инертных газов $ArCl^$, $KrCl^*$ и $XeCl^*$ в диапазоне длин волн 175–308 нм. Для возбуждения смесей $Ne-Xe$ (Kr , Ar) – HCl использовался самостоятельный разряд высокого давления с искровой предыонизацией. Показано, что при накачке поперечным разрядом смесей инертных газов и галогенов интенсивности свечения полосы $B-X$ молекул $ArCl^*$, $KrCl^*$ и $XeCl^*$ сравнимы, и до 90 % энергии излучения эксиламп может быть сконцентрировано в УФ области спектра. Пиковая плотность мощности УФ излучения на $\lambda = 222$ и 308 нм на поверхности выходного окна эксилампы составляла ~ 2 кВт/см² при энергии в импульсе до ~ 3 мДж. Энергия излучения на $\lambda = 175$ нм на выходе эксилампы достигала ~ 0.6 мДж при пиковой плотности мощности ~ 0.4 кВт/см².*

Ключевые слова: эффективное мощное спонтанное УФ излучение, объемный разряд высокого давления.

1. Введение

Для ряда применений в различных областях науки, технологии, медицины и т. д. требуются источники мощного ВУФ–УФ излучения. Одним из типов УФ излучателей являются электроразрядные эксиплексные лазеры на молекулах галогенидов благородных газов, однако они достаточно сложны и дороги в эксплуатации. Поэтому в случаях, не требующих когерентности излучения, лазеры можно заменить более простыми источниками спонтанного излучения – эксилампами. Методы возбуждения эксиламп имеют много общего с хорошо разработанными методами накачки эксиплексных лазеров. Как правило, в качестве источника мощного УФ излучения используется самостоятельный разряд в различных смесях инертных газов и галогенов, формируемый импульсными высоковольтными генераторами разных конструкций [1–11]. Средняя мощность эксиламп с возбуждением тлеющим разрядом превышает 1 кВт [10, 11]. Эксилампы эффективно работают в более широких диапазонах параметров накачки, состава и давления газовых смесей, чем эксиплексные лазеры, и их КПД, как правило, выше. Эксилампы не критичны к мощности возбуждения и геометрии активной области, что облегчает задачу формирования объемного разряда и позволяет создавать как широкоапертурные, так и миниатюрные источники спонтанного УФ излучения. Однако ранее основное внимание уделялось созданию эксиламп с высокой средней мощностью излучения, тогда как для ряда приложений нужна большая плотность мощности излучения. К настоящему времени известны лишь несколько работ, в которых сообщалось об исследованиях $XeCl^*$ - и $KrCl^*$ -эксиламп с большой плотностью мощности излучения [4–6].

В то же время излучательные характеристики молекул $ArCl^*$ в объемном поперечном разряде исследованы слабо, а мощность излучения на $\lambda = 175$ нм не измерялась [7, 9].

Целью настоящей работы является разработка импульсной планарной эксилампы на молекулах хлоридов инертных газов с плотностью мощности излучения ~ 2 кВт/см², излучающей в УФ и ВУФ областях спектра. Для возбуждения эксилампы был выбран поперечный разряд с УФ предыонизацией, что позволило увеличить давление рабочей смеси до нескольких атмосфер.

2. Конструкция эксилампы и методики измерений

Конструкция планарной эксилампы с накачкой поперечным разрядом приведена на рис.1. Для формирования объемного разряда использовался, как и в [4–6], импульсный генератор, состоящий из накопительного ($C_0 = 3.3 - 13.2$ нФ) и обострительных ($C_1 = 0.9$ нФ) конденсаторов и управляемого искрового разрядника РУ-78. Зарядное напряжение накопительного конденсатора C_0 обычно составляло 25 кВ. Разрядная область имела диаметр 5 см при расстоянии между сплошным и сетчатым электродами $d = 2.5$ см. Прозрачность сетчатого электрода составляла 65 %. Предыонизация газа между электродами осуществлялась излучением искровых промежутков, расположенных вокруг разрядной области. Для вывода излучения использовалось кварцевое окно толщиной 12 мм с пропусканием на $\lambda = 308, 222$ и 175 нм более 90 %, 80% и 37 % соответственно.

