

Электроразрядный ВУФ лазер с твердотельным генератором накачки

С.К.Вартапетов, О.В.Грязнов, М.В.Малашин, С.И.Мошкунов, С.В.Небогаткин, Р.Р.Хасая,
В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков

Представлены результаты исследования электроразрядного ArF-лазера (длина волны 193 нм) с полностью твердотельным генератором накачки на основе полупроводникового коммутатора и системы магнитного сжатия высоковольтных импульсов. Максимальная энергия излучения составила 15 мДж, длительность лазерных импульсов – 18 нс, частота их следования – 1 кГц.

Ключевые слова: твердотельный коммутатор, генератор с магнитным сжатием высоковольтных импульсов, увеличенный во времени импульс ВУФ излучения.

1. Введение

Электроразрядные ArF- и F₂-лазеры являются мощными источниками вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения. Они генерируют излучение на длинах волн $\lambda = 193$ и 157 нм с энергией фотонов 6.4 и 7.9 эВ соответственно [1–12], которое поглощается практически во всех материалах. Это излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром $\sim \lambda$, что позволяет обеспечивать высокую интенсивность и локальность воздействия лазерного пучка на вещество. Под действием излучения ArF- и F₂-лазеров изменяется коэффициент преломления оптических материалов, поэтому такие лазеры используют для формирования в оптическом волокне брэгговских решеток, которые работают как зеркала на входе и выходе световода. Оптические световоды с брэгговскими решетками применяются в телекоммуникации. При этом они могут быть как пассивными (фильтры, рамановские конвертеры излучения), так и активными (волоконные лазеры) элементами или служить высокочувствительными сенсорами для дистанционного измерения характеристик физических полей, температур, давлений и т. д. [1, 13–16].

Лазеры на ArF и F₂ играют ключевую роль в микроэлектронике. С их помощью проводится сверление отверстий в многослойных интегральных печатных платах для компьютеров. По мере уменьшения размеров микросхем требуются отверстия диаметром несколько микрон и менее. В фотолитографической технологии последних поколений при изготовлении интегральных схем с минимальным размером элементов до 65–45 нм используется лазерное излучение с $\lambda = 193$ нм [10–12]. Кроме того,

благодаря высокому пространственному разрешению (менее 100 нм), достигаемому при абляции твердых материалов интенсивным ВУФ излучением, ArF- и F₂-лазеры выгодно использовать при высокоточной обработке материалов для изготовления отдельных элементов микроэлектромеханических систем. ArF-лазеры нашли также широкое применение в медицине: в офтальмологии – для исправления аномалий зрения (близорукость, дальнозоркость, астигматизм), в дерматологии – при лечении кожных заболеваний (псориаз, экзема) [1]. Недавно была продемонстрирована возможность получения структур субмикронного и нанометрового размеров на поверхности материалов под действием излучения F₂-лазера [17, 18].

Помимо высоких выходных энергетических характеристик излучения современные «индустриальные» лазеры должны удовлетворять дополнительным требованиям: работать при частотах следования импульсов ~ 1000 Гц, иметь высокое качество оптического пучка, определяемое его однородностью, расходимостью, спектральным составом излучения, а также обладать высокой надежностью, относительно небольшими габаритами и весом.

Как правило, в коммерческих электроразрядных лазерах используются либо водородные тиратроны (ресурс работы менее 10^{10} импульсов), либо низковольтные твердотельные коммутаторы с практически неограниченным ресурсом работы. Совершенствование твердотельных коммутаторов необходимо для улучшения эксплуатационных характеристик «индустриальных» лазеров.

