

Э. Г. БАТЫРБЕКОВ

## КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНЫХ СРЕД ЛАЗЕРОВ С ПРЯМОЙ ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ НА ПЕРЕХОДАХ АТОМА НЕОНА

После получения мощной квазинепрерывной генерации на Зр-Зs переходах NeI [1-2] при возбуждении электронным пучком, в том числе с относительно малым удельным энерговкладом ( $10 \div 100 \text{ Вт}/\text{см}^3$ ) [3, 4], одновременно несколько исследовательских научных групп доложили о получении генерации с прямой ядерной накачкой излучением импульсных ядерных реакторов [5-7]. Низкие пороговые характеристики ( $1,5 \cdot 10^{13} \text{ н}/\text{см}^2\text{с}$ ), что соответствует возможностям существующих стационарных ядерных реакторов, были доложены в работе [8]. Однако экспериментальное подтверждение получения непрерывной генерации с прямой ядерной накачкой в

условиях стационарного ядерного реактора до сих пор нет.

Настоящая работа является заключительной из цикла работ, посвященных исследованию кинетики неоновой плазмы, в поле излучения стационарного ядерного реактора [9-11]. Используя результаты предыдущих работ, в частности, экспериментального исследования эффективности заселения Зр уровней NeI, разработана кинетическая модель физико-химических процессов, протекающих в He-Ne-Ar (Kr) плазме, созданной продуктами ядерных реакций, с целью определения пороговых характеристик неонового лазера с прямой ядерной накачкой.

Нами рассматривался баланс концентрации атомарных и молекулярных ионов  $\text{He}^+$ ,  $\text{He}_2^+$ ,  $\text{Ne}$ ,  $\text{Ne}_2^+$ ,  $\text{He}\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}_2^+$ ,  $\text{Ar}_3^+$ ,  $\text{Kr}^+$ ,  $\text{Kr}_2^+$ ,  $\text{Kr}_3^+$  и возбуждение атомов и молекул:  $\text{He}^{**}$ ,  $\text{He}_2^{**}$ ,  $\text{He}^*$ ,  $\text{He}_2^*$ ,  $\text{Ne}^*(4;5\text{S})$ ,  $\text{Ne}^{**}(3\text{p})$ ,  $\text{Ne}^*(3\text{S})$ ,  $\text{Ne}_2^{**}$ ,  $\text{Ne}_2^{**}$ ,  $\text{Ar}^{**}$ ,  $\text{Ar}^*$ ,  $\text{Ar}_2^{**}$ ,  $\text{Kr}^{**}$ ,  $\text{Kr}^*$ ,  $\text{Kr}_2^{**}$ ,  $\text{Kr}_2^*$ .

Одновременно рассматривалась поуровневая кинетика 3р и 3s состояний атомов Ne. Система дифференциальных уравнений баланса частиц, дополненная уравнениями сохранения заряда и баланса энергии электронов, решалась численным методом для квазистационарного случая. Условия квазистационарности вытекают из большой продолжительности процессов ядерной накачки ( $\tau_{\text{нак}} > 100 \text{ мкс}$ ), во много раз превышающие характерные времена атомных процессов, протекающих в плазме.

Рабочими уровнями перехода с  $\lambda=585,2 \text{ нм}$  являются состояния 3р'[1/2]<sub>0</sub> и 3s'[1/2]<sub>1</sub><sup>0</sup> - соответственно верхние уровни систем 3р и 3s состояний NeI. При этом состояние 3р'[1/2]<sub>0</sub> не участвует в процессах внутримультиплетной релаксации и заселяется в основном в процессах диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов. Заселение состояния 3s'[1/2]<sub>1</sub><sup>0</sup>, как показано в [11], определяется преимущественно радиационными переходами с уровня 3р'[1/2]<sub>0</sub>. В связи с этим рассмотрение поуровневой кинетики 3р и 3s состояний атомов неона ограничивалось рассмотрением 4 групп состояний: 3р'[1/2]<sub>0</sub>, 3s'[1/2]<sub>1</sub><sup>0</sup>, 3р и 3s, где под 3р и 3s рассматривались в совокупности все остальные состояния 3р и 3s уровней атомов неона соответственно.

