

А.В. Карелин, С.И. Яковленко

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ He – Ne – Ar – H₂-ЛАЗЕРА, НАКАЧИВАЕМОГО ЖЕСТКИМ ИОНИЗАТОРОМ

Построена подробная нестационарная кинетическая модель пеннинговского плазменного лазера на неоне в смеси He – Ne – Ar – H₂ ($\lambda = 585,3$ нм) с учетом влияния примесей азота. Данная модель удовлетворительно описывает имеющиеся экспериментальные результаты по электронно-пучковой и ядерной накачке смесей He – Ne – Ar, Ne – H₂ и He – Ne – Ar – H₂, полученные различными экспериментальными группами, и позволяет с высокой степенью надежности проводить оптимизацию данного лазера.

Введение

За последние годы появилось большое количество работ, посвященных исследованиям пеннинговского плазменного лазера на неоне в условиях электронно-пучковой и ядерной накачки, а также экспериментальным и теоретическим исследованиям плазмохимических и радиационных процессов в данной активной среде (подробно см. [1]). Это потребовало пересмотра и существенной модификации кинетических моделей He – Ne – Ar и Ne – H₂-лазеров. В данной статье приводятся модифицированные кинетические модели и результаты численного моделирования данного лазера в условиях электронно-пучковой и ядерной накачки с учетом влияния примесных концентраций азота.

В связи с тем, что в печати появились сообщения о создании He – Ne – H₂ [2] и Ne – H₂-лазеров [3] с ядерной накачкой и об улучшении генерационных характеристик He – Ne – Ar-лазера при малых добавках водорода [4, 5], нами была построена и исследована кинетическая модель He – Ne – Ar – H₂-лазера с учетом влияния добавок азота.

Кинетическая модель

За основу была взята кинетическая модель He – Ne – Ar-лазера на переходе $3p'[1/2]_0 - 3s'[1/2]_1$ атома Ne с длиной волны рабочего перехода $\lambda = 585,3$ нм [6 – 9], но существенным образом модифицированная: был уточнен ряд констант принципиальных плазмохимических реакций (ПХР), введены важные новые плазмохимические процессы и убраны лишние. В модели рассматривались следующие атомы, молекулы и ионы: He*, Ne*, Ar*, Ar**, Ne**₂, Ne*₂, He*₂, HeNe*, Ar₂*, He⁺, Ne⁺, Ar⁺, He₂⁺, Ne₂⁺, Ar₂⁺, He₃⁺, Ne₃⁺, Ar₃⁺, HeNe⁺. В поуровневую кинетику атома неона (аналогично [6 – 9]) были включены 4 группы состояний ($3s$, $3s'$), ($3p$, $3p'$), ($4s$), ($5s$) и 2 отдельных состояния $3p'[1/2]_0$ и $3s'[1/2]_1$.

В процессе численного моделирования исследовалось влияние состава смеси, а также параметров резонатора и накачки на выходные характеристики лазера. В связи с изучением влияния примеси молекулярного азота в модель были дополнительно включены компоненты N⁺, N₂, N, N₂.

В кинетической модели He – Ne – Ar – H₂ – N₂-лазера кроме перечисленных выше компонентов рассматривались еще: H⁺, H₂⁺, H₃⁺, H₂(v), H, HeH⁺, He₂H⁺, HeH₂⁺, NeH⁺, Ne₂H⁺, ArH⁺, Ar₂H⁺, ArH₂⁺, HeH*, NeH*, Ne₂H*, ArH*. Константы скоростей приведены преимущественно в [8, 10, 11].

Совместно с уравнениями баланса числа частиц решались уравнения для газовой и электронной температур. Таким образом, число уравнений достигало 47, а число ПХР с учетом поуровневой кинетики достигает 300. Для расчетов использовался комплекс программ «ПЛАЗЕР» [12, 13].

Результаты расчетов

Созданная модель тестировалась на результатах экспериментальных исследований лазера с $\lambda = 585$ нм на смесях He – Ne – Ar, Ne – H₂ и He – Ne – Ar – H₂ с накачкой электронными пучками наносекундной и микросекундной длительности, а также на результатах экспериментов по ядерной накачке (подробнее см. [1]).

