

Эффективная генерация излучения в смесях гелия и фтора в диффузных разрядах, формируемых убегающими электронами

В.Ф.Тарасенко, А.Н.Панченко, В.В.Кожевников

Исследованы параметры вынужденного излучения, генерируемого в диффузных разрядах, которые формируются в смесях гелия и фтора в резко неоднородном электрическом поле. Получена генерация в видимой и ВУФ областях спектра на переходах атомов и молекул фтора. Показано, что в смесях He–F₂ генерация на длине волны 157 нм продолжается в течение нескольких полупериодов тока разряда. За счет однородности диффузного разряда получен максимальный КПД генерации F₂-лазера 0.15%, что соответствует КПД лазеров данного типа с накачкой поперечными объемными разрядами с преионизацией.

Ключевые слова: эффективная ВУФ генерация, диффузный разряд, неоднородное электрическое поле, убегающие электроны.

1. Введение

Электроразрядные лазеры на молекулах фтора с длиной волны генерации 157 нм являются мощными источниками вынужденного излучения в области вакуумного ультрафиолета. Такое излучение сильно поглощается большинством материалов, что дает возможность широко использовать данный лазер для их очистки и обработки [1], в литографии [2–4], для фотохимического осаждения [5] и т. д. Для накачки F₂-лазеров, как правило, применяются поперечные объемные разряды с предварительной ионизацией газовой смеси. Однако в смесях со фтором наблюдается быстрая контракция объемного разряда, которая происходит в течение 20–30 нс [6]. Это делает необходимым использовать для возбуждения короткие мощные импульсы напряжения большой амплитуды и высокое давление рабочей смеси [7, 8]. В этих условиях такой важный параметр лазера, как его КПД, из-за рассогласования импеданса генератора и сопротивления разряда обычно меньше 0.1%. Расчетный КПД η_{int} относительно вложенной энергии для F₂-лазера составляет 1% [9] и может быть реализован с использованием генераторов двойного разряда при уменьшении мощности накачки и давления активной газовой смеси [10].

Максимальные КПД электроразрядных лазеров на молекулярном фторе относительно запасаемой в генераторе энергии (0.15%) были получены в [11, 12] при накачке короткими мощными импульсами длительностью ~ 10 нс.

Следует отметить, что объемная диффузная плазма может быть создана за счет инициирования убегающими электронами в газовых промежутках с электродами, имеющими малый радиус кривизны, на которые подаются импульсы высокого напряжения с фронтами ~ 1 нс [13]. В

работе [14] предложено такие диффузные разряды называть «объемные разряды, инициируемые пучком электронов лавитен» (ОРИПЭЛ) (Runaway Electron Preionized Diffuse Discharge (REP DD)). Показано, что ОРИПЭЛ может использоваться для получения эффективной генерации в различных диапазонах спектра [15].

Целью настоящей работы является исследование параметров вынужденного излучения в смесях гелия и фтора при накачке импульсным диффузным разрядом.

2. Экспериментальная аппаратура и методики измерений

Для проведения исследований характеристик излучения, генерируемого в наносекундных диффузных разрядах, которые формируются в различных газовых смесях импульсами высокого напряжения, была создана лазерная камера, соединенная с импульсным генератором РАДАН-220 и подробно описанная в [16]. Максимальная энергия E , запасенная в формирующей линии генератора емкостью $C = 50$ пФ [17], составила 2.1 Дж. Эта величина определяется пробивным напряжением U серийного искрового разрядника-обострителя Р-49, которое в наших экспериментах было равно 280 ± 10 кВ.

Высоковольтный импульс от генератора РАДАН-220 подавался на электроды из нержавеющей стали, выполненные в виде лезвий с закругленными краями и углом при вершине 5°. Радиус кривизны острых кромок составлял 0.05 мм. Это обеспечивало неоднородное распределение напряженности электрического поля в разрядном промежутке и, соответственно, его усиление у электродов, что позволяло формировать объемные диффузные разряды в различных активных газовых смесях при давлениях до 10 атм. Длина электродов составляла 30 см, а зазор между ними d был равен 1.8 см. На боковой стенке камеры имелось дополнительное окно для фотографирования разряда и регистрации параметров импульсов его спонтанного излучения. Резонатор был образован плоским алюминиевым зеркалом и плоскопараллельной пластинкой из MgF₂.

