

04;07;12

Источник УФ излучения на основе импульсного разряда в смеси Хе—NaCl

© Р.Б. Рийвес, Е.А. Светличный, Ю.В. Жменяк, В.А. Кельман, Ю.О. Шпеник

Институт электронной физики НАН Украины,
88017 Ужгород, Украина
e-mail: vkel@mail.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 24 февраля 2004 г.)

Описаны конструкция и эксплуатационные параметры эксимерной лампы на смеси Хе—NaCl. Изучен эмиссионный спектр лампы, его временные характеристики. В спектре доминирует эксимерная полоса 308 nm ХеCl. Исследованы спектральное распределение энергии в пределах полосы и его зависимость от условий эксперимента. Обсуждается механизм возбуждения верхнего состояния эксимерной молекулы.

Введение

Источники спонтанного ультрафиолетового (УФ) излучения имеют весьма широкую сферу научно-технических применений. В частности, эксимерные некогерентные лампы в ряде случаев могут весьма успешно конкурировать с лазерными источниками. Это прежде всего такие области, как инициирование фотохимических и фотофизических процессов, деструкция вредных органических веществ. Как представляется, особенно перспективными могут быть применения в медицине и экологии, т.е. в наиболее болезненно чувствительных ныне областях, которые непосредственно определяют качество жизни.

На данном этапе создано немало образцов эксиламп, преимущественно на двойных газовых смесях, которые излучают на эксимерных переходах галогенидов инертных газов. Тем не менее актуальной задачей продолжает оставаться поиск химического и парциального состава рабочих смесей и способов их накачки для получения максимальных КПД и мощности излучения таких эксимерных ламп.

С нашей точки зрения, в особенности привлекательным является предложение, которое было сделано в работе [1], где было выполнено численное моделирование эксимерной-ХеCl лампы на двойной смеси Хе—NaCl с накачкой жестким ионизатором пучкового типа. Было показано, что в оптимальных условиях возбуждения (давление ~ 10 Torr, удельный энерговклад $\sim 60\text{--}125$ W/cm³, состав смеси Хе—NaCl= 20/1) КПД лампы достигает величины 40%, а излучаемая энергия 0.025 J/l.

Следует отметить, что определенным стимулом для постановки задачи о численном моделировании эксилампы указанного состава стали работы [2,3]. В них впервые на эксперименте такой тип смеси был использован при инжекции NaCl в сверхзвуковой плазменный поток ксенона. Была получена эффективная люминесценция на переходе 308 nm молекулы ХеCl. Заселение возбужденного состояния эксимерной молекулы происходило преимущественно, по мнению авторов, за счет бинарных

реакций замещения натрия в молекуле NaCl атомом или же ионом ксенона.

В данной работе предложенная в [1–3] смесь была использована для построения эксилампы низкого давления с возбуждением продольным высоковольтным импульсно-периодическим разрядом. Этот способ, очевидно, имеет существенные преимущества как перед пучковым, так и плазменным (в варианте [2,3]) для практического использования. Кроме того, мы выделяем как большое преимущество именно химический состав рабочей Хе—NaCl смеси, поскольку в ней использована в качестве донора галогена каменная соль, которая в обычных условиях является нетоксичным веществом.

Техника и методика эксперимента

Эксимерный источник создан на основе вакуумно-герметической газоразрядной трубки (ГРТ) из плавленого кварца с внутренним диаметром 12 mm и длиной промежутка между электродами 0.4 m. Порошок кухонной соли NaCl высокой степени очистки был размещен непосредственно вдоль ГРТ. Коаксиальные водоохлаждаемые электроды, изготовленные из меди, вклеены в противоположные торцы ГРТ. Вывод излучения из эксилампы осуществлялся через кварцевые окошки. Необходимый температурный режим достигнут одновременным использованием саморазогрева (т.е. тепла, выделяемого разрядом) и внешней печи. Следует отметить, что для получения давления насыщенного пара NaCl 1 Torr необходимо обеспечить температуру внутренней стенки ГРТ не менее чем 1138 K [4].

Для возбуждения продольного импульсно-периодического разряда в эксилампе был использован тиратронный генератор с коммутатором ТГИ1-2000/35 с резонансным перезарядом накопительной емкости 1650 pF.

Для регистрации эмиссионных свойств эксилампы применялись монохроматор МДР-6, фотоприемники ФЭУ-106, 14ЭЛУ-ФС, измеритель мощности ИМО-2Н, осциллограф С1-99.

