

Измерение констант скорости энергообменных процессов в плазме импульсно-периодического разряда в смеси Ar/He при накачке перехода $1s_5 \rightarrow 2p_7$

Р.А. Курамшин^{1, 2}, А.П. Торбин^{1, 2}

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

² Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Самара, Россия

Обоснование. Лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой (ЛОНИГ) представляет собой перспективную лазерную систему, которая превращает излучение лазерных диодов в мощное излучение высокого качества [1–3]. ЛОНИГ работает по трехуровневой схеме: в плазме тлеющего разряда в смеси Ar/He нарабатываются метастабильные атомы $Ar(1s_5)$; оптическая накачка соответствует переходу $1s_5 \rightarrow 2p_9$; за счет процесса $Ar(2p_9)+He$ заселяется верхний излучательный уровень $2p_{10}$; лазерная генерация осуществляется на переходе $2p_{10} \rightarrow 1s_5$ [4, 5]. Включение уровней $2p_7$ и $2p_6$ в тему нашего исследования объясняется тем, что в настоящее время предлагаются системы ЛОНИГ с двойной накачкой, в которых за счет накачки перехода $1s_4 \rightarrow 2p_8(2p_7)$ решается проблема накопления в активной среде долгоживущего состояния $1s_4$ [6, 7].

Цель — определить значения констант скорости энергообменных процессов, происходящих в плазме Ar/He импульсно-периодического разряда, которые необходимы для развития лазера на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой.

Методы. Для моделирования кинетики энергообменных процессов в плазме Ar/He использовался программный пакет COMSOL Multiphysics, где были записаны уравнения баланса для уровней метастабильного аргона $1s_5 - 2p_6$.

В экспериментах для наработки высоких концентраций Ar^* использовался импульсно-периодический разряд, зажигаемый между парой титановых электродов, размещенных внутри 3-осевого креста из нержавеющей стали. Кинетика Ar^* в смеси Ar/He исследовалась методом лазерно-индуцированной флуоресценции.

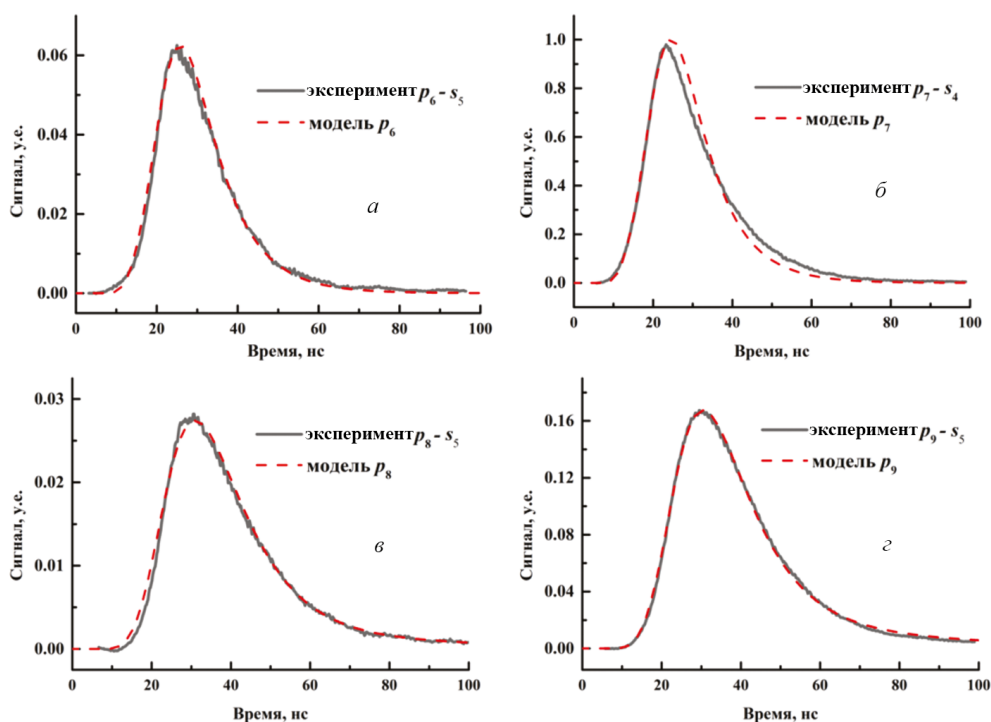


Рис. 1. Сигналы, полученные при накачке $Ar\ 1s_5 \rightarrow 2p_7$ на длине волны 772,4 нм, давлении в камере $P = 350$ Торр и температуре газа в зоне разряда $T = 420$ К (сплошные линии — эксперимент, пунктирные — модель)

Для возбуждения уровней $\text{Ar}(2p_7)$ использовался перестраиваемый Ti-Sa лазер. Регистрация сигналов проводилась одновременно по трем каналам с помощью скоростных ФЭУ. Особенностью проведенного эксперимента является прямое измерение температуры газа в плазме разряда методом перестраиваемой диодно-лазерной абсорбционной спектроскопии по уширению линии поглощения аргона на переходе $1s_5 \rightarrow 2p_{10}$.

