

УДК 539.1:621.373.826

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕЛИЙ-АРГОН-КСЕНОНОВОЙ АКТИВНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЕ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОЧАСТИЦЫ УРАНА

Будник А.П., Сипачев А.В.

*ГНЦ РФ, Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского,  
г. Обнинск, 249033, пл. Бондаренко, 1  
arbud@yandex.ru*

## Аннотация

Разработана теоретическая модель кинетических процессов в гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана. Модель позволяет описывать процесс многоволновой генерации лазерного излучения в резонатор в облучаемых нейтронами гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащих наночастицы урана.

Исследованы энергетические характеристики лазерного излучения, генерируемого тройной смесью инертных газов на длинах волн 1.73 и 2.03 мкм. Показано, что общая эффективность преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в облучаемой нейтронами запыленной наночастицами урана газовой в гелий-аргон-ксеноновой среде превышает на порядок эффективность преобразования при гетерогенном методе ядерной накачки такой активной среды.

**Ключевые слова:** математическая модель, наночастица, ядро, уран, аргон, ксенон, гелий, осколок, деление, пылевая плазма, генерация, лазерное излучение

## MATHEMATICAL MODELING OF KINETIC PROCESSES WITH GENERATION OF LASER RADIATION IN HELIUM-ARGON-XENON DUSTY PLASMA CONTAINING URANIUM NANOPARTICLES

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

*Institute for Physics and Power Engineering named after A. I. Leypunsky,  
Russia, Obninsk, 249033*

A theoretical model of kinetic processes in helium-argon-xenon gas medium containing nanoparticles of uranium. The model allows to describe the process of multi-wavelength lasing in the resonator in irradiated by neutrons of helium-argon-xenon gas medium containing nanoparticles of uranium.

The energy characteristics of the laser radiation generated by the ternary mixture of inert gases at wavelengths of 1.73 and 2.03 microns. It is shown that the overall efficiency of conversion of nuclear energy into the energy of the laser radiation in the irradiated with neutrons dusty nanoparticles uranium gas into helium-argon-xenon medium order of magnitude higher than the conversion efficiency of the method in heterogeneous nuclear pumping a gain medium.

**Keywords:** mathematical model of nanoparticles, dusty plasma, laser radiation.

## 1. Введение

В последнее время было предложено для значительного увеличения эффективности прямого преобразования ядерной энергии в энергию когерентного оптического излучения, использовать лазерно-активные газовые среды, облучаемые нейтронами и содержащие нанокластеры химических соединений урана [1–4].

Выполненные расчетно-теоретические исследования показали, что возможно получить усиление лазерного излучения в ядерно-возбуждаемой аргон-ксеноновой пылевой газовой плазме. Это позволяло рассчитывать на создание способа и устройств с высокой эффективностью прямого преобразования кинетической энергией осколков деления в энергию когерентного оптического излучения.

В результате исследований выполненных в 2012г., впервые методами математического моделирования показано, что общая эффективность преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в бинарной смеси инертных газов (аргон-ксеноновой пылевой газовой плазме) может превышать на порядок эффективность такого преобразования при гетерогенном методе накачки [5].

Тем не менее, процесс генерации лазерного излучения в возбуждаемой осколками деления пылевой плазме инертных газов малоизучен. Экспериментальные исследования в этой области чрезвычайно сложны, они существенно ограничены в виду большой радиоактивной опасности. В настоящее время расчетно-теоретические исследования в этой области представляются основным направлением исследований.

Настоящая работа посвящена исследованию нейтронно-физических, оптических и кинетических процессов в лазерно-активной гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана. В ходе выполнения работы были разработаны модели физических процессов, протекающие в плазме, алгоритмы для численного решения системы уравнений, и созданы комплексы программ для математического моделирования.

Изучены энергетические характеристики лазерного излучения, генерируемого тройной смесью инертных газов, возбуждаемой осколками деления ядер урана, эмитируемыми из пылевых частиц в результате индуцированного нейтронами деления ядер урана.

Разработана теоретическая модель кинетических процессов в гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана. Созданная кинетическая модель учитывает 86 компонентов плазмы и 747 плазмохимических процессов. Были рассмотрены процессы разрушения пылевых частиц при столкновении с ними осколков деления урана.

