

СОЗДАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ХИМИКО-ФИЗИЧЕСКИХ ЛАЗЕРОВ В ФИНЭПХФ РАН (АН СССР)

Введение. Среди энергетических проблем химической физики наряду с непосредственным превращением химической энергии в энергию лазерного излучения есть и проблема превращения химической энергии сначала в световую нелазерную, а потом в когерентное излучение. Разработка независимых от электрических сетей компактных и мобильных установок для получения оптического излучения — когерентного и некогерентного — была (да, в известной степени, и остается) весьма актуальной проблематикой, какой много занимались в СФМСХР ИХФ АН СССР — ФИНЭПХФ РАН в 1970–1980-е гг. В данном обзоре излагаются некоторые исторические сведения об этих работах, а также приводятся некоторые теоретические и экспериментальные данные об эффективности таких источников и об их возможных применениях.

Химическая энергия — древнейший источник света. Костры, факелы, свечи, керосиновые лампы использовались для освещения, сменяя друг друга, со времени появления человека на земле до «эры электричества». Энергия химических связей превращалась в результате реакции окисления в тепловую, разогретые продукты реакции светили и освещали, этот свет мог использоваться и для «спецназначения» — например, пламя в маяках или вспышка магния при фотографировании. Несмотря на древность реализации преобразования «химии» в свет, эффективными способами преобразования — да еще в высокоинтенсивные потоки — занимаются сравнительно недавно. Когда появились лазеры, накачка которых осуществлялась электроразрядными лампами-вспышками, запитываемыми от конденсаторов, появились, естественно, и предложения использовать альтернативные источники свечения — химические.

Энергия, заключенная в химических соединениях, все еще остается недостижимой по своей плотности по сравнению с другими носителями и накопителями. Удельная энергоемкость химиче-

ских систем — порядка 10^6 – 10^7 Дж/кг. В емкостных накопителях электроэнергии удельная энергоемкость обычно порядка 100 Дж/кг. Последнее время произошло бурное развитие литий-ионных аккумуляторов. Но и в самых лучших аккумуляторах энергоемкость больше чем на порядок уступает химическим энергоемким веществам ($7 \cdot 10^5$ против $4 \cdot 10^6$ Дж/кг), тем более что для их зарядки все равно требуется электросеть [1]. Поэтому так привлекательны были прямые способы преобразования химической энергии в электричество и в свет, в том числе в когерентное излучение.

Так, предлагалось накачивать твердотельные активные элементы (АЭ) светом ударной волны в ударной трубе, при детонации взрывчатых веществ (ВВ) и т. п. (см., например [2, 3]). Подобные опыты с малыми порциями ВВ проводились и в ОСР ИХФ АН СССР в 1960-е гг. И эти и другие известные подобные попытки окончились фактически безрезультатно. Тем не менее попытки применения «химии» для накачки твердотельных лазеров (т. е. создания по нашей терминологии химико-физических лазеров — ХФЛ), а также мощных импульсных источников некогерентного излучения продолжились и продолжают сейчас. Перспективные исследования велись и ведутся, в частности, по взрывным магнитогидродинамическим генераторам, взрывомагнитным генераторам, взрывным плазменно-вихревым источникам оптического излучения. Эффективность преобразования химической энергии ВВ в излучение в последних составила 5%–7,5% и считается авторами высокой (для достигаемых температур) [4, 5]. К более простым, несколько менее мощным, но и более эффективным устройствам относятся импульсные химические источники света с детонационным инициированием газовой смеси, занимающие свою, и важную, нишу в области применений. Их называют также химико-физическими лампами, а лазеры на их основе, с легкой руки В. Л. Тальрозе, — ХФЛ.

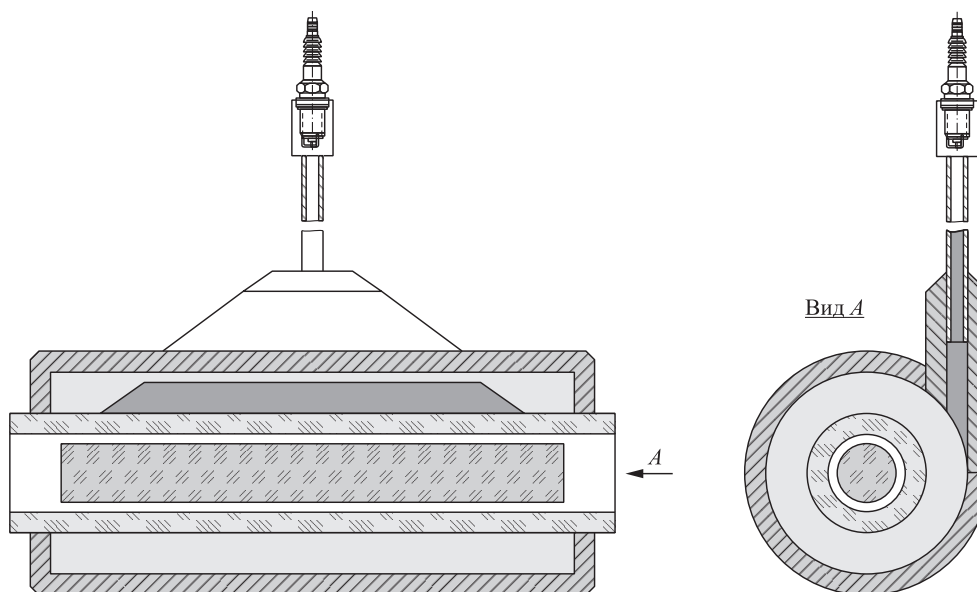


Схема одного из вариантов ХФЛ

В ХФЛ в отличие от химических лазеров выделение химической энергии и лазерная генерация происходят в разных местах. Химико-физические лазеры — это «физические» лазеры с «химической» накачкой.

Наиболее эффективно преобразовывать свет накачки в лазерное излучение будут те АЭ, для которых время распада верхнего лазерного уровня будет сравнимо с характерными временами свечения взрыва. При максимальной температуре, достижимой химическим путем, около 6000 К (см. ниже), основная часть излучения абсолютно черного тела (АЧТ) с такой температурой ($\sim 65\%$) лежит в диапазоне 300–10 000 нм с максимумом вблизи 500 нм. По этим причинам в ХФЛ разумно использовать неодимовое стекло или рубин, имеющие широкие полосы поглощения в указанном спектральном диапазоне и время жизни верхнего уровня порядка 1 мс.

Попытки осуществления подобных систем предпринимались в США в 1966–1967 гг., но в открытой литературе появлялись лишь отрывочные сведения. Так, Райтом [6] при создании оптического квантового генератора (ОКГ) на неодимовом стекле впервые был применен источник накачки на основе газовой смеси C_2N_2/O_2 . В [7] сообщалось о достижении порога (но и только) АЭ из рубина при его накачке излучением продуктов взрыва смеси дициан/кислород. Большей эффективности следовало ожидать у стекол, активированных неодимом, поскольку их пороговые энергии накачки гораздо ниже. С 1970 г. работы по накачке ОКГ излучением химических реакций были в США засекречены.