Для переходов с  $\lambda = 724,5 \text{ нм}$  и  $703,2 \text{ нм}$  верхним рабочим уровнем является самое нижнее состояние системы 3р уровней NeI - 3р[1/2]<sub>1</sub>, заселение которого определяется, как диссоциативной рекомбинацией молекулярных ионов, так и процессами внутримультиплетной релаксации. Поэтому в данном случае рассматривались все 10 состояний 3р уровней и 4 состояния системы 3s уровней NeI. В расчетах учитывались поуровневое заселение указанных состояний, процессы внутри и межмультиплетной релаксации, радиационные переходы.

Расчеты проводились для смесей  $\text{He}^3(3\text{Атм})$ - $\text{Ne}(30\text{Top})$ - $\text{Ar}$  (переход с  $\lambda = 585,2 \text{ нм}$ ) и  $\text{Ne}(1\text{Атм})$ - $\text{Kr}$  (переходы с  $\lambda = 703,2$  и  $724,5 \text{ нм}$ ). Оптимальное давление смесей определялось длинами свободного пробега заряженных частиц и конкретной геометрией лазерной трубки.

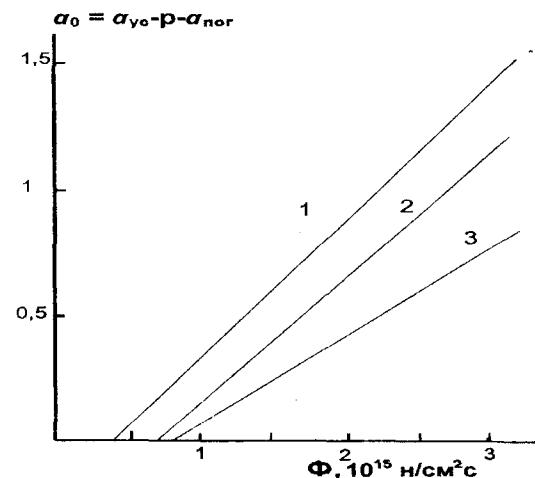


Рис. 1. Зависимость величины  $\alpha_0 = \alpha_{yc} - p - \alpha_{nor}$  для переходов с  $\lambda=585,2 \text{ нм}$  ( $\text{He}^3(3\text{Атм})+\text{Ne}(30\text{Top})+\text{Ar}$  (8Top)) (1),  $703,2 \text{ нм}$  ( $\text{Ne}(1\text{Атм})+\text{Kr}(15\text{Top})$ ) (2),  $724,5 \text{ нм}$  ( $\text{Ne}(1\text{Атм})+\text{Kr}(35\text{Top})$ ) (3) от потока тепловых нейтронов

На рис. 1 приведены расчетные значения величины  $\alpha_0 = \alpha_{yc} - p - \alpha_{nor}$ , как функция потока тепловых нейтронов для оптимальных (с точки зрения максимального значения коэффициента усиления) смесей, где  $p$  – коэффициент полезных потерь,  $\alpha_{nor}$  – нерезонансное поглощение лазерного излучения активной средой.

