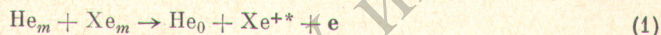


ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОНОВ Ar II, Kr II И Xe II МЕТАСТАБИЛЬНЫМИ АТОМАМИ He И Ne В ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

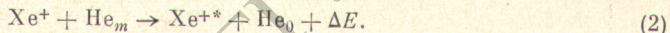
О. П. Бочкова, И. А. Зубкова и С. Э. Фриш

В послесвечении тлеющего разряда в смесях He—Ar, He—Kr, Ne—Kr, Ne—Xe исследовалось возбуждение ионов Ar II, Kr II, Xe II метастабильными атомами He (2^3S) и Ne (3^3P_0). Наблюдалось селективное заселение кватертных уровней ионов, расположенных на $0.3 \div 0.5$ эв ниже энергии возбуждения соответствующего метастабильного атома. Сечения реакции ион—метастабиль, по предварительным оценкам, $\sim 10^{-15}$ см.

В работах [1, 2] нами были рассмотрены два наиболее вероятных процесса, приводящих к образованию возбужденного иона Хе в послесвечении тлеющего разряда в смеси гелия с ксеноном: парные столкновения метастабильных атомов

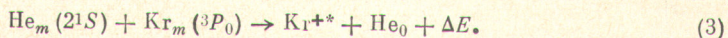


и ступенчатое возбуждение иона метастабильными атомами гелия



Было обнаружено, что в результате реакции (1) с большой эффективностью заселялись уровни Хе II, энергия возбуждения которых значительно меньше суммарной энергии возбуждения метастабильных состояний Хе и He, а реакция (2) заметного выхода не давала.

Настоящая работа преследовала цель выяснить эффективность процесса (2) в заселении возбужденных состояний иона. Для исследований были выбраны смеси He—Ar, He—Kr, Ne—Kr и Ne—Xe. Как видно из схемы относительного расположения уровней (рис. 1), в этих смесях энергетически невозможно протекание реакции (1) и, наоборот, в результате реакции (2) должна заселяться большая группа уровней ионов Ar⁺, Kr⁺ и Xe⁺. Исключение составляет смесь He—Kr, где заселение уровней Kr⁺ с энергией возбуждения < 17.14 эв возможно и за счет реакции



Вклад реакции (3) в заселение уровней $5p^4D_{5/2, 7/2}$ и $5p^4P_{3/2, 5/2}$ иона криптона можно оценить, пользуясь различием в свойствах 2^1S - и 2^3S -состояний гелия. Известно, что в результате столкновений с медленными электронами состояние 2^1S превращается в состояние 2^3S с сечением $\sim 2 \cdot 10^{-14}$ см² (5). Поэтому можно ожидать, что с увеличением концентрации электронов (ростом тока) заселенность состояния 2^1S уменьшится. Однако с ростом тока до 50 ма наблюдается линейный рост яркости линий 473.9, 476.6, 465.9 и 435.5 нм иона криптона.

Аналогичный результат был получен при добавлении в смесь He—Kr небольших количеств неона (до 5%). Добавление неона не изменило существенно наблюдаемое послесвечение линий, хотя сечение разрушения

состояния 2^1S гелия неонем в 17.5 раз больше сечения разрушения состояния 2^3S [4], и добавки неона в таких количествах в наших условиях должны были уменьшить время жизни метастабильных атомов гелия в состоянии 2^1S до нескольких микросекунд.

Необходимые для наблюдения реакции (2) однократные ионы Ar^+ , Kr^+ , Xe^+ в нормальном состоянии в послесвечении разряда в смесях этих газов с He и Ne образуются в результате двух процессов.

Таблица 1

Сталкивающиеся частицы	σ , 10^{15} см ²	Литература
He(2^1S)—Ar	1.6	[3]
He(2^3S)—Ar	0.5	[3]
He(2^1S)—Kr	2.8	[4]
He(2^3S)—Kr	0.77	[4]
He(2^1S)—Xe	3.6	[4]
He(2^3S)—Xe	0.98	—
Ne($3P^0$)—Ar	2.6	[5]
	3.2	[6]
Ne($^3O_0 2$)—Kr	1.4	[6]
Ne($^3P_0 2$)—Xe	1.1 ÷ 1.0	[6]