Газовые смеси, состоящие из инертных газов Ne , He , Xe , Kr , Ar и галогенов HCl или Cl_2 при давлении буферного газа p_b до 2.5 атм, готовились непосредственно в разрядной камере.

Для измерения тока разряда и напряжения на разрядном промежутке были установлены пояс Роговского и делитель напряжения. Спектр выходного излучения эксилампы в диапазоне 200–800 нм измерялся спектромет-

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, vft@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 3 октября 2005 г.

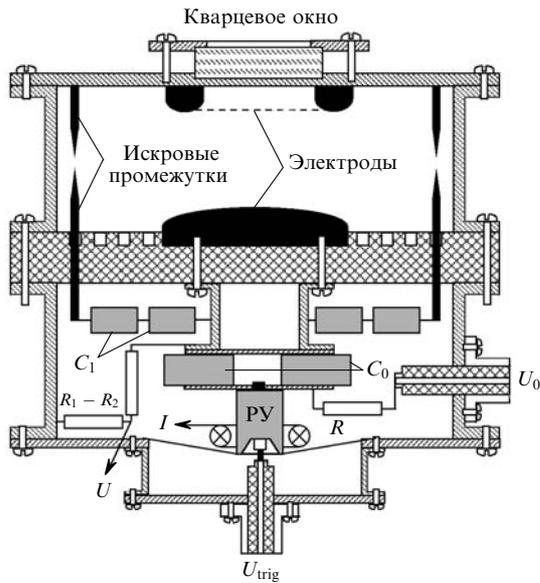


Рис.1. Конструкция эксилампы с накачкой поперечным объемным разрядом:

C_0 и C_1 – накопительные и обострительные конденсаторы; ПУ – управляемый искровой разрядник; U , I – сигналы с делителя напряжения $R_1 - R_2$ и пояса Роговского соответственно; U_0 , U_{trig} – подводы зарядного напряжения и пускового импульса.

ром EPP-2000 C-25 (StellarNet Inc.), а в диапазоне 150–500 нм – вакуумным монохроматором VM-502 (Acton Research Corp.). Зависимость мощности УФ излучения от времени определялись вакуумным фотоэлементом ФЭК-22 СПУ. При измерении формы импульса излучения на $\lambda = 175$ нм выходное окно эксилампы покрывалось салицилатом натрия. Энергия излучения на длинах волн 175 и 222 нм определялась измерителем мощности УФ излучения С8026 с сенсорной головкой СН8025 (Hamamatsu, полоса чувствительности 150–250 нм), а на $\lambda = 222$ и 308 нм – измерителем энергии ОРНИР с сенсорной головкой РЕ-50ВВ (диаметр измерительной площадки 50 мм) или фотоэлементом ФЭК-22 СПУ (диаметр фото катода 40 мм), который предварительно калибровался при помощи ртутной лампы ДРЛ-400, монохроматора МУМ-2 и измерителя мощности ОРНИР с сенсором PD-300UV. Измерения энергии излучения на $\lambda = 175$ нм проводились в атмосфере аргона. Электрические сигналы записывались цифровыми осциллографами TDS-224 или TDS-220.

3. Спектральный состав излучения эксилампы

На рис.2 показан обзорный спектр излучения объемного разряда в смеси Ne:Xe:HCl = 830:3:1 при давлении $p_b = 2.5$ атм. Структуры спектров излучения эксилампы при работе на хлоридах различных инертных газов достаточно близки. Основная доля энергии излучается в УФ и ВУФ диапазонах на переходах молекул RCl^* , где R – атом Xe, Kr или Ar. В остальной части спектра излучение практически отсутствует, видны только отдельные слабые линии возбужденных атомов и ионов R^+ , R^* , на долю которых приходится всего несколько процентов общей энергии излучения.

