

04:07

Об условиях работы модуля электрической прокачки импульсно-периодического лазера на атомах и молекулах фтора

© А.К. Шуаибов

Ужгородский государственный университет,
294000 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 29 мая 1997 г.)

Представлены результаты исследования условий зажигания и характеристик многоэлектродного коронного разряда в системе иглолка–сетка, который предназначен для использования в модуле электрической прокачки рабочих сред лазеров высокого давления на атомах и молекулах фтора. Изучались электрические и оптические характеристики коронных разрядов положительной и отрицательной полярности, распределенных по длине поперечного разряда лазеров на $F(3s-3p)$ и $F_2(D'-A')$. Характеристики коронных разрядов изучались в смеси He/F_2 при атмосферных давлениях.

Введение

Рабочие смеси He/F_2 при атмосферных давлениях довольно эффективно применяются в импульсно-периодических лазерах, излучающих в красной области спектра ($\lambda = 620-780$ nm) на $F(3s-3p)$ [1,2]. В области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) данная среда является рабочей для мощных лазеров на $\lambda = 157$ nm $F_2(D'-A')$ [3,4], представляющих значительный интерес для применений в фотохимии и литографии. Данный лазер является наиболее коротковолновым из всех мощных электроразрядных лазеров высокого давления ($E = 2.6$ J/l, КПД = 1.5% [4]) и может работать в импульсно-периодическом режиме. При использовании таких агрессивных сред, как смеси He/F_2 , традиционные механические системы прокачки газовых смесей (компрессоры, диаметрально вентильеры) имеют ограниченный ресурс работы, характеризуются большим энергопотреблением и вызывают дополнительное загрязнение рабочей среды импульсно-периодического лазера. Особенно важной является высокая чистота рабочей смеси для ВУФ лазеров на молекулах фтора. В этом случае для частот следования импульсов ≤ 100 Hz возможно применение электрической прокачки, действие которой основано на эффекте "электрического ветра", возникающего во внешней области коронного разряда (КР) [5]. Исследование характеристик таких КР для рабочих сред N_2 , CO [6] и $HeCl^*$ лазеров [7] показало, что КР в системе электродов (СЭ) иглолка–сетка существует в форме точечных генерационных зон (ГЗ) и темной внешней области. При этом средний ток неконтрагированного КР (I) сильно зависит от давления и состава газовых смесей. Скорость электрической прокачки $v \sim (I)^{1/2}$ [8] ограничена неустойчивостью КР и может быть увеличена за счет оптимизации давления, состава газовых смесей и режима питания КР. Для КР в смесях инертных газов с молекулами фтора подобные исследования отсутствуют.

В настоящей работе представлены характеристики модуля прокачки миниатюрного импульсно-периодического лазера на атомах и молекулах фтора, работающего на смеси He/F_2 . Изучались вольт-амперные (ВАХ) и ча-

стотные характеристики положительного и отрицательного КР. Исследовались обзорные спектры излучения ГЗ КР в смеси He/F_2 и зависимости средних интенсивностей излучения линий $F(3s-3p)$ от тока КР.

Условия эксперимента и пространственные характеристики КР

СЭ КР состояла из одного ряда иглолок и никелевой сетки. Радиус закругления острия иглолок равнялся 0.5 mm, а радиус проволочек сетки составлял 0.15 mm. Межэлектродное расстояние было равным 2 cm, а полная длина СЭ составляла 11 cm. Напряжение положительной или отрицательной полярности подавалось на иглолки через ограничительное сопротивление $R = 1-3$ MΩ. Другие условия эксперимента и система регистрации характеристик КР были аналогичны описанному в [6,7].

КР в смеси He/F_2 высокого давления состоял из диффузной плазменной среды красного цвета, образующейся вблизи острий иглолок, и темной внешней области КР. В отличие от отрицательного КР в смесях инертных газов с молекулами HCl , в КР на смесях He/F_2 и $He/(Ar,Kr,Xe)/F_2$ ГЗ является сплошной и по виду напоминает импульсный поперечный разряд. Поперечный размер ГЗ отрицательного КР достигал 0.5–1.0 cm при ее длине 11 cm. Поперечные размеры ГЗ увеличивались с ростом напряжения на иглолках вплоть до появления стримера возле одной из них. Сплошной характер ГЗ КР в смеси He/F_2 создает предпосылки получения более однородного поперечного потока газовой среды, чем в КР на смесях $He/Xe(Kr)/HCl$. В положительном КР на смеси He/F_2 поперечные размеры ГЗ в 2–3 раза ниже, чем для отрицательного КР.