Модель включает эволюционные уравнения для концентраций газовых компонент плазмы и пылевых частиц с различными зарядами, а также для функции распределения электронов по энергиям и уравнения, описывающие процесс генерации лазерного излучения в резонаторе.

## **2. Модель кинетических процессов в возбуждаемой осколками деления пылевой гелий-аргон-ксеноновой лазерно-активной среде**

Особое место в создании мощных лазерных установок занимает лазер на переходах атома ксенона. Одним из самых низких порогов и высоких КПД обладает лазер аргон-ксеноновый лазер. Однако, при больших удельных мощностях накачки ( $0.7 \div 1.0 \text{ кВт/см}^3$ ) таких смесей происходит срыв генерации в результате перегрева электронного газа плазмы [6–7]. При добавлении в активную среду аргон-ксенонового лазера второго буферного газа - гелия температура электронов в плазме резко падает из-за упругих столкновений с легкими атомами гелия, благодаря чему гелий – аргон ксеноновый лазер может работать при более высоких удельных мощностях накачки и удельных энерговкладах.

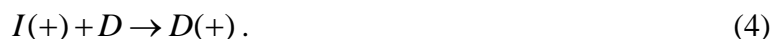
Хотя КПД гелий-аргон-ксеноновых лазеров ниже, чем у аргон-ксеноновых, за счет больших энерговкладов можно получать более высокую энергию генерации. Самостоятельный интерес представляет также свойство гелий-аргон-ксенонового лазера при сравнимом процентном содержании гелия и аргона в рабочей смеси генерировать в основном на длине волны 2.03 мкм. Указанные особенности гелий-аргон-ксенонового лазера определяют важность и наличие довольно большого количества теоретических моделей ([3] и ссылки в ней), описывающих работу гелий-аргон-ксенонового лазера в условиях конкретных экспериментов.

Модель кинетических процессов в возбуждаемой осколками деления аргон-ксеноновой лазерно-активной среде с монодисперсной пылевой компонентой была разработана в работах [1–5]. Примем эту модель за основу.

В схему плазмохимических реакций модели аргон-ксеноновой лазерно-активной среды с монодисперсной пылевой компонентой были добавлены кинетические процессы, описывающие взаимодействие между компонентами гелиевой и основными компонентами аргон-ксеноновой плазмы, а также процессы, характерные для самой гелиевой плазмы – образование атомарных и молекулярных ионов гелия, возбужденных атомов и молекул гелия, процессы взаимодействия различных компонент гелиевой плазмы с атомами аргона. В модели представлены также процессы, описывающие генерацию на переходах с длиной волны 1.73; 2.03 и 2.65 мкм.

Основные компоненты гелий-аргон-ксеноновой плазмы, включенные в модель, показаны на рис. 1. Это ионы атомов  $\text{He}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Xe}^+$ , ионы молекул  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{Ar}_2^+$ ,  $\text{Xe}_2^+$ ,  $\text{ArXe}^+$ , возбужденные состояния атомов He, Ar, Xe, в том числе атомы ксенона на всех возбужденных уровнях, принадлежащих состояниям 5d, 6p, 6s и 6s', а также более высоко возбужденным состояниям, объединенным в одно эффективное состояние 7p, 7s, эксимеры  $\text{He}_2^*$ ,  $\text{HeXe}^*$ ,  $\text{HeXe}^{**}$ ,  $\text{Ar}_2^*$ ,  $\text{Ar}_2^{**}$ ,  $\text{ArXe}^*$ ,  $\text{Xe}_2^*$ .

В модели с монодисперсной пылевой компонентой процессы взаимодействия электронов и ионов с заряженными наночастицами описывались следующими “плазмохимическими” реакциями:



Здесь введены обозначения:  $e$  – соответственно электрон;  $D$ ,  $D(+)$ ,  $D(n-)$  – соответственно электрически нейтральный, положительно и отрицательно заряженные наночастицы радиусом 5 нм;  $n$  – заряд наночастиц в единицах заряда электрона;  $I(+)$  – любой положительно заряженный атомарный или молекулярный ион газовой смеси.

