

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 621.3.038.613

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ  $\text{CO}_2$ -ЛАЗЕР  
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ  
ДЛЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОГО ГЕНЕРАТОРА  
ВЫСОКОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

© 2012 г. Ю. А. Сагов, Б. Ю. Шарков, Н. Н. Алексеев, А. В. Шумшуров, А. Н. Балабаев,  
С. М. Савин, А. Д. Белокуров, И. А. Хрисанов, К. Н. Макаров

*ГНЦ РФ “Институт теоретической и экспериментальной физики”*

*Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25*

Поступила в редакцию 31.05.2011 г.

Описано устройство лазерного генератора, стабилизированного по частотному составу и интенсивности выходного излучения. В основе генератора лежит импульсный  $\text{CO}_2$ -ТЕА-модуль с накачкой самостоятельным разрядом, работающий в импульсно-периодическом режиме с частотой до 3 Гц. Базовой частью газоразрядного модуля является схема формирования самостоятельного однородного разряда в рабочем объеме смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$  при атмосферном давлении. Она основана на генерации высоковольтного импульса специального профиля, при котором обеспечиваются высокая надежность возбуждения разряда и воспроизводимость разрядных характеристик от импульса к импульсу. Применение в оптическом генераторе гибридной схемы позволяет выделить единственную продольную моду в спектре выходного излучения и, тем самым, устранить нежелательные интерференционные явления, приводящие к нестабильности мгновенных значений интенсивности излучения. В процессе разработки генератора были получены оптимальные рабочие параметры гибридной схемы, обеспечивающие высокое качество и воспроизводимость пространственно-временных и энергетических параметров лазерного излучения.

## ВВЕДЕНИЕ

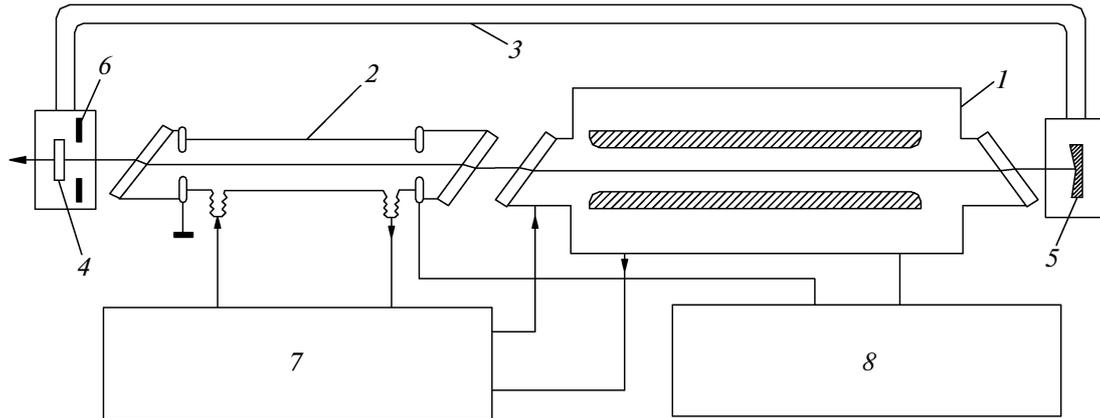
Создание лазерного генератора, работающего в импульсно-периодическом режиме со стабильными и воспроизводимыми от импульса к импульсу выходными характеристиками генерируемого излучения, актуально для многих практических приложений. Описанный в данной статье прибор разработан для лазерного ионного источника, применяемого в ускорительно-накопительном комплексе ИТЭФ-ТВН (тераваттный накопитель) в качестве импульсного лазерно-плазменного генератора пучка высокозарядных тяжелых ионов для последующего их ускорения в циклическом режиме в линейных и кольцевых ускорителях до энергии от 100 МэВ/нуклон до 4 ГэВ/нуклон. Требования к нему определяются круглосуточным режимом его работы с частотой импульсов ускоренного пучка (и соответственно срабатывания лазера) до 1 Гц и эксплуатационным ресурсом до 4000 ч в год, а также мерой надежности этого элемента, который фактически определяет стабильность и долговременную работу всей сложной и дорогостоящей ускорительной установки.

Для создания высокоэффективного лазерно-плазменного генератора, как показали более ранние исследования [1, 2], необходима разработка лазерного драйвера, построенного по генераторно-усилительной оптической схеме с задающим ге-

нератором, характеризуемым высокостабильными выходными характеристиками излучения. Они могут быть достигнуты в результате решения двух основных задач: разработки надежного способа возбуждения однородного самостоятельного разряда в рабочем объеме резонатора  $\text{CO}_2$ -лазера при атмосферном давлении и стабилизации мгновенных значений интенсивности излучения устранением условий интерференции нескольких мод колебаний, неизбежно возникающих в резонаторе в процессе генерации излучения.

Стабилизация возбуждения разряда решает проблему воспроизводимости энергии излучения, однако не гарантирует повторяемости формы импульса, интенсивности (мощности) излучения из-за большого числа продольных мод колебаний, возникающих в резонаторе, интерференция которых носит хаотический характер и приводит к нестабильности интенсивности излучения.

Для стабилизации формы импульса интенсивности излучения необходимо выделение одной моды колебаний в генерируемом излучении, в которую накачивается вся запасенная в рабочей смеси энергия. Среди множества способов решения этой задачи получила распространение схема лазера, называемая гибридной [3, 4]. Она основана на использовании внутри резонатора лазера двух модулей газовой смеси соответственно высо-



**Рис. 1.** Блок-схема гибридного генератора. 1 – модуль атмосферного давления; 2 – трубка низкого давления; 3 – оптическая скамья; 4 – плоское полупрозрачное зеркало; 5 – медное сферическое зеркало; 6 – диафрагма с калиброванным отверстием; 7 – газовакуумный блок; 8 – блок электропитания.

