

Н. БУРТЕБАЕВ, М.У. ХАСЕНОВ, А.С. СЫРЛЫБАЕВ

## ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ СМЕСЕЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ ЖЕСТКИМ ИОНИЗАТОРОМ

(Представлена академиком НАН РК Э.Г.Боос)

Исследовано влияние тушащих добавок на люминесцентные свойства смесей гелия и неона при накачке б-частицами  $^{210}\text{Po}$ . Сделан вывод, что заселение  $3p^1[1/2]$ -уровня  $\text{NeI}$  при возбуждении тяжелой заряженной частицей происходит не в процессе диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов. Наиболее вероятным каналом заселения  $\text{Ne}(3p)$  предполагается передача возбуждения атомам неона от метастабильных атомов гелия и прямое возбуждение неона ядерными частицами и вторичными дельта-электронами.

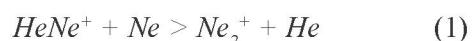
Генерация излучения в видимом диапазоне, отсутствие деградации и химической активности рабочей газовой смеси, значительный кпд привлекают интерес к лазеру высокого давления на  $3p\text{-}3s$ -переходах неона с накачкой ионизирующим излучением [1]. В [2] теоретически рассмотрена возможность создания лазера на линии неона 585 нм при накачке смеси  $\text{He-Ne-H}_2$  б-частицами. В настоящей работе исследованы зависимости интенсивности линии 585 нм от концентрации тушащей добавки в смесях  $\text{He-Ne-H}_2(\text{Ar, Kr, D}_2)$  при возбуждении б-частицами  $^{210}\text{Po}$ .

Установка для измерения спектров описана в [3]. В камере из нержавеющей стали располагались 18 источников с  $^{210}\text{Po}$ . Размер области возбуждения  $\varnothing 25\times70$  мм, максимальный пробег  $\alpha$ -частиц с энергией 5 МэВ в газе при нормальных условиях составляет [4]: в  $\text{He}$  – 183,  $\text{Ne}$  – 56,  $\text{Ar}$  – 37,  $\text{Kr}$  – 28,  $\text{H}_2$  – 340 мм. Перед установкой источников камера прогревалась и обезгаживалась при вакууме  $\sim 10^{-5}$  Торр. Сами  $\alpha$ -источники после установки откачивались без прогрева в течение 2-3 недель до получения хорошо воспроизводимых (до 3-7% интенсивности для разных газов) спектров люминесценции. Давление газов измерялось с помощью образцового мановакуумметра и вакуумметра ВДГ-1. Использовались аргон и гелий с содержанием примесей менее  $8\cdot10^{-3}\%$ , неон и криптон содержали примесей менее  $10^{-3}\%$ . Технический водород и дейтерий (обогащение по  $\text{D}_2$  99%, примеси азота  $\sim 0,1\%$ , кислорода  $\sim 0,05\%$ ) очищались при пропускании через силикагель и активную медь. Спектр излучения анализировался с помощью монохроматора SPM-2 с кварцевой призмой и ФЭУ-106, работающего в режиме счета фотонов. Активность б-источников составляла 9,6 ГБк, что соответствует среднему энерговкладу в 2 атм ге-

лия  $\sim 3\cdot10^{-5}$  Вт·см $^{-3}$  и “средней” по объему газа скорости ионизации  $S\sim 4\cdot10^{12}$  см $^{-3}\text{с}^{-1}$ .

Измеренные зависимости интенсивности люминесценции на линии 585 нм от давления тушащих добавок показаны на рис. 1. Были проведены также измерения с добавками технического азота, содержащего  $\sim 2\%$  кислорода, экспериментальные точки (на рис. 1 не показаны) лежат между кривыми для  $\text{Ar}$  и  $\text{Kr}$ . Зависимость интенсивности люминесценции на л=703 нм от давления добавок  $\text{H}_2$  или  $\text{Kr}$  аналогична зависимости для 585 нм (рис. 2).

