

# Миниатюрная УФ лампа, возбуждаемая субнаносекундными импульсами напряжения

М.В.Ерофеев, Е.Х.Бакшт, В.Ф.Тарасенко, Ю.В.Шутько

*В азоте, смеси Ar–N<sub>2</sub> и воздухе исследовались энергетические, временные и спектральные характеристики излучения второй положительной системы азота. Для возбуждения газов использовался генератор FPG-10 с длительностью импульса напряжения на полувывоте 200 и 400 пс и амплитудой на согласованной нагрузке 14 и 6 кВ соответственно. Показано, что данный генератор позволяет реализовать два режима возбуждения. В первом режиме диффузный разряд формируется при атмосферном давлении, что дает возможность создавать миниатюрные лампы с наносекундной длительностью импульса в УФ области спектра. Формирование диффузного разряда достигается за счет генерации убегающих электронов при использовании электродов с малым радиусом кривизны и длительностью фронта импульса напряжения. Во втором режиме при возбуждении барьерным разрядом достигнуто увеличение средней мощности излучения. Однако рабочее давление в этом режиме уменьшалось, а размеры излучающей области и длительность импульса УФ излучения существенно увеличивались.*

**Ключевые слова:** возбуждение объемным разрядом без источника дополнительной предьонизации, излучение второй положительной системы азота, наносекундные импульсы УФ излучения.

## 1. Введение

В настоящее время большое внимание уделяется созданию источников спонтанного излучения УФ и ВУФ диапазонов, в том числе эксиламп (см. обзоры [1–6] и ссылки в них). Это обусловлено их широким применением в различных областях науки и техники и успехами в создании источников спонтанного излучения различных типов [6, 7]. Однако для ряда практических приложений требуются источники спонтанного излучения с новыми свойствами, в частности миниатюрные источники с размерами излучающей области  $(1–3) \times 1 \times 1$  мм и сравнительно большой (свыше 1 Вт) импульсной мощностью излучения. Кроме того, проявляется интерес к созданию источников спонтанного излучения с длительностью импульса несколько наносекунд, работающих как в режиме однократных импульсов, так и в импульсно-периодическом режиме. До настоящего времени миниатюрные источники создавались только на основе коротких искровых разрядов. Излучение таких источников было широкополосным, а длительность импульсов составляла сотни наносекунд и более [7].

Для создания газоразрядных источников с длительностью импульса несколько наносекунд и шириной полосы излучения единицы нанометров можно использовать объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) (см. работы [8, 9] и ссылки в них). Диффузный характер такого разряда достигался за счет предьонизации промежутка убегающими электронами,

которые генерировались возле электродов с малыми радиусами кривизны и в промежутке [10]. Для реализации ОРИПЭЛ необходимо подавать на газоразрядный промежуток импульсы напряжения с амплитудой  $\sim 100$  кВ и более и коротким фронтом.

В работе [11] исследовались свойства оптического излучения при ОРИПЭЛ в галогенидах инертных газов. Для возбуждения разряда использовались наносекундные импульсы напряжения с амплитудой до 150 кВ от генератора РАДАН-150 [12]. Было показано, что максимальные пиковые плотности мощности УФ излучения достигаются при разрядном промежутке 12 мм, отношении инертного газа к галогену 50:1, давлении  $\sim 1$  атм и составляют  $\sim 5$  кВт/см<sup>2</sup> при эффективности 5%. Длительности импульсов УФ излучения при этом лежали в диапазоне 30–40 нс и соответствовали длительности импульса тока разряда. Излучающий объем при возбуждении ОРИПЭЛ в [11] и других работах превышал 1 см<sup>3</sup>. В [13, 14] при возбуждении барьерного разряда тем же генератором длительности импульсов УФ излучения в ХеСl-, КrСl-, ХеВr- и КrВr-эксилампах сократились до  $\sim 4$  нс за счет сокращения длительности импульса тока. Плотность мощности излучения при этом уменьшилась до 700 Вт/см<sup>2</sup>, а объем разрядной области увеличился. Создание миниатюрных источников требует существенного уменьшения объема излучающей области и напряжения генератора. Однако и в этих условиях необходимо достаточно высокое (порядка атмосферного) давление рабочего газа, а разряд должен быть диффузным.