тах [1, 2]. Суммарное давление смеси в разрядной трубке 1—2 мм рт. ст., давление примеси 10^{-4} ÷ 10^{-3} мм рт. ст., сила тока 30 ма. В этих условиях разряда концентрации заряженных частиц не превышают 10^{10} ÷ 10^{11} см⁻³.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2, 3 и в табл. 2. Как и в смеси He—Xe наблюдалось длительное послесвечение линий ионов

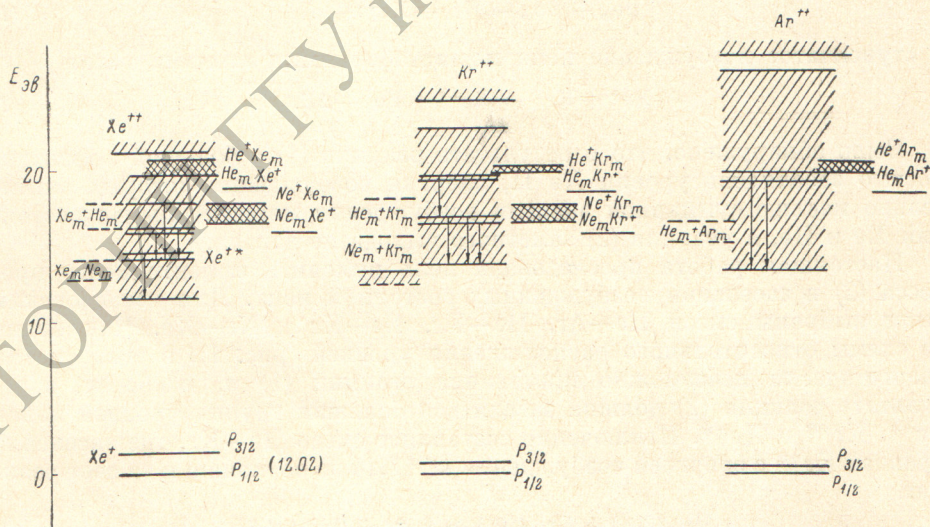


Рис. 1. Схема относительного расположения уровней энергии в спектрах Ar II, Kr II, Xe II.

(~100 ÷ 200 мксек.). Для сравнения в 4-м столбце табл. 2 приведены радиационные времена жизни некоторых линий ионов [8—10]. Характер послесвечения зависел от концентрации примеси, общего давления смеси и силы тока в разрядной трубке. При уменьшении концентрации примеси и общего давления смеси в излучении линий ионов наблюдается максимум через 50 ÷ 100 мксек. после обрыва разряда.

На рис. 3 приводятся относительные числа квант в разряде и через 50 мксек. после обрыва, определенные по наиболее ярким линиям ионов. В тех случаях, когда с уровня можно было наблюдать несколько линий,

