

УДК 533.9...15

**Параметры радиационных процессов в плазме  
микроволнового резонансного разряда***В. В. Андреев, И. А. Волдинер, М. А. Корнеева*

*В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения спектральных и фотометрических характеристик излучения в оптическом диапазоне импульсно-периодического микроволнового ЭЦР-разряда (2,45 ГГц, мощность до 200 Вт, давление плазмообразующего газа Ar от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-1}$  Торр). В этих условиях в рабочем объеме создается плотная ( $n_e = 1 \cdot 10^{10} \div 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) низкотемпературная ( $T_e = 3 \div 5 \text{ эВ}$ ) плазма с высокой степенью ионизации ( $1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5}$ ). Показано, что регистрируемое повышение концентрации электронов вблизи верхней границы указанного диапазона давлений при неизменном уровне подводимой мощности приводит к радикальному изменению типа и спектрального состава излучения, а также к пороговому характеру увеличения светового потока. Анализ зондовых и оптических измерений позволил выделить диапазон изменения рабочих условий, определяющих характер и параметры изучаемых радиационных процессов.*

PACS: 52.50.-Sw

*Ключевые слова:* ЭЦР-разряд, спектроскопия, фотометрия, видимый диапазон, зондовые измерения.

**Введение**

Физические процессы, развивающиеся при резонансных взаимодействиях магнитоактивной плазмы с электромагнитными полями в области СВЧ-диапазона, чрезвычайно многообразны и весьма чувствительны к изменению рабочих условий. Микроволновые резонансные разряды широко используются в различных вакуумно-плазменных технологиях [1]. Если частота СВЧ-поля и циклотронная частота близки, то в этом случае речь идет о разряде в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). Резонансное создание плазмы, удерживаемой внешним магнитным полем пробочной конфигурации, устраняет необходимость в применении сильных электрических полей и оказывает существенное влияние на уровень энергетических затрат, требуемых для

достижения высокой степени ионизации. Кроме того, разряды такого типа обладают возможностью легкого управления плазменными параметрами. Изучение радиационных процессов и возможностей регулирования спектрального состава и интенсивности излучения, сопровождающего такое взаимодействие, представляет практический интерес для прикладных исследований в области радиационных плазменных технологий.

Целью данных исследований является изучение поведения спектральных и фотометрических характеристик излучения, генерируемого в аргоновой плазме, которая создается в условиях, близких к электронному циклотронному резонансу, причем в области давлений, примыкающих к верхней границе рабочего диапазона.

**Экспериментальная установка**

Пробой газа осуществлялся при подаче СВЧ-мощности, когда магнитная поверхность ЭЦР находилась в пределах рабочей области резонатора. Разряд генерировался в кварцевой колбе, расположенной в цилиндрическом  $TE_{111}$ -резонаторе с рабочей частотой 2,45 ГГц, помещенном в магнитное поле пробочной конфигурации. Магнитное поле создавалось постоянными магнитами  $SmCo_5$  с системой магнитного замыкания, причем с предусмотренной возможностью изменения ин-

---

Андреев Виктор Викторович, доцент.  
Волдинер Игорь Алексеевич, студент.  
Корнеева Мария Анатольевна, ассистент.  
Российский университет дружбы народов (РУДН).  
Россия, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.  
Тел. 8 (903) 733-92-75.  
E-mail: vvandreev@mail.ru; reewo@rambler.ru;  
korneevama@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.

© Андреев В. В., Волдинер И. А., Корнеева М. А., 2016

дукции магнитного поля в минимуме ловушки и его градиента с помощью микрометрического перемещения полюсных магнитов. Резонатор возбуждался посредством дифракционной связи с волноводным трактом, оснащенным системами измерения падающей и отраженной мощности. Импульсный режим стандартного магнетронного генератора СВМ-150-1 с длительностью импульса 4 мс и паузой 6 мс обеспечивался сторонним модулятором. Остаточное давление в колбе было не хуже  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр, а натекатель СНА-2 обеспечивал поддержание рабочего давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-1}$  Торр. Разрядная камера была снабжена вакуумно-плотным портом с увиолевым окном, используемым для наблюдения и измерений оптического излучения плазмы разряда, а также портами для вакуумных и зондовых измерений.

