

Эффективный электроразрядный ХеF-лазер с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко, Е.А.Тельминов

Исследованы характеристики разряда и лазерного излучения при возбуждении смеси Ne–Xe–NF₃ двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и прерывателем тока на основе полупроводниковых SOS-диодов. Показано, что высоковольтный предимпульс, формируемый генератором с индуктивным накопителем, существенно повышает стабильность и длительность поддержания объемного разряда в смесях с NF₃, а также увеличивает энергию излучения и длительность импульса генерации на В–Х-переходе молекул ХеF. При использовании искровой предыонизации получены импульсы излучения с полной длительностью до 200 нс при длительности на полувысоте до 100 нс. Максимальная энергия излучения ХеF-лазера ($\lambda = 348, 351$ и 353 нм) достигала 0.5 Дж при электрическом КПД до 1.6%.*

Ключевые слова: устойчивый объемный разряд, ХеF-лазер, эффективное возбуждение, индуктивный накопитель энергии.

1. Введение

Увеличение длительности импульса излучения электроразрядных эксиплексных лазеров имеет большое практическое и научное значение. С одной стороны, снижение импульсной мощности излучения позволяет существенно увеличить энергию в импульсе, а также среднюю мощность излучения, передаваемого по световоду. С другой стороны, увеличение числа проходов в резонаторе дает возможность эффективно управлять такими параметрами лазерного излучения, как расходимость и ширина линии генерации, что важно для различных технологических приложений электроразрядных эксиплексных лазеров.

Увеличение длительности импульса излучения при возбуждении самостоятельным поперечным разрядом впервые было получено в ХеСl-лазере. При накачке от импульсной формирующей линии длительность лазерных импульсов на $\lambda = 308$ нм достигала ~ 200 нс [1]. В работе [2] предложен нестационарный режим накачки газовых лазеров, позволивший при использовании интенсивной предыонизации с помощью плазменных электродов увеличить длительность импульса излучения ХеСl-лазера до 1 мкс. Данный режим накачки оказался достаточно универсальным, и при накачке ХеF-лазера были получены импульсы с полной длительностью до 0.4 мкс. Однако эффективность ввода энергии в активную среду эксиплексного лазера в [1, 2] была низкой из-за рассогласования импедансов импульсного генератора и разряда. Для увеличения эффективности электроразрядного способа возбуждения были разработаны достаточно слож-

ные схемы возбуждения двойным разрядом, в которых используются искровые коммутаторы или магнитные ключи на основе насыщающихся дросселей [3–5]. При этом сначала генератор накачки формирует высоковольтный предимпульс, инициирующий разряд в лазерном промежутке, а затем основной накопитель (конденсатор или формирующая линия) вкладывает в активную среду лазера основную часть запасенной энергии в режиме согласования импедансов. При возбуждении ХеСl-лазеров двойным разрядом длительность генерации удается увеличить до ~ 1.5 мкс [4] и поднять электрический КПД до 4%–5% [3, 5].

В лазерах на молекулах фторидов инертных газов контрагирование разряда наступает раньше, чем в ХеСl-лазере, и сильно ограничивает длительность импульса излучения [6]. Обычно длительность генерации электроразрядных ХеF-лазеров составляет 20–30 нс при энергии излучения ~ 100 мДж [7–10]. Использование плазменных электродов в [11] позволило поднять энергию излучения на молекулах ХеF* до ~ 0.8 Дж, а длительность генерации до ~ 50 нс. В этих экспериментах η_0 – электрический КПД ХеF-лазера относительно энергии, запасаемой в емкостном накопителе, не превышал 1%.

Использование накачки двойным разрядом с предыонизацией рентгеновским излучением позволило получить в смесях с малым содержанием донора фтора NF₃ импульсы излучения с длительностью на полувысоте до 212 нс [12]. КПД генерации ХеF-лазера относительно энергии, запасенной в основном накопителе, составил более 1.2% [13]. Однако КПД лазера из-за больших затрат энергии на формирование предимпульса и генерирование рентгеновского излучения подсветки был ниже 1%.

