

УДК 539.1:621.373.826
539.1:519.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОСКОЛКОВ ДЕЛЕНИЯ УРАНА В ЭНЕРГИЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АРГОН-КСЕНОНОВОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ С НАНОЧАСТИЦАМИ УРАНА

М.Н. Слюняев, А.П. Будник, А.В. Сипачёв

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского. 249033, Обнинск, Калужской обл., пл.
Бондаренко, 1*



Исследован процесс прямого преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию лазерного излучения (ЛИ) в движущейся аргон-ксеноновой лазерно-активной газовой среде, содержащей наночастицы урана.

Разработаны модель и метод численного решения уравнений модели прямого преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию лазерного излучения в такой среде. Выполнены расчеты пространственно-временной эволюции распределения концентрации наночастиц урана при различных скоростях движения газа и размерах наночастиц урана.

Исследованы кинетические процессы в движущейся аргон-ксеноновой лазерно-активной газовой среде, содержащей наночастицы урана.

Впервые исследованы усилительные свойства лазерно-активной пространственно-неоднородной ядерно-возбуждаемой содержащей наночастицы урана облучаемой нейтронами движущейся аргон-ксеноновой среды. Согласно результатам исследования, при установившемся состоянии коэффициент усиления интенсивности ЛИ может быть семикратным и выше. Столь высокий показатель позволяет говорить, что такую среду можно использовать не только в лазере с ядерной накачкой, но и в режиме одноканального оптического квантового усилителя с ядерной накачкой.

Ключевые слова: математическое моделирование, преобразование, ядерная, энергия, деление, уран, осколки, кинетические процессы, лазерное излучение, движущаяся плазма, наночастицы.

ВВЕДЕНИЕ

Прошло около 40 лет с тех пор, когда было предложено применять распыленные в активной газовой среде мелкодисперсные урансодержащие частицы для преобразования ядерной энергии в энергию оптического излучения [1]. Применение мелкодисперсных урансодержащих частиц по сравнению с традиционно применяющимися методами гетерогенной ядерной накачки активных газовых сред может повысить долю энергии,

© М.Н. Слюняев, А.П. Будник, А.В. Сипачёв, 2015

выносимой осколками деления из конденсированной фазы в газовую среду, в десять и более раз. Это создает предпосылки для повышения эффективности преобразования ядерной энергии в энергию оптического излучения.

Рассеяние и поглощение лазерного излучения активной средой, содержащей мелкодисперсные урансодержащие частицы, является существенным фактором, препятствующим развитию генерации лазерного излучения в такой среде.

В последнее время было предложено использовать лазерно-активные газовые среды, облучаемые нейтронами и содержащие нанокластеры соединений урана [2 – 4].

Вначале расчетно-теоретические исследования показали, что возможно получить усиление лазерного излучения в ядерно-возбуждаемой аргон-ксеноновой пылевой газовой плазме [2–4].

Далее методами математического моделирования было показано, что при генерации лазерного излучения (ЛИ) в аргон-ксеноновой газовой среде, облучаемой нейтронами и содержащей наночастицы урана, эффективность преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию ЛИ на порядок превышает эффективность преобразования этой энергии при гетерогенной накачке [7, 8]. Это позволяет рассчитывать на создание способа и устройств с высокой эффективностью прямого преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию когерентного оптического излучения.

Однако в исследованиях [7, 8] рассматривалась только неподвижная однородная пылевая среда. Для того чтобы избежать осаждения наночастиц урана в газе представляется целесообразным продувать эту среду. Кроме того, в процессе облучения при неоднородном нагреве газа осколками деления возможно возникновение движения пылевой среды.

Таким образом, возникает необходимость исследования преобразования энергии осколков деления урана с учетом движения активной среды.

Работа посвящена математическому моделированию прямого преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию лазерного излучения в облучаемой нейтронами движущейся аргон-ксеноновой пылевой плазме, содержащей наночастицы урана.

Целью работы является определение влияния движения активной среды и пространственной неоднородности на процесс усиления ЛИ в лазерно-активном элементе (ЛАЭЛ).

МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ УРАНА В ПЫЛЕВОМ ЛАЭЛ

Рассмотрим установившееся движение смеси инертных газов аргона и ксенона в ЛАЭЛ, который представляет собой вертикальную цилиндрическую поверхность. При установившемся движении газа с дозвуковыми скоростями в начальный момент времени $t = 0$ на входе в ЛАЭЛ вводятся пылевые наночастицы урана (U). При этом отношение массы урановой пыли к массе газа мало. Таким образом, пыль при движении не вызывает сильных возмущений, поэтому для описания аксиально-симметричного движения газа, содержащего наночастицы урана, использовалось решение уравнения Навье-Стокса [9]. Можно считать, что давление газа в ЛАЭЛ приближенно постоянно. Для моделирования используем функции, зависящие от координат и времени.

Распределение скорости подачи газа, содержащего наночастицы урана, подчиняется параболическому закону [9]. Изменение концентрации урановой пыли в движущемся газе можно описать параболическим уравнением, учитывая как диффузию пылевых частиц, так и силы, действующие на частицы в потоке газа:

$$\partial n / \partial t = D \Delta n - \operatorname{div}(\mathbf{j}), \quad (1)$$

где n – концентрация частиц; D – коэффициент диффузии; Δ – оператор Лапласа; \mathbf{j} – плотность потока пылевых частиц, равная

$$\mathbf{j} = v_p(r) n, \quad (2)$$

содержащая $v_p(r)$ – скорость движения пылевых частиц, которая может быть отличной от скорости движения аргон-ксеноновой газовой среды.

Коэффициент диффузии D определим, используя аппроксимацию, предложенную в [10]:

$$D = kT(1 + 3.12 \operatorname{Kn}) / (6\pi r_p \eta), \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – температура; Kn – число Кнудсена; r_p – радиус наночастицы урана; η – динамическая вязкость газа.

Пусть аргон-ксеноновая газовая смесь движется вертикально вверх, тогда на пылевые частицы в ЛАЭЛ действуют две силы: сила тяжести (F_T), направленная вниз, и сила Стокса (F_C), направленная противоположно силе тяжести по скорости потока. Эти силы соответственно равны

$$F_T = m_p g, \quad (4)$$

$$F_C = 6\pi r_p \eta (v(r) - v_p(r)), \quad (5)$$

где m_p – масса частицы; $v(r)$ – скорость потока газа; $v_p(r)$ – скорость частицы.

Из равенств (4) и (5) можно найти среднюю скорость установившегося направленного движения частицы в потоке в зависимости от расстояния от оси цилиндра до его внутренней стенки:

$$m_p g = 6\pi r_p \eta (v(r) - v_p(r)), \quad (6)$$

$$v_p(r) = v(r) - m_p g / (6\pi r_p \eta). \quad (7)$$

В дальнейшем считаем, что скорость v_p устанавливается достаточно быстро.

Выразив массу частицы через радиус и плотность, получим

$$v_p(r) = v(r) - (2\rho_p r_p^2 g) / (9\eta), \quad (8)$$

где ρ_p – плотность частицы.

Скорость, с которой газ подается на вход в ЛАЭЛ, неравномерна относительно поперечного сечения трубы. Для описания скорости использовано параболическое распределение [9] вида

$$v(r) = v_{\max} (R^2 - r^2) / R^2, \quad (9)$$

где $v(r)$ – текущая скорость в радиусе r ; r – текущий радиус; R – внутренний радиус трубы; v_{\max} – максимальная скорость газа (на оси).

Учитывая (2) и (9), преобразуем уравнение (1) к итоговому виду

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial}{\partial r} n + \frac{\partial^2}{\partial z^2} n \right) - v_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{\partial}{\partial z} n, \quad (10)$$

где z, r – цилиндрические (осевая и радиальная) координаты.

В начальный момент времени концентрация пылевых частиц в ЛАЭЛ равна нулю, на вход подаются пылевые частицы заданной концентрации. Процесс симметричен относительно оси ЛАЭЛ. При этом на границе, где $r = R$, $N_0 = 0$. На стенках происходит прилипание частиц. Выход из ЛАЭЛ свободный.