Для проведения спектрометрических исследований применялся монохроматор-спектрограф MS3504i с компенсацией астигматизма. Спектр регистрировался в режиме монохроматора. Спектрометрический тракт с сохранением всех параметров системы регистрации был откалиброван по длине волны с помощью ртутной лампы ДРС 50-1, а по абсолютной интенсивности с помощью лампы СИРШ 6-40 (аттестована во ВНИИОФИ).

Освещенность регистрировалась при помощи аттестованного люксметра ТКА-ПКМ С051, предназначенного для измерений в видимой области спектра (380—760 нм) с диапазоном от 10 до 200000 лк (погрешность  $\pm 8,0$  %). Измерения проводились на расстоянии 4 см от разрядной колбы.

Параллельно с проведением спектральных исследований определялись температура и концентрация электронов методом двойного зонда, позволяющим проводить измерения и при наличии магнитного поля, что актуально в проводимых экспериментах. Зонд был изготовлен из молибденовой проволоки диаметром 0,4 мм, длина открытой поверхности — 3,5 мм, расстояние между зондами — 1,6 мм, глубина погружения в резонатор 1,5 см (измерения проводятся на периферии разряда для уменьшения влияния на распределения электрического и магнитного полей). Система сбора данных была полностью автоматизирована и синхронизована с импульсным режимом магнетрона.

### Экспериментальные результаты

Определение рабочих режимов разряда, обеспечивающих эффективное преобразование энергии электромагнитных волн в энергию излучения, требовало обеспечить условия по созданию плазмы высокой степени ионизации и эффективного ее удержания в пределах рабочего объема. Известно, что для плазмы, удерживаемой в маг-

нитной ловушке пробочного типа, время рассеяния в конус потерь различно для электронов и ионов. В случае ЭЦР-плазмы, когда  $T_e \gg T_i \gg T_n$ , отношение характерных времен столкновений  $\tau_{ei} / \tau_{ii} > 1$ . Таким образом, ионы быстрее покидают объем ловушки, и время удержания определяется электронным временем рассеяния. Влияние возникающего вследствие ухода ионов из ловушки амбиполярного потенциала на темп потерь электронов пренебрежимо мало ввиду малых значений  $T_i$ . Диффузия в координатном пространстве накладывает также ряд ограничений на удержание такой плазмы. Временной шаг остается прежним — время наиболее быстрого рассеяния, а пространственным шагом является ларморовский радиус частиц. Следовательно, в типичных экспериментальных условиях скорость диффузии ионов выше. Таким образом, столкновительный режим, при котором время жизни плазмы определяется поперечной диффузией, а не рассеянием в конусы потерь, представляет наибольший интерес с точки зрения проводимых экспериментов. Улучшение удержания в условиях ЭЦР определяется резонансным взаимодействием, которое противодействует диффузии электронов в пространстве импульсов.

В условиях проводимых экспериментов при изменении давления плазмообразующего газа в исследуемом диапазоне дважды происходят радикальные изменения параметров разряда, сопровождающиеся изменением светового потока, концентрации электронов, типа спектра (появление континуума) и поглощаемой мощности. Плавное увеличение интенсивности свечения разряда по мере равномерного увеличения давления в области низких давлений сменяется пороговым усилением светового потока и изменением наблюдаемого оттенка и яркости излучения вблизи верхней границы рабочего диапазона давлений.

