

- [1] А. И. Китайгородский. Молекулярные кристаллы. Изд. «Наука», М., 1971.  
 [2] Г. В. Климушева, Р. В. Яремко. Опт. и спектр., 31, 243, 1971; 32, 616, 1972.  
 [3] А. И. Бутакова. Дипломная работа, КГУ. Красноярск, 1972.  
 [4] Y. Toyozawa. Progr. Theor. Phys., 20, 53, 1958.  
 [5] E. E. Whiting. JQSRT, 8, 1379, 1968.  
 [6] H. Sumi, Y. Toyozawa, J. Phys. Soc. Japan, 31, 342, 1971; H. Sumi, J. Phys. Soc. Japan, 32, 616, 1972.

Поступило в Редакцию 3 июля 1973 г.

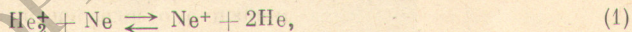
УДК 537.525

## НАБЛЮДЕНИЕ ДИССОЦИАТИВНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ИОНА ГЕЛИЯ В РАННЕМ ПОСЛЕСВЕЧЕНИИ РАЗРЯДА

В. С. Егоров, А. А. Пастор, В. В. Самохвалов и А. А. Соловьев

Электрический разряд в гелии при средних давлениях (несколько мм рт. ст. и выше) приводит к возникновению положительно заряженных частиц различного сорта ( $\text{He}^+$ ,  $\text{He}_2^+$  и т. д.). В момент окончания разряда может происходить электрон-ионная рекомбинация этих частиц в объеме плазмы, сопровождающаяся, вообще говоря, испусканием атомарного линейчатого спектра гелия, возникает рекомбинационное послесвечение. Представляет интерес выяснить, какие линии атомарного спектра в послесвечении гелия соответствуют процессу объемной рекомбинации молекулярного иона  $\text{He}^+$ . Этот интерес тем более оправдан, что в настоящее время нет единого мнения даже по вопросу о том, в каких условиях можно обнаружить диссоциативную рекомбинацию этой частицы (см., например, [1]).

Поставленную задачу можно решить, если, с одной стороны, селективным образом изменить величину концентраций различных заряженных частиц гелия в плазме газового разряда, следить при этом за относительным изменением величины этих концентраций, а, с другой стороны, одновременно регистрировать изменение характера рекомбинационного послесвечения спектральных линий атома гелия. Заметим, что именно такого рода методика была применена нами ранее для получения сведений о диссоциативной рекомбинации молекулярного иона неона  $\text{Ne}_2^+$  [2]. В качестве метода селективного воздействия на концентрацию  $\text{He}_2^+$  в разряде мы воспользовались ионно-молекулярной реакцией последнего с неоном



идущей с большой эффективностью при тепловых энергиях сталкивающихся частиц (константа скорости реакции  $1.5 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек.}^{-1}$  [3]). В то же время при таких энергиях относительного движения атомарный ион гелия  $\text{He}^+$  с неоном практически не взаимодействует.

В наших экспериментах производилось сравнение послесвечения разряда в чистом гелии с послесвечением разряда в смеси гелий—неон. При этом, чтобы существенно не изменять условия возбуждения гелия в смеси по сравнению со случаем чистого газа, количество неона в смеси составляло менее 1% от количества гелия (парциальное давление последнего в смеси составляло  $3 \div 4$  мм рт. ст.). Цилиндрическая разрядная трубка имела в длину 20 см и внутренний диаметр 2 см. Разряд в газе возбуждался от специального импульсного генератора. Во время разряда через газ проходил импульс тока амплитудой  $15 \div 20$  а и длительностью 5 мксек. Регистрация свечения разряда происходила по стандартной схеме подобного рода измерений, включавшей в себя монохроматор с дифракционной решеткой, фотоумножитель и импульсный двухлучевой осциллограф С1-7.

