

## Мощные электроразрядные лазеры на плотных газах с накачкой от генераторов с полупроводниковыми прерывателями тока

А.Н. Панченко, В.Ф. Тарасенко\*

Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 14.05.2010 г.

Приведены результаты исследований импульсных газовых лазеров на плотных газах с накачкой двойным разрядом. Для формирования объемного разряда или прямой накачки использованы генераторы импульсов высокого напряжения с индуктивными накопителями энергии (ГИНЭ). Показано, что ГИНЭ обеспечивает формирование устойчивого объемного разряда в смесях газов высокого давления. Это существенно улучшает параметры генерации различных лазеров на плотных газах ( $\text{CO}_2$ , HF, DF, оксиплексных, азотных). Показана перспективность применения в ГИНЭ полупроводниковых прерывателей тока на основе SOS-диодов.

*Ключевые слова:* импульсные лазеры, плотные газы, индуктивные накопители энергии, полупроводниковые прерыватели тока; *pulsed lasers, dense gases, inductive energy storage, semiconductor opening switch.*

### Введение

В настоящее время электроразрядные лазеры на плотных газах находят широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе для изучения свойств атмосферы Земли [1, 2]. Поэтому исследования, направленные на улучшение параметров излучения и совершенствование конструкций данных лазеров, а также на изучение новых активных сред, постоянно привлекают внимание ученых. В отделе сильноточной электроники СО АН СССР, а с 1977 г. в Институте сильноточной электроники СО РАН (ИСЭ СО РАН) работы по созданию и исследованию лазеров на плотных газах ведутся с 1969 г. Часть результатов по исследованиям лазеров с накачкой пучком электронов и объемным разрядом рассмотрена в обзорной статье [3].

В настоящей статье приведены наиболее важные результаты, полученные при исследованиях лазеров на плотных газах с накачкой генераторами с индуктивными накопителями энергии и полупроводниковыми прерывателями тока (SOS-диодами [4]), подробно полученные данные изложены в работах [5–15]. В создании лазеров подобного типа ИСЭ СО РАН является мировым лидером. При накачке самостоятельным разрядом для ряда лазеров достигнуты наибольшие эффективности [5, 6, 10, 12, 15], длительности импульса и энергии [14] излучения, а также реализованы новые режимы генерации [9, 14].

### Метод формирования импульсов высокого напряжения с помощью индуктивных накопителей энергии

Метод формирования импульсов высокого напряжения с помощью индуктивных накопителей энергии (ИНЭ) известен сравнительно давно (см. [16] и ссылки в ней). В генераторах импульсов высокого напряжения с индуктивными накопителями энергии (ГИНЭ) энергия передается из первичного емкостного накопителя в индуктивность  $L$  разрядного контура генератора, а затем при срабатывании специального элемента, называемого прерывателем тока (ПТ), в газоразрядную нагрузку.

Из расчетов, проведенных в [16], следует, что ГИНЭ увеличивает скорость нарастания тока в нагрузке  $dI/dt = R_{\text{ПТ}}/L_2$ , где  $R_{\text{ПТ}}$  – сопротивление ПТ;  $L_2$  – индуктивность присоединения ПТ к нагрузке. Видно, что  $dI/dt$  тем больше, чем больше сопротивление прерывателя  $R_{\text{ПТ}}$  и меньше  $L_2$ . Длительность импульса тока в нагрузке  $\tau_n = L/(R_{\text{ПТ}} + R_n)$  и при сопротивлении нагрузки  $R_n$ , близкой к импедансу импульсного генератора,  $R_r$  будет значительно короче длительности импульса, формируемого емкостным накопителем  $C$ :  $\tau_{LC} = \pi(LC)^{1/2}$ . При этом легко получается умножение передаваемой в нагрузку мощности. Коэффициент умножения мощности  $M$  можно записать как  $M \sim 4R_n L^2 / R_r (L + L_2)^2$ . Из приведенных выше соотношений следует, что в общем случае использование индуктивного накопителя дает возможность сократить длительность импульса

\* Алексей Николаевич Панченко (alexei@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

накачки, «обострить» передний фронт импульса тока в нагрузке и увеличить вводимую в нагрузку мощность.

ГИНЭ также обеспечивает два режима возбуждения газовых лазеров. В первом случае вся энергия из емкостного накопителя передается в индуктивность. В этом случае индуктивный генератор дает короткий мощный импульс накачки с быстрым нарастанием тока разряда и умножением мощности накачки. Данный режим может использоваться для возбуждения лазеров, для эффективной работы которых необходим короткий мощный импульс возбуждения (например,  $N_2$ -лазеров) [7, 9, 14].

Второй режим характеризуется частичной передачей энергии. В этом случае ГИНЭ генерирует высоковольтный предимпульс, формирующий объемный разряд в активном объеме лазера при повышенных давлениях и ускоряющий достижение порога генерации, а основная доля энергии вкладывается в лазерную среду от первичного накопителя, подключенного в согласованном режиме. Данный режим накачки может использоваться для возбуждения лазеров, работающих в квазистационарной стадии разряда (например, эксиплексных и  $CO_2$ -лазеров) [7, 8, 10, 12, 13]. В настоящей статье основное внимание уделено лазерам, в которых применяется второй режим накачки.

Перспективность применения индуктивных накопителей энергии была оценена сотрудниками ИСЭ СО РАН, которые создали первый лазер с прерывателем на основе взрывающихся проводников [17]. УФ-генерация была получена на молекулах азота. Использование ГИНЭ за счет увеличения напряжения на лазерном промежутке привело к двукратному росту мощности лазерного излучения, а длительность импульса генерации возросла на 30%. Позднее подобный ГИНЭ был использован в [18] для накачки нецепного HF-лазера. Индуктивный накопитель удваивал напряжение, прикладываемое к лазерному промежутку, и увеличивал мощность накачки. За счет этого был получен однородный объемный разряд в смеси  $SF_6-H_2$  без использования предыонизации рабочего газа.

