

## ПОЛЯРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО ПРОТОННЫМ УДАРОМ

*В.П.Петухов, Е.А.Романовский, С.В.Ермаков*

С помощью дифракционного спектрометра-поляриметра впервые измерена степень поляризации рентгеновского излучения  $L_{I_1}$ ,  $L_{\alpha_{1,2}}$  и  $L_{\beta_{2,15}}$ -линий атома серебра, возбуждаемого протонами. Установлено, что степень поляризации  $L_{I_1}$ -линии уменьшается от 29 до 8% при увеличении энергии протонов от 150 до 500 кэВ.

При ионизации внутренних оболочек атомов с полным моментом  $j > 1/2$  пучком частиц образующиеся ионы оказываются выстроенными относительно пучка вследствие того, что сечения ионизации различны для состояний с различными проекциями момента на направление пучка частиц [1]. Поэтому рентгеновское излучение, сопровождающее заполнение вакансий в подоболочках с квантовым числом  $j > 1/2$  должно быть поляризованным. Исследование поляризации рентгеновского излучения позволяет получить информацию о степени ориентации образующихся ионов и о заселенности состояний с различными значениями магнитного квантового числа, что невозможно определить из измерений полных и дифференциальных сечений ионизации.

Авторам известна только одна работа [2], в которой степень поляризации суммарного излучения смеси трех линий  $L_{\alpha}$ ,  $L_{\eta}$ , и  $L_{I_1}$ , генерируемых при столкновении 100 кэВ протонов с атомами меди и германия, оценивалась косвенным образом из измерений углового распределения этого излучения.

В настоящей работе с помощью дифракционного спектрометра-поляриметра [3] с кристалл-анализатором из графита ( $2d = 6,76 \text{ \AA}$ ) при разрешении  $\sim 30 \text{ эВ}$  измерена степень поляризации  $P$  излучения  $L_{I_1}$ ,  $L_{\alpha_{1,2}}$  и  $L_{\beta_{2,15}}$ -линий атома серебра, возбуждаемого протонами с энергией от 150 до 500 кэВ. Измерение степени поляризации рентгеновского излучения основано на использовании поляризационной зависимости интенсивности брэгговского отражения от кристалла. Мишенью служила фольга толщиной  $300 \text{ мкг/см}^2$ , установленная под  $45^\circ$  по отношению к пучку протонов, рентгеновское излучение регистрировалось под углом  $90^\circ$  относительно этого пучка. Угловое расхождение пучка протонов, падающих на мишень не превышало  $1^\circ$ .

В соответствии с определением степени поляризации линейная поляризация рентгеновского излучения, измеряемая при брэгговском угле  $\theta$ , дается выражением

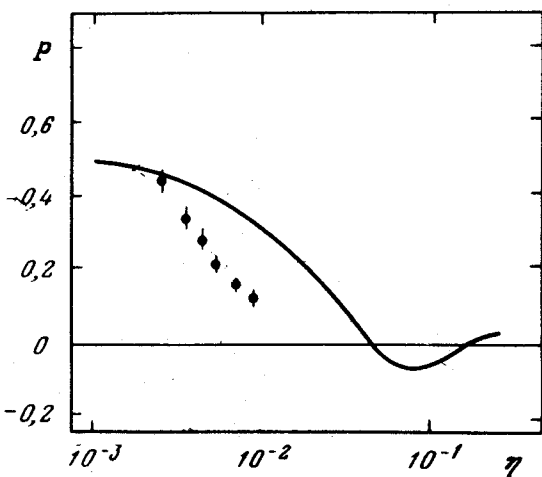
$$P = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}} \frac{1 + \cos^2 2\theta}{1 - \cos^2 2\theta}, \quad (1)$$

где  $I_{\parallel}$  и  $I_{\perp}$  — интенсивности излучения отраженного от кристалла-анализатора, когда плоскость отражения соответственно перпендикулярна и параллельна оси пучка протонов. Для исключения систематической ошибки в измерениях поляризации, обусловленных погрешностями в юстировке прибора, одновременно с измерением интенсивности  $L_{\beta_1}$ ,  $L_{\alpha_{1,2}}$  и  $L_{\beta_{2,15}}$ -линий измерялась интенсивность  $L_{\beta_1}$ -линии, излучение которой неполяризовано и при определении степени поляризации излучения этих линий по формуле (1) их интенсивности нормировались на интенсивность линии  $L_{\beta_1}$ .

