

04;07;12

Широкоапертурный CO₂-усилитель сверхатмосферного давления с накачкой объемным самостоятельным разрядом

© Г.А. Баранов, А.А. Кучинский, П.В. Томашевич

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,
196641 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: gennady@mail.rcom.ru

(Поступило в Редакцию 25 сентября 2007 г.)

Рассматриваются вопросы практической реализации объемного самостоятельного разряда в CO₂-газовых смесях с давлением до 10 atm, предназначенного для усиления ИК-импульсов пикосекундной длительности. Представлены результаты экспериментальных исследований электроразрядных и оптических характеристик широкоапертурного CO₂-усилителя высокого давления. Обсуждается возможность создания на его основе комплексной лазерной установки тераваттного уровня мощности с задающим генератором и предварительным усилителем.

PACS: 42.55.Lt, 52.80.Nc

Введение

В последние годы наблюдается значительный интерес к созданию пикосекундных лазерных установок тераваттного уровня мощности в ИК-области спектра. Использование мощных коротких лазерных импульсов позволяет создать особое состояние вещества, когда время релаксации состояний, возникающих при оптическом пробое плазмы, много больше продолжительности лазерного импульса, что позволяет исследовать фундаментальные свойства плазмы для таких задач, как лазерное ускорение электронов, многофотонная ионизация, создание сред для рентгеновских лазеров, получение протяженных плазменных каналов в атмосфере и т.п. Применение специальных формирующих оптических систем на основе нетрадиционных оптических элементов, например аксиконов, позволит создавать в плазме сверхсильные электрические поля с заданным законом пространственного распределения лазерного излучения, что расширяет возможности использования тераваттных CO₂-лазеров в таких задачах, как ускорение элементарных и материальных частиц до сверхвысоких энергий.

Область применения излучения лазеров в ИК-диапазоне непрерывно расширяется благодаря повышению уровня их мощности. Наиболее впечатляющие успехи достигнуты на действующих CO₂-лазерных комплексах в США — Брукхэвенской национальной лаборатории (BNL) и Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе (UCLA). В настоящее время на этих установках проводятся эксперименты по ускорению заряженных частиц в различных схемах ускорения [1–4], генерации мощного рентгеновского излучения [5–7], получению когерентного излучения в терагерцовом диапазоне длин волн [8] и т.д.

Основным и наиболее сложным элементом таких установок, определяющим в конечном итоге максимальную мощность импульса заданной длительности, является оконечный широкоапертурный усилитель высокого

давления (УВД). В [9,10] подробно обсуждались принципы построения систем накачки активной среды CO₂-усилителей (лазеров) сверхатмосферного давления, описаны экспериментальные результаты исследования характеристик усилительного модуля с активным объемом 0.05 × 0.05 × 0.55 м и предварительной ионизацией газа мягким рентгеновским излучением (работа выполнена в НИИЭФА и ИОФ РАН).

В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик CO₂-лазерного усилителя, созданного в Лазерном центре НИИЭФА, с апертурой 0.1 × 0.1 м и активным объемом 10 л при давлении в конструктивном объединении разрядной камеры с промежуточным накопителем энергии — водяным конденсатором, что обеспечивает минимально возможную индуктивность разрядного контура системы накачки активной среды [11], а также использование рентгеновского излучения для предварительной ионизации рабочей смеси с напряжением на электронной пушке 200 кВ. Это позволяет существенно повысить величину удельного энерговыклада в разряд по сравнению с известными аналогами. Поскольку кроме широкоапертурного усилителя неотъемлемой частью любой мощной лазерной установки является первичный источник излучения — задающий генератор, в статье обсуждаются различные варианты его исполнения в зависимости от конкретного применения лазерного комплекса.

Описание экспериментальной установки

Основными элементами усилителя высокого давления являются: газоразрядная камера (РК), промежуточный накопитель энергии, устройство для предварительной ионизации разрядной области, генератор импульсных напряжений. Конструктивная схема установки представлена на рис. 1.

