

Краткие сообщения

02;04;07;10

О механизмах образования инверсной заселенности уровней атомов и ионов металлов в плазменной струе

© В.П. Стародуб

Институт электронной физики НАН Украины,
294016 Ужгород, Украина

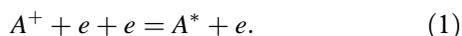
(Поступило в Редакцию 5 мая 1997 г.)

Проведено исследование механизмов образования инверсных заселенностей в плазменных струях на парах лития, натрия, кадмия и стронция. Установлено, что основную роль в образовании инверсной заселенности на переходах щелочных атомов играет трехчастичная электрон-ионная рекомбинация, а для переходов между уровнями ионов стронция и кадмия существенную роль играют неупругие соударения с буферным газом. При этом использование гелия вместо аргона приводит к значительному увеличению величины инверсии.

Рассмотрение условий и анализ механизмов возникновения инверсий в движущейся плазме с быстро меняющимися плотностью и температурой представляется важным для выяснения возможности создания плазменно-динамического лазера. В настоящей работе проведено исследование плазменных струй на парах лития, натрия, кадмия и стронция. Эксперименты проводились на установке, описанной в [1]. Источником струи служил плазмотрон постоянного тока со звуковым соплом диаметром 3 мм. В качестве буферного газа использовались аргон и гелий. Определение заселенности возбужденных уровней проводилось оптическим методом по интенсивностям спектральных линий, которые в свою очередь определялись методом сравнения с интенсивностью эталонного источника с известным распределением энергии по спектру.

Исследования показали, что между определенными уровнями атомов лития и натрия, а также ионов кадмия и стронция возникает инверсная заселенность. Эти атомы и ионы имеют по одному электрону на внешней оболочке и поэтому являются похожими. Однако результаты исследования показали, что поведение инверсных заселенностей на соответствующих переходах атомов и ионов как от начальных условий, так и вдоль струи отнюдь не идентичное.

На рис. 1 представлены зависимости величин инверсных заселенностей от расстояния вдоль струи для наиболее перспективных с точки зрения получения генерации переходов исследуемых элементов. Видно, что для лития и натрия максимальная величина инверсной заселенности наблюдается вблизи среза сопла и резко падает вдоль струи, отслеживая при этом изменение концентрации электронов [2,3]. Все это говорит о том, что существенную роль в создании инверсной заселенности играют процессы с участием электронов, в частности процесс трехчастичной электрон-ионной рекомбинации



В отличие от щелочных металлов максимум величины инверсной заселенности у ионов Sr^+ и Cd^+ наблюдается на значительном удалении от среды сопла (рис. 1, кривые 3, 4). Это однозначно говорит о том, что в кадмиевой и стронциевой плазме реакция (1) не вносит существенного вклада в образование инверсной заселенности. Вероятнее всего, инверсия на переходе $6^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ стронция создается за счет процессов с участием буферного газа He, о чем свидетельствует зависимость величины инверсии от давления гелия (рис. 2). Отметим, что все зависимости, представленные на рис. 2, были получены при постоянном расходе металлов. Анализ литературы [4–7], а также диаграмм уровней атомов стронция и гелия и ионов стронция

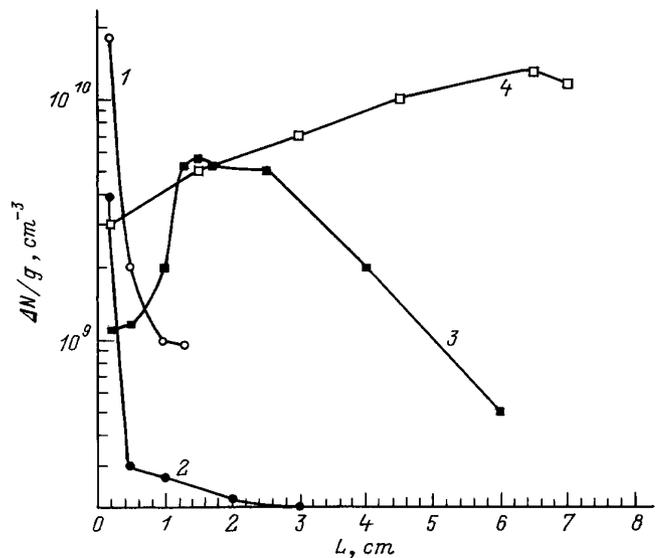


Рис. 1. Изменение величины инверсной заселенности на переходах Li I, Na I, Cd II и Sr II вдоль струи. 1 — $3^2S_{1/2} \rightarrow 2^2P_{3/2}$ Li I, 2 — $5^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$ Na I, 3 — $6^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ Sr II, 4 — $5s^2D_{5/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ Cd II.