Ряд твердотельных лазеров реализован при использовании пиротехнической (гетерогенной) накачки. Длительность свечения таких источников обычно 5–15 мс, цветовая температура в пике около 4500–4800 К. Ряд ссылок на такие лазеры помещен в [8]. Низкая скорость гетерогенного горения не позволяет реализоваться адиабатическим температурам, и подобные пиротехнические источники были пригодны лишь для накачки АЭ с низкими порогами возбуждения. Кроме того, они, как правило, одноразового действия. Подобных недостатков лишены источники накачки на основе взрывных реакций газовых смесей, тем более — с детонационным инициированием.

Равновесное или неравновесное свечение? Чем интенсивнее излучение в реакции при постоянном давлении (пламена) или постоянном объеме (взрывы), тем лучше для преодоления порога генерации АЭ. Обычно интенсивность излучения ограничена термодинамическими (равновесными) температурами, развивающимися в реакции, но известны и случаи так называемой хемилюминесценции, когда яркостная температура превышает термодинамическую.

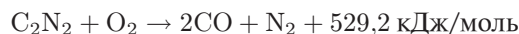
К известным хемилюминесцентным пламенам относятся сероуглеродное пламя низкого давления, излучающее сильнее, чем излучает АЧТ при термодинамической температуре пламени [9]. Это связано с неравновесными концентрациями активных частиц — атомов и радикалов — в пламени за счет протекания химической разветвленной реакции. Можно было надеяться на такое неравновесное излучение и в начале взрыва смесей се-

роуглерода с кислородом, в его химической фазе. Более того, предполагались некоторые механизмы, которые могли бы обеспечить неравновесность и в окончательной стадии взрыва, когда температура велика [10]. По этой причине первые попытки накачать твердотельный АЭ в 1973 г. были предприняты именно излучением взрыва смесей CS_2/O_2 . Как выяснилось впоследствии на основании спектральных и энергетических измерений излучения при взрывах смесей $\text{CS}_2/\text{O}_2 = 1/4$ атмосферного давления, свечение имеет тепловой, равновесный характер [11]. Яркостная температура соответствовала термодинамической или даже чуть меньше из-за неадиабатичности процесса, о накачке рубина не могло быть и речи. Ясно, что в расчетах ХФЛ (взрывы смесей атмосферного и большего давления) надо опираться исключительно на термодинамические температуры.

Максимальные температуры, достижимые в химических реакциях. Термодинамический анализ. Окисление дициана — реакция-рекордсмен. Горение некоторых металлов. Интенсивность излучения АЧТ пропорциональна четвертой степени его температуры, поэтому в химических источниках света не так важна теплота сгорания используемого горючего, сколь развивающаяся при этом температура.

Для успешного решения задачи создания эффективных ламп и соответственно лазеров необходимо было прежде всего выбрать такие химические реакции, которые обладают максимальными значениями адиабатических температур продуктов. Температура среды в ХФЛ ограничена сверху адиабатической температурой сгорания, которая связана с величиной теплового эффекта реакции и зависит также от прочности продуктов реакции, выбора реагентов и их соотношения. Физическая основа химического получения высоких температур — отсутствие в продуктах реакции многоатомных и двухатомных молекул со слабыми связями. В противном случае значительная доля теплового эффекта реакции тратится на их развал.

Данный вопрос проанализирован в работе [12]. Химические реакции рассмотрены как источники высоких температур, проведены термодинамические расчеты ряда реакционно-способных систем в условиях постоянного объема (взрыв) и постоянного давления (пламена). Следует отметить, что максимальная температура, достигаемая в химических реакциях, составляет ~ 6000 К и реализуется в таких превращениях, продуктами которых являются молекулы CO и N_2 , т. е. в реакциях окисления дициана C_2N_2 или дицианацетилена C_4N_2 кислородом, озоном или двуокисью азота. Для «базовой» реакции



при начальном давлении стехиометрической смеси 1 атм адиабатическая температура 5813 К. Пиковая мощность излучения АЧТ с такой температурой составляет 6,5 кВт/см².

Большинство горючих компонент, перспективных для их применения в ХФЛ — жидкости в обычных условиях хранения. Кислород сжижается при весьма низких температурах. Но расчеты авторов показывают, что применение в качестве окислителя легко конденсирующихся окислов азота не так сильно уменьшает достижимые температуры. Так, при замене кислорода на двуокись азота температура снижается до 5582 К. Это позволяет достигнуть компактности установки в целом.

Температура взрывов и пламен отличается из-за различия теплоемкостей C_p и C_v . Пламена менее горячие, чем взрывы смесей при постоянном объеме, тем не менее если вместо воздуха использовать кислород (как при кислородно-ацетиленовой сварке), то «жаропроизводительность» их бывает достаточно велика для многих применений в достаточно мощных источниках света. Сгорание ацетилена в смеси с кислородом сопровождается высокой температурой, достигающей 3200 °С. Пламя смеси дициан/кислород по расчетам достигает температуры ~ 4800 К. Относительно вредности и опасности этих компонентов можно заметить, что они применяются или применялись в промышленности при соблюдении, естественно, соответствующих правил безопасности.

При горении некоторых металлов, продуктами которого являются весьма прочные окислы этих металлов, теоретически достигается также очень высокая температура. Так, адиабатическая температура сгорания циркония в кислороде при давлении 5 атм составляет величину около 5900 К, но в отличие от газофазных реакций скорость протекания гетерофазных реакций столь низка (по сравнению со скоростью теплоотвода), что реально достигаемые температуры не превышают 4500 К [13]. Расчетная адиабатическая температура сгорания циркония в кислороде при постоянном объеме — ~ 6000 К. Однако в реальных условиях развивается температура 4650 °С (самая высокая для металлических горючих) [8]. Это связано с тем, что реакции окисления металлов являются гетерогенными и достаточно медленными процессами, поэтому значительную роль начинает играть теплоотвод и адиабатические температуры не реализуются.

Расчеты адиабатических температур позволяют отобрать рабочие смеси для задачи, предназначен-

ной для данного типа ХФЛ. Далее будем в основном говорить о ХФЛ на основе самой высокотемпературной системы C_2N_2/O_2 или C_2N_2/NO_2 . Мы не касаемся здесь локальных перегревов.

Чтобы яркостная температура химической лампы, определяющая реальный световой поток, была близка к адиабатической температуре сгорания, необходимо выполнение двух условий. Во-первых, смесь должна сгорать так быстро, чтобы за время сгорания не было заметных теплопотерь. Это условие после решения некоторых проблем выполнялось с помощью быстрого детонационного инициирования (см. ниже). Во-вторых, спектральные характеристики продуктов горения должны быть таковы, чтобы спектр излучения источника был близок к АЧТ.

