

УДК 539.9...15

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В He-N₂-H₂ ПЛАЗМЕ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ УРАНА

Будник Александр Петрович,

канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории Физических проблем
ГНЦ РФ – Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского,
Россия, 249033, г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1. E-mail: budnik@ippe.ru

Кузнецова Елена Эдуардовна,

науч. сотр. лаборатории Физических проблем ГНЦ РФ –
Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского, Россия, 249033,
г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1. E-mail: Kuznetsova.Elena_IPPEmail.ru

Создание высокоэнергетических лазеров с ядерной накачкой до сих пор остаётся перспективной и актуальной, но пока не реализованной задачей совместного применения двух высоких технологий: ядерной и лазерной. Экспериментальные исследования являются крайне затратными и небезопасными. Это существенно тормозит прогресс в этой области исследований. Детально разработанные кинетические модели ядерно-возбуждаемой плазмы могут существенно ускорить разработку высокоэнергетических лазеров с ядерной накачкой. Авторами разработана оригинальная многокомпонентная кинетическая модель гелий-азот-водородной активной среды, возбуждаемой осколками деления урана, в которой учитываются все основные процессы селективного заселения рабочих лазерных уровней. Методами математического моделирования установлено, что заселение верхнего лазерного уровня примерно в равной степени определяется как процессами перезарядки атомарных и молекулярных ионов гелия в столкновениях с участием молекулы азота, так и процессами Пеннинга при столкновениях молекулярного азота с возбужденными атомами гелия.

Учитывая тот факт, что в типичных условиях ядерной накачки возбуждаемая осколками деления гелий-азот-водородная активная лазерная среда является сильно неоднородной, в настоящей работе был проведен анализ полученных данных математического моделирования. В условиях реального эксперимента по ядерной накачке среды коэффициент усиления мощности пучка лазерного излучения за один проход не сильно отличается как при учете неоднородного распределения энерговклада в активную среду, так и при замене его однородным. При этом мгновенный общий энерговклад в активную среду должен совпадать. Эти отличия приближенно можно учесть, введя эффективный линейный коэффициент потерь β , который равен, согласно расчетам настоящей работы, 10^{-5} см^{-1} .

Ключевые слова:

Кинетическая модель, коэффициент усиления слабого сигнала, кинетические процессы, генерационные характеристики, лазерное излучение.

Гелий-азотная смесь, генерирующая лазерное излучение на 1^- системе азота, используется в лазерах как активная среда более 35 лет [1]. Последние четверть века в качестве активной среды преимущественно стала использоваться гелий-азот-водородная активная среда [2].

За это время были выполнены обширные исследования по изучению кинетических процессов гелий-азот-водородной плазмы при накачке среды как традиционными методами [1–5], так и при ядерной накачке [6–8]. Максимальный КПД преобразования энергии, вложенной в такую среду традиционными способами (электронным пучком, разрядом и т. д.), в энергию лазерного излучения был достигнут на длине волны 427,8 нм и составлял около 3 % (например, [2, 4]). При ядерной накачке максимальный достигнутый КПД был на порядок меньше [7, 8].

Существуют две основные точки зрения о том, какие процессы создают инверсную населенность в гелий-азот-водородной активной среде. С одной стороны (например, [4]), считается, что доминирующими каналами накачки верхнего лазерного уровня являются процессы перезарядки при столкновениях с участием ионов He⁺ или He²⁺ с молекулами N₂. Согласно другой точке зрения [1, 2], главная роль

отводится процессам Пеннинга при столкновениях молекул азота с возбужденными атомами гелия. При этом при ядерной накачке предсказанные теорией значения КПД преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в гелий-азот-водородной активной среде существенно расходились с экспериментальными данными [4, 6–8].

Настоящая работа посвящена изучению кинетических процессов в гелий-азот-водородной активной среде, возбуждаемой осколками деления. Следует отметить, что в настоящее время это единственная активная среда, на которой при ядерной накачке была получена генерация лазерного излучения как в УФ, так и в видимом диапазоне. Целью работы является создание многокомпонентной кинетической модели, позволяющей методами математического моделирования определить достижимые на длине волны 428 нм генерационные характеристики (линейный коэффициент усиления слабого сигнала, максимальный КПД преобразования вложенной в среду осколками деления энергии и др.).