кого (атмосферного) и низкого давления. В качестве модуля низкого давления применяется трубка низкого давления (т.н.д.) с тлеющим разрядом, генерирующая узкую спектральную линию излучения, определяемую доплеровским спектральным контуром. При определенных условиях ширина линии может быть сравнима с межмодовым расстоянием для продольных колебаний оптического резонатора, что позволяет настроить резонатор на генерацию излучения на единственной частоте, выделенной из полного спектра возможных частотных мод.

## 1. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ГЕНЕРАТОРА

Блок-схема гибридного генератора приведена на рис. 1. Основными составными частями генератора являются газоразрядные модули высокого (атмосферного) (1) и низкого (2) давления, оптическая скамья 3, на которой смонтирован полусферический резонатор, образованный медным сферическим зеркалом 5 и плоским полупрозрачным зеркалом 4, перед которым установлена диафрагма 6 с калиброванным отверстием, допускающим возбуждение генерации только на основной поперечной моде  $TEM_{00}$ . Блоки 7 и 8 предназначены для газовакуумного снабжения разрядных модулей, а также для их импульсного высоковольтного питания.

Для возбуждения тлеющего разряда в трубке низкого давления использовалась достаточно хорошо отработанная схема, приведенная в [5, 6].

## 2. СХЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ НАКАЧКИ МОДУЛЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

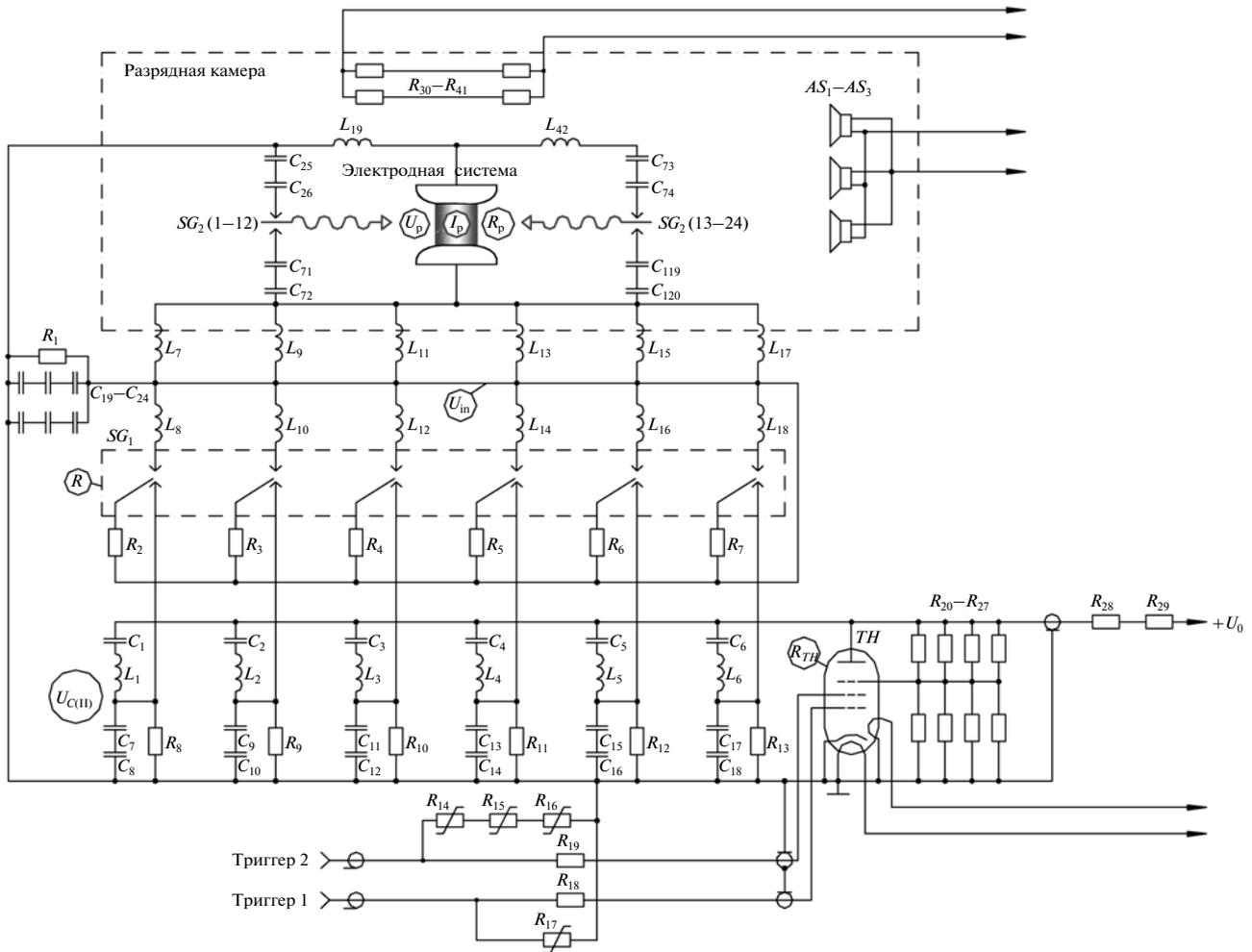
В описываемом здесь устройстве для возбуждения объемного разряда при атмосферном давлении использована идея, сформулированная в

[7] и заключающаяся в формировании импульса возбуждения и питания разряда, изменяющегося во времени так, чтобы обеспечивалось разделение стадии предыонизации разрядного объема и основного вклада энергии, при котором достигаются наилучшие условия для накачки требуемых колебательно-вращательных уровней возбуждения рабочих газов.

Разработанная схема питания модуля высокого давления приведена на рис. 2. Основная часть схемы – это генератор высоковольтных импульсов, с помощью которого осуществляется возбуждение разряда в газовой камере между электродами, профилированными (модифицированный профиль Эрнста) по рекомендации, изложенной в [8].