Подробные спектры излучения объемного поперечного разряда в смесях Ne–Xe (Kr, Ar)–HCl представлены на рис.3. В излучении объемного разряда наиболее

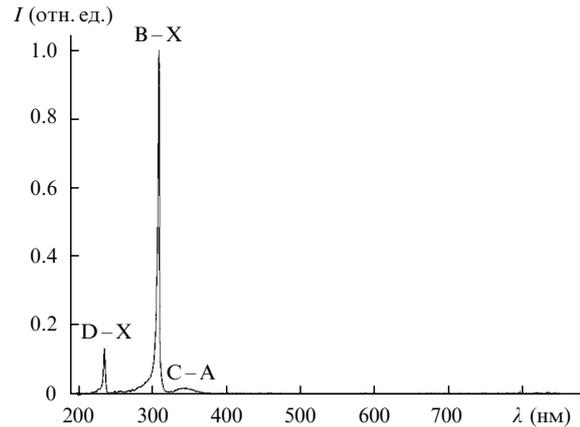


Рис.2. Обзорный спектр излучения XeCl-эксилампы в диапазоне длин волн 190–850 нм на смеси Ne:Xe:HCl = 840:3:1 при $p_b = 2.5$ атм.

интенсивными являются относительно узкие полосы переходов D–X (максимумы на 236, 199 и 169 нм), B–X (максимумы на 308, 222 и 175 нм) и широкая полоса C–A молекул RCl^* . Подобный спектральный состав излучения разряда наблюдается и при других способах возбуждения эксиламп [1–7] и обусловлен строением молекул галогенидов благородных газов и подобием кинетических процессов в газе при различных способах формирования разряда. Соотношение интенсивностей данных полос зависит от способа формирования разряда. Так, в излучении тлеющего и емкостного разрядов отношение интенсивностей переходов D–X и B–X выше, чем в поперечном разряде высокого давления, а полуширина полосы перехода B–X возрастает и может достигать 10 нм [11].

Кроме того, в спектрах излучения разряда в смесях с Kr и особенно с Ar наблюдается полоса $D' - A'$ возбужденных молекул Cl_2^* на длине волны 258 нм. Интенсивность полосы хлора в спектре KrCl-лампы составляет 3% интенсивности полосы B–X-перехода молекул KrCl^{*}, что близко к интенсивности спектра спонтанного

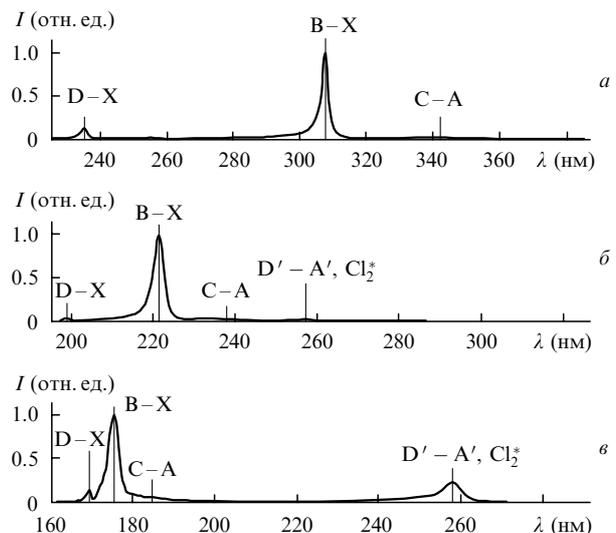
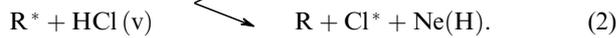
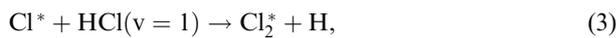


Рис.3. Подробные спектры излучения эксилампы на смесях Ne: Xe:HCl = 840:3:1 при $p_b = 2.5$ атм (а), Ne:Kr:HCl = 1300:15:1 при $p_b = 2$ атм (б) и Ne:Ar:HCl = 2200:20:1 при $p_b = 2.5$ атм (в). Интенсивности полос молекул ArCl^{*} скорректированы с учетом пропускания выходной кварцевой пластинки.