Спектральные и временные особенности излучения источника

Наиболее выразительной чертой выполненных исследований является то, что не только пучковая накачка, как это предложено в [1], но и накачка Хе–NaCl лампы импульсно-периодическим разрядом также приводит к эффективной эмиссии УФ излучения. На рис. 1 приведен интегрированный во времени $J(\lambda)$ эмиссионный спектр эксилампы. Условия эксперимента (как и далее) приведены непосредственно на рисунке. Спектр ограничен участком 290–340 нм. Величина излучаемой мощности вне границ этого диапазона незначительна. В спектре доминирует излучение эксимерной полосы 308 нм ХеCl. Кроме нее в границах указанного спектрального интервала присутствуют линии атомарного натрия 330.2 + 330.3 нм ($4p \rightarrow 3s$ -переход), а также резонансные линии атома меди 324.7 + 327.4 нм ($4p \rightarrow 4s$ -переход). В то время как излучение натрия обусловлено химическим составом используемой рабочей смеси, появление меди в разряде стимулировано распылением медных электродов ионной бомбардировкой и газотранспортными реакциями в присутствии галогена. Такая „чистота“ спектра характерна для разрядов в инертных газах с примесью металлов, как, например, в лазерах на самоограниченных переходах. По мере разогрева из эмиссионного спектра в обоих случаях постепенно, практически полностью, исчезают спектральные линии инертных газов. Это явление обусловлено уменьшением температуры электронов в разряде с повышением концентрации легкоионизируемых частиц, в частности атомов металлов.

При установлении плоского резонатора с зеркалами с диэлектрическими покрытиями, имеющими коэффициенты отражения на длине волны 308 нм 98 (глухое) и 30% (выходное), характер спектрального распределения излучения в пределах эксимерной полосы не

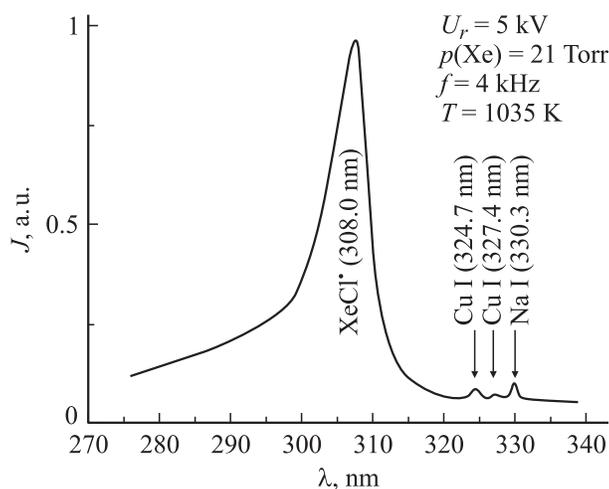


Рис. 1. Интегрированный во времени эмиссионный спектр $J(\lambda)$ эксилампы на смеси Хе–NaCl.

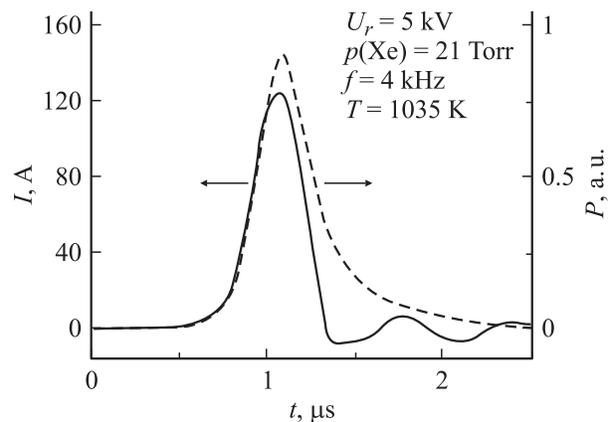
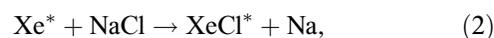
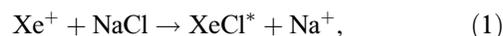


Рис. 2. Временные формы импульсов тока $I(t)$ и эксимерной эмиссии $P(t)$.