В ряде лазерных технологий (фотолитография, запись брэгговских решеток на оптоволокне, получение дифракционных оптических микроструктур и т. д.) предъявляются повышенные требования к характеристикам выходного пучка и сроку службы оптических элементов лазерной установки. При этом возникает ряд особых проблем. Во-первых, это сравнительно низкая монохроматичность и высокая расходимость пучка. С целью достижения высоких пространственных и спектральных характеристик излучения в работе [3] были предложены различные оптические схемы неустойчивых резонаторов и селекции спектра лазерного излучения с использовани-

М.В.Малашин, С.И.Мошкунов, С.В.Небогаткин, Р.Р.Хасая, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186 Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18; e-mail: rutberg@iperas.spb.ru, yamschikov52@mail.ru
С.К.Вартапетов, О.В.Грязнов. Центр физического приборостроения Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, Московская обл., 142190 Троицк; e-mail: info@lasersys.ru

Поступила в редакцию 10 сентября 2008 г., после доработки – 2 апреля 2009 г.

ем дисперсионных элементов. Однако подобные схемы вносят значительные внутррезонаторные потери, что приводит к снижению энергии генерации.

Во-вторых, под воздействием мощного ВУФ излучения возникает эффект уплотнения вещества. Из-за этого изменяется показатель преломления оптического материала (плавленый кварц, флюорит), что приводит к деградации зеркал резонатора и других оптических элементов, через которые проходит лазерный пучок. Для решения указанных проблем в [10, 11] был предложен эффективный подход, основанный на увеличении длительности импульса лазерной генерации. При таком подходе за счет увеличения числа проходов излучения по резонатору улучшается пространственная когерентность пучка и уменьшается ширина спектра излучения, а также в результате увеличения длительности лазерного импульса снижается его интенсивность и ослабляется негативное влияние эффекта уплотнения вещества.

Целью настоящей работы являлось создание и исследование системы возбуждения малогабаритных (активный объем $\sim 9 \text{ см}^3$) AgF - и F_2 -лазеров с полностью твердотельным генератором накачки, позволяющей генерировать ВУФ излучение с увеличенной примерно в два раза по сравнению с обычными лазерами длительностью импульса и частотой следования импульсов до 1 кГц.

2. Магнитный генератор высоковольтных импульсов с твердотельным коммутатором

Характеристики AgF - и F_2 -лазеров во многом зависят от параметров высоковольтных импульсов, формируемых генератором накачки на разрядном промежутке (РП) лазера. На стадии нарастания напряжения происходит зажигание объемного самостоятельного разряда, которым накачивается активная среда лазера. Чем меньше длительность фронта импульса t_f , тем однороднее разряд и тем больше динамический ресурс работы газовой смеси [19–22]. В период спада напряжения осуществляется возбуждение активной среды. Уменьшение длительности спада напряжения t_p способствует повышению эффективности накачки лазера [2, 20, 21]. Снижение t_p обычно достигается путем минимизации индуктивно-

сти контура разряда обостряющей емкости, подключаемой параллельно электродам РП. Для уменьшения t_f применяются обострители [21–23]. При работе лазеров в импульсно-периодическом режиме наиболее эффективными обострителями являются системы магнитного сжатия, представляющие собой цепочки последовательно соединенных контуров, состоящих из емкостей и нелинейных насыщающихся дросселей. Число последовательных контуров выбирается таким, чтобы обеспечить оптимально высокие амплитуду и скорость нарастания напряжения на РП и свести к минимуму потери энергии, подводимой к РП. По сравнению с газоразрядными обострителями высоковольтных импульсов [21] системы магнитного сжатия имеют значительно больший срок службы и могут работать при частотах следования импульсов более 1 кГц [23].

Другой важнейшей частью генератора накачки лазера является коммутирующее устройство. В последнее время широкое распространение получили мощные полупроводниковые коммутаторы, которые имеют практически неограниченный ресурс работы и обеспечивают высокую стабильность параметров импульсов напряжения. При этом обычно используются схемы генератора накачки с относительно низковольтными полупроводниковыми коммутаторами, работающими совместно с повышающими трансформаторами [1]. Высоковольтный трансформатор требует надежной изоляции. Поэтому обычно он помещается в бак с трансформаторным маслом. Такие схемы весьма громоздки, имеют большой вес и приводят к дополнительным потерям энергии.

