

Генератор импульсов для накачки электроразрядных эксимерных лазеров

И.Н.Коновалов, Ю.Н.Панченко, М.Ю.Сухов

Для накачки электроразрядных эксимерных лазеров разработан генератор импульсов, в котором емкостной накопитель энергии подключен к газоразрядной камере лазера с помощью многоканального искрового коммутатора через малоиндуктивную полосковую линию. Данная схема генератора позволяет уменьшить потери энергии в коммутаторе и индуктивность цепи разряда емкостного накопителя; при мощности накачки 800 МВт эффективность передачи запасаемой энергии в нагрузку достигает 85 %. Для зажигания однородного объемного разряда генератор формирует предымпульс, создающий в газоразрядной камере лазера слаботочный объемный разряд. При возбуждении электроразрядного ХеСl-лазера с размером активной области $3 \times 5.4 \times 80$ см, составом смеси Ne:Хе:НСl = 2000:2.5:1 и давлением 4 атм получены импульсы излучения с энергией до 3.4 Дж и длительностью на полувысоте до 260 нс, а также однородное распределение энергии по апертуре излучения.

Ключевые слова: генератор импульсов, объемный разряд, ХеСl-лазер.

1. Введение

Значительный прогресс в создании образцов электроразрядных эксимерных лазеров с энергией излучения в импульсе 1–10 Дж достигнут при использовании в генераторах накачки емкостных накопительных линий с волновым сопротивлением не более 1 Ом [1–8]. Для зажигания самостоятельного объемного разряда применяется высоковольтный импульс, формируемый обостряющей емкостью разрядного контура генератора накачки либо поступающий на ввод газоразрядной камеры от дополнительной зарядной емкости. Уменьшение времени формирования объемного разряда за счет большой крутизны нарастания напряжения на межэлектродном промежутке газоразрядной камеры и зарядка накопительной линии с водяной изоляцией до двойного напряжения квазистационарного горения разряда позволили получить эффективность передачи энергии от линии в активную среду лазера 93 % [1]. Улучшение однородности горения объемного разряда и оптимизация напряженности электрического поля в плазме обеспечили эффективную накачку ХеСl-лазера с КПД до 5 % [5]. Как отмечалось ранее [1, 7, 8], дальнейшее увеличение КПД электроразрядных эксимерных лазеров возможно за счет улучшения однородности горения объемного разряда, увеличения скорости нарастания тока в нем и уменьшения потерь энергии в коммутаторе.

При последовательном соединении емкостного накопителя энергии, коммутатора и нагрузки для уменьшения времени коммутации и, следовательно, потерь энергии в коммутаторе параллельно коммутатору подключалась сосредоточенная либо распределенная «греющая»

емкость [9, 10]. Подключение коммутатора по такой схеме приводит к большой суммарной индуктивности разрядной цепи, поэтому его габаритные размеры должны быть по возможности минимальными. А в генераторе импульсов, выполненном на основе двойной емкостной линии, коммутатор вынесен из цепи разряда линии на нагрузку, ограничения на его габаритные размеры не накладываются. При использовании такого генератора требуется зарядное напряжение, в два раза меньшее, чем при использовании генератора с одним емкостным накопителем. Однако во время инвертирования напряжения в одной из емкостных линий генератора ток коммутации в два раза больше, чем при аналогичных условиях в генераторе с одной линией. Это приводит к большим потерям энергии в коммутаторе и удлинению фронта импульса напряжения на нагрузке.

С целью увеличения эффективности использования энергии, запасаемой в генераторе, за счет уменьшения потерь энергии в коммутаторе и уменьшения индуктивности цепи разряда генератора на нагрузку нами для накачки электроразрядных эксимерных лазеров разработан генератор импульсов, в котором емкостной накопитель энергии подключен к газоразрядной камере лазера с помощью многоканального искрового коммутатора через малоиндуктивную полосковую линию. Для зажигания однородного объемного разряда генератор формирует предымпульс, создающий в газоразрядной камере лазера слаботочный объемный разряд.

