

Увеличение длительности импульса излучения ArF-лазера с твердотельным генератором накачки

С.И.Мошкун, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков

Исследована возможность увеличения длительности импульса генерации ArF-лазера (длина волны 193 нм) путем применения формирующей искусственной линии с нелинейными дросселями. Описан ArF-лазер (максимальная энергия импульса излучения 15 мДж, длительность лазерных импульсов 18 нс, частота следования импульсов 1 кГц) с полностью твердотельным генератором накачки.

Ключевые слова: твердотельный коммутатор, генератор с магнитным сжатием высоковольтных импульсов, удлиненный импульс ВУФ излучения.

1. Введение

Эксимерные ArF-лазеры являются мощными источниками ВУФ излучения (193 нм), которые широко применяются в промышленности, микроэлектронике, медицине, средствах связи и т. д. [1–9]. Значительные усилия разработчиков этих лазеров направлены на увеличение средней мощности, частоты следования и стабильности импульсов генерации, а также на повышение ресурса работы. В последние годы для решения этих задач успешно применяются системы возбуждения лазеров с полностью твердотельными генераторами накачки [5, 8, 9].

Другой важной задачей является улучшение качества выходного пучка и связанных с ним пространственных временных и спектральных характеристик излучения. В ряде технологических применений ArF-лазеров (фотолитография, запись брэгговских решеток на оптоволокне, получение дифракционных оптических микроструктур и т. д.) повышенные требования предъявляются к характеристикам выходного пучка и сроку службы оптических элементов лазерной установки. При этом возникает ряд проблем: с одной стороны – сравнительно низкая монохроматичность и высокая расходимость пучка, с другой – эффект уплотнения вещества под действием мощного ВУФ излучения. Последнее вызывает изменение показателя преломления оптического материала (плавленый кварц, флюорит кальция), что приводит к деградации зеркал резонатора и сканирующих оптических элементов, через которые проходит лазерный пучок.

Для решения указанных проблем в [10, 11] был предложен эффективный метод, основанный на увеличении длительности импульса. Это дает возможность эффективно управлять пространственной когерентностью пучка и шириной спектра излучения за счет повышения числа проходов излучения по резонатору. Кроме того, в ре-

зультате увеличения длительности лазерного импульса снижается интенсивность пучка и ослабляется негативное влияние эффекта уплотнения вещества. Увеличение длительности лазерного импульса позволяет также повысить импульсную энергию и среднюю мощность излучения, передаваемого по световоду.

Целью настоящей работы было создание и исследование системы возбуждения малогабаритного (активный объем $\sim 9 \text{ см}^3$) ArF-лазера с полностью твердотельным генератором накачки, позволяющей генерировать излучение ($\lambda = 193 \text{ нм}$) с увеличенной примерно в два раза длительностью импульса и частотой следования импульсов до 1 кГц.

2. Увеличение длительности лазерного импульса

Временной профиль оптического импульса малогабаритного ArF-лазера имеет вид короткого одиночного пучка. Для активных сред длиной $\sim 30 \text{ см}$ длительность импульса генерации по полувысоте составляет 5–7 нс. Следовательно, при длине резонатора около 30 см число проходов излучения по резонатору не превышает пяти, что недостаточно для формирования высокомонохроматического пучка. Поэтому используются методы принудительного удлинения лазерного импульса [10, 11].

Наиболее эффективным методом удлинения лазерного импульса является увеличение времени выделения энергии в объемном самостоятельном разряде, которым накачивается активная среда. Этого можно достичь либо за счет применения электрических схем с повышенными значениями индуктивности и емкости, входящих в замкнутую цепь, через которую питается газоразрядный промежуток лазера, либо с помощью искусственных формирующих линий, состоящих из нескольких последовательно включенных LC-контуров [12]. Однако в последнем случае необходимо увеличить длительность фронта напряжения на электродах лазера, чтобы не внести дополнительных потерь энергии при работе генератора накачки.