В результате исследований установлено, для корректного описания кинетических процессов в гелий-азот-водородной активной среде в широком диапазоне как начальных давлений газовой смеси,

Таблица 1. Основные плазмохимические реакции кинетики верхнего лазерного уровня**Table 1.** The main plasma-chemical reactions of the upper laser level kinetics

№	Плазмохимический процесс Plasma-chemical process	Константа скорости процесса, см ^{3(n-1)/с} Process rate constant, cm ^{3(n-1)/sec} *
1	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + H_2 \rightarrow N_2H^+ + H$	$3,38 \times 10^{-16}$
2	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + hv_{391}$	$4,00 \times 10^6$
3	$N_2 + He^+ \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He$	$1,60 \times 10^{-9}$
4	$N_2 + He_2^+ \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He + He$	$8,25 \times 10^{-10}$
5	$N_2 + He(2^3S) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$7,23 \times 10^{-10}$
6	$N_2 + He(2^1S) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$8,50 \times 10^{-11}$
7	$N_2 + He(2^1P) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$5,95 \times 10^{-10}$
8	$He_2^+ + N_2 + He \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He + He + He$	$9,70 \times 10^{-30}$
9	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+(v=1)) + hv_{428}$	$1,60 \times 10^7$
10	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+(v=2)) + hv_{470}$	$8,00 \times 10^5$
11	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + He \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + He$	$8,00 \times 10^{-13}$
12	$N_2 + He(2^3P) \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$5,95 \times 10^{-10}$
13	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + N \rightarrow N^+ + N_2$	$5,00 \times 10^{-12}$
14*	$N_2 + FF \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e + FF^{**}$	$4,62 \times 10^{-15***}$
15	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_g^+) + N_2$	$4,53 \times 10^{-10***}$
16	$N_2 + e \rightarrow N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e + e$	—***
17	$He_2(a^3\Sigma_u^+) + N_2 \rightarrow He + N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + e$	$8,50 \times 10^{-11}$
18	$N_2^+(B^2\Sigma_u^+) + H_2 \rightarrow N_2 + H_2^+$	$1,13 \times 10^{-16}$

Примечание: *n – число компонент участвующих в прямой реакции; ** FF – осколок деления (fission fragment); *** – константы скорости рассчитываются согласно сечениям

Notes: * n –; **FF is the fission fragment; *** rate constants are calculated according to sections

рех нижних возбужденных состояниях суммарно составляет 24–30 % при P=0,5–9,0 атм. Причем вклад в скорость заселения этих четырех процессов существенно перераспределяется в зависимости от состава среды.

Следует отметить, что расселение N₂⁺(B²Σ_u⁺)-состояния происходит в основном путем излучения квантов с длиной волны 391,4 нм.

Моделирование генерационных характеристик гелий-азот-водородной активной среды

Верификация разработанной многокомпонентной кинетической модели проводилась путем сравнения экспериментальных данных с рассчитанными значениями линейных коэффициентов усиления слабого сигнала, зависимости мощности генерируемого лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе. Ввиду скудости данных экспериментов по ядерной накачке сравнение было также проведено с данными по накачке электронным пучком, как наиболее близкой по основным процессам к ядерной накачке. При расчетах использовались два различных

варианта данных о сечении вынужденного перехода, определенные в работах [4, 12].

Экспериментальные и расчетные данные о линейных коэффициентах усиления слабого сигнала представлены на рис. 2 (ядерная накачка [7]) и в табл. 2 (накачка электронным пучком [12, 13]).

Экспериментальные данные получены путем обработки генерационных экспериментов [9] для следующих условий: начальное давление смеси 5 атм, состав смеси He/N₂/H₂=3786/7/7. В пределах погрешностей экспериментальных данных согласие можно признать удовлетворительным. При моделировании условий ядерной накачки расхождение теоретических и экспериментальных данных меньше при использовании данных о сечении вынужденного излучения [4]. В случае электронно-пучковой накачки (табл. 2), наоборот, расхождение меньше при использовании данных о сечении вынужденного излучения [12].

Расчетные и экспериментальные данные о зависимости мощности генерируемого в гелий-азот-водородной активной среде лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе представлены на рис. 3.