2. Экспериментальная установка

Принципиальная электрическая схема генератора дана на рис.1. Накопитель энергии C_L состоит из двух параллельно соединенных линий с пленочной изоляцией (марки ФЛ-100 или ФЛ-200) или с пленочно-бумажно-масляной изоляцией (марки ФЛ-300), разработанных в ОКБ «Новик» и имеющих соответственно «электрическую длину» 100, 200 и 300 нс, емкость 50, 100 и 150 нФ и

И.Н.Коновалов, Ю.Н.Панченко, М.Ю.Сухов. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 4; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 3 июля 2003 г.

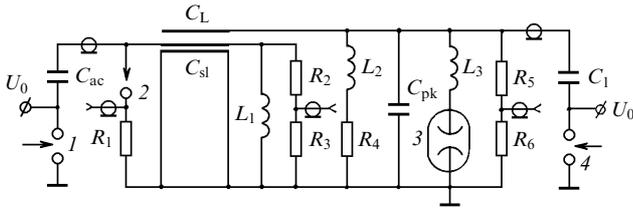


Рис. 1. Электрическая схема генератора:

1, 4 – искровые разрядники; 2 – коммутатор; 3 – газоразрядная камера; C_L – накопитель энергии; C_{sl} – емкость полосковой линии; C_{pk} – обостряющая емкость; C_{ac} – накопительная емкость; U_0 – зарядное напряжение.

волновое сопротивление 1 Ом. Импульсная зарядка линий производится от емкости C_{ac} марки ИК-100 кВ–0.4 мкФ через кабель КВИ-120 при коммутации коаксиального управляемого искрового разрядника 1 [11]. Зарядная индуктивность $L_2 = 1$ мкГн и сопротивление $R_4 = 2.4$ Ом изготовлены в виде спирали из нихромовой проволоки диаметром 0.5 мм. Регистрация импульсов напряжения на емкостных линиях и на вводе в газоразрядную камеру 3 осуществляется с помощью делителей напряжения R_2, R_3 и R_5, R_6 . Ток разряда накопительных линий измеряется с помощью шунтов R_1 . Шунты выполнены из композиционных резисторов ТВО-0.5 Вт – 1 Ом, которые равномерно распределены по ширине линий.

В качестве быстродействующего малоиндуктивного коммутатора 2 использовался двухэлектродный многоканальный искровой разрядник с резко неоднородным электрическим полем около анода. Электроды разрядника изготовлены из нержавеющей стали: анод – пластинка толщиной 1 мм, катод – стержень диаметром 15 мм. Длина электродов равна 680 мм, зазор между электродами – 6 мм. Для обеспечения стабильности запуска и многоканального пробоя разрядника межэлектродный зазор подсвечивается от искр, зажигаемых около катода при запуске разрядника. Корпус разрядника выполнен из винипластовой трубы с внешним диаметром 65 мм. При зарядке накопительных линий до 40–60 кВ многоканальный разрядник заполнялся азотом до давления соответственно 1.5–2.5 атм. Для частотного режима работы генератора накачки разработан аналогичный по конфигурации разрядник с металлическим корпусом и водоохлаждаемыми электродами [11].

Полосковая линия имеет емкость $C_{sl} = 5$ нФ, «электрическую длину» $t_{sl} = 10$ нс, волновое сопротивление $\rho_{sl} = 1$ Ом и образована нижними шинами накопительных линий и заземленной токоведущей шиной генератора, отделенными друг от друга листом из винипласта или полиэтилена. Генератор накачки выполнен по двухконтурной схеме с обостряющей емкостью $C_{pk} = 4.9$ нФ, ответственной за формирование объемного разряда в газоразрядной камере. Обостряющая емкость собрана из керамических конденсаторов марки КВИ-3 (20 кВ, 680 пФ). Пробой многоканального искрового разрядника происходит под действием емкости $C_1 = 6.6$ нФ, заряженной до напряжения 60 кВ. Ток разряда емкости C_1 коммутируется управляемым искровым разрядником 4.