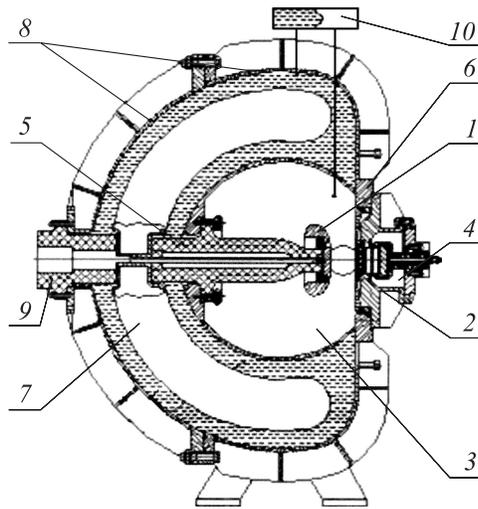


Рис. 1. Конструктивная схема разрядной камеры и промежуточного накопителя энергии.

Разрядный промежуток системы накачки образован профилированным катодом 1 и сеточным анодом 2, расположенным внутри цилиндрической разрядной камеры 3. Рентгеновский предьонизатор 4 установлен вблизи анода. Катод закреплен на высоковольтном проходном изоляторе 5, а анод — на присоединительном фланце 6. В непосредственной близости от разрядной камеры расположена цилиндрическая высоковольтная обкладка промежуточного емкостного накопителя 7. Земляная обкладка конденсатора образована металлической поверхностью разрядной камеры и внешней составной обечайкой 8. Полость между ними заполнена дистиллированной деионизованной водой. Напряжение к электродам разряда и к водяному конденсатору подводится через высоковольтный ввод 9. С целью уменьшения механической нагрузки на обечайку РК и повышения электропрочности воды в „быстром“ накопителе энергии при повышении давления газовой смеси водяная полость накопителя соединена с газовым объемом разрядной камеры через диафрагменный компенсатор давления 10.

Наиболее ответственным элементом конструкция РК является проходной изолятор, рассчитанный на импульсное напряжение 1 MV. Для повышения прочностных характеристик изолятор изготовлен из полиэтилена с применением технологии литья под давлением. Длина токоведущего элемента равна длине разрядной области, что обеспечивает минимально возможную индуктивность основного разрядного контура системы накачки.

При конструировании РК использованы результаты проведенного нами расчета статических электрических полей разрядной камеры, водяного конденсатора и проходного изолятора. Для определения первоначальной картины распределения поля в основном разрядном промежутке в программу закладывались известные аналитические профили высоковольтного электрода (Роговского, Филлича, Чанга, Брюса, Эрнста и их модификации [12]). Дальнейшие расчеты (с учетом металлических

стенок разрядной камеры) показали, что минимальное значение неоднородности электрического поля ($\leq 10\%$) на краю высоковольтного электрода обеспечивает профиль Брюса [13].

Заряд „быстрого“ накопителя энергии осуществляется с помощью 8-ступенчатого высоковольтного генератора импульсных напряжений (ГИН), собранного по схеме LC-генератора, и обеспечивающего следующие параметры.

Максимальное напряжение холостого хода, kV ... 640.
 Величина пиковой емкости, nF 62.5.
 Величина „быстрой“ емкости, nF 62.
 Длительность заряда промежуточного накопителя, μ s 2.
 Максимальный энергозапас, kJ 13.
 Диапазон величины зарядного напряжения, kV ... 50–80.

В качестве источника предварительной ионизации газа используется рентгеновское излучение, формирующееся в материале анодной фольги электронной пушки вследствие торможения в ней пучка ускоренных электронов. Конструктивно источник представляет собой взрывоэмиссионный диод с тормозным прострельным анодом [9,10]. Система формирования электронного пучка содержит электронную пушку с катодом, изготовленным из графитовых волокон, и анодную решетку с геометрической прозрачностью ~ 0.8 . Для питания предьонизатора используется накопительная батарея емкостью 120 nF. При ускоряющем зазоре 0.028 m и рабочем напряжении 70 kV полная длительность тока диода составляла 15 μ s при пиковом значении тока ~ 6 кА. В качестве мишени использована Al-фольга толщиной 50 μ m. Рабочее давление в предьонизаторе $\leq 10^{-5}$ Torr.