Свечение продуктов высокотемпературных взрывов. Проблема «зачернения» спектра [14, 15]. Интенсивность и энергия свечения взрывов, определяющие эффективность накачки, зависят как от состава рабочей смеси, так и от ее начального давления. Об эффективности накачки следили по измерениям как амплитуды импульсов свечения на определенных длинах волн, так и непосредственно энергии излучения в диапазоне расположения полос поглощения неодимового стекла. В большом цикле опытов измерялась также интенсивность люминесценции неодимового стекла в зависимости от состава смеси и давления. Все методы дают близкие результаты. В «чистых» смесях максимальная интенсивность люминесценции, а значит, и мощность накачки, достигается для смесей с небольшим избытком топлива, т.е. дициана ($R = 100[C_2N_2]/([C_2N_2] + [O_2])$), примерно так же ведет себя зависимость суммарной энергии излучения, интенсивность свечения максимальна около $R = 55$. При увеличении давления или толщины излучательного слоя максимум люминесценции сдвигался ближе к $R = 50$ (стехиометрия), интенсивность люминесценции с ростом давления росла в исследованных пределах линейно, что говорило о фактически прозрачной среде. Чтобы достичь излучения АЧТ, надо было во много раз увеличивать произведение P_0d , что в условиях реальных установок было невозможно. Подтверждением сказанному являлось измеренная нами яркостная температура, на 600–800 К меньше адиабатической. Таким образом, «чистые» смеси явно не были подходящими для эффективной накачки неодимовых стекол.

Изучение спектра показало, что основными излучающими частицами являются C_2 и CN. Концентрации того и другого увеличиваются во много раз при переходе через стехиометрический состав, соответственно резко увеличивается интенсивность

свечения, при этом при остывании образуется много сажи (особенно при $R = 52$ и более), которая, оседая на стенки, делает их малопрозрачными. Это обстоятельство также делало невозможным использование таких смесей в разрабатываемых нами устройствах.

Проблема зачернения спектра и обеспечения максимальной яркости и мощности излучения была решена с помощью введения в смесь малых ($\sim 1\%$ (об.)) «чернящих» примесей, при сгорании которых образуются продукты с высокими излучательными свойствами. Проблема эта достаточно старая. Например, в [16, 17] существенного увеличения свечения оптически прозрачного пламени C_2N_2/O_2 добивались добавлением в горючую смесь небольших «присадок» BCl_3 . Кроме BCl_3 в процессе поиска были испытаны также PCl_3 , CrO_2Cl_2 , OsO_4 (удобен тем, что и начальный и конечный продукты газообразны), WF_6 , $TiCl_4$, VF_5 , $Fe(CO)_5$ и др. [14]. В результате этих поисков, в которых участвовали и А. П. Харитонов с Ю. Л. Москвиным, были отобраны наиболее эффективные вещества.

Так, например, добавление 2%–4% VF_5 увеличивало интенсивность люминесценции неодимового стекла примерно в 2 раза, а насыщение интенсивности наступало уже при $P_0 = 1$ атм.

Было установлено, что в тех случаях, когда наблюдался положительный эффект, излучающими частицами являлись моноокисы металлов. Для достижения адиабатической температуры и максимальной мощности излучения и определения длительности излучения и излученной энергии важен вопрос о скорости остывания продуктов взрыва, т.е. о теплообмене при взрывах в замкнутом объеме ХФЛ. Именно теплоотдачей и определяется световая эффективность или световой коэффициент полезного действия (КПД) химико-физических ламп. Этот аспект также был исследован в ФИНЭПХФ РАН в 1980-е гг.

Динамика остывания высоконагретых продуктов взрывов. Простая физическая модель. Световой коэффициент полезного действия химико-физических ламп. Сравнение с экспериментом [18, 19]. Как уже сказано, очень важно было экспериментально определить параметры теплоотдачи и теоретически исследовать вопрос о максимальном «выходе света» при высокотемпературных взрывах, а также сравнить теоретические и имеющиеся экспериментальные данные.

Решение задачи об остывании высоко нагретых продуктов в замкнутом объеме, получение временных зависимостей давления и интенсивности теплового свечения были бы желательны не только для проектирования ХФЛ, но и для других практически важных случаев. При некоторых не

очень сильных упрощениях уравнение остывания можно свести к следующему:

$$-\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\theta^4}{\tau_{\text{л}}} + \frac{\theta}{\tau_{\text{к}}}. \quad (1)$$

Здесь $\theta = T/T_m$, где T — средняя температура в объеме, T_m — начальная максимальная (близкая к адиабатической) температура; $\tau_{\text{л}}$ и $\tau_{\text{к}}$ — характерные времена лучистого и конвективного теплоотвода, полагаемые постоянными. Постоянство характерных времен остывания и отношения каналов остывания $k_m = \alpha_{\text{л}}/\alpha_{\text{к}} = \tau_{\text{к}}/\tau_{\text{л}}$ — это главное допущение модели: теплофизические и радиационные параметры при остывании изменяются мало. При этих предположениях уравнение (1) легко интегрируется:

$$\theta(t) = \left[(k_m + 1) \exp\left(\frac{3t}{\tau_{\text{к}}}\right) - k_m \right]^{-1/3}.$$

Отсюда получаются теоретические зависимости для экспериментально измеряемых величин — температуры $T(t)$, интенсивности излучения на данной длине волны $J_{\lambda}(t)$, давления $P(t)$, ширины импульса $\tau_{1/2}$ и т. п. Все они зависят от соотношения каналов радиационного и конвективного остывания $k_m = \alpha_{\text{л}}/\alpha_{\text{к}}$. Соотношение этих каналов не исследовалось ранее сколько-нибудь последовательно.

Эффективность ламп определяется не только максимально развиваемой мощностью свечения (или максимальной яркостной температурой), но и долей запасенной (в обычных лампах — электрической), в данном случае — химической (тепловой), энергии, переходящей в световую. Весьма сложное соотношение для величины светового КПД или «выхода света» $\eta = E/Q$ (где E — энергия, излучаемая продуктами взрыва; Q — энергозапас смеси, пропорциональный начальному давлению) аппроксимируется приближенным выражением:

$$\eta = \frac{E}{q\rho_0 V} = \frac{1}{\tau_{\text{л}}} \int_0^{\infty} \theta^4(d) dt \approx 0,18k^{0,4}. \quad (2)$$

Характерно, что даже при десятикратном превышении излучения над конвекцией излучается около половины энергозапаса смеси, остальное тепло уходит в стенки за счет конвекции.

