

УФ-ВУФ эксимерный излучатель с накачкой поднормальным тлеющим разрядом

А.К.Шуаибов, А.И.Дашенко, И.В.Шевера

Исследованы характеристики малогабаритного эксимерного излучателя на смеси Ar–Cl₂, возбуждаемой поднормальным тлеющим разрядом. Показано, что данный разряд является многоволновым источником излучения в области 175–258 нм. Оптимальное давление молекул хлора находится в диапазоне 0.3–0.5 кПа, а аргона – в диапазоне 2–4 кПа. Средняя мощность УФ-ВУФ излучения достигает 0.7 Вт при КПД, равном 3%. Излучатель может быть использован в микроэлектронике, химии высоких энергий, фотометрии коротковолнового диапазона, биофизике и медицине.

Ключевые слова: поднормальный тлеющий разряд, источник УФ-ВУФ излучения, многоволновая эксимерная лампа.

Поднормальный тлеющий разряд (ПТР) на смесях Хе и Кг с молекулами хлора является эффективным источником излучения с $\lambda = 308$ нм (ХеCl ($B - X$)) и 222 нм (КгCl ($B - X$)). В первых систематических исследованиях таких эксимерных ламп была достигнута средняя мощность 8–20 Вт с КПД $\eta = 12 - 23\%$ [1, 2]. В дальнейшем за счет увеличения габаритов разрядной трубки, энерговыклада в плазму и применения водяного охлаждения мощность излучения хлоридов Хе и Кг была увеличена до 100–130 Вт при КПД $\eta = 10 - 13\%$ [3, 4]. Максимальный КПД был достигнут в коаксиальном ПТР ($\eta = 25 - 30\%$ [5]), но при этом мощность излучения с $\lambda = 222$ и 308 нм не превышала 8 Вт. Перечисленные результаты были получены в разрядных трубках с внутренним диаметром $d = 12 - 30$ мм и длиной $L \geq 170$ мм. Исследования ПТР на смесях тяжелых инертных газов с молекулами хлора, возбуждаемого в коротких ($L \leq 100$ мм) и узких ($d \leq 5$ мм) трубках, отсутствуют. Нет также данных по оптическим характеристикам ПТР в смеси Ar–Cl₂, что сдерживает разработку малогабаритных источников непрерывного излучения для УФ-ВУФ области длин волн ($\lambda = 175$ нм для ArCl и 258 нм для Cl₂^{*}).

В настоящей работе приводятся характеристики компактного УФ-ВУФ стационарного излучателя с накачкой ПТР на смеси Ar–Cl₂ низкого давления.

Исследуемый разряд зажигался в кварцевых или сапфировых трубках с внутренним диаметром 5 мм при межэлектродном расстоянии 100 мм. Катод и анод из никеля устанавливались внутри разрядной трубки. Для замены нагретой рабочей смеси торцевые части разрядной трубки оставались открытыми, а сама трубка помещалась в буферную вакуумную камеру объемом 10 л. Буферная камера была соединена с вакуумным монохроматором через окно из CaF₂. Центр разрядной трубки устанавливался напротив центра входной щели вакуумного монохроматора. Более детально система регистра-

ции описана в работах [6, 7]. ПТР зажигался при помощи высоковольтного выпрямителя ($U \leq 30$ кВ, $I \leq 100$ мА). Измерение абсолютной мощности излучения проводилось по методике работы [4] с использованием прибора «Кварц-01».

Разряд характеризовался наличием слаботочной и сильноточной стадий, переход между которыми происходил в виде скачка при токе разряда $I_{ch} = 0.5 - 2.0$ мА. Типичные вольт-амперные характеристики ПТР на смеси Ar–Cl₂ при разных парциальных давлениях хлора приведены на рис. 1, а. Зависимости $U_{ch}(I_{ch})$ имели гиперболическую форму. С ростом разрядного тока I_{ch} от 1 до 10 мА разрядное напряжение U_{ch} уменьшалось с 4–4.5 до ~ 2 кВ. При $I_{ch} \geq 10$ мА ПТР переходил в стадию нормального тлеющего разряда, когда U_{ch} практически не зависело от I_{ch} [8]. С увеличением давления молекул хлора наблюдался рост U_{ch} и энерговыклада в плазму тлеющего разряда (рис. 1, б). Увеличение давления аргона (при фиксированном парциальном давлении хлора, равном 0.1–0.6 кПа) от 0.6 до 4.0 кПа приводило к росту U_{ch} от 3.0 до 4.5 кВ.