менялся. В частности, оставалась неизменной ширина полосы на полувысоте, которая составляла, как и в цикле работ [2,3] с плазменным источником, ~ 5 нм и была нечувствительной к изменению условий эксперимента. Все это означает, что стимулированное излучение, как и ожидалось, отсутствовало по крайней мере ввиду низкого давления смеси.

На рис. 2 приведены временные формы импульсов тока $I(t)$ и мощности $P(t)$ эксимерной эмиссии. Продолжительность токового импульса по его основанию составляет ~ 400 ns, а эмиссионного — ~ 1 μs. Эксимерная полоса начинает излучать одновременно с развитием тока в ГРТ, и преобладающая часть энергии излучения приходится на импульс тока разряда.

Структура спектра эксимерной полосы однозначно свидетельствует в пользу того, что молекулы ХеCl* генерируются в разряде в нижних колебательных состояниях В-терма. Но в таком случае к образованию эксимерной молекулы могут приводить только бинарные (при участии двух частиц) реакции замещения типа



а не трехчастичная реакция ион-ионной рекомбинации. Константы скорости указанных реакций в работах [1–3] оценены на уровне $k = 10^{-10} - 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{s}$. Хотя эта оценка и недостаточно точна, однако воспользуемся ее усредненным значением $\sim 5 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$. При условии, что Хе⁺ и Хе* выбывают из объема ГРТ исключительно за счет реакций накачки (1) и (2), получим, что постоянная времени угасания интенсивности эксимерной эмиссии в послесвечении будет составлять $\tau = [kN(\text{NaCl})]^{-1} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$. В этом соотношении $N(\text{NaCl})$ — концентрация молекул каменной соли, определяемая температурой ГРТ. При всей приближенности эта оценка неплохо совпадает с экспериментальными данными (рис. 2), поэтому является дополнительным подтверждением в пользу того, что и в наших условиях накачка осуществляется реакциями замещения.

Оптимизация условий возбуждения эксимерной эмиссии

К числу внешних факторов, определяющих выход УФ излучения, относятся давление ксенона $p(\text{Xe})$, температура стенки ГРТ T , напряжение на выпрямителе U_r и частота следования импульсов возбуждения f . Взаимодействие всех перечисленных факторов и определяет в конечном итоге эффективность излучателя. Результаты измерений зависимостей пиковой импульсной мощности излучения P эксилампы от каждого из вышеозначенных параметров приведены на рис. 3–6. Полученные зависимости в своем большинстве имеют в пределах области измерений экстремумы. Это позволяет определить факторную точку с параметрами: частота повторения импульсов $f = 5 \text{ kHz}$, напряжение на выпрямителе $U_r = 5 \text{ kV}$, давление ксенона $p(\text{Xe}) = 30 \text{ Torr}$, давление

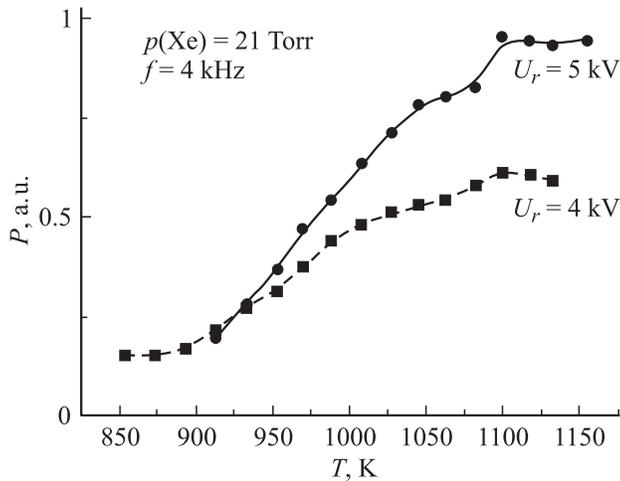


Рис. 3. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения P эксилампы от температуры ГРТ.

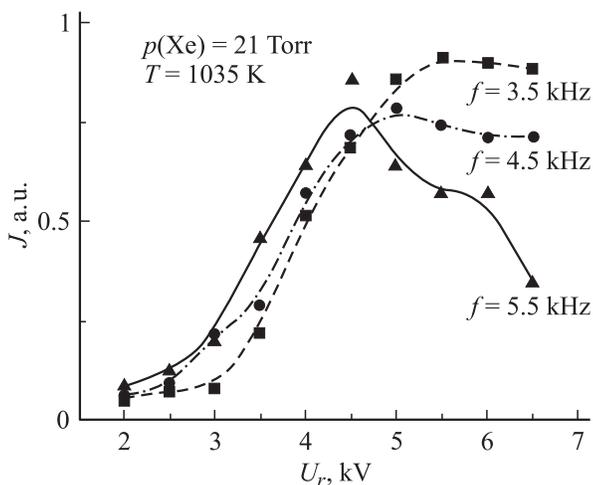


Рис. 4. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения P эксилампы от напряжения на выпрямителе.