Всего в модели рассматривалось 73 компонент и учитывалось 686 реакций в аргон-ксеноновой среде.

Лазерные переходы в ксеноновом лазере происходят между 5d- и 6p-уровнями. Структура этих уровней и лазерные переходы с соответствующими длинами волн показаны на рис. 2.

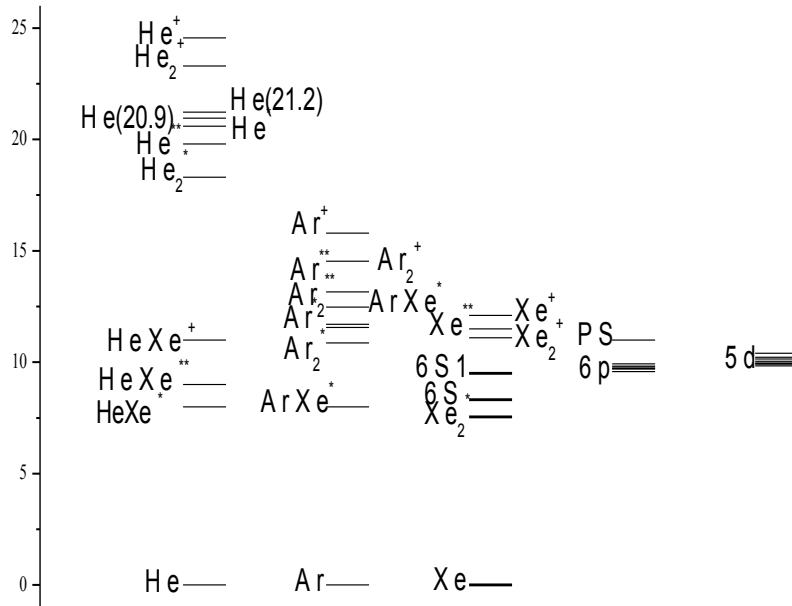


Рис. 1. Энергетическая диаграмма рассматриваемых в кинетической модели состояний газовых компонент

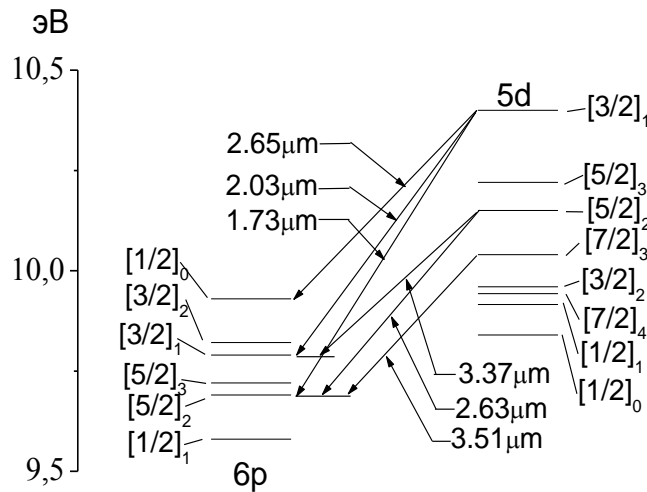


Рис. 2. Энергетическая диаграмма рассматриваемых в кинетической модели состояний атома ксенона, на переходах между которыми возможно получить генерацию лазерного излучения

На рис. 3 схематически показаны основные плазмохимические процессы в гелий-аргон-ксеноновой плазме после облучения рабочей смеси импульсом осколков деления. Во взаимодействиях с электронами, рождаемыми в буферной смеси осколками деления, образуются ионы  $\text{He}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Xe}^+$ , возбужденные атомы  $\text{He}^*$ ,  $\text{He}^{**}$ ,  $\text{Ar}^*$ ,  $\text{Ar}^{**}$ . Далее в результате трехчастичной конверсии нарабатываются молекулярные ионы  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{Ar}_2^+$ ,  $\text{Xe}_2^+$ ,  $\text{ArXe}^+$ .

