

ВОЗБУЖДЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ГЛАВНОЙ СЕРИИ АТОМА И ИОНА ГЕЛИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Я. Н. Семенюк, А. И. Имре, А. И. Дашенко
и И. П. Запесочный

При электронно-атомных столкновениях исследованы спектры ВУФ излучения HeI (50—60 нм) и He II (20—30 нм) и измерены функции возбуждения спектральных линий, соответствующих переходам $1snp-1s^2$ HeI и $np-1s$ HeII ($n \leq 4$) в интервале энергий от порога возбуждения до 500 эВ. Проведена оценка абсолютных величин сечений возбуждения исследованных линий. Установлен закон спада сечений (в максимуме) внутри серий с ростом главного квантового числа исходного уровня линии.

Введение

Процессы возбуждения спектров гелия при электронно-атомных столкновениях исследованы в основном в видимой области. Так, например, в работах [1, 2] наиболее полно изучены энергетические зависимости эффективных сечений возбуждения спектральных линий пара- и ортогелия, двух линий иона гелия, а также установлен закон спада сечений возбуждения линий (в максимуме) с ростом главного квантового числа исходного уровня.

Спектральные линии, соответствующие переходам главных серий атома и иона гелия, расположены в труднодоступной для эксперимента вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра. Очевидно, этим объясняется ограниченное число экспериментальных данных об электронном возбуждении этих линий. Так, в работах [3, 4] изучено возбуждение трех линий атома гелия, а для иона гелия исследовалось только возбуждение резонансной линии [5].

Целью данной работы было детальное исследование возбуждения при электронно-атомных столкновениях спектральных линий главной серии HeI и HeII, а также характера зависимости между сечением возбуждения линий в максимуме и главным квантовым числом исходного уровня линии.

Аппаратура и методика измерений

Экспериментальная установка состоит из следующих основных узлов: дифференциально откачиваемых камеры столкновений с электронной пушкой и вакуумного монохроматора, а также систем стабилизированного электропитания и регистрации излучения.

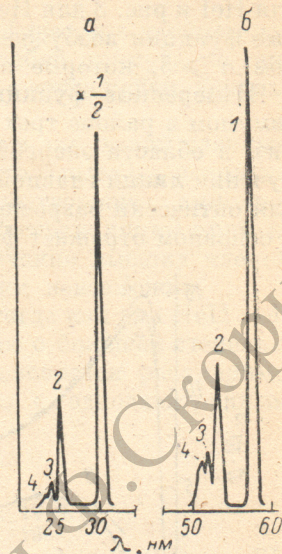
В эксперименте спектрально чистый гелий в проточной системе напускался непосредственно в объем столкновений через игольчатый натекагель. Электронный пучок формировался трехэлектродной пушкой, и в интервале энергий 20—500 эВ его плотность тока изменялась в пределах $(2 \div 5) \cdot 10^{-2}$ А/см². Энергетическая неоднородность электронов в пучке на половине высоты кривой распределения составляла ~ 2 эВ. ВУФ излучение спектрально разделялось вакуумным монохроматором скользящего падения лучей с постоянным углом отклонения 140° , построенным в нашей лаборатории на базе полуметровой дифракционной решетки 600 штр/мм. Наиболее эффективная спектральная область работы монохроматора 20—70 нм при обратной линейной дисперсии 0.9 нм/мм. Излучение выводилось через входную щель (0.2 мм) монохроматора, установленную непосредственно у объема столкновений параллельно электронному пучку, и вакуумный переход, который обеспечивал необходимый пере-

пад давлений при дифференциальной откачке узлов установки. Давление гелия в объеме столкновений при исследовании возбуждения линий главной серии атома и иона гелия составляло $\sim 10^{-5}$ и $\sim 10^{-3}$ мм рт. ст. соответственно и подбиралось так, чтобы в первом случае реабсорбция излучения была незначительной, а во втором — полезный сигнал был максимальным и не искажался вторичными процессами. Детектором излучения служил открытый электронный умножитель канального типа КЭУ-4, работающий в режиме счета фотоэлектронов.

Для регистрации и накопления сигнала использовался многоканальный анализатор АИ-128, переключение счетных каналов которого осуществлялось синхронно со ступенчатым (шаг 4 эВ) циклическим изменением энергии электронов в исследуемом диапазоне. Сигнал накапливался до тех пор, пока для самых слабых спектральных линий погрешность измерений падала до 3%.

Рис. 1. Спектр излучения гелия в ВУФ области (линии главных серий).

а — переходы HeI: 1 — $2p-1s$, 2 — $3p-1s$, 3 — $4p-1s$, 4 — $np-1s$;
б — переходы HeI: 1 — $1s2p-1s^2$, 2 — $1s3p-1s^2$, 3 — $1s4p-1s^2$, 4 — $1snp-1s^2$.