МОДЕЛЬ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗБУЖДАЕМОЙ ОСКОЛКАМИ ДЕЛЕНИЯ ПЫЛЕВОЙ АРГОН-КСЕНОНОВОЙ ЛАЗЕРНО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ

Модель кинетических процессов в возбуждаемой осколками деления аргон-ксеноновой лазерно-активной среде с монодисперсной пылевой компонентой была разработана и подробно описана в работах [2, 3]. Эта модель использовалась в настоящей работе для исследования кинетических процессов в плазме, создаваемой осколками деления урана, индуцированного нейтронами.

В кинетической модели аргон-ксеноновой среды с монодисперсной пылевой компонентой в газовой компоненте учитывались атомарные (Ar^+ , Xe^+) и гомоядерные молекулярные ионы аргона и ксенона (Ar_2^+ , Xe_2^+), гетероядерный ион ArXe^+ и молекула ArXe , атомы аргона и ксенона в возбужденных состояниях, а также эксимеры аргона и ксенона.

Для возбужденного атома ксенона рассматриваются отдельно уровни $6s$, восемь $5d$ подуровней и шесть $6p$ подуровней, а подуровни $7p$ и $7s$ состояний объединялись в единый уровень (рис. 1). Все остальные состояния ксенона объединены в одно состояние, обозначенное Xe^* .

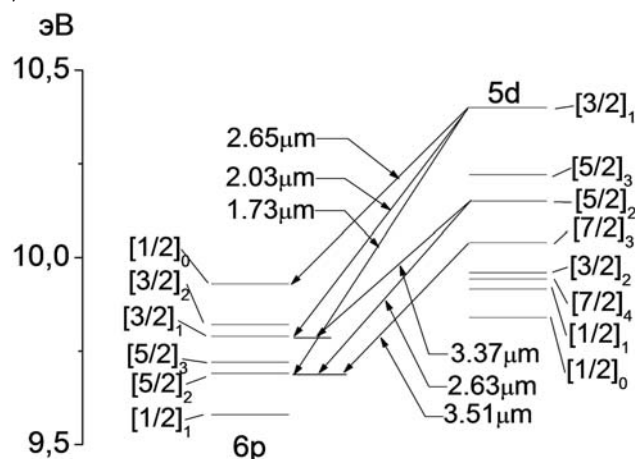


Рис. 1. Энергетическая диаграмма рассматриваемых в кинетической модели состояний атома ксенона, на переходах между которыми возможно получить генерацию лазерного излучения

Последовательность основных кинетических процессов, ведущих к созданию в аргон-ксеноновой среде инверсной заселенности следующая. Осколки деления, взаимодействуя с аргон-ксеноновой средой, теряют энергию, главным образом, на образование атомарных ионов и возбужденных атомов аргона. Далее в столкновениях атомарных ионов Ar^+ и возбужденных атомов аргона с атомами аргона и ксенона образуются как возбужденные атомы ксенона, так и атомарные ионы ксенона Xe^+ , а также молекулярные гомоядерные Ar_2^+ , Xe_2^+ и гетероядерные ионы ArXe^+ .

Заселение верхних возбужденных состояний атома ксенона происходит в результате диссоциативной рекомбинации ионов Xe^{2+} и ArXe^+ при столкновении этих ионов с электронами. При этом реакция с участием ArXe^+ вносит основной вклад в заселение верхнего лазерного уровня для перехода с длиной волны 1,73 мкм.

Важную роль в заселении и расселении верхнего лазерного уровня играют столкновения с медленными электронами, приводящие в незапыленной аргон-ксеноновой среде при больших мощностях удельного энерговыделения к срыву генерации ЛИ. При большой концентрации урановых частиц ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$) вследствие прилипания электронов к пылевым наночастицам концентрация электронов падает [3 – 5], по-

этому срыв генерации ЛИ не происходит.

Всего в модели рассматривались 57 компонентов и учитывались 434 реакции в аргон-ксеноновой среде.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения уравнения (10) использовался метод конечных разностей. Это уравнение аппроксимировалось пятиточечной конечно-разностной схемой, аналогичной разработанной и подробно описанной в [11]. Для решения уравнения конечно-разностной схемы была создана программа на языке Visual C++ в среде MS Visual Studio 2010.