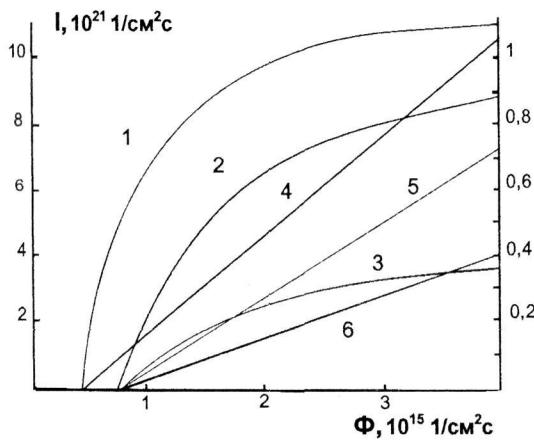
Коэффициент усиления определяется выражением:  $\alpha_0 = \sigma_{yc} [\frac{S_p}{k_p} - S_s/k_s g_p/g_s]$ , где  $\sigma_{yc}$  – сечение стимулированного перехода,  $S_p$  и  $S_s$  – соответственно потоки заселения верхнего и нижнего лазерного уровней.  $S_p$  включает в себя диссоциативную рекомбинацию молекулярных ионов с учетом значений эффективности заселений, полученных экспериментально при спектральных исследованиях [9], радиационные переходы с 4s и 5s уровнями атомов неона и процессы внутримультиплетной релаксации (для переходов с  $\lambda=703,2$  и  $724,5 \text{ нм}$ ).  $S_s$  представляет собой прямое возбуждение продуктами ядерных реакций, радиационные и межмультиплетные в двухчастичных столкновениях с атомами неона переходы с 3р уровнем атомов неона.  $k_p$  и  $k_s$  – полные скорости “очистки” верхнего и нижнего рабочего уровня соответственно в процессах двухчастичных и трехчастичных столкновениях с атомами He, Ne, Ar, а также радиационных переходов для 3р уровней.

Как видно, пороговые значения потоков тепловых нейтронов, при которых выполняется условие  $\alpha_0=0$ , составляют  $\Phi_{\text{пор}} \approx 4 \cdot 10^{14}$ ,  $7 \cdot 10^{14}$  и  $8 \cdot 10^{14} \text{ н/см}^2\text{с}$  соответственно для переходов с  $\lambda=585,2, 703,2$  и

724,5 нм, что вполне достижимо на импульсных ядерных реакторах и несколько превышают возможности стационарных ядерных реакторов.

Для определения выходных характеристик лазерного излучения при накачке потоком тепловых нейтронов  $\Phi \geq \Phi_{\text{пор}}$  система уравнений баланса частиц, энергии электронов и сохранения заряда дополнялось уравнением для плотности лазерного излучения в резонаторе:

$$\frac{dl}{cdt} = \alpha_{yc} l - pl - \alpha_{noz} 1 + W_{cn},$$



**Рис. 2.** Зависимость плотности лазерного излучения (4,5,6) и КПД (1,2,3) генерации от вложенной в газ энергии для  $\lambda=585,2 \text{ нм} (\text{He}^3(3 \text{ Атм})+\text{Ne}(30 \text{ Тор})+\text{Ar}(9 \text{ Тор}))$  (1,4), 703,2 нм ( $\text{Ne}(1 \text{ Атм})+\text{Kr}(20 \text{ Тор})$ ) (2,5), 724,5 нм ( $\text{Ne}(1 \text{ Атм})+\text{Kr}(40 \text{ Тор})$ ) (3,6)

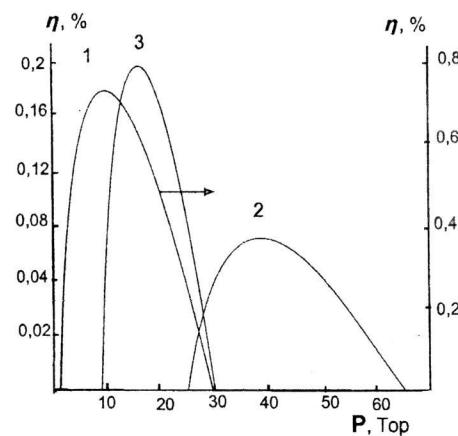
Результаты расчетов кинетики физико-химических процессов объясняют отрицательные результаты экспериментов по созданию лазера на 3p-3s переходах NeI с прямой ядерной накачкой излучением стационарного ядерного реактора ВВР-К. Расчетное значение порогового энерговклада  $\omega_{\text{пор}} \approx 8,7 \text{ Вт}/\text{см}^3$  для перехода с  $\lambda = 585,2 \text{ нм}$  несколько больше максимально достигнутой в условиях реактора ВВР-К величины  $\omega = 4,4 \text{ Вт}/\text{см}^3$ .