Таблица 2

Переход	$E_{\nu}, \text{эВ}$	$\tau_p, \text{мсек.}$	$\bar{\nu}_{\text{отн.}}$	
He — Ar				
506.2	$4s^4P_{1/2} - 4p^4P_{3/2}^0$	19.26	—	0.75 ± 0.15
500.9	$4s^4P_{3/2} - 4p^4P_{5/2}^0$	19.22	—	0.6 ± 0.1
493.3	$4s^4P_{3/2} - 4p^4P_{3/2}^0$	19.26	—	0.6 ± 0.1
488.9	$4s^2P_{1/2} - 4p^2D_{1/2}^0$	19.80	—	—
487.9	$4s^2P_{3/2} - 4p^2D_{3/2}^0$	19.68	—	0.6 ± 0.1
484.8	$4s^4P_{3/2} - 4p^4P_{1/2}^0$	19.30	—	1
480.6	$4s^4P_{5/2} - 4p^4P_{5/2}^0$	19.22	—	1.5 ± 0.25
476.5	$4s^4P_{1/2} - 4p^2P_{3/2}^0$	19.87	—	—
473.5	$4s^4P_{5/2} - 4p^4P_{3/2}^0$	19.26	—	1.6 ± 0.1
472.7	$4s^2P_{2/2} - 4p^2D_{3/2}^0$	19.76	—	0.2
465.8	$4s^2P_{3/2} - 4p^2P_{1/2}^0$	19.80	—	0.1
454.5	$4s^2P_{3/2} - 4p^2P_{1/2}^0$	19.87	—	—
443.0	$4s^4P_{1/2} - 4p^4D_{3/2}^0$	19.61	—	0.2
442.6	$4s^4P_{3/2} - 4p^4D_{5/2}^0$	19.55	—	0.5 ± 0.2
438.9	$4s^4P_{1/2} - 4p^4D_{1/2}^0$	19.84	—	0.2
426.6	$4s^4P_{5/2} - 4p^4D_{5/2}^0$	19.55	—	0.1
He — Kr				
484.6	$5s^2P_{3/2} - 4p^2P_{1/2}^0$	17.25	—	—
476.6	$5s^4P_{3/2} - 5p^4D_{5/2}^0$	16.87	7.6	—
473.9	$5s^4P_{5/2} - 5p^4P_{5/2}^0$	16.60	—	—
469.4	$5p^4D_{7/2} - 6s^4P_{5/2}$	19.47	—	1.8 ± 0.3
465.9	$5s^4P_{5/2} - 5p^4P_{3/2}^0$	16.65	—	—
461.9	$5s^2P_{3/2} - 5p^2D_{5/2}^0$	17.37	8.9	—
458.3	$5p^4D_{5/2}^0 - 6s^4P_{3/2}$	19.57	—	0.2 ± 0.1
432.3	$5p^4P_{1/2}^0 - 6s^4P_{3/2}$	19.57	—	0.1 ± 0.03
443.6	$5s^4P_{1/2} - 5p^2P_{3/2}^0$	17.37	—	—
438.6	$5p^4P_{3/2}^0 - 6s^4P_{5/2}$	19.47	—	1
435.5	$5s^4P_{5/2} - 5p^4D_{7/2}^0$	16.83	8.7	—
He — Xe				
431.8	$5p^4P_{5/2}^0 - 6s^4P_{5/2}$	19.47	—	1.2 ± 0.5
429.3	$5s^4P_{3/2} - 5p^4D_{3/2}^0$	17.16	7.7	—
Ne — Xe				
541.9	$6s^4P_{3/2} - 6p^4D_{5/2}$	14.07	11 ± 5	—
531.3	$6p^4D_{1/2}^0 - 7s^4P_{5/2}$	16.43	—	1
529.2	$6s^4P_{5/2} - 6p^4P_{5/2}^0$	13.89	13 ± 6	—
508.0	$6p^4D_{5/2} - 7s^4P_{3/2}$	16.51	—	0.5 ± 0.1
487.6	$5d^2D_{5/2} - 6p'^2F_{7/2}$	16.12	—	0.7 ± 0.1
486.2	$6p^4P_{5/2} - 7s^4P_{5/2}$	16.43	—	0.9 ± 0.1
484.4	$6s^4P_{3/2} - 6s^4D_{7/2}^0$	14.10	—	—

Таблица 2 (продолжение)

Переход	E_{ν} , эв	τ_p , мсек.	$Q_{отн.}$
Ne — Kr			
476.6	$5s^4P_{3/2} - 5p^4D_{5/2}^0$	16.87	—
473.9	$5s^4P_{5/2} - 5p^4D_{3/2}^0$	16.60	—
465.9	$5s^4P_{3/2} - 5p^4P_{3/2}^0$	16.65	—
435.5	$5s^4P_{3/2} - 5p^4D_{1/2}^0$	16.83	—

число квант суммировалось. По оси абсцисс отложена энергия возбуждения в электрон-вольтах, отсчитанная от нормального состояния соответ-