При сильном разбавлении смеси  $[\text{Xe}]/([\text{He}]+[\text{Ar}]+[\text{Xe}])=0.001 \div 0.1$ , которое обычно имеет место в экспериментах, энергия с гелия передается на аргон и затем с аргона на ксенон. Возбужденные атомы  $\text{He}^*$ ,  $\text{Ar}^*$ ,  $\text{Xe}^*$  в реакциях ассоциации образуют эксимерные молекулы  $\text{He}_2^*$ ,  $\text{Ar}_2^*$ ,  $\text{ArXe}^*$ ,  $\text{Xe}_2^*$ , которые затем быстро радиационно распадаются с образованием атомов в основном состоянии – это канал потерь.

Схема основных процессов накачки верхнего лазерного уровня для переходов с длиной волны 1.73; 2.03 и 2.65 мкм показана на рис. 3.

Заселение верхних лазерных уровней 5d в настоящей модели, как и в модели аргон-ксеноновой среды, происходит в результате тушения высоковозбужденных уровней 7p, 7s, которые, в свою очередь, заселяются, в основном, в результате трех реакций: диссоциативной рекомбинации гетеромолекулярных ионов  $\text{ArXe}^+$  (до  $70 \div 80 \%$ ), возбуждения электронным ударом состояний 6s (до  $5 \div 10 \%$ ) и тушения атомами аргона высоковозбужденных состояний  $\text{Xe}^{**}$  (до  $10 \div 15 \%$ ) (рис. 4). Тушение состояний 7p, 7s на верхние лазерные уровни 5d осуществляется, в основном, атомами аргона и гелия.

Очистка нижнего рабочего уровня  $6p[3/2]1$ , определяющая инверсию заселенностей, преимущественно происходит в результате тушения атомами гелия, причем константа скорости тушения гелием уровня  $6p[3/2]1$  имеет существенно более высокое значение, чем остальных 6p-уровней. Последним обстоятельством и объясняется преобладание лазерного излучения с длиной волны 2.03 мкм в спектре генерации гелий-аргон-ксенонового лазера.

### **3. Расчетно-теоретические исследования кинетических процессов в облучаемой нейтронами гелий-аргон-ксеноновую газовой среде, содержащей нанокластеры урана**

Математическое моделирование кинетических процессов в облучаемой нейтронами гелий-аргон-ксеноновую газовой среде, содержащей нанокластеры урана было выполнено при различных мощностях энерговысвобождения и относительных концентрациях, как газовых компонент, так и концентрациях наночастиц, а также разных давлениях газа.