Ранее нами был предложен способ накачки лазерной среды двойным разрядом с формированием предимпульса при помощи индуктивного накопителя энергии и прерывателя тока на основе SOS-диодов [14] и сообща-

А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко, Е.А.Тельминов. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: alexei@loi.hcei.tsc.ru, VFT@loi.hcei.tsc.ru

лось о создании длинноимпульсного ХеСl-лазера с энергией излучения до 1.5 Дж и $\eta_0 = 2\%$ [15]. Предварительные эксперименты показали, что генератор с индуктивным накопителем энергии позволяет также увеличить длительность генерации электроразрядных КгF- и ХеF-лазеров [16], однако в этой работе оптимальные условия накачки ХеF-лазера достигнуты не были.

В настоящей работе сообщается о создании эффективного длинноимпульсного ХеF-лазера с накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и полупроводниковым прерывателем тока. При использовании искровой предыонизации получены импульсы излучения с полной длительностью до 200 нс и энергией излучения на молекулах ХеF* ($\lambda = 348, 351$ и 353 нм) 0.5 Дж при электрическом КПД $\eta_0 = 1.6\%$.

2. Конструкция лазера и методики измерений

В экспериментах использовался лазер с возбуждением поперечным разрядом и простой системой предыонизации от искровых разрядников, близкий по конструкции к описанному в [14–16]. Установка позволяла формировать объемный разряд при повышенных давлениях в смесях Ne–Xe–NF₃. Электрическая схема лазера приведена на рис.1. Генератор накачки включал в себя основной и вспомогательный контуры. Основной контур сформирован емкостным накопителем $C_0 = 38$ или 70 нФ, индуктивностью L_0 и искровым разрядником SW_0 . Вспомогательный контур предназначался для предварительной накачки SOS-диодов D в прямом направлении и включал конденсатор $C_D = 10$ или 36 нФ, искровой коммутатор SW_D и индуктивность L_D . В лазере использовались 10 диодов типа SOS-50-2, установленных параллельно обострительным конденсаторам. Предыонизация разрядного промежутка осуществлялась излучением искровых промежутков, равномерно расположенных с обеих сторон от анода, которые срабатывали при импульсной зарядке обострительных конденсаторов $C_{1/2}$ ($C_1 = 2.45$ нФ).

Генератор мог работать в режиме с индуктивным накоплением энергии и как обычный емкостной генератор. В последнем случае конденсатор C_D не использовался. Длительность тока разряда в различных режимах работы генератора составляла 150–250 нс. Активный объем лазера V в различных экспериментальных условиях был равен $4 \times (0.8 - 1.2) \times 72$ см и менялся при изменении

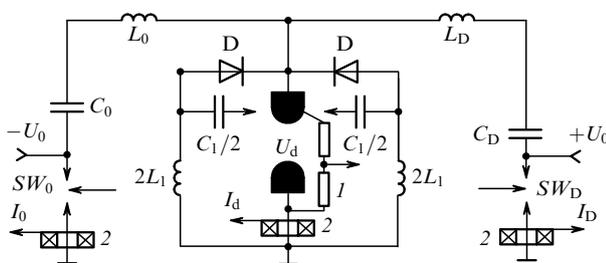


Рис.1. Принципиальная электрическая схема ХеF-лазера с накачкой от индуктивного накопителя энергии:

SW_0, SW_D – искровые разрядники; C_0 – первичный емкостной накопитель; $C_{1/2}$ – обострительные конденсаторы; C_D – емкость накачки SOS-диодов D в прямом направлении; $L_0 = 24.5$ нГн, $L_1 = 11$ нГн, $L_D = 0.87$ или 3.13 мкГн – индуктивности контуров; U_0, U_D – зарядные напряжения; I – делитель напряжения; 2 – пояса Роговского.

ширины разрядной области, которая зависела от зарядного напряжения основного накопителя U_0 , состава и давления смеси.