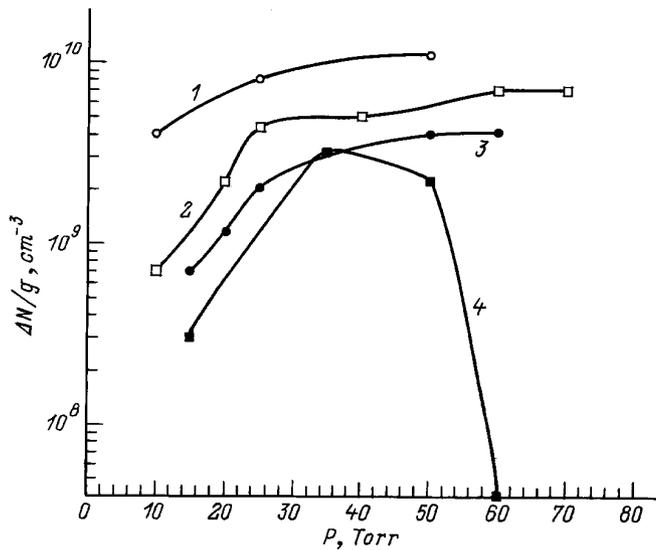
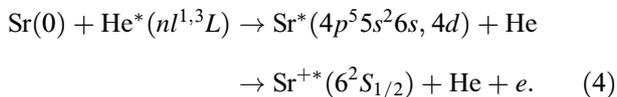
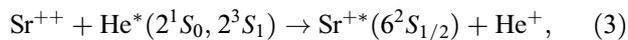
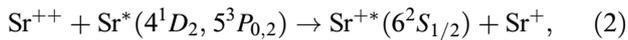


Рис. 2. Зависимость величины инверсной заселенности на переходах Li I, Na I, Cd II и Sr II от давления гелия. 1 — $3^2S_{1/2} \rightarrow 2^2P_{3/2}$ Li I, 2 — $5s^2^2D_{5/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ Cd II, 3 — $5^2S_{1/2} \rightarrow 3^2P_{3/2}$ Na I, 4 — $6^2S_{1/2} \rightarrow 5^2P_{3/2}$ Sr II.

указывает, что существенную роль в заселении уровней могут сыграть следующие элементарные процессы:



Как видно, в двух из них участвуют атомы буферного газа. Константы скорости реакций (2), (3) велики и по данным [5] соответственно равны $1 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ и $2 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$. Константу реакции (4) найти не удалось, но исследования [4] говорят о том, что в диапазоне 19–25 eV имеются автоионизационные уровни атома стронция, которые могут распадаться с образованием иона стронция в соостоянии $6^2S_{1/2}$. Величина сечения такой реакции для различных уровней $\text{Sr}^* \text{ I}$ оценивается в пределах $10^{-14} - 10^{-17} \text{ cm}^2$.

При малых концентрациях гелия инверсии не существует (рис. 2), так как концентрации гелия недостаточно для накачки $6^2S_{1/2}$ -уровня (реакции (3), (4)). С увеличением концентрации гелия инверсная заселенность появляется и достигает максимума, а затем падает. Падение величины инверсии объясняется тем, что при увеличении концентрации гелия быстрее происходят релаксационные процессы в плазме и быстрее разрушаются метастабильные состояния стронция и гелия.

Для выяснения роли процессов (1)–(4) нами был проведен дополнительный эксперимент. В He–Sr плазменную струю была введена примесь легкоионизирующегося цезия. Концентрация цезия не превышала

$10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. В условиях эксперимента примесь цезия увеличивала концентрацию электронов примерно вдвое, не влияя при этом существенно на электронную температуру. В случае рекомбинационного заселения $6^2S_{1/2}$ -уровня (реакция (1)) интенсивность соответствующей линии должна была бы возрасти. В случае если в заселении уровня преобладают процессы (2)–(4), интенсивности линий 430.5 и 416.2 nm должны были бы уменьшиться, так как в первом случае $\Delta N \sim N_e$, а во втором $\Delta N \sim 1/N_e$. Введение примеси цезия в He–Sr плазменную струю не увеличивало интенсивности указанных линий, а, наоборот, уменьшало их $\sim 20\%$. Следовательно, реакции (2)–(4) вносят существенный вклад в заселение $6^2S_{1/2}$ -уровня Sr II. При выяснении вопроса о роли буферного газа в создании инверсной заселенности на переходах иона кадмия была произведена замена гелия на аргон. Было установлено, что в Ar–Cd плазме величина инверсии в 6–8 раз меньше, чем в струе He–Cd плазмы. Объясняется это тем, что сечение эндотермической перезарядки на уровне Cd^+ примерно на порядок меньше, чем соответствующее сечение эндотермической перезарядки в He–Cd плазменной струе. Кроме того, в He–Cd плазме включается реакция Пеннинга, которая в случае с аргонем не работает.

Таким образом, на основании данных, полученных в результате исследования плазменных струй на парах металлов, установлено, что основную роль в образовании инверсной заселенности на переходах щелочных атомов играет трехчастичная электрон-ионная рекомбинация, а для переходов между уровнями ионов стронция и кадмия существенную роль играют неупругие соударения с буферным газом, причем использование гелия вместо аргона приводит к значительному увеличению величины инверсии.

Список литературы

- [1] Богачева С.П., Вереш М.Ф., Запесочный И.П. и др. // УФЖ. 1995. Т. 30. № 2. С. 186–189.
- [2] Богачева С.П., Воронюк Л.В., Запесочный И.П. и др. // ПМТФ. 1984. № 6. С. 10–15.
- [3] Вереш М.Ф., Запесочный И.П., Стародуб В.П. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 3. С. 572–574.
- [4] Боровик А.А., Алексахин И.С., Куляускене А.Б. // Опт. спектр. 1982. Т. 53. Вып. 6. С. 976–980.
- [5] Смирнов Б.М. Возбужденные атомы. М.: Энергоиздат, 1982. 232 с.
- [6] Контратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газофазных реакций. М.: Наука, 1975. 397 с.
- [7] Смирнов Б.М. Асимптотические методы в теории столкновений. М.: Атомиздат, 1973. 294 с.