Импульс напряжения  $U_p$  на профилированных электродах и тока разряда  $I_p$  формируются в процессе перекачки (при помощи коммутирующих элементов  $TH$  и  $SG_1$ ) энергии, запасенной в конденсаторном ряду  $C(I)$ , составленном из  $C_1-C_6$ , в промежуточный конденсаторный ряд  $C(II)$  – из  $C_7-C_{18}$  и далее в  $C(III)$  – из  $C_{19}-C_{24}$  и  $C(IV)$  – из  $C_{25}-C_{120}$ . Конструктивные индуктивности  $L(I)$  – ряд  $L_1-L_6$ ,  $L(II)$  – ряд  $L_7-L_{18}$  и  $L(III)$  – ряд  $L_{19}-L_{42}$  определяют динамику формируемых импульсов. Повышение напряжения на емкостях  $C(IV)$ , подключенных к искровым зазорам  $SG_2$  источников ультрафиолетового излучения, вызывает предварительную ионизацию разрядного объема и инициирует в этом объеме самостоятельный разряд. Для стабилизации объемной фазы разряда в этот момент принципиальную роль играет быстрый вклад энергии в разрядный объем из емкости  $C(IV)$  через минимальную индуктивность  $L(III)$ .

Формирование импульса тока разряда в рабочем объеме модуля моделировалось с учетом параметров электрических цепей, а также процессов ионизации и рекомбинации молекул в рабо-



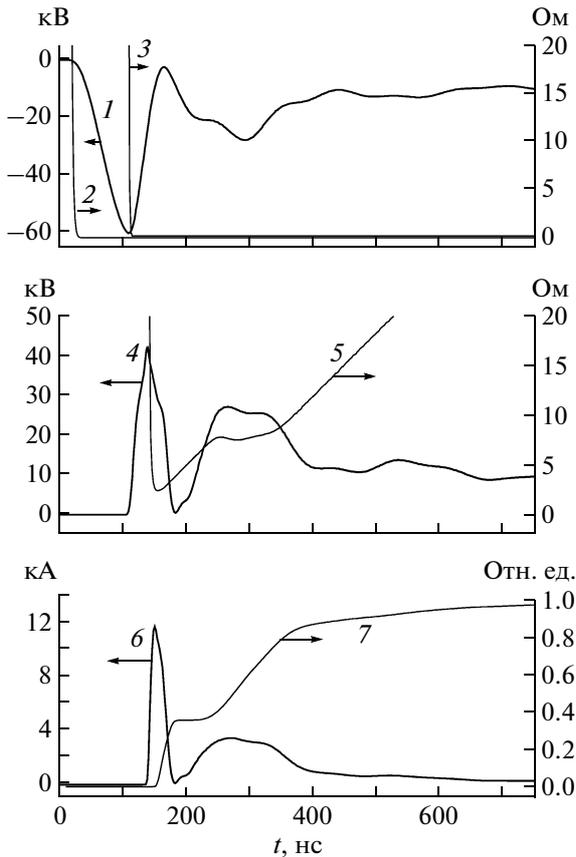
**Рис. 2.** Принципиальная схема питания газоразрядного модуля атмосферного давления.  $SG_1$  – многозазорный искровой разрядник,  $SG_2$  – искровые зазоры;  $TH$  – тиратрон СХ 2608;  $C_1$ – $C_6$  – Maxwell MDE37635-50кВ/7нФ,  $C_7$ – $C_{18}$  – ТДК4700 40кВ/2нФ,  $C_{19}$ – $C_{24}$  – КВИ-3 16кВ/680пФ,  $C_{25}$ – $C_{120}$  – КВИ-3 16кВ/470пФ;  $L_1$ – $L_{42}$  – конструктивные индуктивности;  $R_1$ – $R_{29}$  – резисторы,  $R_{30}$ – $R_{41}$  – нагреватели;  $AS_1$ – $AS_3$  – акустические динамики.

чей смеси [9] в предположении однородности электрического поля и электронной концентрации в межэлектродном промежутке. На рис. 3 представлены результаты расчета динамики основных электрических характеристик модуля в процессе развития разряда для типичного состава смеси  $CO_2 + N_2 + He = 4:1:5$  и зарядного напряжения  $U_0 = 37$  кВ.

Сопротивления тиратрона  $R_{TH}$  (кривая 2), многозазорного разрядника  $R$  (кривая 3) и искровых зазоров  $SG_2$  задавались при моделировании в виде экспоненциально спадающих функций с параметрами, соответствующими их техническим данным.

При замыкании при помощи тиратрона  $TH$  предварительно заряженного конденсаторного ряда  $C(I)$  на  $C(II)$  напряжение на  $C(II)$  поднимается (рис. 3, кривая 1) до приблизительно удвоенного значения зарядного напряжения  $C(I)$ , достаточного для пробоя разрядника  $SG_1$ , замыкающего

