

## СРАВНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ ЧАСТИЦ, ОТЛЕТАЮЩИХ ОТ ПОВЕРХНОСТИ ГРАНАТОВ И МЕТАЛЛОВ ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ *COMPARISON OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE RADIATION OF EXCITED PARTICLES SPUTTERED FROM THE GARNETS AND METALS UNDER ION BOMBARDMENT. И.А. Афанасьева, Н.А. Азаренков, В.В. Бобков, В.В. Грицына, И.И. Оксенюк, Д.И. Шевченко I.O. Afanasieva, M.O. Azarenkov, V.V. Bobkov, V.V. Gritsyna, I.I. Okseniuk, D.I. Shevchenko*

НИ ПЛИП им. Я.М. Фогеля, Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

E-mail: <u>bobkov@karazin.ua</u>

Проведены исследования основных параметров ионно-фотонной эмиссии металлического иттрия и алюмоиттриевого граната с целью выяснения процессов, влияющих на формирование возбуждённых состояний у выбитых атомов и ионов иттрия. Установлено, что возбуждённые атомы и ионы иттрия могут как выбиваться с поверхности бомбардируемой мишени вследствие процессов развития каскада линейных столкновений или кратных столкновений на поверхности облучаемой мишени, так и образовываться над поверхностью мишени за счёт развала выбитой возбужденной молекулы (например, YO) при её отлёте от поверхности.

The main parameters of the ion-photon emission of metallic yttrium and yttrium-aluminum garnet have been investigated in order to elucidate the processes that affect the formation of excited states in knockedout yttrium atoms and ions. It was found that excited atoms and ions of yttrium can both be knocked out of the surface of the bombarded target due to the development of a cascade of linear collisions or multiple collisions on the surface of the irradiated target, and they can be formed above the target surface due to the breakup of the knocked-out excited molecule (for example, YO) during its departure from surface.

Работа продолжает исследования процессов образования возбужденных частиц, распыленных при ионной бомбардировке сложных соединений.

**Цель работы.** Сравнение параметров ионно-фотонной эмиссии (ИФЭ), возникающей при бомбардировке ионами Ar<sup>+</sup> металлического иттрия (Y) и алюмоиттриевого граната (YAG) для выяснения механизмов образования распыленных возбужденных частиц.

**Объект исследования.** Процессы взаимодействия пучка ионов Ar<sup>+</sup> с поверхностью твердого тела, приводящие к распылению вторичных частиц в возбужденном состоянии.

Материалы для исследования. Металлический иттрий Y, алюмоиттриевый гранат Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>.

Условия эксперимента. Экспериментальная установка, на которой проводились исследования, позволяет получить выделенный по массе пучок ионов  $Ar^+$  с энергией 20 кэВ и плотностью тока 10-15 мкА/см<sup>2</sup>. Излучение, испущенное возбужденными частицами, в направлении перпендикулярном плоскости падения первичного пучка, анализировалось и регистрировалось с помощью фотоэлектрической системы регистрации (МДР-3, охлаждаемый ФЭУ-106), работающей в режиме счета фотонов и чувствительной в диапазоне длин волн 250-800.0 нм. Геометрия сбора квантов излучения позволяла определить полное число фотонов, испускаемых исследуемыми распыленными возбужденными частицами.

Для определения энергетического состава распыленных возбужденных частиц был применен метод исследования "пространственного распределения" излучения. При этом использовалась насадка на входную щель монохроматора, позволяющая перемещать горизонтальную щель шириной 0.1 мм вдоль проекции ореола на плоскость входной щели и определять распределение сигнала исследуемой линии  $I_{\lambda}$  вдоль высоты изображения *l*.

## Экспериментальные результаты.

В спектре излучения частиц, выбитых из Y и YAG, наблюдались эмиссии, испущенные атомами и ионами иттрия, канты полос сине-зеленой ( ${}^{2}\Sigma \rightarrow {}^{2}\Sigma$ ) и оранжевой ( ${}^{2}\Pi \rightarrow {}^{2}\Sigma$ ) систем молекулы YO, а также ряд линий спектра Al I в случае YAG. В работе было исследовано только излучение возбуждённых атомов и ионов иттрия. Для всех наблюдаемых эмиссий иттрия был определен квантовый выход излучения  $\gamma_{\lambda}$ , определяемый как число фотонов с длиной волны  $\lambda$  перехода  $i \rightarrow k$ , испущенных отлетающими возбужденными частицами, в расчете на один падающий ион:  $\gamma_{ik} = \frac{\Sigma N_{ik}}{N^{+}}$ , где  $\Sigma N_{ik}$  полное число фотонов перехода  $i \rightarrow k$ , испущенных отлетающими от поверхности возбужденными в *i*-ое состояние частицами,  $N^{+}$ – число падающих ионов.

Для выяснения механизма выбивания возбужденных частиц необходимо правильно учесть принцип распределения неупругой энергии по возбужденным состояниям отлетающих частиц. В связи с этим целесообразно ввести понятие эффективности возбуждения  $\sigma_i$  частиц в состояние с энергией  $E_i$  одним падающим ионом. Связь зависимости  $\sigma_i(E_i)$  с экспериментально определяемыми значениями  $\gamma_{jk}$  имеет вид:  $\sigma_i(E_i) = \frac{\gamma_{ik}}{g_i A_{ik} \cdot \tau_i}$ , где  $g_i$  – статистический вес уровня,  $A_{ik}$  – вероятность перехода  $i \rightarrow k$ ,  $\tau_i$  – время жизни *i*-го уровня.