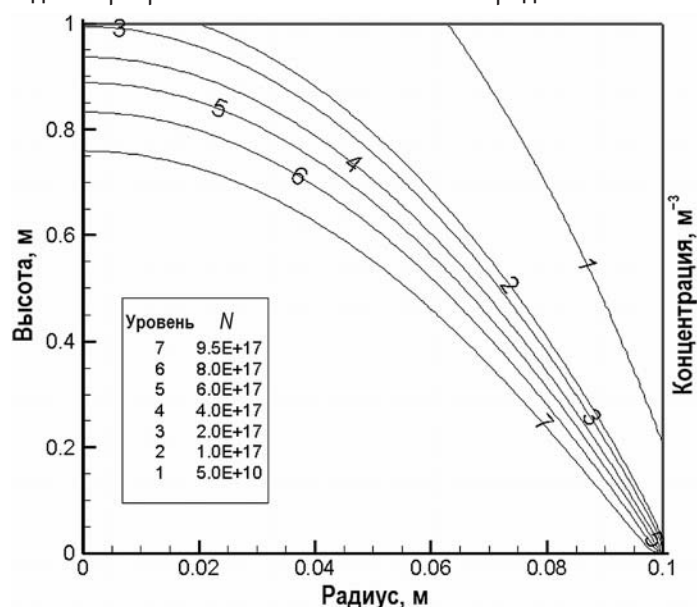


Рис. 2. Распределение наночастиц урана в ЛАЭЛ в момент времени $t = 10$ с

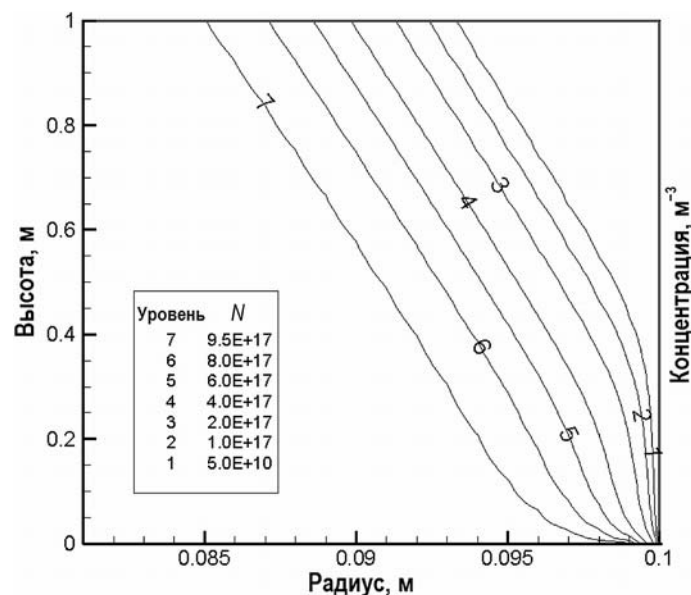


Рис. 3. Распределение наночастиц урана в ЛАЭЛ в момент времени $t = 50$ с

Результат моделирования можно представить в виде изолиний, построенных на основе значений концентраций частиц урана в узлах сетки. На рисунках 2, 3 пред-

ставлены типичные результаты изменения концентрации наночастиц урана в ЛАЭЛ. Результаты расчетов получены для частиц с радиусом $r_p = 5$ нм при давлении газа $p = 0.5$ атм и следующих значениях переменных: $z_{\max} = 1$ м, $r_{\max} = 0.1$ м, $v_{\max} = 0.1$ м/с, $N_0 = 10^{18}$ м $^{-3}$. Установившееся состояние можно наблюдать начиная примерно с 50-й секунды.