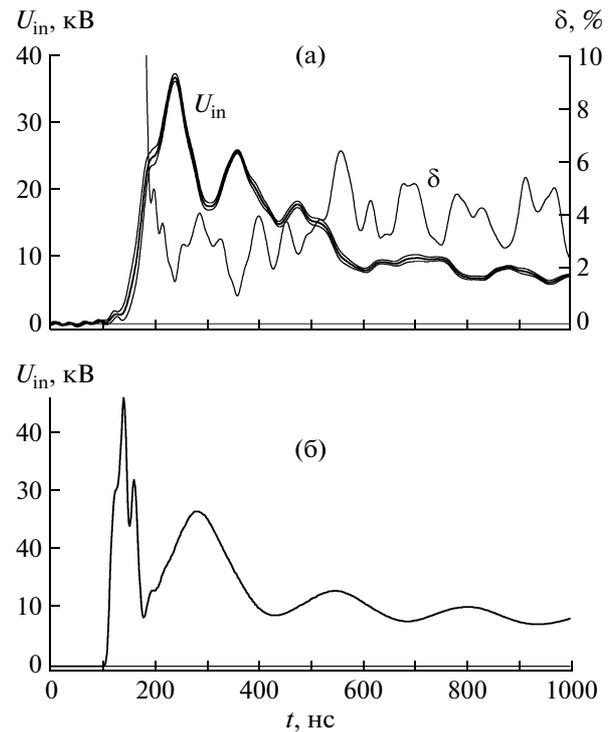
ряд  $C(I)$ – $C(II)$  на  $C(III)$  и  $C(IV)$  (кривая 3). Предыонизация газа ультрафиолетовым излучением от искровых источников  $SG_2$ , возникающая при достаточно низком напряжении на  $C(IV)$ , подготавливает зажигание самостоятельного разряда в объеме между профилированными электродами, обеспечивая быстрое развитие его однородной фазы. Невысокая электронная концентрация, возникающая в результате предыонизации, быстро нарастает в процессе развития самостоятельного разряда под действием достаточно высокой напряженности электрического поля ( $E/p \approx 25$  кВ/см · атм, кривая 4) и сопровождается формированием мощного короткого импульса тока (кривая 6), при котором рабочая смесь получает около трети энергии (кривая 7), при этом сопротивление разряда  $R_p$  уменьшается до 3 Ом (кривая 5). На следующей фазе протекания разряда осуществляется основной вклад запасенной энергии



**Рис. 3.** Данные расчета разрядных характеристик в генераторном модуле. Рабочая смесь  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} = 4:1:5$ ; зарядное напряжение  $U_0 = 37$  кВ;  $C(I) = 42$  нФ,  $C(II) = 6$  нФ,  $C(III) = 2.82$  нФ;  $L(I) = 180$  нГн,  $L(II) = 80$  нГн,  $L(III) = 20$  нГн; 1 – напряжение  $U_{C(II)}$  на второй емкости; 2 – сопротивление тиратрона; 3 – сопротивление многозарядного разрядника; 4 – напряжение на разряде; 5 – сопротивление  $R_p$  разряда; 6 – разрядный ток; 7 – энерговклад в разряд.

при существенно уменьшенной напряженности электрического поля ( $E/p \approx 15$  кВ/см·атм), приближающейся к величине, соответствующей оптимальной накачке колебательных уровней возбуждения молекул  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  электронным ударом. Для лазеров атмосферного давления на смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$  оптимальная величина напряженности поля находится в интервале значений 5–10 кВ/см [10, 11].

Низковольтные электрические цепи, приведенные на схеме рис. 2, предназначены для питания вспомогательного оборудования, обеспечивающего работу модуля в долговременном импульсно-периодическом режиме. Нагреватели  $R_{30}–R_{41}$  используются для нагрева оптических деталей и предотвращения разрушения оптических окон лазера, изготовленных из гигроскопических материалов (монокристаллы KCl). Прокачка газовой смеси лазерной камеры через встроенный в нее



**Рис. 4.** Временная форма импульса напряжения  $U_{in}$  на высоковольтном вводе в разрядную камеру лазерного модуля: а – усредненные осциллограммы  $U_{in}$  со среднеквадратическими отклонениями мгновенных значений и относительные значения отклонений  $\delta$ ; б – соответствующая расчетная форма.

холодильник реализуется с помощью акустических динамиков  $AS_1–AS_3$ , расположенных в экранированном корпусе сбоку от электродной системы вдоль ее оси. Перед динамиками установлена диафрагма с отверстием для организации направленного газового потока через электродный промежуток к холодильнику.

В результате достигнуто надежное функционирование модуля атмосферного давления с частотой повторения до 3 Гц при удельном вкладе энергии более 150 Дж/л в разрядный объем  $1.7 \times 1.7 \times 50$  см<sup>3</sup> и широком диапазоне состава смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ , включая достижение концентрации молекулярных газов до 50%, а доли углекислого газа до 40%. На рис. 4 представлены экспериментальные (рис. 4а) и расчетные (рис. 4б) данные временной зависимости напряжения на вводе в разрядную камеру (точка  $U_{in}$  на рис. 2).

В качестве измеренной формы импульса напряжения приведены результаты статистической обработки серии из 30 последовательных импульсов в виде усредненной величины напряжения  $U_{in}$  со среднеквадратическими отклонениями мгновенных значений  $U_{in} \pm \sigma$ , а также относительного отклонения от среднего  $\delta = \sigma/U_{in}$  в процентах. Следует отметить высокую степень воспроизво-

димости от выстрела к выстрелу: относительный разброс мгновенных значений не превышает 5% за основной промежуток вклада энергии в разряд. Расчетная форма импульса напряжения и полученная экспериментально имеют общие качественные черты, однако детальная картина в реальности отличается от рассчитанной по модели, предполагающей однородность напряженности поля и электронной плотности в межэлектродном промежутке, а также простейшее описание процессов коммутации цепей.

### 3. УСЛОВИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНОГО ЛАЗЕРНОГО ГЕНЕРАТОРА

В процессе исследования условий стабильной работы гибридного генератора настройки атмосферного (CO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> + He = 4 : 1 : 5) модуля лазера оставались неизменными. В качестве выходного зеркала резонатора использовалась плоскопараллельная пластина из германия, просветленная с одной стороны, с коэффициентом отражения ≈ 0.36.

