

P13-2008-145

К. Пышняк<sup>1</sup>, М. Турек<sup>1</sup>, А. Дроздзель<sup>1</sup>, Ю. Селянко<sup>2</sup>,  
Д. Мончка<sup>3</sup>, Ю. А. Ваганов, Ю. В. Юшкевич

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ  
ИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПУЧКОВ  
ИОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

---

<sup>1</sup>Институт физики, Университет Марии Кюри-Склодовской, Люблин,  
Польша

<sup>2</sup>Институт информатики, Университет Марии Кюри-Склодовской, Лю-  
блин, Польша

<sup>3</sup>Институт атомной энергии, Свек-Варшава, Польша

Пышняк К. и др.

P13-2008-145

Установка для исследования процессов ионного распыления под влиянием пучков ионов средних энергий

Описывается конструкция экспериментальной установки, разработанной в Институте физики Университета Марии Кюри-Склодовской, Люблин, Польша, для исследования процесса распыления твердых тел под влиянием бомбардировки пучками ионов средних энергий. Созданная аппаратура подвергалась ряду экспериментальных тестов и компьютерных симуляций, целью которых была оптимизация не только целой системы, но и отдельных ее узлов. Некоторые результаты этих тестов представлены в статье.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова, ОИЯИ, и в Институте физики УМКС, Люблин.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Pyszniak K. et al.

P13-2008-145

The Facility for Studying the Ion Sputtering by Bombardment with Medium Energy Ion Beams

The design of the experimental facility for studying the ion sputtering process of solids by bombardment with medium energy ion beams is described. The facility underwent a number of experimental tests and computer simulations both for the whole system and separate units. A brief review of these tests is presented.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR, and at the Institute of Physics, UMCS, Lublin.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

## ВВЕДЕНИЕ

В современных отраслях науки и техники (например, в полупроводниковой промышленности) широко используются ионные технологии. Типичным примером этого являются ионная имплантация и ионное распыление [1, 2]. Во время ионной бомбардировки мишени из твердых тел эти два процесса, как правило, протекают параллельно, т. е. кроме легирования определенными примесями одновременно происходит распыление, причем не только материала мишени, но также имплантированных ранее атомов примесей. В результате реальная доза имплантации, определяемая как количество атомов, оставшихся после облучения в мишени, всегда меньше дозы имплантации, полученной путем измерения заряда ионов, падающих на мишени. Конкуренция названных процессов приводит к тому, что количество имплантированных атомов в мишени достигает всегда только определенной дозы.

Процесс распыления меняет также предусмотренное теорией распределение ионов по глубине мишени. Поэтому знание коэффициентов распыления мишени (особенно сложных полупроводниковых соединений), а также имплантированных примесей необходимо для правильного определения дозы и глубины их проникновения внутрь облученного материала.

Имея это в виду, авторы статьи разработали и создали аппаратуру, которая дает возможность точных исследований процесса распыления твердых тел ионными пучками с энергией 20–70 кэВ. Назначением этой аппаратуры является также наблюдение за процессом насыщения имплантированных мишеней и заодно определение динамических коэффициентов распыления атомов бомбардирующего пучка, которые, как правило, зависят от величины дозы имплантации.

Хотя идея установки очень проста, но конструкция отдельных элементов аппаратуры, а также реализация измерений требовали решения ряда сложных технических проблем, без чего полученные результаты были бы искажены. В качестве примера можно привести проблемы, связанные с экстракцией вторичных ионов с поверхности образца, и вопросы, касающиеся устранения эффектов, связанных с эмиссией вторичных электронов.

Существенным шагом на пути получения правильных результатов экспериментов является также определение рабочих параметров аппаратуры и

уменьшение негативных факторов, влияние которых может исказить измерение. Поэтому процесс оптимизации этих параметров будет описан далее в статье.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка для исследования процесса распыления твердых тел под влиянием пучков ионов с энергиями 20–70 кэВ создана на основе электромагнитного сепаратора изотопов, к которому присоединена измерительная камера (рис. 1).

