

01; 02

© 1991

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМОВ Dy ПРИ ИОННО- И ЭЛЕКТРОННО-АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ И В РАСПЫЛЕНИИ

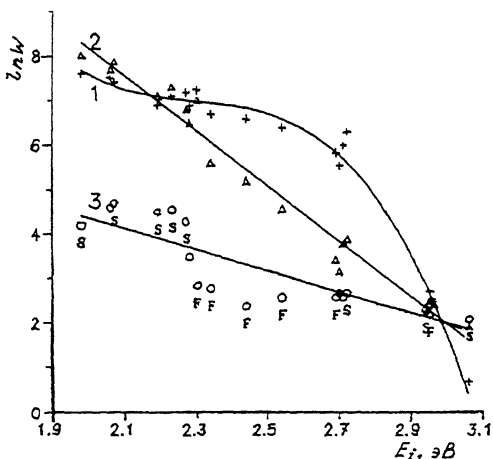
Е.К. В а с и л ь е в а, С.Н. М о р о з о в

Один из наиболее чувствительных методов исследования компонентного состава поверхности и приповерхностных слоев, основан на явлении ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ), возникающей при ионной бомбардировке поверхности твердого тела. Для развития метода необходимо изучить вклад различных механизмов в формирование возбужденных состояний распыленных частиц. Представляется полезным для этой цели сравнить формирование возбужденных частиц при распылении и других видах столкновительных процессов. Работ, посвященных исследованию этих процессов методами сравнительного анализа, очень мало и результаты не однозначны [1-3]. Для редкоземельных и переходных металлов, атомы которых имеют незаполненные f и d - оболочки и сложную систему нижних энергетических уровней подобные исследования не проводились. Между тем, совсем недавно, при сравнении фотонной эмиссии атомов гольмия, возбужденных в результате электронно-атомного столкновения и в распылении, было установлено существенное различие в высвечивании внешних $(s-p)$ и внутренних $(f-d)$ переходов, очевидно обусловленное различными механизмами возбуждения [4].

В данной работе сравниваются результаты экспериментального исследования оптических спектров атомов диспрозия при ионно- и электронно-атомных столкновениях в газовой фазе и в распылении.

Все столкновительные процессы наблюдались в одной вакуумной камере с единой системой анализа и регистрации оптического излучения. Исследования выполнены для систем $Ho^+ \rightarrow Dy$, $e \rightarrow Dy$ в газовой фазе (парах) с применением методики пересекающихся атомного и электронного пучков в условиях, близких к однократным столкновениям, и системы $Dy^+ \rightarrow Dy$ (твердотельная мишень). Образцы диспрозия бомбардировались ионами Dy^+ перпендикулярно поверхности. Энергия ионов составляла 40 кэВ, электронов - 200 эВ. Остаточный вакуум в системе $\approx 10^{-6}$ Тор. Измерительный тракт включал в себя монохроматор УМ-2 и фотоумножитель ЕМ1, 6256 В. Геометрия сбора излучения предусматривала попадание в поле зрения детектора практически всех возбужденных частиц с временем жизни $\leq 1-3$ мкс.

Измерены интенсивности 19 резонансных линий DyI , расположенных в области 400-600 нм, соответствующих переходам



Сравнение относительной эффективности возбуждения уровней атомов диспрозия в распылении (кривая 1), ионно-атомных столкновениях — $\text{Ho}^+ \rightarrow \text{Dy}$ (кривая 2) и электронно-атомных столкновениях — $e^- \rightarrow \text{Dy}$ (кривая 3). Внутренние $-(f-d)$ переходы обозначены — F , внешние — S .

в основное состояние из нижних термов $4f^{10} 5d 6s^2$ и $4f^9 6s 6p$ — конфигураций.

Предполагаем, что распад возбужденных атомов происходит в свободном пространстве

и роль каскадных переходов не существенна [5]. В ситуации, когда между верхним возбужденным состоянием и нижним возможен только один переход, что характерно для резонансных спектров, наблюдаемая интенсивность линий — I_{ki} (исправленная с учетом спектральной чувствительности аппаратуры) пропорциональна сечению возбуждения уровня — σ_k . Для сопоставления различных процессов столкновения целесообразно представить сечение возбуждения в виде: $\sigma_k = g_k f_{ik} W$, где g_k и f_{ik} — статистический вес возбужденного уровня и сила осциллятора перехода (атомные характеристики), а W — фактор, характеризующий данный процесс столкновения (эффективность возбуждения),

$$W = \sigma_k g_k^{-1} f_{ik}^{-1} \sim I_{ki} g_k^{-1} f_{ik}^{-1} \quad (1)$$

Такое представление сечения возбуждения в дипольном приближении достаточно очевидно для электронных и ионных столкновений [6] и условно может быть принято для распыления, поскольку механизм возбуждения ИФЭ не выявлен.

На рисунке приведены графики зависимости логарифма относительной эффективности возбуждения уровней — $\ln W$ от энергии их возбуждения — E_i , полученные в результате обработки экспериментальных данных с помощью выражения (1), значения g_k и f_{ik} взяты из [7]. Нормировка интенсивности проведена для перехода — $\text{Dy} I ({}^1P^o)$, ($\lambda = 421.18$ нм), с максимальным значением f_{ik} . Как видно из рисунка, несмотря на некоторый разброс точек, большинство из них группируется для каждого из трех случаев возбуждения, вдоль определенной линии, что подтверждает корректность предлагаемого рассмотрения.