Для возбуждения тлеющего разряда длиной 80 см в кварцевой трубке (т.н.д.) Ø25 мм использовалась импульсная схема питания, обеспечивающая плотность тока около 8 мА/см<sup>2</sup> через балластное сопротивление 100 кОм при напряжении горения 5 кВ. Оптимизация параметров т.н.д. проводилась в диапазоне давлений 2–10 Торр. Как известно [12], в таких условиях ширина контура усиления линии молекулы CO<sub>2</sub> определяется температурой газа и оценивается величиной  $\Delta_D \approx \approx 150$  МГц. С другой стороны, при длине резонатора  $l = 2.65$  м частотное расстояние между продольными типами колебаний составляет  $\Delta_l \approx c/2l \approx \approx 56.6$  МГц ( $c$  – скорость света). В таких условиях становится возможным возбудить генерацию на единственной частоте, совпадающей с центром спектральной линии CO<sub>2</sub>, если т.н.д. включается с опережением по отношению к запуску атмосферного модуля.

Для получения стабильного излучения на одной продольной моде проводилось экспериментальное исследование работы гибридной схемы лазерного генератора в зависимости от давления смеси CO<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> + He = 1 : 1 : 8 в т.н.д. и времени задержки запуска атмосферного модуля  $\tau$ . Измерения характеристик импульса излучения гибридного генератора показали, что в зависимости от условий реализуется три характерных вида импульса излучения: а) гладкий, соответствующий одночастотной генерации; б) синусоидальный, с регулярным периодом межмодовых колебаний  $T = 2l/c$ , соответствующий двум частотам в спектре; в) модулированный высокой частотой, типичный для самосинхронизации продольных мод в лазере высокого давления. Для характеристики формы импульса излучения в первых двух

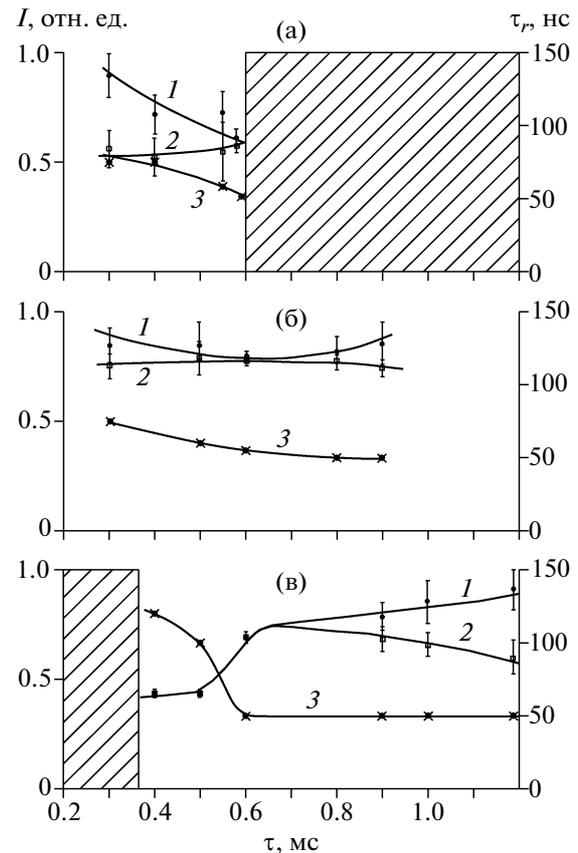


Рис. 5. Результаты исследования глубины модуляции и длительности фронта импульса излучения гибридного генератора при изменении времени задержки запуска  $\tau$  для различных давлений смеси в т.н.д.: а – 2 Торр; б – 4 Торр; в – 8 Торр. 1 –  $I_{max}$ ; 2 –  $I_{min}$ ; 3 – длительность фронта лазерного импульса  $\tau_f$ . Заштрихованная область соответствует самосинхронизации мод.

случаях регистрировалась глубина его модуляции вблизи центральной части, характеризуемая величинами  $I_{max}$  и  $I_{min}$ .

Проводилось также измерение длительности фронта нарастания импульса  $\tau_f$ , которая также оказалась зависящей от условий в т.н.д. Результаты измерений приведены на рис. 5 в виде зависимостей  $I_{max}$ ,  $I_{min}$  и  $\tau_f$  от времени задержки  $\tau$  запуска атмосферного модуля относительно т.н.д. для различных давлений рабочей смеси. Форма импульса генерации гибридного лазера, как показали эксперименты, носила статистический характер и могла меняться в некоторых пределах от выстрела к выстрелу при одних и тех же настройках схемы. Данные усреднялись по 25 измерениям, и в качестве ошибки принимались среднеквадратические отклонения. Заштрихованные области показывают условия, при которых происходит срыв генерации излучения в режим самосинхронизации большого числа продольных мод. Как видно,

срыв генерации возникает в двух противоположных случаях: при низких давлениях газа и большой задержке запуска или при высоких давлениях смеси и малой задержке запуска. Поскольку коэффициент усиления пропорционален количеству активных молекул, т.е. давлению смеси, эти условия сопровождаются соответственно низким и высоким уровнями шума излучения в резонаторе на момент включения основного лазерного модуля.

С наибольшей вероятностью одночастотный спектр в гибридном генераторе формируется при промежуточном уровне излучения рабочей частоты трубкой низкого давления: давление смеси в т.н.д. — 4 Торр, опережение включения  $\tau = 0.6$  мс (рис. 5б). Более низкая интенсивность шумов при пониженных давлениях в т.н.д. и больших задержках запуска (рис. 5а при  $\tau > 0.6$  мс) не приводит к возбуждению генерации на единственной моде и не меняет характера генерации модуля атмосферного давления, что проявляется в виде самосинхронизации большого числа мод.

При высоких давлениях смеси в т.н.д. и соответственно при больших темпах нарастания шума излучения в резонаторе одномодовая генерация также срывается в многомодовый режим (рис. 5в при  $\tau < 0.35$  мс), что можно объяснить влиянием насыщения усиления на зарождающейся частоте, что создает условия для нарастания интенсивности соседней собственной частоты резонатора. Хотя в этом режиме и существуют условия для устранения модуляций на импульсе излучения в интервале задержек  $\tau = 0.4-0.65$  мс, такой высокоинтенсивный режим т.н.д. приводит к уменьшению амплитуды основного импульса генерации и увеличению его фронта нарастания, что нежелательно для дальнейших приложений генератора.