Основное отличие плазмы на смесях He/F_2 и $He/(Ar,Kr,Xe)/HCl$ связано с тем, что константа скорости диссоциативного прилипания электронов к молекулам $F_2(v = 0)$ примерно на два порядка выше, чем к молекулам $HCl(v = 0)$ [9,10]. Поэтому при высоком давлении смеси He/F_2 большая часть электронов

за короткий промежуток времени (1 ns) преобразуется в отрицательные ионы фтора [11–13]. Созданный резервуар ионов F^- выталкивается электрическим полем отрицательно заряженных иглолок по направлению к сетке. В процессе диффузии ионов F^- происходит отлипание электронов, с помощью которых и происходит предыонизация объема, занимаемого в дальнейшем ГЗ. По данным [14,15], основным механизмом зажигания отрицательного КР является УФ предыонизация, и в инертных газах основным источником УФ предыонизации является диффузия резонансного излучения R . Наиболее эффективным процессом отлипания электронов от ионов F^- является фотоотлипание под действием квантов с $\lambda \leq 360$ nm [12,13]. Данный эффект предложено использовать в излучателях импульсно-периодических RF($B-X$) лазеров, он называется NIAP (negative ion assisted preionization) технологией предыонизации [13]. Источниками излучения, разрушающего F^- в КР на смесях He/ F_2 , может быть излучение $\lambda = 157$ nm $F_2(D'-A')$, а в смесях He/R/ F_2 — интенсивное спонтанное излучение молекул RF $B-X$ ($\lambda = 193, 249$ и 351 nm).

В положительном КР ионы F^- нейтрализуются положительно заряженными иглолками, что приводит к формированию более узкой в поперечном размере ГЗ. В этом случае условия реализации NIAP схемы предыонизации разрядной области ГЗ затруднены. Таким образом, в КР на смеси He/ F_2 автоматически реализуется NIAP схема УФ предыонизации, приводящая к образованию пространственно однородной, протяженной ГЗ с поперечным размером ≤ 1 cm.

В КР на смеси He/ F_2 ГЗ, размещаемая под сеточным катодом лазера с накачкой поперечным разрядом на $\lambda = 157$ nm $F_2(D'-A')$, может выполнять одновременно функции УФ предыонизатора и системы электрической прокачки. Для оптимизации контура прокачки желательно использовать сеточный или перфорированный анод поперечного разряда. В этом случае реализуются оптимальные геометрические условия как для размещения УФ предыонизации, так и для системы электрической прокачки лазера.

Электрические характеристики КР

Осциллографические исследования показали, что ток положительного и отрицательного КР является импульсным без постоянной составляющей. Типичная форма импульсов тока КР представлена на рис. 1. Импульс тока отрицательного КР имел амплитуду 2 mA (при $U = 10.4$ kV). Фронт импульсов тока был коротким, а спад — затянутым до 1 μ s. В положительном КР импульс тока состоял из двух максимумов и был более длительным. Поскольку основным носителем тока в КР определенной полярности являются ионы той же полярности, диффундирующие от ГЗ к противоположному электроду [8,14,15], то основным носителем тока отрицательного КР являются ионы F^- . Зависимость

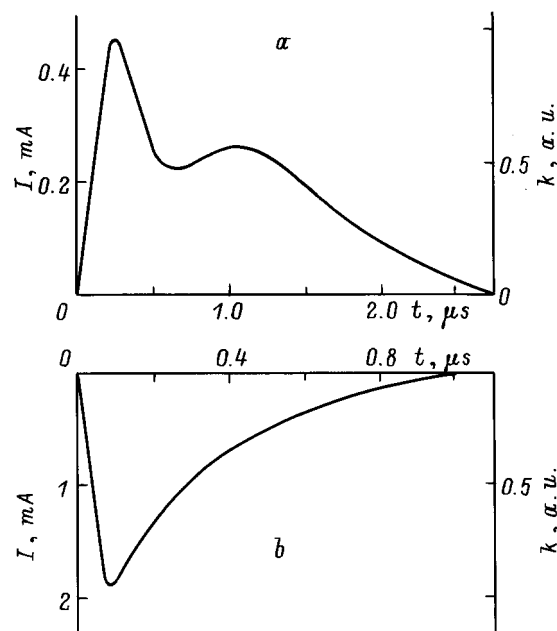


Рис. 1. Осциллограммы тока положительного (а) и отрицательного (б) КР в смеси He/ $F_2 = 200/0.8$ kPa.