В отличие от традиционных схем нами была разработана схема высоковольтного генератора наносекундных импульсов без высоковольтного трансформатора. Функциональная схема генератора показана на рис. 1. Его особенностью являлось использование высоковольтного полупроводникового коммутатора, предложенного в [23]. Генератор выполнен на основе полностью твердотельных элементов схемы. Блок генератора содержит высоковольтный стабилизированный источник напряжения, высоковольтный твердотельный коммутатор (ВТК) со схемой управления, двухзвенную систему магнитной компрессии импульсов, а также блок управления и контроля.

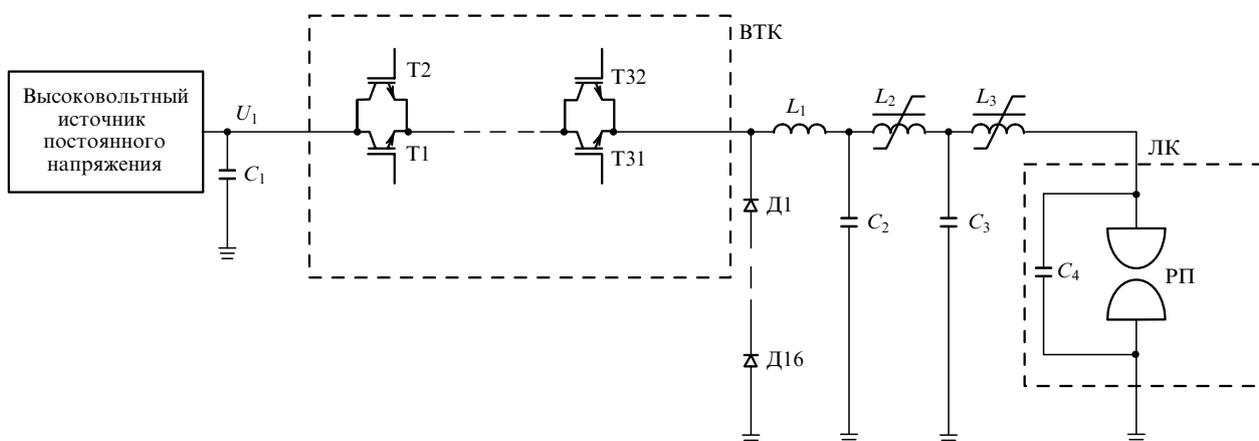


Рис. 1. Функциональная схема генератора накачки:

C_1 – накопительный конденсатор (100 нФ, 16 кВ); ВТК – высоковольтный твердотельный коммутатор на IGBT; T1–T32 – биполярные транзисторы с изолированным затвором; D1–D16 – линейка защитных диодов (HFA30PB 120); L_1 – зарядный дроссель (23 мкГ); C_2 – конденсатор первого звена магнитного сжатия (3 нФ, 32 кВ); L_2 – насыщающийся дроссель первого звена магнитного сжатия (14 мкГ); C_3 – конденсатор второго звена магнитного сжатия (3 нФ, 32 кВ); L_3 – насыщающийся дроссель второго звена магнитного сжатия (4 мкГ); C_4 – обостряющая емкость лазерной камеры (2.7 нФ); ЛК – лазерная камера; РП – разрядный промежуток лазера.

ВТК является полностью управляемым (включение и выключение) и состоит из 32 биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT – insulated gate bipolar transistor), включенных параллельно и последовательно. Управление транзисторами осуществляется посредством трансформаторов (на рис.1 не показаны). Такой способ включения IGBT позволяет реализовать достаточно простую схему генератора с удвоением напряжения за счет неполного разряда накопительного конденсатора емкостью C_1 .

При подаче импульса управления ВТК открывается, в результате происходит резонансный заряд конденсатора C_2 через дроссель с индуктивностью L_1 . Длительность управляющего импульса подбирается такой, чтобы ВТК закрылся в момент достижения максимума напряжения на C_2 . При этом ток через ВТК близок к нулю, что приводит к значительному снижению коммутационных потерь. Поскольку $C_1 \gg C_2$, амплитуда напряжения на конденсаторе C_2 стремится к удвоенному зарядному напряжению $2U_1$. Далее импульс напряжения обостряется, а также укорачивается системой магнитного сжатия и прикладывается к электродам РП.