Рис. 1. Зависимости  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  для линий спектра Y I Рис. 2. Зависимости  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  для линий спектра Y II

тела, более полную информацию об этих процессах можно получить при сопоставлении  $\sigma_i(E_i)$  с энергетическим составом распыленных возбужденных частиц. Независимо от процессов образования по мере удаления от поверхности заселенность возбужденного состояния меняется за счет процесса спонтанного

распада по закону:  $N_i(l) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = N_0 \exp\left(-\frac{l}{v_{eff}\tau_i}\right)$ . При этом зависимость  $\ln I_{\lambda}(l)$  соответствует зависимости  $\ln N_i(l)$  и в самом общем случае представляет собой набор прямолинейных отрезков (рис.3), наклон

общем случае представляет собой набор прямолинейных отрезков (рис.3), наклон которых дает возможность оценить значение эффективной скорости разных групп распыленных возбужденных частиц. При этом является важным последовательное изменение наклона прямолинейных участков от большего к меньшему, поскольку больший наклон соответствует более медленным частицам. Физически это обозначает, что около поверхности излучают самые медленные частицы и по мере удаления регистрируется оптическое излучение все более быстрых частиц. В случае если число частиц, возбужденных в исследуемое *i*-тое состояние изменяется по мере удаления от поверхности не только за счет спонтанного распада, но и за счет каскадных переходов из выше лежащих состояний или за счет образования возбужденной в *i*-тое состояние частицы при развале распыленной сложного комплекса зависимость  $\ln I_d(l)$  существенно изменяется (рис.4).



Рис. 3. Зависимость  $\ln I_{\lambda}(l)$  с двумя скоростными группами. Fig. 3. Dependence  $\ln I_{\lambda}(l)$  with two velocity groups.

Рис. 4. Зависимость  $\ln I_{\lambda}(l)$  при появлении процесса дозаселения. Fig. 4. Dependence  $\ln I_{\lambda}(l)$  when the process of repopulation appears.

Для всех исследованных в работе линий спектров Y I и Y II были измерены пространственные распределения интенсивности линии вдоль её высоты. Оказалось, что помимо "классического" вида зависимостей  $\ln I_{\lambda}(l)$  (рис.3) были выявлены линии, для которых наблюдался вид зависимостей представленных на рис 4. Следует отметить, что эти линии испускаются с возбужденных уровней, для которых значения  $\ln \sigma_i$  на рис.1 и 2 отклоняются от прямой линии. Т.е. можно предположить дозаселение этих уровней. Однако согласно таблицам спектральных переходов, вероятность дозаселения с вышележащих уровней мала, поэтому нами сделано предположение о дозаселении указанных уровней за счет развала распыленного сложного комплекса, например, YO.

## Выводы.

Проведены исследования основных параметров ИФЭ металла иттрия (Y) и

Fig. 1. Dependence  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  for Y I spectral lines Fig. 2. Dependence  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  for Y II spectral lines

Как видно из рис. 1 и 2 зависимости  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  для линий спектра Y I и Y II в первом приближении можно аппроксимировать прямолинейными отрезками, что свидетельствует о термодинамически равновесном распределении энергии возбуждения при образовании возбуждённых частиц Y. Однако нужно отметить заметное отклонение значений  $\ln \sigma_i$  для некоторых уровней возбуждения *i* от прямолинейной зависимости, что может быть обусловлено дозаселением упомянутых уровней уже при отлете возбужденной частицы от поверхности или за счет каскадных переходов из выше лежащих (*j*) состояний (*j* > *i*), или за счет образования возбужденной в *i*-тое состояние частицы при развале распыленного более сложного комплекса. Несмотря на это полученную зависимость  $\sigma_i(E_i)$  можно представить следующим образом:  $\sigma_i(E_i) \sim \exp(\frac{E_i}{E_a})$ , где  $E_a$  – некоторая константа, зависящая от процесса взаимодействия налетающего иона с частицами твердого

тела, который заканчивается вылетом возбужденных частиц. Следует отметить, что коэффициент наклона зависимостей  $\ln \sigma_i = f(E_i)$  для атомов Y примерно в два раза меньше чем для ионов Y независимо от типа мишени. Это может означать, что вклад каскадных и кратных столкновений в образование возбуждённых атомов и ионов Y различен.

Из вида зависимости  $\sigma_i(E_i)$  можно сделать косвенные заключения о процессах, приводящих к выбиванию возбужденных частиц с поверхности твердого

алюмоиттриевых гранатов (YAG) с целью определения процессов, влияющих на формирование возбуждённых состояний у выбитых атомов и ионов иттрия. Определён спектральный состав и квантовый выход излучения частиц, выбитых пучком ионов аргона с поверхности исследованных мишеней. Исследовано пространственное распределение излучения отлетающих возбуждённых атомов и ионов иттрия. На основании рассчитанных данных для эффективности возбуждения  $\sigma_i$  как функции от энергии возбуждения верхнего уровня исследуемого перехода и данных о пространственном распределении излучения сделан вывод о том, что возбуждённые атомы и ионы иттрия при ионной бомбардировке исследованных мишеней могут как выбиваться с поверхности бомбардировке исследованных столкновений на поверхности облучаемой мишени, так и образовываться над поверхностью мишени за счёт развала выбитой возбужденной молекулы (например, YO) при её отлёте от поверхности.

1. Influence of Type of Bonds in Compounds on the Mechanism of the Sputtered Excited Particles Formation Under Ion Bombardment / V.V.Bobkov, V.V. Gritsyna, V.T. Gritsyna, I.A. Afanas'eva, and D.I. Shevchenko // Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2016. — V.10. — P.1239. — 1265.