В лазере использовались профилированные электроды, которые существенно уменьшали неоднородности электрического поля (локальное усиление поля на электродах и в разрядном промежутке). Электроды изготавливались из нержавеющей стали. Межэлектродный зазор d равнялся 4 см. Характеристики разряда и лазерной генерации изучались в смесях Хе:NФ₃ = 4:1 с буферным газом неоном при давлении трифторида азота 1.5 или 0.75 Тор. Общее давление смеси составляло 2–3.5 атм. В качестве заднего зеркала использовались плоские зеркала с алюминиевым или диэлектрическим покрытием, на выходе резонатора в большей части экспериментов устанавливалось плоское зеркало с коэффициентом отражения $R = 30\%$ на $\lambda \sim 350$ нм.

Энергия излучения лазера измерялась калориметром ОРНИР с сенсорной головкой FL-250А. Форма импульса излучения регистрировалась в дальней зоне вакуумным фотодиодом ФЭК-22 СПУ, на который при помощи светоделительной пластинки направлялась часть лазерного излучения. Спектр излучения ХеF-лазера регистрировался при помощи спектрометра StellarNet EPP2000-C25 со спектральным разрешением 0.75 нм и полушириной апаратуры функции 1.5 нм. Для работы фотодиода и спектрографа в линейном режиме излучение на их входе ослаблялось с помощью последовательно установленных металлических сеток.

В экспериментах измерялись ток через разрядный промежуток I_d , ток разряда емкостного накопителя I_0 , ток через SOS-диоды I_D и напряжения на SOS-диодах (U_{SOS}) и электродах (U_d) лазера при помощи поясов Роговского и резистивного делителя напряжения соответственно. Электрические сигналы регистрировались цифровыми осциллографами TDS-220 или TDS-224.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Работу генератора накачки в режиме индуктивного накопителя иллюстрирует рис.2. В первые 500 нс после включения искрового коммутатора SW_D через полупроводниковые диоды начинает протекать ток в прямом направлении. При этом напряжение на диодах, составляющее несколько сотен вольт, снижается в течение фазы

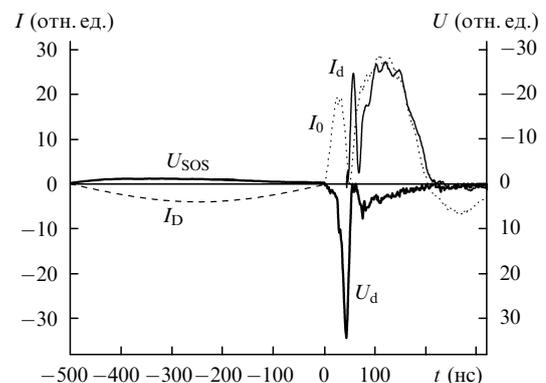


Рис.2. Осциллограммы импульсов тока через диоды I_D , тока основного накопителя I_0 и тока разряда I_d в смеси Ne–Xe–NF₃, а также напряжения на SOS-диодах U_{SOS} и лазерном промежутке U_d при работе генератора в режиме индуктивного накопителя энергии.

прямой накачки. В момент смены полярности тока I_{SOS} срабатывает разрядник SW_0 и на диоды подается импульс обратной полярности от емкостного накопителя, а часть энергии, запасенной в C_0 , передается в индуктивность контура L_0 . Примерно через 30 нс начинается резкий рост сопротивления SOS-диодов, приводящий к быстрому обрыву тока I_0 . При этом разброс времени срабатывания отдельных диодов в генераторе при их параллельном соединении не превышал нескольких наносекунд. SOS-диоды имели очень высокую стабильность, надежность и большой ресурс работы, выдерживали многократные перегрузки по току и напряжению.

В момент обрыва тока I_0 индуктивный накопитель формирует предимпульс с амплитудой до $U_{\max} = L_0 \times dI_0/dt \sim 70 - 80$ кВ, где dI_0/dt – скорость обрыва тока в диодах, с временем нарастания около 20 нс. После пробоя лазерного промежутка индуктивный накопитель совместно с обострительными конденсаторами обеспечивает быстрый рост тока разряда I_d , формируя короткий мощный импульс накачки. Совместное действие таких факторов, как высокое пробивное напряжение и резкий рост тока разряда при использовании индуктивного накопителя энергии существенно улучшает однородность разряда в смесях эксиплексных лазеров и повышает его устойчивость [2, 17]. Затем основная энергия вкладывается в активную среду XeF-лазера во время разряда конденсатора C_0 . При большом U_0 может наблюдаться рассогласование импеданса накопителя C_0 с сопротивлением разряда. Однако ток в обратном направлении протекает через SOS-диоды, что снижает эрозию электродов и повышает надежность работы лазера как с индуктивным, так и с емкостным генератором.