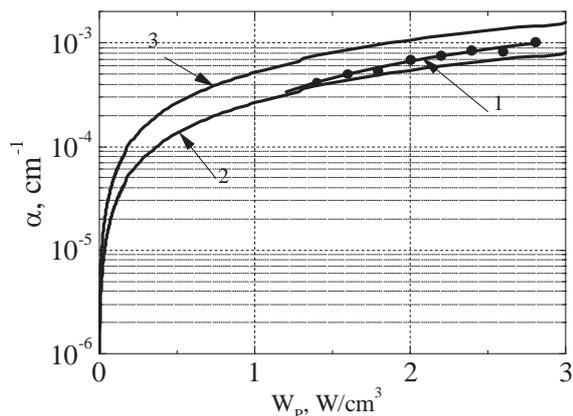


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от максимальной удельной мощности энергоклада (длина импульса $\tau=300$ мкс; коэффициент нерезонансных потерь $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$): 1 – экспериментальные данные работы [7], результаты математического моделирования с сечениями вынужденного перехода, взятыми из работ: 2 – [12]; 3 – [4]

Fig. 2. Dependence of low signal gain coefficient on the maximum specific capacity of energy deposition (pulse length is $\tau=300$ mks; nonresonant loss ratio is $2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$): 1 – experimental data of the paper [7], results of mathematical modeling with induced transition sections taken in papers: 2 – [12]; 3 – [4]

Таблица 2. Сравнение значений коэффициентов усиления слабого сигнала и достигнутой эффективности генерации с экспериментальными данными для $\lambda=427,8$ нм

Table 2. Comparison of low signal gain coefficient values and generation efficiency obtained with the experimental data for $\lambda=427,8$ nm

Давление, атм Pressure, atm	Состав He/N ₂ /H ₂ среды Composition of He/N ₂ /H ₂ medium	$\alpha, 10^{-3}, \text{ см}^{-1}$				$\eta, \%$				
		Эксперимент Experiment [12]		Расчет с сечением Calculation with section		Эксперимент Experiment [12]		Расчет с сечением Calculation with section		
			[12]	[4]		[12]	[4]		[12]	[4]
4	4атм/4тор/3тор	2,8±0,3	2,5	1,3	1,7	2,1	1,8			
6	6атм/4тор/3тор	3,1±0,3	3,3	1,7	2,0	2,6	2,2			

На рис. 3 представлены расчетные и экспериментальные данные о зависимости мощности генерируемого в гелий-азот-водородной активной среде лазерного излучения от времени, а также энергии лазерного излучения в импульсе.

На рис. 3 приведены данные по ядерной накачке, соответствующие условиям эксперимента [8]. Длина лазерно-активного элемента составляла 2,5 м; его внутренний диаметр 4,8 см, толщина слоя уранового покрытия составляла 5 мкм; коэффициент пропускания зеркал резонатора $R_1=0,7 \%$, $R_2=0,7 \%$; длительность импульса накачки ~6 мс; максимальная удельная мощность энергоклада 200 Вт/см^3 , состав гелий-азот-водородной активной среды: He/N₂/H₂=1000/1,22/1,88, начальное давление $P=1,6$ атм. Согласно экспериментальным данным [8] линейный коэффициент нерезонансных по-

терь $\beta=10^{-5} \text{ см}^{-1}$. Расчеты зависимости мощности генерации от времени, выполненные с учетом такого значения β , вполне удовлетворительно согласуются с данными эксперимента (рис. 3).

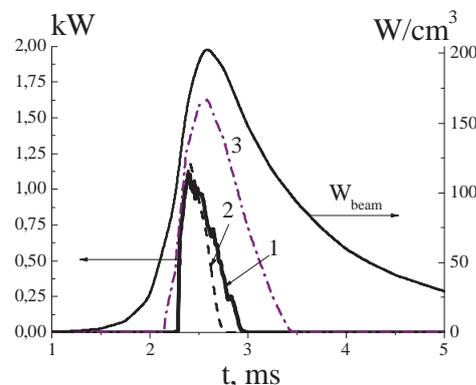


Рис. 3. Зависимость мощности лазерной генерации P и удельной мощности энергоклада W от времени для условий работы [8] (He/N₂/H₂=1000/1,22/1,88, начальное давление 1,6 атм): 1 – экспериментальные данные работы [8], результаты математического моделирования с сечениями вынужденного перехода, взятыми из работ: 2 – [12]; 3 – [4]

Fig. 3. Dependence of laser generation P power and specific capacity of energy deposition W on time for operation conditions [8] (He/N₂/H₂=1000/1,22/1,88, initial pressure 1,6 atm): 1 – experimental data of the paper [8], results of mathematical modeling with induced transition sections taken in papers: 2 – [12]; 3 – [4]