Результаты измерения степени поляризации  $L$  излучения атома серебра при возбуждении протонами представлены в таблице.

$E_p, \text{кэВ}$ Линия	150	200	250	300	400	500	$\frac{1 - \cos^2 2\theta}{1 + \cos^2 2\theta}$
$L_{\beta_1}$	$29 \pm 4$	$25 \pm 4$	$22 \pm 4$	$17 \pm 2$	$14 \pm 2$	$8 \pm 2$	1,002
$L_{\alpha_{1,2}}$	—	$4 \pm 2$	—	$3 \pm 2$	$2 \pm 1,5$	$2 \pm 1$	1,13
$L_{\beta_{2,15}}$	—	$4 \pm 2$	—	$3 \pm 2$	$2 \pm 2$	$2 \pm 2$	1,38

Как видно из таблицы, степень поляризации излучения линии наибольшая по сравнению с остальными линиями и меняется от 29 до 8% при увеличении энергии протонов  $E_p$  от 150 до 500 кэВ. При этом поляризация излучения линий  $L_{\alpha_{1,2}}$  и  $L_{\beta_{2,15}}$  не превышает 4% и почти не зависит от энергии протонов.



Зависимость степени поляризации  $P$  излучения  $L_{\beta_1}$ -линии от относительной скорости столкновения  $\eta$ . Линия — расчет в борновском приближении

Используя результаты расчетов зависимости степени выстроенности атомов с вакансией в  $L_3$  оболочке от относительной скорости столкновения  $\eta = (v/v_0 Z)^2$  ( $v$  — скорость протона,  $Z$  — заряд ядра

атома мишени,  $v_0 = 2,19 \cdot 10^8$  см/сек), выполненных в борновском приближении в работе [4], была рассчитана степень поляризации излучения  $L_1$ -линии, возбуждаемого протонами (рисунок). Результаты расчетов совпадают с аналогичными расчетами работы [2]. Как видно из рисунка, в области скоростей столкновения  $3 \cdot 10^{-3} < \eta < 10^{-2}$  расчетные значения степени поляризации излучения  $L_1$ -линии превышают экспериментальные и это расхождение увеличивается с ростом относительной скорости столкновения. В расчетах [2, 4] не учитывался вклад переходов Костера – Кронига из  $L_1$  и  $L_2$  подболочек в образование вакансий в  $L_3$  подболочке, заполнение которых сопровождается неполяризованным излучением, поэтому на рисунке даны экспериментальные значения степени поляризации  $L_1$ -линии атома серебра с поправкой на увеличение числа вакансий в подболочке за счет этих переходов. Сечения ионизации  $L_1$  и  $L_2$  подболочек при этом определялись из измерения интенсивности  $L_{\beta_1}$ - и  $L_{\beta_3}$ -линий. Лучшее количественное согласие теории и эксперимента, видимо, может быть достигнуто проведением расчетов с использованием более точных моделей.

Таким образом, в результате проведенных прямых измерений установлено, что рентгеновское излучение характеристических линий, излучаемых атомом при заполнении вакансии, образованной протонным ударом в  $L_3$  подболочке, поляризовано и степень поляризации возрастает с уменьшением энергии протонов. Так как результаты измерения интенсивности излучения отдельных линий, зависят от степени его поляризации, которая как здесь установлено, может достигать 30% и изменяться в зависимости от энергии протонов, то данное обстоятельство необходимо учитывать как при измерении спектров рентгеновского излучения, так и при определении сечений генерирования этого излучения, возбуждаемого тяжелыми частицами.

## Литература

- [1] W.Mehlhorn. Phys. Lett., 26 A, 166, 1968.
- [2] A.Schöler, F.Bell. Z. Physik. A286, 163, 1978.
- [3] В.П.Петухов, Е.А. Романовский, А.М.Борисов. VII Всесоюзная конференция по физике электронных и атомных столкновений. Тезисы, стр. 151, Петрозаводск, 1978.
- [4] E.G.Berezhko, N.M.Kabachnik, V.V.Sizov. J. Phys., B11, 14, 421, 1978.