Результаты. На рис. 1, а–г сплошными линиями показаны типичные сигналы с трех каналов, настроенных на переходы $2p_6 \rightarrow 1s_5$ (а), $2p_7 \rightarrow 1s_4$ (б), $2p_8 \rightarrow 1s_5$ (в) и $2p_9 \rightarrow 1s_5$ (г) при накачке $1s_5 \rightarrow 2p_7$ на длине волны 772,4 нм, давлении в камере $P = 350$ Торр и температуре газа в зоне разряда $T = 420$ К. Регистрация сигналов с уровней $2p_7$ и $2p_9$ проводилась через один канал путем перестройки положения монохроматора с малым временным интервалом. Результаты моделирования представлены на рис. 1, а–г пунктирными линиями. Лучшее согласие модели со всеми 4 экспериментальными сигналами было достигнуто при следующих подобранных значениях суммарных констант скорости столкновительной релаксации между p уровнями:

$$\text{Ar}(2p_6) + \text{He} \rightarrow \text{Ar}(2p_{7,8,9,10}) + \text{He} \quad 1 \times 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

$$\text{Ar}(2p_7) + \text{He} \rightarrow \text{Ar}(2p_{8,9}) + \text{He} \quad 8 \times 10^{-12} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

$$\text{Ar}(2p_8) + \text{He} \rightarrow \text{Ar}(2p_{9,10}) + \text{He} \quad 1,5 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1},$$

$$\text{Ar}(2p_9) + \text{He} \rightarrow \text{Ar}(2p_{10}) + \text{He} \quad 1,5 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Заметно расхождение расчетов с экспериментом для перехода $2p_7 \rightarrow 1s_4$ (рис. 1, б), которое средствами модели устранить не удалось. Данное расхождение может быть объяснено неточностью в определении формы и энергии импульса накачки $1s_5 \rightarrow 2p_7$, задающего начальное распределение концентрации $[\text{Ar}(2p_7)]$.

Выводы. В работе была создана экспериментальная установка, позволяющая одновременно регистрировать излучения от нескольких переходов метастабильных атомов аргона, генерируемых в ИПР, при прямом измерении температуры газа. В результате сравнения сигналов с моделью получены значения констант скорости процессов тушения состояний аргона $2p_6$, $2p_7$, $2p_8$ и $2p_9$ в столкновениях с He. Ранее подобные измерения проводились без контроля температуры газа.

Ключевые слова: лазер на метастабильных атомах инертных газов с оптической накачкой; импульсно-периодический разряд; метастабильный атом; кинетическая модель; плазма.

Список литературы

1. Han J., Heaven M.C. Gain and lasing of optically pumped metastable rare gas atoms // Opt. Lett. 2012. Vol. 37, No. 11. P. 2157–2159. DOI: 10.1364/OL.37.002157
2. Sanderson C.R., Ballmann C.W., Han J., et al. Demonstration of a quasi-CW diode-pumped metastable xenon laser // Optics Express. 2019. Vol. 27, No. 24. P. 36011–36021. DOI: 10.1364/OE.27.036011
3. Sun P., Zuo D., Mikheyev P.A., Han J., Heaven M.C. Time-dependent simulations of a CW pumped, pulsed DC discharge Ar metastable laser system // Optics express. 2019. Vol. 27, No. 16. P. 22289–22301. DOI: 10.1364/OE.27.022289
4. Han J., Heaven M.C. Kinetics of optically pumped Ar metastables // Opt. Lett. 2014. Vol. 39, No. 22. P. 6541–6544. DOI: 10.1364/OL.39.006541
5. Mikheyev P.A., Han J., Clark A., et al. Production of Ar and Xe metastables in rare gas mixtures in a dielectric barrier discharge // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. Vol. 50, No. 48. P. 485203. DOI: 10.1088/1361-6463/aa91bf
6. Sun P., Zuo D., Wang X., et al. Investigation of dual-wavelength pump schemes for optically pumped rare gas lasers // Optics Express. 2020. Vol. 28, No. 10. P. 14580–14589. DOI: 10.1364/OE.392810
7. Gao J., Sun P., Wang X., Zuo D. Modeling of a dual-wavelength pumped metastable argon laser // Laser Physics Letters. 2017. Vol. 14, No. 3. P. 035001. DOI: 10.1088/1612-202X/aa5b10

Сведения об авторах:

Руслан Айратович Курамшин — студент, группа 4402-030302D, физический факультет; Самарский национальный исследовательский университет, Самара, Россия. E-mail: kuramshinr2001@gmail.com

Алексей Петрович Торбин — научный руководитель, кандидат физико-математических наук; Самарский национальный исследовательский университет, Самара, Россия. E-mail: torbin.ap@yandex.ru