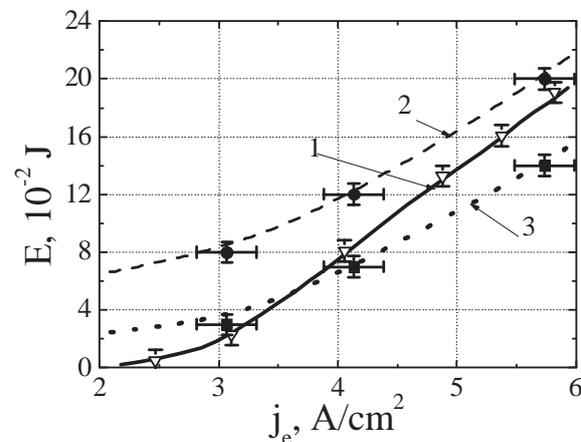


Рис. 4. Энергетические характеристики гелий-азот-водородной активной среды: 1 – зависимость энергии импульса E генерируемого лазерного излучения от плотности тока электронного пучка j_e ; 2 – расчет с сечением [4]; 3 – с сечением [12]

Fig. 4. Output performance of helium-nitrogen-hydrogen active medium: 1 is the dependence of energy of E pulse, generated laser radiation on density of j_e electron beam current: 2 – calculation with section [4]; 3 – with section [12]

В типичных условиях ядерной накачки возбуждаемая осколками деления гелий-азот-водородной активной среда является сильно неоднородной (например, [14]). Согласие экспериментальных данных с результатами расчетов, выполненных в пренебрежении неоднородностью гелий-азот-водородной ак-

тивной среды, на наш взгляд, объясняется следующим. Как показали выполненные по методике [14, 15] расчетные исследования в условиях эксперимента [8] коэффициент усиления мощности пучка лазерного излучения за один проход не сильно отличается как при учете неоднородного распределения энерговклада в активную среду, так и при замене его однородным при совпадении мгновенного общего энерговклада в среду. Эти отличия приближенно можно учесть, введя эффективный линейный коэффициент потерь β . Подробному обоснованию этого положения будет посвящена отдельная работа.

Отметим, что широко используемое при математическом моделировании кинетических процессов в лазерах с ядерной накачкой «нульмерное» приближение, как правило, удовлетворительно согласуется с результатами экспериментов [13], несмотря на сильную неоднородность активной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Газовый лазер высокого давления в фиолетовой области спектра на ионах молекулярного азота / Н.Г. Басов, Л.А. Васильев, В.А. Данилычев и др. // Квантовая электроника. – 1975. – Т. 2. – № 7. – С. 1591–1593.
- Эффективный квазипрерывный лазер высокого давления на первой отрицательной системе азота / Н.Г. Басов, А.Ю. Александров, В.А. Данилычев и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1985. – Т. 42. – № 1. – С. 39–42.
- Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И. Импульсные лазеры в плазме, создаваемой электронными пучками и разрядами // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 2. – С. 117–128.
- Collins C.B. The nitrogen ion laser pumped by charge transfer // Journal of Quantum Electronics. – 1984. – V. QE-20. – № 1. – P. 47–62.
- Хасенов М.У. Излучение смесей He-Ne-H₂ (Ar, Kr) при слабой накачке жестким ионизатором // Известия ТПУ. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 119–122.
- Скорость образования молекулярных ионов гелия в плазме высокого давления, возбуждаемой осколками деления / Н.М. Барышева, А.В. Бочков, Н.В. Бочкова и др. // Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой: Труды конф. – Арзамас-16, 1995. – Т. 1. – С. 114–120.
- Параметры усиления лазера на 1-ой отрицательной полосе азота / А.В. Бочков, А.В. Зигидулин, Э.П. Магда и др. // Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы: Сб. докл. IV Междунар. конф. (ЛЯН-ИР-2007). – Обнинск, 18–21 сентября 2007. – С. 156–159.
- Дюжов Ю.А. Полетаев Е.Д., Смольский В.Н. Исследование генерации на переходах 1-й отрицательной системы азота ($\lambda=391,4, 428,1$ нм) в He-N₂-H₂ смесях при накачке осколками деления от импульсного реактора БАРС-6 // Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы: Сб. докл. IV Междунар. конф. (ЛЯН-ИР-2007). – Обнинск, 18–21 сентября 2007. – С. 151–155.
- Будник А.П., Кузнецова Е.Э. Модель физико-химической кинетики гелий-азот-водородной ядерно-возбуждаемой плазмы // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2010. – Т. 9. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-010.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Будник А.П., Кузнецова Е.Э. Тестирование математической модели кинетических процессов в газовой гелий-азот-водородной плазме // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2011. – Т. 11. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-005.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Дятко Н.А., Кочетов И.В., Напартович А.П. Функция распределения электронов по энергии в распадающейся плазме азота // Физика плазмы. – 1992. – Т. 18. – Вып. 7. – С. 888–900.
- Эффективные столкновительные лазеры в видимой и УФ-областях спектра / А.Ю. Александров, В.А. Долгих, О.М. Керимов и др. // Известия АН СССР. Серия физическая. – 1989. – Т. 53. – № 8. – С. 1474–1482.
- Басов Н.Г., Данилычев В.А. Лазеры на конденсированных и сжатых газах // УФН. – 1986. – Т. 148. – Вып. 1. – С. 55–99.
- Алексеева И.В., Будник А.П., Сипачев А.В. Неравновесная радиационная плазмодинамика в газовых активных средах оптических квантовых усилителей с ядерной накачкой // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2010. – Т. 9. URL: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-009.pdf> (дата обращения: 20.12.2013).
- Карелин А.В. Физические основы реактора-лазера. – М.: ВНИЭМ, 2007. – 259 с.

