

О ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ ИЗ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ОТ КРАТНОСТИ ЗАРЯДА И СКОРОСТИ БОМБАРДИРУЮЩИХ ИХ ИОНОВ

© М.Р.Бедилов, А.Н.Ишмуратов

Институт ядерной физики Академии наук Узбекистана,
702132 Ташкент, Узбекистан
(Поступила в Редакцию 30 марта 1995 г.
В окончательной редакции 23 ноября 1995 г.)

Всестороннее исследование физических процессов, протекающих при налетании пучков многозарядных ионов (МЗИ) на твердые тела, представляет большой научный и практический интерес. Результаты подобных исследований важны при переходе от качественного [1] к количественному анализу состава различных веществ методом времяпролетной лазерной масс-спектрометрии, который сдерживается отсутствием исчерпывающих данных о зависимости коэффициента ионно-электронной эмиссии γ от скорости v , кратности заряда Z , массы M ионов лазерной плазмы и других условий эксперимента.

Фундаментальное значение подобных исследований обусловлено тем, что в литературе практически отсутствуют экспериментальные работы по исследованию ионно-электронной эмиссии с поверхности твердых тел под действием МЗИ, скорости которых находятся в пределах $10^6 - 10^7$ м/с. Между тем скорости быстрых ионов лазерной плазмы доходят до $5 \cdot 10^6$ м/с [2].

Целью настоящей работы является исследование электронной эмиссии с поверхности твердых тел при бомбардировке их МЗИ лазерной плазмы с кратностями заряда $Z = 1 - 8$ и скоростями $5 \cdot 10^5 - 3 \times 10^6$ м/с.

Для достижения этой цели собрана экспериментальная установка, состоящая из следующих основных узлов: лазерное устройство, камера формирования пучков многозарядных, в частности быстрых, ионов, времяпролетный анализатор с магнитным сепаратором МЗИ, камера взаимодействия ионов с твердыми телами и система регистрации эмитируемых электронов.

В рамках настоящей работы ограничимся лишь описанием метода получения быстрых ионов при умеренных плотностях потока лазерного излучения, т.е. при $q \sim 10^{11}$ Вт/см², а также системы регистрации электронов, эмитируемых с поверхности исследуемых тел при воздействии на них отдельными импульсами МЗИ.

Быстрые ионы лазерной плазмы, как правило, образуются при $q > 10^{14} \text{ W/cm}^2$ [2]. Это в свою очередь требует эксплуатации дорогостоящих установок. Для достижения цели с наименьшими затратами нами предложен более простой метод получения плотных пучков быстрых ионов. Он заключается в предварительном ускорении МЗИ лазерной плазмы под воздействием внешнего электрического поля [3,4]. Скорости ионов измерялись по времени прихода их на детектор, который расположен на расстоянии 370 см от места образования лазерной плазмы.

Для регистрации электронов, эмитируемых при воздействии на поверхности исследуемых тел отдельными импульсами МЗИ лазерной плазмы, применили коллекторный метод измерений, аналогичный [5]. Исключением явилась следующая деталь: поскольку в экспериментах такого рода большое значение имеет состояние поверхности, нами был использован хорошо зарекомендовавший себя способ дополнительной ее очистки пучком лазерного излучения [6]. Он заключается в том, что часть лазерного излучения, под воздействием которого образуется высокотемпературная плазма, отводится с помощью светоделителя и направляется на поверхность вторичной мишени. Плотность мощности излучения на площади 1 cm^2 у поверхности вторичной мишени составляет порядка $10^7 - 10^8 \text{ W/cm}^2$. При таких потоках излучения происходит полная очистка поверхности от всяких возможных загрязнений.

Лазерная очистка поверхности выгодна и отличается высокой эффективностью, в особенности при бомбардировке поверхности исследуемых тел быстрыми ионами, скорости которых находятся в пределах 10^6 m/s . Действительно, ионы с такими скоростями преодолевают дрейфовое расстояние 370 см за $t \sim 7 \cdot 10^{-6} - 10^{-6} \text{ s}$. За такое время на очищенную поверхность оседает не более 10^{-4} монослоя остаточных газов [6]. Сравнение полученных при описываемых условиях экспериментальных результатов с данными других авторов [7,8], применивших классические методы очищения поверхности вторичной мишени, показывает, что они совпадают с достаточно высокой точностью.

В качестве исследуемых объектов были выбраны Al, Cu, CuBe, W и стекло, которые подвергались воздействию МЗИ C, Al и Ti.

На рис. 1 приведено семейство зависимостей $\gamma(Z)$, полученных при бомбардировке Al-мишени ионами C с различными скоростями. Видно, что при скоростях ионов $v \sim 6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ γ не зависит от Z иона, что находится в хорошем согласии с результатами [7]. Однако снижение γ по мере повышения Z ионов, скорости которых превышают $8 \cdot 10^5 \text{ m/s}$, является несколько неожиданным, поскольку, согласно тео-

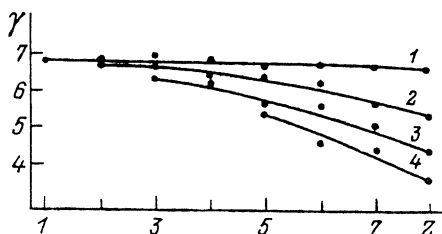


Рис. 1. Зарядовая зависимость коэффициента эмиссии γ при бомбардировке поверхности Cu ионами Ti с различными скоростями.

v (m/s): 1 — $5 \cdot 10^5$, 2 — $8 \cdot 10^5$, 3 — 10^6 , 4 — $2 \cdot 10^6$.

