

## ЭКСИЛАМПЫ НА ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ И ИХ СМЕСЯХ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ, ИНИЦИИРУЕМЫМ ПУЧКОМ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2012 г. М. И. Ломаев, доктор физ.-мат. наук; Д. В. Рыбка, канд. физ.-мат. наук;  
Д. А. Сорокин, аспирант; В. Ф. Тарасенко, доктор физ.-мат. наук

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: lomaev@loi.hcei.tsc.ru

Изучены амплитудно-временные и спектральные характеристики излучения гомо- и гетероядерных молекул инертных газов при их возбуждении объемным разрядом, иницируемым пучком убегающих электронов. Показано, что благодаря мощности возбуждения на уровне 100 МВт/см<sup>3</sup> и более удается создавать источники спонтанного излучения с высокой импульсной мощностью.

*Ключевые слова:* вакуумное ультрафиолетовое излучение, димер, эксилампа, объемный (диффузный) разряд.

Коды OCIS: 260.7210, 230.6080, 350.5610

Поступила в редакцию 14.03.2012

### Введение

Для создания источников излучения с высокой мощностью и малой длительностью импульса необходимо увеличивать давление рабочей смеси газов, сохраняя при этом однородный разряд в промежутке и удельную мощность возбуждения в расчете на один атом. Формирование объемного (диффузного) разряда при повышенных давлениях обычно обеспечивается за счет предыонизации разрядного промежутка от дополнительного источника. Сокращение длительности импульса возбуждения также позволяет увеличить рабочее давление газовой смеси источника излучения. Увеличение общей мощности возбуждения достигается за счет увеличения амплитуды импульса напряжения и уменьшения волнового сопротивления генератора возбуждения. Подобные системы накачки широко применяются при создании импульсных лазеров с поперечным разрядом [1–3]. Известны работы, в которых подобные системы возбуждения применялись для создания эксиламп ультрафиолетового (УФ) [4, 5] и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) диапазонов [6–8]. Однако системы, использующие дополнительные источники для предыонизации, весьма сложны.

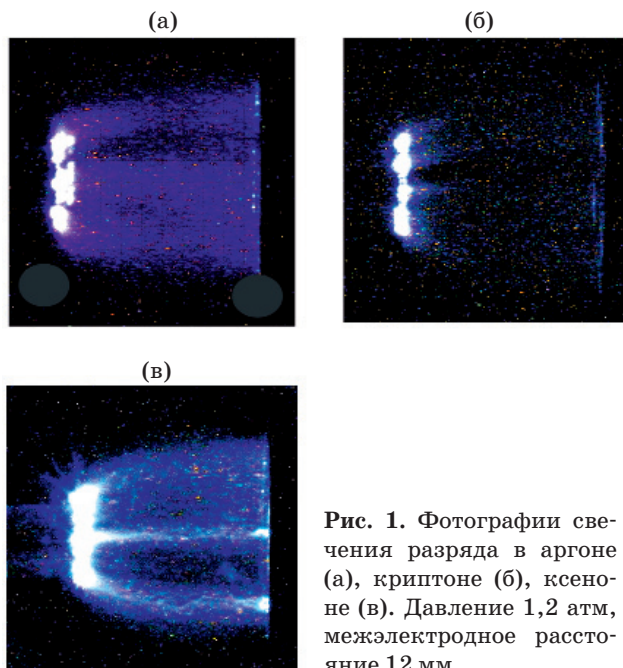
С середины прошлого столетия известно о возможности формирования диффузного

разряда в гелии [9] и воздухе [10] при атмосферном давлении за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения при разряде между катодом с малым радиусом кривизны и плоским анодом. Такой способ возбуждения был использован для создания источников излучения на переходах 2<sup>+</sup> системы азота [11–14], на переходах димеров инертных газов [15, 16], на оксиплексных молекулах галоидов инертных газов [17] и на узких полосах гетероядерных молекул инертных газов [18, 19].