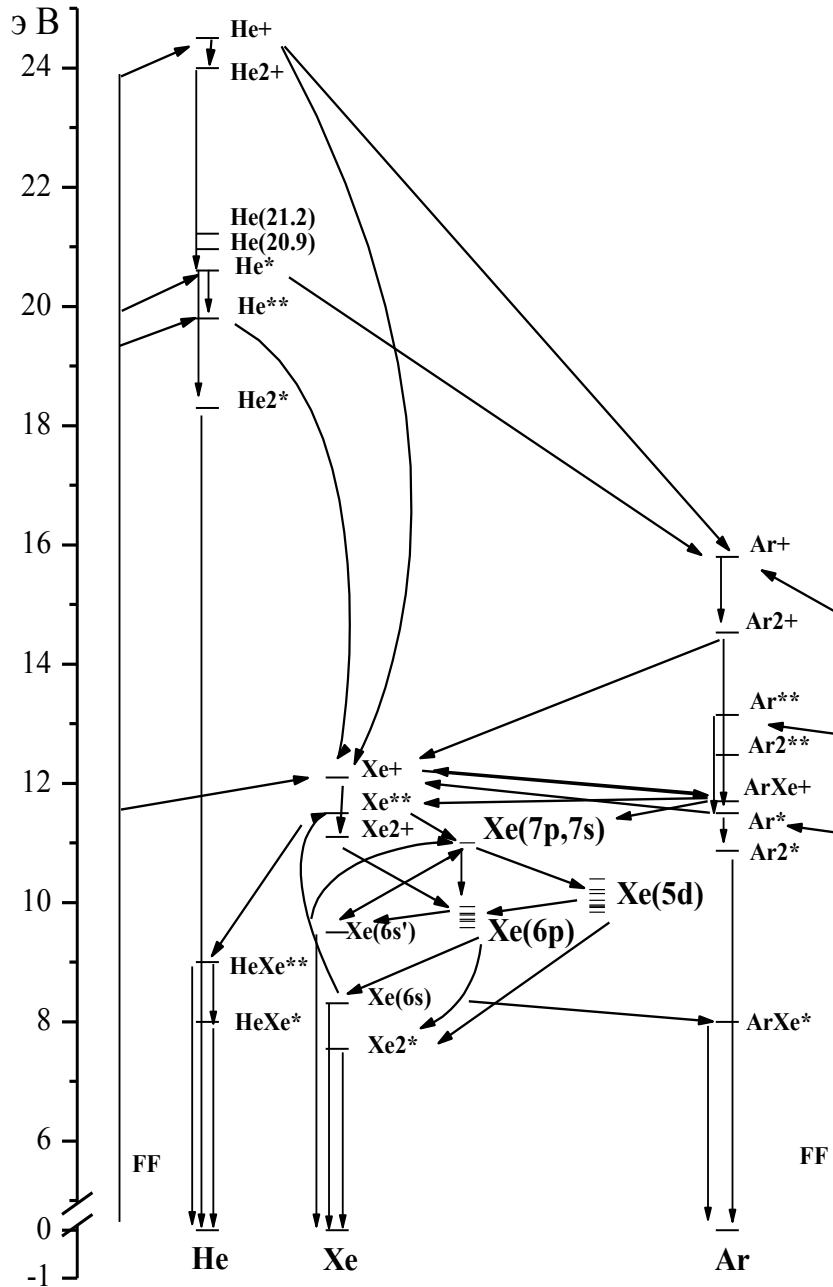


Рис. 3. Схема плазмохимических реакций в гелий-аргон-ксеноновой среде, облучаемой осколками деления (FF)

Далее представлены типичные результаты расчетов смеси He/Ar/Xe=1/98.5/0.5. Начальное давление газовой смеси полагалось равным 1 атм, а начальная температура равной 300 К. Полагалось, что удельная мощность энергоклада осколков деления в среду зависела от времени по закону

$$P(t) = P_{\max} \frac{t}{\tau} \exp\left(1 - \frac{t}{\tau}\right),$$

где  $\tau = 70$  мкс,  $P_{\max}$  – максимальная удельная мощность энергоклада осколков деления в активную среду  $P_{\max} = 255$  Вт/см<sup>3</sup>.

