

И.С. Бычек, А.В. Луговской, А.М. Янчарина

Механизм возбуждения спектральных линий гелия $\lambda = 706,5$ и $587,6$ нм в пучковой плазме

Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова, г. Томск

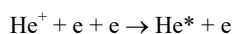
Поступила в редакцию 11.11.99 г.

В He–H₂-плазме, возбуждаемой пучком низкоэнергетичных ($2 \div 10$ кэВ) электронов, определен диапазон условий для формирования инверсной населенности на переходах атома гелия $\lambda = 706,5$ нм ($3^3 S-2^3 P$) и $\lambda = 587,6$ нм ($3^3 D-2^3 P$).

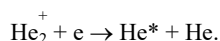
При возбуждении He–H₂-смеси пучком низкоэнергетичных ($2 \div 6$ кэВ) электронов ранее в [1] была получена генерация на двух новых линиях атома гелия в видимой области спектра на $\lambda = 728,1$ ($3^1 S-2^1 P$) и $667,8$ нм ($3^1 D-2^1 P$), а также на $\lambda = 706,5$ нм ($3^3 S-2^3 P$), наблюдавшейся ранее при различных способах накачки [3, 4]. В условиях пучковой плазмы возможно получение усиления и генерации еще на ряде переходов гелия, в частности на $\lambda = 492,2$; $447,1$ и $587,6$ нм. Последняя самая интенсивная линия в видимой области спектра представляет наибольший интерес.

Условия формирования инверсной населенности уровней $3^3 D-2^3 P$ ($\lambda = 587,6$ нм) в He–H₂-смеси аналогичны переходу $3^3 S-2^3 P$ ($\lambda = 706,5$ нм) и осуществляются пучковой накачкой. Детальный анализ роли кинетических процессов в заселении рабочих уровней $3^3 S$ и $2^3 P$ в He–H₂-смеси с учетом констант скоростей плазмохимических реакций [2] показывает, что определяющими в девозбуждении нижнего $2^3 P$ -уровня являются спонтанное излучение и реакция Пеннинга с молекулой водорода. На импульсе накачки существенна роль прямого электронного возбуждения. Характер заселения верхнего уровня $3^3 S$ задает блок уровней с $n = 3$, который эффективно заселяется за счет процессов рекомбинации при возбуждении пучком, а затем столкновениями с плазменными электронами девозбуждается на самый нижний уровень $3^3 S$.

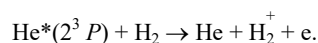
Пучок электронов, проникающий в газ, основную часть энергии отдает на ионизацию среды. Таким образом, после импульса тока заселение уровней атома гелия происходит за счет актов тройной



и диссоциативной рекомбинации



Девозбуждение нижнего уровня перехода осуществляется в реакции Пеннинга с молекулой водорода:



Аналогичный механизм заселения уровней осуществляется на переходе $3^3 D-2^3 P$. Однако образованию значительной инверсии на этом переходе препятствуют мультиплетное расщепление верхнего уровня, а также его столкновительное девозбуждение при высоких давлениях газа. Нами проведен поиск условий, оптимальных для формирования инверсной населенности на переходе с $\lambda = 587,6$ нм гелия.

Возбуждение плазмы осуществлялось низкоэнергетичным пучком электронов, сформированным в разряде с сетчатым анодом [1]. Давление рабочей смеси варьировалось в диапазоне $P = 5 \div 20$ торр, импульс тока длительностью на полувывсоте $\tau_{0,5} = 0,5 \div 1$ мкс формировался в разрядном промежутке с напряжением $U = 2 \div 6$ кВ и плотностью тока пучка $j \sim 5$ А/см².

Излучение He–H₂-плазмы с помощью линзы фокусировалось на щель спектрального аппарата МДР-3, который позволял исследовать спектр плазмы в широком диапазоне. Выбор конкретных спектральных линий осуществлялся поворотом дифракционной решетки. Регистрация временного хода спектральных линий проводилась с помощью фотоэлектронного умножителя ФЭУ-100 и двухлучевого осциллографа С-74. Это позволяло исследовать во времени одновременно излучение спектральной линии и развертку импульса тока.

Исследованы амплитудно-временные характеристики излучения линий гелия на $\lambda = 706,5$ и $587,6$ нм в широком диапазоне условий возбуждения при вариации давления гелия и состава He–H₂-смеси. Уровень $2^3 P$ является общим нижним рабочим уровнем для обеих линий. Об эффективности его девозбуждения водородом свидетельствует легко достигаемый режим усиления и генерации на переходе $\lambda = 706,5$ нм. Для линии $\lambda = 587,6$ нм необходимо обеспечить условия более интенсивной накачки верхнего рабочего уровня $3^3 D$ либо девозбуждения нижнего уровня $2^3 P$ за счет подбора новых газовых смесей на основе H₂.

На рис. 1 представлена временная зависимость интенсивностей атомных ($\lambda = 587,6$ и $706,5$ нм) и ионной ($\lambda = 468,1$) линий гелия. Импульс тока (рис. 1, а) имеет пиковую форму. Ионная линия (рис. 1, б) фактически повторяет ход импульса тока, но на спаде интенсивности преобладают рекомбинационные процессы. Об этом

свидетельствует длительное послесвечение линии. Максимумы атомных линий излучения (рис. 1, а) наблюдаются после импульса накачки и характеризуются более длительным рекомбинационным излучением. Следовательно, ссылаясь на временной ход интенсивностей линий, можно говорить об эффективном рекомбинационном заселении уровней на переходах λ 706,5 и λ 587,6 нм атома гелия.