На рис. 1 представлены фотографии разряда в трех наиболее характерных режимах генерации. С целью облегчения дальнейшего изложения данные режимы пронумерованы. Характерные изменения светового потока (рис. 2) происходят при давлении  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  Торр (переход из первого режима во второй, сопровождается увеличением освещенности в  $\sim 3$  раза) и давлении  $\sim 1 \cdot 10^{-2}$  Торр (переход из второго режима в третий, характеризуется усилением освещенности в  $\sim 15$ — $20$  раз). Зондовые измерения показали, что изменение концентрации электронов происходит аналогичным образом (рис. 2). В пределах одного режима с ростом давления увеличение концентрации составляет не более 10—20 %, а при переходе из одного режима в другой возрастает в 2—3 раза. В данных режимах концентрация электронов составляет соответственно:  $\sim 1 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup>,  $\sim 6 \cdot 10^{10}$  см<sup>-3</sup> и  $\sim 4 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Видно,

что вблизи верхней границы диапазона рабочих давлений концентрация превышает критическую ( $\sim 7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ) для используемой частоты СВЧ-нагрева. При этом, как было показано в [2], в нижнем диапазоне исследуемых давлений (первый и второй режим) температура электронов равна  $\sim 5 \text{ эВ}$ , а при переходе в 3-й режим, соответствующий верхней границе рабочего диапазона, происходит снижение температуры до  $3 \text{ эВ}$ .

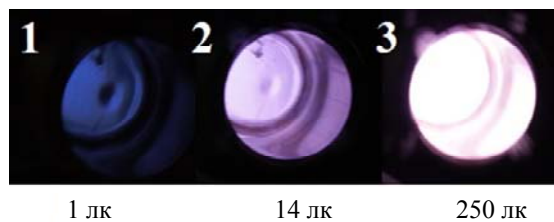


Рис. 1. Фотографии свечения (освещенности поверхности  $E$ ) разряда в различных режимах: режим 1 — давление  $2 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ ; 2 — давление  $6 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ ; 3 — давление  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$ .

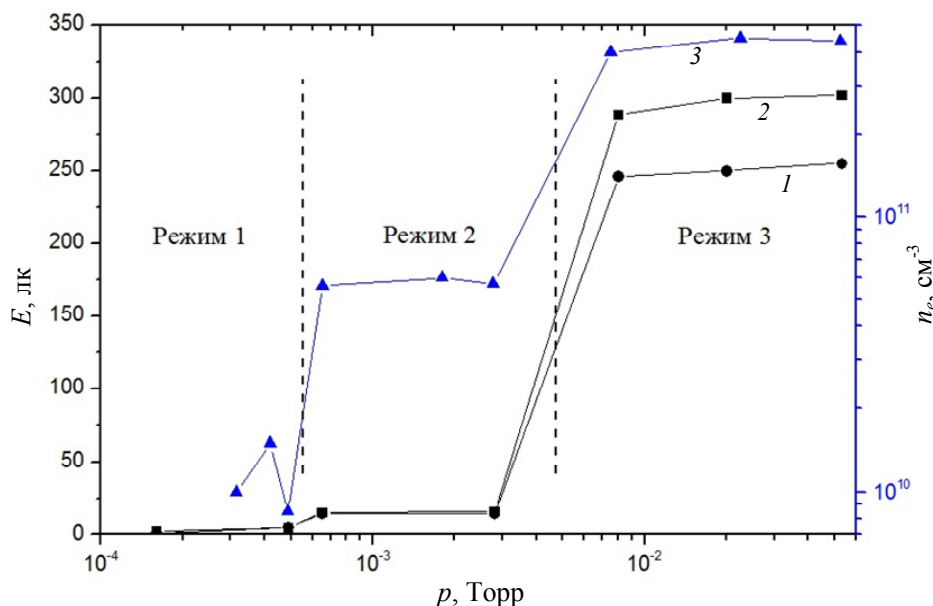


Рис. 2. Зависимость регистрируемой освещенности  $E$  и концентрации электронов  $n_e$  от давления плазмообразующего газа  $p$ . Кривая 1 — освещенность (при  $B_0 = 875 \text{ Гс}$ ), кривая 2 — освещенность ( $B_0 = 925 \text{ Гс}$ ), кривая 3 — концентрация электронов ( $B_0 = 875 \text{ Гс}$ ).