излучения активной среды электроразрядного KrCl-лазера [12]. В излучении смеси Ne–Ar–HCl относительная интенсивность полосы Cl₂^{*} возрастает в 5–7 раз. Возникновение полосы хлора в спектрах излучения ArCl- и KrCl-эксиламп можно связать с реакциями, проходящими с участием возбужденных атомов хлора Cl^{*} в различных состояниях. Данные состояния могут заселяться из-за преддиссоциации эксиплексных молекул при их образовании в следующих процессах:



Здесь R⁺, R* – ион или метастабильное состояние криптона или аргона; HCl(v) – колебательно-возбужденная молекула хлористого водорода. На высокую вероятность хода реакций по каналу (2) для R = Kr указывалось в [13], а в [12] измеренная концентрация Cl^{*} в среде электроразрядного KrCl-лазера оказалась сравнимой с концентрацией метастабилей Kr*. В случае смесей с аргоном (R = Ar) доля реакций, проходящих по каналу (2), при низком давлении смеси может достигать 80 % [14, 15]. Возбужденные молекулы хлора затем могут возникать как в гарпунной реакции [6]



так и в процессе ион-ионной рекомбинации



где положительные ионы хлора возникают при ступенчатой ионизации Cl^{*}.

Основная энергия, излучаемая эксилампой с накачкой поперечным разрядом, концентрируется на В–Х-переходе молекул RCl^{*}, полуширина которого вследствие быстрой столкновительной релаксации в газе высокого давления не превышает ~2 нм. Так, в условиях эксперимента, представленных на рис.3, около 80 % энергии излучается на В–Х-переходе молекул KrCl^{*} (диапазон длин волн 200–230 нм) и XeCl^{*} (диапазон длин волн 275–320 нм). В случае ArCl-эксилампы до 60 % энергии излучается в ВУФ области спектра, остальная часть энергии в основном обусловлена излучением молекулярного хлора на λ = 258 нм (переход D' – A'). Отсюда можно сделать вывод, что объемный поперечный разряд в смеси Ne–Ar–HCl может служить эффективным источником мощного спонтанного ВУФ излучения.

4. Вольт-амперные и излучательные характеристики эксилампы

На рис.4 приведены осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке эксилампы, тока разряда накопительного конденсатора и мощности излучения на молекулах KrCl^{*} и XeCl^{*}. Активное сопротивление поперечного разряда в условиях нашего эксперимента не превышало 30 % импеданса генератора накачки, поэтому ток разряда накопителя осциллировал, а его амплитуда слабо зависела от давления рабочей смеси. Импульсы УФ излучения начинаются после пробоя разрядного промежутка эксилампы. До момента пробоя ток обусловлен зарядкой обострительных конденсаторов через искровые промежутки предьонизации, при этом моменты достижения максимумов излучения молекул

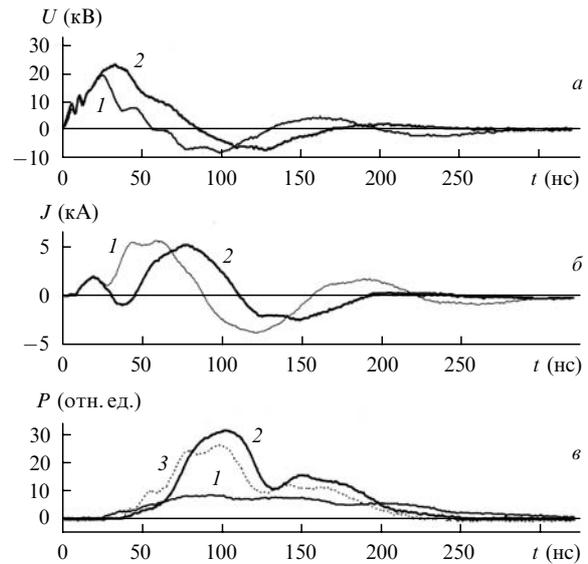


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке эксилампы (а), тока разряда накопительного конденсатора (б) и мощности излучения на λ = 222 (1, 2) и 308 нм (3), полученные на смесях Kr:HCl = 15:1 (p = 18 Тор) при давлении неона 0.5 (1) и 2.5 атм (2) и Xe:HCl = 3:1 (p = 9 Тор) при давлении неона 2.5 атм (3).

