

Формирование наносекундных и субнаносекундных импульсов излучения ХеСl-лазера с дифракционной расходимостью

Ю.Н.Панченко, В.Ф.Лосев, В.В.Дударев

Приводятся результаты экспериментальных исследований по формированию в ХеСl-лазере импульсов излучения с наносекундной и субнаносекундной длительностью. Для формирования коротких импульсов излучения используется резонатор с ВРМБ-зеркалом. Показано, что фокусировка излучения внутрь и на поверхность нелинейной среды позволяет формировать импульсы длительностью 3 нс и 150 пс соответственно. Полученные пучки содержат в дифракционном угле более 70 % энергии, а отношение сигнал/шум для них составляет более 10^4 .

Ключевые слова: эксимерный лазер, активная среда, ВРМБ-среда, расходимость, субнаносекундный импульс излучения.

1. Введение

Для многих исследований по взаимодействию излучения эксимерных лазеров с различными материалами требуется высокая интенсивность излучения, т. е. лазер должен обеспечивать высокую мощность и минимальную расходимость излучения. Один из путей повышения мощности лазера связан с уменьшением длительности его импульса. Однако известно, что при уменьшении длительности импульса излучения усложняются условия формирования его малой расходимости. Поэтому для формирования коротких и мощных импульсов излучения с малой расходимостью обычно применяются лазерные системы, состоящие из задающего генератора (ЗГ) и усилителя. В ЗГ формируется маломощный лазерный пучок с требуемыми параметрами, а в усилителе повышается его энергия.

Один из способов формирования пучка с требуемыми параметрами в эксимерных лазерах основан на использовании нелинейной среды, как правило такой, в которой реализуется вынужденное рассеяние Мандельштам – Бриллюэна (ВРМБ). Известно, что ВРМБ-среда позволяет осуществить как обращение волнового фронта (ОВФ) для получения пучка с минимальной расходимостью, так и эффективное формирование заданной малой длительности импульса излучения. Наибольшее распространение для этого получили метод компрессии импульса излучения в нелинейной среде [1] и метод «усеченного бриллюэновского рассеяния» (TRUBS) [2]. Первый из них основан на истощении пучка накачки в нелинейной среде, второй – на прерывании процесса вынужденного рассеяния за счет оптического пробоя. Если для реализации первого метода требуется узкополосное излучение накачки, то для второго метода уменьшения длительности импульса можно использовать широкополосное излучение. В работах [2–5] описаны результаты

исследований по формированию в эксимерных лазерных системах импульсов с длительностью до десятков и сотен пикосекунд с помощью метода TRUBS. Во всех этих работах использовались лазерные системы, состоящие из ЗГ и усилителя.

Таким образом, получение мощных коротких импульсов излучения с малой расходимостью связано с созданием лазерных систем, которые включают в себя нелинейную среду и дорогостоящие спектральные и пространственные селекторы излучения.

Сложность и высокая стоимость таких лазерных систем стимулируют исследования, направленные на упрощение оптических схем. Одним из вариантов простого решения задачи формирования короткого импульса излучения с требуемыми параметрами может быть использование ВРМБ-среды в резонаторе лазера, в котором нет дополнительных спектральных селекторов. Главная проблема, которая возникает при этом, связана с большой шириной контура усиления эксимерного лазера. Известно, что для получения ОВФ при ВРМБ широкополосной накачки необходимо реализовать условия взаимодействия, аналогичные случаю монохроматического пучка [6, 7]. Например, в работе [3] было реализовано ОВФ пучка КгF-лазера с шириной спектральной линии $\Delta\nu_p = 32 \text{ см}^{-1}$. В этом случае длина взаимодействия выбиралась меньшей длины когерентности накачки, $L_{\text{int}} < L_{\text{coh}}$, а интенсивность накачки увеличивалась согласно [8] до величины, превышающей критическую интенсивность $I_{\text{cr}} = 4\pi\Delta\nu_p/g$, где g – коэффициент усиления ВРМБ. Однако необходимость повышения интенсивности накачки при использовании широкополосного излучения приводит к росту других нелинейных процессов, конкурирующих с ВРМБ. В работах [9, 10] показано, что при взаимодействии широкополосного излучения с гептаном по мере диссоциации молекул среды или развития вынужденного температурного рассеяния, обусловленных двухфотонным поглощением, эффективность ВРМБ снижается, и процесс рассеяния может вообще прекратиться. Применение газообразных сред, например SF₆, имеющих малый коэффициент двухфотонного поглощения, позволяет избавиться от данных процессов, но в этом случае фактором, снижающим эффективность ВРМБ, является оп-

