

А.И. Федоров, С.В. Мельченко

ФОРМИРОВАНИЕ ОСНОВНОЙ МОДЫ ХеСІ-ЛАЗЕРА В НЕУСТОЙЧИВОМ ТЕЛЕСКОПИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ С ЧАСТИЧНО ОТРАЖАЮЩИМ ВЫХОДНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Приведены результаты экспериментов с ХеСІ-лазером, в котором для снижения расходимости выходного пучка использовалась конфигурация резонатора «вогнутое зеркало — частично отражающий выпуклый зеркальный мениск».

Показано, что оптимальный коэффициент отражения зеркального мениска при $M = 10$ для данного лазера составляет 20%. На основе оценочных расчетов сделан вывод о том, что данный лазер, при использовании плоскопараллельного резонатора, в котором выходным зеркалом служит кварцевая пластинка, и неустойчивого телескопического резонатора с полностью отражающими зеркалами и $M = 10$, работает в режиме насыщения. Оптимальное отражение выходного зеркала для него в первом случае составляет 4,5%, а оптимальное увеличение резонатора во втором случае M равно 22.

Проблема снижения расходимости эксиплексных лазеров на галогенидах благородных газов — одна из важнейших задач, требующих решения для расширения области практических приложений этих мощных и эффективных источников УФ-излучения. Наиболее широко для достижения указанной цели используются неустойчивые телескопические резонаторы с выводом излучения мимо выпуклого зеркала Z_2 (рис. 1, а) [1, 2].

Мы, в частности, применяли резонатор, состоящий из полностью отражающего вогнутого зеркала (З) и частично отражающего зеркального мениска (М), коэффициент отражения которого мог изменяться от 10 до 40% (рис. 1, б). Такой резонатор значительно реже используется, хотя имеет ряд преимуществ: меньшая мощность суперлюминесцентного фона и лучшая однородность распределения интенсивности по сечению пучка подобно [3], но с меньшими чем в [3] потерями на оптических элементах, более простая технология напыления покрытия выходного зеркала. К недостаткам такого резонатора следует отнести потери на отражение выходного пучка с плоским фронтом (т. к. отражающее покрытие нанесено на всю поверхность зеркала) и возникновение паразитных волн после отражения от выходного зеркала и электродов, что может сказываться на расходимости пучка при приближении к дифракционному пределу. В статье проведено сравнение выходных характеристик лазерного пучка при использовании обычного неустойчивого телескопического резонатора и описанного выше.

Лазерная установка представляла собой электроразрядную систему [4] с геометрией разряда $2 \times 0,6 \times 70$ см³, где $d = 2$ см — межэлектродный зазор. Пиковая плотность мощности накачки составляла $\sim 2-3$ МВт/см³ при длительности импульса на полувысоте 20 нс. Возбуждалась смесь Хе:НСІ = 5:1 (4 мм рт. ст.) с буферным газом Не при давлении 3 атм. Коэффициент усиления при таких условиях возбуждения измерялся нами ранее и соответствовал $\sim 0,15$ см⁻¹. Коэффициент ненасыщенного поглощения согласно [5] составляет 0,008—0,01 см⁻¹. Резонатор был образован вогнутым зеркалом с $R = 200$ см, коэффициентом отражения $\rho = 95\%$ на $\lambda = 308$ нм и выпуклым зеркальным мениском с $R_m = 20$ см, $\rho_m = 12; 20; 40\%$. Расстояние L между зеркалами составляло 83,5 см (они служили окнами лазерной камеры). В результате выходной пучок имел близкий к плоскому фронт (точка фокусировки располагалась на расстоянии

$$l = (M+1)L^2/(M-1)d = 24 \text{ м [6], } d = \left| \frac{R}{2} - \frac{R_m}{2} - L \right|.$$

Расходимость излучения определялась фотометрированием фокального пятна, снятого на пленку РФ-3, при фокусировке лазерного пучка линзой с $F = 32,4$ см. Также измерялась доля энергии излучения, имеющего ту или иную расходимость с помощью набора диафрагм. Денситограмма распределения интенсивности света в фокальном пятне линзы представлена на рис. 2 для резонатора с $\rho_m = 20\%$ (в направлении, параллельном полю разряда). Видно, что фокальное пятно представляет собой наложение двух ядер, соответствующих расходимости ~ 4 и $0,4$ мрад. Крылья распределения обусловлены суперлюминесцентным фоном с расходимостью ~ 30 мрад. Подобная картина наблюда-