Перейдем к обсуждению полученных результатов. На рис. 1 представлены зависимости выходной мощности лазерного излучения от парциального давления аргона для смесей с различной степенью чистоты в условиях экспериментов [14–16]. Наличие оптимума на зависимостях обусловлено, с одной стороны, улучшением очистки нижнего рабочего уровня с ростом давления аргона, а с другой – девозбуждением верхнего рабочего состояния в реакции Пеннинга на аргоне и конкуренцией реакций трехчастичной и бинарной перезарядки ионов Ne₂⁺ на аргоне с реакцией диссоциативной рекомбинации, накачивающей верхний рабочий уровень. При низких мощностях накачки преобладает влияние перезарядки, а при больших – девозбуждение в реакции Пеннинга. Видно также, что наличие в смеси небольших количеств азота на уровне сотых и тысячных долей процента приводит к существенному падению выходной мощности лазерного излучения.

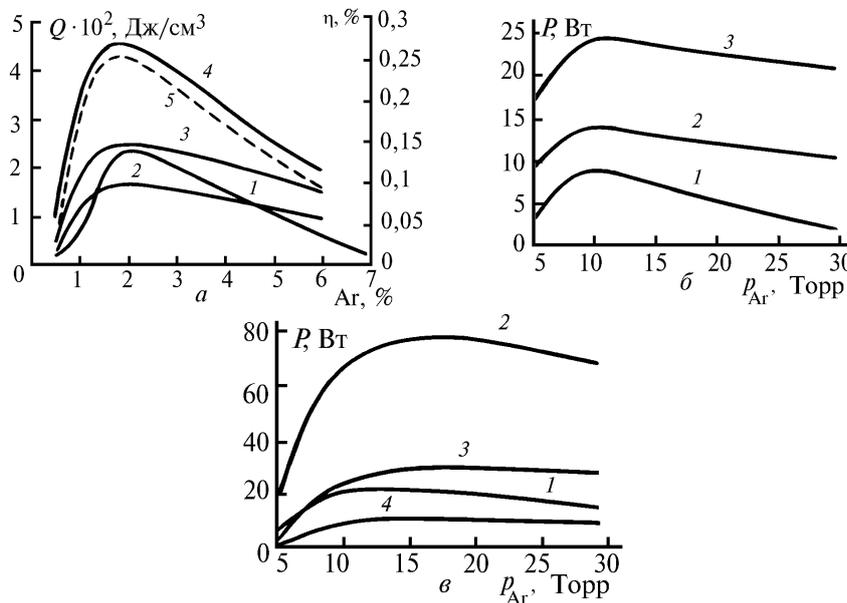


Рис. 1. Зависимости генерационных характеристик лазерного излучения ($\lambda = 585,3$ нм) в смеси He – Ne – Ar от парциального давления аргона: *a* – накачка электронным пучком – $j = 0,24$ А/см², $\tau_{0,5} = 30$ мкс, $E_e = 200$ кэВ, $p = 2$ атм, содержание неона – 12%: 1 – эксперимент [15]; 2 – расчет $[N_2] = 5,7 \cdot 10^{15}$ см⁻³; паразитное поглощение $\chi^- = 10^{-4}$ см⁻¹; 3 – расчет, $[N_2] = 5,7 \cdot 10^{15}$ см⁻³; $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 4 – расчет, $[N_2] = 0$, $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 5 – кпд, расчет, условия те же, что и кривая 4. *б* – ядерная накачка – $p_{He} = 1$ атм; $\bar{\Phi} = 1,3 \cdot 10^{15}$ н/см² · с; $\nu = 0,13$ с⁻¹; $p_{Ne} = 30$ Торр; $\tau_{0,5} = 3$ мс; $L = 150$ см; $d = 2,8$ см; $V = 900$ см³: 1 – эксперимент [14]; 2 – расчет $[N_2] = 2,7 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 3 – $[N_2] = 0$, $\chi^- = 0$. *в* – ядерная накачка – $p_{He} = 2$ атм; $p_{Ne} = 300$ Торр; $\bar{\Phi} = 2,5 \cdot 10^{15}$ н/см² · с; $\nu = 0,088$ с⁻¹; $V = 1900$ см³; $L = 2$ м; $d = 5,5$ см: 1 – эксперимент [16]; 2 – расчет, $[N_2] = 2,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 3 – расчет, $[N_2] = 5,2 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 4 – расчет, $[N_2] = 2,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\chi^- = 10^{-4}$ см⁻¹

Наилучшее согласие между экспериментами и расчетом находится при чистоте газов не хуже: He – 99,99%, Ne – 99,99%, Ar – 99,9% и паразитном поглощении в зеркалах или активной среде не более одного процента.