Процессы в активных средах лазеров на  $3p\text{-}3s$ -переходах  $\text{NeI}$  считаются хорошо изученными [5]: заселение верхнего лазерного уровня происходит преимущественно за счет диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов  $\text{Ne}_2^+$  и  $\text{HeNe}^+$ . При относительно слабой накачке ионы  $\text{HeNe}^+$  также образуют ионы  $\text{Ne}_2^+$  в реакциях замещения:



Принимая, что зависимость интенсивности люминесценции на линии 585 нм определяется конкуренцией процессов перезарядки ионов  $\text{Ne}_2^+$  на тушащей добавке и рекомбинации электронов с  $\text{Ne}_2^+$ , получим для концентрации добавки, при которой интенсивность падает вдвое:

$$P = \sqrt{\beta \times S} / k \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент перезарядки  $\text{Ne}_2^+$  на примеси,  $\beta$  – коэффициент рекомбинации  $\text{Ne}_2^+$  с электронами.

Для водорода  $k=1,1\cdot10^{-10}$  см $^3\text{с}^{-1}$  [6], тогда при “средней” скорости ионизации  $P\sim 8\cdot10^{12}$  см $^{-3}\sim 2\cdot10^{-4}$  Торр. Измеренные значения  $P$  соответствуют 2,8 Торр для  $\text{Kr}$ , 3,8 Торр для  $\text{Ar}$  и 8 Торр для  $\text{H}_2, \text{D}_2$  в смеси с 2 атм гелия и 50 Торр неона (см. рис. 1). Коэффициенты перезарядки для  $\text{Ar}, \text{Kr}$  малы [6],

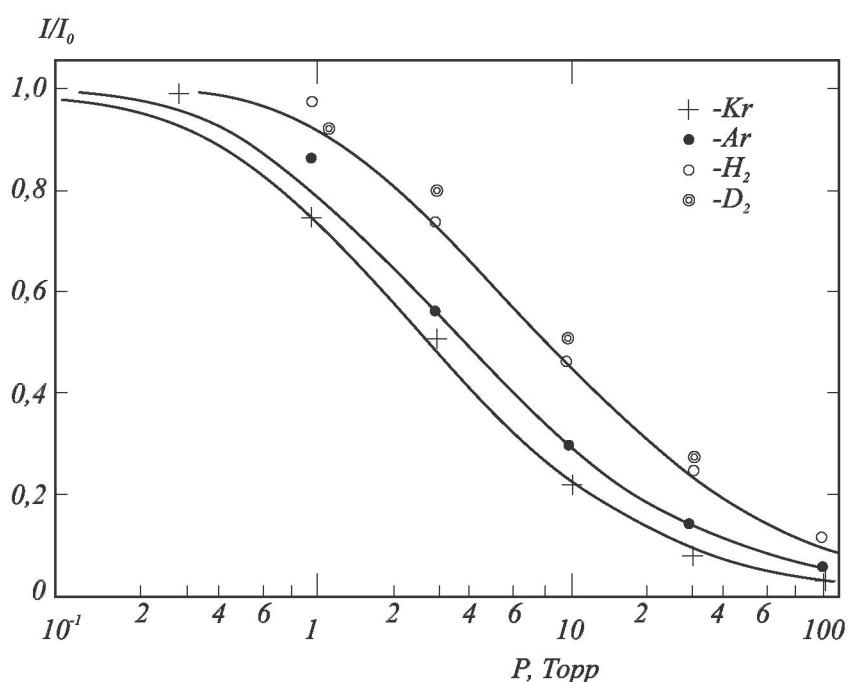


Рис. 1. Зависимость интенсивности люминесценции от давления добавок к смеси He (2 атм) + Ne (50 Торр).  $I_0$  – интенсивность в смеси без добавок