Измерения степени неоднородности рентгеновского пучка, проведенные с помощью матрицы рентгеновских датчиков на различных расстояниях от выходного окна предьонизатора, показали [10], что в области разрядного промежутка ионизация газовой смеси происходит практически равномерно (в отличие от предьонизаторов на основе УФ-излучения распределенных искровых разрядов).

Экспериментальные результаты

При выводе установки на расчетные параметры давление активной среды последовательно увеличивалось с шагом 2.5 atm и соответствующим подключением ступеней LC-генератора ($n = 2, 4, 6, 8$). Этот алгоритм, предложенный в [9], обеспечивает постоянство удельного энерговыклада в разряд W и параметра E_0/P (E_0 — начальная напряженность электрического поля в разрядном промежутке) с увеличением давления газа при заданном значении зарядного напряжения ГИН (U_0). В нашем случае эти значения варьировались в следующих пределах: $U_0 = 70–80$ kV и соответственно $W = 100–130$ J/l · atm и $E_0/P = 5.6–6.4$ kV/cm · atm. При анализе результатов следует учитывать, что при

этом меняется отношение величин накопительной емкости ГИН (C_1) и „быстрой“ емкости (C_2), определяющее коэффициент перенапряжения на разрядном промежутке ($C_1/C_2 = 10-1$). На каждой стадии эксперимента при заданном давлении P значения W и E_0 могут быть увеличены простым добавлением одной или двух ступеней ГИН.

Уже на стадии физического запуска установки и проведения первых экспериментов ($P = 1-5 \text{ atm}$) выяснилось, что при повышении давления активной среды в РК необходимо увеличивать ускоряющее напряжение на вакуумном диоде (U_d). Этот эффект наблюдается также на установке в ИОФ РАН и связан, по-видимому, не столько с увеличением верхней границы спектра рентгеновского излучения, сколько с ростом интенсивности его мягкой компоненты ($< 50 \text{ keV}$), осуществляющей основной вклад в ионизацию газовой смеси. Поэтому в дальнейших экспериментах вместо накопительной батареи [10] использовался 3-ступенчатый ГИН, собранный по схеме Аркадьева–Маркса с величиной пиковой емкости 50 nF .

На рис. 2 представлены осциллограммы тока (I) и напряжения (U) на вакуумном диоде при величине зарядного напряжения ГИН пушки 65 kV (развертка — 500 ns/div ; калибровка по току — 5 kA/div , по напряжению — 50 kV/div). По сравнению с первоначальным вариантом [10] максимальные значения напряжения и тока предьонизатора выросли с 80 до 200 kV и с 6 до 15 kA соответственно. Длительность тока при этом сократилась с $1.5 \mu\text{s}$ до 500 ns .

Вторая проблема, возникшая при увеличении числа ступеней ГИН разряда накачки, связана с неудовлетворительной работой разрядников. Оказалось, что стандартная схема каскадного запуска коммутаторов с помощью RC -цепочек [9] не обеспечивает синхронной и стабильной работы LC -генератора. Поэтому использована схема с трансформаторным запуском. Применение трансформаторов с возрастающим от ступени к ступени коэффициентом трансформации позволило сократить временной разброс срабатывания разрядников LC -