Перестройка по магнитному полю в узком диапазоне изменений величины индукции магнитного поля в минимуме ловушки  $850 \text{ Гс} \leq B_0 \leq 925 \text{ Гс}$  показала, что увеличение магнитного поля способствует облегчению пробоя, а переход от одного режима излучения к другому начинает происходить при более низких значениях давления. Аналогичное влияние оказывает и увеличение падающей мощности. При пограничных значениях давления, характеризующих переход между режимами, увеличение мощности приводит к смене режима генерации. Изменение же падающей мощности при фиксированном давлении (не являющемся пограничным для смены режима) приводит лишь к увеличению светового потока с сохранением температуры и концентрации электронов, степени ионизации и типа спектра. При смене второго и третьего режимов также наблюдается изменение уровня поглощаемой разрядом мощности: в первом и втором режимах поглощаемая мощность находится на уровне  $\sim 60\text{—}70\%$ , а в третьем режиме ее величина резко возрастает до  $\sim 90\text{—}95\%$ .

Полученные зависимости изменения плазменных параметров при варьировании магнитного поля  $B_0$  в минимуме ловушки совпадают с характеристиками разрядов, полученными другими авторами [3] в области нижней границы давлений. В ряде работ отмечается, что плотность может достигать значений, превышающих критическое в диапазоне магнитных полей  $B_0 > B_{ECR}$  [4, 5]. Отмечается также, что в этих условиях происходит как бы вторичное зажигание с одночастичным ЭЦР-взаимодействием (ECR «gas lighter»).

Распределение атомов по возбужденным состояниям, рассчитанное на основе спектральных измерений, показывает сильную неравновесность исследуемой плазмы. Как известно [6], в такой плазме основную роль в формировании ее состава играют столкновения атомов с электронами. Измеренные величины  $n_e$ ,  $n_a$  и  $T_e$  позволили определить, что плазма исследуемого разряда обладает высокой степенью ионизации от  $6 \cdot 10^{-5}$  при  $5 \cdot 10^{-2} \text{ Торр}$  до  $7 \cdot 10^{-4}$  при  $4 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ . В предположении максвелловской функции распределения для электро-

нов, полученные результаты свидетельствуют о превышении граничной степени ионизации в диапазонах изменения измеренных плазменных параметров [6]:

$$\frac{N_e}{N_a} = \frac{3}{8\pi} \frac{m_e}{M} \frac{T\varepsilon}{e^4 \ln \Lambda} \sigma^*(v) = 2 \div 6 \cdot 10^{-10},$$

где  $m_e$  — масса электрона,  $M$  — масса атома,  $T$  — температура газа,  $\varepsilon$  — энергия электронов,  $e$  — заряд электрона,  $v$  — скорость электронов,  $\sigma^*(v)$  — диффузионное сечение рассеяния электрона на атоме,  $\ln \Lambda$  — кулоновский логарифм. Межэлектронные столкновения, частота  $\nu_{ee}$  которых в типичных экспериментальных условиях составляет  $3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$  в области верхней границы и  $1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  для нижней границы рабочего диапазона давлений, оказывают максвеллизирующее действие на реальную функцию распределения электронов. В этих же условиях частоты электрон-атомных столкновений  $\nu_{en}$  соответствуют диапазону от  $8 \cdot 10^7$  до  $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ . При больших значениях величины отношения  $\nu_{ee}/\delta\nu_{en}$ , где  $\delta$  — средняя доля энергии, теряемой при одном соударении с атомом, межэлектронные столкновения играют существенную роль. Выполненные оценки, с учетом [7], показали, что для всех исследованных режи-

мов величина этого отношения  $>1000$ . Данный факт свидетельствует, что функции распределения для электронов близка к максвелловской и приведенные выше оценки являются справедливыми.