Результаты расчетов квазистационарных значений линейного коэффициента усиления ЛИ α на длине волны 1.73 мкм в зависимости от концентрации наночастиц урана в лазерно-активной аргон-ксеноновой газовой среде при удельной мощности энерговыклада 240 Вт/см 3 и давлении газа 0.5 атм представлены в табл. 1. Коэффициент усиления ЛИ газовой среды рассчитан в пренебрежении ослаблением излучения наночастицами. Там же представлены рассчитанные данные о зависимости коэффициента ослабления β ЛИ наночастицами урана (радиус частиц – 5 нм) от их концентрации для длины волны 1.73 мкм [2, 3, 5, 6].

Зависимость полного коэффициента усиления среды $\mu = \alpha - \beta$ от концентрации N для длины волны 1.73 мкм показана на рис. 4. Там же для удобства сравнения добавлены графики для коэффициентов усиления ЛИ α и ослабления ЛИ β газовой средой.

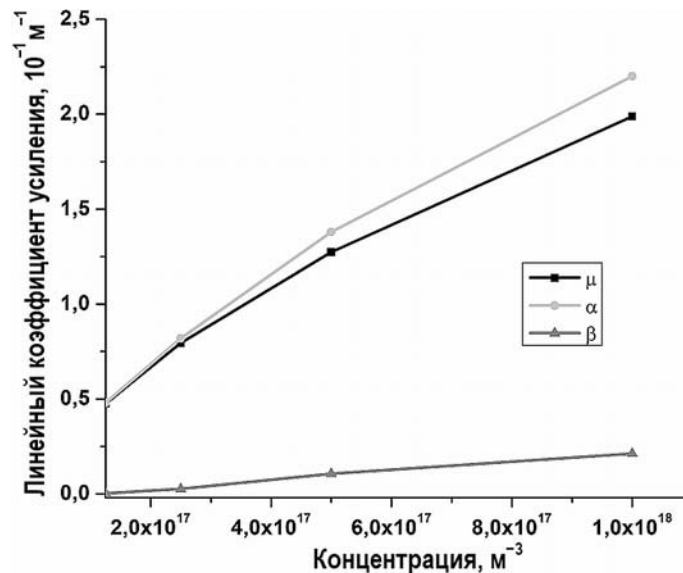


Рис. 4. Зависимость полного линейного коэффициента усиления μ ЛИ аргон-ксеноновой газовой средой, содержащей наночастицы урана, от концентрации наночастиц урана N

Таблица 1

Коэффициенты усиления газовой средой (α) и ослабления (β) излучения в зависимости от концентрации наночастиц N

$N, 10^{18} \text{ м}^{-3}$	$\alpha, 10^{-1} \text{ м}^{-1}$	$\beta, 10^{-1} \text{ м}^{-1}$
1.0	22.0	2.125
0.5	13.8	1.062
0.25	8.2	0.265
0.125	4.8	0.033

Изменение интенсивности I ЛИ, распространяющегося параллельно оси цилиндра, может быть описано следующим уравнением:

$$dI/dz = \mu(z, r, t)I. \quad (11)$$

Определим коэффициент усиления интенсивности ЛИ газовой средой следующим образом:

$$K(z, r, t) = I_0 / I, \quad (12)$$

где I_0 – интенсивность излучения на входе в лазерно-активную среду.

Тогда $K(z, r, t)$ можно представить в виде

$$K(z, r, t) = \exp\left(\int_0^z \mu(z_1, r, t) dz_1\right). \quad (13)$$

Ввиду большой проникающей способности нейтронного излучения и малой длины пробега осколков деления, которые теряют большую часть энергии в начале пробега, можно считать, что плотность энерговыделения в аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана пропорциональна концентрации частиц урана. Используя данные о зависимости от времени распределения концентрации частиц урана в ЛАЭЛ, можно рассчитать временные зависимости коэффициента усиления интенсивности ЛИ $K(z, r, t)$.