Спектр излучения плазмы ПТР на смеси Ar–Cl₂ представлен на рис. 2. В спектре основным было излучение полос с $\lambda = 175$ нм (ArCl ($B - X$)) и 180–195 нм (Cl₂ ($^1\Sigma - ^1P_4$)), выделялся максимум континуума молекулы Cl₂ при $\lambda = 200$ нм, а также полоса с $\lambda = 258$ нм (Cl₂ ($D' - A'$)). Из рис. 2 видно, что плазма исследуемого разряда является многоволновым источником излучения в обла-

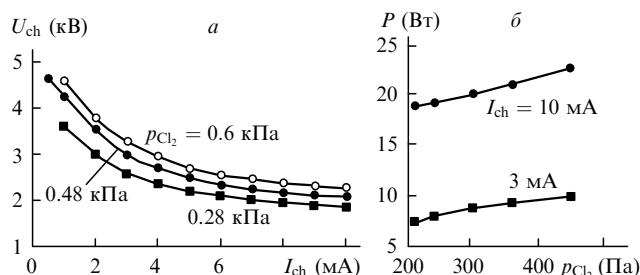
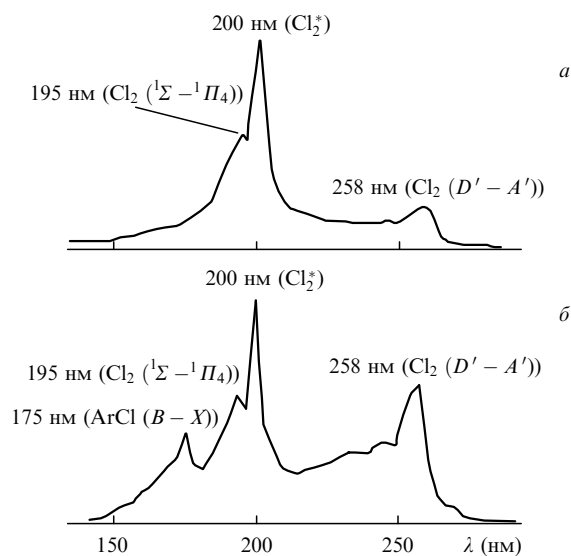


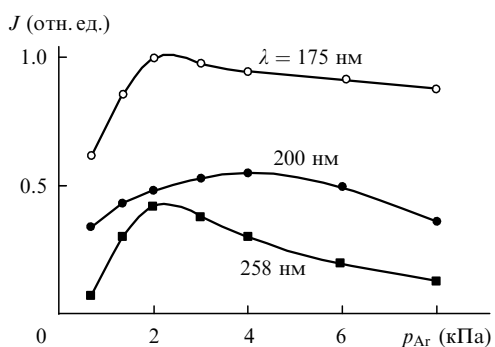
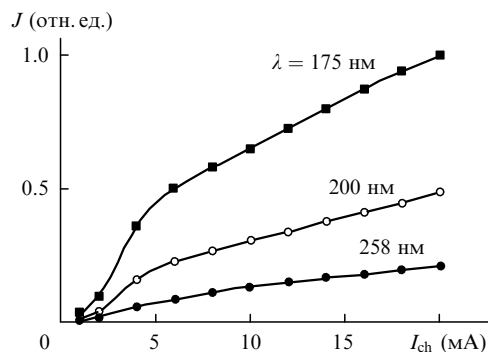
Рис. 1. Вольт-амперные характеристики (а) и зависимости мощности P , вкладываемой в плазму ПТР на смеси Ar–Cl₂, от давления молекул хлора p_{Cl_2} при $p_{Ar} = 2.8$ кПа (б).

Рис.2. Спектры излучения плазмы ПТР в Cl_2 (а) и смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ (б).

сти 175–258 нм. Оптимальное давление молекул хлора в рабочей смеси находится в диапазоне 0.3–0.5 кПа.

Зависимость яркости излучения основных полос излучения от парциального давления аргона приведена на рис.3. При парциальном давлении хлора в смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$, большем 0.3–0.4 кПа, наиболее интенсивной была полоса с $\lambda = 258$ нм (Cl_2 ($D' - A'$)). Оптимальное давление аргона для получения максимальной яркости излучения с $\lambda = 258$ и 200 нм составляло 2 кПа, а с $\lambda = 175$ нм (ArCl^*) – 4 кПа. В области давлений, больших 5 кПа, тлеющий разряд на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ переходил в контрагированное состояние, при котором диаметр плазменного шнура равнялся 1–1.5 мм.