Целью настоящей работы является исследование возможности создания источника УФ излучения с малыми размерами излучающей области, наносекундной длительностью импульса излучения и малой ( $\sim 10$  кВ) амплитудой импульсов напряжения генератора.

М.В.Ерофеев, Е.Х.Бакшт, В.Ф.Тарасенко, Ю.В.Шутько. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила редакция 8 апреля 2010 г.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

В настоящей работе для возбуждения использовался как барьерный разряд, так и ОРИПЭЛ. Возбуждение барьерным разрядом осуществлялось на лампе с одним барьером, состоящей из цилиндрической колбы (диаметр 18 мм, изготовлена из кварца высокого качества), которая заполнялась азотом, воздухом, ксеноном или смесью азота и аргона. Импульсы напряжения прикладывались к вольфрамовому электроду, изготовленному из проволоки диаметром 1 мм и расположенному внутри колбы, и к медной фольге шириной 1 см, которая находилась на внешней стороне колбы. Вольфрамовый электрод был сдвинут относительно центральной оси лампы, разрядный промежуток составлял 3 мм. Излучение выводилось через кварцевое окно, перпендикулярное оси разряда. Расстояние от области горения разряда до торца лампы было 15 мм. При возбуждении ОРИПЭЛ использовались два острых электрода, расстояние между которыми составляло 1–3 мм; основные эксперименты проводились в атмосферном воздухе. При этом обеспечивалась минимальная индуктивность подключения кабеля, соединенного с генератором, к электродам.

Возбуждение проводилось двумя типами генераторов. Высоковольтный однополярный генератор FPG-10 (FID GmbH) работал при максимальной частоте следования импульсов  $f = 1$  кГц и формировал на согласованной нагрузке импульсы напряжения с длительностью на полувывоте  $\tau \sim 200$  и  $\sim 400$  пс и амплитудой  $U = 14$  и 6 кВ соответственно. С электродами разрядного промежутка генератор соединялся коаксиальным кабелем длиной  $\sim 1$  м. На рис.1 показаны осциллограммы импульсов

напряжения на согласованной нагрузке, соответствующие двум режимам работы генератора FPG-10. Другой генератор формировал импульсы напряжения с длительностью на полувывоте  $\tau \sim 1$  мкс и амплитудой  $U = 6$  кВ; ранее он использовался нами для возбуждения одно- и двухбарьерных эксилламп [5]. В настоящих экспериментах этот генератор работал с частотой следования импульсов  $f = 1$  кГц.

Плотность мощности излучения измерялась на торце лампы калиброванным фотоприемником Hamamatsu, включающем в себя фотоприемную головку H8025-222 и измерительный блок C8026. Временной ход импульсов излучения регистрировался вакуумным фотодиодом ФЭК 22 СПУ и скоростным фотодиодом Photek PD025 Low Noise S20 на осциллографах Tektronix DPO 70604 (полоса 6 ГГц) и Tektronix TDS 224 (100 МГц). Спектры излучения разряда в области 200–600 нм регистрировались спектрометром StellarNet EPP2000-C25.

Были проведены исследования длительности импульса излучения, величины излучающей области, импульсной и средней мощности излучения в зависимости от параметров импульса напряжения, геометрии разрядного промежутка, а также состава и свойств газа.

## 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Предварительные исследования проводились на возбуждаемой барьерным разрядом лампе, которая подсоединялась к вакуумному пульту. Известно, что в случае двухбарьерных ламп необходимы при прочих равных условиях более высокие напряжения генератора, чем у однобарьерных эксилламп. Так как в данной работе ставилась задача уменьшить напряжение генератора и увели-

