

04;07

## Планарная ХеСl эксилампа с накачкой тлеющим разрядом низкого давления

© Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия

(Поступило в Редакцию 30 июля 1996 г.)

Экспериментально исследованы энергетические характеристики ХеСl эксилексной лампы планарной конструкции, накачиваемой тлеющим разрядом низкого давления. При использовании разрядного промежутка длиной 2 см и смеси Хе–Сl<sub>2</sub> в интервале длин волн 200–380 нм получены средняя мощность излучения до 20 мВт и эффективность ~ 0.4%, при этом полная эффективность излучения в угол 4π превышала 4%. Показано, что при увеличении рабочего давления и малых токах разряда можно создавать "точечные" источники излучения.

1. Тлеющий разряд низкого давления [1–4] привлекает к себе внимание как альтернатива другим [5,6], более сложным в реализации способам накачки источников спонтанного УФ излучения. Выбор подходящей эксимерной или эксилексной молекулы позволяет получать узкополосную эмиссию в диапазоне 100–360 нм. Так, в [1] в В–Х-переходах молекул КrСl\*, КrF\*, ХеСl\* и ХеF\* получена эффективность излучения до 1%, а в работах [2,3] в тлеющем разряде низкого давления в смесях Кr–Сl<sub>2</sub> и Хе–Сl<sub>2</sub> достигнута эффективность 12%. Авторы [4] разработали коаксиальную эксилампу, на которой при увеличении длины положительного столба тлеющего разряда была получена средняя мощность излучения в смеси Хе–Сl<sub>2</sub> более 100 Вт. Продемонстрированные в этих публикациях свойства эксиламп с накачкой тлеющим разрядом свидетельствуют об их большой перспективности. Весьма важным является то, что данные источники спонтанного излучения существенно проще эксиламп, накачиваемых барьерным и микроволновыми разрядами [5,6]. Для многочисленных приложений требуются УФ и ВУФ (вакуумные) источники различных размеров и конструкций (цилиндрические, коаксиальные, планарные и т.п.) [1–9]. Однако до настоящего времени не было работ, посвященных созданию планарных эксиламп, накачиваемых тлеющим разрядом низкого давления, тогда как планарные эксилампы с другими способами накачки уже используются для фотохимических приложений [6,7]. Например, упоминавшийся выше барьерный разряд может быть сравнительно просто и без ущерба для рабочих параметров эксилампы организован как в цилиндрической конструкции излучателя, так и в планарной [6,7]. Для тлеющего разряда, эффективность которого определяется главным образом излучением из положительного столба [2–4], изменение геометрии излучателя должно существенно влиять на параметры эксилампы.

В данной работе приводятся результаты экспериментальных исследований планарной эксилампы на смеси Хе–Сl<sub>2</sub>(НСl), накачиваемой тлеющим разрядом постоянного тока.

2. Конструкция излучателя эксилампы схематично показана на рис. 1. Разряд зажигался в промежутке между двумя электродами, один из которых, сплошной, изготавливался из латуни, а другой, сетчатый — из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью сетки ~ 66%. Диаметры сплошного и сетчатого электродов составляли ~ 7.0 см. Межелектродный зазор мог изменяться в пределах 1–3 см. Для вывода излучения использовалось кварцевое окно толщиной 1 см, которое имело пропускание на длинах волн 350 и 200 нм соответственно 93 и 80%. Обычно сетчатый электрод являлся анодом, а сплошной — катодом. На сплошной электрод подавалось высокое напряжение, а сетчатый заземлялся. При инверсии полярности напряжения на электродах разряд становился неустойчивым.

В эксилампе использовались смеси ксенона с Сl<sub>2</sub> и ксенона с НСl при общем давлении до 15 Торр. Исследуемые смеси предварительно готовились в смесителе.