Электрические характеристики и размеры полосковой линии генератора накачки можно определить, исходя из следующих условий. При заданных размерах активной области лазера, составе и давлении рабочей смеси газов режимом накачки лазера определяются зарядное напряжение U_0 на накопительных линиях генератора им-

пульсов и амплитуда тока объемного разряда I_c . Волновое сопротивление полосковой линии должно удовлетворять условию $\rho_{sl} = U_0/I_c$, «электрическая длина» t_{sl} линии должна быть равна времени t_c , необходимому для достижения разрядного тока I_c в коммутаторе 2 [11]. Емкость полосковой линии можно определить из соотношения $\rho_{sl} = t_{sl}/(2C_{sl})$ и известного выражения $C_{sl} = \epsilon_0 \epsilon S/a$, где $S = lb$ – площадь меньшей из токопроводящих пластин, образующих линию. Отсюда получаем размеры полосковой линии:

$$\frac{a}{b} = \frac{U_0}{I_c} c \epsilon_0 \sqrt{\epsilon}, \quad (1)$$

$$l = \frac{t_c c}{2\sqrt{\epsilon}}, \quad (2)$$

где a – толщина диэлектрика полосковой линии (в м); b – ширина полосковой линии (в м); l – длина полосковой линии (в м); c – скорость света (в м/с); ϵ_0 – электрическая постоянная (в Ф/м); ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость.

Быстрое нарастание напряжения на полосковой линии при зарядке от емкости C_1 и увеличение напряженности электрического поля вблизи анода в искровом разряднике приводят при достижении напряжения пробоя разрядника к многоканальной коммутации тока. При большом числе искровых каналов, когда ток в канале в среднем меньше 10 кА, постоянную времени τ_R экспоненциального спада напряжения на N параллельных каналах в течение первых ~ 50 нс от начала пробоя разрядника можно определить, используя комбинированную эмпирическую формулу Мартина [12]

$$\tau_R = \frac{L}{NR} + 88d^{1/3} R^{-1/3} E_0^{-4/3} \delta^{1/2} N^{-1/3}, \quad (3)$$

где d – расстояние между анодом и катодом в разряднике (в см); R – импеданс генератора (в Ом); E_0 – начальная напряженность электрического поля вдоль канала (в единицах 10 кВ/см); δ – отношение плотности воздуха в межэлектродном зазоре к его плотности при нормальных температуре и давлении; $L \approx 14d$ – индуктивность канала (L измеряется в нГн).

При разряде полосковой линии и затем накопительных линий генератора накачки нарастание тока в искровых каналах разрядника в основном зависит от скорости газодинамического расширения каналов, равной $\sim 10^6$ см/с [13, 14]. Температура азотной плазмы в каналах достигает $(2-3) \times 10^4$ К, плотность электронов равна $\sim 2 \times 10^{17}$ см $^{-3}$. В результате конверсии однозарядных ионов азота концентрация ионов N_2^+ нарастает до $\sim 10^{17}$ см $^{-3}$. В этих условиях характерное время диссоциативной рекомбинации электронов и молекулярных ионов азота составляет менее 1 нс. Для поддержания возрастающей проводимости плазмы во всех сформировавшихся искровых каналах необходимо, чтобы в течение времени коммутации разрядника t_c скорость нарастания тока в разрядной цепи генератора накачки была близка к 10^{12} А/с. При ограничении скорости нарастания коммутируемого тока и после достижения им максимального значения происходит перераспределение тока между каналами, образовавшимися раньше всех, и каналами, образовавшимися позднее.

Из-за наличия индуктивности линии между искровыми каналами это может привести к существенной нерав-

номерности в распределении напряжения между каналами и к более существенному различию токов через каналы [9]. В результате увеличатся активное сопротивление разрядника и потери энергии на нем, возникнет искажение фронта волны напряжения, падающей на обостряющую емкость генератора и на ввод газоразрядной камеры лазера. В связи с этим необходимо принимать меры, обеспечивающие многоканальный пробой разрядника с малым временным разбросом [15]. Индуктивность подключения полосковой линии к разряднику и индуктивность нагрузки должны быть минимально возможными.