Опыт показал, что большинство случаев достаточно хорошо описываются развитой моделью как качественно, так и по абсолютной величине. Экспериментально исследовались в основном временные профили давления и свечения, а также интегральная энергия излучения при взрывах смесей $\text{C}_2\text{N}_2/\text{O}_2$. Сравнение теоретических значений

с полученными показывает, что наша модель правильно передает все основные зависимости и позволяет вычислить важные параметры: $\tau_{\text{л}}$, $\tau_{\text{к}}$ и k_m . Так, для камер с характерными размерами $d \sim 4 \dots 5$ см для «черных» смесей получаем значения $\tau_{\text{к}} = 10$ мс и $k_m = 2,5 \dots 3,5$. Опытным путем установлено, что формула (2) дает верные величины η (около 20%) и правильно отражает характер поведения η , в частности зависимость от начального давления смеси p_0 : КПД и удельный энергосъём излучения заметно вырастают с увеличением p_0 в диапазоне $p_0 d = 0,5\text{--}7$ атм·см.

Из полученных величин $\tau_{\text{к}}$ можно сделать оценки и важнейшей характеристики теплоотвода — числа Нуссельта $\text{Nu} = \alpha_{\text{к}} d / \lambda_T$, где λ_T — теплопроводность газовой смеси. В наших условиях $\text{Nu} = 200 \dots 500$. Столь большая величина говорит о чрезвычайно развитой конвекции (турбулентной) и о том, что она составляет серьезную конкуренцию радиационному каналу остывания. С развитыми представлениями о причинах интенсивного теплоотвода появляется возможность оценивать и степень адиабатичности (фактически неадиабатичности) взрыва по известной скорости распространения пламени в данной системе. Оценки потери температуры на переднем фронте дают для взрывов $\text{C}_2\text{N}_2/\text{O}_2 \sim 1\%$ ($\sim 50^\circ$), для CS_2/O_2 — 3%–7%.

Проблемы инициирования и сохранения конструкции. Разрушающие факторы при взрывах в замкнутых объемах [20]. Первые опыты по накачке АЭ проводились со смесями CS_2/O_2 . Поскольку надо было управлять запуском взрыва, режим самовоспламенения для ХФЛ не подходил. Для управляемого инициирования применялись и чаще всего применяются в настоящее время такие способы, как поджиг смеси непосредственно в рабочем объеме автомобильной свечей, электрической спиралькой, так называемыми взрывающимися проволочками или импульсными ультрафиолетовыми (УФ) лампами.

В первых экспериментах 1973 г. использовалось фотолизное инициирование. На оси цилиндрической стальной кюветы помещалась кварцевая трубка $\varnothing 50$ мм, а внутри нее — две лампы ИФП-1200 и стеклянная трубка с АЭ (неодимовое стекло). На смеси $\text{CS}_2/\text{O}_2 = 1/4$ при начальном давлении 1,5 атм генерации достичь не удалось. Тогда стали использовать дициан. Так как дициан не имеет существенных полос поглощения в области пропускания кварца, в смесь $\text{C}_2\text{N}_2/\text{O}_2$ добавлялся сероуглерод, хорошо поглощающий УФ излучение ксеноновых ламп. При соотношении $\text{CS}_2/\text{C}_2\text{N}_2 = 1/6$ смесь поджигалась, при этом адиабатическая температура продуктов взрыва была незначительно меньше, чем в отсутствие CS_2 . Генерация не была

достигнута, в том числе и потому, что кварцевая трубка разрушалась ранее, чем достигался максимум температуры.

От фотоинициирования пришлось отказаться и перейти сначала к искровому (от автомобильной свечи непосредственно в объеме лампы) и вскоре к детонационному инициированию, когда детонационная волна инициировалась в трубке вне основного объема и перепускалась в него. В 1974 г. на экспериментальной установке с таким инициированием на АЭ ГЛС-1 $\varnothing 8 \times 80$ мм, защищенном плексигласовой трубкой, при начальном давлении смеси 1,4 атм был реализован режим свободной генерации с энергией 0,23 или 0,05 Дж с 1 см³ объема АЭ [12]. Лазерный сигнал часто имел форму пиков. Все стенки кюветы покрывала копоть, а внутренняя защитная трубка нередко разрушалась. Путь к 15-кратному стабильному увеличению энергии занял 5 лет, а потом за 5 лет показатель был увеличен еще в 12 раз.

Задача осуществления надежного, быстрого, относительно однородного и безопасного инициирования, особенно в устройствах значительного объема, оказалась сложной. Часто разрушалась центральная прозрачная защитная трубка, материалом которой последовательно были кварц, плексиглас, поликарбонат, сапфир. Был проведен тщательный анализ разрушающих факторов:

- (1) механическое воздействие адиабатического взрыва без детонации (давление увеличивается в 30 раз);
- (2) Махе-эффект;
- (3) детонационная, ударная и отраженная ударная волны;
- (4) срыв и реиницирование детонации, эффект пересечения;
- (5) термический удар.

Анализ показал, что наиболее сильное воздействие на конструкции ХФЛ оказывает даже не сама по себе детонационная волна в объеме, а, как ни парадоксально, срыв ее при выходе в объем, когда она затухает и переходит в дозвуковое горение. Как правило, происходит реиницирование детонации, но уже в сжатом (за счет поджатия фронтом пламени) газе, что дает гораздо больший разрушительный эффект, чем обычная детонация при $P_0 = 1$ атм. Ситуация усугубляется и нарушением какой-либо симметрии инициирования, нагрузки становятся еще более неоднородными.

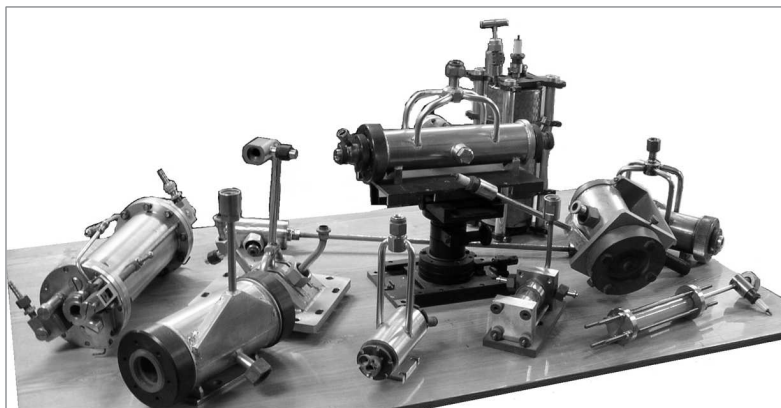
Мы не будем здесь разбирать особенности перепуска детонации. Исследование срыва детонации при переходе в большой объем, проведенное нами

и коллегами, показало наличие критических явлений по начальному давлению смеси и длине «разгонных» трубок [21–23]. Учет критических явлений подобного типа позволил в конце концов избежать разрушения конструкции. Более того, использование пересажой детонации, которая имеет место в коротких «разгонных» (инициирующих) трубках, существенно уменьшает систему инициирования.