Наблюдения за изменениями относительной величины концентраций атомарных и молекулярных ионов гелия в разряде при добавлении малых количеств неона производились с помощью установки для диагностики плазмы по массам заряженных частиц, использующей квадрупольный масс-спектрометр. Ионы вытягивались из прианодных частей разряда, условия возбуждения газа в которых близки к условиям возбуждения газа в положительном столбе. Регистрируемые масс-спектры являлись усредненными по времени, в течение которого длился разряд и ранняя стадия распада плазмы. Подробное описание использованной нами масс-спектрометрической установки дано в работе [4]. Проведенные эксперименты определенно указывают на существование корре-



ляции между рекомбинацией молекулярного иона  $\text{He}_2^+$  и послесвечением некоторых атомарных линий гелия на ранних стадиях распада плазмы разряда. Так, например, на рис. 1, а представлена осциллограмма свечения линии 587.6 нм (переход  $3^3D-2^3P$ )

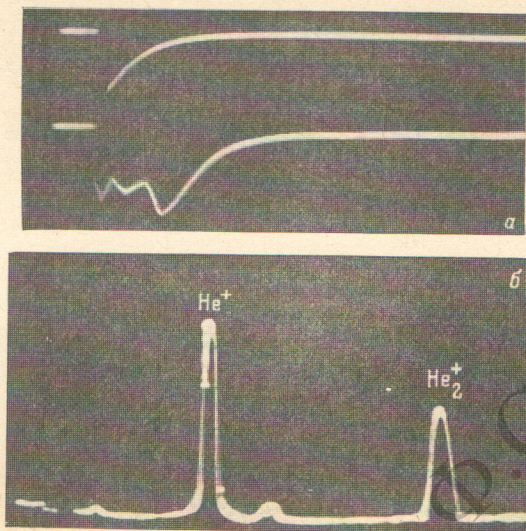


Рис. 1.

а — временной ход свечения линии 587,6 нм при разряде в чистом гелии ( $p_{\text{He}}=3.5$  мм рт. ст., амплитуда импульса тока  $I=20$  А, длительность импульса тока  $\tau_m=5$  мксек.). Верхний луч осциллографа регистрирует сигнал, пропорциональный силе тока через исследуемый разрядный промежуток, нижний луч записывает световой сигнал. б — масс-спектр разряда. Видны пики ионных токов  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}_3^+$ ,  $\text{He}^+$ ,  $\text{HeH}^+$  и  $\text{He}_2^+$ .

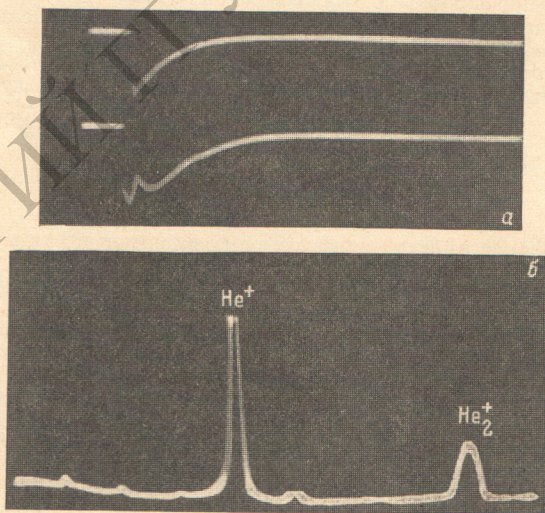


Рис. 2.

а — временной ход свечения линии 587,6 нм при разряде в смеси гелий-неон ( $p_{\text{He}}=3.5$  мм рт. ст.,  $p_{\text{Ne}}=0.3$  мм рт. ст., амплитуда импульса тока и длительность его те же, что для случая рис. 1). б — масс-спектр разряда.

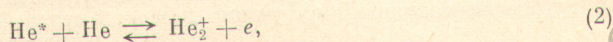
при разряде в чистом гелии. Виден отчетливо выраженный «выброс» осциллограммы, соответствующий по времени заднему фронту исследуемого импульса тока и характерный для процесса послесвечения. Рядом с осциллограммой, изображающей временной ход интенсивности линии 587.6 нм, приведен масс-спектр разряда в этих условиях (рис. 1, б). На нем хорошо видны пики ионных токов  $\text{He}^+$  и  $\text{He}_2^+$ .



Малая добавка неона к гелию приводила к уменьшению концентрации молекулярного иона  $\text{He}_2^+$  в разряде по сравнению с концентрацией атомарного иона  $\text{He}^+$  (см. масс-спектр на рис. 2, б). Одновременно с таким уменьшением концентрации молекулярного иона  $\text{He}_2^+$  в разряде происходило и уменьшение интенсивности послесвечения линии 587.6 нм (рис. 2, а). Интересно отметить, что ранее какая бы то ни было связь послесвечения линии 587.6 нм с рекомбинацией молекулярного иона  $\text{He}_2^+$  отвергалась [5, 6].