Калибровка шкалы энергий производилась по хорошо фиксируемым порогам возбуждения резонансных линий HeI (λ 58.4 нм) и HeII (λ 30.4 нм) с точностью до ± 0.5 эВ.

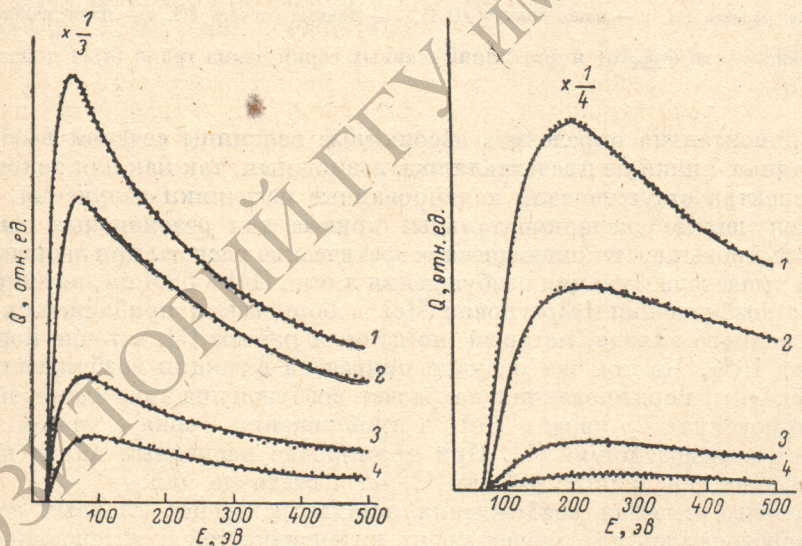


Рис. 2. Функции возбуждения линий главной серии атома гелия.

1 — λ 58.4 нм, 2 — 53.7 нм, 3 — 52.2 нм, 4 — линии с уровнями с $n \geq 5$.

Рис. 3. Функции возбуждения линий главной серии иона гелия.

1 — λ 30.4 нм, 2 — 25.6 нм, 3 — 23.7 нм, 4 — линий с уровнями с $n \geq 5$.

Результаты и их обсуждение

В ходе эксперимента были прежде всего изучены спектры ВУФ излучения HeI в области 50—60 нм и HeII в области 20—30 нм, которые записывались при энергиях возбуждающих электронов соответственно 80 и 200 эВ (рис. 1). Как видно, в обоих случаях хорошо разделяются линии, соответствующие спектральным переходам главных серий с уровнями до $n=4$.

Далее были исследованы функции возбуждения наблюдаемых спектральных линий главных серий в интервале энергий от порога возбуждения до 500 эВ. Функции в относительных единицах представлены кривыми 1—3 на рис. 2 для HeI и рис. 3 для HeII. Кривые 4 на этих же рисунках представляют суммарные функции возбуждения остальных членов серий с главным квантовым числом $n \geq 5$, которые в наших экспериментах не разделялись.

Измеренные функции возбуждения являются плавными кривыми с максимумом в районе трех пороговых энергий. Как показал соответствующий анализ, в области энергий, больших максимума возбуждения, интенсивности излучения линий главной серии HeI убывают по закону $E^{-1} \ln E$, что характерно для оптически разрешенных переходов; для HeII характер возбуждения линий в основном отражает функцию ионизации атома.

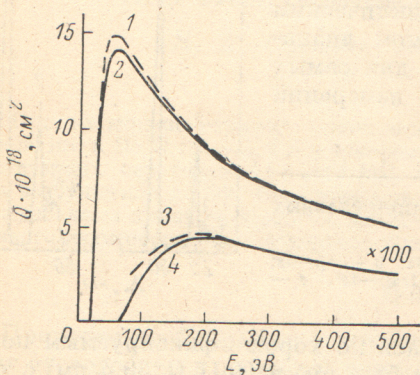


Рис. 4. Эффективные сечения возбуждения резонансных линий HeI 58.4 нм и HeII 30.4 нм. 1 — данные расчета [6], 2 — наши данные (HeI), 3 — данные расчета [7], 4 — наши данные (HeII).

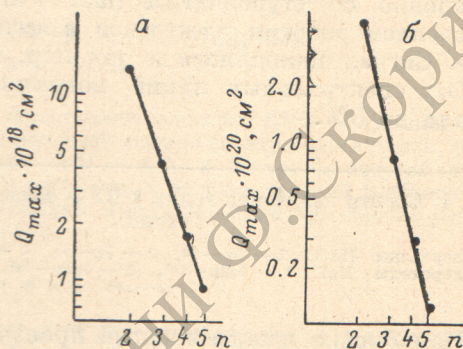


Рис. 5. Зависимости Q_{\max} от n для линий главных серий атома гелия (а) и иона гелия (б).