Мощность, вкладываемая в контрагированный разряд на смеси $\text{Ar}:\text{Cl}_2 = 4:0.1$ (давление смеси $p = 8.4$ кПа), составляла 18 Вт (при $I_{\text{ch}} = 10$ мА). По этой причине при значительном уменьшении объема плазменной среды удельная мощность как бы увеличивается в 15–25 раз, что, вероятно, приводит к перегреву активной среды излучателя и уменьшению яркости полос (рис.3). Полная мощность излучения со всей боковой поверхности плазменного шнура (пропорциональная его диаметру) уменьшается не менее чем в 4–5 раз. Но важным преимуществом контрагированного разряда является то, что он не соприкасается с внутренней поверхностью разрядной трубки. Поскольку ресурс работы хлорсодержащих газоразрядных устройств определяется коэффициентом

Рис.3. Зависимости относительной яркости J излучения полос с максимумами на $\lambda = 175, 200$ и 258 нм от парциального давления аргона p_{Ar} в ПТР на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ при $p_{\text{Cl}_2} = 0.4$ кПа и $I_{\text{ch}} = 10$ мА.Рис.4. Зависимости относительной яркости J излучения плазмы ПТР на смеси $\text{Ar}:\text{Cl}_2 = 4:0.16$ кПа с максимумами на $\lambda = 175, 200$ и 258 нм от разрядного тока I_{ch} .

диффузии хлора в стекло, который значительно возрастает при увеличении температуры стенки трубки [9], то в этом отношении контрагированный тлеющий разряд может представлять определенный интерес для увеличения ресурса работы лампы.

Наибольшая скорость роста яркости (dJ/dI_{ch}) излучения полос ArCl ($B - X$) и Cl_2 ($D' - A'$) была получена в диапазоне разрядных токов 1–4 мА (рис.4), когда на электродах трубки имел место максимальный спад напряжения. При $I_{\text{ch}} \geq 4$ мА наблюдалась линейная зависимость яркости всех исследуемых полос от тока разряда, что свидетельствует об отсутствии значительного нагрева газовой среды.

Таким образом, показано, что ПТР в короткой и узкой разрядной трубке на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ ($p = 2 - 4$ кПа, давление хлора 0.3–0.5 кПа) является многоволновым источником непрерывного излучения в диапазоне 170–260 нм с максимумами на $\lambda = 175, 200$ и 258 нм. Суммарная мощность излучения ПТР достигает 0.7 Вт, а максимальная эффективность выхода УФ-ВУФ излучения получена в области малых разрядных токов ($I_{\text{ch}} = 1 - 4$ мА). При давлении смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$, большем 5 кПа, получен устойчивый контрагированный разряд, не соприкасающийся с внутренней поверхностью разрядной трубки и представляющий интерес для увеличения ресурса работы. Исследуемый разряд может использоваться для разработки компактных источников непрерывного излучения в УФ-ВУФ области спектра, в том числе и источников с медленной прокачкой относительно дешевой (по сравнению со смесями $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ или $\text{Kr}-\text{Cl}_2$) смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$. Такие источники могут найти применение в микроэлектронике, коротковолновой фотометрии, фотохимии, биофизике и медицине.

1. Головицкий А.П., Кан С.Н. *Оптика и спектроскопия*, **75**, 604 (1993).
2. Головицкий А.П., Лебедев С.В. *Оптика и спектроскопия*, **82**, 251 (1997).
3. Панченко А.Н., Скаун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. и др. *Письма в ЖТФ*, **21**, № 20, 77 (1995).
4. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **68**, № 2, 64 (1998).
5. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Оптика и спектроскопия*, **84**, 389 (1998).
6. Шуайбов А.К., Дашенко А.И. *Квантовая электроника*, **30**, 279 (2000).
7. Шуайбов А.К., Дашенко А.И. *ПТЭ*, № 3, 101 (2000).
8. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда* (М., Наука, 1987, с. 582).
9. Светцов В.И., Куприяновская А.П., Марышев А.Б. *ЖПС*, **35**, 205 (1981).