Перспективность применения ГИНЭ для накачки  $XeCl$ - и  $N_2$ -лазеров, а также пеннинговского плазменного лазера на смеси  $Ne-H_2$  была продемонстрирована в [19, 20], где был использован эрозионный плазменный прерыватель тока с созданием плазмы при помощи лазера. В [21] в качестве прерывателя тока использовались газоразрядные приборы низкого давления промышленного изготовления. Однако практическое применение газоразрядных приборов не получило развития из-за сложной системы управления и малой амплитуды тока обрыва.

## Конструкции лазеров с ГИНЭ и особенности их работы

На рис. 1 приведена электрическая схема лазера с ГИНЭ и полупроводниковый прерыватель тока (ППТ). Генератор накачки включает в себя основной и вспомогательный контуры. Основной контур сформирован емкостным накопителем  $C_0 = 70 \div 550$  нФ, индуктивностью  $L_0$  и искровым разрядником  $SW_0$ .

Для того чтобы полупроводниковый SOS-диод  $D$  работал в качестве прерывателя тока, через него необходимо вначале пропустить ток в прямом направлении (ток прямой накачки). Для этого предназначен вспомогательный контур, включающий конденсатор  $C_D = 10$  нФ, искровой коммутатор  $SW_D$  и индуктивность  $L_D$ . В лазере использовались 10–14 диодов типа SOS-50-2, установленных параллельно обострительным конденсаторам. Длительность импульсов тока разряда в зависимости от величины  $C_0$  менялась в пределах 150–550 нс.

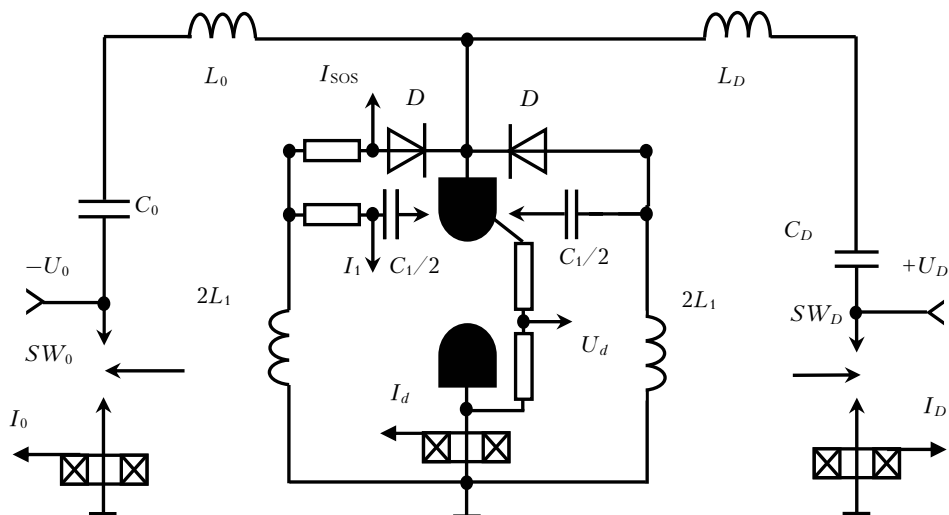


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лазера с ГИНЭ:  $SW_0$ ,  $SW_D$  – искровые разрядники;  $C_0$  – первичный емкостной накопитель;  $C_1$  – обострительные конденсаторы;  $C_D$  – конденсатор для накачки SOS-диодов ППТ (прерывателя тока)  $D$  в прямом направлении;  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_D$  – индуктивности контуров;  $U_0$ ,  $U_D$  – зарядные напряжения;  $U_d$  – напряжение на лазерном промежутке;  $I_D$ ,  $I_0$ ,  $I_d$ ,  $I_{SOS}$ ,  $I_1$  – токи: накачки диодов в прямом направлении, в цепи  $C_0$ , разряда через промежутку, через SOS-диод и в цепи  $C_1$

Для предыонизации разрядного промежутка использовалось излучение искровых промежутков, равномерно расположенных с обеих сторон от анода, которые срабатывали при импульсной зарядке обострительных конденсаторов  $C_1 = 2,45$  или  $3,25$  нФ.

Генератор мог работать как в режиме с индуктивным накоплением энергии, так и в режиме двухконтурного  $LC$ -генератора с накопительным и обострительным конденсаторами. Во втором случае конденсатор  $C_D$  не заряжается.

В лазере использовались профилированные электроды, которые существенно уменьшали неоднородности электрического поля (локальное усиление поля на электродах и в разрядном промежутке) с активной длиной 72 или 90 см. Электроды изготавлива-

лись из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор  $d$  равнялся 4 см. Активный объем лазера  $V$  составлял в различных экспериментальных условиях  $4 \times (0,8-1,2) \times 72(90)$  см<sup>3</sup> и менялся из-за изменения ширины разрядной области, которая зависела от зарядного напряжения основного накопителя  $U_0$ , состава и давления смеси. При работе на молекулах  $CO_2$  зазор уменьшался до 2 см.

Исследовались характеристики разряда и генерации различных газовых лазеров (эксимерных и азотных, нецепных HF(DF),  $CO_2$ ). Давление смеси достигало 3,5 атм.

