

# Интенсивный источник ВУФ излучения на основе плазмы капиллярного разряда

И.И.Собельман\*, А.П.Шевелько\*, О.Ф.Якушев\*, Л.В.Найт\*\*, Р.С.Турли\*\*

*Приведены результаты исследований плазмы капиллярного разряда, используемой в качестве интенсивного источника ВУФ и мягкого рентгеновского излучения. Плазма создавалась при разряде малоиндуктивных конденсаторов в газонаполненном керамическом капилляре. При использовании разных рабочих газов ( $CO_2$ , Ne, Ar, Kr, Xe) наблюдалось интенсивное линейчатое излучение в широком спектральном диапазоне (30–400 Å). Абсолютный выход излучения ксенонового разряда составил  $\sim 5 \text{ мДж} \cdot (2\pi \text{ ср})^{-1} \cdot \text{имп.}^{-1}$  в пределах спектральной полосы шириной 9 Å в области 135 Å. Такой источник излучения может использоваться в различных практических приложениях: проекционной ВУФ литографии, микроскопии биологических объектов в «водяном окне», рефлектометрии и др.*

**Ключевые слова:** ВУФ излучение, плазма капиллярного разряда, ВУФ спектроскопия, рефлектометрия.

## 1. Введение

В семидесятых годах двадцатого века в лаборатории КРФ ФИАНа, возглавляемой Н.Г.Басовым, были начаты исследования по двум очень важным направлениям квантовой электроники. Одно из них – разработка лазеров коротковолнового диапазона, приведшая к появлению семейства лазеров с различными схемами накачки, генерирующих в области длин волн от «водяного окна» до ближнего УФ. Обзор работ по данному направлению приведен в [1].

Второе важное направление исследований связано с использованием спонтанного рентгеновского излучения лазерной плазмы. Лазерная плазма, создаваемая при фокусировке мощного излучения на твердотельную или газовую мишень, является интенсивным источником рентгеновского и ВУФ излучения, в связи с чем она широко используется в фундаментальных и прикладных исследованиях. Успехи в лазерных технологиях позволяют фокусировать излучение с параметрами, изменяющимися в широких диапазонах: плотность потока на мишени  $10^{10}$ – $10^{20}$  Вт/см<sup>2</sup>, длительность лазерного импульса от десятков фемтосекунд до сотен наносекунд. При этом электронная температура плазмы  $T_e$  изменяется от 10 эВ до нескольких килоэлектронвольт, электронная плотность  $N_e$  – от плотности твердого тела  $\sim 10^{23}$  см<sup>-3</sup> и ниже и заряд ионов  $Z$  – вплоть до 30–50.

В последнее время достигнут значительный прогресс в технологии использования мягкого рентгеновского и ВУФ излучения (см., напр., обзор [2]). Он обусловлен успехами в разработке новых типов детекторов и элементов рентгеновской оптики (многослойных зеркал нормального падения, линз Френеля и др.), а также источни-

ков рентгеновского излучения высокой яркости (источников синхротронного излучения, лазерной плазмы, плазмы микропинчей и др.). Среди лабораторных источников основное внимание уделялось лазер-плазменным источникам рентгеновского излучения различных типов. Была успешно продемонстрирована эффективность их применения во многих приложениях. Наиболее впечатляющим достижением последнего времени стало создание промышленной установки для субмикронной ВУФ литографии с использованием лазерной плазмы в качестве источника излучения ( $\lambda = 135 \text{ Å}$ ) и оптической системы для этого диапазона длин волн с многослойными зеркалами нормального падения [3]. В то же время стало очевидным, что для целого ряда приложений требуются более эффективные компактные и дешевые источники рентгеновского излучения. В таких источниках (плазменный фокус [5, 6], Z-пинч-плазма [7–10] и плазма капиллярного разряда [11–27]) используется газоразрядная плазма различных типов [4].

Плазма капиллярного разряда как источник излучения обладает рядом преимуществ: компактностью, относительной простотой, высокой эффективностью и т. д. В последнее время она является объектом интенсивных исследований, ведущихся во многих странах мира: США, Японии, Германии, Франции, Италии, Израиле, Корее, России и др. Плазма капиллярного разряда успешно применялась как источник мягкого рентгеновского и ВУФ излучения [11–13, 20, 23, 24, 27], а также как активная среда для рентгеновских лазеров [14–17, 21, 26]. В работах [4, 18, 19, 22, 25] капиллярный разряд был использован в качестве эффективного источника излучения для ВУФ литографии.