Ю.Н.Панченко, В.Ф.Лосев, В.В.Дударев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: losev@ogl.hcei.tsc.ru

тический пробой [1, 3]. Проведенные исследования показывают, что для реализации ОВФ в случае широкополосной накачки нужно обеспечить выполнение достаточно жестких условий нелинейного взаимодействия излучения со средой. В эксимерных лазерах, имеющих высокий коэффициент усиления активной среды, формирование мощных импульсов излучения с контрастом более 10^2 – 10^3 возможно лишь при создании лазерных систем, состоящих из ЗГ и усилителя.

Следует отметить работу [11], где были найдены условия, позволяющие получать короткий наносекундный импульс в одном лазерном модуле. Однако авторам [11] не удалось реализовать ОВФ, и расходимость выходного пучка была существенно хуже, чем в работах, в которых использовалась система генератор – усилитель.

В работе [12] нами была показана возможность повышения когерентности излучения длинноимпульсного ХеСл-лазера (длительность импульса генерации $\tau_g = 120$ нс), резонатор которого содержал ВРМБ-зеркало. Выходное излучение такого лазера представляло собой суперпозицию двух пучков, распространяющихся под углом друг к другу. Излучение в каждом пучке состояло из цуга коротких импульсов длительностью 6–8 нс. Ширина спектральной линии излучения была существенно меньше, чем в режиме свободной генерации, а расходимость выходного излучения была близка к дифракционному пределу.

В настоящей работе мы продолжили исследования по формированию коротких импульсов излучения с малой расходимостью за счет использования ВРМБ-зеркала в резонаторе ХеСл-лазера с длительностью импульса генерации ~ 30 нс [13, 14]. Целью данных исследований являлось изучение возможности формирования в лазере импульсов излучения с наносекундной и субнаносекундной длительностью, имеющих расходимость, близкую к дифракционному пределу.

2. Экспериментальная установка и методики измерений

В экспериментах использовался коммерческий электроразрядный ХеСл-лазер серии EL, разработанный в ИСЭ СО РАН [13, 14]. Размер активного объема ХеСл-лазера составлял $0.7 \times 2.2 \times 59$ см. При возбуждении смеси состава $\text{Ne}:\text{Xe}:\text{HCl} = 875:15:1$ при давлении $p = 3.6$ атм в режиме свободной генерации энергия излучения лазера была равна 350 мДж, а длительность импульса на уровне половины амплитуды – 29 нс. Максимальный коэффициент усиления активной среды составлял 0.15 см^{-1} , в то время как ненасыщенный коэффициент поглощения был на порядок меньше.

На рис. 1 представлена оптическая схема резонатора, используемого для формирования коротких импульсов

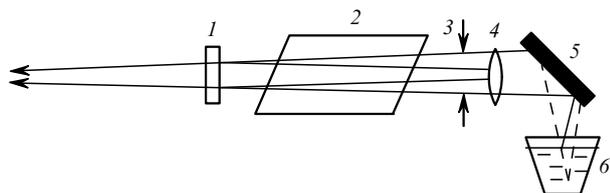


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента:

1 – плоскопараллельная кварцевая пластина; 2 – активная среда ХеСл-лазера; 3 – диафрагма диаметром 10 мм; 4 – двояковыпуклая линза с $f = 10$ см; 5 – алюминиевое зеркало; 6 – кювета с гептаном.

излучения. Во всех экспериментах резонатор лазера был образован зеркалом с коэффициентом отражения $R = 0.07$ (плоскопараллельная кварцевая пластина), фокусирующей линзой и ВРМБ-ячейкой, наполненной гептаном. Положение ВРМБ-ячейки могло изменяться относительно линзы так, чтобы излучение фокусировалось либо внутрь кюветы, либо на ее поверхность. Фокусировка излучения в ячейку осуществлялась линзой с фокусным расстоянием $f = 10$ см.