Можно выделить следующие наиболее общие закономерности.

1. Как и в случае гольмия [4], при электронно-атомном столкновении уровни $\text{Dy} I$, связанные с внешними $-(s-p)$ переходами,

заселяются с большей вероятностью, чем уровни, обусловленные возбуждением внутренних $-(f-d)$ переходов. Наиболее вероятно, что это обстоятельство связано с меньшим сечением возбуждения внутренних переходов по сравнению с внешними при электронном ударе.

2. Крутой наклон зависимости $I_{\alpha W}$ от E_i при ионно-атомных столкновениях указывает на предпочтительную заселенность низколежащих уровней DyI . Качественно этот результат можно объяснить образованием квазимолекулы при сближении атома и иона [8]. Представление о квазимолекулярных состояниях основано на адиабатическом принципе, согласно которому электроны движутся быстрее ядер и образуют орбитали, соответствующие неподвижным ядрам. При распаде квазимолекулы возникают атомы, возбужденные в низколежащие состояния.

3. При распылении (ИФЭ) эффективность возбуждения монотонно уменьшается с ростом E_i (медленнее, чем для случаев электронного и ионного ударов) до $E_i \approx 2.7$ эВ, а затем снижается в области $E_i = 2.7-2.9$ эВ на 1-2 порядка величины. Спад эффективности заселения при $E_i \geq 2.7$ эВ связан, по-видимому, с превышением энергии возбужденных уровней атомов над уровнем Ферми поверхности диспрозия и указывает на доминирующую роль электронно-обменного механизма в возбуждении низколежащих уровней в процессах распыления. Простейшая оценка граничной энергии возбуждения, соответствующей уровню Ферми, дает: $E_{iip} = V_i - \psi$, где V_i - потенциал ионизации атома, ψ - работа выхода поверхности. Для диспрозия $E_{iip} = 2.7$ эВ, что хорошо коррелирует с наблюдаемой в эксперименте. Критическая зависимость эффективности возбуждения от E_i при распылении позволяет предположить, что формирование возбужденных состояний в ИФЭ может осуществляться разными механизмами, в зависимости от расположения уровня Ферми поверхности и энергии возбужденного уровня. Так, если при $E_i \leq E_{iip}$ эффективно проявляется электронно-обменное взаимодействие, то при $E_i > E_{iip}$ возрастает роль столкновительного механизма [9].

При электронно-обменном механизме возбуждения должно наблюдаться равновероятное заселение низколежащих уровней, обусловленное возбуждением электронов как s , так f -оболочек. Это подтверждается результатами эксперимента.

Одной из особенностей спектра ИФЭ является подавление синглетных 1P переходов по сравнению с триплетными 3P и внутренними $-(f-d)$ переходами [10-12]. В работе [12] мы объясняли это явление с точки зрения механизма заселения низколежащих уровней атомов РЗМ в приближении LS -связи [13]. Другим вероятным механизмом, дающим преимущество в заселении триплетных состояний, является безызлучательная релаксация синглетных состояний, при отлете распыленного атома в результате прямой Оже-релаксации [14].

Список литературы

- [1] Snowdon K.J., Andersen B., Veje E. // Rad. Eff. Lett. 1979. V.43. N 4-5. P. 205-210.
- [2] Snowdon K.J., Carter G., Armour D.G., Andersen B., Veje E. // Surface Science. 1979. V. 90. N 2. P. 429-441.
- [3] Andersen N., Andersen B., Veje E. // Rad. Eff. 1982. V. 60. N 1-4. P. 119-127.
- [4] Васильева Е.К., Морозов С.Н., Рыскин Б.В. // Оптика и спектроскопия. 1988. Т. 64. В. 2. С. 282-284.
- [5] Шимон Л.Л., Гарга И.И., Качанов В.Н., Курт Н.В. // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 55. В.2. С. 22-29.
- [6] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1974. 752 с.
- [7] Горшков В.Н., Комаровский В.А., Ошерович А.Л., Пенкин Н.П., Хофферлинг Р. // Оптика и спектроскопия. 1980. Т. 48. В. 4. С. 657-661.
- [8] Andersen B., Jensen K., Petersen N.B., Veje E. // Phys. Rev. A. 1977. V. 15. N 4. P. 1469.
- [9] Kelly R. // Vacuum. 1983. V. 33. N 9. P. 574-554.
- [10] Veje E. // Surface Science. 1981. V. 110. N 2. P. 533-542.
- [11] Veje E. // Phys. Ref. B. 1983. V. 28. N 9. P. 5029-5036.
- [12] Васильева Е.К., Морозов С.Н. // Оптика и спектроскопия. 1986. Т. 61. В. 6. С. 1175-1179.
- [13] Фриш С.В. Оптические спектры атомов. М.-Л.: Физматгиз, 1963. 640 С.
- [14] Падзерский В.А., Ципинюк Б.А. Взаимодействие атомных частиц с твердым телом. Мат. УП Всесоюз. конф. Минск, 1984. С. 275-276.

Поступило в Редакцию
30 марта 1991 г.