В данной работе выполнен краткий обзор наиболее важных результатов, полученных при исследовании эксиламп с возбуждением объемным разрядом, иницируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), и приведены результаты исследований узкополосного излучения с длиной волны 147 нм.

### Формирование диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле

Известно [9–19], что при подаче наносекундных импульсов напряжения на промежуток с катодом малого радиуса кривизны в газах при атмосферном давлении формируется как диффузный (объемный), так и контрагированный разряды. Для создания нетепловых источников спонтанного излучения в ВУФ области спектра



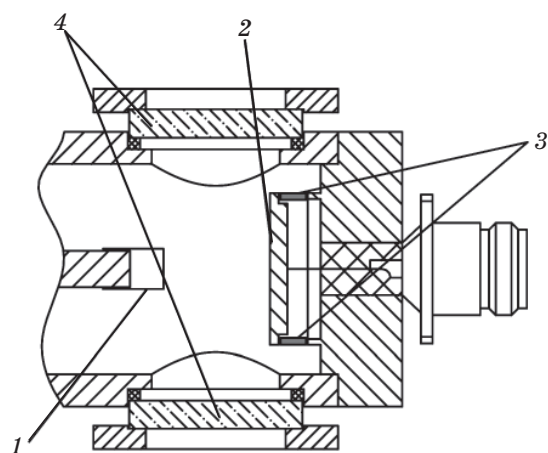
**Рис. 1.** Фотографии свечения разряда в аргоне (а), криптоне (б), ксеноне (в). Давление 1,2 атм, межэлектродное расстояние 12 мм.

с высокой импульсной мощностью излучения необходим диффузный разряд. Это легко осуществить при использовании катодов, имеющих острую кромку, а также при наносекундной длительности импульса напряжения. Формирование диффузного разряда облегчается при сравнительно больших разрядных промежутках (1 см и более). Внешний вид ОРИПЭЛ в инертных газах показан на рис. 1. Разряд имел форму диффузного конуса или однородных диффузных струй, которые могли перекрываться. Фотографии разряда сделаны через боковое окно разрядной камеры, показанной на рис. 2. В данных условиях за счет увеличения разрядного промежутка контракция разряда не происходит в течение всего импульса тока.

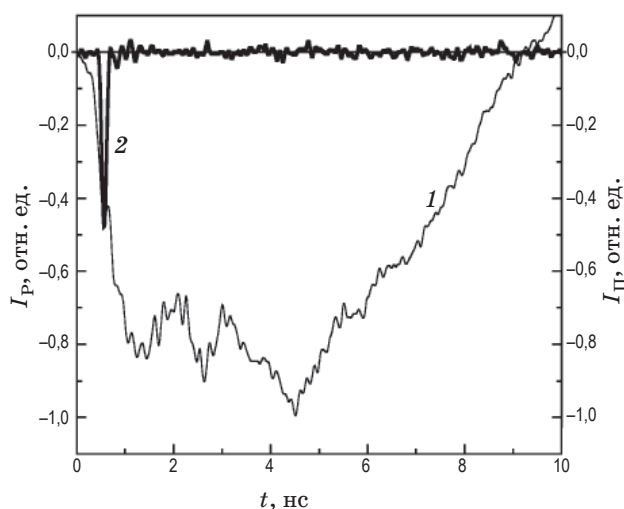
Пример осциллограмм тока разряда и тока пучка уходящих электронов за анодом из фольги в азоте атмосферного давления приведен на рис. 3. Удельная мощность энерговыклада в ОРИПЭЛ достигает  $100 \text{ МВт/см}^3$ . Пространственная форма диффузного разряда зависит от крутизны фронта и длительности импульса напряжения, а также от давления и вида используемого газа. Наиболее быстро в инертных газах контрагирование разряда происходит в ксеноне и криптоне. В случае диффузного разряда при больших зазорах яркие пятна видны только на катоде и их размер не превышает 1 мм. Время появления катодных пятен обыч-

но мало. Измерения, проведенные в [20], показали, что яркие пятна на катоде появлялись за время 200 пс. Плотная плазма вначале возникает у электрода с малым радиусом кривизны (обычно у катода). Пробой промежутка происходит за счет формирования волны ионизации, фронт которой достигает анода за время 1 нс и менее. Скорость фронта волны ионизации достигает  $10 \text{ см/нс}$  [21]. Диффузный разряд в промежутке формируется благодаря генерации уходящих электронов и рентгеновского излучения.