Измерение временной зависимости интенсивности лазерного излучения наносекундной длительности проводилось фотодиодом ФЭК 22СПУ с помощью осциллографа TDS-3032. Для регистрации импульса излучения длительностью менее 1 нс использовалась электронно-оптическая камера «Агат» СФЗМ с временной разверткой 0.15 нс/см. Энергия излучения регистрировалась калориметром Gentec-E. Расходимость излучения определялась с помощью калиброванных диафрагм, установленных в фокальной плоскости линзы с $f = 10$ м.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Используемая нами оптическая схема резонатора с ВРМБ-зеркалом позволяет последовательно выполнять ряд условий, необходимых для формирования излучения с заданными параметрами. При этом последовательность физических процессов, происходящих в резонаторе, может быть описана следующим образом. Вначале формируется короткий импульс излучения с малой расходимостью, но плохим контрастом (большой уровень шума). Затем «включается» ВРМБ-зеркало, происходит увеличение контраста полезного сигнала, формирование короткого импульса излучения при ОВФ и его усиление на одном проходе через активную среду. Незначительные изменения в оптической схеме резонатора позволяют изменять длительность генерируемого импульса в нано- и субнаносекундном диапазонах. В первом случае излучение фокусировалось линзой внутрь кюветы с гептаном, во втором – на ее поверхность. Отличительная особенность этих двух режимов заключается только в положении фокальной перетяжки пучка накачки относительно нелинейной среды.

В обоих режимах пучок первоначально формируется в неустойчивом резонаторе, образованном выпуклой поверхностью линзы радиусом 10 см и выходным зеркалом, отстоящим от нее на расстояние 133 см. Обратная связь в неустойчивом резонаторе осуществляется за счет френелевского отражения от поверхностей оптических элементов. Коэффициент обратной связи такого резонатора можно определить с помощью выражения

$$\eta = \frac{R_1 R_2}{M^2} = 0.035 \frac{0.07}{47^2} = 1.2 \times 10^{-6}, \quad (1)$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения одной поверхности линзы и выходного зеркала соответственно; M – увеличение неустойчивого резонатора, которое в нашем эксперименте было равно 47.

Несмотря на малый коэффициент обратной связи резонатора, наличие большого коэффициента усиления активной среды позволяло достигать порога генерации вблизи максимума контура усиления. Поэтому длительность импульса, сформированного в таком неустойчи-

вом резонаторе, составляла ~ 5 нс, что существенно меньше длительности импульса возбуждения. Лазерный пучок, выходящий из этого резонатора, имел сферический фронт и был расходящимся (за счет отражения от выпуклой поверхности линзы). Проходя через линзу, он фокусировался за ее фокальной плоскостью в пятно достаточно малого размера благодаря малой расходимости излучения. Полный световой поток из неустойчивого резонатора в направлении к ВРМБ-зеркалу кроме короткого импульса излучения содержал существенную долю одно- и двухпроходного усиленного спонтанного излучения (УСИ). Измеренная доля энергии УСИ в энергии пучка накачки, падающего на ВРМБ-зеркало, составляла более 80 %.

Ранее было показано, что использование ВРМБ-среды в эксимерных лазерных системах в качестве нелинейного фильтра позволяет достаточно эффективно отсекал компоненту УСИ [15]. С учетом того, что ширины спектральных полос полезного сигнала и спонтанного шума равны, фильтрацию можно осуществить за счет разной угловой направленности этих излучений. Считая, что пороговый инкремент усиления $G = 25 - 30$, пороговая мощность накачки ВРМБ-среды

$$P_0 \approx \frac{30S}{gL}, \quad (2)$$

где S – поперечное сечение рассеивающей области; L – длина области взаимодействия; g – коэффициент усиления ВРМБ-среды. При этом

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi f^2 \alpha^2}{4} \sim f^2 \alpha^2, \quad (3)$$

где α – расходимость излучения. Видно, что пороговая мощность накачки ВРМБ-среды растет квадратично с ростом расходимости накачивающего излучения. Это приводит к существенному различию пороговых мощностей накачки для генерации короткого импульса с малой расходимостью, сформированного в неустойчивом резонаторе, и УСИ. В нашем случае отношение пороговых мощностей составляло $\sim 10^4$. Столь большое отношение пороговых мощностей позволяло подобрать условия эффективного рассеяния полезного сигнала с ОВФ, а также отфильтровать шумовую компоненту УСИ.

Доказательством реализации ОВФ являлось распространение отраженного от ВРМБ-зеркала излучения строго по тому же пути, по которому оно вышло из активной среды. Выходной лазерный пучок был сходящимся, причем угол схождения равнялся угловой расходимости излучения, проходящего через активную среду и падающего на фокусирующую линзу (рис.1). Кроме того, на расстоянии 50 см от выходного окна лазера было зарегистрировано распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка. Это распределение с хорошей точностью совпадало с расчетным, которое было получено для однородного пучка, распространяющегося через диафрагму диаметром 1 см и фокусирующую линзу с $f = 266$ см. Экспериментальное и расчетное распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка в данной точке показаны на рис.2.