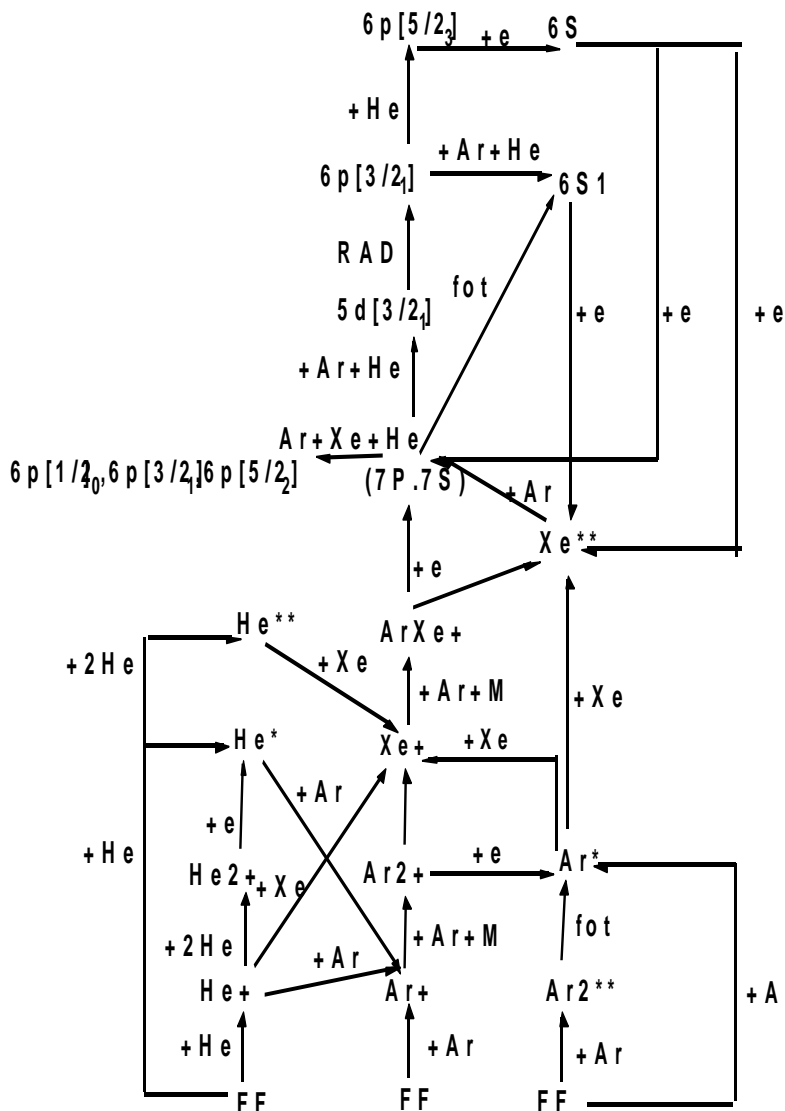


Рис. 4 Схема основных процессов накачки верхнего лазерного уровня для перехода с длиной волны 2/03 мкм

Методами математического моделирования получены данные о временной эволюции компонентного состава, возбуждаемой осколками деления пылевой гелий-аргон-ксеноновой ядерно-возбуждаемой плазмы при развитии генерации лазерного излучения. Изучено влияние состава газовой смеси на эффективность преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию лазерного излучения.

На рис. 5 представлены результаты расчетов эффективности преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию лазерного излучения в гелий-аргон-ксеноновой среде, содержащей наночастицы урана радиусом 5 нм, концентрация наночастиц  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Рассматривалась генерация лазерного излучения на длине волны 1.73 мкм. Длина резонатора равнялась 1 м, коэффициент отражения полупрозрачного зеркала 0.95. Площадь сечения резонатора  $314 \text{ см}^2$ , давление газовой смеси 1 атм.

Эффективность преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в такой среде может достигать 1% от вложенной в активную среду энергии осколков деления, при этом с ростом концентрации гелия в смеси эффективность преобразования снижается.

Известно, что при увеличении концентрации гелия в такой смеси и недостаточной селективности зеркал резонатора развивается многоволновая генерация лазерного излучения.

При этом основная энергия лазерного излучения происходит на переходах 2.03 мкм и 2.63 мкм.

Следовательно, представляет интерес провести исследования многоволновой генерации лазерного излучения в пылевой ядерно-возбуждаемой плазме.

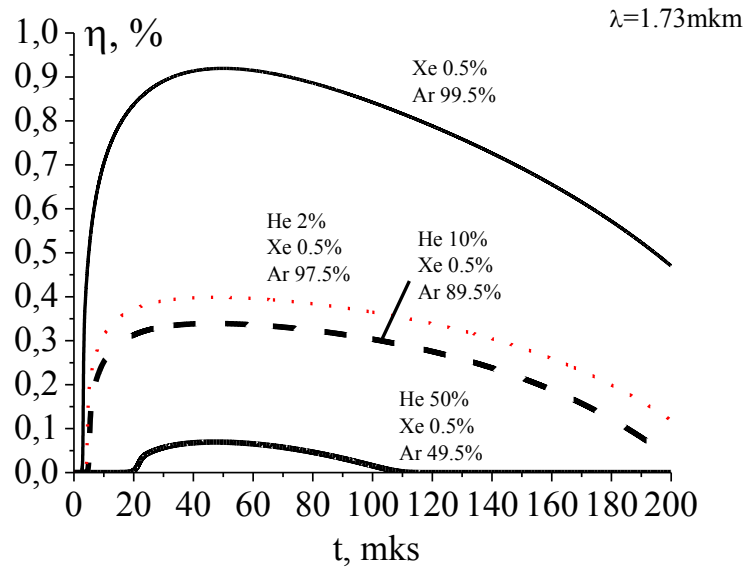


Рис. 5 Мгновенная эффективность преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию лазерного излучения на длине волны 1.73 мкм в гелий-аргон-ксеноновой среде, содержащей наночастицы урана радиусом 5 нм

На рис. 6 представлены результаты расчетов эффективности преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию лазерного излучения в гелий-аргон-ксеноновой среде, содержащей наночастицы урана радиусом 5 нм, концентрация наночастиц  $1011 \text{ см}^{-3}$ .