тока отрицательного КР от времени является фактически зависимостью плотности отрицательных ионов F^- от времени. Начальный участок осциллограммы тока на рис. 1 соответствует росту плотности ионов F^- в области сильного электрического поля (в пределах ГЗ КР), а спад соответствует убыли отрицательных ионов при их диффузии через внешнюю область КР. Из длительности спада импульса тока отрицательного КР 0.9 μ s и размера внешней области КР 1.5 cm следует, что средняя скорость диффузии отрицательных ионов при давлении гелия 2 atm составляет $1.7 \cdot 10^6$ cm/s. Чтобы обеспечить такую скорость дрейфа ионов F^- , напряженность электрического поля в ГЗ должна составлять 20 kV/cm, что следует из данных о подвижности ионов F^- в гелии [11,12]. В положительном КР основными носителями тока являются, вероятно, положительные ионы F^+ и F_2^+ , что и приводило к двугорбому виду осциллограммы тока разряда в смеси He/ F_2 .

ВАХ КР и зависимость частоты следования импульсов тока отрицательного КР от напряжения на иглолках приведены на рис. 2. ВАХ КР состояли из начального участка, близкого к линейному, и резко возрастающей части, связанной со стримерным пробоем. Для смесей He/ F_2 одинакового состава и давления скорость роста тока с увеличением напряжения на иглолках в 1.5–2 раза выше для отрицательного КР, но потенциал зажигания положительного КР на 2–3 kV ниже отрицательного. Для получения максимальной скорости прокачки смеси He/ F_2 оптимальным является использование отрицательного КР при $U = 9–11$ kV. Зависимости частоты следования импульсов тока от напряжения на иглолках были линейными. Наибольшая частота следования импульсов тока наблюдалась в отрицательном КР. В по-

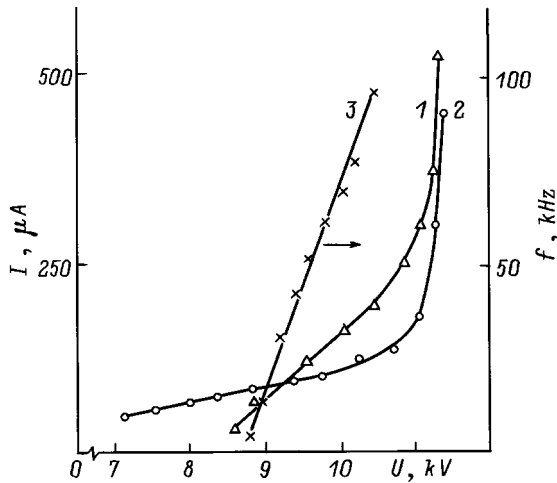


Рис. 2. Зависимости среднего тока (1, 2) и частоты повторений импульсов тока КР (3) от величины напряжения на иглах для отрицательного и положительного КР в смеси He/F₂.

ложительном КР при тех же величинах напряжения питания она уменьшалась примерно в 2 раза. При добавках к смеси He/F₂ атомов Ar, Kr и Xe максимальная частота повторения импульсов тока уменьшалась с ростом атомного веса тяжелого инертного газа и в смеси He/Xe/F₂ составляла 12–14 kHz. Это обусловлено различиями в скоростях дрейфа положительных ионов R⁺, R₂⁺ (экранирующих отрицательно заряженное острие) и отрицательных ионов F⁻ (регулирующих время убывания отрицательного заряда), которые и определяли предельную частоту повторений импульсов тока отрицательного КР [14,15]. Линейная форма ВАХ не является типичной для КР и обусловлена нелинейностями КР в инертных газах, КР при этом приобретает часть свойств тлеющего разряда [16].