До настоящего времени наиболее значительные результаты в этой области были получены группой Дж.Дж. Рокка из Университета Колорадо (США). Проведены исследования капиллярных разрядов различной энергии и разных конструкций, а также диагностика плазмы с временным и пространственным разрешением, изучены спектры многозарядных ионов в широком диапазоне длин волн (см. обзор [16]). В результате этих исследова-

\*Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mira@mail1.lebedev.ru

\*\* L.V.Knight, R.S.Turley. Brigham Young University, Provo 84602, Utah, USA; e-mail: turley@byu.edu

ний получено усиление излучения с длиной волны 469 Å на переходе в Ne-подобном ионе Ag IX [17] с рекордными параметрами [21]: энергия в импульсе 0.1–1 мДж, длительность импульса  $\sim 1$  нс, пиковая мощность 0.1–0.6 МВт, монохроматичность  $\lambda/\delta\lambda \sim 10^4$ . В настоящее время этот лазер является наиболее ярким источником излучения на данной длине волны [1]. Продемонстрировано применение такого лазера в рефлектометрии, интерферометрии плазмы, исследовании абляции вещества с поверхности твердого тела [1]. Его особенностью является сравнительно большая длина волны излучения – 469 Å. Однако этот лазер имеет значительные размеры (в нем используются высоковольтный ( $\sim 700$  кВ) генератор Маркса и метровая водяная линия), что сдерживает его широкое применение.

Для целого ряда применений представляется необходимой разработка компактных интенсивных источников излучения с использованием спонтанного излучения. Дело в том, что для наиболее интересных практических приложений необходимо излучение со сравнительно короткими длинами волн:  $\lambda = 135$  Å для проекционной ВУФ литографии и  $\lambda = 23 - 44$  Å для рентгеновской микроскопии в «водяном окне». Получение генерации в этих спектральных диапазонах связано с огромными трудностями (скорость накачки в условиях столкновительной схемы создания инверсной населенности пропорциональна  $\lambda^{-4}$  [28]), и маловероятно ожидать, что это произойдет в ближайшем будущем.

Использование спонтанного излучения плазмы капиллярного разряда без особого труда позволяет продвинуться в коротковолновый диапазон спектра вплоть до «водяного окна». Монохроматизация излучения источника может быть осуществлена с большой эффективностью с помощью многослойных зеркал нормального падения. В этом случае плазма капиллярного разряда может служить интенсивным монохроматическим источником спонтанного излучения для различных практических приложений: проекционной ВУФ литографии, микроскопии и др.

Целью наших исследований является разработка компактного эффективного источника спонтанного излучения, использующего газоразрядную плазму в керамическом капилляре. Этот источник мягкого рентгеновского и ВУФ излучения в широком спектральном диапазоне – от  $\sim 20$  Å («водяное окно») до нескольких сотен ангстрем – может найти многочисленные практические применения.

## 2. Эксперимент

В экспериментах применялся газонаполненный керамический капилляр диаметром 2 мм и длиной 10 мм. Капилляр заполнялся газом при помощи быстрого электромагнитного клапана. В качестве источника питания была использована электрическая схема, традиционно применяемая при накачке эксимерных лазеров и основанная на полном разряде накопительных конденсаторов на капиллярный промежуток [24, 27]. Все компоненты устройства (конденсаторы, коммутатор и капилляр) были собраны в коаксиальной геометрии. Диаметр источника не превышал 25 см, а его длина – 30 см. Для электрических измерений с временным разрешением  $\sim 1$  нс использовались малоиндуктивный токовый шунт и делитель напряжения.

Электрические параметры капиллярного разряда приведены ниже:

Емкость накопительных конденсаторов (нФ).....	30
Напряжение источника (кВ).....	30–40
Ток разряда (кА).....	25
Энергия, запасаемая в конденсаторах (Дж).....	16
Энергия, вкладываемая в разряд (Дж).....	6

Данная электрическая схема позволила получить в капиллярном разряде малые (десятки наносекунд) длительности импульсов тока и напряжения. Длительность фронта импульса тока не превышала 1.5 нс. Скорость нарастания тока в разряде  $dI/dt$  достигала  $10^{12} - 10^{13}$  А/с. Высокая скорость нарастания тока, играющая существенную роль в процессах сжатия и динамики нагрева плазмы, особенно важна для уменьшения скорости разрушения стенок капилляра и, следовательно, для увеличения срока службы источника.