Конкуренция двух соседних частот резонатора, попадающих в контур усиления т.н.д., при фиксированных параметрах трубки зависит также от длины резонатора: при симметричном расположении мод в контуре уширенной спектральной линии возможно возбуждение генерации на двух частотах. Для настройки генерации на одну продольную моду необходимо в этом случае изменить длину резонатора на четверть длины волны, что обеспечит необходимый сдвиг собственных частот и настройку соседней моды в центр контура усиления.

Так как длина волны излучения достаточно мала, механическая и температурная стабилизация длины резонатора играет важную роль при формировании одномодового спектра излучения. Прямые меры, направленные на стабилизацию длины резонатора, такие как применение точной механики, термостатирование, устранение вибраций и тепловых деформаций и др., позволяют обеспечить постоянство длины резонатора и со-

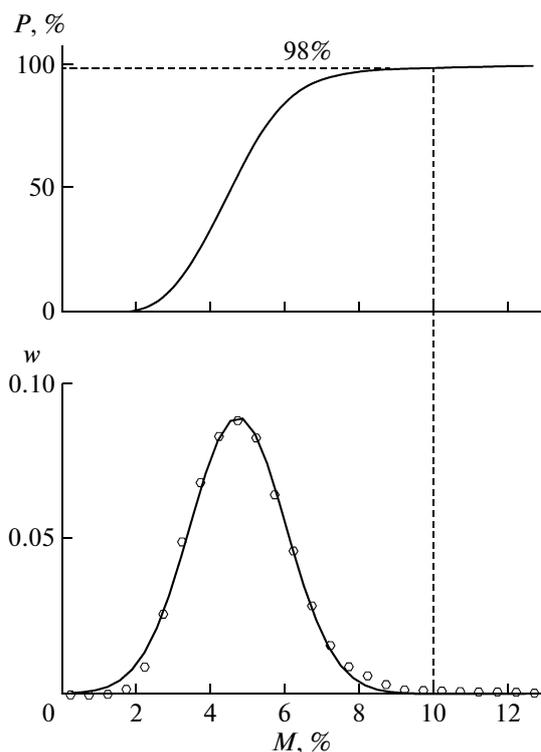
ответственно одномодовый режим генерации излучения только в течение ограниченного промежутка времени.

Кардинально проблема решается при помощи схемы динамической подстройки длины резонатора в процессе работы системы. Исполнительным устройством схемы является пьезоэлемент, на котором закреплено одно из зеркал резонатора, что позволяет менять длину резонатора  $l$  регулированием напряжения, подаваемого на пьезоэлемент от блока питания. Обратная связь осуществляется с использованием сигнала фотодетектора, на который подается отраженная часть излучения задающего генератора. Сигнал фотодетектора оцифровывается и обрабатывается процессором, вырабатывающим сигналы управления пьезоэлементом. Принцип распознавания модулированной формы импульса излучения основан на анализе его частотного спектра. Критерием для подвижки зеркала является появление в спектре излучения составляющих кратных частоте  $\Delta f \approx c/2l \approx 56.6$  МГц с амплитудой, превышающей пороговое значение. Смещение зеркала осуществляется в ту или иную сторону с устанавливаемым шагом  $\pm \delta l$ , что приводит в конечном итоге к устойчивой одночастотной генерации.

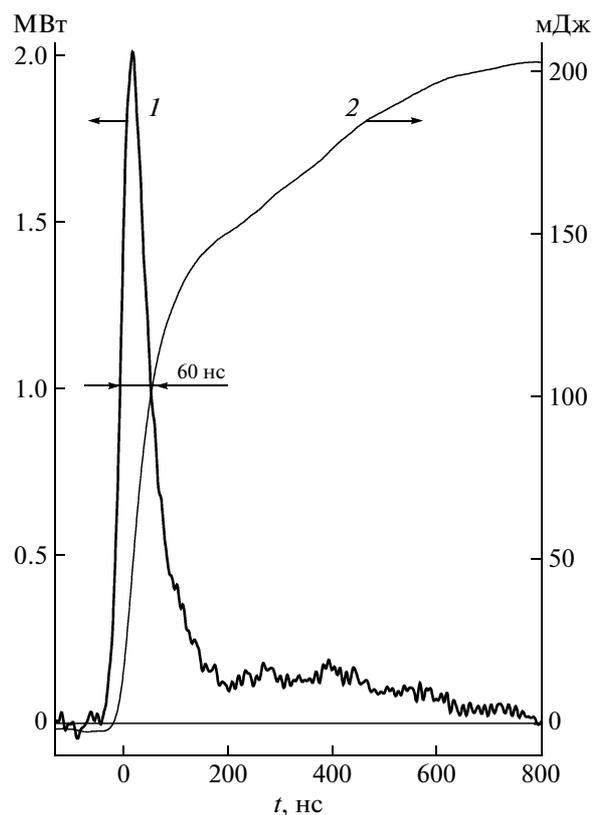
Схема работает в циклическом режиме с частотой повторения циклов регулирования положения зеркала, соответствующей частоте импульсов лазерного излучения. Долговременные испытания гибридного генератора с системой подстройки длины резонатора показали, что многочастотная генерация исключается полностью, а модуляция из-за присутствия второй моды сводится к минимуму. Результаты обработки статистических данных, характеризующих стабильность работы генератора за 14 ч (50000 выстрелов), приведены на рис. 6 в виде функции распределения  $P(M)$  и плотности вероятности  $w(M)$  модуляций излучения с глубиной  $M, \% = 100(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ . Видно, что 98% импульсов характеризуются модуляцией интенсивности не более 10%. Среднее значение модуляции интенсивности излучения не превышает 5% при среднеквадратическом отклонении не более 1.3%. При этом разброс среднего значения интенсивности лазера не превышал 1% по среднеквадратичному отклонению.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В большинстве прикладных задач, решаемых с помощью  $\text{CO}_2$  лазерного генератора, возникает требование на качество пространственно-временных характеристик излучения. Так в приложении к лазерно-плазменному генератору высокозарядных ионов важной характеристикой лазера является расходимость излучения, определяющая