При высокой частоте следования импульсов накачки ($\sim 1 \text{ кГц}$) очень важно обеспечить высокую однородность объемного самостоятельного разряда, исключаящую

С.И.Мошкун, В.Ю.Хомич, В.А.Ямщиков. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Россия, 191186 С.-Петербург, Дворцовая набережная, 18; e-mail: serg-moshkunov@yandex.ru

появление в разрядном промежутке (РП) искровых каналов и катодных пятен, которые приводят к ускоренной деградации смеси и к эрозии электродов. Чтобы получить достаточно однородный самостоятельный разряд, требуется подавать на РП лазера импульсы накачки с малой (десятки наносекунд) [3, 13] длительностью фронта напряжения. В связи с этим мы предлагаем использовать схемы с нелинейными формирующими линиями, которые сочетают в себе возможность управления длительностью импульса накачки, а также формирования достаточно короткого фронта импульса напряжения на РП. Такие линии часто называют схемами магнитного сжатия высоковольтных импульсов.

3. Полностью твердотельный генератор высоковольтных импульсов

Характеристики ArF-лазеров во многом зависят от параметров высоковольтных импульсов, формируемых генератором накачки на РП лазера. На стадии нарастания напряжения происходит зажигание объемного самостоятельного разряда, которым накачивается активная среда лазера. Чем меньше длительность фронта импульса, тем однороднее разряд и тем больше динамический ресурс работы газовой смеси [13, 14].

При работе лазеров в импульсно-периодическом режиме наиболее эффективными обострителями фронта напряжения являются системы магнитного сжатия, которые представляют собой цепочки последовательно соединенных контуров, состоящих из емкостей и нелинейных насыщающихся дросселей. Число последовательных контуров должно быть таким, чтобы обеспечивались оптимально высокие амплитуда и скорость нарастания напряжения на РП, а также заданная длительность импульса накачки. Системы магнитного сжатия высоковольтных импульсов способны надежно работать при частотах следования импульсов несколько килогерц [15].

Другой важнейшей частью генератора накачки лазера является коммутирующее устройство. В последнее время широко распространение получили мощные полупроводниковые коммутаторы, которые имеют практически неограниченный ресурс и обеспечивают высокую стабильность параметров импульсов напряжения. При этом обычно используются схемы генератора накачки с отно-

сительно низковольтными полупроводниковыми коммутаторами, работающими совместно с повышающими трансформаторами [1].

В отличие от традиционных схем генератора накачки, нами была разработана схема высоковольтного генератора наносекундных импульсов без высоковольтного трансформатора. Функциональная схема генератора показана на рис. 1. Его особенностью являлось использование высоковольтного полупроводникового коммутатора, предложенного в [15, 16]. Генератор выполнен на основе твердотельной элементной базы. Блок генератора содержит высоковольтный стабилизированный источник напряжения, высоковольтный твердотельный коммутатор (ВТК) со схемой управления, двухзвенную систему магнитной компрессии импульсов, а также блок управления и контроля. ВТК полностью управляем (возможно как включение, так и выключение) и состоит из 32 биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), включенных параллельно и последовательно (Z1–Z32). Управление транзисторами осуществляется посредством трансформаторов (на рис. 1 не показаны). Такая схема включения транзисторов позволяет реализовать достаточно простую схему генератора с удвоением напряжения за счет неполного разряда накопительного конденсатора C1.

При подаче импульса управления генератором ВТК открывается, в результате чего происходит резонансная зарядка конденсатора C2 через дроссель L1. Длительность управляющего импульса подбирается такой, чтобы ВТК закрывался в момент достижения максимума напряжения на C2. При этом ток через ВТК близок к нулю, что приводит к значительному снижению коммутационных потерь. Поскольку емкость C1 много больше емкости C2, то величина напряжения на конденсаторе C2 стремится к удвоенному зарядному напряжению $2U_1$. Далее полученный на конденсаторе C2 импульс напряжения сжимается по длительности системой магнитного сжатия и прикладывается к электродам РП.

При использовании высоковольтного источника питания мощностью 2500 Вт и принудительного воздушного охлаждения генератор надежно работал на активную нагрузку 30 Ом при частоте следования импульсов до 2 кГц, обеспечивая амплитуду выходного импульса 20–27 кВ с длительностью фронта нарастания ~ 70 нс.