Режим накачки двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии аналогичен режиму diode mode в схемах возбуждения с магнитными ключами [5, 13]. Однако индуктивный генератор не требует импульсной зарядки накопительных конденсаторов и точной синхронизации включения генератора предимпульса и источника рентгеновского излучения. Кроме того, при работе лазера в diode mode часто возникает пауза между пробоем лазерного промежутка и началом накачки от формирующей линии, что может вызвать развитие неоднородностей разряда. При использовании индуктивного накопителя «пауза тока» не возникает.

Величина тока обрыва в диодах I_{int} и энергия, переданная в индуктивность контура L_0 , определялись вели-

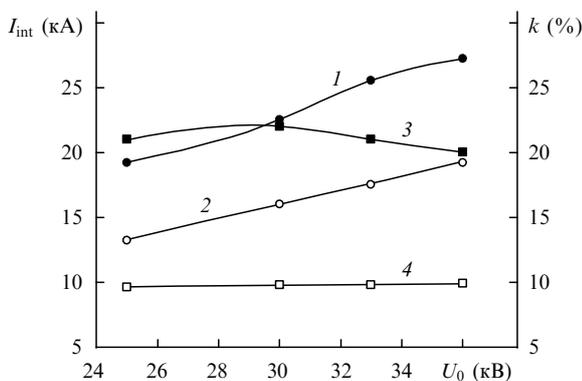


Рис.3. Зависимости тока обрыва I_{int} (1, 2) и доли энергии $k = L_0 I_{\text{int}}^2 \times (C_0 U_0^2)^{-1}$ (3, 4), переданной из основного накопителя C_0 в индуктивность L_0 , от зарядного напряжения U_0 конденсатора $C_0 = 70$ нФ; $C_D = 36$ нФ (1, 3) и 10 нФ (2, 4), $U_D = 20$ кВ.

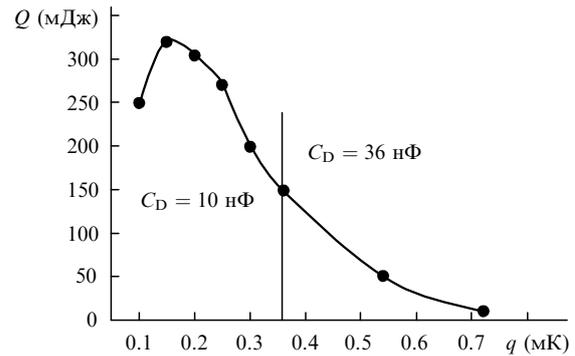


Рис.4. Зависимость энергии излучения XeF-лазера от заряда, накопленного в конденсаторе $C_D = 10$ или 36 нФ, для газовой смеси Ne: Xe: $\text{NF}_3 = 2.5$ атм: 6 Тор: 1.5 Тор при $C_0 = 70$ нФ и $U_0 = 30$ кВ.

чиной энергии или заряда, накопленного в емкости C_D , а также зарядным напряжением основного накопителя (рис.3). В наших экспериментах диоды срабатывали при $I_{\text{int}} \sim 28$ кА, а доля энергии, передаваемой в индуктивность для формирования предимпульса, не превышала 20%. Следует отметить, что, с одной стороны, с ростом тока обрыва возрастают амплитуда предимпульса и скорость нарастания тока через лазерный промежуток, что улучшает условия формирования разряда. Но, с другой стороны, с увеличением I_{int} резко возрастают потери энергии в SOS-диодах во время прерывания тока [18], что приводит к падению энерговклада в активную среду и, соответственно, к снижению рабочих характеристик XeF-лазера. Зависимость энергии генерации XeF-лазера от заряда, накопленного в конденсаторе C_D , приведена на рис.4. Максимальная энергия генерации получена при $C_D = 10$ нФ и $U_D = 15$ кВ, что соответствует энергии, затрачиваемой на прямую накачку SOS-диодов, около 1 Дж.