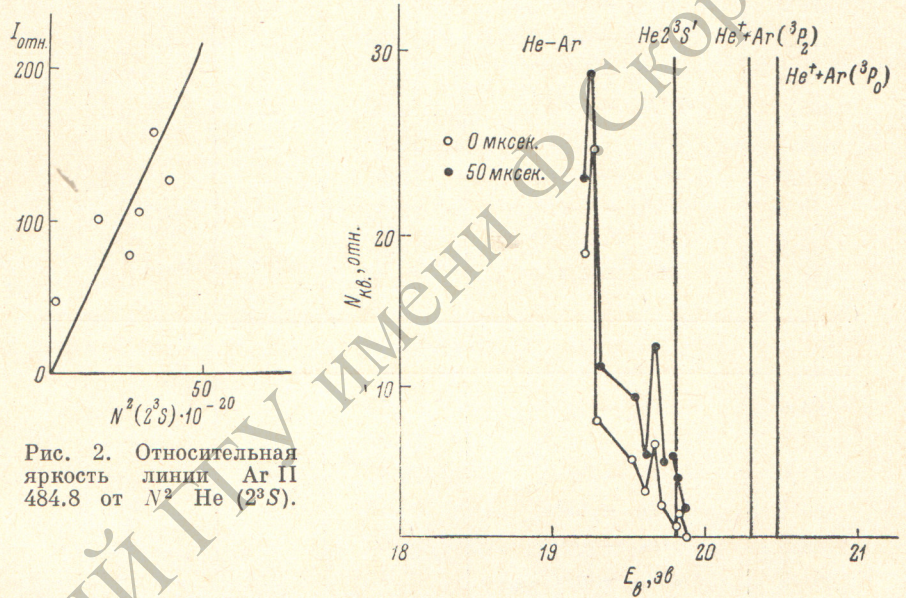


Рис. 2. Относительная яркость линий Ag II 484.8 от N^2 He (2^3S).

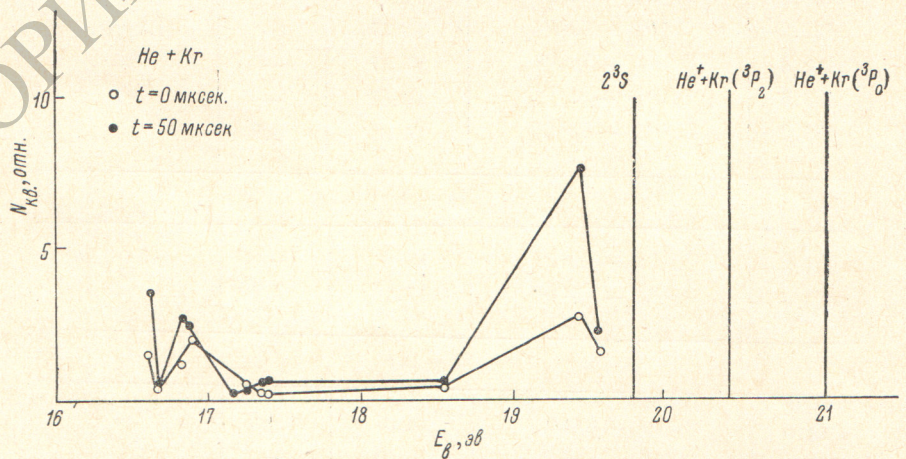


Рис. 3. Относительное число квант для уровней с разной энергией возбуждения. а — He—Ar; б — He—Kr; в — He—Xe; г — He—Kr; д — He—Xe.

ствующего иона. Как видно из рис. 3, в смесях с гелием наиболее эффективно заселяются уровни ионов, расположенные вблизи метастабильного уровня гелия 2^3S , в смесях с Ne — вблизи метастабильных уровней

$2p^5 3s^3 P_2, ^3P_0$, причем максимально заселяются уровни, энергия возбуждения которых на $0.2 \div 0.5$ эв ниже метастабильного уровня. (На рис. 3 энергии соответствующих метастабильных уровней отмечены вертикальными отрезками). В смеси He—Kr заселение уровней Kr⁺⁺ с энергиями возбу-