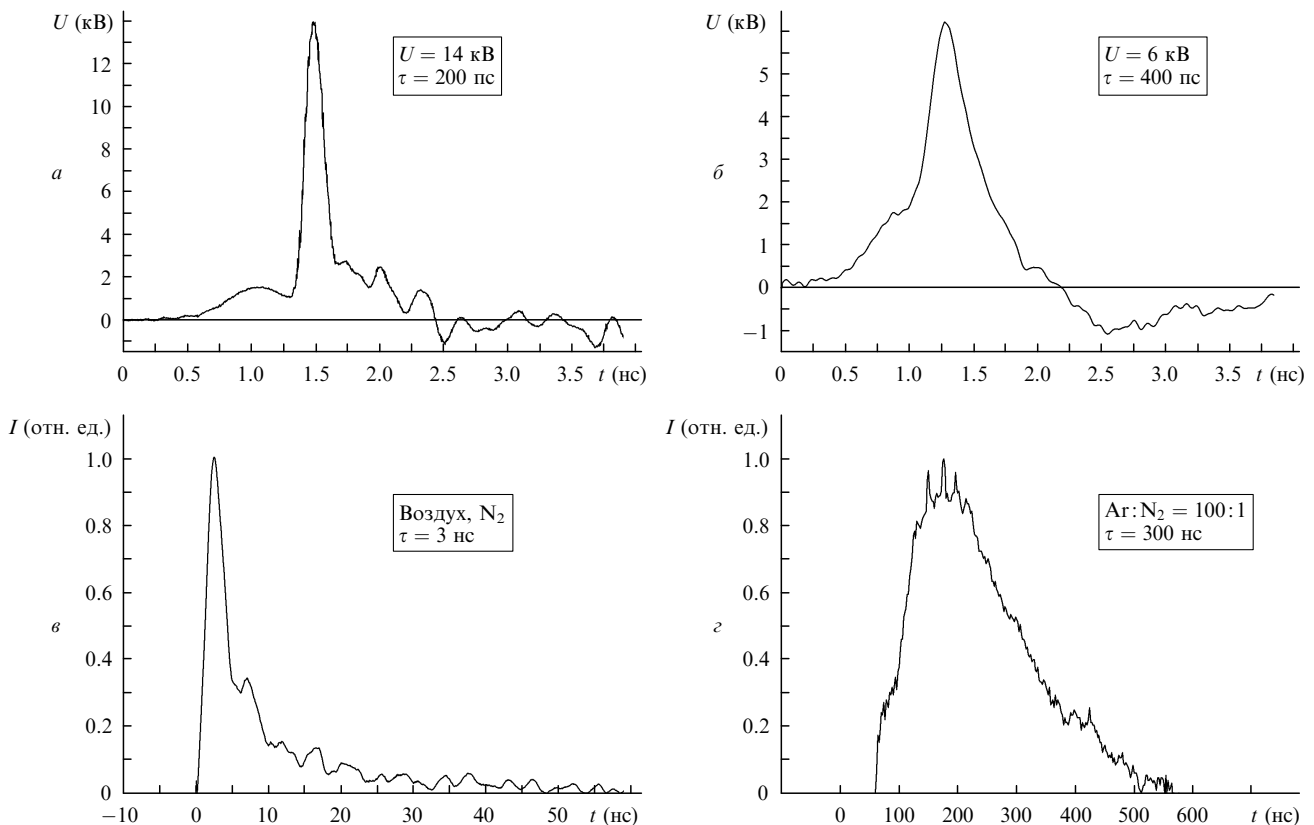


Рис.1. Осциллограммы импульсов напряжения генератора FPG-10 с амплитудой 14 (а) и 6 кВ (б), а также импульсов излучения разряда в воздухе атмосферного давления (в) и в смеси Ar: $N_2 = 100:1$  при давлении  $p = 180$  Тор (г).

чить рабочее давление, эксперименты проводились на однопольной лампе с вольфрамовым острым катодом. Поскольку наличие внутри лампы металлического электрода ограничивает использование рабочих смесей, в состав которых входят галогены, применялись азот, его смеси с аргоном, а также воздух и ксенон.