Описанная корреляция количества молекулярных ионов гелия в разряде и интенсивности послесвечения спектральных линий в первый момент после окончания разряда была зафиксирована также по отношению к спектральным переходам  $3^3S-2^3P$  ( $\lambda=706.5$  нм) и  $2^3P-2^3S$  ( $\lambda=1083.0$  нм). В этом случае полученные нами результаты согласуются с выводами работ [7, 8].

При интерпретации экспериментальных данных, относящихся к послесвечению спектральных линий атома гелия, исходные энергетические состояния которых имеют главное квантовое число  $n=3$ , нужно иметь в виду следующее. Молекулярные ионы гелия  $\text{He}_2^+$  образуются при кратковременном разряде через газ в основном по реакции Хорнбека—Молнара



где  $\text{He}^+$  — возбужденный атом гелия, чье главное квантовое число  $n \geq 3$ . При таком процессе возникающие в разряде молекулярные ионы находятся в возбужденном колебательном состоянии. До тех пор, пока колебательное возбуждение  $\text{He}_2^+$  сохраняется, диссоциативная рекомбинация этого иона может происходить. Ведь только для колебательно возбужденного  $\text{He}_2^+$  существует подходящее пересечение потенциальных кривых устойчивого молекулярного иона и неустойчивой нейтральной молекулы [9]. При релаксации молекулярного иона  $\text{He}_2^+$  в основное колебательное состояние процесс диссоциативной рекомбинации становится маловероятным из-за отсутствия упомянутого пересечения потенциальных кривых. Если принять во внимание предложенный в [10] эффективный механизм релаксации молекулярного иона до колебательным состояниям при столкновениях последнего с медленными электронами, то диссоциативную рекомбинацию  $\text{He}_2^+$  и, следовательно, процесс заселения состояний атома гелия с главным квантовым числом  $n=3$  действительно можно наблюдать скорее всего на ранних стадиях распада плазмы разряда, когда температура электронного газа еще достаточно велика. На более поздних стадиях распада плазмы, характеризующихся низкой температурой электронного газа ( $< 2000^\circ \text{K}$ ), молекулярные ионы гелия должны находиться главным образом в основном колебательном состоянии. Существующее на этих стадиях деионизации разрядного промежутка послесвечение атомарных линий гелия определяется ударно-радиационной рекомбинацией атомарного иона  $\text{He}^+$ .

Как уже говорилось выше, послесвечение линии гелия с длиной волны  $\lambda=1083.0$  нм обнаруживает корреляцию с присутствием в разряде больших количеств молекулярного иона  $\text{He}_2^+$ . Следует заметить, что это послесвечение может быть вызвано и прямым процессом диссоциативной рекомбинации упомянутой частицы [8]. Из изложенного следует, что в [11] также наблюдался процесс диссоциативной рекомбинации  $\text{He}_2^+$ .

### Литература

- [1] M. Biondi, A. Bardsley. *Advances in Atomic and Molecular Physics*, vol. 6, 1970.
- [2] В. С. Егоров, А. А. Полтор. Тез. V Всесоюз. конф. по электронным и атомным столкновениям, Ужгород, 1972.
- [3] M. L. Pahl, *Ergeb. Exakt. Naturwiss.*, 34, 185, 1961.
- [4] В. С. Егоров, А. А. Полтор, Г. А. Плекоткин. *Вестн. ЛГУ*, 16, 324, 1972.
- [5] R. I. Gerber, G. T. Sauter, H. I. Oskam. *Physica*, 32, 1924, 1966.
- [6] E. E. Ferguson, F. C. Fehsenfeld, A. L. Schmeltekopf. *Phys. Rev.*, 138, A384, 1965.
- [7] Г. Н. Герасимов, Г. П. Старцев. Тез. V Всесоюз. конф. по электронным и атомным столкновениям, Ужгород, 1972.
- [8] C. V. Collins, W. V. Hurt. *Phys. Rev.*, 179, 203, 1969; W. W. Robertson. *Chem. Phys. Lett.*, 3, 30, 1969.
- [9] A. Mulliken. *Phys. Rev.*, 131, 962, 1964.
- [10] В. С. Егоров, В. Д. Обьедков. *Опт. и спектр.*, 37, 221, 1969.
- [11] В. С. Егоров, Ю. Г. Козлов, А. М. Шухтин. *Опт. и спектр.*, 17, 154, 1964.

Поступило в Редакцию 17 июля 1973 г.