При использовании высоковольтного источника питания мощностью 2500 Вт и принудительного воздушного охлаждения была продемонстрирована надежная работа генератора на активную нагрузку 30 Ом при частоте повторения импульсов до 2 кГц, амплитудах выходного импульса 20–27 кВ и длительности его фронта ~ 70 нс.

3. Увеличение длительности лазерного импульса

Временной профиль интенсивности импульса излучения обычного AgF-лазера имеет вид короткого одиночного пика. Для активных сред длиной ~ 30 см длительность импульса генерации по полувысоте $t_g = 5 - 7$ нс. При длине резонатора ~ 30 см число проходов излучения по резонатору не превышает пяти, что недостаточно для формирования высокомономатичного пучка. Поэтому в работах [10, 11] использовались методы принудительного удлинения лазерного импульса. При этом следует не допускать снижения выходной энергии и ухудшения однородности разряда в РП.

Временной профиль интенсивности лазерных импульсов определяется временной зависимостью электрической мощности, вводимой в активную среду. В случае короткого лазерного импульса, величина t_g задается временем разряда обостряющей емкости через РП, к электродам которого она подключается. Для генерации импульса излучения с увеличенной длительностью в [11] была предложена электрическая схема, показанная на рис.2. В ней вместо обостряющей емкости используется искусственная формирующая линия, состоящая из емкостей C_{p-1} и C_p и нелинейной индуктивности L . Переход индуктивности L в насыщенное состояние вызывает «перетекание» накопленной энергии из C_{p-1} в C_p и рост напряжения на разрядном промежутке. После его пробоя обе емкости поочередно разряжаются через РП. Если в момент пробоя РП энергии в C_{p-1} и C_p примерно равны, то на выходе лазера генерируется импульс с двумя пиками. Соотношение их амплитуд зависит от емкости C_p , концентрации фтора и давления смеси.

Из сравнения рис.1 и 2 видно, что контур, состоящий

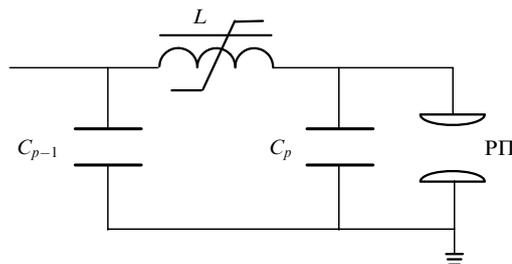


Рис.2. Электрическая схема возбуждения для формирования лазерных импульсов с увеличенной длительностью.

из выходного звена генератора (C_3, L_3) и емкости C_4 (рис.1), по сути является формирующей линией, аналогичной показанной на рис.2. Поэтому генератор высоковольтных наносекундных импульсов, схематически изображенный на рис.1, очевидно, может использоваться для получения режима накачки, необходимого для удлинения лазерного импульса.

4. Экспериментальная установка

Система возбуждения электроразрядного ВУФ лазера включала в себя твердотельный магнитный генератор накачки и лазерную камеру (ЛК) (см. рис.1). ЛК ранее использовалась при работе F₂-лазера. Ее конструкция описана в [6]. Настоящие эксперименты проводились с AgF-лазером. Активный объем разрядного промежутка $V = dwl$, где $d = 1.2$ см – межэлектродное расстояние, $w = 0.3$ см – ширина области разряда, $l = 25$ см – ее длина.

Оптический резонатор длиной 34 см устанавливался на корпусе ЛК. Он был образован глухим плоским зеркалом и выходным окном в виде плоскопараллельной пластины из CaF₂.

Смесь газов F₂–Ag–Ne–Ne прокачивалась через РП с помощью диаметального вентилятора. Давление смеси в ЛК не превышало 5000 мбар. Рабочая смесь охлаждалась проточной водой. Диаметальный вентилятор и радиатор водяного охлаждения располагались внутри ЛК.