Поступила 26.12.2013 г.

UDC 539.9...15

MATHEMATICAL MODELING OF LASER RADIATION GENERATION IN He-N₂-H₂ PLASMA EXCITED BY URANIUM FISSION FRAGMENTS

Aleksandr P. Budnik,

Cand. Sc., State Scientific Center of the Russian Federation
«Physics and Power Engineering», 1, Bondarenko Sq., Obninsk, 249033, Russia.
E-mail: budnik@ippe.ru

Elena E. Kuznetsova,

State Scientific Center of the Russian Federation «Physics and Power
Engineering», 1, Bondarenko Sq., Obninsk, 249033, Russia.
E-mail: Kuznetsova.Elena_IPPEmail.ru

Development of high-energy nuclear-pumped lasers is still a challenging and actual, but not yet implemented task of the joint application of two high technologies: nuclear and laser. Experimental studies are extremely cost-based and unsafe. It balks greatly the progress in this research area. The detailed kinetic models of nuclear-excited plasma can significantly accelerate the development of high-energy nuclear-pumped lasers. The authors developed a unique multi-component kinetic model of helium-nitrogen-hydrogen active medium excited by uranium fission fragments, which takes into account all the major processes of selective check-working laser levels. It was ascertained by the methods of mathematical modeling that the upper laser level population is defined almost equally both by the charge exchange processes of atomic and molecular helium ions in collisions with nitrogen molecules and by the Penning processes at molecular nitrogen collision with the excited helium atoms. Considering the fact that in typical conditions of nuclear pumping the helium-nitrogen-hydrogen active laser medium excited by fission fragments is strongly inhomogeneous, the mathematical modeling data were analyzed. Under real nuclear pumping medium experiment the power gain coefficient of laser beam per a pass does not differ greatly both when taking into account the inhomogeneous energy input distribution to the active medium, and when replacing it by the uniform one. At this time the instant total energy input into the active medium must be the same. These differences can be approximately taken into account by introducing an effective linear loss factor $b?$, which is 10^{-5} cm^{-1} according to the calculations of the research.

Key words:

Kinetic model, small signal laser gain, kinetic processes, generation characteristics, laser radiation.

The research is financially supported by RFBR grant № 12-08-31319.