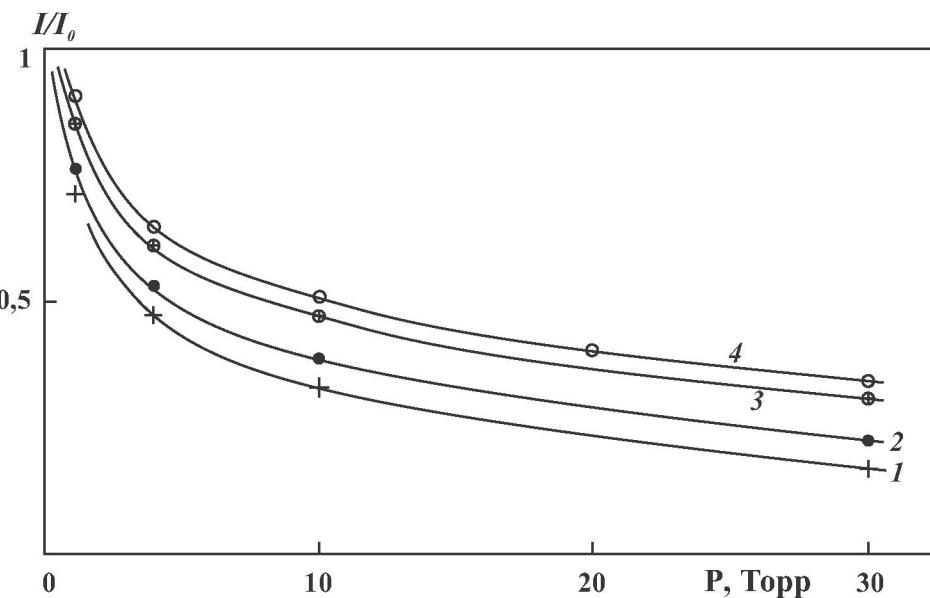


Рис. 2. Зависимость интенсивности люминесценции на 703 нм (1, 3) и 585 нм (кривые 2, 4) от давления водорода в смеси He + Ne (40 Торр) +  $H_2$  при давлении гелия 1 атм (кривые 1, 2) и 2 атм (кривые 3, 4).

для  $H_2$  значение из [6] предполагается сильно завышенным [5], что может объяснить более медленный спад интенсивности. Измеренное для сравнения значение  $P$  для технического азота составило 3,5 Торр, приведенные в литературе значения  $k$  для азота –  $9,1 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$  [6] и  $8,6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \text{с}^{-1}$  [7].

Возможная причина эффективной люминесценции на 585 нм при давлениях тушащей добавки в несколько Торр могла быть связана с неоднородной трековой структурой образующейся плазмы. Пробег  $\alpha$ -частицы с энергией 5 МэВ в гелии при давлении 2 атм составляет 9 см, радиус трека определяется длиной пробега вторичных