В экспериментах энергия выходного лазерного излучения измерялась с помощью пирозлектрического приемника Orpht. Одновременно регистрировались импульсы напряжения генератора накачки на РП и импульсы лазерной генерации. Для этого использовались высоковольтный щуп Tektronix P6015A, коаксиальный фотоземель ФЭК-22 и осциллограф LeCroy WaveSurfer 432.

Оптимизация состава и давления смеси, при которых достигается максимальная энергия генерации, проводилась при частоте следования импульсов 10 Гц. При зарядном напряжении $U_1 = 12$ кВ было найдено оптимальное соотношение компонентов смеси F₂–Ag–Ne при ее полном давлении 4630 мбар.

5. Выходные характеристики лазера

Экспериментальные зависимости энергии излучения лазера W , максимального напряжения U_m на РП, а также длительности импульса излучения на полувысоте $t_{1/2}$ от зарядного напряжения U_1 генератора накачки для оптимальной газовой смеси представлены на рис.3 и 4.

На рис.5 приведены осциллограммы импульсов напряжения на РП и лазерных импульсов с $\lambda = 193$ нм при разных значениях U_1 . Они позволяют проследить эволю-

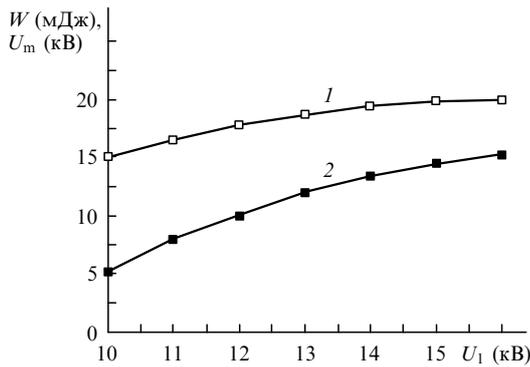


Рис.3. Экспериментальные зависимости максимального напряжения на разрядном промежутке U_m (1) и энергии излучения лазера W (2) от зарядного напряжения U_1 .

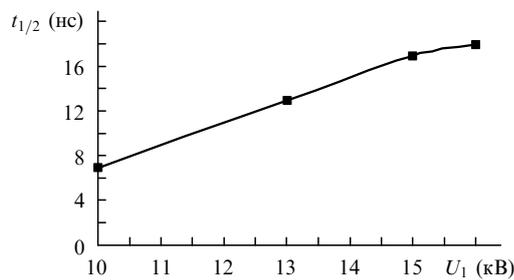


Рис.4. Экспериментальная зависимость длительности лазерного импульса на полувысоте $t_{1/2}$ от зарядного напряжения U_1 .

цию лазерного импульса с изменением зарядного напряжения. При $U_1 = 10$ кВ импульс напряжения имеет плоскую вершину. Это означает, что пробой РП происходит в период времени, когда вся энергия накачки сосредоточена в емкости C_4 . Поэтому импульс генерации представляет собой одиночный пик, форма которого определяется только разрядом емкости C_4 через РП. В диапазоне $U_1 = 10 - 12$ кВ амплитуда разрядного напряжения U_m растет линейно. Это приводит к росту амплитуды лазерного импульса. Из-за уменьшения времени задержки пробоя РП относительно момента нарастания фронта импульса напряжения при $U_1 \geq 12$ кВ пробой начинает происходить на фронте импульса напряжения. В этих условиях энергия накачки определяется разрядами емкостей C_3 и C_4 . Поэтому при $U_1 = 13$ кВ наблюдается лазерный импульс с двумя пиками (рис.5,б), обусловленный разрядом обеих емкостей. Из рис.3 видно, что при дальнейшем увеличении U_1 , величина U_m растет незначительно. Поэтому амплитуда первого пика также изменяется незначительно, а амплитуда второго пика растет и даже может превышать амплитуду первого. При этом величина $t_{1/2}$ становится примерно равной удвоенной длительности одиночного импульса и при $U_1 = 16$ кВ достигает 18 нс.