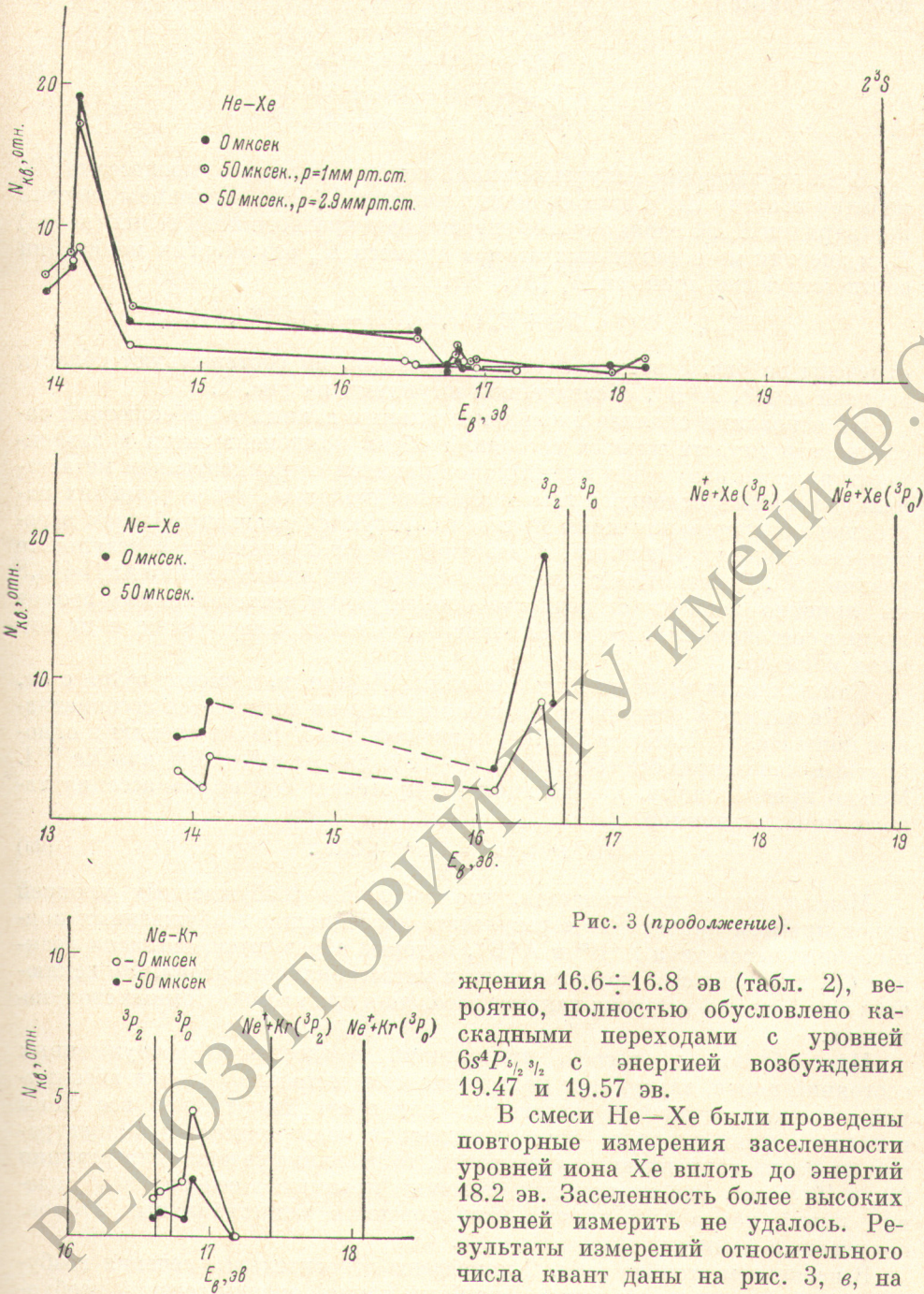
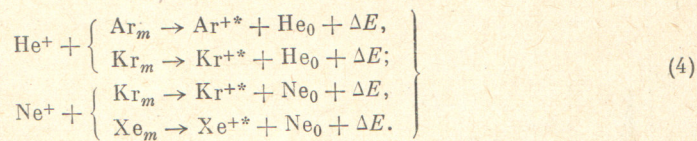


Рис. 3 (продолжение).

ждения $16.6 \div 16.8$ эв (табл. 2), вероятно, полностью обусловлено каскадными переходами с уровней $6s^4 P_{3/2} ^3P_2$ с энергией возбуждения 19.47 и 19.57 эв.

В смеси He—Kr были проведены повторные измерения заселенности уровней иона Kr вплоть до энергий 18.2 эв. Заселенность более высоких уровней измерить не удалось. Результаты измерений относительного числа квант даны на рис. 3, в, на этом же рисунке сопоставляются данные, полученные нами ранее [1] при $p=2.96$ мм рт. ст. и $p_{He}=3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Как видно из рис. 3, в, каскад сверху не обеспечивает заселенности уровней He⁺⁺ с энергией возбуждения $14.07, 14.10, 14.48$ эв и их заселение идет по другому каналу. Возможно, за счет парных столкновений метастабильных атомов, как и предполагалось ранее.