На рис.5 приведены интегральные фотографии свечения разряда, а на рис.6 показаны осциллограммы импульсов напряжения на лазерном промежутке и генерации при различных режимах возбуждения. Медленное нарастание напряжения на лазерном промежутке и низкое напряжение пробоя при накачке XeF-лазера от емкостного накопителя приводят к нарушению однородности разряда. На фоне объемного свечения наблюдаются широкие диффузные каналы, привязанные к ярким катодным пятнам. Индуктивный накопитель повышает скорость нарастания напряжения на промежутке и пробив-

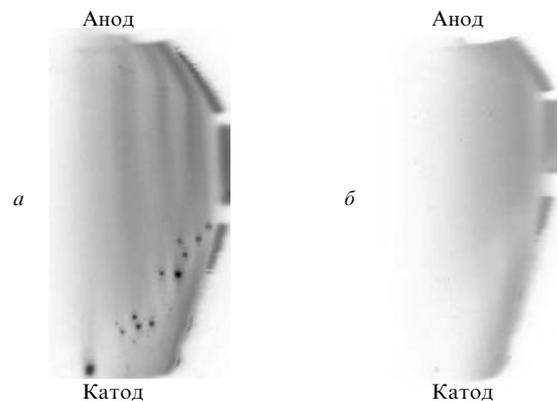


Рис.5. Фотографии свечения разряда (негативное изображение) в смеси Ne: Xe: $\text{NF}_3 = 2.5$ атм: 6 Тор: 1.5 Тор при накачке от емкостного (а) и индуктивного (б) генераторов накачки; $C_0 = 70$ нФ, $U_0 = 30$ кВ, $C_1 = 36$ нФ, $U_D = 15$ кВ.

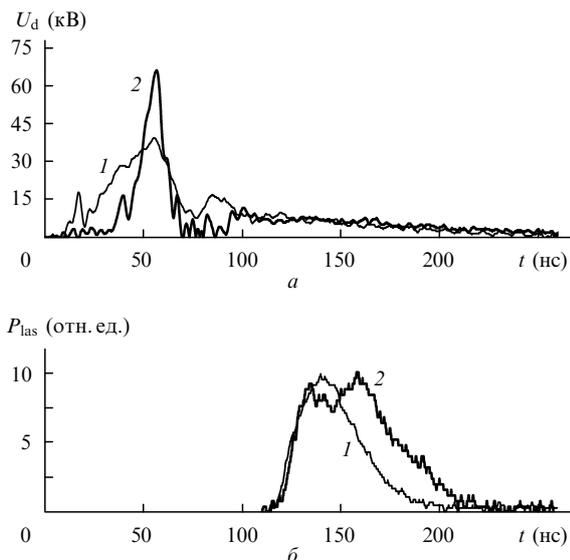


Рис.6. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (а) и лазерного излучения (б), полученные при накачке от емкостного (1) и индуктивного (2) генераторов накачки. Смесь Ne : Xe : NF₃ = 2.5 атм : 6 Тор : 1.5 Тор, C₀ = 70 нФ, U₀ = 30 кВ, C₁ = 36 нФ, U_D = 15 кВ.

ное напряжение разрядного промежутка в 1.5–2 раза. При этом свечение разряда становится значительно однородней, а катодные пятна и каналы практически исчезают. Повышение качества разряда, формируемого при помощи индуктивного генератора, приводит к значительному увеличению длительности импульса генерации ХеF-лазера. В условиях эксперимента, указанных в подписи к рис.6, получены импульсы генерации с полной длительностью до 120 нс при длительности на полувысоте более 50 нс. С уменьшением давления смеси длительность импульса генерации на полувысоте возрастала, как и в работе [13], до 75 нс.