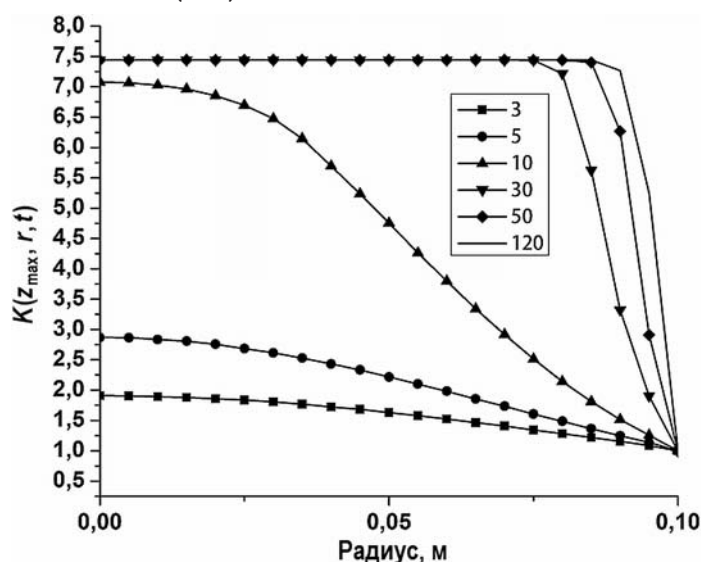


Рис. 5. Радиальная зависимость коэффициента усиления интенсивности ЛИ в различные моменты времени

Результаты расчетов радиальной зависимости $K(z_{\max}, r, t)$ на выходе из ЛАЭЛ в различные моменты времени для частиц с радиусом 5 нм при давлении 0,5 атм представлены на рис. 5. При расчетах полагалось, что максимальная удельная мощность энерговыклада осколков деления, равная 240 Вт/см³, достигается при концентрации 10^{18} м⁻³.

Из представленных результатов расчетов коэффициента усиления интенсивности ЛИ следует, что среда длиной в 1 м обеспечивает большое усиление ЛИ. Это позволяет использовать такую среду не только в лазере с ядерной накачкой, но и в режиме однопроходного оптического квантового усилителя с ядерной накачкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны двумерная продольно-неоднородная аксиально-симметричная модель для описания прямого преобразования кинетической энергии осколков деления урана в энергию лазерного излучения в пылевом ЛАЭЛ и конечно-разностный метод численного решения модели, который основывается на пятиточечной разностной схеме.

При математическом моделировании кинетических процессов в облучаемой нейтронами движущейся аргон-ксеноновой пылевой плазме, содержащей наночастицы урана, рассчитаны квазистационарные значения линейного коэффициента усиления ЛИ на длине волны 1.73 мкм. Одновременно рассчитывались зависимости линейных коэффициентов ослабления ЛИ наночастицами урана (радиус частиц 5 нм) от концентрации наночастиц.

Впервые исследованы усилительные свойства лазерно-активной облучаемой нейтронами пространственно-неоднородной движущейся аргон-ксеноновой среды, содержащей наночастицы урана. Согласно результатам исследования, значение коэффициента усиления интенсивности ЛИ при установившемся состоянии превышает семь. Столь высокий показатель позволяет говорить, что такую среду можно использовать не только в лазере с ядерной накачкой, но и в режиме одностороннего оптического квантового усилителя с ядерной накачкой.