лась в [3] и связана с постепенным снижением расходимости пучка при увеличении числа проходов света в резонаторе. Действительно [6], через N проходов расходимость излучения составляет величину:

$$\theta_N = \frac{d}{L_p \cdot M^{N-1}} (1 - 1/M),$$

где L_p — длина разрядной области; d — ее поперечный размер (например, межэлектродное расстояние). Дифракционная расходимость $\theta_d = 2,44 \lambda/d$ достигается через N_0 проходов, определяемое выражением:

$$N_0 = \ln[4(M-1)d^2/\lambda L_p] / \ln M.$$

Если известна осциллограмма лазерного импульса, то, зная время, необходимое свету для того, чтобы сделать один полный оборот резонатора (расстояние $2L$), можно рассчитать долю энергии излучения, имеющего данную расходимость. Для рассматриваемого случая $M = 10$, $L_p = 70$ см, $L = 83,5$ см, $\lambda = 308$ нм. Тогда, через два прохода (через $\tau_2 = \frac{4L}{c} = 10$ нс) излучение будет иметь $\theta_2 = 4$ мрад, а энергия излучения с такой расходимостью будет составлять:

$$\frac{\int_0^{\tau_2} P d\tau}{\int_0^{\tau_n} P d\tau} \approx 50\%$$

общей энергии излучения (P — мощность лазерного излучения). Через 3 прохода θ_3 равно 0,4 мрад, а доля энергии составит $\sim 30\%$. Дифракционная расходимость достигается к концу импульса при $N_0 = 4$, и энергия такого излучения составляет $< 10\%$ от общей. Заметим, что наши данные говорят о том, что при приближении к дифракционному пределу ($\theta \approx 5\theta_d$) расчеты все хуже совпадают с экспериментом, т.к. на формирование пучка начинают оказывать влияние неоднородности разряда, паразитные волны, отраженные от плоских граней оптических деталей и т.д. При проведении оценок зеркала считались полностью отражающими. Если же выходное зеркало отражает частично, то основная мода будет выделяться в $1/\rho_m$ раз медленнее в отсутствие насыщения.

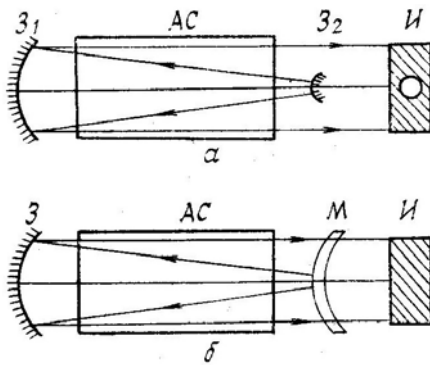


Рис. 1. Оптическая схема ХеСl-лазера с неустойчивыми телескопическими резонаторами с выводом излучения мимо выпуклого зеркала Z_2 (а) и через частично отражающий зеркальный мениск M (б); Z и Z_1 — вогнутые зеркала резонаторов, АС — активная среда, И — выходное сечение лазерного излучения

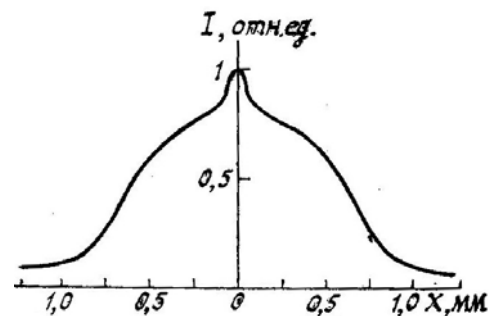


Рис. 2. Денситограмма фокального пятна лазерного излучения, сформированного резонатором «вогнутое зеркало — зеркальный мениск» с $\rho_m = 20\%$ и $M = 10$. Фокусное расстояние линзы $F = 32,4$ см

В таблице представлена полная выходная энергия лазера и энергия излучения с расходимостью θ_2 и θ_3 для трех различных коэффициентов отражения зеркального мениска. Для сравнения также приведены данные для плоскопараллельного и обычного неустойчивого телескопического резонатора. Видно, что при $\rho_m = 12\%$ скорость выделения основной моды действительно падает по сравнению с обычным неустойчивым телескопическим резонатором. Однако, начиная с $\rho_m = 20\%$, доля энергии излучения с расходимостью как 4, так и 0,4 мрад перестает зависеть от ρ_m , в то время как общая энергия излучения уменьшается с ростом ρ_m . Таким образом, наблюдается насыщение усиления. Известно,

[5], что максимальная интенсивность лазерного излучения, которую можно снять с единицы апертуры, если пренебречь потерями, I_{\max} определяется:

$$I_{\max} = g_0 L_p I_s,$$

где g_0 — коэффициент усиления слабого сигнала; I_s — интенсивность насыщения. Про моделируем ситуацию следующим образом. Пусть до достижения $I \sim I_{\max}$ коэффициент усиления не меняется, а затем скачком падает до нуля. В этом случае остаток пути пучок будет распространяться с коэффициентом поглощения α (ненасыщенный коэффициент поглощения). Это приближение достаточно точно, если $g_0 \geq 10\alpha$, что справедливо в нашем случае. Тогда расстояние до выходного края активной среды, которое преодолевает пучок с поглощением, определяется из выражения