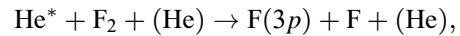
ГЗ отрицательного КР в смеси He/F₂ является протяженным источником не только красного излучения, а, по-видимому, и ВУФ излучения на λ = 157 nm F₂(D'–A') и может использоваться в качестве простой селективной ВУФ лампы.

Оптические характеристики излучения генерационной зоны КР

На рис. 3, 4 представлены обзорный спектр излучения ГЗ КР и зависимости линий F(3s–3p) от тока КР в смеси He/F₂. Спектры излучения положительного и отрицательного КР были одинаковыми и отличались только величиной интенсивности линий атома фтора. Основные линии в спектре излучения ГЗ принадлежали переходам F(3s–3p) и являлись генерационными при накачке смеси He/F₂ поперечным разрядом высокого давления [1]. Наибольшая интенсивность излучения на переходах атома фтора получена в отрицательном КР, а большинство зависимостей имели возрастающий харак-

тер при увеличении тока КР (за исключением кривой 2 на рис. 4).

Атомы F(3p) в плотной электроразрядной плазме эффективно образуются в реакциях передачи энергии [4]



$$k = 8.2(-30) \text{ cm}^6/\text{s}. \quad (1)$$

В отрицательном КР плотность ионов F⁻, объем ГЗ и интенсивность излучения на переходах F(3s–3p) больше, чем в положительном КР. В этом случае наряду с реакцией (1) атомы F(3p) могут эффективно получаться в процессах рекомбинации ионов He⁺ и F⁻ через образование эксимерной молекулы HeF*, для которой свойственно очень малое время жизни и быстрая преддиссоциация [17]. Вклад рекомбинационного заселения F(3p), как следует из рис. 4 и ВАХ КР, может

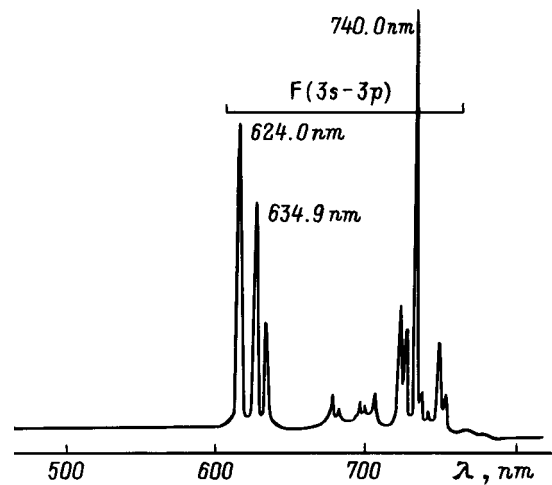


Рис. 3. Обзорный спектр излучения генерационной зоны отрицательного КР.

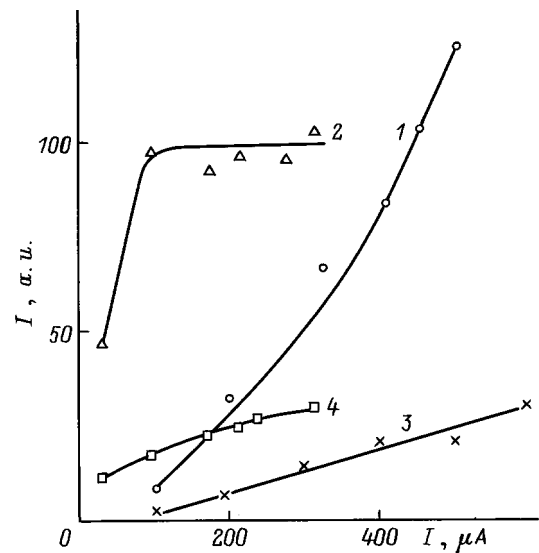
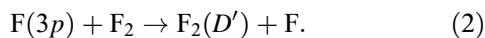


Рис. 4. Зависимости интенсивности излучения линий 740.0 nm F* (1, 2) и 624.0 nm F* (3, 4) от тока положительного и отрицательного КР.

преобладать при пониженных напряжениях на иголках и соответственно при более низких эффективных значениях параметра E/N в ГЗ КР.