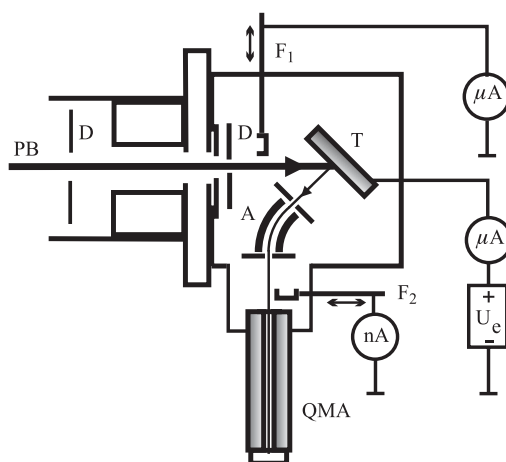


Рис. 1. Схема аппаратуры для исследования процесса распыления твердых тел: PB — пучок ионов из сепаратора изотопов; D — диафрагмы; F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> — цилиндры Фарадея; T — изучаемый образец; A — анализатор энергии ионов и электронов; QMA — квадрупольный анализатор масс

Полученный из сепаратора пучок ионов определенной энергии и массы входит в измерительную камеру через систему диафрагм D диаметром 8 мм и попадает на исследуемую мишень T, установленную под углом 45° по отношению к направлению пучка. В результате ионной бомбардировки мишень подвергается распылению, причем распыляемый материал получается в форме нейтральных атомов, положительных и отрицательных ионов. Созданная нами установка может быть использована как для измерения суммарного коэффициента распыления, так и для исследования вторичной эмиссии ионов как положительных, так и отрицательных.

Часть вторичных ионов, выбиваемых из мишени (заряженных положительно или отрицательно в зависимости от типа эксперимента), через входную щель шириной 3 мм попадает в анализатор энергии ионов А. В нашем случае анализатором энергии ионов является цилиндрический секторный конденсатор с углом отклонения ионов  $45^\circ$ , средним диаметром 75 мм и расстоянием между обкладками 10 мм. Выходная щель анализатора также имеет ширину 3 мм. Обе щели находятся на нулевом потенциале по отношению к массе прибора. Облученная мишень помещается на специальном держателе, который в зависимости от типа эксперимента может принимать потенциал  $U_e$ , положительный в случае исследования положительных ионов либо отрицательный в случае отрицательных ионов или электронов. После прохождения через анализатор пучок ионов определенной энергии попадает в квадрупольный анализатор масс QMA, с помощью которого регистрируются ионы в диапазоне 2–200 а.е.м. Между анализатором энергии А и QMA можно поместить подвижный цилиндр Фарадея  $F_2$ , с помощью которого измеряется интенсивность токов вторичных ионов, проходящих через анализатор. Все приборы, источники питания и блоки, входящие в состав электронной системы, управляются компьютером. Более точное описание некоторых отдельных элементов аппаратуры можно найти в работах [3, 4].

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ

Созданная нами аппаратура подверглась ряду тестов, как экспериментальным, так и компьютерным симуляциям с целью оптимизации не только целой системы, но и отдельных ее узлов. Оптимизация, с одной стороны, касалась электронных систем, а с другой — геометрических факторов, таких как форма и размеры отдельных электродов, которые входят в состав измерительной камеры. В настоящей статье мы ограничимся презентацией процесса оптимизации двух существенных факторов системы. Одним из них является величина экстракционного напряжения  $U_e$ , которое подается на держатель с облучаемым образцом. Это напряжение, с одной стороны, увеличивает количество вторичных ионов, извлекаемых из пространства вблизи мишени (Т), и направляет их к входной щели анализатора энергии (А). С другой стороны, увеличивается кинетическая энергия анализируемых ионов, что существенно влияет на разрешающую способность квадрупольного анализатора масс. Как известно, она ухудшается с ростом скорости попадающих в него ионов. Чтобы найти компромисс, т. е. определить оптимальную величину  $U_e$ , проведен ряд экспериментальных исследований. В качестве мишеней использовались образцы из титана и кремния. Массовый спектр титана имеет пять характерных пиков, отвечающих изотопам с массовыми числами 46–50, что удобно для определения разрешающей способности квадрупольного анали-