Проведенные исследования показали, что лазер устойчиво работал при частоте следования импульсов $f < 1$ кГц. Максимальная эффективность генерации лазера относительно энергии, запасаемой в конденсаторе C_2 (рис.1), составила 1.2% при зарядном напряжении 13 кВ. Зависимость выходной энергии от частоты следования импульсов при зарядном напряжении 15 кВ показана на рис.6. Уменьшение энергии при $f = 1000$ Гц составляет 15% от энергии при $f = 20$ Гц. При этом средняя мощность выходного излучения превышала 10 Вт.

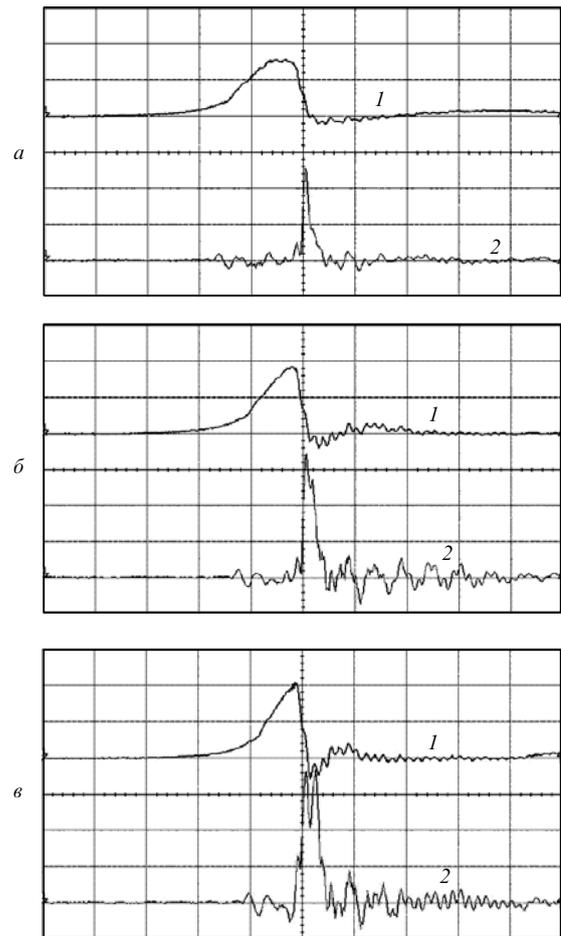


Рис.5. Осциллограммы импульсов разрядного напряжения (1) и лазерного излучения (2) при зарядном напряжении $U_1 = 10$ (а), 13 (б) и 16 кВ (в). Масштаб для осциллограмм 1 – 10 кВ/дел., осциллограммы 2 даны в относительных единицах, развертка – 50 нс/дел.

Ранее нами была разработана эффективная система возбуждения электроразрядного F_2 -лазера, результаты исследования которой подробно представлены в [6]. В целом она была подобна системе возбуждения, рассмотренной в настоящей работе. В ней использовалась та же самая ЛК, но с оптическим резонатором на $\lambda = 157$ нм. Коммутатором в схеме генератора накачки служил тиратрон с холодным катодом ТПИ1-1к/20. Несмотря на некоторое различие в схемах магнитного сжатия импульсов, параметры импульсов напряжения на РП, полученные в [6] и в настоящей работе, были близки. Зарегистрировать форму импульса излучения с $\lambda = 157$ нм не удалось из-за присутствия в спектре излучения F_2 -лазера красного излучения (624–755 нм) атомарного фтора F^* [2, 5]. Тем не менее в [11] было показано, что описанный

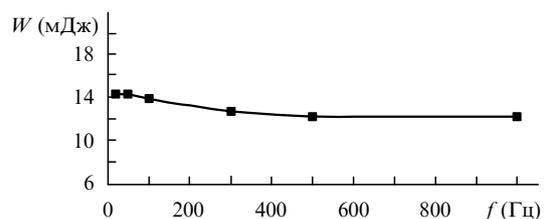


Рис.6. Зависимость выходной энергии лазера W от частоты следования импульсов f при $U_1 = 16$ кВ.