Рассматривалась генерация лазерного излучения на длине волны 2.03 мкм. Длина резонатора равнялась 1 м, коэффициент отражения полупрозрачного зеркала 0.95. Площадь сечения резонатора  $314 \text{ см}^2$ , давление газовой смеси 1 атм.

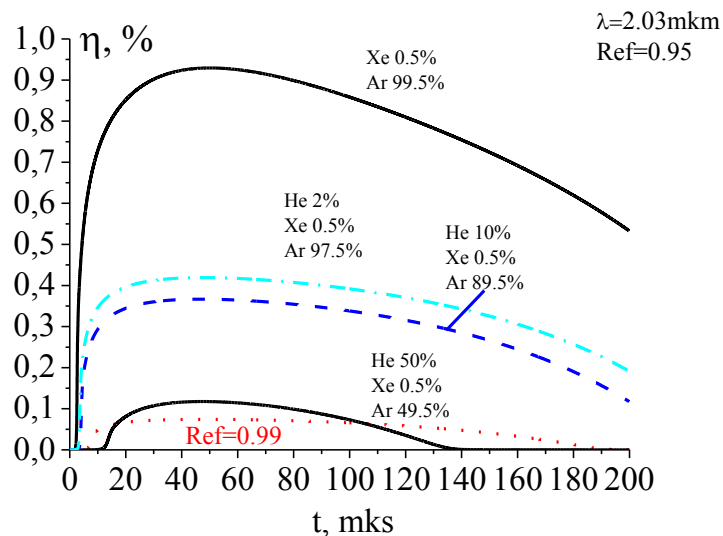


Рис.6 Мгновенная эффективность преобразования кинетической энергии осколков деления в энергию лазерного излучения на длине волны 2.03 мкм в гелий-аргон-ксеноновой среде, содержащей наночастицы урана радиусом 5 нм



## Заключение

Таким образом, в настоящей работе впервые изучена генерация лазерного излучения на длинах волн 1.73 и 2.03 мкм в лазерно-активной гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана.

Показано, что эффективность преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения в лазерно-активной гелий-аргон-ксеноновой газовой среде, содержащей наночастицы урана, может составлять около одного процента от вложенной в активную среду энергии осколков деления.

Следует отметить, что при этом общая эффективность преобразования ядерной энергии в энергию лазерного излучения превышает примерно на порядок эффективность этого преобразования при гетерогенном методе ядерной накачки, когда примерно 90% ядерной энергии бесполезно уходит на нагрев стенок ЛАЭЛ.

## Литература

1. 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..
2. 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. <http://chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-20-003.pdf>
3. 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. <http://chemphys.edu.ru/pdf/2013-04-29-004.pdf>
4. 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. 21 с.
5. А.П. Будник, А.В. Сипачёв. Математическое моделирование кинетических процессов при генерации лазерного излучения в аргон-ксеноновой активной газовой среде, содержащей наночастицы урана// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2013. Том 15. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2014-11-30-004.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2014-11-30-004.pdf)
6. Боховко М.В., Будник А.П., Добровольская И.В., Кононов В.Н., Кононов О.Е. Энергетическая перегрузка лазера на переходах 5d-6p атома Хе с накачкой осколками деления урана-235. Препринт ФЭИ-2651, Обнинск, 1997.
7. Карелин А.В., Симакова О.В. Кинетика активной среды многоволнового ИК лазера на ксеноне в смесях с Не и Аг, накачиваемых жестким ионизатором. Квантовая электроника, т.28, №2, С. 121, 1999.

8.

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2014 г.