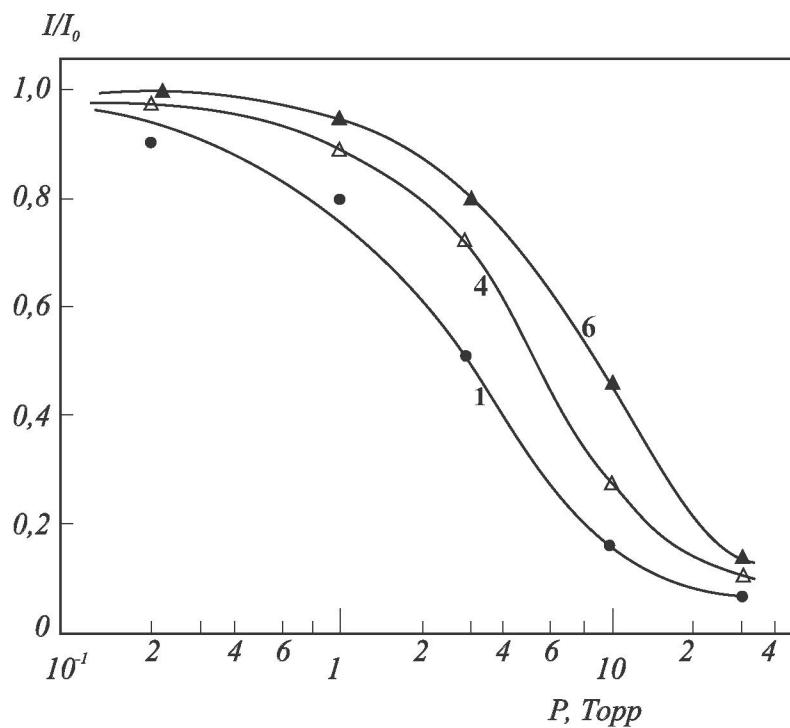


Рис. 3. Зависимость интенсивности люминесценции на 585 нм от давления криптона в смеси He + Ne (40 Торр) + Kr при давлении гелия 1, 4 и 6 атм.

электронов с энергией около 100 эВ –  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  см, объем трековой области составляет  $\sim 7 \cdot 10^{-6}$  см<sup>3</sup>. Энергия образования электрон-ионной пары в гелии 45 эВ, при пролете  $\alpha$ -частицы образуется  $10^5$  электронов, начальная плотность электронов в треке  $\alpha$ -частицы  $n_e \sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup>. Характерное время рекомбинации электронов с ионами  $\text{Ne}_2^+$  при такой плотности  $\Phi = v n_e \sim 2 \cdot 10^{-3}$  с. Время жизни трека, обусловленное амбиполярной диффузии, составляет десятки наносекунд [8]. Трек расплывается по объему газа намного раньше характерного времени рекомбинации, слабая зависимость интенсивности люминесценции от давления добавок не связана с трековым характером плазмы. Характер зависимости интенсивности люминесценции от давления криптона при разных давлениях гелия (рис. 3) также подтверждает этот вывод. При изменении давления смеси с 1 до 6 атм начальная плотность электронов в треке возрастает в 200 раз, давление криптона, при котором люминесценция спадает вдвое, увеличивается всего в 3 раза.

По-видимому, заселение  $3p'[1/2]_0$ -уровня  $\text{NeI}$  при возбуждении тяжелой частицей происходит не в процессе диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов. Для сравнения: при

ядерной накачке ртутьсодержащих смесей заселение уровней  $\text{HgI}$  происходит в процессе диссоциативной рекомбинации ионов  $\text{Hg}_2^+$  [9]. Добавление 0,1 Торр кислорода к смеси  ${}^3\text{He}-\text{Hg}$  приводит к ослаблению линий триплета и резонансной линии ртути в ~500 раз [10], что связано с прилипанием электронов к  $\text{O}_2$ . Конкурирующий с перезарядкой на атомах ртути процесс перезарядки  $\text{He}_2^+$  на  $\text{O}_2$ , по-видимому, в данном случае несуществен, так как ионы  $\text{O}_2^+$  будут также перезаряжаться на атомах Hg. Добавление к смеси He (2 атм) + Ne (50 Торр) до 30 Торр технического азота с примесью ~2%  $\text{O}_2$  привело к такому же спаду интенсивности, как и для чистых Ag и Kr, то есть процессы прилипания электронов к электроотрицательной примеси не влияют на заселение  $3p'[1/2]_0$ -уровня неона.

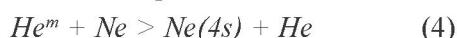
В работе [11] на основании исследования спектрально-временных характеристик чистого неона с накачкой тяжелыми заряженными частицами был сделан вывод о заселении уровней неона прямым возбуждением ядерными частицами и вторичными дельта-электронами, а в Не-Не смесях также в процессах передачи возбуждения от метастабилей гелия:



Таблица. Интенсивность люминесценции при возбуждении б-частицами.