Сравнение режимов накачки от ГИНЭ и  $LC$ -генератора на примере  $CO_2$ -лазера иллюстрирует рис. 2 [15]. В первые 500 нс после включения искрового

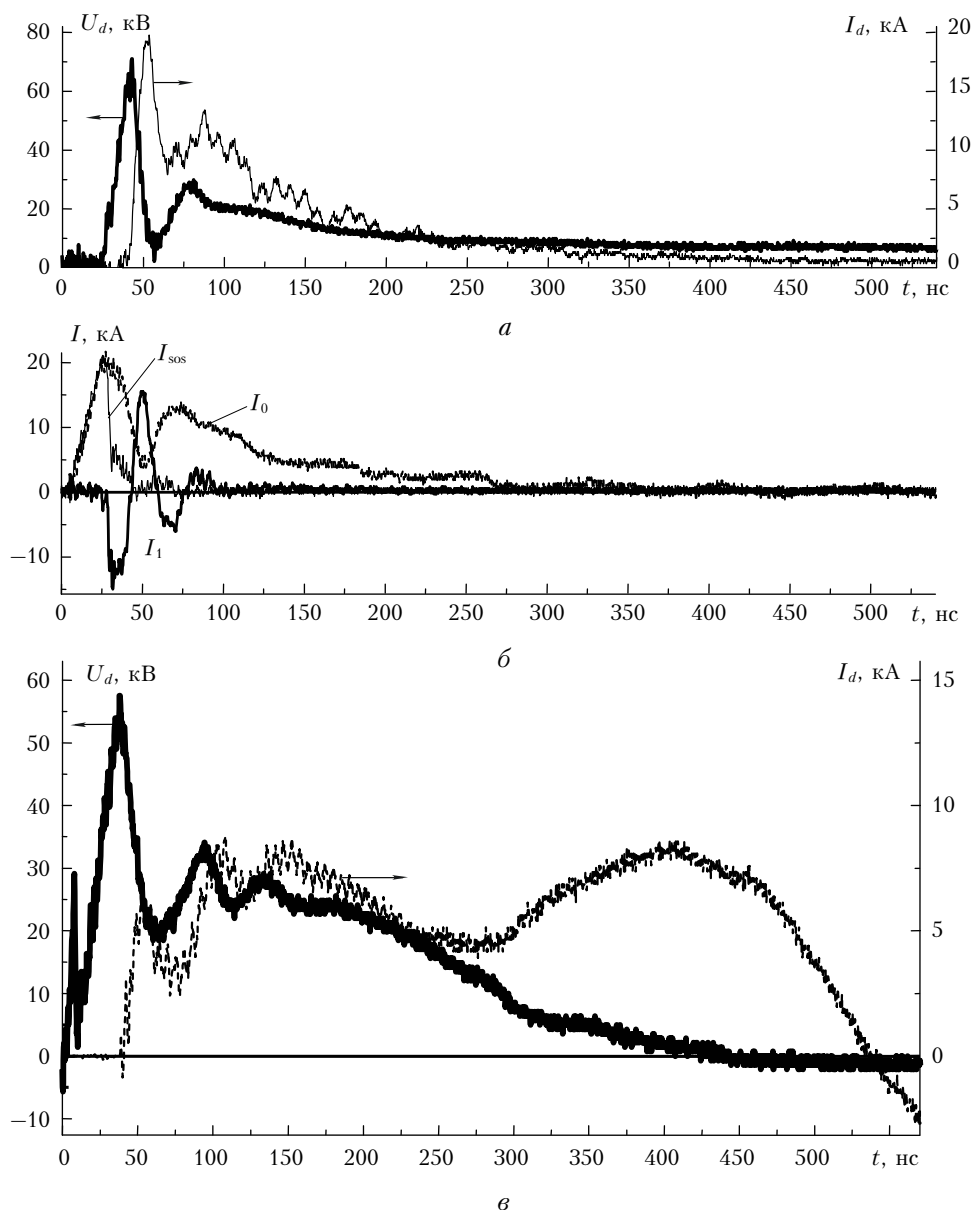


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке  $U_d$ , тока в лазерном промежутке  $I_d$ , тока через диоды  $I_{SOS}$ , тока в цепи накопительной  $I_0$  и обострительной  $I_1$  емкостей. Накачка смеси He :  $CO_2$  :  $N_2 = 3 : 1 : 1$  при  $p = 1$  атм осуществлялась генератором с ПИТ (а, б) и  $LC$ -генератором (в). Зарядное напряжение накопительной емкости  $U_0 = 36$  кВ

коммутатора  $SW_D$  через полупроводниковые диоды начинает протекать ток в прямом направлении. В течение этого времени происходит накопление неосновных носителей заряда в области  $p-n$ -переходов SOS-диодов. При этом напряжение на диодах составляет несколько сотен вольт и снижается в течение фазы прямой накачки. Эта часть работы ГИНЭ на рис. 2 не показана. В момент смены полярности прямого тока замыкается разрядник  $SW_0$  и на диоды подается импульс обратной полярности от емкостного накопителя. Фаза проводимости обратного тока продолжается  $\sim 30$  нс. Затем сопротивление SOS-диодов за малое время ( $\sim 10$  нс) увеличивается более чем на порядок, что приводит к быстрому обрыву тока в ППТ. Отметим, что разброс времени срабатывания отдельных диодов в генераторе при их параллельном соединении не превышал нескольких наносекунд. SOS-диоды показали очень высокую стабильность и надежность работы, выдерживали многократные перегрузки по току и напряжению и имели большой ресурс работы.