Для спектральных измерений применялся спектрометр скользящего падения с постоянным углом отклонения  $\alpha = \varphi + \psi = 166^\circ$  [25], принципиальная схема которого приведена на рис.1. Сканирование по длинам волн осуществляется прецизионным поворотом сферической дифракционной решетки. Параметры спектрометра рассчитаны так, чтобы дефокусировка из-за выхода излучения за круг Роуланда была мала и не ухудшала спектрального разрешения. В спектрометре используются три дифракционные решетки: 1200, 600 и 300 штрих./мм (радиус 1 м, угол блеска  $2^\circ$ , вольфрамовое покрытие), позволяющие проводить спектральные измерения в диапазоне длин волн 44.3–425.2 Å. Спектрометр может применяться в качестве монохроматора, рефлектометра и спектрографа. В первом случае используется выходная щель. Ширины входной и выходной щелей устанавливаются через вакуумные вводы с точностью 0.5 мкм. Во втором случае монохроматор соединен со специальной камерой, позволяющей измерять коэффициенты отражения решеток и зеркал скользящего падения. В третьем случае в плоскости выходной щели устанавливается фотопленка. Точная фокусировка при этом осуществляется только для центральной длины волны  $\lambda_0$ . Однако из-за малой угловой апертуры спектрографа скользящего падения возможна регистрация спектра в достаточно широком спектральном диапазоне  $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ . Величина  $\Delta\lambda$  связана с наблюдаемым спектральным разрешением  $\lambda/\delta\lambda$ :

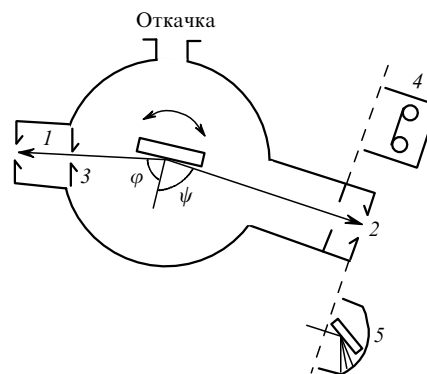


Рис.1. Схема спектрографа-монохроматора скользящего падения (GIMS) с постоянным углом отклонения: 1, 2 – входная и выходная щели; 3 – диафрагма; 4 – камера для регистрации спектров на фотопленку; 5 – камера для измерения коэффициентов отражения.

чем больше  $\Delta\lambda$ , тем меньше разрешение  $\lambda/\delta\lambda$ , вызванное дефокусировкой. На центральной длине волны  $\lambda_0$  спектральное разрешение  $\lambda/\delta\lambda = 330$  при ширине входной щели 15 мкм. Настройка спектрографа на различные длины волн  $\lambda_0$  осуществляется поворотом дифракционной решетки.

В спектрографе использовалась съемная кассета для фотопленки, позволяющая записывать несколько спектров без нарушения вакуумирования камеры. Спектры регистрировались на калиброванной фотопленке УФ-4 [29]. Для записи каждого спектра требовалось от 1 до 10 разрядов в плазме.

Спектрометр закреплялся на выходном фланце капиллярного источника ВУФ излучения. Расстояние между выходным окном капилляра и входной щелью спектрометра составляло 50 мм. Использовалась дифференциальная вакуумная откачка капиллярного источника и спектрометра. Давление в спектрометре поддерживалось в пределах 10 мТор, в то время как давление рабочего газа в капилляре составляло 100–800 мТор.

### 3. Результаты экспериментов

На рис.2–5 приведены примеры ВУФ спектров капиллярного разряда для различных рабочих газов. В качестве последних использовались  $\text{CO}_2$ , Ne, Ar, Kr, Xe при давлении 100–800 мТор. Идентификация спектральных линий проводилась на основе данных [30]. В газах легких элементов (O, Ne) возбуждались интенсивные *L*-спектры (переходы 2–3, 2–4) в Li- и Be-подобных ионах на длинах волн  $\lambda > 90 \text{ \AA}$  (рис.2). Наиболее коротковолновое излучение зарегистрировано в Ar-разряде на переходах  $2p-3s$ ,  $2p-3d$  в ионах Ar IX, Ar X (рис.3). Максимальная интенсивность  $2p-3s$ -перехода ( $\lambda = 49 \text{ \AA}$ ) имела место при давлении 400 мТор. Эти спектры использовались для оценки электронной температуры  $T_e$  в разряде: наблюдаемым стадиям ионизации ( $\text{Ar}^{8+}$ ,  $\text{Ar}^{9+}$ ) при корональном равновесии [31] соответствует  $T_e > 60 \text{ эВ}$ .