затора масс QMA. Массовый спектр кремния имеет три пика, отвечающие массам 28, 29, 30 а.е. Обе мишени бомбардировались пучками ионов аргона с энергиями 20–30 кэВ. В этом пределе энергии коэффициенты распыления меняются незначительно и составляют 1,6 (для Si) и 2,0 (для Ti) атомов на падающий ион аргона [5]. Плотность тока ионов, бомбардирующих мишень, установлена на постоянном уровне, а именно 0,7 мкА/см<sup>2</sup>. Измерение интенсивностей ионных токов велось с помощью цилиндра Фарадея F<sub>1</sub>, размещенного на время измерений перед держателем мишени (см. рис. 1). Чтобы определить оптимальную величину  $U_e$ , проводились измерения зависимости интенсивностей токов первичных ионов как функции напряжения экстракции. Рис. 2 показывает пример таких зависимостей. С помощью QMA измерялось также распределение энергии выбиваемых из мишени электронов (рис. 3).

Из анализа графиков следует, что при  $U_e = 60$  В практически все вторичные электроны возвращаются на мишень и только в небольшой степени могут исказить результаты измерения ионного тока, падающего на образец. Для определения оптимальных рабочих параметров аппаратуры с помощью квадрупольного анализатора масс велись измерения распределения энергии вторичных ионов для разных величин  $U_e$  в пределах 60–200 В. Типичные спектры, полученные из этих измерений, показаны на рис. 4.

Рис. 5 представляет зависимость интенсивности тока вторичных ионов, доходящих до входной щели анализатора энергии, от экстракционного напряжения  $U_e$ . Из рисунка видно, что ток вторичных ионов относительно

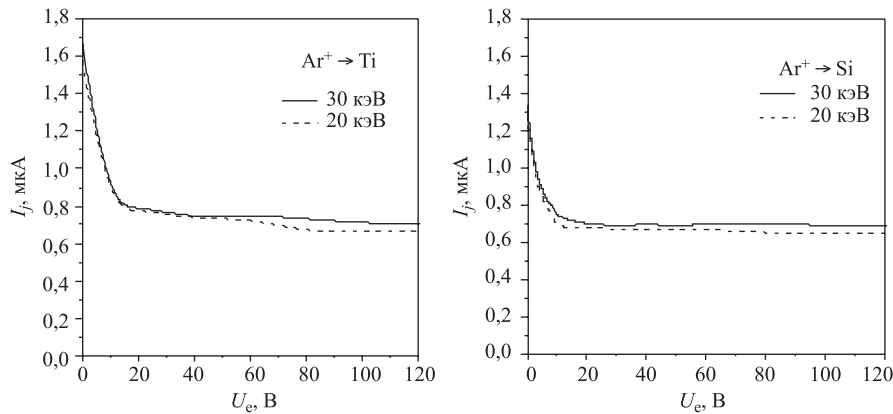


Рис. 2. Зависимость ионного тока, падающего на мишень, от экстракционного напряжения  $U_e$

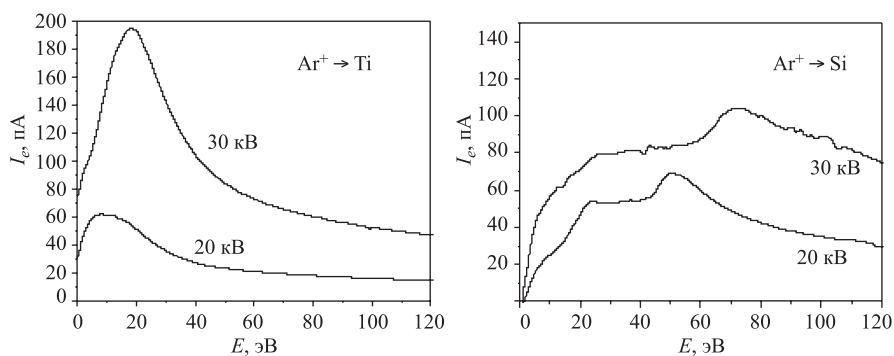


Рис. 3. Энергетическое распределение вторичных электронов, выбиваемых из образцов Ti и Si