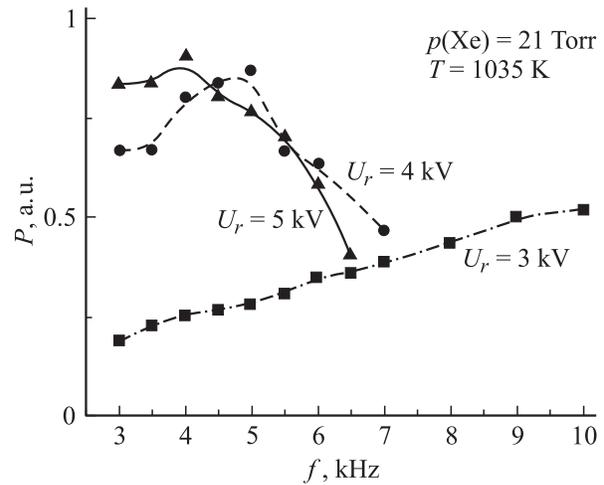


Рис. 5. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения P эксилампы от частоты.

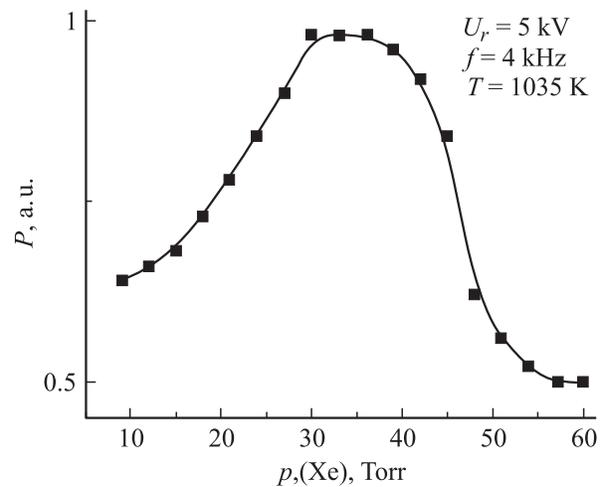


Рис. 6. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения P эксилампы от давления ксенона.

паров NaCl 0.1 Torr ($T = 1045 \text{ K}$) — как обеспечивающую максимум излучательной мощности УФ излучения для использованного излучателя.

Оценка средней мощности эксимерной эмиссии лампы была выполнена на основании соответствующих измерений со стороны одного из окон ГРТ и учета геометрического фактора для вышеозначенных оптимальных условий. Эта средняя мощность спонтанного излучения лампы составила несколько W , КПД $\sim 1\%$.

Полагаем, что имеется некоторый резерв увеличения энергетических характеристик излучателя за счет подбора состава рабочей смеси, увеличения рабочей емкости и т.д. На будущее планируется также применить непрерывный тлеющий разряд с целью создания эффективного непрерывного источника УФ излучения на смеси $\text{Xe}-\text{NaCl}$.

Выводы

Для создания эксимерной лампы на переходе 308 nm молекулы ХеСl с возбуждением высоковольтным импульсно-периодическим разрядом использована смесь с нетоксичным галогенонесителем Хе–NaCl. Средняя мощность излучения эксимерной полосы 308 nm ХеСl составила несколько Вт. Спектральное распределение энергии в пределах полосы и скорость угасания интенсивности эксимерной эмиссии во времени в послесвечении свидетельствуют в пользу того, что доминирующими в заселении верхнего состояния молекулы ХеСl* являются бинарные реакции замещения натрия в молекуле NaCl ксеноном.

Список литературы

- [1] Бойченко А.М. // Квантовая электроника. 1999. Т. 29. № 2. С. 163–167.
- [2] Алехин А.А., Баринин В.А., Герасько Ю.В. и др. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 43–51.
- [3] Алехин А.А., Баринин В.А., Герасько Ю.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 9–20.
- [4] Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.