На рис.7 приведены спектры генерации ХеF-лазера, полученные при различных давлениях неона. На λ ~ 348, 351 и 353 нм наблюдались три лазерных полосы, интенсивности которых менялись в зависимости от давления буферного газа. При увеличении давления интенсивность полосы на λ ~ 353 нм резко возрастала из-за увеличения скорости столкновительной релаксации молекул ХеF* [9, 19].

Следует отметить, что при накачке от индуктивного накопителя длительность лазерного импульса при боль-

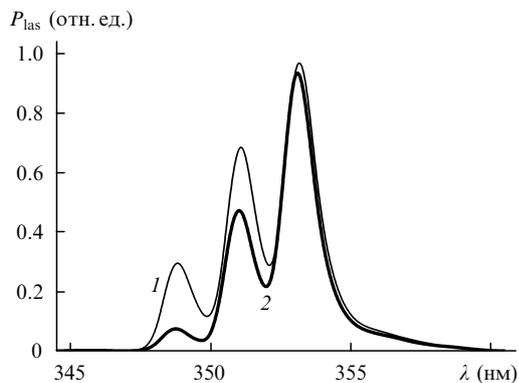


Рис.7. Спектры лазерного излучения в смеси Хе:NF₃ = 6:1.5 Тор при давлении неона p = 2 (1) и 2.5 атм (2). Накачка от индуктивного накопителя, C₀ = 70 нФ, U₀ = 33 кВ.

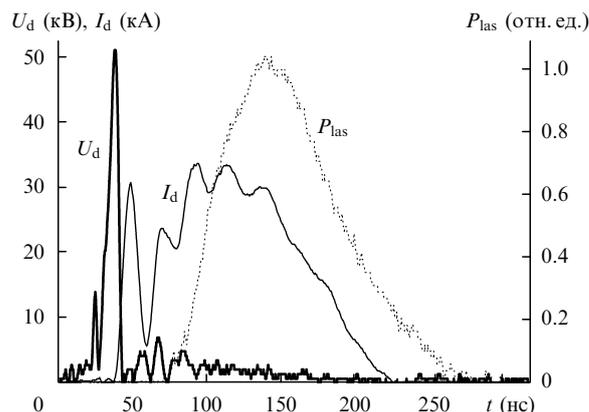


Рис.8. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U_d, тока разряда I_d и генерации P_{las} ХеF-лазера, полученные в смеси Ne : Xe : NF₃ = 2.5 атм : 3 Тор : 0.75 Тор при накачке от индуктивного накопителя при C₁ = 10 нФ, U_D = 20 кВ, C₀ = 70 нФ, U₀ = 36 кВ. Коэффициент отражения выходного зеркала R = 80 %.

шом содержанию в газовой смеси NF₃ была несколько меньше длительности импульса накачки. Причиной этого, как отмечалось выше, может быть развитие в разрядном промежутке микроканалов (филаментов) [4, 6, 17], которые не видны на интегральных фотографиях. Вероятность развития филаментов падает при снижении в смеси концентрации галогена. На рис.8 приведены характерные осциллограммы напряжения на лазерном промежутке, тока разряда и импульса генерации в смеси с малым содержанием трифторида азота. В наших экспериментах при повышении добротности резонатора снижение в смеси парциального давления NF₃ с 1.5 до 0.75 Тор привело к увеличению полной длительности импульса излучения до 200 нс при длительности на полувысоте до 100 нс, что близко к результатам, полученным в [12] в аналогичных условиях при использовании рентгеновской предыонизации и сложного генератора двойного разряда на основе магнитных ключей. Получена энергия излучения до 150 мДж, а КПД ХеF-лазера относительно вложенной энергии η_{int} достигал 1.5 %.

В смеси, содержащей 1.5 Тор NF₃, при использовании индуктивного накопителя с C₀ = 70 нФ энергия излучения возрастала с ростом давления буферного газа и при p = 3.5 атм достигала 0.5 Дж, что соответствовало удельной лазерной энергии ~ 1.8 Дж/л и электрическому КПД η₀ = 1.1 %. Внутренний КПД ХеF-лазера η_{int} (относительно вложенной в активную среду энергии) в этом случае превышал 2 %. При отключении индуктивного накопителя энергия излучения снижалась на 30 % – 50 %.