Существенное значение имеют собственные характеристики накопительных линий генератора, поскольку они определяют амплитуду и максимально возможную скорость нарастания разрядного тока. Для линии с распределенными параметрами имеем

$$\rho_{CL} = \frac{377a}{b\sqrt{\epsilon}}, \quad (4)$$

$$\frac{I_a}{b} = 2.65 \times 10^{-3} E\sqrt{\epsilon}, \quad (5)$$

где I_a – амплитуда тока при коротком замыкании линии; E – напряженность электрического поля в изоляции; ρ_{CL} – волновое сопротивление линии. Из (4), (5) следует, что максимально возможный ток от линии определяется диэлектрической проницаемостью изоляции, ее электрической прочностью и размером линии. Для получения большого тока необходимо использовать диэлектрики с большой величиной $E\sqrt{\epsilon}$. В импульсных генераторах с низкоомными линиями вода, по существу, является наиболее приемлемым диэлектриком. Однако линии с водяной изоляцией имеют относительно большие размеры, для очистки воды от примесей требуется дополнительная аппаратура.

В разработанном нами генераторе применяются линии с пленочной и пленочно-бумажно-масляной изоляцией, поскольку они отличаются компактностью и простотой технического обслуживания. В частности, линии ФЛ-200 имеют ширину 285 мм, высоту 90 мм, длину 270 мм и при номинальном зарядном напряжении 70 кВ рассчитаны на частоту циклов зарядка – разряд до 100 Гц. Линии ФЛ-200 успешно использовались для накачки широкоапертурного электроразрядного ХеСl-лазера; получены энергия излучения в импульсе 14 Дж и КПД по запасаемой в линиях энергии 4 % [6].

При исследовании широкоапертурного электроразрядного ХеСl-лазера нами было показано [16, 17], что при предыонизации рабочей смеси газов Ne – Хе – НСl до начальной концентрации электронов $n_0 \geq 10^{12} \text{ см}^{-3}$ улучшаются однородность и устойчивость горения самостоятельного объемного разряда. В связи с этим для зажигания однородного объемного разряда в разработанном генераторе предусмотрено формирование предимпульса, создающего в газоразрядной камере лазера слаботочный объемный разряд. При зарядке накопительных линий C_L от емкости C_{ac} за 2.5 мкс на сопротивлении R_d возникает падение напряжения до 10 кВ, приложенное к обостряющей емкости C_{pk} и разрядному промежутку газоразрядной камеры 3 (рис.1).

При срабатывании источника рентгеновского излучения, осуществляющего предыонизацию рабочей смеси газов, в разрядном промежутке зажигается однородный

по свечению объемный разряд с концентрацией электронов порядка 10^{12} см^{-3} [18]. При инициировании пробоя многоканального искрового разрядника импульсом напряжения, поступающим от емкости C_1 , параметры разрядных промежутков газоразрядной камеры и многоканального искрового разрядника желателно подбирать так, чтобы при заданной крутизне нарастания напряжения на них напряжение пробоя разрядника было близким к максимальному напряжению, достигаемому при формировании объемного разряда. В этом случае в активной области лазера происходит кратковременное усиление горения слаботочного объемного разряда.

3. Результаты экспериментов

Экспериментальное исследование режимов разряда линий ФЛ-100 и ФЛ-200 в разработанном генераторе импульсов на согласованную с ними малоиндуктивную активную нагрузку 0.5 Ом показало, что данная схема построения генератора не уступает схеме емкостная линия – коммутатор – нагрузка даже при минимальных размерах встроенного в нагрузку коммутатора. При разряде накопительных линий полосковая линия срабатывает как малоиндуктивный элемент разрядной цепи.