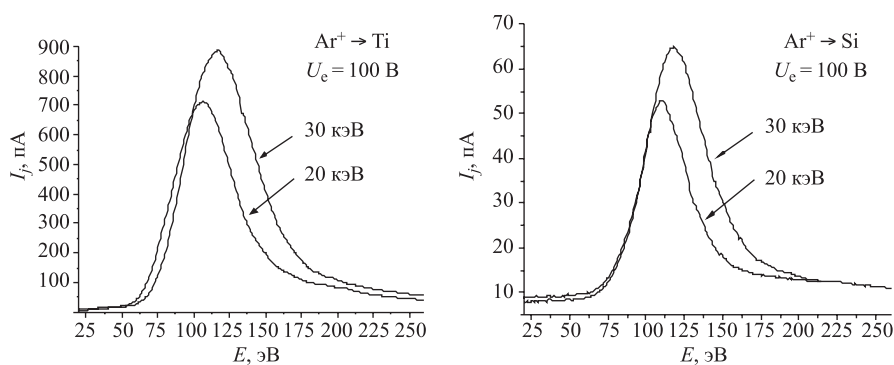


Рис. 4. Энергетические спектры вторичных ионов, выбиваемых из образцов Ti и Si под влиянием ионных пучков Ar<sup>+</sup> с энергией 20 и 30 кэВ

быстро растет с увеличением  $U_e$ , что, без сомнения, является следствием лучшей экстракции ионов из области образца.

Полученные характеристики распределения энергий вторичных ионов использовались для оценки относительных коэффициентов вторичной эмиссии ионов  $S$ . С этой целью определялась суммарная интенсивность тока вторичных ионов как поля поверхности, лежащей под кривой энергетического распределения. Такие расчеты велись для кривых распределения энергий ионов, измеряемых при  $U_e = 200$  В, поскольку при этом напряжении надо ожидать, что практически все выбиваемые ионы доходят до анализатора энергии. Результаты расчетов показаны в таблице.

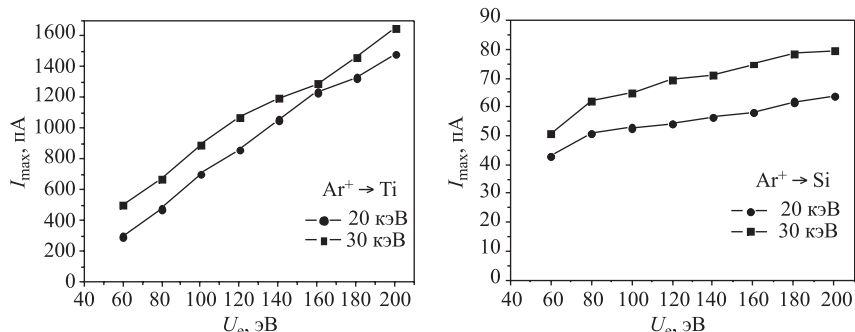


Рис. 5. Зависимость максимального тока вторичных ионов от экстракционного напряжения  $U_e$  для образцов Ti и Si

**Относительные коэффициенты вторичной эмиссии ионов для мишеней Ti и Si, бомбардируемых пучками ионов  $Ar^+$  с интенсивностью 0,7 мкА. Напряжение экстракции ионов составляло  $U_e = 200$  В**

| $E$ , кэВ | $S_{Ti}$ | $S_{Si}$ |
|-----------|----------|----------|
| 20        | 0,24     | 0,030    |
| 25        | 0,25     | 0,032    |
| 30        | 0,26     | 0,033    |

Надо подчеркнуть, что измеряемые нами коэффициенты вторичной эмиссии ионов как функции энергии падающего пучка аргона представляют собой зависимость, похожую на упомянутую выше зависимость коэффициента вторичной эмиссии от энергии ионов аргона, приведенную в работе [5], т.е. коэффициенты в рассматриваемом диапазоне энергии ионов практически постоянны.