На рис.9 приведены характерные осциллограммы и зависимости энергии излучения и КПД генерации ХеF-лазера, полученные при уменьшении емкости C₀ до 38 нФ и накачке от индуктивного и емкостного генераторов. Уменьшение емкости накопителя привело к сокращению длительности тока разряда до ~ 150 нс. При использовании индуктивного генератора импульс излучения по форме повторял импульс тока разряда и прекращался одновременно с прекращением импульса возбуждения. При этом длительность импульса генерации (120 нс по основанию и 50 нс на полувысоте) оставалась примерно такой же, как и при C₀ = 70 нФ. Максимальный электрический КПД ХеF-лазера в условиях данного эксперимента составил 1.6 %. Ранее столь высокий КПД был получен только в ХеF-усилителе с накачкой быстрым разрядом

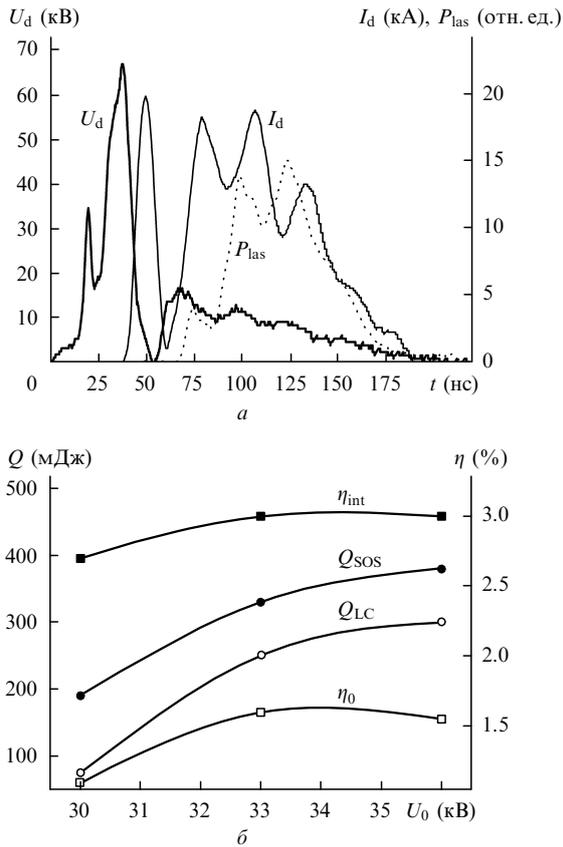


Рис.9. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке U_d , тока разряда I_d и лазерного излучения P_{las} , полученные при использовании индуктивного накопителя при $U_0 = 36$ кВ (а), и зависимости энергии излучения Q_{SOS} , внутреннего (η_{int}) и электрического (η_0) КПД XeF-лазера при накачке от генератора с индуктивным накопителем, а также энергии излучения Q_{LC} при накачке от емкостного генератора от зарядного напряжения конденсатора C_0 (б). Смесь Ne:Xe:NF₃ = 2.5 атм:6 Тор:1.5 Тор, $C_0 = 38$ нФ, $C_1 = 10$ нФ.

за счет уменьшения потерь энергии на достижение порога [20]. Получена энергия излучения до 0.36 Дж, а эффективность η_{int} XeF-лазера с накачкой от индуктивного накопителя относительно вложенной энергии достигала 3%. Близкие значения внутреннего КПД XeF-лазера получены при возбуждении смесей Ne–Xe–NF₃ пучком электронов, что обеспечивает высокую равномерность энерговклада и снимает проблему контракции разряда [21–23]. Энергия излучения и длительность импульса излучения при отключении индуктивного накопителя заметно снижались.

На основе достигнутых результатов можно сделать вывод, что генератор с индуктивным накопителем позволяет зажигать устойчивый объемный разряд в смесях с трифторидом азота длительностью до 150–200 нс. Высокое качество разряда в свою очередь приводит к существенному увеличению энергии и эффективности генерации, а также длительности импульса излучения XeF-лазера.