Падение напряжения на разряднике и ток разряда линий измерялись одновременно в нескольких точках по длине разрядника. Результаты измерений, а также наблюдение свечения искровых каналов через окна в торцах корпуса разрядника давали возможность оценивать динамику развития искровых каналов, распределение каналов и коммутируемого тока по длине разрядника. С увеличением зарядного напряжения на накопительных линиях от 40 до 60 кВ пробой разрядника происходил по большему числу искровых каналов (30–40 на 1 м длины разрядника), на фоне которых были видны 6–8 диффузных каналов, связанных, по-видимому, с рассеянием энергии в конце импульса накачки. При этом разброс измерений коммутируемого тока уменьшался с 30 % до ~ 10 %. При зарядных напряжениях на накопительных линиях менее 40 кВ многоканальная коммутация тока достигалась без изменения конфигурации электродов разрядника путем заполнения его гелием до давления 3–5 атм. Наиболее стабильно многоканальный разрядник срабатывал при разряде генератора накачки на короткозамкнутую нагрузку или нагрузку, составляющую доли ома, поскольку скорость нарастания и амплитуда разрядного тока были наибольшими для заданных зарядных напряжений на накопительных линиях.

Полный ток разряда накопительных линий рассчитывался с учетом неоднородности его распределения по длине электродов многоканального разрядника. Результаты расчетов проверялись путем сопоставления заряда, прошедшего по цепи, и наблюдаемого при этом изменения напряжения на накопительных линиях, а также по данным измерений падения напряжения на активной нагрузке генератора. Потери энергии на многоканальном разряднике оценивались по осциллограммам спада напряжения на нем и нарастания тока в цепи с учетом падения напряжения на собственной индуктивности разрядника.

Динамика изменения активного сопротивления многоканального разрядника во время разряда накопительных линий ФЛ-200 на согласованную нагрузку показана на рис.2,а. После пробоя искрового разрядника в течение

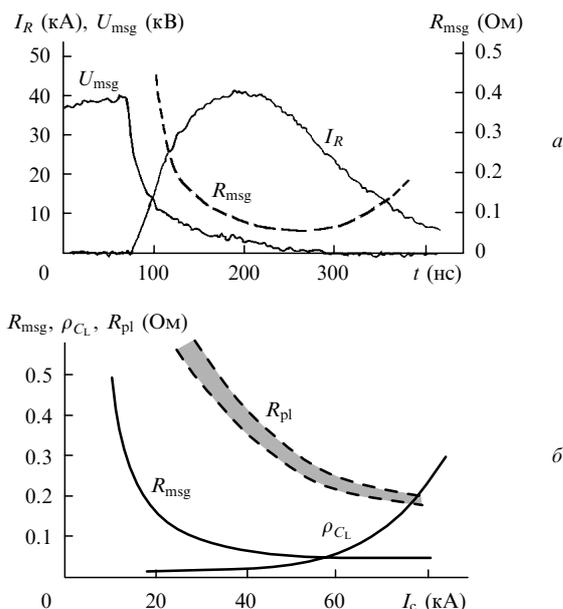


Рис.2. Динамика изменения напряжения U_{msg} на многоканальном разряднике и активного сопротивления R_{msg} разрядника при разряде генератора с током I_R на согласованную нагрузку (а), а также зависимости активного сопротивления R_{msg} , сопротивления ρ_{CL} активных потерь в накопительных линиях и сопротивления плазмы R_{pl} объемного разряда от тока I_c разряда генератора (б) при размере активной области лазера $3 \times 5.4 \times 80$ см, составе смеси Ne:Xe:HCl = (1500 – 2000):(2 – 5):1 и давлении 4 атм.

первых ~ 10 нс скорость спада напряжения на разряднике достигает 5×10^{12} В/с. Однако в последующие 50 нс скорость спада напряжения уменьшается до 2×10^{11} В/с и далее составляет в среднем 2×10^{10} В/с. В итоге, в течение времени нарастания тока в цепи напряжение на межэлектродном зазоре разрядника составляет от 5 до 3 кВ и активное сопротивление искровых каналов изменяется от 1 до 0.3 Ом. При достижении амплитуды разрядного тока, когда мощность генератора в импульсе накачки максимальна, активное сопротивление искровых каналов составляет $\sim 10\% - 20\%$ от сопротивления нагрузки. С увеличением амплитуды тока в цепи от 20 до 80 кА сопротивление разрядника экспоненциально уменьшается от 0.15 до 0.035 Ом.