В течение фазы проводимости часть энергии  $E_L = L_0 I^2 / 2$ , где  $I$  – амплитуда обрываемого тока, передается в индуктивный накопитель энергии (индуктивность  $L_0$ ). Для условий рис. 2, а, б  $I = 20$  кА и  $E_L = 5$  Дж. Ток через диоды полностью прекращался через 75 нс, за это время в них поглотилось 6 Дж. В момент обрыва ток в контуре ИНЭ  $L_0$  переключается на зарядку обострительных конденсаторов. В результате ИНЭ за время  $\sim 10$  нс заряжает  $C_1$  до более чем 70 кВ, формируя высоковольтный предимпульс на лазерном промежутке. После пробоя промежутка ток, остающийся в ИНЭ, складывается с током разряда обострительной емкости  $I_1$ , что обеспечивает быстрое нарастание тока в лазерном промежутке и формирует короткий мощный импульс накачки. Затем основная энергия вкладывается в активную среду от емкости  $C_0$ . При большом  $U_0$  и (или) накачке смесей с меньшим сопротивлением разряда (эксимерные лазеры) может наблюдаться рассогласование импеданса  $C_0$  с сопротивлением разряда. Однако все последующие осцилляции тока протекают через SOS-диоды, что снижает эрозию электродов и повышает надежность работы лазера.

При накачке от LC-генератора обострительные конденсаторы  $C_1$  заряжаются только от накопительной емкости, что замедляет время нарастания напряжения на промежутке до  $\sim 40$  нс и снижает пробивное напряжение лазерного промежутка до 57 кВ (рис. 2, в). Вводимая в активную среду лазера в первом пике мощность при этом падает более чем в 2 раза. Кроме того, отключение ППТ приводит к потере устойчивости разряда. Через 250 нс после пробоя промежутка начинаются резкий рост тока и падение напряжения на лазерном промежутке, что характерно для перехода разряда в искровую стадию. При уменьшении зарядного напряжения накопительной емкости LC-генератора во всех исследованных газовых смесях контрагирование разряда наступало через 20–100 нс после пробоя промежутка, что приводило к резкому падению энергии лазерного излучения.

Соответственно отключение ППТ во всех исследованных смесях приводило к потере устойчивости объемного разряда, падению энергии излучения в 2–5 раз и снижению длительности импульсов лазерного излучения.

ГИНЭ позволяет легко регулировать амплитуду импульса напряжения и скорость нарастания тока разряда путем изменения величины емкости  $C_D$  и ее зарядного напряжения. Это дает возможность только за счет указанных параметров получать оптимальные режимы накачки различных газовых смесей. В экспериментах максимальный ток обрыва в одном диоде составлял 4 кА. Соответственно ток срабатывания ППТ мог достигать 40 кА. В ИНЭ могло передаваться до 50% запасенной в  $C_0 = 70$  нФ энергии, остальная энергия терялась в SOS-диодах на стадии обрыва тока. В этом режиме ИНЭ формировал короткий импульс накачки с  $\tau_n = 20 \div 30$  нс.

Отметим также, что режим накачки двойным разрядом от ГИНЭ соответствует режиму «diode mode» в традиционных схемах возбуждения двойным разрядом с емкостными накопителями [22–25]. Однако ГИНЭ не требует импульсной зарядки конденсаторов и точной синхронизации между включениями генератора предимпульса, основного накопителя и источника рентгеновской предыонизации. Кроме того, при работе генераторов с емкостными накопителями в режиме «diode mode» часто возникает пауза между пробоем лазерного промежутка и началом накачки от основного накопителя, что может вызвать развитие неоднородностей разряда. При использовании индуктивного накопителя пауза тока невозможна.

Совместное действие таких факторов, как высокое пробивное напряжение и резкий рост тока разряда при использовании индуктивного накопителя энергии, существенно улучшает однородность разряда в газовых смесях высокого давления и повышает его устойчивость во всех исследованных газовых смесях. Модельные расчеты работы XeCl- и KrF-лазеров в [12, 13] показали, что ГИНЭ в течение первых  $\sim 5$  нс после пробоя лазерного промежутка обеспечивает рост концентраций электронов в плазме до  $\sim 10^{14}$  см<sup>-3</sup>. В этот период времени рост концентрации заряженных частиц происходит в основном в процессе прямой ионизации. По-видимому, данная особенность накачки от ГИНЭ является причиной высокой однородности и устойчивости формируемых объемных разрядов. Поясним это предположение следующими рассуждениями: прямая ионизация является процессом, который сильно зависит от параметра  $E/p$ , где  $E$  – напряженность электрического поля на лазерном промежутке;  $p$  – давление смеси. Если в какой-то малой области разряда увеличится концентрация электронов, напряженность электрического поля в этой области снизится из-за роста проводимости. Это замедлит дальнейший рост концентрации электронов в данной области. Данный процесс при использовании ППТ стимулирует выравнивание концентрации плазмы во всей области объемного разряда.

Высокая амплитуда и короткий фронт предимпульса, генерируемого ИНЭ, дополнительно приво-

дят к возникновению в искровых промежутках интенсивного рентгеновского излучения, что также положительно влияет на однородность и устойчивость объемного разряда при накачке различных газовых лазеров генераторами с ППТ [11].