Известно, что тяжелые инертные газы обладают большей световой эффективностью



**Рис. 2.** Конструкции разрядной камеры. 1 – потенциальный электрод, 2 – плоский электрод, 3 – токовый шунт, 4 – боковые окна.



**Рис. 3.** Осциллограммы тока разряда  $I_P$  (1) и тока пучка уходящих электронов  $I_П$  (2) в азоте при атмосферном давлении.

как в случае возбуждения искровым, так и объемным разрядами. Их возбуждение посредством импульсных наносекундных объемных разрядов в неоднородном электрическом поле с высокой удельной мощностью (до сотен МВт/см<sup>3</sup>) весьма перспективно с точки зрения получения мощных импульсных потоков излучения.

### Импульсные эксилампы на гомоядерных димерах инертных газов

Для исследования характеристик разряда и его излучения применялась установка и аппаратура, которые подробно описаны в работах [15–17]. Для ксенона, криптона и аргона при давлении 0,3–1,2 атм был получен объемный разряд без источника дополнительной предыонизации. Фотографии свечения разряда показаны рис. 1. Энерговклад в плазму разряда при атмосферном давлении составил величину ≈1 Дж. Удельная мощность энерговклада в этих условиях была не менее 100 МВт/см<sup>3</sup>. Газоразрядная плазма являлась источником мощного широкополосного излучения  $V^1\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ ,  $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$  переходов димеров  $Xe_2^*$ ,  $Kr_2^*$ ,  $Ar_2^*$  в ВУФ области спектра (рис. 4). Спектральная плотность мощности широкополосного излучения в УФ и видимой областях спектра составляет доли процента от ее пикового значения для вторых континуумов инертных газов. Энергия излучения димеров ксенона, криптона и аргона составляла не менее 90% от всей энергии излучения в диапазоне 120–850 нм. Наибольшую мощность и энергию широкополосного излучения наблюдали в ксеноне.

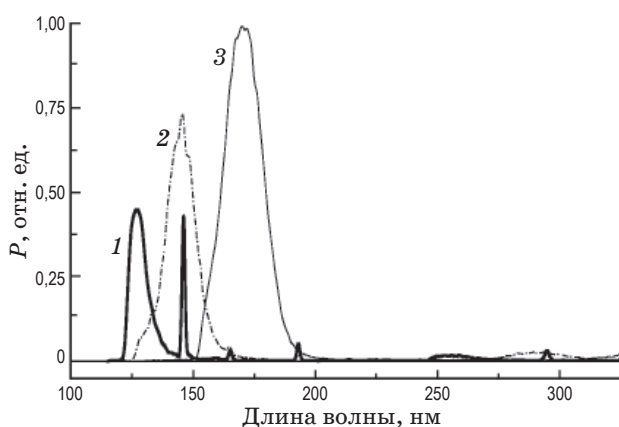
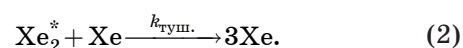
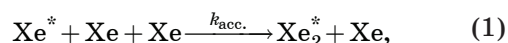


Рис. 4. Спектры излучения газоразрядной плазмы ксенона (1), криптона (2), аргона (3). Давление в камере для всех газов 1,2 атм.

Энергия излучения в полный телесный угол, измеренная калориметром ОРНИР, составила величину ≈ 45 мДж. Длительность импульса излучения на полувысоте, зарегистрированная коаксиальным фотоэлементом с алюминиевым катодом, собранном на основе серийного фотоприемника ФЭК-22СПУ, не превышала 130 нс при давлении ксенона 1,2 атм.