4. Заключение

Проведены исследования лазерных характеристик при возбуждении смесей Ne–Xe–NF₃ двойным разрядом от генератора с индуктивным накопителем энергии и пре-

рывателем тока на основе полупроводниковых SOS-диодов. При этом индуктивный генератор, в отличие от других генераторов двойного разряда, не требовал импульсной зарядки накопительных конденсаторов и точной синхронизации их запуска. Разброс времени срабатывания отдельных SOS-диодов в генераторе при их параллельном соединении не превышал нескольких наносекунд. Генератор обеспечивал высокую стабильность генерируемых импульсов, в том числе и при работе в частотном режиме.

Показано, что высоковольтный предимпульс, формируемый генератором с индуктивным накопителем, существенно повышает стабильность и длительность горения объемного разряда в смесях с NF₃, а также увеличивает энергию излучения и длительность импульса генерации на В–Х-переходе молекул XeF*. Получены лазерные импульсы с полной длительностью до 200 нс при длительности на полувысоте до 100 нс. Энергия излучения на молекулах XeF* ($\lambda = 348, 351$ и 353 нм) достигала 0.5 Дж при электрическом КПД XeF-лазера η_0 до 1.6%. Внутренний КПД η_{int} был близок к эффективности XeF-лазеров с накачкой пучком электронов и достигал 3%.

На основе проведенных экспериментов был создан эффективный длинноимпульсный электроразрядный XeF-лазер с простой и надежной искровой предыонизацией и накачкой от генератора с индуктивным накопителем энергии и прерывателем тока на основе полупроводниковых SOS-диодов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ, проект № 2596.

- Levatter J.I., Robertson K.L., Lin S.C. *Appl. Phys. Lett.*, **39**, 297 (1981).
- Ломаев М.И., Мельченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48**, 1385 (1984).
- Long W.H., Plummer M.J., Stappaerts E.A. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 735 (1983).
- Taylor R.S., Leopold K.E. *J. Appl. Phys.*, **65**, 22 (1989).
- Fischer C.H., Kushner M.J., DeHart T.E., MacDaniek J.P., Petr R.A., Ewing J.J. *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1574 (1986).
- Kuscner M.J. *IEEE Transactions on Plasma Science*, **19**, 387 (1991).
- Burnham R., Powell F.X., Djeu N. *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 30 (1976).
- Sarjeant W.J., Alcock A.J., Leopold K.E. *Appl. Phys. Lett.*, **30**, 635 (1977).
- Верховский В.С., Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **8**, 417 (1981).
- Kumagai H., Obara M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 1874 (1989).
- Баранов В.Ю., Борисов В.М., Христофоров О.Б. *Квантовая электроника*, **8**, 165 (1981).
- Mei Q.-C., M.Peters P.J., Trentelman M., Wittman W.J. *Appl. Phys. B*, **60**, 553 (1995).
- Trentelman M., M.Peters P.J., Mei Q.-C., Wittman W.J. *J. Opt. Soc. Am. B*, **12**, 2494 (1995).
- Бакшт Е.Х., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **30**, 506 (2000).
- Baksh E.H., Losev V.F., Panchenko A.N., Panchenko Yu.N., Tarasenko V. F. *SPIE Proc. Int. Opt. Eng.*, **4747**, 88 (2001).
- Baksh E.H., Panchenko A.N., Tarasenko V.F., Matsunaga T., Goto T. *Jap. J. Appl. Phys.*, **41**, 3701 (2002).
- Makarov M., Bonnet J., Pigache D. *Appl. Phys. B*, **66**, 417 (1998).
- Рукин С.Н. *ИТЭ*, № 4, 5 (1999).
- Баранов В.Ю., Борисов В.М., Кирюхин Ю.Б., Степанов Ю.Ю. *Квантовая электроника*, **5**, 2285 (1978).
- Sadighi-Bonabi R., W.Lee F., Collins C.B. *J. Appl. Phys.*, **52**, 8508 (1982).
- Mandl A., Litzemberger L. *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 955 (1987).
- Nishida N., Tittel F.K. *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 1847 (1988).
- Mandl A. *J. Appl. Phys.*, **71**, 1630 (1992).