Для измерения разрядного тока (*I*) последовательно излучателю включался миллиамперметр. Разрядный ток варьировался в пределах 1–10 мА. Мощность накачки обычно не превышала 10 Вт. Большие мощности приво-

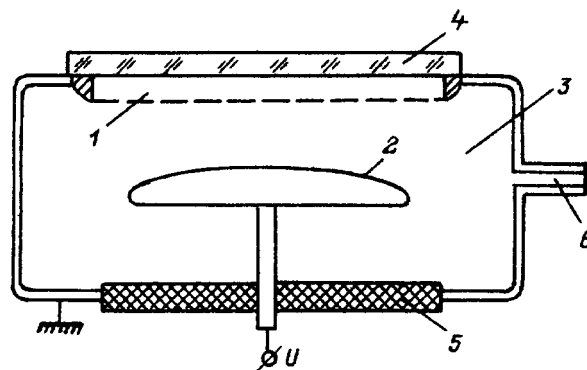
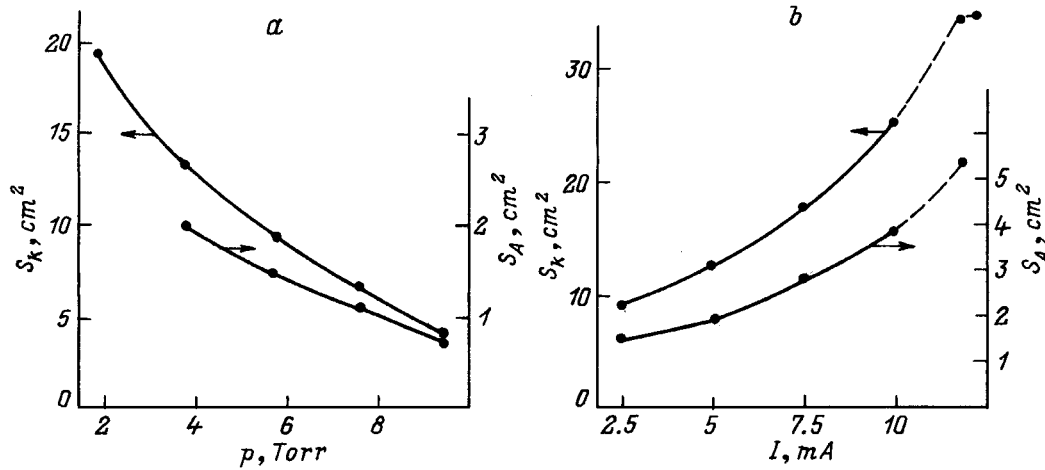


Рис. 1. Планарная эксилампа с накачкой тлеющим разрядом. 1 — сетчатый электрод, 2 — сплошной электрод, 3 — буферный объем, 4 — выходное окно, 5 — диэлектрик, 6 — штуцер для напуска рабочей смеси.



**Рис. 2.** Характерные площади сечения разряда на аноде  $S_a$  и катоде  $S_k$  в смеси  $\text{Xe} : \text{Cl}_2 = 3 : 1$ . *a* — в зависимости от общего давления смеси ( $I = 2.5 \text{ mA}$ ); *b* — в зависимости от тока разряда ( $p = 5.7 \text{ Torr}$ ).

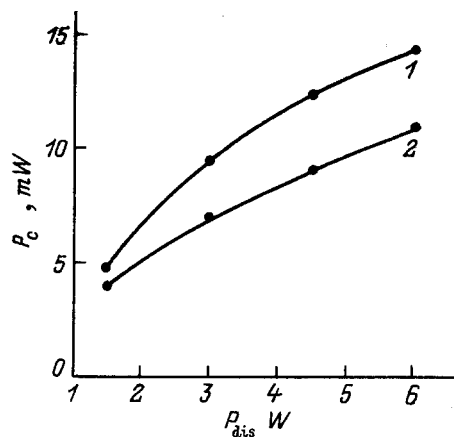
дили к перегреву латунного электрода и быстрому уходу галогенонесителя из смеси, что лишь отчасти компенсировалось сравнительно большим объемом разрядной камеры.

Мощность излучения измерялась с помощью фотодиода ФЭК22-СПУ, который калибровался излучением  $\text{XeCl}$  лазера, а необходимый спектральный диапазон выделялся фильтрами УФС.