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

Поступила в редакцию 15 июня 2020 г.

Для измерений энергии лазерного излучения применялся измеритель типа ОРНІR (Ophir Optronics LTD, Inc.) с сенсорной головкой PE50BV, которая устанавливалась на минимальном расстоянии от выходного зеркала резонатора; зазор между ними продувался гелием. Поскольку в смесях He–F₂ наблюдалась одновременная генерация на переходах атомов и молекул фтора в видимой и ВУФ областях спектра, для определения энергии видимого излучения измерение проводилось без продувки зазора.

Лазерные импульсы на линиях FІ измерялись фотоэлементом ФЭК-29СПУ. Для измерения ВУФ импульсов фотокатод в стандартном фотоэлементе ФЭК-22 заменялся полированной медной пластинкой. Фотоэлемент вакуумно-плотно присоединялся к выходному зеркалу резонатора и откачивался до остаточного давления 5×10^{-4} мм рт. ст. Работа выхода медного катода составила 4.53–5.10 эВ, что соответствует красной границе фотоэффекта: $\lambda = 274\text{--}245$ нм [18].

Фотоэлемент с медным катодом тестировался импульсами лазерного излучения на $\lambda = 351\text{--}353$ нм (XeF*–лазер), 337.1 нм (азотный лазер) и 248 нм (KгF*–лазер). Формы лазерных импульсов на $\lambda = 248$ нм, зарегистрированных ФЭК-22 и модифицированным фотоэлементом, совпадали, а излучение на $\lambda = 337$ и 351–353 нм фотоэлементом с медным катодом не фиксировалось. Следует отметить, что методики измерений импульсов ВУФ излучения плазмы приборами с металлическими фотокатодами хорошо разработаны, обеспечивают высокую точность и достаточно широко распространены [19–21]. Спектры излучения плазмы диффузного разряда в диапазоне длин волн 200–1100 нм фиксировались спектрометром HR400 (Ocean Optics).

Для измерения импульсов тока разряда использовался омический шунт, собранный из низкоиндуктивных чип-резисторов. Электрические сигналы регистрировались цифровым осциллографом TDS 3054.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Генерация на линиях атомарного фтора

В плазме разряда в смесях гелия со фтором кинетические процессы, формирующие инверсию на переходах атомарного фтора, являются частью кинетики ВУФ лазеров на молекулах F₂. Одним из каналов заселения верхнего лазерного уровня ВУФ перехода молекулы фтора $D'(^3P_{2g}) \rightarrow A'(^3P_{2u})$ является реакция передачи энергии



где F* – возбужденные атомы фтора в метастабильных состояниях $3s^4P_j$ ($j = 5/2, 3/2, 1/2$), которые являются нижними лазерными уровнями для лазера на линиях атомарного фтора [11]. Поэтому исследование генерации на линиях FІ важно для более полного понимания кинетики F₂-лазера.

Отличительной особенностью F-лазера является малое время запаздывания лазерного импульса относительно начала импульса накачки и широкая область генерации, достигающая 1 см при давлении газовой смеси 1–3 атм, тогда как в случае N₂-лазера [16] выходной пучок значительно уже. Это можно связать с тем, что порог генерации на линиях фтора достаточно низок, а область

протекания тока в начальной стадии ОРИПЭЛ достаточно широка [22]. Затем область протекания основного тока разряда сужается, и, поскольку для достижения порога генерации на молекулах фтора требуется более высокая плотность тока, ширина автографа ВУФ излучения уже не превышает 3–4 мм [7].

Длительность лазерного излучения на линиях FІ с превышением добротности резонатора равна нескольким полупериодам тока разряда, что свидетельствует о высокой устойчивости ОРИПЭЛ в смесях со фтором. В спектре лазерного излучения присутствуют пять линий в диапазоне 634–755 нм. При этом на периферии лазерного пятна при низком давлении преобладает излучение на $\lambda = 634$ нм, тогда как в центре апертуры наблюдаются линии $\lambda > 700$ нм. Это выглядит как провал интенсивности излучения в центре пятна генерации, поскольку глаз ИК излучение не видит.