RCl^{*} близки к таковым для максимумов тока разряда. Длительность импульсов УФ излучения совпадала с длительностью накачки, что говорит о высокой однородности активной среды эксилампы. С повышением давления газовой смеси растет активное сопротивление разрядного промежутка, в результате чего увеличивается мощность накачки и резко растут мощность и энергия излучения молекул хлоридов инертных газов.

Влияние сорта галогеноносителя на работу эксилампы иллюстрируется на рис.5. При замене хлористого водорода хлором меняется форма импульса излучения молекул хлоридов инертных газов, а энергия излучения как на λ = 222 нм, так и на λ = 308 нм падает примерно в 1.5 раза. Мощность излучения молекул KrCl^{*} в смеси с Cl₂ в течение 10 нс после пробоя разрядного промежутка лампы возрастает, а затем наблюдается ее постепенный спад. Полученная зависимость мощности излучения на λ = 222 нм практически совпадает с временным ходом концентрации метастабилей криптона в объемном поперечном разряде [16]. Отсюда следует, что в смесях с хлором молекулы RCl^{*} формируются преимущественно в гарпунной реакции

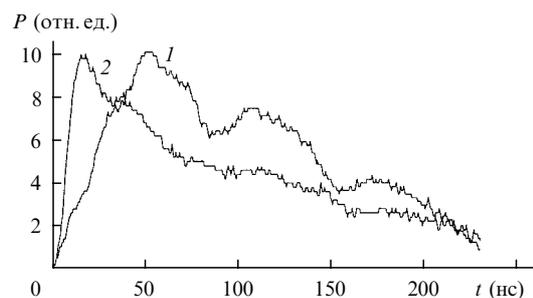


Рис.5. Осциллограммы мощности излучения на λ = 222 нм, полученные в смесях Kr:HCl = 15:1 (1) и Kr:Cl₂ = 15:1 (2) (p = 36 Тор) при давлении неона 0.5 атм.

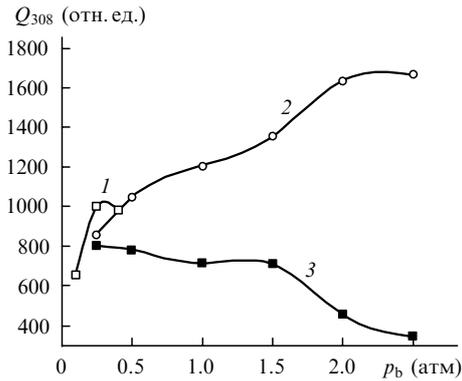


Рис.6. Зависимости энергии излучения эксилампы на $\lambda = 308$ нм от давления буферного газа аргона (1), неона (2) и гелия (3). Газовая смесь Хе:НСI = 3:1, $p = 9$ Тор.

В случае использования НСI основным каналом образования молекул хлоридов инертных газов является трехчастичная ион-ионная рекомбинация [6]



поэтому мощность излучения молекул RCl^* имеет несколько максимумов, коррелирующих с максимумами концентрации ионов в плазме, которые близки по времени к максимумам тока разряда.

Наблюдаемые временные зависимости интенсивностей свечения полосы $D' - A'$ молекулы Cl_2^* и молекул RCl^* в наших экспериментах были подобны. Отсюда можно сделать вывод о том, что D' -состояние молекулы Cl_2 в объемном поперечном разряде заселяется преимущественно в процессе ион-ионной рекомбинации (см. реакцию (4)).

