

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ AgF ЛАЗЕРА, НАКАЧИВАЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

А.М. Бойченко, В.И. Держиев, А.Г. Жидков, С.С. Сулашкин, С.И. Яковленко

Разработана кинетическая модель активной среды AgF лазера ($\lambda = 193$ нм) и приведено ее сравнение с имеющимися экспериментальными данными.

Несмотря на достаточно большое число сообщений о запуске AgF лазеров, число работ, посвященных исследованию параметров активной среды на смеси Ag-F₂ и характеристик генерации или усиления при накачке электронным пучком, сравнительно мало [1-6]. Однако имеющиеся данные позволяют построить достаточно надежную теоретическую модель и определить область значений параметров смеси и энерговклада, оптимальных для работы AgF лазера, накачиваемого электронным пучком.

В данной работе построена теоретическая модель релаксации активной среды AgF лазера ($\lambda = 193$ нм) в смеси Ag-F₂, накачиваемой электронным пучком. Модель включает 11 реагентов: Ag, Ag*, Ag₂*, Ag⁺, Ag₂⁺, AgF*, Ag₂F*, F, F⁻, F₂ (v=0), F₂ (v=2) и концентрацию электронов. Решаются уравнения баланса ионов и возбужденных атомов и молекул, а также электронов совместно с уравнениями энергетического баланса для электронной и газовой температур. В расчетах характеристик генератора учитывается также уравнение формирования излучения с $\lambda = 193$ нм

$$\frac{1}{c} \frac{dI}{dt} = (\kappa^+ - \kappa^- - \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R}) I + Q, \quad (1)$$

где κ^+ — коэффициент усиления, который рассчитывается самосогласованно с учетом насыщения; κ^- — коэффициент нерезонансного поглощения; L — длина резонатора; R — коэффициент отражения зеркала; Q — затравочное спонтанное излучение активной среды [7].

На рис. 1 приведены результаты расчетов, соответствующих условиям эксперимента [1]. В этом эксперименте накачка смеси Ag-F₂ осуществлялась электронным пучком длительностью $\tau_{1/2} = 55$ нс с энергией электронов $E_e = 2$ МэВ. Энерговклад от пучка \dot{W} составлял 0,6 МВт/см³ (эквивалентная частота ионизации $\nu = 2,9 \cdot 10^3$ с⁻¹). Кювета с активной средой имела длину L = 180 см и диаметр d = 15 см. Полученная удель-

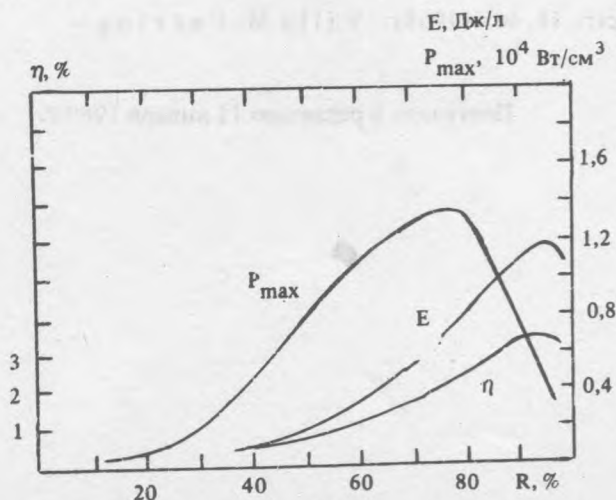


Рис. 1. Результаты расчетов выходной энергии E, КПД η и максимальной мощности P_{max} для условий эксперимента [1] при различных коэффициентах отражения зеркала R.

ная энергия составила ~ 1 Дж/л, максимальная мощность $\sim 1,7 \cdot 10^4$ Вт/см³ при КПД $\sim 3\%$. Авторами /1/ не были указаны характеристики зеркал, поэтому на рис. 1 приведены зависимости выходной энергии E (Дж/л), КПД η и максимальной мощности P_{\max} от коэффициента отражения первого зеркала при глухом втором.

Параметры эксперимента /1/ достигаются при коэффициенте отражения, лежащем в диапазоне $R \cong 80 \div 95\%$. Отметим, что смещение оптимума по коэффициенту отражения для AgF лазера в область глухих зеркал по сравнению с XeCl и KrF системами связано с аномально низким поглощением излучения ($\lambda = 193$ нм) в смеси. В чистой смеси основное поглощение происходит на молекулах Ag_2F^* , но и в этом случае сечение невелико ($\sigma \approx 2,6 \cdot 10^{-18}$ см²).

На рис. 2 приведены результаты расчетов для условий эксперимента /5/ ($E_e = 2$ МэВ), $\tau_{1/2} = 65$ нс). Авторами /5/ сообщается о получении $E = 5$ Дж/л и КПД 3,4% при энергокладе $2,3$ МВт/см³ ($\nu = 2,4 \cdot 10^4$ с⁻¹), тогда как наши расчеты дают значения E и КПД, на порядок превосходящие результаты /5/. Следует отметить, что авторы /5/ обращают внимание на то, что ими использовался калориметр, работающий в диапазоне 250 нм – 30 мкм и что их результаты могут быть занижены.