3. Проведенные измерения показали, что после пробоя рабочей смеси между электродами устанавливается напряжение, не превышающее  $1 \text{ kV}$ . Картина свечения разряда зависит от давления смеси, ее состава и тока. Например, при токе  $2.5 \text{ mA}$  в смеси  $\text{Xe} : \text{Cl}_2 = 6 : 1$  и межэлектродном промежутке  $2 \text{ cm}$  изменение общего давления  $p$  приводило к следующим изменениям картины свечения газоразрядной плазмы. При  $p > 11 \text{ Torr}$  разряд локально привязывался к краям электродов и фактически не был объемным. Уменьшение давления смеси до  $5.7 \text{ Torr}$  приводит к тому, что прикатодное свечение покрывает почти весь сплошной электрод, а в объеме вблизи анода формируется устойчивый положительный столб, сечение которого на сетке имеет круглую форму. Дальнейшее снижение давления приводит к постепенному увеличению диаметра положительного столба, размыванию четких границ его свечения и снижению его интенсивности. Это связано с укорачиванием положительного столба, а затем и с полным его исчезновением при  $p < 1 \text{ Torr}$ . При уменьшении давления толщина прикатодного свечения все более и более увеличивается и может достигать  $1\text{--}1.5 \text{ cm}$ , теряя в интенсивности. Характерные размеры сечения пятен на аноде  $S_a$  и катоде  $S_k$ , для рассмотренного выше случая, представлены на рисунке 2, *a*. Аналогичные зависимости были получены для других смесей и разрядных токов. Таким образом, при коротком разрядном промежутке и выборе соответствующих параметров можно получать на сетке как довольно широкий срез положительного столба (до  $5 \text{ cm}^2$ ),

так и "точечную" излучающую область диаметром около  $1 \text{ mm}$ . В традиционном варианте тлеющего разряда, зажигаемого в длинных трубках при больших межэлектродных зазорах в несколько десятков сантиметров, на существование положительного столба значительное влияние оказывает наличие стенок. В планарной эксилампе боковые стенки удалены от области разряда на расстояние несколько сантиметров, тем не менее в этих условиях формируется стабильный тлеющий разряд, что и позволяет получать малые диаметры положительного столба. Конечно, используя трубки малого диаметра, можно также создавать "точечные" источники света. Однако, применяя эксилампу планарной геометрии при равных межэлектродных промежутках, можно работать при более низких напряжениях. С другой стороны, увеличивая диаметр электродов, можно при увеличении тока разряда получать пропорциональное увеличение диаметра области, занимаемой положительным столбом, которая вносит основной вклад в излучение, и создавать планарные эксилампы большого диаметра. На рис. 2, *b* показано влияние тока разряда на диаметры светящейся области плазмы у обоих электродов. При токе более  $10 \text{ mA}$  из-за перегрева катода в лампе данной конструкции (дополнительное охлаждение сплошного электрода не было предусмотрено) эксилампа включалась на короткое время. При токе разряда  $12 \text{ mA}$  поверхность катода, обращенная к сетчатому электроду, уже практически полностью была покрыта свечением, поэтому дальнейший рост тока не отражался на величине  $S_k$  (рис. 2, *b*).

Наибольшая средняя мощность излучения на  $\lambda \sim 308 \text{ nm}$  была получена в смесях с  $\text{Cl}_2$  и составляла при токе  $10 \text{ mA}$  и общем давлении  $p = 8 \text{ Torr}$   $\sim 20 \text{ mW}$ . Эффективность по вложенной энергии была невелика — примерно  $0.4\%$ . Однако, если оценить полную эффективность свечения в УФ диапазоне в угол  $4\pi$ , считая, что световой поток не ограничивался элементами лампы (ослабление на сетчатом электроде,



**Рис. 3.** Зависимость средней мощности излучения планарной эксилампы с накачкой непрерывным тлеющим разрядом от мощности.  $p = 5.7$  Торг; 1 — смесь Хе : Сl<sub>2</sub> = 6 : 1, 2 — смесь Хе : НСl = 6 : 1.

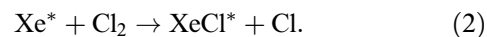
поглощение сплошного электрода, уход излучения в стороны, диафрагмирование выходным окном), то ее значение оказывается на порядок бóльшим, достигая в лучшем случае ~ 4%.

Замена НСl на Сl<sub>2</sub> не вела к существенному увеличению средней мощности излучения (рис. 3). В [10] показано, что одинаковые уровни мощности излучения в смесях с НСl и Сl<sub>2</sub> характерны для так называемой слаботочной стадии тлеющего разряда, при которой наблюдается однородное свечение всего межэлектродного объема эксилампы без заметного падения его интенсивности вблизи катода. Между тем в нашем опыте форма свечения была уже далекой от описанной только что. Как отмечалось в [10], для слаботочной стадии характерны высокие значения  $E/p \sim 30$  В/см · Торг на промежутке. В данных условиях, в которых существовала сравнительно короткая (< 1 см) область положительного столба, отношение  $E/p$  всегда было выше 30 В/см · Торг. Это можно связать с малой длиной разрядного промежутка, бóльшую часть длины которого занимает катодное падение потенциала. Как показали наши измерения распределения потенциала вдоль цилиндрической эксилампы длиной 50 см и диаметром 4 см, к прикатодной области размером не более 5 см приложено порядка половины напряжения. Основываясь на примерно одинаковых эффективностях излучения молекул ХеСl\* с галагеноносителями Сl<sub>2</sub> и НСl и наличии на рядном промежутке довольно высокого напряжения, можно предположить следующее.