На рис.2 приведены зависимости от давления газа плотности мощности излучения разряда в азоте и в смесях смеси  $Ar-N_2$  разного состава при амплитудах импульсов напряжения генератора FPG-10 14 и 6 кВ. Как и в [15], наибольшие плотности мощности были получены в смесях азота с аргоном. В этих смесях энергия электронов передается на нижние уровни аргона, а затем от метастабильных уровней аргона к уровню  $C^3P_u$  молекулы азота, поэтому в оптимальных смесях парциальное давление аргона существенно превышает парциальное давление азота. В обоих режимах работы генератора FPG-10 максимум плотности мощности излучения достигался для смеси  $Ar:N_2 = 200:1$ , причем при возбуждении импульсами с  $U = 14$  кВ и  $\tau \sim 200$  пс максимумы мощности излучения наблюдались при более низких давлениях, чем в случае возбуждения импульсами с  $U = 6$  кВ и  $\tau \sim 400$  пс. Заметим, что в первом режиме возбуждения наблюдался второй максимум зависимости  $P(p)$  в области давлений  $p = 130$  Тор (рис.2,а). Это можно связать с влиянием длительности и амплитуды импульса напряжения на формирование разряда. Из рис.2 видно, что увеличение импульса напряжения в 2.3 раза приводит к почти пропорциональному увеличению плотности мощности излучения. При давлении более 100 или 300 Тор в смесях  $Ar-N_2$  с различным соотношением компонентов разряд контрагировался или переставал зажигаться. При использовании воздуха и азота характеристики излучения были примерно одинаковыми.

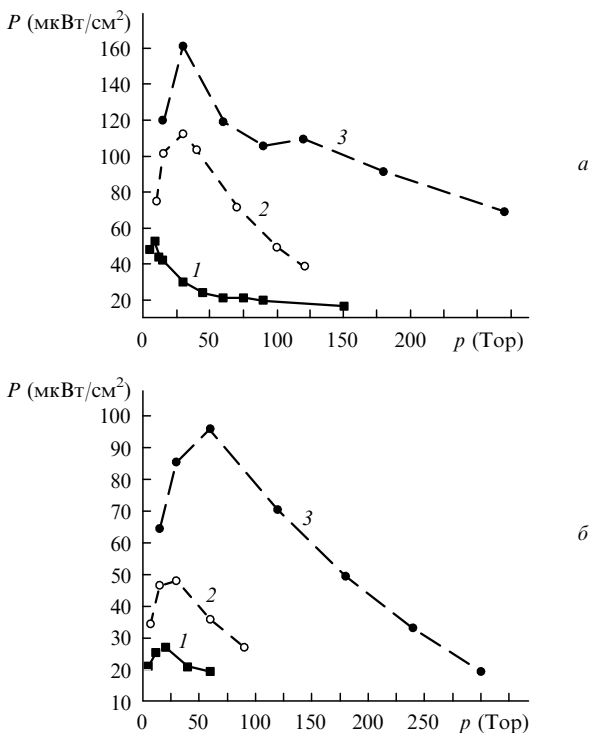


Рис.2. Зависимости плотности мощности излучения  $N_2$ -лампы барьерного разряда от давления рабочей смеси для азота (1), а также смесей  $Ar:N_2 = 10:1$  (2) и  $Ar:N_2 = 200:1$  (3) при возбуждении генератором с амплитудой импульсов напряжения  $U = 14$  (а) и 6 кВ (б).

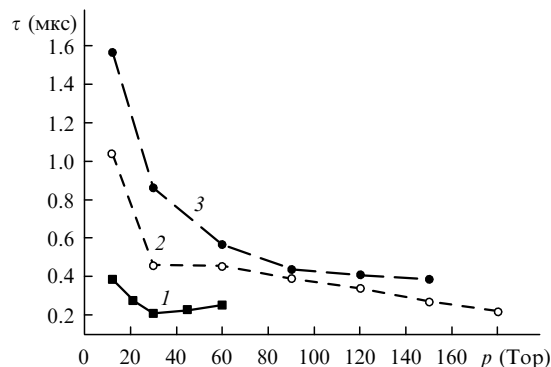


Рис.3. Зависимости длительности на полувысоте импульсов излучения  $N_2$ -лампы барьерного разряда от давления рабочей смеси для чистого азота (1), а также смесей  $Ar:N_2 = 100:1$  (2) и  $Ar:N_2 = 200:1$  (3).

Применение второго генератора с длительностью импульса напряжения на полувысоте  $\tau = 1$  мкс позволило увеличить среднюю мощность излучения, но длительность импульса излучения при этом также увеличилась. Причем в течение каждого импульса напряжения на его фронте генерировались два импульса излучения [5]. Средние мощности  $P$  излучения  $N_2$ -лампы при  $U = 6$  кВ и  $f = 1$  кГц составили 3.2 и 13 мВт для первого и второго генераторов соответственно. При увеличении  $U$  до 14 кВ и сокращении  $\tau$  до 200 пс средняя мощность УФ излучения в смеси  $Ar-N_2$  составила 5.8 мВт.