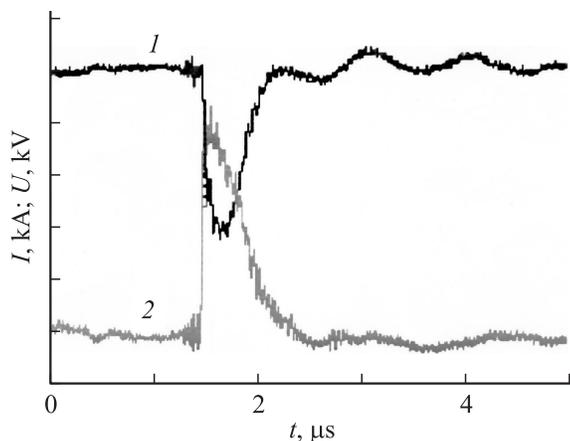


Рис. 2. Осциллограммы тока (I) и напряжения (U) на вакуумном диоде.

генератора до 50 ns (по сравнению с 300 ns разбросом в схеме запуска с RC -цепочками).

Результаты экспериментов, выполненных по указанному алгоритму, качественно соответствуют результатам исследований усилителя — прототипа [10]. При повышении давления активной среды:

- область устойчивости разряда накачки по значению зарядного напряжения ГИН увеличивается с ростом пикового напряжения на рентгеновском предьонизаторе;

- запуск предьонизатора необходимо осуществлять приблизительно за 500 ns до того, как напряжение холостого хода LC -генератора достигнет своего максимума;

- область устойчивости разряда накачки по величине параметра W уменьшается с ростом доли молекулярных газов в смеси;

- существенно усложняется проблема согласования источника питания с объемным самостоятельным разрядом накачки.

Степень согласования цепи источник питания—нагрузка определялись как величина отношения энергии ($CU^2/2$), запасенной в „быстром“ накопителе, к энергии, оставшейся в реактивной цепи источника питания после окончания разряда накачки в процентах. Для случая LC -генератора эта величина оценивается соотношением значений амплитуд напряжений формирования разряда и второго колебательного пика ГИН. Измерения напряжения на разрядном промежутке проводились с помощью делителя, подсоединенного непосредственно к катоду разрядного промежутка. Для измерения полного разрядного тока использовался распределенный омический шунт, одновременно выполняющий функцию токопровода, соединяющего анодный электрод с заземленным корпусом камеры.

На рис. 3 представлены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке, тока разряда накачки, тока и напряжения на рентгеновском предьонизаторе при давлении в разрядной камере 10 atm в гелии (a) и в смеси $\text{He} + 4\% \text{ CO}_2$. Калибровка каналов: -66 kV/V (рис. 3, a) и 132 kV/V (рис. 3, b). Калибровка для остальных каналов: для сигнала с датчика тока накачки — 16.5 kA/V , для сигнала с датчика тока рентгеновского предьонизатора — 4 kA/V , для сигнала с датчика напряжения на рентгеновском предьонизаторе — 50 kV/V .

Величины зарядных напряжений LC -генератора (U_{0d}) и ГИН предьонизатора (U_{0p}) указаны на осциллограммах. Из осциллограмм следует, что при данных параметрах величина энергии, оставшейся в колебательных контурах разрядных цепей, не превышает 10% .

В ходе экспериментов также установлено, что уменьшение пиковой емкости LC -генератора (т.е. переход в область $C_1/C_2 < 1$) не решает проблемы согласования. Если в чистом гелии эта проблема решается полностью, то в газовых смесях, содержащих даже небольшое количество CO_2 , необходимо существенное увеличение значения U_{0p} .

Для изучения оптических характеристик активной среды УВД использована стандартная схема измерения