№пп	Состав смеси	$I$ , л (нм)	Активность, ГБк	$I^*$ (отн. ед)
1	${}^4\text{He}$ (2 атм) + Ne (50 Торр)	5,69;	585	9,6
2	${}^3\text{He}$ (2 атм) + Ne (50 Торр)	5,72;	585	9,6
3	${}^3\text{He}$ (2 атм) + Hg (1,5 мТорр)	15,7;	546	16
4	Xe (1 атм) + Hg (1,5 мТорр)	79;	546	22
5	He (4 атм) + N <sub>2</sub> (0,3 Торр)	20,6; 6,0;	391 427	5,4

Возможным каналом заселения на наш взгляд также является процесс:



Известно, что уровни Ne(4s) близки к уровню He ( ${}^2\text{S}_1$ ), на передаче возбуждения атомам неона от He ( ${}^2\text{S}_1$ ) основана работа гелий-неонового лазера на 1,15 мкм. Отсутствие линий переходов 4s-3p в смеси высокого давления [11] связано с тем, что эти переходы лежат в ИК-области спектра за пределами чувствительности ФЭУ. В работе [12], где измерения проводились до 1 100 нм, присутствует линия 966,5 нм, соответствующая переходу  $4s[3/2]_2$ - $3p[1/2]_1$ . В ближней ИК-области также присутствуют линии 3d-3p –переходов, более интенсивные в чистом неоне, чем в смеси He-Ne [12]. Можно предположить, что заселение 3d-уровней происходит в процессах прямого возбуждения неона, в каскадных переходах 3d-3p и 3s-3p заселяются 3p-уровни неона.

Результаты настоящей работы подтверждают основной вывод [11] – при накачке смесей с неоном тяжелыми частицами преобладающий механизм заселения 3p-уровней неона не связан с диссоциативной рекомбинацией  $\text{Ne}_2^+$ .

Заселение 3p-уровней в результате рекомбинации  $\text{Ne}_2^+$  могло экранироваться перезарядкой  $\text{Ne}_2^+$  на примеси уже в смеси He-Ne без добавок. В таблице приводятся результаты измерений, которые позволяют оценить такую возможность. Интенсивность люминесценции на 585 нм в смеси с  ${}^3\text{He}$  высокой чистоты (содержание азота, водорода, углеводородов менее чем по 0,0001%) не отличалась от интенсивности в смеси с гелием марки «Б». Приводятся также интенсивности ( $I$ ) для других смесей, скорректированные на спектральную чувствительность установки и величину энерговклада в газ ( $I^*$ ).

Для линии триплета ртути 546 нм коэффициент ветвления равен 0,53 [13], селективность на-

качки уровня  ${}^7\text{S}_1 \sim 0,8$  [9]. Селективность возбуждения состояния  $\text{B}^2\Sigma_u^+$  в смеси He-N<sub>2</sub> – 0,75 [14]. Сравнивая интенсивности этих смесей с высокой эффективностью люминесценции и учитывая, что доля излучения на 585 нм составляет 15-20% от интенсивности всех линий 3p-3s переходов неона [5], можно сделать вывод, что основными, возможно, явно преобладающими каналами заселения 3p-уровней неона являются процессы передачи возбуждения от метастабильей гелия и прямого возбуждения неона.

Изменения интенсивности на 585 нм связаны не только с тушением 3p'[1/2]<sub>0</sub>-уровня добавками, константа скорости тушения составляет  $4,6 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  для H<sub>2</sub> и  $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$  для Ar [15]. Учитывая время жизни уровня – 14,3 нс [13], получим значение давления H<sub>2</sub> или Ar, при котором скорость тушения сравнивается со скоростью спонтанного распада уровня  $\approx 40$  Торр. По-видимому, спад интенсивности люминесценции с ростом парциального давления тушащей добавки связан, в основном, с процессом Пеннинга метастабилей гелия на добавке.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Мельников С.П., Сизов А.Н., Синянский А.А. Лазеры с ядерной накачкой. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. 440 с.
- Shaban Y. R., Campos T.P.R. A Proposed Continuous Wave 585.4 nm  ${}^4\text{He}/\text{H}_2$  Gas Laser Mixture Pumped by b-emitter Radioisotope // Brazilian J. of Physics. 1997. V. 27. N 2. P. 129–134.
- Khasenov M.U. Emission of the heteronuclear ionic molecules (ArXe)<sup>+</sup> at excitation by a hard ionizer // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6263. P. 141–148.
- Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка. 1975. 415 с.
- Карелин А.В., Яковленко С.И. Кинетическая модель He-Ne-Ar-H<sub>2</sub>-лазера с накачкой жестким ионизатором // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 8. С. 769–775.
- Вирин Л. И. Джагагунян Р.В., Карабечев Г.В., Потапов В.К., Тальрозе В.Л. Ионно-молекулярные реакции в газах. М.: Наука. 1979. 548 с.