На положение оптимума по парциальному давлению аргона влияет мощность накачки, а также количество вредной примеси азота. С ростом концентрации азота и падением мощности накачки оптимум смещается в область низких давлений аргона.

На рис. 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей коэффициента усиления в смеси He – Ne – Ar(–H₂) от мощности накачки. Экспериментальная зависи-

мость взята из работы [17]. Видно удовлетворительное качественное и количественное согласие между расчетом и экспериментом.

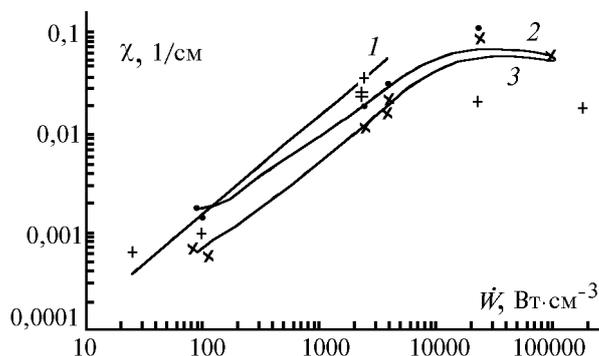


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от мощности накачки: 1 – экспериментальные точки (+) и аппроксимация из работы [17]; 2 – точки (·) и аппроксимация, полученные в результате расчетов при чистоте смеси 99,999%; 3 – расчетные точки (×) и аппроксимация при чистоте смеси 99,999%

В [4, 5, 18] исследовалось влияние малых добавок водорода на генерационные характеристики He – Ne – Ar-лазера. В [4, 18] предполагается, что примесь водорода уменьшает коэффициент паразитного поглощения. В [5] сделан вывод, что примесь водорода поглощения не меняет. В то же время, согласно [5], меняется коэффициент усиления. Однако указанные работы выполнены при сильно различающихся мощностях накачки, и их следует рассматривать отдельно.

Возможно, что на эксперименты [5] повлияло наличие примесей азота в рабочей камере. Так, например, в эксперименте получены коэффициенты усиления $6 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ в отсутствие H_2 и $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при его наличии. Наши расчеты для среды He – Ne – Ar в отсутствие H_2 при чистоте смеси 99,99% дают $\chi = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ и $\chi_0 = 1,69 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ при чистоте смеси 99,999%, при наличии H_2 в количестве, соответствующем эксперименту [5] (0,4 Торр), и чистоте смеси 99,999% $\chi_0 = 1,61 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$. Существенного изменения поглощения при добавке водорода относительно накачки [5] в расчете замечено не было.

Отсюда можно сделать вывод, что влияние примесей азота на уровне паспортной чистоты может оказаться более существенным, чем наличие в смеси малых добавок водорода. Поэтому для надежного установления влияния малых добавок H_2 на выходные характеристики He – Ne – Ar-лазера требуется надежный контроль за чистотой смеси в эксперименте. В настоящее время, на наш взгляд, пока еще недостаточно данных для окончательного вывода о заметной роли малых добавок H_2 в смеси He – Ne – Ar, особенно при мощностях энерговклада, характерных для ядерной накачки.

Отрицательное влияние водорода, полученное в нашем расчете для экспериментальных условий [5], связано с влиянием перезарядки ионов Ne_2^+ на H_2 , что приводит к падению потока накачки на верхний рабочий уровень, и девозбуждением верхнего рабочего уровня в реакции Пеннинга. При этом малая добавка водорода уже не сказывается существенно на заселенности нижнего рабочего состояния. Таким образом, влияние малых добавок водорода аналогично влиянию примесей азота с той лишь разницей, что скорость перезарядки Ne_2^+ на водороде существенно ниже, чем на азоте. При этом изменяется ненасыщенный коэффициент усиления, а не коэффициент поглощения.

Этот вывод косвенно подтверждается результатами измерений коэффициентов поглощения, приведенных также в [5]. При добавке водорода коэффициент поглощения заметно не изменяется. Увеличение же коэффициента усиления в эксперименте, возможно, связано с тем, что чистота смеси в опытах с водородом была выше.