**Рис. 6.** Результаты обработки данных долговременно-го теста гибридного генератора с системой подстройки длины резонатора: **а** – доля импульсов задающего генератора с модуляцией интенсивности не более  $M$ ; **б** – вероятность появления модуляции глубиной  $M$  (точки) и гауссова функция (сплошная линия).



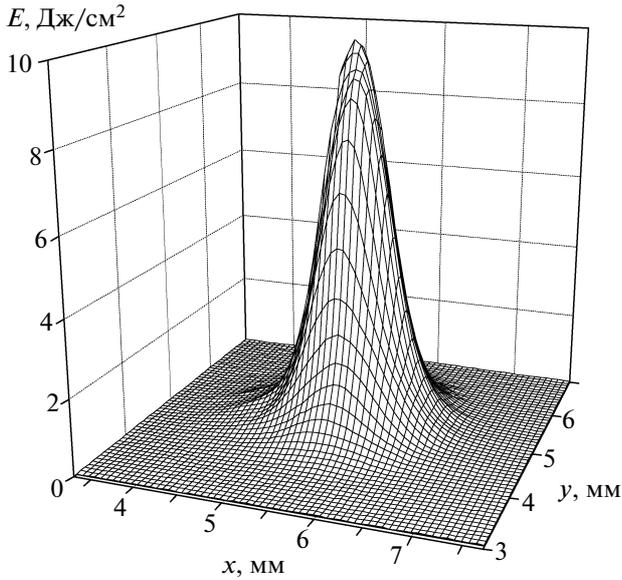
**Рис. 7.** Осциллограмма импульса излучения гибридного генератора (1) и интеграл по времени от мощности (2).

эффективность его фокусировки на мишень. К другим существенным для лазерно-плазменного генератора параметрам излучения относятся мощность первого пика генерации и доля энергии, распределенная в типичном для СО<sub>2</sub>-лазера низкоинтенсивном “хвосте”, составляющая обычно не менее половины полной энергии импульса и вызывающая генерацию большого количества низкозарядных ионов и паров материала мишени, что нежелательно в технологической схеме источника высокозарядных частиц.

Для исследования пространственных и временных характеристик гибридного генератора применялись инфракрасная камера и схема скоростной регистрации импульса излучения. Временная форма импульса лазера воспроизводилась с помощью быстрого фотодетектора в комбинации с цифровым осциллографом; временное разрешение методики было не хуже 1 нс. Одновременное измерение энергии калориметрическим приемником позволяло восстановить шкалу мощности импульса. Измерения показали, что полная энергия импульса достигает 200 мДж, при этом энергосодержание первого пика излучения длительностью 60 нс на полувывоте не менее 60% (рис. 7, кривая 2); пиковая мощность импульса

достигает 2 МВт (рис. 7, кривая 1). Такие высокие показатели пиковой мощности и энергосодержания первого пика обусловлены возможностью работы генератора при высоких удельных энергозатратах и оптимальных по кинетике лазерной генерации смесях газов с соотношением углекислоты и азота в диапазоне значений 3–4 и концентрацией гелия около 50% [13, 14].

Качество лазерного пучка в дальней зоне оценивалось по измерениям пространственного распределения излучения в фокальной плоскости объектива. Для этого излучение генератора, ослабленное до необходимого уровня фильтрами из СаF<sub>2</sub>, фокусировалось сферическим зеркалом ( $F=250$  см) и регистрировалось с помощью инфракрасной камеры PYROCAM–III. На рис. 8 приведены данные измерений распределения интенсивности пучка задающего генератора, сфокусированного на расстоянии 8.7 м от выходного зеркала с пространственным разрешением  $0.1 \times 0.1$  мм. Распределение интенсивности в фокальной плоскости, как оказалось, хорошо описывается функцией Гаусса с характерным диаметром  $\approx 1.5$  мм по уровню  $1/e$  ( $e$  – основание натурального логарифма). Соответствующая угловая характеристика излучения лазера приведена на



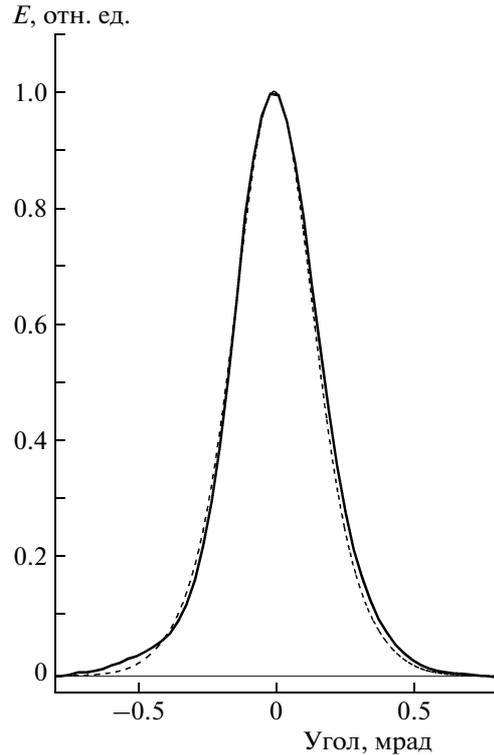
**Рис. 8.** Распределение интенсивности излучения гибридного генератора в фокальной плоскости объектива с  $F = 250$  см.