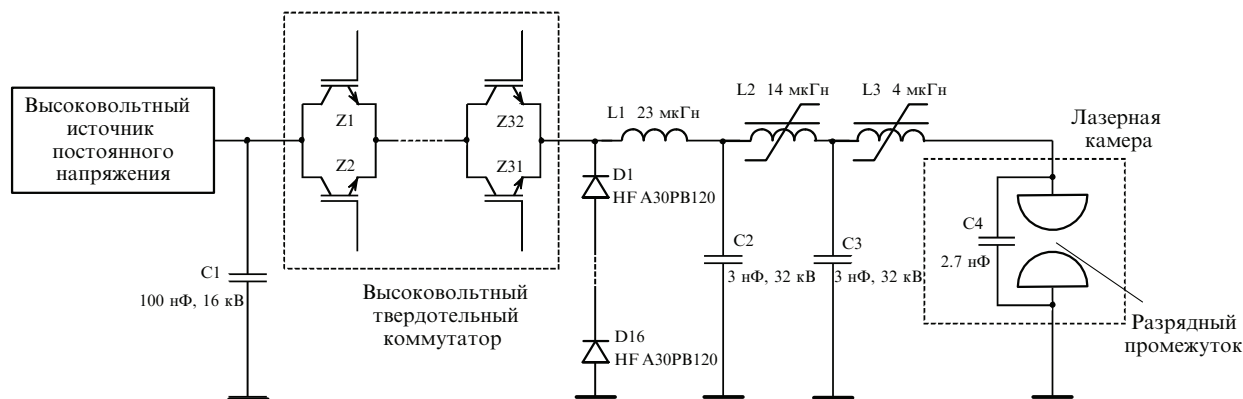


Рис. 1. Функциональная схема генератора накачки.

C1 – накопительный конденсатор; Z1–Z32 – биполярные транзисторы с изолированным затвором; D1–D16 – линейка защитных быстродействующих диодов; L1 – зарядный дроссель; C2 – конденсатор первого звена магнитного сжатия; L2 – насыщающийся дроссель первого звена магнитного сжатия; C3 – конденсатор второго звена магнитного сжатия; L3 – насыщающийся дроссель второго звена магнитного сжатия; C4 – обостряющий конденсатор лазерной камеры.

4. Экспериментальная установка

Система возбуждения электроразрядного AgF-лазера включала в себя твердотельный магнитный генератор накачки и лазерную камеру, конструкция которой описана в [3]. Активный объем разрядного промежутка $V = dwl$ (где $d = 1.2$ см – межэлектродное расстояние, $w = 0.3$ см – ширина разряда и $l = 25$ см – длина РП). Оптический резонатор длиной 34 см устанавливался на корпусе лазерной камеры. Он был образован глухим плоским зеркалом и выходным окном из плоскопараллельной пластины CaF_2 .

Смесь газов F_2 , Ar , He и Ne прокачивалась через РП с помощью диаметального вентилятора. Давление смеси в лазерной камере не превышало 5000 мбар. Рабочая смесь охлаждалась проточной водой, диаметальный вентилятор и радиатор водяного охлаждения располагались внутри камеры.

Энергия выходного лазерного излучения измерялась с помощью пирозлектрического приемника Ophir, одновременно регистрировались импульсы напряжения генератора накачки на разрядном промежутке и импульсы лазерной генерации. Для этого использовались высоковольтный щуп Tektronix P6015A, коаксиальный фотоэлемент ФЭК-22 и осциллограф LeCroy WaveSurfer 432.

5. Выходные характеристики лазера

Экспериментальные зависимости энергии импульса излучения лазера W , максимального напряжения U_{\max} на разрядном промежутке, а также длительности импульса излучения на полувысоте $\tau_{0.5}$ от зарядного напряжения U_1 генератора накачки, представлены на рис.2 и рис.3 соответственно.

Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (кривые 1) и генерации излучения с $\lambda = 193$ нм (кривые 2) при разных значениях U_1 изображены на рис.4. Они позволяют проследить эволюцию лазерного импульса с изменением зарядного напряжения (рис. 4,а) имеет плоскую вершину. Это означает, что пробой РП происходит в период времени, когда вся энергия накачки сосредоточена в емкости C_4 . Поэтому импульс лазерной