выше принцип получения лазерного излучения с увеличенной длительностью импульса, основанный на разряде нелинейной формирующей линии через РП, применим как для AgF-, так и для F₂-лазеров. Поэтому рассмотренная в настоящей работе схема возбуждения также может использоваться для генерации лазерного излучения на $\lambda = 157$ нм с увеличенной длительностью импульса.

6. Заключение

Таким образом, разработана эффективная система возбуждения электроразрядных ВУФ лазеров, основанная на использовании полностью твердотельного магнитного генератора накачки. Она позволяет генерировать более длинные (длительностью до 18 нс) импульсы излучения AgF-лазера с энергией до 15 мДж. На $\lambda = 193$ нм получена средняя мощность излучения более 10 Вт при частоте следования импульсов 1 кГц.

Настоящая работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-08-00784-а и 08-08-00965-а).

- Basting D. et al (Eds). *Excimer Laser Technology* (Göttingen: Lambda Physik AG, 2001).
- Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **33** (8), 677 (2003).
- Атежев В.В., Вартапетов С.К., Жуков А.Н., Курзанов М.А., Обидин А.З. *Квантовая электроника*, **33** (8), 689 (2003).
- Atejev V.V., Vartapetov S.K., Zhukov A.N., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A. *Tech. Program XI Conf. on Laser Opt.* (St. Petersburg, 2003, p. 18).
- Atejev V.V., Vartapetov S.K., Zhukov A.N., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 123 (2004).
- Вартапетов С.К., Жигалкин А.А., Лапшин К.Э., Обидин А.З., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **36** (5), 393 (2006).
- Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Электронный журнал «Исследовано в России»*, **152**, 1414 (2006).
- Peters P., Feenstra L., Bastiaens H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 338 (2001).
- Borisov V., Khristoforov O., Kirykhin Yu., Vinokhodov A., Demin A., Vodchits V., Eltzov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 348 (2001).
- Kakizaki K., Saito T., Mitsuhashi K., Arai M., Tada T., Kasahara S., Igarashi T., Hotta K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4000**, 1397 (2000).
- Hofmann T., Johanson B., Das P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4000**, 511 (2000).
- Klerk J., Wagner C., Droste R., Levasier L., Jorritsma L., Setten E., Kattouw H., Jacobs J., Tilmann Heil T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6520**, 65201Y (2007).
- Othonos A., Kalli K. *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing* (Boston, London: Artech House, 1999).
- Larionov Yu.V., Rybaltovsky A., Semjonov S., Bubnov M., Dianov E., Vartapetov S., Kurzanov M., Obidin A., Yamschikov V. *Tech. Dig. Conf. on Optical Fiber Communication (OFC-2003)* (Atlanta, GA, USA, 2003, v. 1, p. 38).
- Larionov Yu.V., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Bubnov M.M., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A. *Tech. Dig. Conf. on Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (BGPP'2003)* (Monterey, CA, USA, 2003, MD28, p. 136).
- Larionov Yu.V., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Bubnov M.M., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Kurzanov M.A., Obidin A.Z., Yamschikov V.A., Guryanov A.N., Yashkov M.V., Umnikov A.A. *Tech. Dig. Conf. on Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (BGPP'2003)* (Monterey, CA, USA, 2003, MC4, p. 46).
- Лапшин К.Э., Обидин А.З., Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. *Российские нанотехнологии*, **2** (11-12), 59 (2007).
- Лапшин К.Э., Обидин А.З., Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. *Физика и химия обработки материалов*, № 1, 35 (2008).
- Осипов В.В. *УФН*, **170**, (3), 225 (2000).
- Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. *Импульсные газовые лазеры* (М.: Наука, 1991).
- Месяц Г.А. *Генерирование мощных наносекундных импульсов* (М.: Сов. радио, 1974).
- Аполлонов В.В., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 483 (1997).
- Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *Препринт ИПЭФ РАН* (М., 2004).