При использовании в генераторе накопительных линий ФЛ-100 или ФЛ-200, в которых изоляционная лавсановая пленка смочена соответственно трансформаторным маслом или карбогалом (диметилциклогексаном) без применения конденсаторной бумаги, генератор развивал в импульсе накачки мощность до 800 МВт с эффективностью передачи запасенной энергии в нагрузку 85%. При дальнейшем увеличении мощности разряда в линиях резко возрастали диэлектрические потери и доля энергии, вводимой в нагрузку, уменьшалась. При разряде линий в режиме короткого замыкания скорость нарастания тока в цепи не превышала 6×10^{11} А/с, амплитуды тока составляли ~ 0.75 от амплитуд, рассчитанных путем деления зарядных напряжений на волновое сопротивление линий. В линиях ФЛ-300 применялась комбинированная пленочно-бумажно-масляная изоляция; при отборе с линий мощности более 600 МВт активные потери в них достигали 50% от запасенной энергии. При коротком замыкании линий ФЛ-300 скорость нарастания разрядного тока не превышала 2×10^{11} А/с, амплитуда тока составляла ~ 0.5 от расчетной.

На рис.2,б показаны зависимости активного сопротивления многоканального искрового разрядника и активного сопротивления накопительных линий ФЛ-200 (при использовании в расчетах последовательной схемы замещения диэлектрика с потерями) от тока разряда генератора на нагрузку. Сравнение их с сопротивлением плазмы объемного разряда в электроразрядном ХеСл-лазере, исследованном нами ранее [6, 16, 17], показывает, что при токе разряда генератора до 30 кА и, следовательно, относительно низкой удельной мощности накачки лазера (менее 300 кВт/см³) потери энергии в генераторе и макронеоднородность накачки активной среды лазера будут определяться в основном многоканальным разрядником. Поэтому для данного режима разряда генератора конфигурация межэлектродного зазора в разряднике и его коммутационные характеристики должны быть соответствующим образом подобраны.

При разрядном токе 30–60 кА, когда удельная мощность накачки лазера возрастает от 300 до 500 кВт/см³, режимы накачки лазера оптимальны по эффективности передачи запасаемой энергии в плазму объемного разряда (до 85%) и по эффективности преобразования вложенной энергии в световую (до 4.7%) [6]. Зарядка накопительных линий в генераторе до напряжений более 60 кВ и достижение амплитуды разрядного тока более 60 кА приведут к дальнейшему линейному росту мощности накачки лазера и энергии импульсов излучения [16], однако из-за возрастания диэлектрических потерь в линиях КПД лазера начнет резко снижаться.

Разработанный генератор использовался нами для накачки электроразрядного ХеСл-лазера с размером активной области $3 \times 5.4 \times 80$ см. Индуктивность газоразрядной камеры $L_3 \sim 20$ нГн. Задача состояла в получении импульсов излучения с энергией до 2 Дж и длительностью на полувысоте не менее 250 нс. В связи с этим в генераторе накачки применялись линии ФЛ-300 с «электрической длиной» 300 нс. Рабочая смесь газов в газоразрядной камере имела состав Ne:Xe:HCl = 2000:2.5:1 при давлении 4 атм. Предыонизация газа осуществлялась мягким рентгеновским излучением с энергией квантов 25–30 кэВ, длительность импульса рентгеновского излучения составляла 500 нс. Источник излучения обеспечивал однородную ионизацию газа в активной области лазера и в отсутствие напряжения, приложенного к разрядному промежутку, создавал начальную концентрацию электронов до 2×10^9 см⁻³ [16, 19]. Оптический резонатор был образован диэлектрическим зеркалом с коэффициентом отражения 99% на длине волны ~ 308 нм и плоскопараллельной кварцевой пластиной. Импульсы лазерного излучения регистрировались с помощью фотодиода ФЭК-22, энергия излучения измерялась калориметром ИМО-2Н.