Влияние сорта буферного газа на энергию излучения эксилампы показано на рис.6. При низком давлении наиболее эффективным является буферный газ аргон. Однако с повышением давления интенсивность и длительность свечения молекул RCl^* в смесях с Аг и Не начинают падать из-за развития искровых каналов в разрядном промежутке эксилампы. Максимальная энергия спонтанного излучения получена в газовых смесях с буферным газом неона.

Зависимости удельных плотностей энергии Q_{sp} и пиковой мощности P_{sp} излучения на $\lambda = 222$ и 308 нм от расстояния до внешней поверхности кварцевого окна эксилампы приведены на рис.7. Данные зависимости сняты при помощи фотодиода. Видно, что параметры излучения ХеСI- и КгСI-эксиламп практически совпадают. Минимальное расстояние R , на котором мог быть установлен данный детектор, равнялось 1.6 см. Экстраполяция экспериментальной зависимости до поверхности выходного окна ($R \sim 0.1$ см) дает на выходе из эксилампы $Q_{sp} = 0.12$ МДж/см², что при площади кварцевой пластинки $S = 20$ см² соответствует полной энергии излучения $Q_t = 2.4$ МДж. При этом I_{sp} достигает ~ 1.8 кВт/см². Результаты расчетов Q_{sp} и I_{sp} по методикам, приведенным в [6], отличались от данных экстраполяции не более чем на 20%. При использовании измерителя ОРНIР с головкой РЕ-50ВВ получено $Q_{sp} = 2.5 \pm 0.2$ мДж на расстоянии ~ 5 мм от поверхности выходного окна. При увеличении накопительной емкости C_0 до 13.2 нФ энергия излучения достигала 3 мДж, а пиковая плотность мощности возрастала до ~ 2 кВт/см².

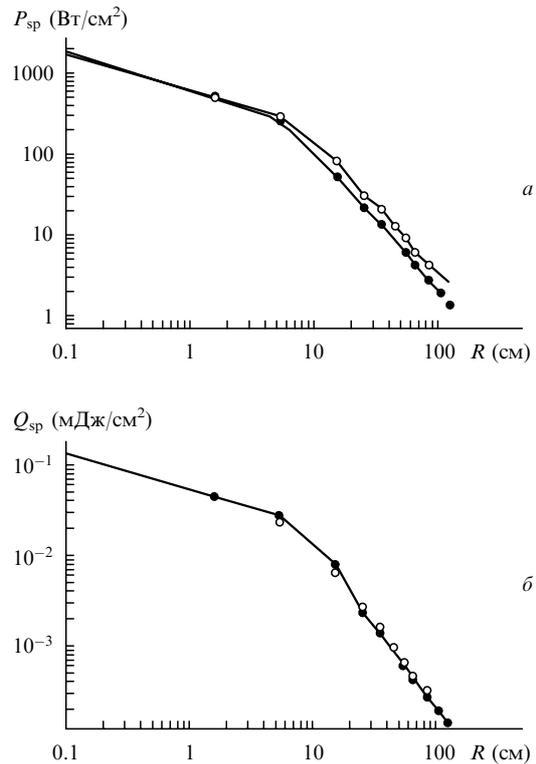


Рис.7. Зависимости удельной плотности пиковой мощности (а) и удельной плотности энергии (б) УФ излучения на $\lambda = 222$ нм (светлые точки) и 308 нм (темные точки) от расстояния до внешней поверхности выходного кварцевого окна эксилампы для смеси Не: Хе:НСI = 830:3:1 ($p_b = 2.5$ атм) и Не:Кг:НСI = 680:15:1 ($p_b = 2$ атм). Точки – данные измерений, кривые – экстраполяция экспериментальных данных.

Характеристики ВУФ излучения молекул $ArCl^*$ были примерно в 4 раза хуже, чем молекул $HeCl^*$ и $KrCl^*$. Энергия излучения Q_t на $\lambda = 175$ нм на выходе эксилампы достигала ~ 0.6 МДж при пиковой плотности мощности $I_{sp} \sim 0.4$ кВт/см².