В рождении электронов в плазме разряда при высоких  $E/p$  значительную роль играет прямая ионизация инертного газа электронным ударом [11], а образование эксиплекса ХеСl\* должно происходить и в процессе ионной рекомбинации



В нормальном тлеющем разряде в смесях с Сl<sub>2</sub> образование эксиплекса обеспечивается преимущественно за счет гарпунной реакции [2–4]



На этой стадии смеси с Сl<sub>2</sub> всегда дают, согласно [2–4,10], в несколько раз бóльшие мощности и эффективности по сравнению со смесями с НСl. В нашем же случае, обобщив сказанное, имеем постоянное, хотя и небольшое, превышение средней мощности излучения смесей с хлором над смесями с хлороводородом, испытанных в сходных условиях; картину свечения, характерную для нормального тлеющего разряда; значения  $E/p > 30$  В/см · Торг, что больше соответствует слаботочной стадии тлеющего разряда. Отсюда можно предположить, что в реализованных условиях проявляется смешанное действие обеих реакций (1) и (2).

В работе [12] было показано, что в области давлений 0.5–2.0 Торг в тлеющем разряде сохраняются высокие КПД излучения молекул ХеСl\* ~ 10%, если им соответствуют оптимальные удельные мощности накачки ~ 0.3 Вт/см<sup>3</sup> · Торг. Оценка для того же, что и в [12], соотношения компонентов смеси Хе : Сl = 3 : 1 значения удельной мощности накачки в настоящей работе, когда общее давление  $p = 2$  Торг, дает величину, близкую к 1 Вт/см<sup>3</sup> · Торг и, следовательно, далекую от оптимальной. Это также может влиять на величину эффективности свечения (~ 4.2%), полученную из опыта.

4. Итак, в работе сообщается о создании планарной ХеСl эксиплексной лампы с накачкой непрерывным тлеющим разрядом низкого давления. В отличие от условий накачки, используемых в [1–4,10,12] для цилиндрических и коаксиальных эксиламп, для планарной эксилампы характерны более высокие значения параметра  $E/p$  и малая длина положительного столба. При использовании разрядного промежутка длиной 2 см в интервале длин волн 200–380 нм получена средняя мощность излучения до 20 мВт. Эффективность УФ излучения в угол 4π достигала 4%. Отмечены особенности горения тлеющего разряда в смесях инертного газа с галагеноносителями НСl и Сl<sub>2</sub> в планарной геометрии излучателя без боковых стенок.

Авторы благодарят А.С. Кузьмина за помощь при проведении экспериментов.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (Проект № 96-02-16668-а).

## Список литературы

- [1] Taylor R.S., Loepold K.E., Tan K.O. // Appl. Phys. Lett. 1991. Vol. 59. N 5. P. 525–527.
- [2] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73–76.
- [3] Головицкий А.П., Кан В.С. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. Вып. 3. С. 604–609.

- [4] *Панченко А.Н., Скакун В.С., Соснин Э.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 77–80.
- [5] *Kumagai H., Obara M.* // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. N 15. P. 1583–1584.
- [6] *Kogelschats U.* // Pure & Appl. Chem. 1990. Vol. 62. N 9. P. 1667–1674.
- [7] *Kessler F., Bauer G.H.* // Appl. Surf. Sci. 1992. Vol. 54. P. 430–434.
- [8] *Fominski V.Yu., Markeev A.M., Naumenko O.I.* et al. // Appl. Surf. Sci. 1994. Vol. 78. P. 437–443.
- [9] *Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* и др. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 5. С. 1–5.
- [10] *Ломаев М.И., Панченко А.Н., Скакун В.С.* и др. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 199–206.
- [11] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [12] *Ломаев М.И., Полякевич А.С., Тарасенко В.Ф.* // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 207–210.