Проведение спектроскопических исследований позволило выделить спектральные отличия выявленных режимов. Измерения проводились при четырех характерных давлениях:  $4 \cdot 10^{-4}$  Торр (низкое давление, первый режим),  $6 \cdot 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-3}$  Торр (среднее давление, второй режим),  $5 \cdot 10^{-2}$  Торр (высокое давление, третий режим). При низком давлении в области 400—500 нм интенсивность линий атомарного аргона меньше интенсивности линий ионов первой зарядности, многие линии атомарного аргона в этой области отсутствуют. На рис. 3 в выделенных фрагментах представлены детализированные распределения интенсивности в узких спектральных диапазонах. Видно, что при давлении  $4 \cdot 10^{-4}$  Торр присутствует только одна линия атомарного аргона 451,1 нм, при этом остальные линии принадлежат ионам первой зарядности. В других режимах в данной области наблюдается три линии атомарного аргона. Интенсивность линий группы 2p в красном диапазоне длин волн в первом режиме невелика (рис. 3). Поэтому из-за такого распределения интенсивности в спектре, весь разряд имеет преимущественный сине-сиреневый оттенок.

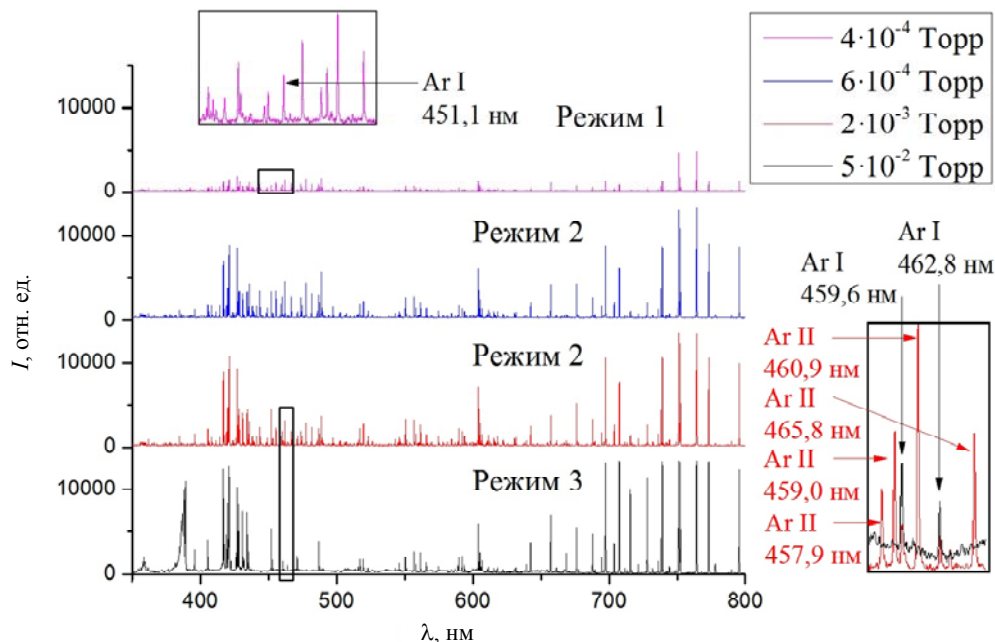


Рис. 3. Спектры аргона при различных режимах ( $I$  — интенсивность,  $\lambda$  — длина волны).

При переходе от первого режима ко второму происходит перераспределение энергии в спектре. Во втором режиме интенсивность линий ионов сохраняется, но возрастают интенсивности линий атомарного аргона, особенно линий группы 2p

(в 3—7 раз для большинства линий). Цвет разряда меняет оттенок. С ростом давления во втором режиме происходит снижение интенсивности линий ионов при возрастании яркости атомарной компоненты с сохранением освещенности.

При больших давлениях (третий режим) в спектре разряда наблюдается явно выраженный континуум и полностью исчезают линии ионной компоненты, что наглядно показано на рис. 3 в увеличенном фрагменте спектров для давлений  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $5 \cdot 10^{-2}$  Торр.

### Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования поведения спектральных и фотометрических характеристик излучения в оптическом диапазоне импульсно-периодического микроволнового ЭЦР-разряда (2,45 ГГц, мощность до 200 Вт, давление плазмообразующего газа Ar от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1 \cdot 10^{-1}$  Торр).