При увеличении давления газа разряд становится менее однородным. В ксеноне уже при давлениях 3–4 атм наблюдаются каналы контракции. Тем не менее, при давлении 12 атм мощное излучение полосы димера ксенона, наряду с широкополосным излучением фоторекомбинационных переходов ионов ксенона в УФ области спектра, также фиксируется. Следует отметить, что, несмотря на уменьшение энергии излучения, мощность ВУФ излучения увеличивается с ростом давления. Максимальная плотность мощности импульса излучения на полувысоте 8 нс были получены при давлении ксенона 12 атм. Сокращение длительности и увеличение мощности излучения с ростом давления ксенона связано с увеличением как скорости формирования димеров ксенона  $Xe_2^*$  в реакции ассоциации (1), так и скорости их безызлучательного тушения атомами ксенона  $Xe$  (2)



Оценки показывают, что увеличение давления от 1 до 12 атм приводит к увеличению вероятности ухода  $Xe^*$  в реакцию (1) от  $3,3 \times 10^7$  до  $5 \times 10^9$  с<sup>-1</sup>.

### Узкополосный источник ВУФ излучения на гетероядерных молекулах инертных газов

Оптические свойства гетероядерных молекул инертных газов и практическая значимость изучения их смесей описаны в работах [22–25]. При этом возбуждение смесей газов осуществлялось в большинстве случаев продольным разрядом в капилляре. В работах [18, 19] приведены результаты экспериментального исследования излучения бинарных смесей аргона и криптона с малыми (≈0,01%) добавками ксенона, возбуждаемых ОРИПЭЛ. Было показано, что в обеих смесях кроме мощного излучения димеров инертных газов регистрируется уз-

копосное излучение в области 147 нм. При этом предполагалось, что при увеличении активной длины и наличии резонатора в данных условиях может быть получено лазерное излучение в ВУФ области спектра на длине волны 147 нм.

Подробные исследования спектров излучения бинарных смесей аргона и гелия с добавками ксенона в области 147 нм были проведены в широком диапазоне концентраций ксенона – от 0,005 до 10%. Для регистрации спектров излучения использовался вакуумный монохроматор VM-502 (Acton Research Corp.) с полушириной аппаратной функции 0,3 нм при ширине входной и выходной щелей 30 мкм. Обнаружено, что при содержании ксенона менее 0,1% в спектре излучения регистрируется одна компонента. Ее длина волны примерно совпадает с длиной волны резонансной линии ксенона 146,96 нм. При содержании ксенона в смеси на уровне 0,1–1% в спектре обеих смесей присутствуют, как минимум, две компоненты. При большем содержании ксенона в спектре доминирует излучение первого континуума димера ксенона.

Для смеси гелий-ксенон был зарегистрирован временной ход импульсов излучения двух участков спектра, интервал между центрами которых составляет 0,6 нм (спектральные участки А и Б на рис. 5). Осциллограммы импульсов излучения представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что интенсивность излучения в коротковолновой области достигает своего максимального значения на 300 нс позже (кривая 1) по отношению к временному ходу излучения в длинноволновой области. Это, вероятно, является следствием того, что излучение на спектральных участках А и Б (рис. 5) соответствует излучению разных оптических переходов одной частицы (гетероядерной молекулы  $\text{HeXe}^*$ ) или излучению разных возбужденных частиц.

Коротко- и длинноволновая составляющие спектра излучения смесей по-разному поглощаются в проходной камере, заполненной ксеноном. На рис. 7 приведены зависимости интенсивности излучения коротко- и длинноволновой составляющих спектра излучения смеси  $\text{Ar-Xe}$  (общее давление смеси 0,5 атм, содержание ксенона 0,1 %) от давления ксенона в проходной камере. При интерполяции обеих кривых спадающими экспонентами были оценены коэффициенты поглощения обеих составляющих спектра. Для длинноволновой части