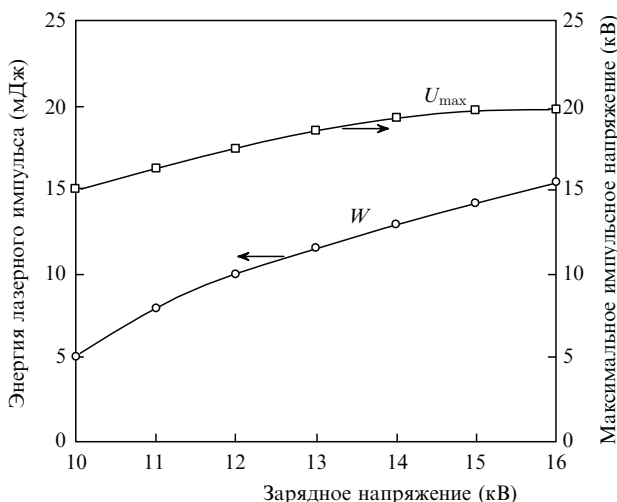


Рис.2. Экспериментальные зависимости энергии импульса излучения лазера W и максимального напряжения на разрядном промежутке U_{\max} от зарядного напряжения U_1 .

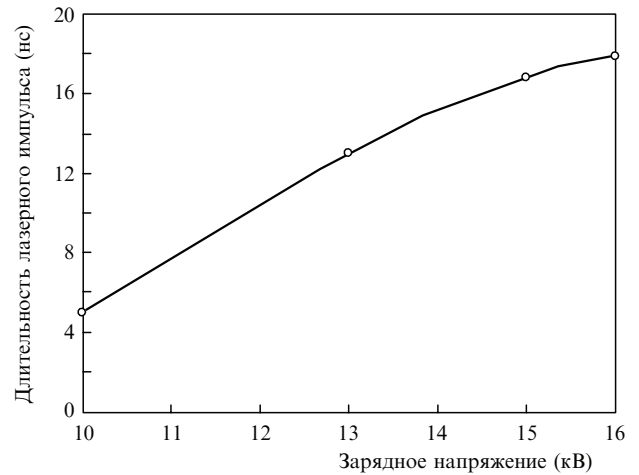


Рис.3. Экспериментальная зависимость длительности лазерного импульса на полувысоте $\tau_{0.5}$ от зарядного напряжения U_1 .

генерации имеет форму одиночного пика, определяемую только разрядом емкости C_4 через РП. В диапазоне напряжений $U_1 = 10 - 12$ кВ амплитуда максимального напряжения U_{\max} на РП растет линейно, что ведет к росту амплитуды лазерного импульса. Однако из-за уменьше-

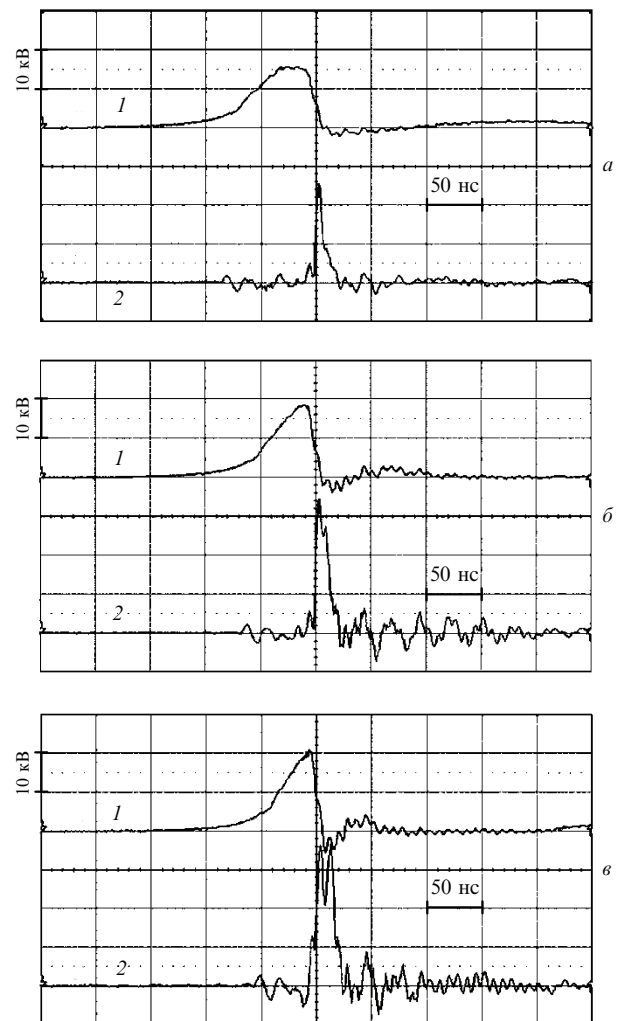


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения на разрядном промежутке (1) и лазерного излучения (2) при зарядном напряжении $U_1 = 10$ (а), 13 (б) и 16 кВ (в).