$$L_n = \frac{\ln I_{\max}/I_{н.т.р.}}{\alpha} \approx 30 \text{ см}$$

для $I_{н.т.р.}$, соответствующей обычному неустойчивому телескопическому резонатору ($g_0 = 0,12 \text{ см}^{-1}$, $I_s = 0,25 \text{ МВт/см}$ [5], $L_p = 70 \text{ см}$, $\alpha = 0,008 \text{ см}^{-1}$, $I_{н.т.р.} = 1,8 \text{ МВт/см}^2$). Это же расстояние необходимо пройти пучку для достижения того же I при коэффициенте отражения выходного зеркала ρ_m и, следовательно, начальной интенсивности, в $1/\rho_m$ раз меньшей, если $\rho_m = 20\%$. Таким образом, $\rho_m = 20\%$ является оптимальным коэффициентом отражения выходного зеркала для лазера с указанными выше параметрами активной среды. Из этого следует, что при короткой и мощной накачке эксиплексного лазера (например, возбуждение быстрым разрядом) и большой активной длине, во-первых, не обязательно использовать полностью отражающие зеркала для образования неустойчивого телескопического резонатора, что приводит к улучшению пространственной однородности пучка без ухудшения других параметров лазера. Во-вторых, коэффициент обратной связи в плоскопараллельном резонаторе в данном случае $1/m^2 \cdot \rho_m = 4,5\%$ меньше, чем в том случае, если на выход помещается непокрытая кварцевая пластинка. Поэтому в ряде случаев для повышения выходной энергии лазера необходимо наносить на пластинку просветляющее покрытие. Наконец, для неустойчивого резонатора с полностью отражающими зеркалами оптимальный с точки зрения обратной связи M равно 22. Использование такого увеличения в конфигурации «вогнутое зеркало — зеркальный мениск», очевидно, нецелесообразно из-за высоких потерь на отражение пучка на выходном зеркале. Если увеличивать M между 10 и 22, то качество пучка будет возрастать, а его энергия — уменьшаться. Оптимальный коэффициент увеличения составляет 15 — 16.

Полная выходная энергия лазера ($E_{\text{общ}}$), энергия излучения ($E_{\theta_2} \cdot E_{\theta_3}$) с расходимостью θ_2 и θ_3 для трёх различных коэффициентов отражения зеркального мениска ρ_m , плоскопараллельного (ППР) и обычного неустойчивого телескопического резонаторов (НТР) с $\rho_1 = \rho_2 = 100\%$

$\rho_m, \%$	$E_{\text{общ}}, \text{ мДж}$	$E_{\theta_2}, \text{ мДж}$	$E_{\theta_3}, \text{ мДж}$
12	28	12	5
20	30	15	10
40	24	12	7
ППР	54	—	—
НТР	20	11	6

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Резонатор в виде «вогнутое зеркало — частично отражающий зеркальный мениск» обладает несомненными преимуществами перед обычным неустойчивым телескопическим резонатором для достижения расходимости $\sim 5 \div 100_{\text{д}}$, т.е. $100 \div 500$ мкрад.

2. При короткой мощной накачке и большой активной длине оптимальный коэффициент обратной связи в плоскопараллельном резонаторе может соответствовать кварцевой пластинке с просветляющим покрытием.

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Виноходов А.Ю. и др. //Квантовая электроника. 1988. Т. 15. № 9. С. 1712 — 1719.
2. McKee T.J., Boyd G.T. //Appl. Opt. 1988. V. 27. № 9. P. 1840 — 1843.
3. Апанасевич П.А., Бохонов А.Ф., Бураков В.С. и др. Управление генерационными характеристиками электроразрядного ХеСl-лазера с неустойчивым резонатором. Минск, 1987. 36 с. (Препринт/Ин-т физики АН БССР, № 47.0).
4. Федоров А.И., Бричков С.А. //Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 7. С. 772 — 775.

5. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Степанов Ю. Ю. Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоиздат, 1988. 214 с.
6. Ананьев Ю. А. Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979. 328 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
3 июня 1991 г.

A. I. Fyodorov, S. V. Mel'chenko. Formation of the Fundamental Mode in the XeCl-Laser in the Case of Unstable Telescopic Type Resonator with a Partially Reflecting Output Mirror.

The paper presents some results of experiments with XeCl-laser in which for decreasing the output beam divergence we used the cavity configuration composed of a concave 100% reflecting mirror and a partially reflecting convex meniscus.

It was found in the work that at the magnification coefficient of the resonator telescope $M = 10$ the optimal reflection coefficient for the meniscus is 20%. Based on calculational estimations the conclusion has been drawn that the plane parallel resonator with the quartz plate as the output mirror and the telescopic resonator composed of totally reflecting mirrors with $M = 10$ are operating in the saturation mode. Optimal value of the reflection coefficient of the output mirror in the former case is 4.5% and optimal value of M in the later case is $M = 22$.