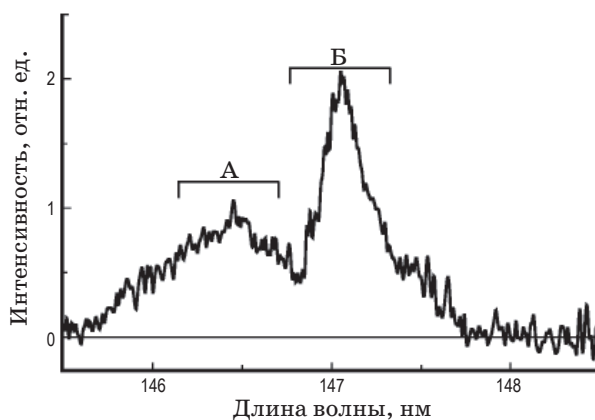


Рис. 5. Спектр излучения смеси  $\text{He-Xe}$  при содержании ксенона 1%. Давление смеси 0,5 атм. Ширина щелей монохроматора 30 мкм (А, Б – см. рис. 6).

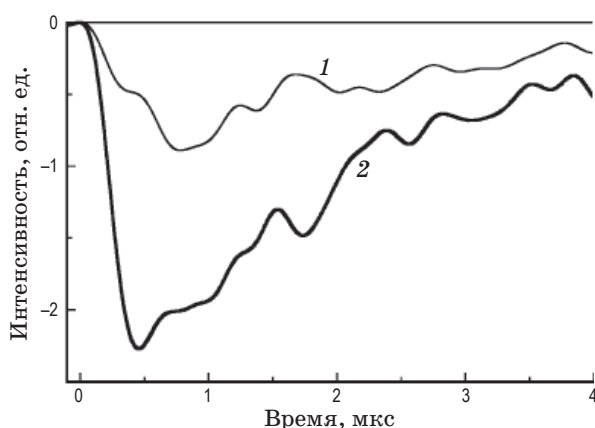


Рис. 6. Временной ход излучения смеси  $\text{He-Xe}$  на длинах волн спектральных интервалов А (1) и Б (2), отмеченных буквами на рис. 5.

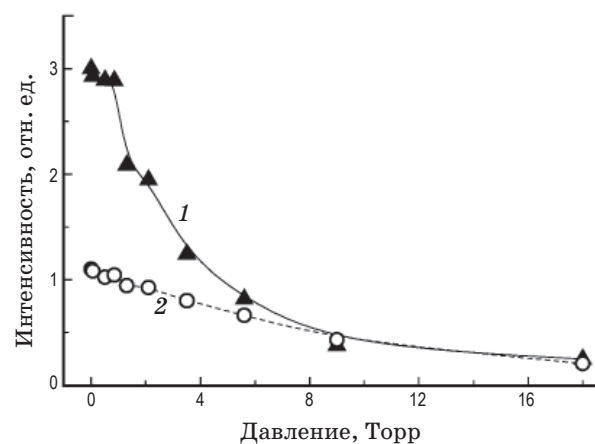


Рис. 7. Зависимости интенсивности излучения длинноволновой (1) и коротковолновой составляющих (2) спектра от давления ксенона в проходной камере. Давление  $\text{Ar-Xe}$  смеси 0,5 атм. Содержание ксенона 0,1%.

спектра при давлении ксенона в проходной камере 3,5 Торр коэффициент поглощения составил  $3,7 \times 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ , для коротковолновой части спектра он оказался в 3 раза меньше.

### Заключение

Импульсный объемный разряд, инициируемый пучком быстрых электронов, обеспечивает высокий (до 100 МВт/см<sup>3</sup> и более) уровень плотности мощности возбуждения при повышенных давлениях инертных газов и их смесей. Это позволяет получать интенсивные