Показано, что в условиях проводимых экспериментов создается неравновесная плазма с низкой электронной температурой и высокой степенью ионизации, параметрами которой можно управлять. Вариация давления в широком диапазоне значений способствует изменению режима генерации разряда. Выявлены фотометрические и спектрометрические отличия между характерными режимами генерации. Отмечено превышение критической концентрации электронов, высокий уровень поглощения СВЧ-мощности, усиление освещенности и наличие континуума в верхнем

диапазоне рабочих давлений. Несмотря на низкую степень ионизации по сравнению с другими исследованными режимами, разряд, генерируемый в этом случае, является наиболее эффективным для преобразования энергии СВЧ-волны (до 90 % поглощения) в излучение видимого диапазона, что представляет интерес для прикладных исследований в области радиационных плазменных технологий.

*Работа частично поддержана грантом РФФИ № 16-02-00640\16.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lieberman M. A. Principles of plasma discharges and materials processing. — New York: Wiley, 1994.
2. Андреев В. В., Корнеева М. А., Василеска И. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 69.
3. Kiriya R., Takenaka T., Kurisu Y., Nozaki D., Sato F., Kato Y., Lida T. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A324.
4. Sakudo N. Rev. Sci. Instrum., 1977. Vol. 71. No. 2. P. 762.
5. Gammino S., Celola L., Giavola G., Maimone F., Mascali D. Rev. Sci. Instrum., 2010. Vol. 81. P. 02B313.
6. Смирнов Б. М. // Успехи физических наук. 2009. Т. 179. № 6. С. 591.
7. Gibson J. C., Gulley R. J., Sullivan J. P., Buckman S. J., Chan V. and Burrow P. D. // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1996. Т. 29. P. 3177.

## Investigation of radiance processes in pulse-periodic resonant microwave plasma

*V. V. Andreev, I. A. Voldiner, and M. A. Korneeva*

People' Friendship University of Russia  
6 Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russia  
E-mail: vvandreev@mail.ru

*Received March 14, 2016*

*This work provides results of experimental investigation of spectral and photometric characteristics of visible range radiance produced by resonant pulse-periodic microwave ECR discharge (2.45 GHz, average power up to 200 W, Argon pressure ranging from  $1 \cdot 10^{-1}$  to  $1 \cdot 10^{-4}$  Torr) The discharge working parameters lead to generation of dense ( $n_e = 1 \cdot 10^{10} \div 4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ), low temperature ( $T_e = 3 \div 5 \text{ eV}$ ) plasma with ionization rate within  $1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-5}$  range. It is shown that the growth of electron concentration at the upper limit of the pressure range with the constant level of provided power leads to a registered measurable change in type and spectral composition of the radiance, and, furthermore, radical (over 15—20 times) increase in light flux. Simultaneous analysis of probe and optical measurements allowed to obtain the variation range of working parameters that define the nature and parameters of studied radiational processes.*

PACS: 52.50.-Sw

*Keywords:* ECR discharge, spectroscopy, photometry, visible range, Langmuir probe measurements.

**REFERENCES**

1. M. A. Lieberman *Principles of plasma discharges and materials processing* (Wiley, New York, 1994).
2. V. V. Andreev, I. Vasileska, and M. A. Korneeva, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 69 (2015).
3. R. Kiriyama, T. Takenaka, Y. Kurisu, D. Nozaki, F. Sato, Y. Kato, and T. Lida, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02A324 (2012).
4. N. Sakudo, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 762 (1977).
5. S. Gammino, L. Celola, G. Giavola, F. Maimone, and D. Mascali, *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02B313 (2010).
6. B. M. Smirnov, *Physics-Uspexhi* **52** (6) 559 (2009).
7. J. C. Gibson, R. J. Gulley, J. P. Sullivan, S. J. Buckman, V. Chan and P. D. Burrow, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **29**, 3177 (1996).