Кроме ступенчатого возбуждения иона метастабильными атомами гелия и неона (реакция 2), в смесях He—Ar, He—Kr, Ne—Kr, Ne—Xe образование возбужденных ионов энергетически возможно также в результате перерезонансной перезарядки ионов He⁺ и Ne⁺ на метастабильных атомах примеси



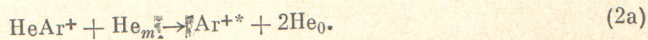
Если наблюдаемое излучение линий ионов обусловлено процессами (4), избыток энергии ΔE в этих реакциях порядка 1–2 эв. Величины энергий перезарядки $E_{\text{пер.}}$, равные сумме энергий однократного иона гелия (неона) E_i и энергии метастабильных атомов примеси E_m без энергии ионизации соответствующей примеси E'_i (Ar, Kr, Xe)

$$E_{\text{пер.}} = E_i(\text{He}, \text{Ne}) + E_m(\text{Ar}, \text{Kr}, \text{Xe}) - E'_i(\text{Ar}, \text{Kr}, \text{Xe}),$$

отмечены на рис. 3 вертикальными отрезками, им соответствуют области энергий A^+B^* , A^*B^+ , обозначенной штрихами на рис. 1.

На основании анализа экспериментальных данных по абсолютной заселенности метастабильных состояний обеих компонент смеси и зависимости яркости излучения линий ионов примеси от концентрации метастабильных атомов основного газа можно предполагать, что в условиях настоящего эксперимента ионы примеси образуются главным образом в результате реакции Пеннинга, а возбуждение их происходит в результате реакции (2). Действительно, из рис. 2 видно, что яркость линии Ar II 484.8 нм линейно зависит от квадрата концентрации метастабильных атомов гелия в состоянии 2^2S . Подобная зависимость наблюдалась также и на линиях иона Kr.

Как показали исследования ионизации Пеннинга, в смесях гелия с Ar, Kr и Xe наряду с однократными ионами примеси образуются ассоциативные ионы HeAr⁺, HeKr⁺ и HeXe⁺, причем их выход по отношению к однократным ионам примеси составляет 15–20% для Ar и Kr и 6% для Xe [11]. Можно предположить, что реакция (2) протекает с участием ассоциативного иона, например,



Можно также предполагать, что заселение возбужденных уровней ионов примеси происходит в результате диссоциации возбужденных ионных комплексов типа A^+B^* и A^*B^+ , которые образуются, согласно реакции (2), в момент столкновения иона и метастабильного атома. Не исключена возможность и других каналов заселения при атомно-атомных столкновениях.

Многообразие процессов, приводящих к заселению возбужденных состояний ионов, затрудняет проведение количественной оценки абсолютной величины сечений. В частности, если предположить, что все ионы в послесвечении разряда — это однократные ионы примеси и концентрация их равна концентрации электронов, то величина сечения для реакции (2) $\geq 10^{-15}$ см². Это на порядок величины превышает сечения возбуждения линий ионов при парных столкновениях метастабильных атомов, полученные нами для смеси He—Xe.

В последнем столбце табл. 2 приведены относительные сечения возбуждения для ряда линий ионов. Для более точной оценки сечений необходим детальный анализ состава заряженных частиц в послесвечении разряда.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю. А. Толмачеву и В. С. Егорову за неоднократные обсуждения результатов эксперимента, а также А. С. Павлову за помощь в создании экспериментальной установки.

Литература

- [1] О. П. Бочкова, Ю. А. Толмачев. *Опт. и спектр.*, 33, 183, 1972.
[2] О. П. Бочкова, Ю. А. Толмачев. *Опт. и спектр.*, 32, 827, 1972.
[3] A. Venton and al. *Phys. Rev.*, 128, 206, 1962.
[4] A. L. Schmeltekopf, F. C. Fensfeld. *J. Chem. Phys.*, 53, 8, 3173, 1970.
[5] A. V. Phelps. *Phys. Rev.*, 93, 1307, 1955.
[6] M. Biondi. *Phys. Rev.*, 82, 543, 1951, 88, 660, 1952.
[7] О. П. Бочкова. *Вестн. ЛГУ*, 16, 1968.
[8] U. Fink, S. Bashkin, W. S. Bikel. *J. Quant. Spectr. Rad. Transf.*, 10, 1241, 1971.
[9] L. Allen, D. G. Jons, D. G. Shopfield. *JOSA*, 59, 842, 1969.
[10] Я. Ф. Веролайнен, А. Л. Ошерович. *Опт. и спектр.*, 27, 31, 1969.
[11] Н. Нотор, А. Нихаус. *VI Intern. Conf. on Phys. Electr. and Atom. Collision.* Massachusetts Inst. of Technol., USA, стр. 878, 1969.

Поступило в Редакцию 21 июня 1972 г.