Литература

1. Miley G.H., McArthur D., DeYuong R., Prelas M. Fission reactor pumped laser: History and prospects: Proceedings Conferences 50 Years with nuclear fission. Washington 25-28 April 1989. PP. 333-342. Pub. American Nuclear Society.
2. Будник А. П., Косарев В. А., Лунев В. П. Математическое моделирование генерационных характеристик активных газовых сред, содержащих нанокластеры соединений урана. / Труды IV Международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» (ЛЯН-ИР-2007) в 2-х томах. ГНЦ РФ-ФЭИ, Обнинск, 2009, т. 1. С. 177-184.
3. Будник А. П., Косарев В. А., Лунев В. П. Математическое моделирование кинетических процессов в газовой аргон-ксеноновой плазме, содержащей нанокластеры химических соединений урана / Препринт ФЭИ – №3141. – Обнинск, 2008.
4. 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. Доступно на сайте <http://chemphys.edu.ru/media/files/2010-01-12-009.pdf> (29.12.2014)
5. Budnik A. P., Deputatova L. V., Fortov V. E., Lunev V. P., Vladimirov V. I. Simulation of kinetic processes, optical and neutron properties of the nuclear-excited uranium dusty plasma of the argon-xenon gas mixture. Ukrainian Journal of Physics. 56 (2012). No. 12. PP. 1260-1264.
6. Будник А. П., Лунев В. П. Расчетно-теоретические исследования методом Монте-Карло оптических и нейтронно-физических свойств аргон-ксеноновой газовой среды, содержащей нанокластеры урана и его химических соединений // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2011. Т. 11. Доступно на сайте http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-006_Budnik_Lunev.pdf (29.12.2014).
7. Будник А. П., Сипачев А. В. Математическое моделирование кинетических процессов в аргон-ксеноновой ядерно-возбуждаемой плазме, содержащей нанокластеры урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2012. Т. 13. Вып. 3. Доступно на сайте http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-11-20-003_Budnik_Sipachev.pdf (29.12.2014).
8. Будник А. П., Сипачев А. В. Математическое моделирование кинетических процессов при генерации лазерного излучения в аргон-ксеноновой активной газовой среде, содержащей наночастицы урана // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Т. 14. Вып. 2. Доступно на сайте http://chemphys.edu.ru/media/files/04_Budnik_Sipachev_apm2011.pdf (29.12.2014).
9. Савельев И. В. Механика, молекулярная физика // Курс общей физики. – М.: Наука, главная редакция физико-математической литературы, 1987. – Т. 1. 432 с.
10. Смирнов Б. М. Аэрозоли в газе и плазме. – М.: ИВТАН, 1990. – 104 с.
11. Алексеева И. В., Будник А. П. Модель пространственно-временной эволюции треков многозарядных ионов с учетом неоднородности вдоль оси трека. 1. Постановка задачи. Метод решения. / Препринт ФЭИ. – №2922. – Обнинск, 2001.

Поступила в редакцию 29.12.2014 г.

Авторы

Слюняев Максим Николаевич, аспирант

E-mail: max.my.net@gmail.com

Будник Александр Петрович, начальник лаборатории, доцент, канд. физ.-мат. наук,

E-mail: apbud@yandex.ru

Сипачёв Александр Васильевич, старший научный сотрудник

UDC 539.1:621.373.826
539.1:519.7

**MODELING OF DIRECT CONVERSION OF URANIUM FISSION
FRAGMENTS KINETIC ENERGY TO LASER RADIATION ENERGY
IN ARGON-XENON DUSTY PLASMA CONTAINING URANIUM
NANOPARTICLES**

Slyunyaev M.N., Budnik A.P., Sipachev A.V.

JSC «State Scientific Center of the Russian Federation – Institute for Physics
and Power Engineering» n.a. A. I. Leypunsky. 1, Bondarenko sq., Obninsk,
Kaluga reg., 249033 Russia

ABSTRACT

The use of active gas medium containing fine uranium particles compared with the traditionally used methods of heterogeneous nuclear pumping of active gas medium can increase the share of fission fragments energy from the condensed phase to the gas medium up to ten times or more. This creates prerequisites for increasing the efficiency of conversion of nuclear energy into optical radiation.

Scattering and absorption of laser radiation by an active medium containing fine uranium particles is a significant factor impeding the development of lasing in such a medium.

Recently, it was suggested to use the laser-active gas medium irradiated by neutrons and containing nanoclusters of uranium compounds. Then, numerical and theoretical studies have shown that it is possible to obtain amplification of laser radiation in such a medium [2-4].

Methods of mathematical simulation showed that during the generation of laser radiation in static argon-xenon gas environment irradiated by neutrons and containing uranium nanoparticles, the efficiency of conversion of the kinetic energy of the uranium fission fragments to the laser energy in ten times exceeds the efficiency of energy conversion during a heterogeneous pumping [7,8].

This article is devoted to the process of direct conversion of uranium fission fragments kinetic energy to laser radiation energy in the moving argon-xenon laser-active gas medium containing uranium nanoparticles.

The model of the space-time evolution of concentration distribution of the uranium nanoparticles injected into the cylindrical dust laser-active element and a method of model's numerical solution were developed. The calculations of the space-time evolution of the uranium nanoparticles concentration distribution for different gas velocities and nanoparticles sizes were carried out.