Следует также отметить, что наша кинетическая модель при добавке водорода дает скорее оптимистический нежели пессимистический результат.

В [4, 18] наблюдается обратная ситуация. В этих экспериментах использовались достаточно мощная накачка и газы высокой степени чистоты ($\sim 99,995\%$). При этих условиях влияние следовых примесей азота на генерационные характеристики не было существенным. Но из-за мощной накачки имела место высокая концентрация метастабилей Ar^* ($\sim 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ при $p_{\text{H}_2} = 0,003 \text{ Торр}$).

И хотя сечение поглощения рабочего излучения на них мало (в расчетах использовалось значение $\sigma^- = 5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$), влияние небольших добавок H_2 на уровне 0,4 – 0,8 Торр приводит к заметному изменению формы импульса генерации (рис. 3). При этом, хотя расчетная пиковая мощность P изменяется слабо, кпд возрастает с 0,24 до 0,36% в условиях, указанных в [18].

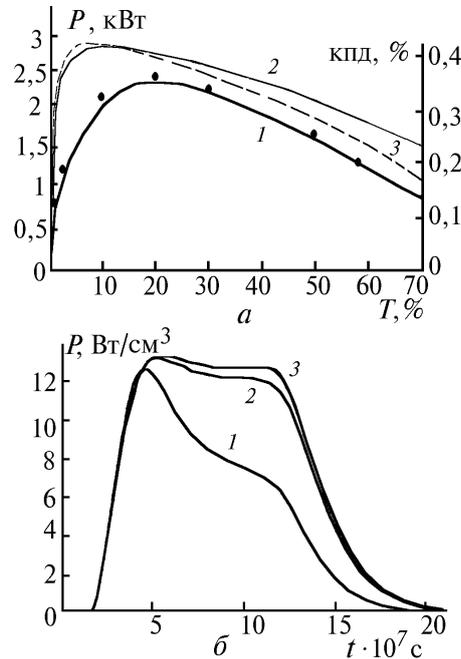


Рис. 3. Генерационные характеристики He–Ne–Ar–H₂-лазера: *a* – зависимость мощности генерации и кпд от пропускания резонатора T $p_{\text{He}}=3$ атм, $p_{\text{Ne}}=200$ Торр, $p_{\text{Ar}}=30$ Торр, $p_{\text{H}_2}=0,8$ Торр, $j=1,2$ А/см². 1 – эксперимент [18]; 2 – расчет; 3 – расчетный кпд. *б* – расчетные формы импульса генерации в условиях эксперимента [4]. $p_{\text{He}}=3$ атм, $p_{\text{Ne}}=200$ Торр, $p_{\text{Ar}}=15$ Торр. 1 – $p_{\text{H}_2}=0,003$ Торр, 2 – $p_{\text{H}_2}=0,4$ Торр, 3 – $p_{\text{H}_2}=0,8$ Торр

Влияние добавок водорода на эффективность генерации в смеси He – Ne – Ar при ядерной накачке в оптимальных условиях приведено на рис. 4. Видно, что при добавке водорода вплоть до 1 Торр кпд генерации при мощности энерговклада около 150 Вт/см³ немного растет, а при большем давлении начинает быстро падать. Эти результаты оптимизации получены в предположении чистой смеси, когда концентрация азота не превышала 10^{14} см^{-3} .

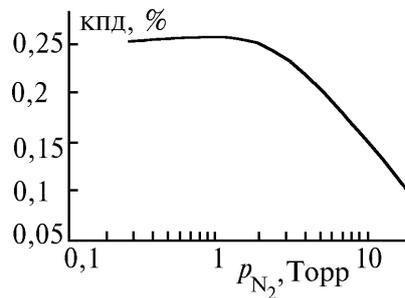


Рис. 4. Влияние малых добавок водорода в смеси He – Ne – Ar на эффективность генерации – $p_{\text{He}}=1,5$ атм, $p_{\text{Ne}}=40$ Торр, $p_{\text{Ar}}=15$ Торр, $\dot{W}=150$ Вт/см³

Исследованию пороговых характеристик He – Ne – Ar (H₂)-лазера соответствуют результаты, приведенные на рис. 5. Видно, что при эффективном времени жизни фотона в резонаторе 1 мкс, паразитном поглощении порядка 10^{-6} см^{-1} и концентрации азота 10^{14} см^{-3} (т.е. фактически в идеальных условиях) пороговая мощность энерговклада для лазера на смеси He – Ne – Ar составляет

около 3 Вт/см³. Однако появление небольших примесей азота или водорода приводит к заметному росту порога генерации. Аналогична, только еще более драматична, ситуация в лазере на смеси He – Ne – H₂. В оптимальных по кпд условиях ($p_{\text{He}} = 0,5$ атм, $p_{\text{Ne}} = 300$ Торр, $p_{\text{H}_2} = 30$ Торр) наличие примеси азота на уровне 0,01% приводит к повышению порога генерации до 250 Вт/см³.