Геометрия и конструкция систем инициирования [24]. Важным устройством ХФЛ является инициатор, с помощью которого зажигается и сгорает в том или ином режиме горючая смесь, создавая высокую температуру и, соответственно, интенсивное свечение. Как уже сказано, основным стало инициирование детонационной волной. Поджиг (обычно искровой, но могут использоваться и капсюль (пистон) или пьезозажигалка) горючей смеси осуществляется вне основного объема, в специальном канале (трубке) или системе каналов. В объем входит уже сформировавшаяся детонационная волна, которая в определенных условиях (см. выше) со скоростью несколько километров в секунду охватывает весь объем. Так, слой газа с характерным расстоянием в 5 см сгорает в детонационной волне за время 20 мкс, что гораздо меньше, чем время существования высоких давления и температуры



Физико-химический лазер импульсно-периодического действия



Различные конструкции ХФЛ

в сосуде таких размеров. Конечно, давление собственно в волне в несколько раз выше, чем усредненное по объему, но скорость инициирования, относительная симметричность и краткость взаимодействия вполне компенсируют этот недостаток, особенно для импульсных и импульсно-периодических (с небольшой частотой работы) устройств.

Исследовались и применялись различные конструкции, которые обеспечивали либо симметричный ввод детонационных волн с торцов цилиндрической взрывной камеры, либо тангенциальный ввод в цилиндрический сосуд (как разветвляющимися трубками, так и щелевым соплом). В последнем случае ввод мог быть как симметричный, так и несимметричный относительно оси взрывного сосуда. В обычных системах инициирования использовались один, два или четыре канала (обычно с внутренним диаметром 6 или 4 мм), отходящие от одной «разгонной» трубки. При миниатюризации взрывных устройств естественно встает задача использования в инициаторах тонких трубок-капилляров. Оцененный нами размер ячейки детонационного фронта в смеси дициан—кислород вблизи стехиометрического состава — около 0,5 мм, что в принципе позволяло надеяться на перепуск детонации через каналы малых поперечных размеров. Исследование детонации газовых смесей C_2N_2/O_2 в стеклянных и металлических капиллярах диаметром 2–0,4 мм дало возможность конструировать капиллярные детонационные инициаторы.

Все перечисленные конструкции инициаторов работали успешно при соблюдении указанных выше условий превышения критического (предельного) начального давления смеси.

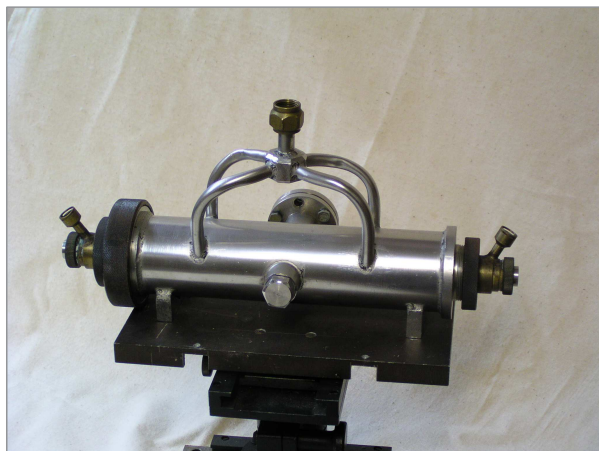
Конструкции ламп. Лазерные конструкции [14, 25]. Как следует из сказанного выше, очень важной проблемой при реализации ХФЛ являлось разрушение внутренних элементов ХФЛ. Проблема эта



Внутренняя часть многоэлементного ХФЛ типа «световой котел»

была решена, и в ФИНЭПХФ РАН были созданы безопасные (неразрушающиеся) конструкции ламп и лазеров. Были разработаны мощные многогоразовые импульсные химико-физические лампы различной геометрии: трубчатые, коаксиальные, торцевые, спиральные, многоэлементные (сотовые и типа «световой котел») с характерными размерами от 1 см до 0,5 м. Рабочие давления смеси составляли 1–2 атм. Излучение накачки было сосредоточено в основном в диапазоне 400–900 нм, его мощность составляла не менее 5 кВт/см², энергия — от 50 Дж до десятков килоджоулей, длительность — от 0,5 до 3 мс.

Материалом для ХФЛ служили, как правило, нержавеющая сталь и титан, но могли применяться и другие легкие прочные сплавы. Прозрачные элементы (окна, трубки и пр.) изготавливались из оргстекла или поликарбоната, но самые лучшие свойства показал лейкосапфир. Сапфировые трубки позволяли применять их даже в качестве обычных («трубчатых») ламп (при успешном решении



«Обычный» одноэлементный ХФЛ



Четырехэлементный ХФЛ

проблемы неразрушающего инициирования). Оказалось, что довольно большие нагрузки выдерживают и полиэтиленовые трубки. Для не самых «жестких» смесей они могут использоваться для создания спиральных ламп. При густой навивке (слой к слою) такие трубки представляют собой наиболее просто и быстро изготавливаемые конструкции ламп. Детонация в них обеспечивает с практической точки зрения очень быстрый охват свечением всей длины гибкой трубки.

Источники света описанного типа — химико-физические лампы — широко применялись нами

в ХФЛ. Лазерная генерация была получена на Nd^{3+} фосфатных стеклах на длине волны 1,06 мкм. Лазеры также имели разную геометрию и делились на одноэлементные и многоэлементные. Самые лучшие результаты (по энергии лазерного излучения с 1 см³ АЭ) были получены в коаксиальной одноэлементной конструкции. Такая конструкция представляет собой коаксиал, внешний цилиндр которого стальной, а внутренняя трубка — сапфировая, внутри нее помещается АЭ. Зеркала резонатора могут быть как внешними, так и нанесенными на торцы АЭ. Инициирование осуществлялось обычно «пауком» из четырех «разгонных» трубок, соединенных в месте расположения свечи поджига и тангенциально входящих в рабочий объем.

Помимо генерации в свободном режиме были получены гигантские импульсы, а также исследовалась возможность создания неодимовых усилителей с физико-химической накачкой, что оказалось также весьма перспективным направлением. Это связано с высокой однородностью накачки, более низкой тепловой нагрузкой на АЭ. Кроме неодимовых стекол разных марок и типоразмеров использовались еще АЭ из иттрий-алюминиевых гранатов и пр. Эффективно работал эрбиевый ХФЛ на 2,94 мкм.

Наиболее экономичными и лучшими в пересчете на 1 см³ конструкции являются многоэлементные (от 4 до 44) лазеры, накачиваемые многоканальными лампами типа сот или светового котла. Многоэлементные конструкции с параллельным и поперечным размещением АЭ и светящихся каналов в больших блоках прозрачной пластмассы с высокой ударной вязкостью позволяли накачивать сразу десятки АЭ и получать суммарные энергии в десятки и даже сотни джоулей. Сложностью, впрочем, ныне преодолеваемой, в таких конструкциях является сведение лазерных пучков в один. Лазерный КПД и удельная энергия генерации в многоэлементных устройствах приближаются к 1% и к 1 Дж с 1 см³ АЭ соответственно. В таком случае для получения 1 Дж лазерной энергии затрачивается ~ 100 Дж энергии химической или ~ 10 см³ смеси, или 0,014 см³ жидкого дициана. Для генерации 100 Дж лазерного импульса требуется 1 л газовой смеси или 1,4 см³ горючего.