На рис.1 приведены зависимости интенсивностей спонтанного и вынужденного излучений на линиях атомарного фтора от давления гелия в активной смеси. Буквами Q и D обозначены квартеты (переходы с уровней $3p^4S_{3/2}^0$ и $3p^4P_{5/2,3/2,1/2}^0$) и дублеты (переходы с уровней $3p^2S_{1/2}^0$ и $3p^2P_{1/2,3/2}^0$) соответственно. Согласно [23] интенсивность спонтанного излучения P равна произведению населенности $n[FІ]$ верхнего уровня перехода и вероятности спонтанного излучения $A: P = n[FІ]A$. Из рис.1,а следует, что населенности верхних уровней переходов слабо зависят от давления гелия. Исключением является квартетный переход на $\lambda = 739.8$ нм, интенсивность излучения на котором существенно возрастает. Интенсивности же лазерных линий в зависимости от давления гелия ведут себя совершенно иначе (рис.1,б). При увеличении давления буферного газа наблюдается резкий рост мощности генерации

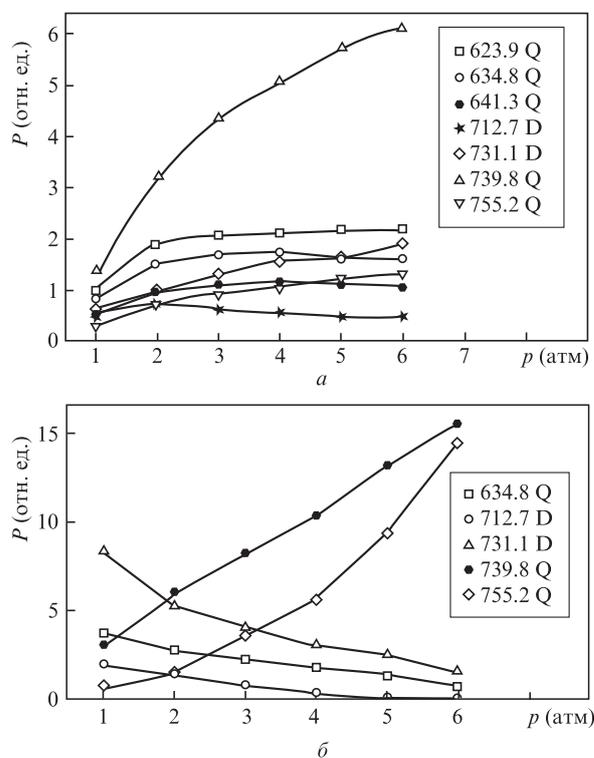


Рис.1. Зависимости интенсивностей P спонтанного (а) и вынужденного (б) излучений на линиях FІ от давления p гелия в смеси с F₂ (5 мм рт. ст.). Буквами Q и D обозначены квартеты и дублеты, длины волн приведены в нанометрах.

на квартетных переходах $3p^4P^0_{5/2} - 3s^4P_{5/2, 3/2}$ на $\lambda = 739.8$ и 755.2 нм, тогда как интенсивность излучения на остальных линиях снижается практически до нуля. Можно предположить, что данные зависимости обусловлены быстрой релаксацией верхних уровней дублетных переходов при столкновениях атомов фтора и гелия. При росте давления смеси область генерации становится такой же, как и у F_2 -лазера. Общая энергия излучения на линиях FI линейно растет с увеличением давления смеси и при $p = 8$ атм превышает 0.3 мДж. Это также подтверждает устойчивость ОРИПЭЛ в смесях со фтором, поскольку при контрагировании разряда энергия генерации на линиях FI резко падает [24].

Если предположить, что один атом фтора в состояниях $3s^4P_{5/2, 3/2}$ производит один лазерный фотон на $\lambda = 157$ нм, реакция (1) может обеспечить энергию генерации на молекулах F_2 до 1.6 мДж.

3.2. ВУФ лазер на молекулах фтора

Работу F_2 -лазера с накачкой диффузным разрядом иллюстрирует рис.2. На рис.2,а приведены характерные осциллограммы импульса тока в разрядном промежутке I_d , импульса спонтанного излучения диффузного разряда в области $\lambda = 200-800$ нм, максимумы которого соответствовали максимумам I_d , и лазерного импульса на $\lambda = 157$ нм. Порог ВУФ генерации достигается при $p \approx 3$ атм. Лазерный импульс на $\lambda = 157$ нм начинается вблизи первого максимума I_d и имеет три выраженных пика, соответствующих трем последовательным осцилляциям тока диффузного разряда. Полная длительность ВУФ лазерного импульса достигала 30 нс. Мощности излучения в первых двух пиках возрастали с увеличением давления ак-

тивной смеси, а интенсивность третьего пика при этом снижалась. Это связано с тем, что амплитуды первых пиков тока слабо зависели от давления гелия, а амплитуда тока накачки в третьем пике уже заметно падала.