## Параметры излучения лазеров с ГИНЭ

### СО<sub>2</sub>-лазер ( $\lambda \sim 10,6$ мкм)

Как известно, для эффективной накачки СО<sub>2</sub>-лазера электрическим разрядом необходимо наряду с сохранением однородности разряда поддерживать на разрядном промежутке оптимальную величину параметра  $E/p$  в пределах  $6 < E/p < 12$  В/(см · мм рт. ст.) в зависимости от состава смеси и длительности накачки [26]. Данный диапазон  $E/p$  соответствует напряжению на лазерном промежутке ниже статического пробивного и обычно не реализуется при накачке самостоятельным разрядом. Значение параметра  $E/p$  во время накачки самостоятельным разрядом можно уменьшить при понижении зарядного напряжения, но это существенно уменьшает вкладываемую в рабочую смесь энергию и может приводить к контрагированию разряда. Избежать образования искр в активном объеме лазера и увеличить вкладываемую энергию при пониженных  $E/p$  удастся при использовании профилированных электродов, которые создают в разрядном промежутке однородное поле, и при высокой начальной концентрации электронов от внешнего ионизатора. В качестве такого внешнего ионизатора используются высоковольтный предимпульс, интенсивное ультрафиолетовое излучение или пучок электронов. Однако затраты энергии на создание высокой начальной ионизации были сравнимы с вводимой в активную среду энергией, поэтому электроразрядные импульсные СО<sub>2</sub>-лазеры атмосферного давления имеют сравнительно невысокие кпд (10–12%).

При использовании ГИНЭ достаточно легко реализовать режим накачки, когда предимпульс с высокой мощностью накачки формирует плазму объемного разряда с высокой начальной концентрацией. Затем основная энергия вкладывается в активную среду при значении  $E/p$ , близком к оптимальному. В данном режиме накачки получена энергия генерации  $Q = 6,2$  Дж при внутреннем (относительно вложенной в активную среду энергии) кпд СО<sub>2</sub>-лазера до  $\eta_{int} = 20\%$ . Электрический (относительно запасенной в накопительном конденсаторе энергии) кпд при этом достигал  $\eta_0 = 15\%$ .

### Нецепной HF-лазер ( $\lambda \sim 2,6-3,2$ мкм)

Максимальный кпд нецепных лазеров достигается в смесях SF<sub>6</sub>–H<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>) при длительности импульса накачки не более  $\tau_p \approx 150$  нс и удельном энергокладе  $Q_{уд} = 50 \div 70$  Дж/л [5, 6]. Увеличение  $\tau_p$  и  $Q_{уд}$  приводит к контракции объемного разряда и резкому падению кпд. В этом случае устойчивость разряда повышается при замене H<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>) на

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(C<sub>2</sub>D<sub>6</sub>). ГИНЭ позволяет легко формировать устойчивый однородный разряд в смесях SF<sub>6</sub> с H<sub>2</sub>(D<sub>2</sub>) и C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>(C<sub>2</sub>D<sub>6</sub>) и обеспечивает оптимальные параметры импульса накачки для нецепных химических лазеров.

При  $C_0 = 70$  нФ высокие кпд реализованы в широких диапазонах зарядного напряжения и энергоклада. В смесях SF<sub>6</sub> с H<sub>2</sub> получена удельная энергия генерации до 5,5 Дж/л [ $\sim 100$  Дж/(л · атм)] при  $\eta_{int} \sim 10\%$ . При этом полная энергия излучения составляла 1,5 Дж. При увеличении  $C_0$  до 170 нФ (активная длина лазера 90 см) максимальная энергия излучения (4,3 Дж) получена в смесях SF<sub>6</sub> с C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> при  $\eta_0$  до 4,4%. При этом удельная энергия генерации достигала 6 Дж/л.

### DF-лазер ( $\lambda \sim 3,5-4,2$ мкм)

DF-лазер на смеси SF<sub>6</sub>–D<sub>2</sub> достаточно близок по свойствам HF-лазеру. Однако при одинаковых условиях накачки от ГИНЭ выходные параметры DF-лазера из-за большей длины волны излучения составляют примерно 0,8 от параметров лазера на молекулах HF. При  $C_0 = 70$  нФ получена энергия излучения до 1,2 Дж при электрическом кпд до 3%. Внутренний кпд DF-лазера достигал 7% и слабо зависел от энергоклада. При  $C_0 = 170$  нФ энергия излучения возрастала до 2,5 Дж. Отметим, что полученные значения  $\eta_{int}$  являются предельными для нецепных химических HF(DF)-лазеров [5, 6].

### Длинноимпульсные KrF- и XeF-лазеры ( $\lambda = 248$ и $351-353$ нм)

В эксиплексных лазерах на молекулах фторидов инертных газов контракция разряда обычно наступает уже через 30–50 нс. Для накачки KrF- и XeF-лазеров в настоящее время используются импульсы малой длительности и большой мощности. Соответственно длительность импульса излучения оказывается малой – примерно 30 нс. Попытки увеличения длительности импульса излучения [25] приводят к снижению энергии излучения и эффективности лазера. В связи с этим общепринято считать, что для XeF- и KrF-лазеров малая длительность импульса возбуждения является необходимым условием эффективной накачки.

В наших экспериментах с ГИНЭ определены параметры оптимальных предимпульсов, позволяющие существенно поднять длительность импульсов излучения и кпд XeF- и KrF-лазеров. Амплитуда напряжения на лазерном промежутке достигала  $\sim 80$  кВ. Формирование объемного разряда происходит при сильном электрическом поле  $\sim 20$  кВ/см. Амплитуда первого пика тока разряда составляла  $\approx 30$  кА. В этих условиях легко получены импульсы лазерного излучения на молекулах KrF\* длительностью до 90 нс. Максимальная энергия излучения достигала  $Q = 0,65$  Дж при  $\eta_0 = 1,5\%$ .