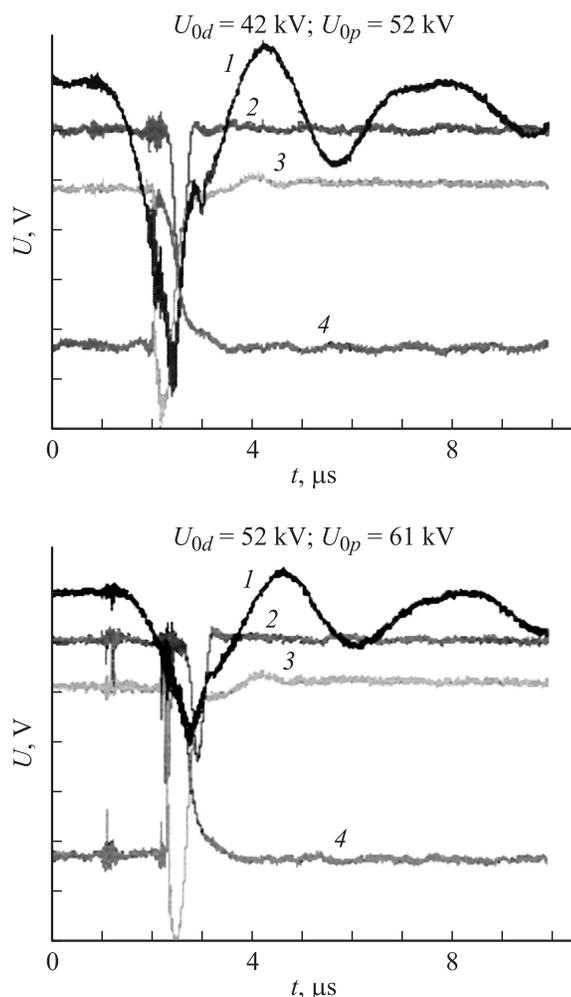


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с датчиков напряжения на разрядном промежутке (1), тока разряда накачки (2), тока (3) и напряжения (4) на рентгеновском предьонизаторе, $P = 10 \text{ atm}$; a — He, b — He + 4% CO_2 .

коэффициента усиления слабого сигнала (K_a), содержащая непрерывный CO_2 -лазер (ИЛГН-705), механический модулятор, фотоприемник ФСГ-22-3А1, синхронизатор модулятора со схемой запуска УВД. После прохождения отверстия модулятора импульс CO_2 -лазера заводится в разрядную камеру УВД и, отражаясь от глухого зеркала, возвращается (по другому оптическому пути) через ослабитель на фотоприемник. Коэффициент ослабления сигнала выбирался из условия работы фотоприемника в линейном режиме.

В связи с большой длиной усиливающей среды выходной сигнал почти на два порядка величины превышает зондирующий, поэтому сигнал с фотоприемника подавался на первый канал осциллографа Tektronix TPS-2024, а на втором канале регистрировался зондирующий импульс лазера с параметрами (чувствительность и развертка), обеспечивающими максимальную точность измерения. Измерения K_a проведены при различном содержании компонентов молекулярных газов и различ-

ных значениях зарядного напряжения ГИН в области давлений 1–10 atm. В газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 1:1$ при давлении 10 atm и 5% содержании молекулярных газов значение K_a составляло 0.02 cm^{-1} . В области давлений $P = 1\text{--}6 \text{ atm}$ при увеличении доли молекулярных газов в активной смеси и соответствующем повышении значений параметров W и E_0/P измеренный коэффициент усиления слабого сигнала достигал 0.025 cm^{-1} .

Генерация пикосекундных CO_2 -лазерных импульсов тераваттного уровня мощности

В настоящее время в России (ИОФ РАН, Москва) осуществляется проект „Picasso“, направленный на генерацию цуга импульсов CO_2 -излучения с перестраиваемой длительностью 2–100 ps и временным расстоянием между импульсами 10 ns [14]. Задающий генератор (ЗГ) установки состоит из первичного источника ИК-излучения: одномодового, одночастотного ТЕА-лазера с инжекционным управлением от непрерывного стабилизированного лазера и германиевого ключа, управляемого Nd-лазера. Задающий генератор формирует импульсы длительностью 175 ps и мощностью 0.1 MW. В качестве усилителя мощности, работающего в регенеративном режиме, используется разработанный в НИИЭФА [9] модуль с активным объемом $0.05 \times 0.05 \times 0.55 \text{ m}$ и удельным энерговыделением $60 \text{ J/l} \cdot \text{atm}$. На установке „Picasso“ получена генерация цуга 200 ps импульсов мощностью $\sim 10 \text{ GW}$ с полной энергией 22 J. В настоящее время на стенде проводятся исследования, направленные на сокращение длительности импульса ЗГ и повышение надежности работы усилителя мощности при давлении рабочей смеси $\sim 10 \text{ atm}$.