Импульсно-периодические устройства. В обычных импульсных ХФЛ следующая вспышка может быть повторена через время ~ 10 с. Некоторые применения требуют большей частоты повторения. Для таких нужд разрабатывались химико-физические лампы импульсно-периодического действия. Периодичность их работы обеспечивалась с помощью электропневмоклапанов, выпускающих ра-



Многоэлементный ХФЛ с параллельным расположением АЭ и светящихся каналов

бочую смесь и выпускающих отработанные продукты, или поршней, вытесняющих отработанный газ. Могут применяться устройства и с газодинамическим затвором.

К импульсно-периодическим устройствам надо отнести и факельные источники инфракрасного (ИК) излучения. В них после поджига рабочей смеси в специальной камере с открывающейся при некотором давлении крышкой происходит выброс светящегося факела в воздух. После этого происходит автоматическое заполнение камеры новой порцией, закрытие ее крышкой и повторение вспышки-выброса. Поскольку главной целью здесь является получение мощного «отвлекающего» ИК излучения, требования к точности начального состава смеси и к остаточным продуктам в ее составе довольно мягкие; могут эффективно использоваться и сажеобразующие составы.

Другие рабочие смеси. Смесями C_2N_2/O_2 (адиабатическая температура взрыва ~ 6000 К) дело не ограничилось. Если химические источники накачки с высокими температурами сгорания применялись для создания мощных автономных лазерных систем на неодимовых стеклах, то для менее мощных лазеров на кристаллах иттрий-алюминиевых гранатов в качестве рабочего тела химической лампы использовались газовые смеси с существен-

но меньшими адиабатическими температурами, вплоть до обычного бытового газа. Естественно, они «допировались» малыми добавками, о которых шла речь раньше. Подобные работы велись в 1980-е гг. О реализации лазеров на $YAG-Nd^{3+}$ с накачкой химическими лампами с «низкотемпературными» смесями CS_2/O_2 и CO/O_2 было сообщено только в 2001 г. [26]. Это была первая открытая публикация непосредственно по ХФЛ, не раскрывающая, тем не менее, ни одного важного конструкторского и технологического момента.

Адиабатическая температура взрывных реакций этих смесей не превышает 3700 К, что значительно ниже температуры сгорания дициана. По этой причине трудно ожидать превышения порога накачки АЭ из неодимового стекла, однако в случае использования ИАГ- Nd^{3+} для задач, не требующих высоких энергетических характеристик, применение подобных смесей обладает рядом преимуществ: не критичность состава исходных компонент смеси CS_2 , CO и O_2 , более низкие динамические нагрузки, возникающие во время взрыва, возможность работы химической лампы в частотном режиме. Кроме того, сероуглерод (CS_2) при комнатной температуре — жидкость с высоким ($\sim 0,4$ атм) давлением насыщенных паров. При использовании вместо кислорода NO_2 оба исходных компонента рабочей смеси — жидкости, что позволяло сделать весьма компактное устройство. Любопытно, что, как уже говорилось, именно с неудачных попыток накачать АЭ (рубин) излучением взрывов смесей CS_2/O_2 началась вся эпопея ХФЛ в СФМСХР ОИХФ.

Возможность непрерывной накачки химико-физического лазера. Разработка высокотемпературной камеры сгорания [27]. Автономные непрерывные высокоинтенсивные источники света на пламенах нужны для ряда задач, в том числе и гражданского назначения. Пламена менее горячие, чем продукты взрыва. Температуры взрывов и пламен отличаются из-за различия теплоемкостей C_p и C_v , тем не менее если вместо воздуха использовать кислород (как при кислородно-ацетиленовой сварке), то «жаропроизводительность» пламен достаточно велика для многих применений в достаточно мощных источниках света. Попытка, неудачная, использовать пламена дициана для непрерывной накачки АЭ была сделана в США еще в 1970 г. или несколько ранее. Активный элемент помещался между четырьмя горелками и, по-видимому, сильно нагревался, ибо о никакой системе охлаждения не сообщалось [28].

Непрерывный режим накачки анализировался в ФИНЭПХФ РАН в 1988–1989 гг. Термодинамические расчеты показывают, что температура пламен смесей дициана с кислородом при давлении

нии 1 атм достигает для эквимолярной смеси значения 4830 К. При отклонении от стехиометрии на 2% в ту или иную сторону температура падает на 5%–7%. Во взрыве, надо отметить, спадание менее резкое, что говорит о важности точной регулировки потоков реагентов и желательности обратной связи с выходными параметрами пламени, например интенсивностью его свечения.

Для повышения яркости свечения пламен в исходную смесь обычно вводят добавку, обеспечивающую наличие в продуктах молекулы с высокими излучательными свойствами, но при этом понижается, естественно, термодинамическая температура пламени. Возникает задача поиска оптимального количества добавки. Наши расчеты показывают, что максимальное свечение можно ожидать в смесях с содержанием горючего 48% и с добавлением в нее 3–4 % (об.) «присадок», «зачерняющих» спектр излучения. Температура пламени такой смеси при давлении 1 атм равна 3860 К, причем степень черноты среды с характерным размером излучающего слоя 3 см оценивается как 0,4. В области поглощения лазерного элемента 500–900 нм излучается $5 \cdot 10^{20}$ фотон/(см²с), или 180 Вт/см².

Температура пламени по сравнению с приведенной может быть повышена двумя способами. Увеличение давления, при котором происходит горение, с 1 до 10 атм дает прирост температуры всего на 150 К. Другой способ — предварительный нагрев смеси или ее компонентов — приводит к почти пропорциональному росту конечной температуры: каждые 100 К нагрева «внизу» откликаются 55 К «сверху». Предварительный нагрев исходных газов обычно осуществляется за счет рекуперации тепловой энергии — возвращения части нагретых продуктов реакции для подогрева исходной смеси. Ограничением здесь, естественно, является самовоспламенение смесей дициана с кислородом, которое наступает при температуре выше 700 °С.

В связи с описанными причинами понижения температуры в продуктах пламени предлагаемый путь предварительного нагрева реагентов за счет рекуперации представляется еще более привлекательным. Технически возможен (но и предельно) нагрев инградиентов до 900 К. Тогда температура пламени выбранного нами ранее оптимального состава смеси поднимается почти на 400 К — до 4200 К. Это позволяет надеяться на эффективное преобразование тепла в тепловое излучение, но, с другой стороны, требует значительных усилий в реализации. Мощность излучения в этом случае в диапазоне 500–900 нм достигает 200–250 Вт/см².