(до сотен кВт/см<sup>3</sup>) потоки спонтанного излучения гомо- и гетероядерных молекул инертных газов в ВУФ области спектра, эффективно формирующихся в газоразрядной плазме в данных условиях возбуждения. Полученные результаты указывают на перспективность получения стимулированного излучения на переходах гомо- и гетероядерных молекул при возбуждении данных сред ОРИПЭЛ.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 10-08-00556-а и ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, ГК № 02.740.11.0562.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат. 1988. 216 с.
2. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. Pulsed gas lasers. Washington: SPIE Press. 1995. 374 p.
3. Endo I., Walter R.F. Gas lasers. New York: CRC Press, Taylor and Francis Group. 2007. 556 p.
4. Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Янкелевич Е.Б. Мощная широкоапертурная эксимерная лампа // ПТЭ. 1992. № 4. С. 244–245.
5. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Планарная эксимерная лампа на хлоридах инертных газов с накачкой поперечным самостоятельным разрядом // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 2. С. 169–173.
6. Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. Эксимерная электроразрядная лампа с  $\lambda = 126, 146$  или  $172 \text{ нм}$  // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 1–5.
7. Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. Импульсный источник спонтанного излучения в ВУФ области спектра // Опт. атмосферы и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 694–698.
8. Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Кузнецов А.А. Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксимерные лампы с накачкой барьерным разрядом // ЖТФ. 1994. Т. 64. В. 10. С. 146–150.
9. Noggle R.C., Krider E.P., Wayland J.R. A search for X-rays from helium and air discharges at atmospheric pressure // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. P. 4746–4748.
10. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. Рентгеновское излучение при импульсных разрядах в воздухе // ЖТФ. 1969. Т. 39. В. 8. С. 1530–1533.
11. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. Характеристики газоразрядного источника световых импульсов наносекундной длительности // ПТЭ. 1977. № 1. С. 203–204.
12. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. Оптические свойства плазмы при объемном наносекундном разряде атмосферного давления в неоднородном электрическом поле // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 8. С. 35–40.
13. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Кривоногова К.Ю. Излучательные характеристики азота при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком убегающих электродов // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 1. С. 40–47.
14. Ерофеев М.В., Бакиш Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. Миниатюрная УФ лампа, возбуждаемая субнамосекундными импульсами напряжения // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 6. С. 561–564.
15. Бакиш Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Излучение плазмы объемного наносекундного разряда в ксеноне, криптоне и аргоне при повышенном давлении // Квант. электрон. 2006. Т. 36. № 6. С. 576–580.
16. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бакиш Е.Х. Мощный короткоимпульсный источник спонтанного излучения на димерах ксенона // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 6. С. 595–596.

17. *Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф.* Изучение объемного разряда в галогенидах инертных газов без источника предьонизации // Квант. электрон. 2008. Т. 38. № 4. С. 401–403.
  18. *Герасимов Г.Е., Крылов Б.Е., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Излучение в аргоне и криптоне на длине волны ~ 147 нм при возбуждении диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами // Квант. электрон. 2010. Т. 40. № 3. С. 241–245.
  19. *Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение в ВУФ области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Опт. атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 3. С. 253–258.
  20. *Тарасенко В.Ф., Бакиш Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* Диффузные разряды в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях, инициируемые убегающими электронами // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 2. С. 51–59.
  21. *Тарасенко В.Ф.* Параметры сверхкороткого лавинного электронного пучка, генерируемого в воздухе атмосферного давления, и их измерение // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 5. С. 444–457.
  22. *Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Hallin R., Морозов А.О., Arnesen A., Heijkenskjold.* Вынужденное излучение смесей инертных газов в ВУФ диапазоне // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 2. С. 327–334.
  23. *Morozov A., Krylov B., Gerasimov G., Arnesen A., Hallin R.* VUV emission spectra from binary rare gas mixtures near the resonance lines of XeI and KrI // J. Phys. D: Appl. Phys. 2003. V. 36. P. 1126–1134.
  24. *Герасимов Г.Н.* Оптические спектры бинарных смесей инертных газов // УФН. 2004. Т. 174. № 2. С. 155–175.
  25. *Герасимов Г.Н., Халлин Р., Крылов Б.Е., Арнесен А.* Механизм генерации стимулированного ВУФ излучения димера  $\text{Xe}^*\text{Kr}$  в капиллярном разряде постоянного тока // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 9. С. 3–10.
-