В смеси XeF-лазера, содержащей 1,5 торр NF<sub>3</sub> при ГИНЭ с  $C_0 = 70$  нФ, энергия излучения возрастала с ростом давления буферного газа и при

$p = 3,5$  атм достигала  $Q = 0,5$  Дж, что соответствовало удельной лазерной энергии  $\sim 1,8$  Дж/л и  $\eta_0 = 1,1\%$ . Внутренний кпд ХеF-лазера  $\eta_{int}$  при этом превышал 2%. Импульс генерации (120 нс по основанию и 50 нс на полувысоте) был несколько короче импульса накачки из-за развития неоднородностей объемного разряда. При  $C_0 = 170$  нФ энергия излучения возросла до 0,85 Дж, однако электрический кпд падал до  $\eta_0 = 0,8\%$ .

Уменьшение  $C_0$  до 38 нФ позволило поднять кпд генерации ХеF-лазера. При этом длительность генерации (120 нс по основанию и 50 нс на полувысоте) осталась примерно такой же, как при  $C_0 = 70$  нФ. Максимальный кпд ХеF-лазера в условиях данного эксперимента составил  $\eta_0 = 1,6\%$ . Ранее столь высокий кпд был получен только при инжекционной синхронизации ХеF-лазера с накачкой быстрым разрядом за счет уменьшения потерь энергии на достижение порога [27]. Получена энергия излучения 0,36 Дж, а внутренний кпд ХеF-лазера достигал  $\eta_{int} = 3\%$ . Близкие значения внутреннего кпд ХеF-лазера были получены при возбуждении смесей Ne–Xe–NF<sub>3</sub> пучком электронов, которая обеспечивает высокую равномерность энерговклада и снимает проблему контракции разряда.

В смесях с малым содержанием NF<sub>3</sub> были получены импульсы с полной длительностью до 200 нс при длительности на полувысоте до 100 нс, что близко к результатам, полученным в [24] в аналогичных условиях при использовании рентгеновской преддьюнизации и сложного генератора двойного разряда на основе магнитных ключей. Энергия излучения ХеF-лазера в этом режиме достигала 150 мДж при  $\eta_{int} = 1,5\%$ .

### **Длинноимпульсный ХеСl-лазер ( $\lambda = 308$ нм)**

Детальные исследования процессов, происходящих в плазме разряда в смесях инертных газов и галогенов, позволили разработать физические принципы увеличения длительности импульсов генерации эксиплексных лазеров на молекулах ХеСl [22, 23, 25]. Было показано, что основным фактором, ограничивающим время существования объемного разряда в смесях инертных газов и галогенов и, соответственно, сокращающим длительность импульсов генерации ХеСl-лазеров, является развитие нитевидных неоднородностей (филаментов). В зависимости от условий преддьюнизации и скорости нарастания напряжения на разрядном промежутке данные филаменты появляются через 200–300 нс после зажигания объемного разряда. После появления таких микроканалов основной ток разряда начинает протекать через них. Эффективность образования молекул галогенидов благородных газов в микроканалах низка из-за слишком высокой плотности тока, что и приводит к обрыву импульса излучения. Каналы появляются тем позже, чем интенсивней преддьюнизация и чем меньше время нарастания напряжения на лазерном промежутке. Кроме того, замедлить формирование филаментов и получить длительность импульсов ге-

нерации ХеСl-лазера более 500 нс можно при уменьшении содержания в смеси ксенона ( $\sim 10$  мм рт. ст.) и хлористого водорода ( $\sim 1$  мм рт. ст.) и мощности накачки  $\sim 100$  кВт/см<sup>3</sup>.

Индуктивный накопитель энергии с  $C_0 = 550$  нФ обеспечивал быстрое нарастание напряжения на лазерном промежутке. Амплитуда импульса напряжения достигала 70 кВ и возросла с ростом  $U_1$ . При увеличении емкости разгонного контура  $C_D$  до 36 нФ и ее зарядного напряжения  $U_1$  первый пик тока со временем нарастания 30 нс имел амплитуду до 40 кА. Мощность накачки в этом пике превышала  $\sim 1$  МВт/см<sup>3</sup> и обеспечивала быстрое достижение порога генерации. Высоковольтный предимпульс и быстрое нарастание тока разряда приводили к формированию однородного объемного разряда большой длительности. Об этом говорит совпадение длительности полученных импульсов лазерного УФ-излучения на  $\lambda = 308$  нм с длительностью тока разряда (500 нс).

Получена максимальная энергия излучения, которая составила 1,6 Дж в импульсе с полной длительностью до 500 нс и длительностью на полувысоте 300 нс. Максимальный  $\eta_0$  достигал 1,6% при  $U_0 = 16$  кВ и не зависел от зарядного напряжения накопителя. Увеличение  $U_D$  приводит к росту тока обрыва в ППТ. То есть все большая доля энергии, запасенной в  $C_0$ , переводится в индуктивный накопитель и затем тратится на формирование предимпульса. С одной стороны, это приводит к улучшению условий формирования разряда и повышению его устойчивости. С другой стороны, растут потери энергии в ППТ, что уменьшает энерговклад от основного накопителя  $C_0$ . Баланс этих процессов приводит к подобной зависимости  $Q(U_0)$ . Полученные параметры генерации являются максимальными для длинноимпульсных ХеСl-лазеров.

Данный лазер используется в мощной лазерной системе в качестве задающего генератора [8].