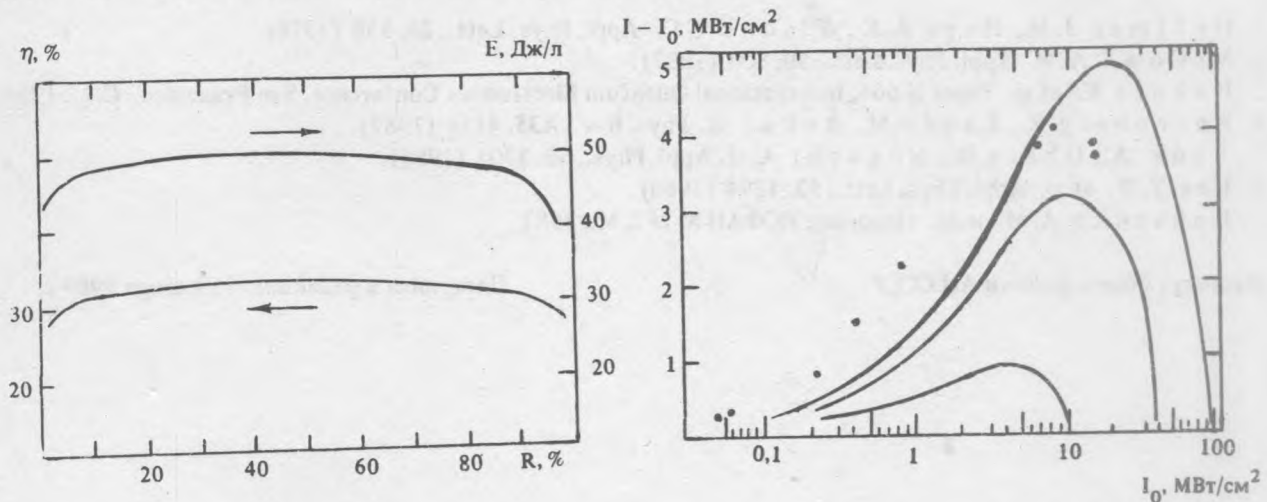


Рис. 2. Зависимости выходной энергии E и КПД η от коэффициента отражения первого зеркала при глухом втором. Расчет для условий эксперимента /5/. $[Ar] = 2,3 \cdot 10^{19}$ см⁻³, $[F_2] = 1,07 \cdot 10^{17}$ см⁻³, $E_e = 2$ МэВ, $\dot{W} = 2,3$ МВт/см³ ($\nu = 2,4 \cdot 10^4$ с⁻¹), $L = 240$ см, $d = 18$ см, $\tau_{1/2} = 65$ нс.

Рис. 3. Сравнение расчетных характеристик усилителя с экспериментом /6/: $\kappa^- = 2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹ (1); $4 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹ (2); $1 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ (3), точки – эксперимент /6/; $\kappa^+ = 2 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹, I_0 – выходная интенсивность.

Наиболее информативно сравнение результатов расчета характеристик однопроходного AgF усилителя с данными работы /6/. Активная среда усилителя длиной $L = 50$ см ($[Ar] = 2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³, $[F_2] = 1,08 \times 10^{17}$ см⁻³) формировалась электронным пучком длительности $\tau_{1/2} = 65$ нс, обеспечивающим энергоклад $\dot{W} = 1,17$ МВт/см³ ($\nu = 1,04 \cdot 10^4$ с⁻¹). Задающий генератор (AgF лазер) накачивался тем же электронным пучком, поэтому сигнал на вход усилителя подавался через 30 нс после достижения максимума свечения AgF^* , коэффициент усиления к этому моменту составлял половину от максимального. Авторы утверждают, что согласно их расчетам, энергоклад к этому моменту также падал в два раза. При этом получены следующие характеристики: ненасыщенный коэффициент усиления $\kappa^+ = 4,2 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹, коэффициент нерезонансного поглощения $\kappa^- = 2 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹; насыщающая мощность $I_s = 3,2$ МВт/см². Согласно нашей модели максимумы энергоклада и концентрации AgF^* не совпадают во времени, однако через 30 нс после достижения максимума концентрации AgF^* коэффициент усиления κ^+ также падает приблизительно в два раза и составляет $\kappa^+ = 2 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹ при максимальном значении $\kappa^+_{\max} = 4,4 \cdot 10^{-2}$ см⁻¹. Величина κ^- в течение этого времени практически не меняется и приблизительно равна $3 \cdot 10^{-3}$ см⁻¹. Насы-

шающая мощность в нашей модели составила величину $I_S = 10,5 \text{ Вт/см}^2$, что существенно ближе к значению I_S , следующему из характера зависимости суммарного коэффициента усиления активной среды от мощности внешнего излучения.

На рис. 3 даны теоретические кривые зависимости выходной мощности от интенсивности затравочного излучения I_0 , полученные из соотношения

$$\beta z = \ln(y/y_0) + (1 + \beta) \ln[(\beta - y_0)/\beta - y], \quad (2)$$

где $y_0 = I_0/I_S$, $y = I/I_S$, $z = \kappa^- L$, $\beta = (\kappa^+ - \kappa^-)/\kappa^- = \kappa^0/\kappa^-$. Кривые рассчитаны при различных выбранных значениях сечения поглощения σ . При $\sigma = 2,6 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$ имеется наилучшее согласие.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hoffman J. M., Hays A. K., Tisone G. C. Appl. Phys. Lett., **28**, 538 (1976).
2. McCown A. W. Appl. Phys. Lett., **50**, 804 (1987).
3. Nakuta K. et al. Paper N 664, International Quantum Electronics Conference, San Francisco, C.A., 1986.
4. Rozenberg Z., Laudo M., Rokni M. Phys. Rev., **A35**, 4151 (1987).
5. Suda A., Obara M., Noguchi A. J. Appl. Phys., **60**, 3701 (1986).
6. Lee Y. W. et al. Appl. Phys. Lett., **52**, 1294 (1988).
7. Бойченко А. М. и др. Препринт ИОФАН № 282, М., 1987.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 16 января 1989 г.