ния времени задержки пробоя РП относительно момента нарастания фронта импульса напряжения уже при $U_1 \geq 12$ кВ пробой начинает происходить на фронте импульса напряжения. В этих условиях энергия накачки перераспределяется между конденсаторами С3 и С4, в связи с чем при $U_1 = 13$ кВ наблюдается появление импульса с двумя пиками излучения (рис.4,б), обусловленного разрядом обеих емкостей. При дальнейшем увеличении U_1 (рис.3) напряжение U_{\max} растет незначительно, поэтому амплитуда первого пика излучения также изменяется незначительно, а у второго пика она растет сильнее и даже может превышать амплитуду первого пика. При этом длительность импульса излучения $\tau_{0,5}$ становится приблизительно равной удвоенной длительности одиночного импульса и при $U_1 = 16$ кВ достигает 18 нс.

Проведенные исследования показали, что лазер устойчиво работает при частоте следования импульсов до 1 кГц. Средняя мощность выходного излучения превышала 10 Вт. Максимальная эффективность генерации лазера относительно энергии, запасаемой в конденсаторе С2 (рис.1), составляла 1.2 % при зарядном напряжении 13 кВ.

6. Заключение

Предложено использовать схемы с нелинейными формирующими линиями для управления длительностью импульса накачки, а также для получения короткого фронта импульса напряжения накачки, при котором обеспечивается формирование достаточно однородных самостоятельных разрядов. Разработана эффективная система возбуждения эксимерных лазеров, основанная на использовании полностью твердотельного магнитного генератора накачки. Схема позволяет генерировать импульсы излучения ArF-лазера с длительностью до 18 нс и энергией до 15 мДж при частоте следования более 1 кГц.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-10-08-01281-а).

1. *Excimer Laser Technology*. Ed. by D.Basting et al. (Gottingen: Lambda Physik AG, 2001).
2. Borisov V., Khristoforov O., Kirykhin Yu., Vinokhodov A., Demin A., Vodchits V., Eltzov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt Eng.*, **4184**, 348 (2001).
3. Вартапетов С.К., Жигалкин А.А., Лапшин К.Э., Обидин А.З., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **36**, 5, 393 (2006).
4. Klerk J., Wagner C., Droste R., Levasier L., Jorritsma L., Setten E., Kattouw H., Jacobs J., Tilmann Heil T. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt Eng.*, **6520**, 65201Y (2007).
5. Kakizaki K., Sasaki Y., Inone T., Sakai A. *Rev. Sci. Instrum.*, **77**, 035109 (2006).
6. Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. *Докл. РАН*, **419** (6), 754 (2008).
7. Токарев В.Н., Хомич В.Ю., Шмаков В.А., Ямщиков В.А. *Физика и химия обработки материалов*, № 4, 18 (2008).
8. Вартапетов С.К., Грязнов О.В., Малашин М.В., Мошкунов С.И., Небогаткин С.В., Хасая Р.Р., Хомич В.Ю., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **39** (8), 714 (2009).
9. Khasaya R.R., Malashin M.V., Khomich V.Yu., Yamschikov V.A. *Proc. X Intern. Conf. 'Laser and Laser-information Technologies: Fundamental Problems and Applications'* (Smolyan, Bulgaria, 2009, p. 205–215).
10. Kakizaki K., Saito T., Mitsuhashi K., Arai M., Tada T., Kasahara S., Igarashi T., Hotta K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt Eng.*, **4000**, 1397 (2000).
11. Hofmann T., Johanson B., Das P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt Eng.*, **4000**, 511 (2000).
12. Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. *Импульсные газовые лазеры* (М.: Наука, 1991).
13. Осипов В.В. *УФН*, **170** (3), 225 (2000).
14. Аполлонов В.В., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **24**, 483 (1997).
15. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *Генератор высоковольтных наносекундных импульсов на основе биполярных транзисторов с изолированным затвором. Препринт ИПЭФ РАН* (М., 2004).
16. Иванов Е.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю. *ПТЭ*, **1**, 88 (2006).