Экспериментально определить абсолютные величины сечений возбуждения исследованных линий не представлялось возможным, так как для далекой ВУФ области спектра отсутствовали калиброванные источники излучения. В связи с этим полученные экспериментальные кривые для резонансных линий HeI и HeII нормировались на имеющиеся теоретические расчеты при энергии 500 эВ. На рис. 4 приведена функция возбуждения линии HeI λ 58.4 нм, нормированная на расчет возбуждения $1s2p$ -уровня HeI в борновском приближении [6], при учете каскадного вклада, который, по данным работы [2], в точке нормировки составляет 16%. На том же рисунке приведена функция возбуждения линии HeII λ 30.4 нм, нормированная на расчет возбуждения при электронно-атомных столкновениях $2p$ -уровня HeII в приближении Борна с учетом конфигурационных взаимодействий [7]. При нормировке каскадный вклад не учитывался, так как, по данным работы [5], он достаточно мал.

Абсолютные сечения возбуждения остальных членов главных серий HeI и HeII определялись по отношению их интенсивностей к интенсивности резонансных линий. Полученные таким образом величины сечений возбуждения в максимуме составляют соответственно для линий $\lambda\lambda$ 58.4, 53.7, 52.2 нм HeI — $14 \cdot 10^{-18}$, $4.3 \cdot 10^{-18}$, $1.7 \cdot 10^{-18}$ см², а для линий $\lambda\lambda$ 30.4, 25.6, 24.3 нм HeII — $4.5 \cdot 10^{-20}$, $0.8 \cdot 10^{-20}$, $0.3 \cdot 10^{-20}$ см². Погрешность при сравнении интенсивностей линий определяется в основном изменением коэффициента чувствительности системы регистрации для исследованных участков спектра, которое в нашем эксперименте не учитывалось. Поэтому из-за уменьшения коэффициента чувствительности в области 20—30 нм (максимум чувствительности оценочно достигается при 40—45 нм) определенные нами сечения возбуждения линий HeII в действительности должны иметь большее значение.

Полученные данные по эффективным сечениям возбуждения позволяют установить закономерности в изменении сечений внутри главных серий HeI и HeII. Из работы [2] известно, что для линий резкой и диффузной серий пара- и орто-

гелия, возбуждаемых электронным ударом, сечения в максимуме возбуждения Q_{\max} связаны с главным квантовым числом n исходного уровня соотношением

$$Q_{\max} = Cn^{-\alpha},$$

где C и α — постоянные для данной серии величины. Графически в двойном логарифмическом масштабе это соотношение представляет собой прямую, по тангенсу угла наклона которой определяется α . Постоянную C легко найти, используя конкретные значения Q_{\max} и n для данной серии.

На рис. 5 приведены такие зависимости между Q_{\max} и n для линий главных серий HeI и HeII соответственно. Как видно, экспериментальные Q_{\max} довольно хорошо укладываются на соответствующие прямые, что подтверждает выполнение указанной закономерности для этих серий. Путем экстраполяции прямых в сторону увеличения n можно, очевидно, оценить и сечения высших членов серий, непосредственное измерение которых практически невозможно.

Постоянная α для главной серии HeI составляет ~ 3 , тогда как для HeII ~ 4 . Более высокое значение α в последнем случае, связанное с большей степенью спада сечений последовательных линий этой серии, объясняется различиями в процессах возбуждения с ионизацией по сравнению с одноэлектронным возбуждением.

Литература

- [1] С. Э. Фриш, В. Е. Яхонтова. Опт. и спектр., 4, 402, 1959.
- [2] И. П. Запесочный, П. В. Фельцан. УФЖ, 10, 1198, 1965.
- [3] F. G. Donaldson, M. A. Hender, J. M. McCoskey. Abstract of Papers VII ICPEAC, 2, 699. Amsterdam, 1971.
- [4] J. P. DeJohn, J. Van Eeck. Abstract of Papers VII ICPEAC, 2, 701. Amsterdam, 1971.
- [5] А. И. Дащенко, И. П. Запесочный, А. И. Имре, В. С. Вукстич, Ф. Ф. Данч, В. А. Кельман. ЖЭТФ, 67, 503, 1974.
- [6] Y. K. Kim, M. Inokuti. Phys. Rev., 175, 176, 1968.
- [7] E. Stigl. J. Phys. B., 5, 1688, 1972.

Поступило в Редакцию 7 декабря 1981 г.