REFERENCES

- Basov N.G., Vasiliev L.A., Danilychev V.A. High-Pressure Gas Laser Emitting in the Ultraviolet Spectral Region from Molecular Ions of Nitrogen. *Journal of Quantum Electronics*, 1975, vol. 2, no. 7, pp. 1591–1593.
- Basov N.G., Alexandrov A.Yu., Danilychev V.A. Efficient high-pressure quasi-cw laser using the first negative system of nitrogen. *Letters in JETPHYS*, 1985, vol. 42, no. 1, pp. 47–50.
- Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. Pulsed lasers on plasmas produced by electron beams and discharges. *Journal of Quantum Electronics*, 2003, vol. 33, no. 2, pp. 117–128.
- Collins C.B. The nitrogen ion laser pumped by charge transfer. *Journal of Quantum Electronics*, 1984, vol. QE-20, no. 1, pp. 47–62.
- Khasenov M. U. Radiation mixtures He-Ne-H₂ (Ar, Kr) with weak pumping hard ionizer. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, Iss. 4, pp. 12–17.
- Barysheva N.M., Bochkov A.V., Bochkova N.V. Skorost obrazovaniya molekulyarnykh ionov geliya v plazme vysokogo davleniya, vzbuzhdaemoy oskolkami deleniya [The rate of helium molecular ions formation in high-pressure plasma excited by fission fragments]. *Fizika yaderno-vzbuzhdaemoy plazmy i problem lazerev s yadernoy nakachkoy. Trudy konferentsii* [Proc. of the conference Physics of nuclear-induced plasma, and the problem of nuclear-pumped lasers. Arzamas-16, 1995. – Vol. 1, pp. 114–120.
- Bochkov A.V., Zigidulin A.V., Magda E.P. Parametry usileniya lazera na pervoy otritsatelnoy polose azota [Parameters of laser gain on the first negative band of nitrogen]. *Fizika lazerev s yadernoy nakachkoy i impulsnye reaktory. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of IV International Conference Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors (NPL-2007-IR)]. Obninsk, 18–21 September 2007. pp. 156–159.
- Dyuzhov Yu.A., Poletaev E.D., Smolskiy V.N. Issledovanie generatsii na perekhodakh pervoy otritsatelnoy sistemy azota ($\lambda=391,4, 428,1 \text{ nm}$) v He-N₂-H₂ smesyakh pri nakachke oskolkami deleniya ot impulsnogo reaktora BARS-6 [Investigation of generation at crossings 1st negative system of nitrogen ($\lambda=391,4, 428,1 \text{ nm}$) in He-N₂-H₂ mixtures pumped by fission fragments from a pulsed reactor BARS-6]. *Fizika lazerev s yadernoy nakachkoy i impulsnye reaktory. Sbornik dokladov IV Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proc. of IV Intern. Conf. Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors (NPL-2007-IR)]. Obninsk, 18–21 September 2007. pp. 151–155.
- Budnik A.P., Kuznetsova E.E. Model fiziko-khimicheskoy kinetiki geliya-azot-vodorodnoy yaderno-vzbuzhdaemoy plazmy [Model of physical and chemical kinetics of helium-nitrogen-hydrogen nuclear-induced plasma]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2010, vol. 9. Available at: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-010.pdf> (accessed 20 December 2013).
- Budnik A.P., Kuznetsova E.E. Testirovanie matematicheskoy modeli kineticheskikh protsessov v geliya-azot-vodorodnoy plazme [Testing a mathematical model of kinetic processes in gas helium-nitrogen-hydrogen plasma]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2011, vol. 11. Available at: <http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2011-02-01-005.pdf> (accessed 20 December 2013).
- Dyatko N.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P. Electron energy distribution function in a decaying nitrogen plasma. *Journal of Plasma Physics*, 1992, vol. 18, Iss. 7, pp. 888–900.

12. Alexandrov A.Yu, Dolgikh V.A., Kerimov O.M. et al. Efficient collisional lasers in the visible and ultraviolet spectral regions. *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Physics Series*, 1989, vol. 53, no. 8, pp. 1474–1482.
13. Basov N.G., Danilychev V.A. Condensed and compressed gas lasers. *Sov. Phys. Usp.*, 1986, vol. 29, pp. 31–56.
14. Alekseeva I.V., Budnik A.P., Sipachev A.V. Neravnovesnaya radiatsionnaya plazmodinamika v gazovykh aktivnykh sredakh opticheskikh kvantovykh usiliteley s yadernoy nakachkoy [Nonthermal radiation plasmadynamics in gas active media of lasers nuclear-pumped amplifiers]. *Physical and chemical kinetics in gas dynamics*, 2010, vol. 9. Available at: <http://www/chemphys.edu.ru/pdf/2010-01-12-009.pdf> (accessed 20 December 2013).
15. Karelin A.V. *Fizicheskie osnovy reaktora-lazera* [Physical bases of the reactor-laser]. Moscow, VNIEM publ., 2007. 259 p.

Received: 26 December 2013.