Энергия излучения лазера на молекулярном фторе, как и в работах [8, 9, 11, 12], линейно росла с увеличением давления активной смеси. Это связано с ростом энергии, вкладываемой в активную среду, поскольку напряжение на разрядном промежутке пропорционально давлению смеси [25], а ток разряда в первых двух пиках, в течение которых осуществляется основной энерговыход, в наших экспериментах в основном определяется волновым сопротивлением генератора РАДАН-220 и слабо зависит от давления. Максимальная энергия генерации при давлении He 8.5 атм $Q_{157} = 3$ мДж. При этом, согласно зависимости на рис.2,б, возможен ее дальнейший рост. Данная энергия соответствует КПД F_2 -лазера 0.15%, который был получен при накачке F_2 -лазера поперечным самостоятельным разрядом с предыонизацией [11, 12]. Отсюда также можно сделать вывод, что примерно половина молекул F_2^* в состоянии $D'(^3P_{2g})$ формируется по нейтральному каналу (1).

Согласно оценке, удельная мощность накачки в наших экспериментах с учетом данных о напряжении в квазистационарной стадии объемного разряда U_{qs} , приведенных в [25], составляет 6–7 МВт/см³, что соответствует приведенному в [12] оптимальному значению, требуемому для получения максимальной эффективности F_2 -лазера.

Существование ВУФ лазерного импульса в течение нескольких осцилляций тока в разрядном промежутке также свидетельствует о высокой устойчивости диффузного разряда, формируемого в неоднородном электрическом поле за счет предыонизации убегающими электронами [14]. Этот эффект можно связать с близкими к описанным в [26] условиями формирования диффузного разряда при амплитуде импульсов напряжения, превышающей 250 кВ, и быстром нарастании плотности тока в разрядном промежутке ($dj/dt > 50 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{нс}^{-1}$). Характерной особенностью данного режима накачки является быстрый рост концентрации электронов и ионов в процессах прямой ионизации. В этих условиях формируется плазма без флуктуаций концентрации заряженных частиц в объеме, что и приводит к высокой устойчивости диффузного разряда.

4. Заключение

Исследована генерация в смесях гелия со фтором при накачке диффузным разрядом, формируемым в неоднородном электрическом поле убегающими электронами. Получена генерация в видимой и ВУФ областях спектра на переходах атомов и молекул фтора. Показано, что объемная стадия диффузного разряда сохраняется в течение нескольких последовательных осцилляций тока в лазерном промежутке. Достигнута энергия генерации в ВУФ области до 3 мДж при длительности ВУФ лазерного импульса до 30 нс. За счет малой длительности и оптимальной мощности накачки получен максимальный КПД генерации F_2 -лазера 0.15%, равный КПД лазеров данного типа с возбуждением поперечными объемными разрядами с предыонизацией.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме №13.1.4.