рис. 9. Расходимость пучка гибридного генератора по уровню  $1/e$  интенсивности в измеряемой точке можно оценить как  $4.5 \cdot 10^{-4}$  рад (сплошная линия), что хорошо согласуется с дифракционными расчетами гауссова пучка, описывающего фундаментальную моду резонатора задающего генератора (пунктирная линия). Расчеты выполнены по программе FOCUSD, описанной в [1] и учитывающей дифракцию лазерного пучка в аксиально-симметричном приближении.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование различных схемотехнических решений по созданию и стабилизации объемного самостоятельного разряда и выполнена разработка импульсного  $\text{CO}_2$ -лазера, характеризующегося высокостабильными выходными характеристиками, которые достигнуты благодаря надежному способу возбуждения однородного самостоятельного разряда в рабочем объеме резонатора  $\text{CO}_2$ -лазера при атмосферном давлении и стабилизации мгновенных значений интенсивности излучения устранением условий интерференции нескольких мод колебаний.

Стабилизация формы импульса интенсивности излучения и выделение одной продольной моды колебаний в генерируемом излучении получены в гибридной схеме лазера, основанной на применении внутри резонатора лазера двух модулей газовой смеси соответственно высокого (атмосферного) и низкого давления, а также комплекса схемотехнических решений, обеспечивающих их стабильную совместную работу.



**Рис. 9.** Угловая направленность излучения гибридного генератора в измеряемой точке. Сплошная линия — эксперимент, пунктирная — расчет.

В разработанной схеме накачки модуля атмосферного давления стабилизация однородного самостоятельного разряда обеспечивается формированием динамического процесса возбуждения и питания разряда таким образом, чтобы обеспечивалось оптимальное разделение стадии предыонизации разрядного объема и основного вклада энергии, при котором достигаются наилучшие условия для накачки требуемых колебательно-вращательных уровней возбуждения рабочих газов. В результате достигнуто надежное функционирование модуля атмосферного давления с частотой повторения до 3 Гц при удельном вкладе энергии более 150 Дж/л в разрядный объем  $1.7 \times 1.7 \times 50 \text{ см}^3$  и широком диапазоне состава смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ .

В качестве модуля низкого давления применяется трубка низкого давления с тлеющим разрядом, генерирующая узкую спектральную линию излучения, определяемую доплеровским спектральным контуром. При созданных условиях ширина линии выбрана сравнимой с межмодовым расстоянием для продольных колебаний оптического резонатора, что позволило настроить резонатор на генерацию излучения на единственной частоте, выделенной из полного возможного спектра частотных мод.

Условия стабилизации излучения гибридного лазерного генератора на одной продольной моде получены оптимизацией характеристик выходного излучения в зависимости от давления рабочей смеси в трубке низкого давления и задержки запуска атмосферного модуля.

Долговременная стабилизация характеристик лазерного излучения, связанная со стабильностью длины резонатора, решается традиционными методами точной механики, термостатированием, устранением вибраций и тепловых деформаций и др., а также с помощью прецизионной схемы динамической подстройки длины резонатора в процессе работы системы.

Измерения выходных параметров разработанной схемы показали, что полная энергия импульса излучения достигает 200 мДж при энергосодержании в первом пике излучения длительностью 60 нс на полувысоте не менее 60%; пиковая мощность импульса при этом составляет 2 МВт.

По высокому качеству пространственных и временных параметров, хорошей воспроизводимости характеристик в сочетании с возможностью работы в импульсно-периодическом режиме с частотой до 3 Гц в долговременной моде лазерный генератор не имеет аналогов по известным литературным источникам.

Разработка стабилизированного CO<sub>2</sub> лазерного генератора выполнена в рамках научной программы ИТЭФ по госконтракту № Н.4Е.45.90.10.1070 и при финансовой поддержке РФФИ по гранту 07-02-13602-офи-ц.

Авторы благодарят В. Межевова и А. Некрасова за помощь при разработке системы прокачки смеси в лазерной камере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Satov Yu., Sharkov B., Haseroth H. et al.* // J. Russian Laser Research. 2004. V. 25. № 3. P. 205.
2. *Sharkov B., Scrivens R.* // IEEE Trans. Plasma Phys. 2005. V. 33. № 6. P.1778.
3. *Wood O.R.* // Proc. IEEE. 1974. V. 62. № 3. P. 355.
4. *Girard A.* // Opt. comms. 1974. V. 11. № 4. P. 346.
5. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992.
6. *Энгель А., Штенбек М.* Физика и техника электрического разряда в газах. Пер. с нем. Т. 1–2. М.–Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1935–1936.
7. *Сатов Ю.А., Смаковский Ю.Б., Хоменко С.В.* Пат. 2096881 РФ // БИ. 1997. № 32. С. 378.
8. *Сатов Ю.А., Смаковский Ю.Б.* Пат. 2195753 РФ // БИ. 2002. № 36. С. 275.
9. *Feoktistov L.P., Charushin A.V., Louzhnov V.G. et al.* // J. Russian Laser Research. 2002. V. 23. № 6. P. 503.
10. *Басов И.Г., Данилычев В.Л.* // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 55.
11. *Бычков Ю.И., Осипов В.В., Савин В.В.* // Газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1977. С. 252.
12. *Ельяшевич М.А.* Атомная и молекулярная спектроскопия. Ч. 3: Молекулярная спектроскопия. М.: Физматлит, 1962.
13. *Адамович В.А., Баранов В.Ю., Смаковский Ю.Б. и др.* // Квантовая электрон. 1978. V. 5. № 4. С. 918.
14. *Lachambre J.-L., Gilbert J., Rheault F. et al.* // IEEE J. Quantum Electr. 1973. V. QE-9. № 4. P. 459.