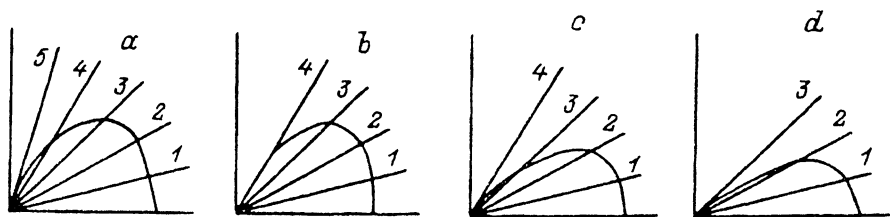


Рис. 2. Характер распределения вылета электронов с поверхности CuBe-мишени под действием ионов C^{5+} с различными скоростями.

v (m/s): $a - 5 \cdot 10^5$, $b - 8 \cdot 10^5$, $c - 10^6$, $d - 3 \cdot 10^6$. Ω ($^\circ$): 1 — 15, 2 — 30, 3 — 45, 4 — 60, 5 — 75.

рии [8], в интервале скоростей ионов $v \sim 10^6 - 10^7$ m/s предполагается, что независимость коэффициента эмиссии от кратности заряда бомбардирующих ионов переходит к соотношению типа $\gamma(Z^2)$.

Это может быть связано с тем, что, по-видимому, при бомбардировке твердых тел МЗИ с $v > 8 \cdot 10^5$ m/s возрастает вероятность протекания эффекта «встрягивания» [9]. Согласно ему, эмиссия электронов происходит при резкой остановке иона при столкновении его с поверхностью твердого тела. Снижение $\gamma(Z)$ при указанных выше скоростях ионов мы связываем с тем, что, видимо, источником эмиссии в этом случае в большей степени являются собственные электроны бомбардирующих МЗИ: чем выше Z иона, тем меньше электронов содержат его оболочки, а следовательно, снижается и коэффициент γ .

Вероятность протекания названного процесса оценивается из условий $\eta = 0.14mv/U$, где m — масса электрона, U — потенциал ионизации. При $v \sim 10^6$ m/s коэффициент η доходит до 10^{-1} .

Нами исследовано и пространственное распределение эмитированных электронов. Полученные результаты представлены на рис. 2. Как видно, повышение скорости бомбардирующих ионов приводит к сужению угла вылета электронов Ω . Так, если при $v = 6 \cdot 10^5$ m/s он составлял 70° , то при $3 \cdot 10^6$ m/s угол вылета сужается в 2 раза.

Несмотря на то что Ω_{\max} доходит до 70° (а при скоростях бомбардирующих ионов $\sim 2 \cdot 10^5$ m/s и до 150° [3]), наибольший выход электронов происходит в относительно малом телесном угле, значение которого связано с Ω_{\max} соотношением $\Omega \sim 0.7\Omega_{\max}$.

Сужение угловых диаграмм электронной эмиссии по мере роста скорости ионов объясняется проникновением быстрых ионов на большую глубину, откуда выход электронов в вакуум затруднен [8]. Поскольку движение электронов в сторону вакуума имеет полусферический характер, вероятность выхода в вакуум высока для электронов, движущихся по нормали к поверхности мишени или под близкими к ней углами.

Таким образом, по результатам проведенных нами исследований можно сделать следующие выводы: 1) начиная со скоростей бомбардирующих ионов $8 \cdot 10^5$ m/s происходит спад зависимости $\gamma(Z)$, что обусловлено преобладающим вкладом в эмиссию собственных электронов самих МЗИ; 2) пространственное распределение электронов остается близким к полусферическому лишь при скоростях $v < 5 \cdot 10^5$ m/s: дальнейшее повышение скорости МЗИ приводит к их сужению.

Список литературы

- [1] Курамагов Д. Автореф. канд. дис. М. (1982). 16 с.
- [2] Андреев Н.Е., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н., Тихончук В.Т., Шиканов А.С. ЖЭТФ **76**, 3, 976 (1979).
- [3] Бедиллов М.Р., Ишмуратов А.Н., Хабибуллаев Б.К. Препринт ИЯФ АН УзССР. Р-6-249. Ташкент (1986). 14 с.
- [4] Бедиллов М.Р., Ишмуратов А.Н. УФЖ **33**, 4, 577 (1988).
- [5] Gilbert L.C. J. Appl. Phys. **44**, 12, 5293 (1973).
- [6] Опачко И.И. ЖТФ **49**, 8, 1759 (1979).
- [7] Арифов У.А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердых тел М. (1967). 502 с.
- [8] Parilis E.S. Kinetic electron emission and fast ion bombardment. A Survey of phenomena in ionized gases. IARA. Vienna (1968). P. 309-351.
- [9] Френкель Я.И. ЖЭТФ **11**, 6, 706 (1941).