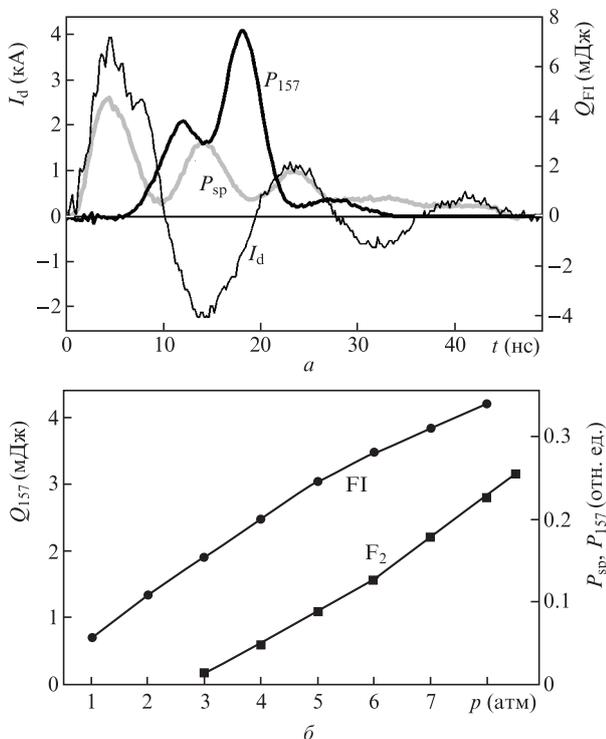


Рис.2. Характерные осциллограммы импульсов спонтанного излучения диффузного разряда P_{sp} и F_2 -лазера P_{157} , а также тока разряда I_d ; смесь He (7 атм) и F_2 (5 мм рт. ст.) (а), а также зависимости энергии излучения F-лазера Q_{FI} и F_2 -лазера Q_{157} от давления He в смеси с F_2 (5 мм рт. ст.) (б).

1. Cefalas A., Sarantopoulou E., Kollia Z. *Appl. Phys. A*, **73**, 571 (2001).
2. Sarantopoulou E., Kollia Z., Kočevár K., Mušević I., Kobe S., Dražić G., Gogolides E., Argitis P., Cefalas A.C. *Mater. Sci. Eng. C, Biomim. Mater., Sens. Syst.*, **23**, 995 (2003).
3. Hofmann T., Hueber J.-M., Das P., Scholler S. *Proc. SPIE*, **3679**, 541 (1999).
4. Spratte S., Voss F., Bragin I., Bergmann E., Niemoeller N., Nagy T., Rebhan U., Targsdorf A., Paetzel R., Govorkov S.V., Hua G. *Proc. SPIE*, **5040**, 1344 (2003).
5. Takao H., Okoshi M., Inoue N. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42**, Part 2, 5A, L461 (2003).
6. Mathew D., Bastiaens H.M.J., Boller K.-J., Peters P.J.M. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 101502 (2006).
7. Yamada K., Miyazaki K., Hasama T., Sato T. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 597 (1989).
8. Kakehata M., Hashimoto E., Kannari F., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **56**, 2599 (1990).
9. Ohwa M., Obara M. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 958 (1987).
10. Bastiaens H.M.J., Peters P.J.M., Wittteman W.J. *Proc. SPIE*, **3092**, 374 (1996).
11. Ищенко В.Н., Кочубей С.А., Ражев А.М. *Квантовая электроника*, **13**, 1072 (1986) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **16**, 707 (1986)].
12. Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **33**, 677 (2003) [*Quantum Electron.*, **33**, 677 (2003)].
13. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. *ЖТФ*, **39**, 1530 (1969) [*Sov. Phys. Techn. Phys.*, **14**, 1148 (1969)].
14. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. *ЖТФ*, **80**, 51 (2010) [*J. Techn. Phys.*, **55**, 210 (2010)].
15. Вильтовский П.О., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Панченко Н.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **43**, 605 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 605 (2013)].
16. Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Lomaev M.I., Panchenko N.A., Suslov A.I. *Opt. Commun.*, **430**, 210 (2019).
17. Mesyats G.A., Korovin S.D., Rostov V.V., Shpak V.G., Yalandin M.I. *Proc. IEEE*, **92**, 1166 (2004).
18. Pimpec F.Le, Milne Ch.J., Hauri Ch.P., Ardana-Lamas F. *Appl. Phys. A*, **112**, 647 (2013).
19. Nassisi V., Beloglazov A., Giannico E., Perrone M.R., Rainò A. *J. Appl. Phys.*, **84**, 2268 (1998).
20. Henneken H., Cholze F.S., Krumrey M., Ulm G. *Metrologia*, **37**, 485 (2000).
21. Sozer E.B., Jiang C., Gundersen M.A., Umstattd R.J. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insulat.*, **16**, 993 (2009).
22. Sorokin D.A., Tarasenko V.F., Beloplotov D.V., Lomaev M.I. *J. Appl. Phys.*, **125**, 143301 (2019).
23. Lochte-Holtgreven W. (Ed.) *Plasma Diagnostics* (Amsterdam: North-Holland Publ. Comp., 1968).
24. Parvin P., Mehravaran H., Jaleh B. *Appl. Opt.*, **40**, 3532 (2001).
25. Вартапетов С.К., Жигалкин А.А., Лапшин К.Э., Обидин А.З., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **36**, 393 (2006) [*Quantum Electron.*, **36**, 393 (2006)].
26. Panchenko A.N., Tarasenko V.F. *Progr. Quantum Electron.*, **36**, 143 (2012).