Энергия выходного излучения составляла 0.5–1 мДж, длительность импульса – 3.5 нс. Некоторое укорочение

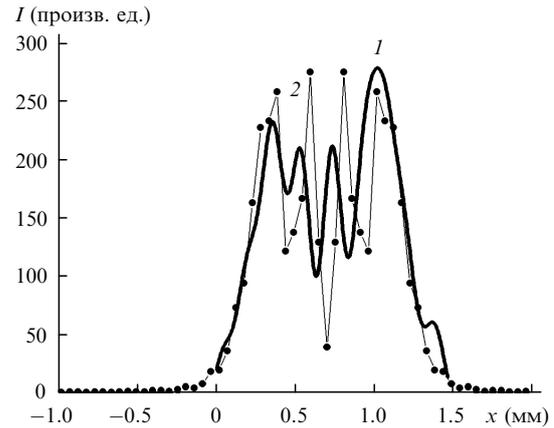


Рис.2. Экспериментальное (1) и расчетное (2) распределения интенсивности излучения в поперечном сечении пучка на расстоянии 50 см от выходного окна лазера.

падающего на ВРМБ-среду импульса излучения длительностью 5 нс происходит за счет того, что рассеяние ВРМБ-средой имеет пороговый характер, и мощности излучения на фронтах падающего импульса было недостаточно для возникновения ВРМБ. На рис.3 показаны осциллограммы разрядного тока, напряжения на разрядной емкости, а также импульсов излучения, которые были получены при использовании плоскопараллельного резонатора и резонатора с ВРМБ-зеркалом. Видно, что короткий импульс формируется в момент времени, соответствующий максимуму мощности импульса свободной генерации. Длительность импульса лазерного излучения составила 3.44 нс на уровне половины его амплитуды, энергия – 0.5 мДж.

Расходимость такого импульса излучения была существенно меньше, чем в случае плоскопараллельного резонатора, и приближалась к дифракционному пределу. Для иллюстрации на рис.4 представлены угловые зависимости энергии излучения для плоскопараллельного резонатора и резонатора с ВРМБ-зеркалом. Видно, что в дифракционном угле φ_0 содержится около 75 % энергии генерации. Уровень шума в выходном излучении по отношению к полезному сигналу был достаточно мал, и отношение сигнал/шум превышало 10^4 .

Для формирования пикосекундного импульса излучения нами использовался второй режим работы схемы, когда излучение фокусировалось в гептан вблизи его

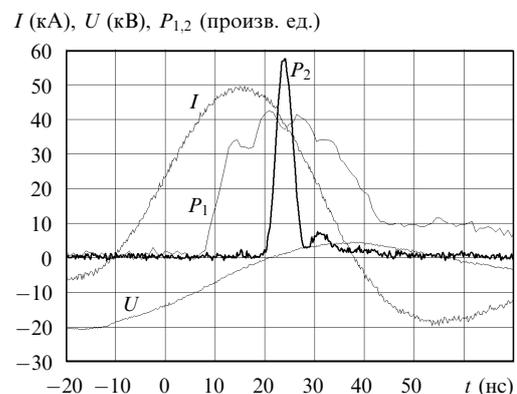


Рис.3. Осциллограммы разрядного тока I , напряжения на разрядной емкости U и импульсов излучения в случае плоскопараллельного резонатора (P_1) и в случае резонатора с ВРМБ-средой (P_2).

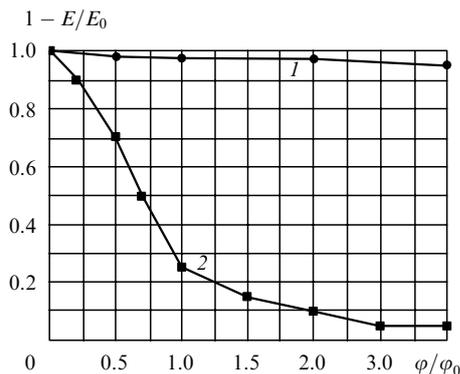


Рис.4. Угловые распределения энергии излучения E в дальней зоне при использовании плоскопараллельного резонатора (1) и резонатора с ВРМБ-зеркалом (2) (E_0 – полная энергия излучения, $\phi_0 = 2.44\lambda/d_0$ – дифракционный угол, d_0 – диаметр лазерного пучка).