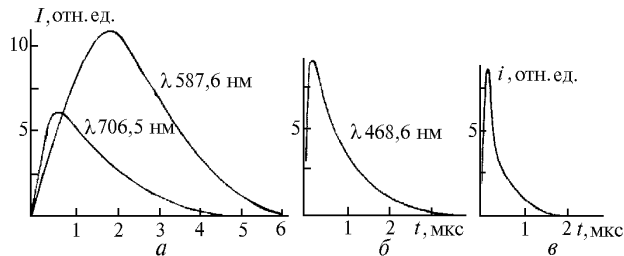


Рис.1. Временные зависимости атомных линий гелия (а), излучения ионной линии (б) и импульса тока (в)

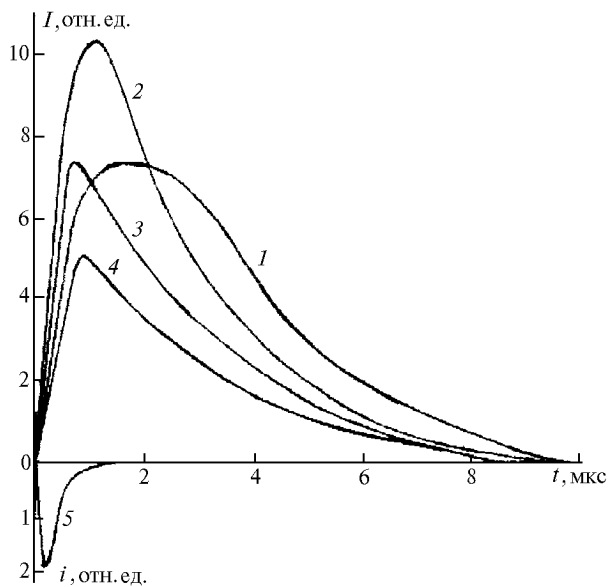


Рис. 2. Зависимость интенсивности линии атома гелия на $\lambda = 587,6$ нм от давления водорода в смеси He-H₂. $P_{\text{He}} = 11,5$ торр; $P_{\text{H}_2} = 0$ (1); 1 (2); 6 (3) и 10 торр (4); 5 – импульс тока

Поиск условий для формирования инверсии на переходе λ 587,6 нм атома гелия проведен по временной зависимости спонтанного излучения от концентрации пеннинговской примеси (рис. 2). Оптимальные по инверсии условия достигаются к началу резкого спада интенсивности линии, что качественно характеризует девозбуждение примесью не только нижнего, но и верхнего уровня перехода. При этом условия инверсии сохраняются, когда интенсивность линии падает примерно в два раза.

В условиях пучковой накачки заселение уровней He 3^3S и 3^3D происходит за счет процессов тройной и диссоциативной рекомбинации. Их эффективность определяется наиболее важными характеристиками плазмы – концентрацией и температурой электронов. Вариации этих параметров в широком диапазоне ($N_e = 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0,2 \div 0,5$ эВ) осуществляются изменением состава He-H₂-смеси и тока накачки. Экспериментально исследована динамика населенности уровня 3^3D в зависимости от концентрации примеси водорода (рис. 3). Установлено, что максимальная величина инверсии на переходе атома гелия ($\lambda = 587,6$ нм) достигается при использовании пеннинговской примеси в диапазоне $P_{\text{H}_2} = 6 \div 10$ торр и давлении гелия $10 \div 20$ торр, что существенно отличается от оптимальных параметров, полученных в [1] для $\lambda = 706,5$ нм атома гелия.

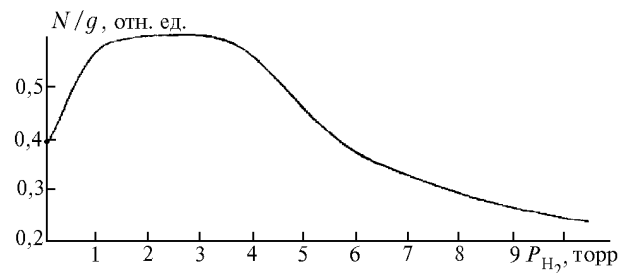


Рис. 3. Зависимость населенности уровня 3^3D на $\lambda = 587,6$ нм от концентрации водорода $P_{\text{H}_2} = 11,5$ торр

1. Бердников А.А., Держиев В.И., Муравьев И.И., Яковленко С.И., Янчарина А.М. // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 11. С. 2179–2199.
2. Демкин В.П., Держиев В.И., Жидков А.Г. и др. Кинетика рекомбинационно-неравновесной He-H₂-плазмы в разряде пучкового типа // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. Вып. 12. С. 1217–1219.
3. Pixton R., Fowles G. // Phys. Lett. 1969. V. 29A. № 11. P. 654–655.
4. Schmieder D., Salomon T. // Opt. Comm. 1985. V. 55. № 1. P. 49–54.

I.S. Bychek, A.V. Lugovskoi, A.M. Yancharina. Mechanism of helium spectral lines ($\lambda = 706.5$ and 587.6 nm) excitation in beam plasma.

A range of conditions for formation of inverse population on the helium atom transitions at $\lambda = 706.5$ nm (3^3S-2^3P) and $\lambda = 587.6$ nm (3^3D-2^3P) has been determined for He-H₂ plasma excited by a beam of low-energy (2–10 keV) electrons.