7. Collins C.B., Lee F.W. Measurement of the rate coefficients for the bimolecular and termolecular ion-molecule reactions of  $\text{Ne}_2^+$  with selected atomic and molecular species // J. of Chem. Phys. 1980. V.72. N10. P. 5381–5389.

8. Будник А.П., Добровольская И.В. Особенности кинетики активных сред лазеров, возбуждаемых осколками деления // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 6. С. 506–510.

9. Батырбеков Г.А., Батырбеков Э.Г., Долгих В.А., Рудой И.Г., Сорока А.М., Тлеужанов А.Б., Хасенов М.У. Люминесценция смесей ртути и инертных газов с молекулярными добавками при возбуждении ионизирующими излучением // Журн. прикл. спектр. 1988. Т. 49. № 5. С. 770–774.

10. Smirnova I.I., Khasenov M.U. Possible use of ion–ion recombination in nuclear pumped laser // Proceedings of SPIE. 2008. V. 6938. P. 69380J.

11. Полетаев Е.Д., Дорофеев Ю.Б., Дьяченко П.П. Конай Гора А.П., Мавлютов А.А., Миськевич А.И., Саламаха Б.С. Излучательные характеристики чистого неона и Не–Не смесей высокого давления при возбуждении ядерными частицами // ЖТФ. 1992. Т. 62. № 2. С. 1–8.

12. Abramov A.A., Gorbunov V.V., Melnikov S.P., Mukhamatullin A.Kh., Pikulev A.A., Smitsyn A.V., Sinyanskii A.A., Tsvetkov V.M. Luminescence of nuclear induced rare-gas plasmas in near infrared spectral range // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6263. P. 12-1–12-18.

13. Радыч А.А., Смирнов Б. М. Параметры атомов и атомных ионов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 344 с.

14. Collins C. The nitrogen ion laser pumped by charge transfer / C. Collins // IEEE J. of Quantum Electronics. 1984. V. 20. N 1. P. 47-63.

15. Буриштейн М.Л., Комаровский В.А., Федоров А.Н., Юргенсон С.В. Исследование тушения возбужденных 2-р-

уровней неона молекулярным водородом и атомами аргона // Оптика и спектр. 1991. Т.71. В. 2. С. 240–242.

### Резюме

210-полонийдың  $\alpha$ -бөлшектерімен қоздыру кезінде гелий және неон қоспаларының люминесценциялық касиеттеріне өшіруші қосымшаның әсері зерттелді. Зарядталған ауыр бөлшектермен қоздыру кезінде  $\text{NeI} \ 3p'[1/2]_0$ -денгейінің толтырылуы, молекулалық ионның диссоциативтік рекомбинация процесі барысында жүзеге аспайтындығы қорытынды нәтижеге алынды. Метастабильді гелий атомынан неон атомына қозудың берілуі және де ядролық бөлшектерден, екінші реттік дельта-электрондардан неонның тұрақтуу  $\text{Ne}(3p)$  толтырудың ең ықтимал арнасы болып табылады.

### Summary

Influence of deactivating additives on luminescent properties of mixes of helium and neon is investigated at pumping by  $\alpha$ -particles of  $^{210}\text{Po}$ . The conclusion is made, that populating of  $3p'[1/2]_0$ -level of NeI at excitation by a heavy particle occurs not in process of dissociative recombination of the molecular ions. The most probable channel of populating of  $\text{Ne}(3p)$  supposes transfer of excitation to atoms of neon from metastable atoms of helium and direct excitation of a neon by nuclear particles and secondary delta-electrons.

УДК 535.37:621.373.8

ТОО «Фотоника»

Поступила 24.09.09 г.