Осциллограммы импульсов напряжения, тока и излучения, характеризующие срабатывание генератора импульсов накачки, ввод энергии в активную среду лазера и генерацию излучения, даны на рис.3. После пробоя многоканального разрядника в максимуме импульса зарядного напряжения на емкостных накопительных линиях полосковая линия разряжается на разрядник, и напряжение от накопительных линий подается на перезарядку обостряющей емкости. При этом достигаются крутизна нарастания и амплитуда напряжения на обостряющей емкости, не меньшие, чем при обычной двухконтурной компоновке генератора накачки.

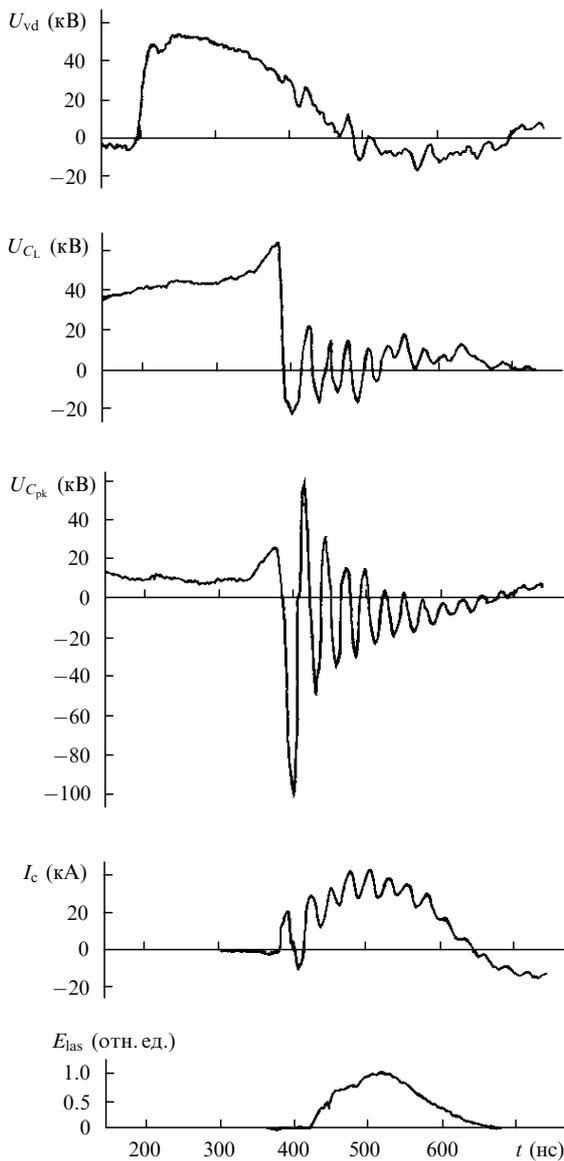


Рис.3. Осциллограммы импульсов напряжения на накопительных линиях U_{Ct} , на обостряющей емкости генератора U_{Cpk} , на вакуумном диоде источника рентгеновского излучения U_{vd} , а также тока объемного разряда I_c и генерируемого излучения E_{las} для смеси состава Ne:Xe:HCl = 2000:2.5:1 и давления 4 атм.

Во время формирования самостоятельного объемного разряда и нарастания разрядного тока в активной области лазера колебательный разряд обостряющей емкости через многоканальный разрядник поддерживает проводимость искровых каналов в нем и их равномерное распределение по длине разрядника. Лучшие режимы работы лазера были получены при времени задержки формирования объемного разряда относительно начала импульса рентгеновского излучения 350–400 нс. К этому времени рентгеновское излучение, поддерживающее горение слаботоочного объемного разряда, достигало максимальной интенсивности и скорость образования свободных электронов в рабочей смеси газов под действием рентгеновского излучения составляла $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. При зарядке накопительных линий генератора накачки до напряжения 45 кВ получены импульсы излучения с энергией 2.1 Дж, длительностью на полувысоте 260 нс и однородным распределением энергии по апертуре излу-

чения $3 \times 5.4 \text{ см}$. При увеличении зарядного напряжения на линиях до 60 кВ энергия импульса излучения равнялась 3.4 Дж, а длительность на полувысоте – 240 нс.