В России существуют еще две пикосекундных CO_2 -лазерных установки существенно меньшей мощности.

В Институте ядерной физики при МГУ работает установка для генерации одиночных импульсов длительностью 30 ps мощностью 10 MW [15]. Короткий импульс излучения формируется с использованием плазменного затвора и кюветы, содержащей CO_2 , при температуре 400°C . Физика этого процесса (так называемый OFID-метод) подробно описана в работе [16]. В настоящее время на этой установке проводятся эксперименты по ускорению электронов в схеме с дифракционной решеткой.

В РНЦ „Прикладная химия“ (Санкт-Петербург) ведутся исследования по генерации $10 \mu\text{m}$ пикосекундных импульсов в системе с оптической накачкой импульсным химическим HF-лазером (на линии 1P8) в рамках проекта МНТЦ № 2678 [17]. На этой установке получена демонстрационная генерация $10 \mu\text{m}$ импульсов с энергией 2.7 J (в активном объеме 0.14 l) в смеси $\text{CO}_2:\text{H} = 1:3$ при давлении 4 atm. Рассчитанный по результатам этого эксперимента коэффициент усиления слабого сигнала равен 0.05 cm^{-1} . Эффективность энергетического преобразования излучения HF-лазера в ИК-излучение составила 4.7%. Достоинство этого метода накачки заключается

меры и радиусы кривизны зеркал выбраны из условий поддержания плотности энергии излучения, близкой к энергии насыщения активной среды на каждом проходе луча. Диаметр светового пучка на выходе УВД — 0.1 м. Численное моделирование этого процесса показало, что для достижения на выходе оконечного усилителя мощности ≥ 1 TW необходимо обеспечить коэффициент усиления слабого сигнала $\sim 0.02 \text{ см}^{-1}$, что вполне реально для разработанной нами конструкции УВД.

Заключение

Реализация предложения, связанного с конструктивным объединением разрядной камеры с промежуточным накопителем энергии в виде водяного конденсатора, и повышение напряжения на рентгеновском предыонизаторе до 200 kV позволили получить устойчивый объемный разряд накачки усилителя при давлении газовой смеси 10 atm и содержании молекулярных газов в активной среде 5–7% с удельным энергокладом 100–130 J/l · atm, а коэффициент усиления слабого сигнала достигает 0.02 см^{-1} . По совокупности полученных параметров разработанный усилитель превышает известные нам аналоги.

Дальнейшие работы по совершенствованию усилителя направлены на:

— повышение стабильности и надежности работы LC-генератора и источника питания предыонизатора при максимально возможных значениях их пикового напряжения;

— исследование влияния соотношения концентраций молекулярных газов ($\text{CO}_2:\text{N}_2$) на коэффициент усиления активной среды в допустимых пределах устойчивости разряда накачки по величине удельного энергоклада в активную газовую смесь;

— увеличение эффективности работы устройства предыонизации газовой смеси при давлении в разрядной камере ~ 10 atm, в частности, за счет замены Al-фольги на тормозную мишень из материала с более высоким атомным номером Z для более эффективного преобразования энергии электронного пучка в рентгеновское излучение;

— повышение ресурса работы основных элементов УВД, подверженных воздействию токов высокой плотности (высоковольтных разрядников, электродов разряда накачки, взрывоэмиссионного катода вакуумного диода предыонизатора).