При увеличении атомного номера рабочего газа возбуждаются спектры следующих электронных оболочек с большим числом спектральных линий. Так, в Kr-разряде возбуждался интенсивный *M*-спектр (переходы 3–4 в ионах Kr VIII–Kr X) с большим числом спектральных линий на  $\lambda > 100 \text{ \AA}$  (рис.4). При возбуждении Xe-разряда

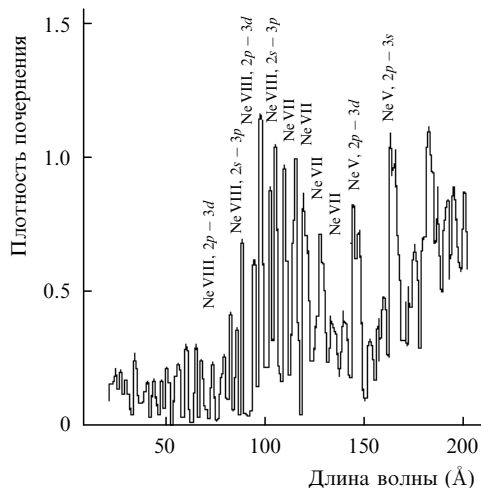


Рис.2. Спектр капиллярного Ne-разряда при давлении газа 400 мТор; центральная длина волны ВУФ спектрометра  $\lambda_0 = 90 \text{ \AA}$ .

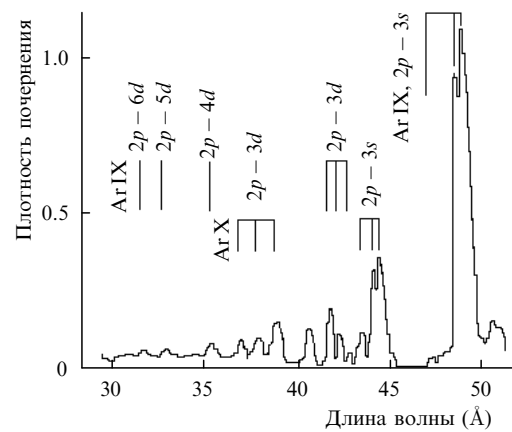


Рис.3. Спектр капиллярного Ar-разряда при давлении газа 250 мТор;  $\lambda_0 = 50 \text{ \AA}$ .

да спектральные линии, принадлежащие разным стадиям ионизации, сливались в отдельные полосы или даже представляли собой квазиконтинуум. Интегральный спектр капиллярного Xe-разряда при различных давлениях газа приведен на рис.5. При малых давлениях газа (100 мТор) наблюдались три полосы излучения в спектральном диапазоне 100–160 Å. Максимумы в спектральном распределении приходились на длины волн 110, 135 и 150 Å. Каждый максимум имел ширину полосы в пределах 10 Å. Эти максимумы могут быть идентифицированы как переходы в ионах  $\text{Xe}^{11+}$ ,  $\text{Xe}^{10+}$  и  $\text{Xe}^{9+}$ . Согласно столкновительно-излучательной модели, используемой для описания лазерной плазмы [32], наблюдаемые стадии ионизации Xe соответствуют  $T_e > 45 \text{ эВ}$ . В то же время корональная модель [31] дает  $T_e \sim 100 \text{ эВ}$ . Наиболее высокая электронная температура имела место при низких давлениях Xe (100–200 мТор). С увеличением давления газа в капилляре  $T_e$  в разряде уменьшалось, максимумы в спектре Xe исчезали и спектры излучения представляли собой квазиконтинуум.

Для проекционной ВУФ литографии особый интерес представляет излучение плазмы капиллярного Xe-разряда вблизи  $\lambda = 135 \text{ \AA}$ . При абсолютных измерениях интенсивности этой плазмы использовались ВУФ спектрометр с калиброванной дифракционной решеткой (см. ниже) и абсолютно калиброванная фотопленка [29] в качестве детектора излучения. Это позволило оценить абсолютный выход излучения плазмы капиллярного Xe-разряда

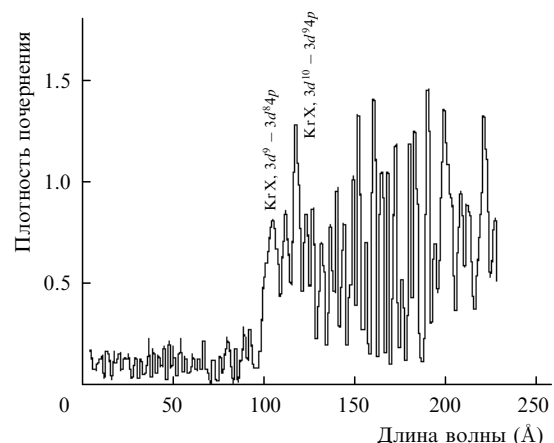


Рис.4. Спектр капиллярного Kr-разряда при давлении газа 300 мТор;  $\lambda_0 = 165 \text{ \AA}$ .