поверхности. В эксперименте подбирались условия, при которых интенсивности короткого импульса было достаточно как для возникновения ВРМБ, так и для развития оптического пробоя на поверхности нелинейной среды, т. е. реализации режима TRUBS. В то же время интенсивности УСИ не хватало для преодоления порогов развития данных процессов. В результате удавалось регулировать и существенно уменьшать длительность выходного импульса лазерного излучения. Минимальная длительность импульса на уровне половины амплитуды, которая устойчиво наблюдалась от импульса к импульсу, была равна 150 пс, а его вид представлен на рис.5. Энергия в импульсе составляла ~ 0.2 мДж. Поскольку выходное излучение было сходящимся, то и в этом режиме также реализовалось ОВФ. Измерения пространственных ха-

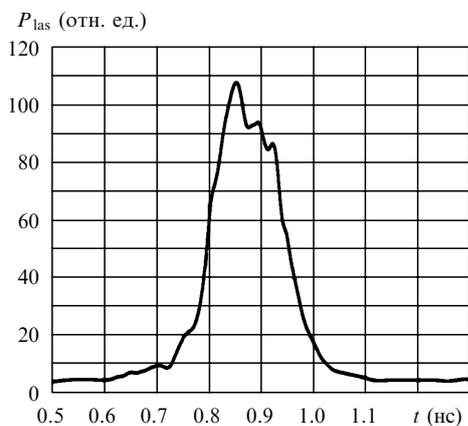


Рис.5. Импульс лазерного излучения с энергией 0.2 мДж, полученный при реализации режима TRUBS.

рактеристик данного импульса показали, что его расходимость и контраст практически повторяли значения, полученные для короткого наносекундного импульса. Необходимо отметить, что в данных экспериментах не принимались специальные меры по формированию поляризации излучения, поэтому излучение накачки и рассеянное излучение были деполаризованы.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе проведены исследования, направленные на формирование в ХеСІ-лазере импульсов излучения с наносекундной и субнаносекундной длительностью, имеющих расходимость, близкую к дифракционному пределу. Для формирования коротких импульсов излучения использовался резонатор с ВРМБ-зеркалом. Изменение положения фокальной перетяжки накачивающего пучка относительно поверхности нелинейной среды позволяло менять длительность импульса рассеянного излучения в широких пределах. При фокусировке излучения накачки внутрь ВРМБ-среды на выходе из резонатора регистрировался лазерный импульс длительностью 3–4 нс с энергией до 1 мДж. При фокусировке пучка накачки на поверхность нелинейной среды лазер генерировал импульс излучения длительностью 150 пс с энергией 0.2 мДж. Полученные лазерные пучки содержали в дифракционном угле более 70 % энергии, а отношение сигнал/шум превышало 10^4 .

1. Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **21**, 55 (1994).
2. Bourne O.L., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **9**, 411 (1984).
3. Kurnit N.A., Thomas S.I. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 421 (1989).
4. McInture I.A., Boyer K., Rhodes C.K. *Opt. Lett.*, **12**, 909 (1987).
5. Джиджоев М.С., Краюшкин С.В., Платоненко В.Т., Слободчиков Е.В. *Квантовая электроника*, **18**, 313 (1991).
6. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. *Обращение волнового фронта* (М.: Наука, 1985).
7. Беспалов В.И., Пасманик Г.А. *Нелинейная оптика и адаптивные лазерные системы* (М.: Наука, 1986).
8. Поповичев В.И., Рагульский В.В., Файзуллоев Ф.С. *Письма в ЖЭТФ*, **19**, 350 (1974).
9. Артюхов В.Я., Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Николаев С.В., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **32**, 717 (2002).
10. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Квантовая электроника*, **19**, 688 (1992).
11. Alimpiev S.S., Vartapetov S.K., Veselovsky I.A., Likhasky S.V., Obidin A.Z. *Opt. Commun.*, **96**, 71 (1993).
12. Losev V.F., Panchenko Yu.N. *Opt. Commun.*, **136**, 31 (1997).
13. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G., Yampolskaya S.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5777**, 558 (2005).
14. Bychkov Yu.I., Losev V.F., Panchenko Yu.N., Yastremsky A.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6053**, 266 (2006).
15. Иванов Н.Г., Лосев В.Ф., Панченко Ю.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **14**, 447 (2001).