Авторы выражают благодарность сотрудникам Лазерного центра Коршунову Ю.И. и Перфильеву С.А. за выполнение конструкторских разработок, а также Васильеву А.В., Комарову В.С., Котову С.М., Скрипуну В.Н. и Хахаеву М.В. за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена по проекту МНТЦ № 2521 и в этой связи считаем необходимым выразить признательность куратору проекта Малахову Ю.И. за весьма квалифицированное руководство работой.

Список литературы

- [1] Kimura W.D., Cambel L.P., Ben-Zvi I. et al. // Proc. 2001 Partial Accelerator Conf. Chicago, USA 2001. P. 103–107.
- [2] Cambel L.P., Dilley C.E., Pogorelsky I.V. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2000. Vol. 28. N 4. P. 1143–1151.
- [3] Kimura W.D., Cambell L.P., Dilley C.E. et al. // Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams. 2001. Vol. 4. P. 101 301.
- [4] Zhou F., Cline D.B., Liu Y. // Proc. EPAC-2002. Paris, France, 2002. P. 1004–1006.
- [5] Tsunemi A., Endo A., Pogorelsky I.V. et al. // Proc. 1999 Partial Accelerator Conf. New York, USA, 1999. P. 2552–2554.
- [6] Kashiwagi S., Washio M., Pogorelsky I.V. et al. // Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. 2000. Vol. A455. P. 36–40.
- [7] Yakimenko V., Pogorelsky I.V. // Phys. Rev. Special Topics-Accelerators and Beams. 2006. Vol. 9. P. 091 001.
- [8] Tochitsky S.Ya., Ralph J.E., Sung C. et al. // J. Appl. Phys. 2005. Vol. 98. P. 026 101.
- [9] Baranov G.A., Kuchinsky A.A., Tomashevich V.P. et al. // Plasma Devices and Operation. 1997. Vol. 5. P. 199–213.
- [10] Баранов Г.А., Кучинский А.А. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 3. С. 219–229.
- [11] Астахов А.В., Баранов Г.А., Перфильев С.А. и др. Устройство накачки широкоапертурного лазера или усилителя высокого давления. Патент на изобретение № 2212083 от 10.09.2003.
- [12] Карнюшин В.Н., Солоухин Р.И. // Микроскопические и молекулярные процессы в газовых лазерах. М.: Атомиздат, 1981. 200 с.
- [13] Bruce F.M. // Instr. J. Electr. Eng. 1947. Vol. 94. P. 138.
- [14] Apollonov V.V., Kazakov K.Kh., Pletnuev N. et al. // Proc. of SPIE. 2003. Vol. 5120. P. 291–296.
- [15] Zayarniy D.A., Alekseev Yu.K., Iskhaknov B.S. et al. // Proc. RUPAC XIX. Dubna, Russia, 2004. P. 216–218.
- [16] Kwok H.S., Yablonovich E. // Appl. Phys. Lett. 1977. Vol. 30. N 3. P. 158–160.
- [17] Aleksandrov B.S., Arsenjev A.V., Azarov M.A. // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4184. P. 315–316.
- [18] Baranov G.A., Kuchinsky A.A., Kotov S.M. et al. // Proc. ICONO/LAT. Minsk, Belarus, 2007. Vol. L01–42. P. 94.
- [19] Alcock A.J., Corkum P.V. // Can. J. Phys. 1979. Vol. 57. P. 1280–1290.
- [20] Apollonov V.V., Kazakov K.Kh., Pletnuev N.V. et al. // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3343. P. 750–758.
- [21] Filip C., Narang R., Tochitsky S.Ya. et al. // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. N 18. P. 3743–3747.
- [22] Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Кучинский А.А. и др. // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 12. С. 43–48.
- [23] Платоненко В.Т., Таранухин В.Д. // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 11. С. 2246–2256.
- [24] Ageichik A.A., Gromovenko V.M., Rezunkov Yu.A. et al. // Proc. ICONO/LAT. Minsk, Belarus, 2007. Vol. L01–25. P. 93.
- [25] Виттеман В. CO_2 -лазер. М.: Мир, 1990. 360 с.