### **Азотный лазер ( $\lambda = 337,1$ нм)**

Азотный лазер с инверсией на уровнях системы  $C^3P_u \rightarrow B^3P_g$  относится к лазерам на самоограниченных переходах с коротким временем жизни верхнего состояния  $C^3P_u$  ( $\sim 40$  нс) и метастабильным нижним термом  $B^3P_g$ . Разработка электроразрядных азотных лазеров с высокой энергией излучения в таких системах остается достаточно сложной технической задачей, что обусловлено короткой длиной волны излучения, малым временем существования инверсии населенностей ( $\sim 10$  нс). Это связано с тем, что необходимо на лазерном промежутке иметь значения  $E/p \geq 100$  В/(см · торр) (см. [14] и ссылки в ней). Данное значение  $E/p$  обычно удается поддерживать очень короткое время из-за быстрого роста тока разряда. Несколько замедлить скорость падения  $E/p$  удается при добавках в азот электроотрицательных молекул (SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub>). Однако при накачке от емкостных генераторов это обычно приводит к контракции объемного разряда и падению энергии генерации N<sub>2</sub>-лазера. Максимальные энергия

и кпд азотного лазера составляют  $Q = 40$  мДж и  $\eta_0 \leq 0,1\%$  (см. [14] и ссылки в ней).

Использование ГИНЭ позволяло формировать устойчивый объемный разряд в смесях  $N_2-SF_6(NF_3)$  длительностью более 100 нс. При этом были получены интересные результаты. При максимальной передаче энергии в ИНЭ достигнут  $\eta_{int} = 0,15\%$  при энергии излучения 20 мДж. В режиме накачки двойным разрядом были зарегистрированы импульсы генерации в УФ-области (337,1 нм), состоящие из двух отдельных пиков [9, 14]. Задержка между максимумами импульсов генерации составила  $\sim 25$  нс. Максимальная энергия излучения в импульсе в этом режиме составила 25 мДж. Отметим, что импульс генерации, состоящий из двух пиков, наблюдался при максимальных энергиях излучения.

Появление двойных импульсов генерации связано со следующими процессами. Добавки в азот электроотрицательных газов увеличивают скорость гибели электронов в разряде за счет прилипания. Соответственно, растет напряжение на лазерном промежутке во время импульса тока разряда. Кроме того, в импульсном генераторе имеется рассогласование между импедансом контура  $C_1$  и сопротивлением объемного разряда, из-за чего наблюдаются затухающие колебания напряжения на лазерном промежутке и тока разряда в результате перезарядки между  $C_0$  и  $C_1$ . Амплитуда этих колебаний достаточна для периодического создания в активной среде азотного лазера условий для достижения инверсной населенности уровней перехода  $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$ . В результате в течение одного импульса накачки лазера реализуются два импульса генерации. Изменение периода данных колебаний дает возможность управлять формой импульса лазерного излучения на  $\lambda = 337,1$  нм. При увеличении  $C_1$  с 2,45 до 3,6 нФ период модуляции тока разряда возрос с 25 до 33 нс, соответственно увеличилось расстояние между пиками генерации.

Увеличение активной длины лазера привело к значительному увеличению энергии генерации на первой и второй положительных системах азота. За счет увеличения коэффициента усиления среды исчез провал между двумя пиками генерации на  $\lambda = 337,1$  нм и импульс излучения приобрел форму, близкую к прямоугольной, с полной длительностью 50 нс. При этом энергия излучения на  $\lambda = 337,1$  нм достигала 50 мДж. Также заметно увеличилась энергия генерации на первой положительной системе азота (переходы  $V^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u$ , наблюдаемые длины волн 869,5; 888,3; 1046,9 нм), которая в смесях с  $SF_6$  достигала 25 мДж, что в 5 раз превосходит максимальную величину, полученную ранее в [28].

### Лазер на атомарных переходах фтора

Длительность импульса генерации FI-лазера, излучающего в диапазоне 640–775 нм, не превышает  $\approx 10$ –20 нс из-за быстрой контракции разряда.

Использование ГИНЭ позволило сформировать объемный разряд в смесях  $He-F_2$  длительностью до 200 нс и увеличить длительность лазерного импульса

до  $> 100$  нс. Получены максимальная на сегодняшний день пиковая мощность (до 400 кВт) и энергия генерации (до 8 мДж) на линиях фтора.

### Заключение

Импульсные лазеры на плотных газах позволяют получать излучение в различных спектральных диапазонах и находят широкое практическое применение. В настоящее время лазеры на углекислом газе и эксимерные (эксимерные) лазеры, описанные выше, широко используются в исследованиях воздействия мощного лазерного излучения на вещество. В ИСЭ СО РАН продолжают исследования газовых лазеров с накачкой объемным самостоятельным разрядом и пучками электронов, формируемых в газонаполненных диодах, а также развиваются новые направления. В частности, начаты работы по созданию лазерной системы с фемтосекундной длительностью импульса. Готовятся эксперименты по преобразованию излучения ряда лазеров в терагерцовый диапазон.

Авторы благодарят сотрудников лабораторий оптических излучений и газовых лазеров, а также сотрудников других отделов и лабораторий ИСЭ СО РАН за сотрудничество при получении результатов, представленных в данной статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (г/к № 02.740.11.0562).