Из рис.7 видно, что на большом расстоянии от эксилампы ($R \geq 10$ см) интенсивность излучения убывает как $1/R^2$. Исходя из этого можно оценить общую энергию, излучаемую в телесный угол 4π , считая эксилампу точечным источником света. Максимальная энергия излучения с учетом прозрачности сетчатого электрода составила 65 МДж при энергии от накопительного конденсатора, вложенной в активную среду эксилампы, 1.4–1.6 Дж. Следовательно, эффективность преобразования энергии накачки в энергию УФ излучения составляет 4%–4.5%, что примерно в два раза больше максимальной эффективности электроразрядного КгСI-лазера [17] и совпадает с результатами расчетов эффективности КгСI-эксилампы с накачкой поперечным разрядом, проведенными в [6].

5. Заключение

Разработан мощный источник ВУФ–УФ спонтанного излучения на хлоридах инертных газов с накачкой поперечным объемным разрядом газовых смесей Не–Хе (Кг, Аг)–НСI. Спектр излучения эксилампы в основном состоит из относительно узких полос переходов $D - X$ и $B - X$ молекул хлоридов инертных газов. В спектрах $KrCl^*$ - и $ArCl^*$ -эксиламп, кроме данных переходов, появ-

ляется полоса возбужденного молекулярного хлора Cl_2^* на $\lambda = 258$ нм.

Обнаружено, что при накачке поперечным разрядом интенсивности свечения полосы В–Х молекул ArCl^* , KrCl^* и XeCl^* в поперечном объемном разряде сравнимы, и до 90 % энергии излучения эксилампы может быть сконцентрировано в УФ области спектра. Получена пиковая плотность мощности УФ излучения на поверхности выходного окна эксилампы до ~ 2 кВт/см² при энергии в импульсе до ~ 3 мДж.

Показано, что объемный разряд в смеси Ne–Ar–HCl является эффективным источником мощного ВУФ излучения. Энергия $Q_t \sim 0.6$ мДж и плотность мощности $I_{sp} \sim 0.4$ кВт/см² излучения этой смеси на $\lambda = 175$ нм могут составлять около 25 % от соответствующих значений для XeCl^* - и KrCl^* -эксиламп.

Авторы благодарят МНТЦ (проект № 2706) и компанию INVAP S.E. (контракт AR-67/04) за финансовую поддержку данной работы.

1. Eliasson B., Kogelschatz U. *Appl. Phys. B*, **46**, 299 (1988).
2. Nakamura I., Kannari F., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **57**, 2057 (1990).
3. Taylor R.S., Leopold K.E., Tan K.O. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 525 (1991).
4. Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Янкелевич Е.Б. *ПТЭ*, № 4, 244 (1992).
5. Voichenko A.M., Skakun V.S., Tarasenko V.F., Fomin E.A., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **3**, 838 (1993).
6. Бойченко А.М., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **23**, 344 (1996).
7. Шуаибов А.К., Л.Л.Шимон, Дашенко А.И. Неймет Ю.Ю., Шевра И.В. *Письма в ЖТФ*, **25** (11), 29 (1999).
8. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. *Письма в ЖТФ*, **25** (21), 27 (1999).
9. Шуаибов А.К., Дашенко А.И. *Квантовая электроника*, **30**, 279 (2000).
10. Скакун В.С., Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **28** (21), 42 (2002).
11. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. *УФН*, **173**, 201 (2004).
12. Пезт В.Э., Сливинский Е.В., Трещалов А.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 438 (1990).
13. Andrew E., Dyer P.E., Roebuck J. *Opt. Commun.*, **49**, 149 (1984).
14. Sadeghi N., Cheaib M., Setser D.W. *J. Chem. Phys.*, **90**, 219 (1989).
15. Tsuji M., Ide M., Muraoka T., Nishimura Y. *J. Chem. Phys.*, **101**, 328 (1994).
16. Nakamura K. *J. Appl. Phys.*, **83**, 1840 (1988).
17. Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **31**, 1231 (1995).