Согласно численному моделированию кинетики процессов в поперечном разряде на смеси He/F_2 [4], возбужденные атомы фтора с энергией верхнего уровня в диапазоне 14–15 eV вносят основной вклад в заселение состояния $\text{F}_2(D')$, распадающегося с излучением полосы с $\lambda = 157$ nm. Поэтому полочка в зависимости интенсивности линии $\lambda = 740.0$ nm $F(3s-3p)$ от тока отрицательного КР, вероятно, обусловлена уходом возбужденных атомов фтора в реакцию конверсии



Исходя из этого в ВУФ области обнаружение возбужденных молекул фтора возможно в отрицательном КР при средних токах разряда 100–300 μA , но для этого требуется постановка специального эксперимента с применением ВУФ монохроматора с соответствующей системой регистрации излучения.

Как видно из спектра излучения (рис. 3), в ГЗ КР реализуется селективное заселение отдельных подуровней $3p$ -состояний атома фтора. Импульсная мощность, вкладываемая в ГЗ отрицательного КР, достигает 2–5 MW в плазму объемом 5–10 cm^3 . Это обеспечивало величину удельного энерговклада на уровне 100 kW/cm^3 . При технической оптимизации конструкции системы электродов, состава и давления газовых смесей и источника питания на основе ГЗ отрицательного КР возможно создание селективного источника излучения на $3s-3p$ -переходах атома фтора.

Выводы

Таким образом, исследование условий работы модуля электрической прокачки импульсно-периодического лазера высокого давления на атомах $F(3s-3p)$ и молекулах $\text{F}_2(D'-A')$ показало, что в коронном разряде на смеси He/F_2 генерационная зона формируется в виде сплошного плазменного шнура, охватывающего все острия иглол; оптимальным является применение отрицательного коронного разряда в модуле прокачки; генерационная зона отрицательного КР может быть использована в качестве простого селективного излучателя в красной области спектра и, вероятно, на $\lambda = 157$ nm F_2^* , который может применяться как источник УФ предыонизации $\text{F}_2(D'-A')$ лазера или соответствующей ВУФ лампы; по сравнению с условиями работы модуля прокачки RCI^* лазеров для КР в смеси He/F_2 наблюдалось увеличение потенциалов зажигания и рост величины рабочих напряжений примерно в 1.5–2 раза; сплошной характер генерационной зоны создает предпосылки получения более однородного поперечного потока газовой среды F^* , F_2^* , RF^* лазеров по сравнению с соответствующими средами импульсно-периодических RCI^* лазеров.

Выражаю благодарность А.И. Дашенко и А.И. Мине за помощь в проведении эксперимента.

Список литературы

- [1] Лисицын В.Н., Ражев А.М. // Письма в ЖТФ. 1977. Т. 3. Вып. 17. С. 862–864.
- [2] Serafetinides A.A., Rickwood K.R. // Appl. Phys. 1987. Vol. B44. N 20. P. 119–123.
- [3] Rice J.K., Hays A.K., Woodwort J.R. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 31. N 1. P. 31–33.
- [4] Yamada K., Miyazaki K., Hasama T., Sato T. // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54. N 7. P. 597–599.
- [5] Баранов А.И., Гурков К.В., Ломаев М.И. и др. // ПТЭ. 1994. № 4. С. 108–111.
- [6] Шуаибов А.К., Миня А.И., Звенигородский В.В., Шевера В.С. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 13. С. 73–78.
- [7] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В. // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 1. С. 20–24.
- [8] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронноионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [9] Christophorov L.G. // Contrib. Plasma Phys. 1987. Vol. 27. N 4. P. 237–281.
- [10] Kigler D., Rozenberg Z., Rokni M. // Appl. Phys. Lett. 1981. Vol. 39. N 4. P. 319–321.
- [11] Hsia J. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 30. N 2. P. 101–103.
- [12] Osborne M.R., Winfield R.J., Green J.M. // J. Appl. Phys. 1989. Vol. 65. N 12. P. 5242–5245.
- [13] Osborne M.R., Green J.M. // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 71. N 7. P. 3127–3133.
- [14] Лозанский Э.Д., Фирсов О.Б. Теория искры. М.: Атомиздат, 1975. 271 с.
- [15] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [16] Belevtzev A.A., Biberman L.M. // Beitr. Plasmaphys. 1983. Bd 23. P. 313–317.
- [17] Hocker L.O. // J. Opt. Soc. Amer. 1978. Vol. 68. P. 262–265.