1. *Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F.* Pulsed gas lasers. Washington: SPIE PRESS. USA, 1995. 274 p.
2. *Gas lasers* / Ed. I. Endo and R.F. Walter. N.Y.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007. 556 p.
3. *Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф.* Мощные импульсные лазеры на плотных газах с накачкой разрядом и пучком электронов // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 993–998.
4. *Руксин С.Н.* Генераторы мощных наносекундных импульсов с полупроводниковыми прерывателями тока // Приборы и техн. эксперим. 1999. Вып. 4. С. 5–36.
5. *Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* Об эффективности нецепных электроразрядных HF(DF)-лазеров // Изв. вузов. Физ. 2004. Т. 47, № 5. С. 93–94.
6. *Панченко А.Н., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф.* Спектральные характеристики нецепных электроразрядных HF- и DF-лазеров в эффективных режимах возбуждения // Квант. электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 320–324.
7. *Panchenko A.N., Tarasenko V.F.* Pulsed Gas Lasers Pumped by Generators with Inductive Energy Storage // Laser Phys. 2006. V. 16, N 1. P. 23–39.
8. *Лосев В.Ф., Ковальчук Б.М., Тарасенко В.Ф., Панченко Ю.Н., Иванов Н.Г., Коновалов И.Н., Абдуллин Э.Н., Панченко А.Н., Зорин В.Б., Скакун В.С., Губанов В.П., Степченко А.С., Толкачев В.С.* Мощная эксимерная лазерная система // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 195–201.
9. *Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е.* УФ азотный лазер с накачкой поперечным разрядом, формирующий двойные импульсы генерации // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 2–3. С. 178–181.
10. *Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов Е.А.* Эффективный электроразрядный ХеF-лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 5. С. 403–407.

11. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е. Рентгеновское излучение искровой системы предыонизации и плазмы объемного разряда в лазере с индуктивным накопителем энергии // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 1. С. 103–107.
12. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Тельминов А.Е., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование ХеСl-лазера с использованием полупроводникового прерывателя тока в схеме питания // Квант. электрон. 2007. Т. 37. № 4, С. 319–324.
13. Бычков Ю.И., Панченко А.Н., Тельминов Е.А., Тарасенко В.Ф., Ямпольская С.А., Ястремский А.Г. КгF-лазер с накачкой двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем // Изв. Томского политехн. ун-та. 2008. Т. 312, № 2. С. 113–116.
14. Panchenko A.N., Suslov A.I., Tarasenko V.F., Konovarov I.N., Tel'minov A.E. Laser on Nitrogen-Electronegative Gas Mixtures, Pumped by Inductive Energy Storage Generator: Experiment and Theoretical Model // Phys. Wave Phen. 2009. V. 17, N 4. P. 251–276.
15. Орловский В.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Электроразрядный CO<sub>2</sub>-лазер с высокой пиковой мощностью излучения // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 3. С. 192–194.
16. Кремнев В.В., Месяц Г.А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987. 100 с.
17. Бычков Ю.И., Котов Ю.А., Лосев В.Ф., Тарасенко В.Ф. Применение контура с прерывателем тока для возбуждения лазеров на самоограниченных переходах // Квант. электрон. 1976. Т. 3, № 7. С. 1607–1608.
18. Запольский А.Ф., Юшко К.Б. Электроразрядный лазер на смеси SF<sub>6</sub>–H<sub>2</sub> с накачкой от индуктивного накопителя // Квант. электрон. 1979. Т. 6, № 2. С. 408–411.
19. Месяц Г.А., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Лазеры на смеси Ne–Xe–HCl и азоте при накачке генератором с плазменным прерывателем // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307, № 4. С. 869–872.
20. Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. Газовые лазеры с накачкой от генератора с плазменным прерывателем тока и индуктивным накопителем // Квант. электрон. 1990. Т. 17, № 1. С. 32–34.
21. Бочков В.Д., Верецагин Н.М., Горюнов Ф.Г., Крестов В.А., Ломаев М.И., Меркулов В.Б., Тарасенко В.Ф., Шалыгин В.Н. Индуктивные накопители энергии, использующие газоразрядные приборы с полным управлением, и их применение // Оптика атмосф. и океана. 1996. Т. 9, № 2. С. 231–238.
22. Long W.H., Plummer J., Stappaerts E.A. Efficient discharge pumping of an XeCl laser using a high-voltage prepulse // Appl. Phys. Lett. 1983. V. 43, N 8. P. 735–737.
23. Fischer C.H., Kushner M.J., De Hart T.E., Mac Darniek J.P., Petr R.A., Ewing J.J. High efficiency XeCl laser with spiker and magnetic isolation // Appl. Phys. Lett. 1986. V. 48, N 22. P. 1574–1576.
24. Trentelman M.M., Peters P.J., Mei Qi-Chu, Witteman W.J. Gas-discharge XeF (B → X) laser excited by a prepulse-main-pulse circuit with magnetic switching // J. Opt. Soc. Amer. B. 1995. V. 12, N 12. P. 2494–2501.
25. Taylor R.S., Leopold K.E. Ultralong optical-pulse corona preionized XeCl laser // J. Appl. Phys. 1989. V. 65, N 1. P. 22–32.
26. Лобанов А.Н., Сучков А.Ф. Функция распределения и баланс энергии электронов в электроионизационном лазере на двуокиси углерода // Квант. электрон. 1974. Т. 1, № 7. С. 1527–1536.
27. Sadighi-Bonabi R., Lee F.W., Collins C.B. Gain, saturation, and optimization of the XeF discharge laser // J. Appl. Phys. 1982. V. 52, N 12. P. 8508–8515.
28. Sanz F.E., Perez J.M.G. A high power high energy pure N<sub>2</sub> laser in the first and second positive system // Appl. Phys. B. 1991. V. 52, N 1. P. 42–45.

**A.N. Panchenko, V.F. Tarasenko. Powerful discharge lasers on dense gases pumped by generators with semiconductor opening switch.**

Pulsed gas lasers on dense gases, pumped by double discharge, are studied. High-voltage pulse generators with inductive energy storage (GIES) are used for volume discharge formation or direct excitation. It was shown that GIES provides formation of stable volume discharge in gas mixtures at elevated pressures. This allows one to significantly improve output parameters of different lasers on dense gases (CO<sub>2</sub>, HF, DF, exciplex, nitrogen). A promise of application in GIES of the semiconductor opening switch, based on SOS-diodes, is demonstrated.