Удельное тепловыделение в процессе горения характеризуется величиной около 6 кДж/г смеси. В объеме около 1 л тепловая мощность по оцен-

ке может превышать 80 кВт (массовые расходы не менее 13 г/с). Устройством, реализующим такие мощности, может быть только высокотемпературная камера сгорания (ВТКС). Главными проблемами создания подобных ВТКС становятся подбор жаростойких конструктивных материалов для них и схема охлаждения, теплоотвод в реальных конструкциях. Ясно и то, что время штатной работы таких устройств порядка секунд. Для более низких температур и интенсивностей свечения соответствующие пламена могут гореть в течение часов без тепловых перегрузок. Отходящие нагретые газы могут использоваться для отопления, нагрева и приведения в действие различных устройств — вплоть до насосов или генераторов.

Предварительные опыты по ВТКС с модельными топливами показали принципиальную возможность реализации ХФЛ непрерывного действия. Совместные работы проводились в ЦИАМе с группой исследователей и конструкторов под руководством Ю.Я. Бурико. Исследовались течения в ВТКС с применением лазерных доплеровских измерителей скорости. На модельном топливе (пропановоздушная смесь) была выбрана оптимальная схема подачи охлаждающего газа. Подача газа-охлаждителя осуществлялась со сравнительно малой скоростью равномерно по всему сечению, причем расход его всего в 2 раза превышал расход горючей смеси.

Для современных низкопороговых кристаллов реальной кажется и идея использования в качестве средства накачки излучения процесса самораспространяющегося высококомпературного синтеза (СВС). Такие твердотельные лампы могут обеспечить (при решении задачи теплоотвода) квазинепрерывное и просто непрерывное (на время порядка секунды) лазерное излучение АЭ, примыкающего к СВС-лампе или накачиваемого через специальный светопровод.

Применения (приложения) химико-физических ламп и лазеров [29]. Важнейшие достоинства химических источников света и лазеров на их основе — автономность, мобильность, компактность, низкие массогабариты, отсутствие электричества и тем более высоковольтных сильноточных цепей, почти неограниченное состояние готовности.

Химико-физические лампы и лазеры имеет свои сферы применения, когда другие источники света применять опасно или невозможно. Даже батареи и аккумуляторы при хранении саморазряжаются, а химические реагенты практически вечны. Мощные многократные импульсные (импульсно-периодические и непрерывные) химико-физические лампы в соответствующих условиях могут найти (и отчасти находят) разнообразное применение: на-

качка АЭ в твердотельных лазерах, маяки, прожектора, ослепляющие устройства, аэродромные огни, ИК-ловушки, осветительные, фотоосветительные, сигнальные средства и пр.

Наши расчеты и эксперименты показывают, что импульсные химические источники света имеют весьма приличный КПД 20%, причем «остальное» тепло может также в существенной мере утилизироваться. В ХФЛ могут использоваться не только рекордные смеси C_2N_2/O_2 , но и многие другие, менее высокотемпературные. Современные низкотемпературные АЭ, а также специальные волоконные АЭ не требуют высоких яркостных температур для своей накачки и тем самым расширяют возможности применения ХФЛ.

Еще один интересный вариант лазерных применений связан с накачкой светом химико-физической лампы не твердотельных АЭ, а газообразной активной среды. Речь идет о возможности реализации фотодиссоционного лазера при диссоциации иодистого брома как солнечным светом [30], так и подобным ему по яркостной температуре свечением взрыва $C_2N_2 + O_2$. Такие работы также в свое время были начаты и прерваны по независящим от нас причинам.

Заключение. Итоги работ по физико-химическим лазерам. В ФИНЭПХФ РАН был создан большой набор эффективных химико-физических ламп и лазеров на их основе для различных применений. Проведенные расчеты и эксперименты показали весьма высокую эффективность преобразования химической (тепловой) энергии в свет и в когерентное излучение. В обычных для ХФЛ условиях световой КПД составляет $\sim 20\%$. Полученная высокая величина числа Нуссельта свидетельствует об интенсивном характере движения в среде нагретых продуктов взрыва, что имеет большое значение для ряда приложений. Модель серого тела, прилагаемая к проблемам остывания продуктов взрывов в ХФЛ, удовлетворительно описывает результаты качественно и количественно и может применяться в ряде других случаев (остывание продуктов взрывов ВВ, шаровых молний, сред, нагретых мощным импульсным разрядом).

На пути создания надежных неразрушающихся мощных лазерных установок для спецназначения было преодолено много препятствий, разрешено немало трудных проблем. Важно, что не только были созданы ХФЛ с отличными показателями, но и то, что при решении главной, и в общем-то прикладной, задачи были получены весьма интересные новые результаты по спектроскопии, детонации, теплофизике и пр. В целом работы велись на высоком уровне, не уступая, а по ряду показателей превосходя зарубежные. Химико-физические ла-

зеры привлекли внимание нескольких специализированных конструкторских бюро (КБ) и научно-исследовательских институтов (НИИ), решался вопрос даже о космическом базировании ХФЛ. Можно уверенно полагать, что лазерные работы в нашей стране, в том числе — в ИНЭПХФ, сыграли свою роль в том, что пресловутые «звездные войны» так и не разыгрались. Исследования по ХФЛ, выполненные в институте, хоть и были много лет закрытыми, имели высокую репутацию, повышая роль ИНЭПХФ в оборонном комплексе страны и принося институту до некоторых пор достойное финансирование. Все это было порушено в 1990-е гг.

Прекращение оборонного заказа в РФ остановило и дальнейшее практическое развитие ХФЛ. В идейном смысле, однако, появились некоторые идеи, связанные с ХФЛ, и некоторые «ответвления» от этой тематики. Световая накачка (в известной степени имитирующая солнечную) твердотельных активных сред подтолкнула нас применить химико-физические лампы и для накачки газовых сред. Проблема однородности накачки активной среды свела нас с ОВФ (обращение волнового фронта) зеркалами и так называемой «четырёхволновкой». Поскольку в ХФЛ используются реакционно-способные химические смеси, родилась идея применить подобные среды и для ОВФ.

В заключение данного обзора крайне важно отметить, что в работах по созданию и исследованию ХФЛ под общим руководством В. Л. Тальрозе принимали участие значительное количество научных сотрудников ФИНЭПХФ РАН — Е. Б. Гордон, Ю. Б. Шекк, С. Г. Хидиров, Л. И. Бубнова, отчасти Ю. Л. Москвин, А. П. Харитонов, Л. В. Дорофеева. В синтезах помогали Г. А. Капралова и С. Е. Наливайко, в конструкторских работах — А. В. Алымов, в машинных расчетах — В. М. Васильев, Ю. М. Петров, Н. А. Светличная. Сотрудничество велось с НПО «Астрофизика», НИИ «Зенит», ГОИ им. С. И. Вавилова, МГТУ им. Н. Э. Баумана, а также с некоторыми другими КБ и НИИ.