Kinetic processes and amplifying properties of moving laser-active spatially

inhomogeneous nuclear-induced containing uranium nanoparticles irradiated by neutrons argon-xenon medium were investigated.

According to the study, the gain value of the intensity of the laser radiation in the steady state exceeds a value of 7. Such a high figure suggests that suggested medium can be used not only in the nuclear-pumped lasers, but also in single-pass mode optical nuclear-pumped quantum amplifier.

Keywords: mathematical simulation, transformation, nuclear energy, fission, uranium fragments, kinetic processes, laser radiation, moving plasma, nanoparticles.

REFERENCES

1. Miley G.H., McArthur D., DeYuong R., Prelas M. Fission reactor pumped laser: History and prospects: Proceedings Conferences 50 Years with nuclear fission. Washington 25-28 April 1989, pp. 333-342. Publ. American Nuclear Society.
2. Budnik A.P., Kosarev V.A., Lunev V.P. Mathematical modeling of the lasing characteristics of active gas media containing nanoclusters uranium compounds [Physics of nuclear-pumped lasers and pulsed reactors]. Obninsk. IPPE Publ., 2009, v. 1 (in Russian).
3. Budnik A.P., Kosarev V.A., Lunev V.P. Mathematical modeling of kinetic processes in the gas argon-xenon plasma containing nanoclusters chemical compounds of uranium. Obninsk. IPPE Publ., 2008, no. 3141 (in Russian).
4. Alekseeva I.V., Budnik A.P., Sipachev A.V. Nonequilibrium radiation plasmodynamics in gas active environment of optical quantum nuclear-pumped amplifiers [Physics-chemical kinetics in gas dynamics.] 2010, v.9. <http://chemphys.edu.ru/media/files/2010-01-12-009.pdf> (in Russian).
5. Budnik A.P., Deputatova L.V., Fortov V.E., Lunev V.P., Vladimirov V.I. Simulation of kinetic processes, optical and neutron properties of the nuclear-excited uranium dusty plasma of the argon-xenon gas mixture. *Ukrainian Journal of Physics*. 2012, v. 56, no. 12, pp.1260-1264 (in Russian).
6. Budnik A.P., Lunev V.P. Settlement and theoretical studies of Monte Carlo optical and neutron-physical properties of argon-xenon gas medium containing nanoclusters of uranium and its compounds [Physics-chemical kinetics in gas dynamics.]. 2011, v.11. Available at: http://chemphys.edu.ru/media/files/2011-02-01-006_Budnik_Lunev.pdf (in Russian).
7. Budnik A.P., Sipachev A.V. Mathematical modeling of kinetic processes in an argon-xenon nuclear-induced plasma containing nanoclusters uranium [Physics-chemical kinetics in gas dynamics.] 2012, v.13. Available at: http://chemphys.edu.ru/media/files/2012-11-20-003_Budnik_Sipachev.pdf (in Russian).
8. Budnik A.P., Sipachev A.V. Mathematical modeling of kinetic processes in the generation of laser radiation in an argon-xenon active gas medium containing uranium nanoparticles. [Physics-chemical kinetics in gas dynamics.]. 2013, v.14. Available at: http://chemphys.edu.ru/media/files/04_Budnik_Sipachev_apm2011.pdf (in Russian).
9. Savel'ev I.V. Mechanics, molecular physics. General Physics Course. Moscow. Nauka Publ., 1987, v.1, 432 p. (in Russian).
10. Smirnov B.M. Aerosols in gases and plasmas. Moscow. Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences Publ., 1990, 104 p. (in Russian).
11. Alekseeva I.V., Budnik A.P. Model spatiotemporal evolution tracks of multiply charged ions in view of heterogeneity along the track. 1. Statement of the problem. Method of solution. Obninsk, IPPE Publ., 2001, no. 2922 (in Russian).

Authors

Slyunyaev Maksim Nikolaevich, PhD Student

E-mail: max.my.net@gmail.com

Budnik Alexandr Petrovich, Head of Laboratory, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: apbud@yandex.ru

Sipachyov Alexandr Vasil'evich, Senior Researcher.