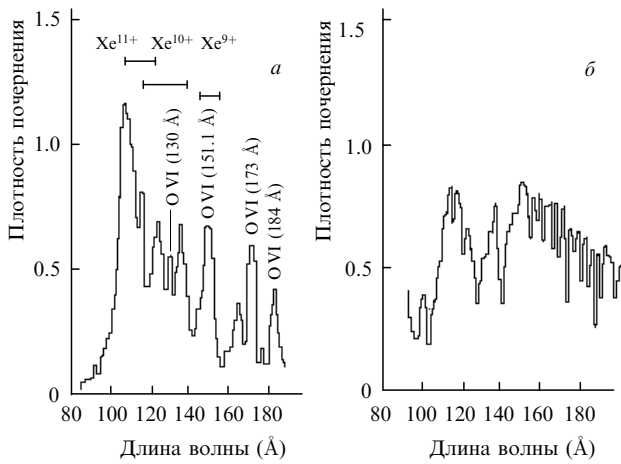


Рис.5. Спектры капиллярного Хе-разряда при давлениях газа 100 (а) и 500 мТор (б);  $\lambda_0 = 135 \text{ \AA}$ .

на  $\lambda = 135 \text{ \AA}$ . При давлении газа 400 мТор выход излучения  $W = 5 \text{ мДж} \cdot (2\pi \text{ ср})^{-1} \cdot \text{имп.}^{-1}$  в пределах ширины полосы отражения  $9 \text{ \AA}$  типичного Мо/Si-зеркала с пиком отражения на  $\lambda = 135 \text{ \AA}$ . Это значение  $W$  очень близко к полученному в работах [18, 19].

Излучение плазмы капиллярного Хе-разряда вблизи  $\lambda = 135 \text{ \AA}$  использовалось и для измерений отражающей способности решеток скользящего падения. Для того чтобы система работала в режиме рефлектометра, к монохроматору присоединялся модуль с тестируемой решеткой. Последняя могла быть установлена под необходимым углом скользящего падения (от  $1$  до  $8^\circ$ ). Падающее и дифрагировавшее излучение регистрировалось на фотопленку. При использовании различных рабочих газов можно калибровать решетки в широком спектральном диапазоне ( $\lambda = 40 - 450 \text{ \AA}$ ). Сначала была измерена отражательная способность решетки (600 штрих./мм, угол скользящего падения  $5^\circ$ ) на  $\lambda = 135 \text{ \AA}$ . Коэффициенты отражения составили 7%, 10%, 1% и 3–4% для нулевого, первого, второго и третьего порядков отражения соответственно. Эта калиброванная дифракционная решетка впоследствии применялась для абсолютных измерений выхода излучения капиллярного Хе-разряда.

#### 4. Заключение

Разработан интенсивный компактный источник ВУФ и мягкого рентгеновского излучения на основе плазмы капиллярного разряда. Высоковольтный блок питания и аксиальная геометрия элементов установки обеспечивали высокие скорости нарастания тока в газоразрядной плазме:  $dI/dt = 10^{12} - 10^{13} \text{ А/с}$ . Срок службы источника увеличен за счет применения газонаполненного керамического капилляра. Использование различных рабочих газов ( $\text{CO}_2$ , Ne, Ar, Kr, Xe) позволило создать интенсивный источник ВУФ и мягкого рентгеновского излучения в широком диапазоне спектра ( $\lambda = 30 - 600 \text{ \AA}$ ), где наблюдаются переходы в многозарядных ионах при температуре электронов  $T_e = 50 - 100 \text{ эВ}$ . Измерен абсолютный выход излучения капиллярного Хе-разряда на  $\lambda = 135 \text{ \AA}$ , представляющей наибольший интерес для проекционной ВУФ литографии. На этой длине волны источник излучения применялся для рефлектометрии (полу-

чены предварительные результаты по измерению коэффициента отражения решеток скользящего падения).