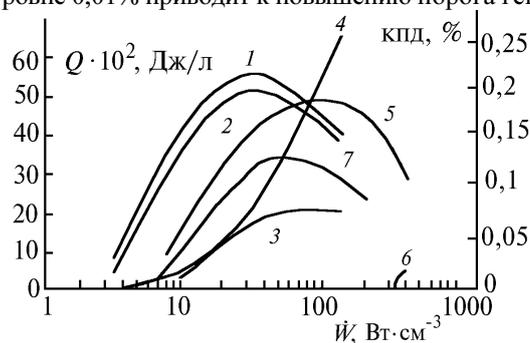


Рис. 5. Зависимости энергии генерации Q и кпд лазера с ядерной накачкой на неоне от мощности накачки: 1 – энергия генерации для смеси He – Ne – Ar при $p_{\text{He}} = 1,5$ атм, $p_{\text{Ne}} = 30$ Торр, $p_{\text{Ar}} = 15$ Торр, $[\text{H}_2] = 10^{14}$ см⁻³, $[\text{N}_2] = 10^{14}$ см⁻³, $\chi^- = 10^{-6}$ см⁻¹, эффективное время жизни фотона в резонаторе 1 мкс; 2 – кпд генерации при тех же условиях, что 1; 3 – кпд генерации в условиях 1 и $[\text{N}_2] = 4,2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ (99,999%); 4 – то же и $[\text{N}_2] = 4,2 \cdot 10^{15}$ см⁻³ (99,999%); 5 – то же при $p_{\text{H}_2} = 0,5$ Торр, чистоте смеси 99,999% и $\chi^- = 10^{-5}$ см⁻¹; 6 – кпд генерации для смеси He – Ne – H₂ при $p_{\text{He}} = 0,5$ атм, $p_{\text{Ne}} = 300$ Торр, $p_{\text{H}_2} = 30$ Торр, $\chi^- = 10^{-6}$ см⁻¹, $[\text{N}_2] = 10^{14}$ см⁻³, эффективное время жизни фотона в резонаторе 1 мкс; 7 – то же, что и 6, но при чистоте смеси 99,99%

Заключение

1. Показано существенное влияние примесей азота в смеси (на уровне паспортной чистоты газов) на выходные характеристики лазера. Для улучшения генерационных характеристик пеннинговских плазменных лазеров на неоне следует использовать газы высокой степени чистоты и осуществлять тщательную очистку лазерной камеры. При этом возможно улучшение генерационных характеристик почти в 2 раза.

2. Проведена численная оптимизация лазера на смеси He – Ne – Ar – H₂. Оптимальные условия генерации: при накачке электронным пучком длительностью $\tau = 10$ нс – давление гелия $p_{\text{He}} = 300$ Торр, давление аргона $p = 60$ Торр, пропускание выходного зеркала $T = 50\%$ (длина активной среды $L = 1$ м), мощность энерговыклада $W = 400$ кВт/см³, энерговыклад за импульс $W = 2,5$ мДж/см³, кпд активной среды по вложенной в газ энергии $\eta = 0,4\%$; при накачке пучком электронов длительностью $\tau = 60$ мкс – $p_{\text{He}} = 1,5 - 2$ атм, $p_{\text{Ne}} = 150$ Торр, $p_{\text{Ar}} = 30$ Торр, $T = 30\%$ ($L = 1$ м), $p_{\text{H}_2} = 1$ Торр, $\dot{W} = 1,5$ кВт/см³ (без H₂) и 3,0 кВт/см³ (с H₂), $\eta \leq 0,4\%$ (без H₂) и $\leq 0,5\%$ (с H₂); в условиях ядерной накачки от импульсного реактора $\tau = 8$ мс – $p_{\text{He}} = 1,5$ атм, $p_{\text{Ne}} = 30$ Торр, $p_{\text{Ar}} = 15$ Торр, $T = 15\%$ ($L = 2$ м), $\dot{W} = 150$ Вт/см³, $\eta \leq 0,3\%$. Введение небольших (менее 1 Торр) добавок водорода при ядерной накачке может приводить к незначительному росту кпд при мощностях накачки свыше 100 Вт/см³. Оптимальные условия генерации для лазера на смеси He – Ne – H₂ составляют: давление гелия 0,5 – 1 атм, давление неона 300 Торр, давление водорода 30 – 40 Торр, мощность энерговыклада 250 – 300 Вт/см³. При этом кпд данного лазера может достигать 0,2%.