Длительность импульса излучения  $\tau$  при барьерном разряде была наименьшей для воздуха и азота ( $\sim 200$  нс, рис.3), однако существенно превышала длительность импульса напряжения генератора FPG-10. В случае азота длительность импульса излучения уменьшалась до давления 30 Тор, а затем несколько возрастала. Это можно также связать с изменением характеристик разряда. В смеси  $Ar:N_2 = 100:1$  при давлении 180 Тор длительность импульса излучения  $N_2$ -лампы составляла 300 нс. Таким образом, сокращение до сотен пикосекунд длительности импульса напряжения с амплитудой  $\sim 10$  кВ не позволило получить в лампе барьерного разряда импульс излучения наносекундной длительности. Это связано со сравнительно малыми давлениями, при которых в лампе формировался диффузный разряд. Кроме того, при малых рабочих давлениях объем разрядной области существенно увеличивается, что не позволяет создавать миниатюрные излучатели. Диффузное облако охватывает боковые стенки острия, и его ширина превышает ширину второго (медного) электрода. При возбуждении ксенона пробой промежутка происходил при давлении менее 10 Тор, что приводило к очень низкой эффективности излучения димеров ксенона в области 172 нм.

Наименьшие длительности импульса излучения были получены с генератором FPG-10 при возбуждении ОРИПЭЛ. Установлено, что при использовании импульсов напряжения с амплитудой 6 и 14 кВ между двумя металлическими острыми электродами при атмосферном давлении воздуха и азота формируется диффузный разряд. При разрядном промежутке  $\sim 3$  мм светящийся цилиндр имеет диаметр  $\sim 1$  мм (рис.4). На промежуток подавались импульсы напряжения с  $U = 14$  кВ и  $\tau = 200$  пс. В спектре излучения при ОРИПЭЛ доминируют полосы второй положительной системы азота (рис.5, штриховая кривая). Импульс излучения в атмосферном воздухе при возбуждении ОРИПЭЛ показан на рис.1,в. Длительность импульса излучения ОРИПЭЛ на полувысоте

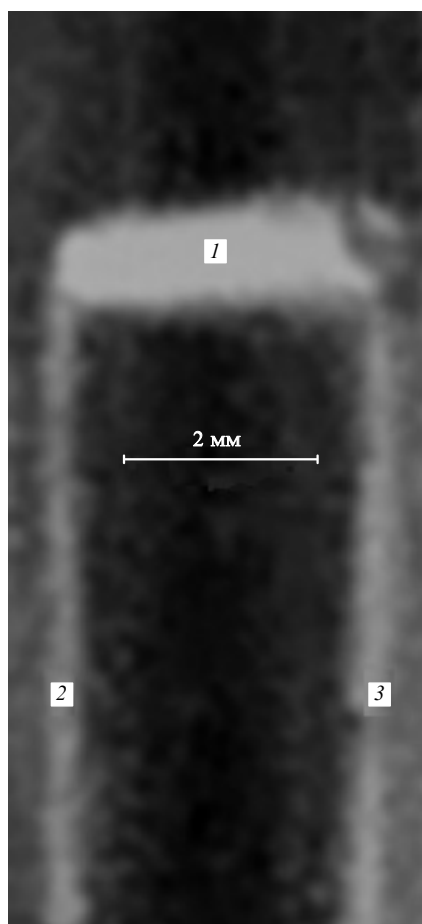


Рис.4. Фотография свечения разряда 1 в воздухе атмосферного давления между высоковольтным (2) и земляным (3) электродами.