4. Заключение

Для накачки электроразрядных эксимерных лазеров разработан генератор импульсов, в котором емкостные накопительные линии подключаются к нагрузке с помощью многоканального искрового разрядника через малоиндуктивную полосковую линию. Предложенная электрическая схема генератора позволяет обеспечить быструю коммутацию тока в разрядной цепи и, следовательно, малые потери энергии в разряднике, улучшить согласование импедансов накопительных линий генератора и нагрузки за счет уменьшения индуктивности между ними.

Генераторы на основе компактных накопительных линий с пленочной изоляцией способны развивать мощность накачки лазера до 800 МВт, при этом эффективность передачи запасаемой энергии в объемный разряд составляет 85 %. Однородный и устойчивый объемный разряд формируется при предварительном зажигании в активной области лазера слаботоочного объемного разряда с концентрацией электронов в плазме $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При возбуждении разработанным генератором импульсов электроразрядного ХеСl-лазера с размером активной области $3 \times 5.4 \times 80 \text{ см}$ достигнуто однородное горение объемного разряда длительностью 500 нс с удельной мощностью накачки активной среды 200–400 кВт/см³, получены импульсы лазерного излучения с энергией до 3.4 Дж и длительностью на полувысоте до 260 нс, а также равномерное распределение энергии по апертуре излучения.

1. Long W.H. Jr., Plummer M.J., Stappaerts E.A. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 735 (1983).
2. Fisher C.H., Kushner M.J., De Hart T.E., Mc Daniel J.P., Petr R.A., Ewing J.J. *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1574 (1986).
3. Taylor R.S., Leopold K.E. *Appl. Phys. B*, **59**, 479 (1994).
4. Van Goor F.A., Witteman W.J., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2206**, 30 (1994).
5. Gerritsen J.W., Keet A.L., Ernst G.J., Witteman W.J. *J. Appl. Phys.*, **67**, 3517 (1990).
6. Басов В.А., Коновалов И.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 787 (1996).
7. Levatter J.I., Robertson K.L., Shao Chi Lin. *J. Appl. Phys.*, **39**, 297 (1981).
8. Van Goor F.A., Trentelman M., Timmermans J.C.M., Witteman W.J. *J. Appl. Phys.*, **75**, 621 (1994).
9. Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. *Сильноточные наносекундные коммутаторы* (Новосибирск: Наука, 1979, с. 97).
10. *Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов*. Под ред. Г.А.Месяца (Новосибирск: Наука, 1974, с. 17).
11. Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Визирь В.А., Коновалов И.Н., Сак К.Д., Червяков В.В. *ПТЭ*, № 6, 86 (1997).
12. Martin J.C. *Multichannel Gaps* (Aldermaston, Berks: SSWA (JSM), 1970).
13. Драбкина С.И. *ЖЭТФ*, **21**, 473 (1957).
14. Брагинский С.И. *ЖЭТФ*, **34**, 1548 (1958).
15. Taylor R.S., Leopold K.E. *Rev. Sci. Instr.*, **55**, 52 (1984).
16. Балбоненко Е.Ф., Басов В.А., Коновалов И.Н., Сак К.Д., Червяков В.В. *ПТЭ*, № 4, 112 (1994).
17. Коновалов И.Н. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **43**, 54 (2000).
18. Коновалов И.Н., Коваль Н.Н., Суслов А.И. *Квантовая электроника*, **32**, 663 (2002).
19. Buehkov Yu., Kostyrya I., Makarov M., Suslov A., Yastremsky A. *Rev. Sci. Instr.*, **65**, 793 (1994).