В дальнейшем планируется разработка на основе капиллярного разряда усовершенствованного компактного источника ВУФ излучения, работающего в частотном ( $\sim 10 \text{ Гц}$ ) режиме. Это позволит проводить ВУФ рефлектометрию оптических элементов в широком диапазоне спектра.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.С. Касьянову и А.А.Малютину (ИОФ РАН) за помощь в работе.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 00-02-16632).

1. Виноградов А.В., Рокка Дж.Дж. *Квантовая электроника*, **33**, 7 (2003).
2. Ceglie N.M. *J. X-Ray Sci. Technol.*, **1**, 7 (1989).
3. Kubiak G., Bemardez L.J., Krenz K., Replogle W.C., Sweatt W.C., Sweeney D.W., Hudyma R.M., Shields H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3767**, 136 (1999).
4. Schriever G., Rahe M., Neff W., Bergmann K., Lebert R., Lauth H., Basting D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3997**, 162 (2000).
5. Partlo W., Fomenkov I., Oliver R., Bix D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3997**, 136 (2000).
6. Nikulin V.Ya., Romanova V.M., Scholz M. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4460**, 55 (2002).
7. McGeoch M. *Appl. Opt.*, **37**, 1651 (1998).
8. Bergmann K., Schriever G., Rosier O., Müller M., Neff W., Lebert R. *Appl. Opt.*, **38**, 5413 (1999).
9. Bergmann K., Rosier O., Müller M., Neff W., Lebert R. *Appl. Opt.*, **39**, 3833 (2000).
10. Semyonov O.G., Gurey A.E., Tikhomirov A.A. *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, 482 (2001).
11. Bogen P., Conrads H., Gatti G., Kohlhaas W. *J. Opt. Soc. Am.*, **58**, 203 (1968).
12. McCorkle R.A. *Appl. Phys. A*, **26**, 261 (1981).
13. Захаров С.М., Коломенский А.А., Пикуз С.А., Самохин А.И. *Письма в ЖТФ*, **6**, 135 (1980).
14. Steden C., Kunze H.-J. *Phys. Lett. A*, **151**, 534 (1990).
15. Shin H.J., Kim D.E., Lee T.N. *Phys. Rev.*, **50**, 1376 (1994).
16. Rocca J.J. *Rev. Sci. Instrum.*, **70**, 3799 (1999).
17. Rocca J.J., Shiyaptev V., Tomasel F.G., Cortazar O.D., Hartshorn D., Chilla J.L.A. *Phys. Rev. Lett.*, **73**, 2192 (1994).
18. Krosner M.A., Bender H.A., Silfvast W.T., Rocca J.J. *Opt. Lett.*, **22**, 34 (1997).
19. Klosner M.A., Silfvast W.T. *Opt. Lett.*, **23**, 1609 (1998).
20. Antsifirov P.S., Dorokhin L.A., Khautiev E.Yu., Sidelnikov Yu.V., Glushkov D.A., Lugovenko I.V., Koshelev K.N. *J. Phys. D*, **31**, 2013 (1998).
21. Macchietto C.D., Benware B.R., Rocca J.J. *Opt. Lett.*, **24**, 1115 (1999).
22. Silfvast W.T., Klosner M., Shimkaveg G., Bender H., Kubiak G., Fomaciari N.R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3676**, 272 (1999).
23. Knight L., Turley S., Crawford C., Hullinger D., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3767**, 45 (1999).
24. Shevelko A.P., Knight L.V., Yakushev O.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4144**, 68 (2000).
25. Shevelko A.P., Knight L.V., Turley R.S., Yakushev O.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4504**, 143 (2001).
26. Ellwi S.S., Juschkin L., Ferri S., Kunze H.-J., Koshelev K.N., Louis E. *J. Phys. D*, **34**, 336 (2001).
27. Шевелько А.П., Якушев О.Ф. *Поверхность*, **4**, 66 (2001).
28. Виноградов А.В., Собельман И.И. *ЖЭТФ*, **63**, 2113 (1972).
29. Шевелько А.П. *Квантовая электроника*, **23**, 748 (1996).
30. Kelly R.L. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **16**, Suppl.1, 105 (1987).
31. Amaud M., Rothenflug R. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **60**, 425 (1985).
32. Blackbum J., Carroll P.K., Costello J., O'Sullivan G. *J. Opt. Soc. Am.*, **73**, 1325 (1983).