Литература

1. Scrosati B., Garche J. Lithium batteries: Status, prospects and future // J. Power Sources, 2010. Vol. 195. P. 2419–2430.
2. Laderman A. J., Byron S. R., Lawrence W. W. Shock tube pumping of laser crystals // Appl. Optics, 1969. Vol. 8. No. 8. P. 1743–1745.
3. Шмелев В. М., Марголин А. Д., Василик Н. Я., Крупкин В. Г., Волов В. Т., Волов Д. Б. Неэлектрический метод накачки твердотельных лазеров // ЖТФ, 1998. Т. 68. № 9. С. 67–70.

4. Буланов С. С., Есеев Р. У., Камруков А. С. и др. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения // ЖТФ, 2010. Т. 80. № 11. С. 87–94.
5. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. В. Е. Фортова. — М.: Наука, 2005. Т. XI. Кн. 4. С. 593–600.
6. Wright J. L. U.S. Govt. Res. Develop. Rep., 1966. Vol. 41. P. 15. (Chem. Abstr., 1967. Vol. 66. No. 120732z.)
7. Smith C. L., Homentovski E., Stokes C. S. Direct nondestructive pumping of ruby lasers by chemical means // Appl. Optics, 1967. Vol. 6. No. 6. P. 1130–1131.
8. Махров Е. Т., Черепов Н. И., Язев И. И. Лампа-вспышка разового действия — источник оптической накачки лазеров // Квантовая электроника, 1976. Т. 3. P. 2300–2301.
9. Кондратьев В. Н., Никитин Е. Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. — М.: Наука, 1973. 465 с.
10. Гордон Е. Б., Дроздов М. С., Москвин Ю. Л., Тальрозе В. Л. Сверхравновесное УФ излучение при самовоспламенении смеси $\text{CS}_2 + 4\text{O}_2$ атмосферного давления // Письма в ЖЭТФ, 1973. Т. 18. Вып. 9. С. 560–563.
11. Шекк Ю. Б., Ревин И. И., Дроздов М. С., Хидиров С. Г., Пластинин Ю. А. Спектральные характеристики и природа излучения при взрывах в замкнутом объеме II. Взрывы смесей $\text{CS}_2/\text{O}_2 = 1/4$ // Физика горения и взрыва, 1982. № 6. С. 96–103.
12. Гордон Е. Б., Дроздов М. С., Светличный С. И., Шекк Ю. Б., Васильев В. М., Тальрозе В. Л. О максимальных температурах, достижимых в химических реакциях // Физика горения и взрыва, 1980. Т. 16. № 2. С. 66–73.
13. Химическая энциклопедия. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. Т. 5. С. 384.
14. Светличный С. И. ХФЛ на неодимовом стекле с накачкой излучением реакции $\text{C}_2\text{N}_2 + \text{O}_2$: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. — Черноголовка, 1980.
15. Бубнова Л. И., Гордон Е. Б., Дроздов М. С., Светличный С. И., Тальрозе В. Л., Хидиров С. Г., Шекк Ю. Б. Спектральные характеристики и природа излучения при взрывах в замкнутом объеме. I. Взрывное окисление дициана // Физика горения и взрыва, 1982. Т. 18. № 5. С. 121–126.
16. Tischer R. L., Sheller K. The luminous characteristics of cyanogen-oxygen-boron trichloride diffusion flames // Combust. Flame, 1968. Vol. 12. P. 367.
17. Bubnova L. I., Svetlichny S. I., Khidirov S. G., Scheck Yu. B. Emissivity and the origin of emission from explosion in a constant volume combustion vessel. III // High Temp. Sci., 1983. Vol. 16. P. 361–376.
18. Бубнова Л. И., Дроздов М. С., Светличный С. И. Световая эффективность газового взрыва // II Всеросс. конф. «Необратимые процессы в природе и технике»: тезисы докл. — М.: Изд-во МГТУ, 2003. С. 298–300.
19. Дроздов М. С., Светличный С. И. Импульсные химические источники света // Известия РАН. Энергетика, 2017. № 1. С. 93–106.
20. Дроздов М. С., Бубнова Л. И., Светличный С. И. Разрушающие факторы взрывов в замкнутых объемах // 3-я Всеросс. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». Тезисы докладов. — М.: МГТУ им. Баумана, 2005. С. 24–26.
21. Дроздов М. С., Хидиров С. Г. Переход горения в детонацию и выход ее в объем // Тезисы докл. 11-го Междунар. симпозиума по процессам горения. — ПНР, 1989. С. 26.
22. Дроздов М. С., Хидиров С. Г. Критические явления в пересечатых детонационных волнах при резком расширении канала // 13-й Симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов. — Черноголовка, 2005. С. 141.
23. Васильев А. А., Дроздов М. С., Хидиров С. Г. Неклассические режимы дифракции волн в горючих смесях // Физика горения и взрыва, 2006. Т. 42. № 6. С. 137–143.
24. Дроздов М. С., Бубнова Л. И., Светличный С. И. Детонационное инициирование газовых взрывов в химико-физических лампах и лазерах // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. Сб. тезисов докл. Междунар. конф. «IX Харитоновские чтения». — Саров: ВНИИЭФ, 2007. С. 68–70.
25. Дроздов М. С., Бубнова Л. И., Светличный С. И. Импульсные химические источники света с детонационным инициированием. Тезисы докл. на IX Забабакхинских научных чтениях. — Снежинск: ВНИИТФ, 2007. С. 84.
26. Дроздов М. С., Бубнова Л. И., Светличный С. И. Лазер на YAG-Nd^{3+} с накачкой химической лампой // Тезисы докл. Всеросс. конф. «Необратимые процессы в природе и технике». — М.: МГТУ им. Баумана, 2001. С. 306–307.
27. Дроздов М. С., Светличный С. И., Бубнова Л. И. Непрерывный режим работы ХФЛ // Необратимые процессы в природе и технике. Тр. 6-й Всеросс. конф. — М.: МГТУ, ФИАН, 2011.
28. Stokes C. S., Stireng L. A. U.S. Govt. Res. Develop. Rep., 1970. Vol. 70. P. 18. (Chem. Abstr., 1970. Vol. 74. No. 81646t.)
29. Бубнова Л. И., Гордон Е. Б., Дроздов М. С., Светличный С. И. Импульсные химические источники света на основе взрывных газовых реакций // Тезисы докл. 3-й Междунар. научн.-технич. конф. «Инженерно-физические проблемы авиационной и космической техники». — Егорьевск: ЕАТК ГА, 1999. С. 270–271.
30. Бубнова Л. И., Гордон Е. Б., Надхин А. И., Светличный С. И., Сотниченко С. А. О возможности создания инверсии при диссоциации иодистого брома солнечным светом // Квантовая электроника, 1983. Т. 10. № 4. С. 883–886.

М. С. Дроздов, С. И. Светличный

Филиал ФИЦ ХФ им. Н. Н. Семёнова РАН
(бывший ФИНЭПХФ РАН)