3. Рассчитаны пороговые характеристики He – Ne – Ar – H₂-лазера с ядерной накачкой. Для смеси He – Ne – Ar в условиях, близких к идеальным, порог генерации составляет около 3 Вт/см³. В реальных условиях минимально достижимая пороговая мощность энерговыклада не менее 10 Вт/см³. Соответственно для смеси He – Ne – H₂ минимальный порог генерации составляет около 8 Вт/см³, а реальный не менее 100 Вт/см³.

4. Построенная нами модель позволяет с высокой степенью надежности провести оптимизацию пеннинговского плазменного лазера на неоне ($\lambda = 585,3$ нм) и ответить на целый ряд вопросов, касающихся кинетики процессов в активной среде.

1. Карелин А.В., Яковленко С.И. Квантовая электроника. 1995. Т.22. N 8. С.769.
2. Miley G. H. Proc. of Spec. Conf. "Physics of Nuclear Induced Plasmas and Problems of Nuclear Pumped Lasers". – IPhPI: Obninsk, 1992. V. 1. P. 40.
3. Бочков А.В., Крыжановский В.А., Магда Э.П., Мухин С.Л. // Письма в ЖТФ. 1993. N 19. С. 54.
4. Александров А.Ю., Долгих В.А., Рудой И.Г., Сорока А.М. // Квантовая электроника. 1991. N 18. С. 673.
5. Ломаев М.И., Мельченко С.В., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. N 24. С. 63.
6. Держиев В.И., Жидков А.Г., Коваль А.В., Яковленко С.И. М., 1987. (Препринт/ИОФАН. N 233.)
7. Держиев В.И., Чикин К.Р., Коваль А.В. и др. М., 1988. (Препринт/МИФИ. N 094.)
8. Бойченко А.М., Держиев В.И., Жидков А.Г. и др. // Труды ИОФАН. 1989. Т. 21. С. 44.
9. Держиев В.И., Жидков А.Г., Коваль А.В., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1989. Т. 16. С. 1579.
10. Азимджанов Б.А., Арсланбеков Т.У., Бункин Ф.В. и др. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. С. 1557.
11. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. С. 7.
12. Yakovlenko S. I. // Laser Physics. 1991. V. 1. P. 565.
13. Середа О.В., Терских А.О., Яковленко С.И. и др. // Труды ИОФАН. 1989. Т. 21. С. 116.
14. Воинов А.М., Кривоносов В.Н., Мельников С.П. и др. // ДАН СССР. 1990. Т. 312. С. 864.
15. Держиев В.И., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Янчарина А.М. М., 1990. (Препринт / ИОФАН. N 35.)
16. Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. // Квантовая электроника. В печати.
17. Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. С. 679.
18. Александров А.Ю., Долгих В.А., Рудой И.Г., Сорока А.М. Квантовая электроника. 1991. Т. 18. С. 1029.

Институт общей физики РАН,
Москва

Поступила в редакцию
21 апреля 1995 г.

A. V. Karelin, S. I. Yakovlenko. Numerical Simulation of He – Ne – Ar – H₂ Laser Pumped by Hard Ionizer.

A detailed time-dependent kinetic model of penning plasma He – Ne – Ar – H₂ laser ($\lambda = 585,3$ nm) taking into account the influence of nitrogen admixtures has been developed. The model is in a good agreement with experimental results on e-beam and nuclear pumping of He – Ne – Ar, Ne – H₂, and He – Ne – Ar – H₂ mixtures obtained by different experimental groups. The model allows one to optimize the neon laser with a high degree of reliability.