составляла 3 нс, а мощность излучения в телесный угол  $4\pi$  была равна 1.7 Вт. Сокращение расстояния между электродами приводило к контрагированию разряда и уменьшению мощности излучения второй положительной системы азота. Однако и при межэлектродном расстоянии  $\sim 1$  мм в случае пробоя промежутка вначале формировалась объемная стадия разряда, которая затем переходила в искровую. Динамика перехода объемной стадии разряда в искровую при формировании ОРИПЭЛ исследована в [16]. В случае малых зазоров в спектре излучения разряда присутствуют полосы второй положительной системы азота, а также широкополосный кон-

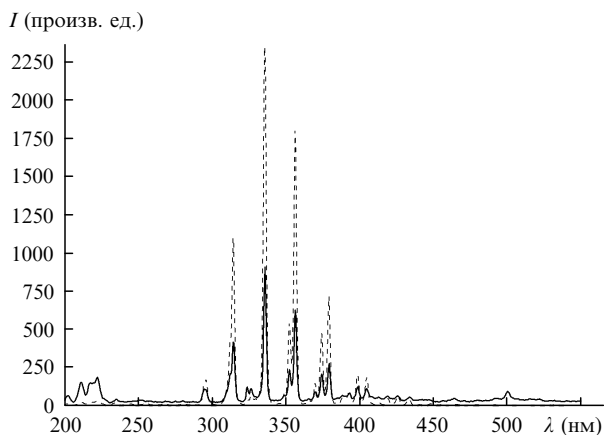


Рис.5. Спектры излучения объемного (штриховая кривая) и искрового (сплошная кривая) разрядов между двумя острями.

тинуум в области 200–600 нм (рис.5, сплошная кривая), характерный для искрового разряда. Формирование диффузного разряда при атмосферном давлении в отсутствие предварительной ионизации промежутка обусловлено генерацией убегающих электронов, а использование импульсов напряжения с фронтом в сотни пикосекунд повышает эффективность их генерации [8–10].

#### 4. Заключение

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования временных, энергетических и спектральных характеристик разряда, возбуждаемого в азоте, в смесях  $\text{Ar}-\text{N}_2$  и ксеноне, а также в воздухе атмосферного давления импульсами напряжения с  $U = 6$  и  $14$  кВ и  $\tau = 200$  и  $400$  пс. При  $U = 6$  и  $14$  кВ минимальные длительности импульсов излучения  $\tau = 3$  нс были получены в воздухе и в азоте атмосферного давления при формировании ОРИПЭЛ между электродами с малыми радиусами кривизны. Создана миниатюрная УФ лампа с возбуждением ОРИПЭЛ, излучающая область которой представляет собой цилиндр длиной 1–3 мм и диаметром  $\sim 1$  мм. Показано, что при использовании барьерного разряда и того же генератора наибольшие мощности достигаются при давлениях менее 70 Тор, а длительности импульса излучения в воздухе, азоте, в смесях  $\text{Ar}-\text{N}_2$  и ксеноне составляют сотни наносекунд (см. рис.1,2). Создана малогабаритная отпаянная лампа барьерного разряда, излучающая на второй положительной системе азота. Показано, что максимальные эффективности и мощности УФ излучения второй положительной системы азота при возбуждении импульсами напряжения длительностью в сотни пикосекунд меньше, чем при возбуждении импульсами длительностью  $\sim 1$  мкс с той же амплитудой.

Работа выполнена при частичной поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, государственный контракт № 02.740.11.0562.

1. Kogelschatz U. *Pure & Appl. Chem.*, **62**, 1667 (1990).
2. Boyd I., Zhang J. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, **121**, 349 (1997).
3. Kogelschatz U. *Plasma Chem. Plasma Processing*, **23** (1), 1 (2003).
4. Ломаев М.В., Скаун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. *УФН*, **173**, 201 (2003).
5. Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скаун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. *ПТЭ*, **5**, 5 (2006).
6. *Photochemistry Research Progress*. Eds by A.Sanchez, S.J.Gutierrez (New York: Nova Science Publ., 2008).
7. *Импульсные источники света*. Под ред. И.С.Маршака. (М.: Энергия, 1978, с. 472).
8. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 1007 (2004).
9. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф., Кривоногова К.Ю. *Оптика и спектроскопия*, **107** (1), 40 (2009).
10. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36**, 576 (2006).
11. Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **38** (4), 401 (2008).
12. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. *ПТЭ*, **146** (1989).
13. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **76**, 59 (2006).
14. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3609 (2006).
15. Авдеев С.М., Соснин Э.А. *Оптика и спектроскопия*, **109** (1), 14 (2009).
16. Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. *ЖТФ*, **80** (2), 51 (2010).