Однако полученные значения показывают, что при потоках тепловых нейтронов  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$ , характерных для импульсных аппаратов, возможно достижение генерации с КПД от вложенной в газ энергии  $\approx 1,1, 0,36$  и  $0,89\%$  соответственно для переходов с  $\lambda = 585,2, 703,2$  и  $724,5 \text{ нм}$ . Результаты расчетов хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований генераций на переходах атома неона с прямой ядер-

$$W_{cn} = A_{ik} h \omega [N e^{**}(3p_i)] \frac{\Delta \Omega}{4\pi} \frac{\Delta \omega_{\text{ген}}}{\Delta \omega_\lambda}$$

- мощность спонтанного излучения в телесный угол  $\Omega$ , соответствующий расходимости лазерного излучения, и в спектральный интервал  $\Delta \omega_{\text{ген}}$ .

Зависимости расчетных значений плотности лазерного излучения и соответствующие им значения КПД лазера в расчете на излучение из одного зеркала от плотности потока тепловых нейтронов и концентрации «тушащей» добавки показаны на рис. 2 и 3.



**Рис. 3.** Зависимость КПД лазера с  $\lambda = 585,2 \text{ нм}$  (1), 703,2 нм (2), 724,5 нм (3) от содержания «тушащих» добавок в смесях:  $\text{He}^3(3 \text{ Атм})+\text{Ne}(30 \text{ Тор})+\text{Ar}$  (1) и  $\text{Ne}(1 \text{ Атм})+\text{Kr}$  (2,3),  $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ н}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$

ной накачкой излучением импульсного ядерного реактора [13].

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бункин Ф.В., Держисев В.И., Месяц Г.А. и др. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12, №2. С. 245.
- Басов Н.Г., Александров А.Ю., Данилычев В.А. и др. Письма в ЖЭТФ. 1985. Т. 41, вып. 4. С. 156.
- Александров А.Ю., Ананьев В.А., Басов Н.Г. и др. // ДАН СССР. 1985. Т. 284, №4. С. 851.
- Александров А.Ю., Долгих В.А., Керимов О.М., Мызников Ю.Ф. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. С. 630.
- Hebner G.A., Hays G.H. // Appl. Phys. 1990. V. 57, N 21. P. 2175.
- Воинов А.В., Кривоносов В.Н., Мельников С.П. и др. // Доклады АН СССР. 1990. Т. 35, вып. 6. С. 568.
- Копай-Гора А.П., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16, вып. 11. С. 23.
- Shaban Y., Miley G.H. Труды конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров ядерной накачкой». Обнинск, РФ, 1993. Т. 2. С. 241.

9. Батырбеков Г.А., Батырбеков Э.Г., Данилычев В.А. и др. Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 68, вып. 6. С. 727.

10. Батырбеков Г.А., Батырбеков Э.Г., Данилычев В.А. и др. // Квантовая электроника. 1990. Т. 20, В9. С. 1084.

11. Батырбеков Э.Г. // Вестник АН КазССР. 1990. Вып. 6. С. 72-78.

12. Batyrbekov E.G., Batyrbekov G.A., Danilychev V.A. // Hyperfine Interactions. 1994. V. 88. P. 173.

13. Конак А.И., Мельников С.П., Порхаев В.В., Синянский А.А. Труды конференции «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой». 1999. Т. 1. 293.

### Summary

This paper is devoted to the researchment of kinetics of neon nuclear induced plasma. The kinetic model of physical and chemical processes, occurring in He-Ne-Ar (Kr) plasma, created by products of nuclear reactions, has been developed, using results of the previous works, in particular, the experimental research of efficiency settling of NeI 3p levels. The basic components of plasma, amplification factors, threshold and output characteristics of lasers with direct nuclear pumping on transitions of neon atom with  $\lambda = 585.2$  nm, 703.2 nm and 724.5 nm have been calculated.

УДК: 539.196; 535.37

Конверсионное предприятие

«КК Интерконнект», г. Алматы

Поступила 20.05.08г.