В рамках оптимизации рабочих параметров описываемой аппаратуры были также зарегистрированы массовые спектры вторичных ионов, входящих в анализатор энергии. Эти спектры измерялись для таких же, как прежде, величин  $U_e$ . Некоторые выбранные результаты этих измерений показаны на рис. 6, 7.

Из этих рисунков видно, что рост  $U_e$  ухудшает разрешающую способность QMA. В результате измерений установлено, что удовлетворительную разрешающую способность при достаточной интенсивности токов вторичных ионов можно получить для  $U_e = 90$  В, для которой разрешающая способность составляла  $R = 185$ . Надо подчеркнуть еще раз, что определение этой величины  $U_e$  было компромиссом между двумя вышеупомянутыми параметрами, т.е. между разрешающей способностью и величиной интенсивности вторичных ионов.



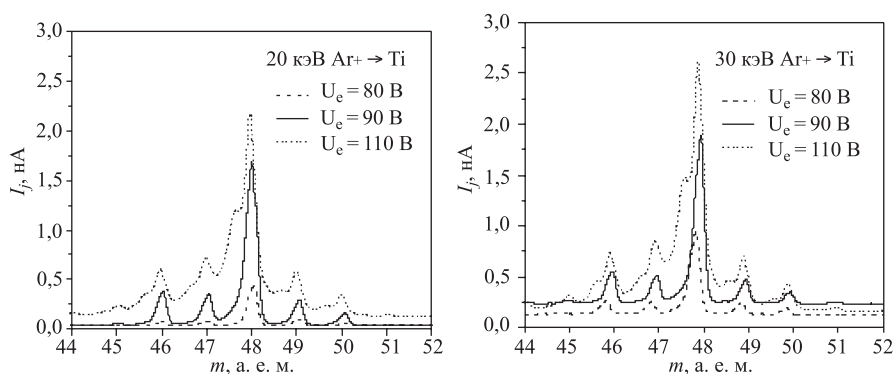


Рис. 6. Массовые спектры вторичных ионов  $Ti^+$ , полученные в результате бомбардировки образцов  $Ti$  пучками  $Ag^+$  с энергией 20, и 30 кэВ

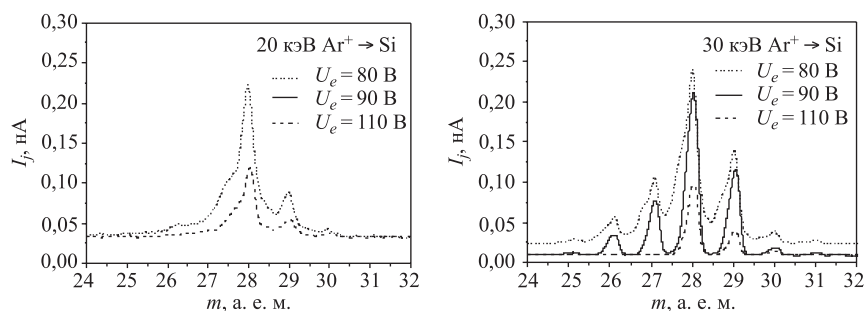


Рис. 7. Массовые спектры вторичных ионов  $Si^+$ , полученные в результате бомбардировки образцов  $Si$  пучками  $Ag^+$  с энергией 20 и 30 кэВ

## ВЫВОДЫ

Спроектирована и разработана экспериментальная установка для исследования процесса распыления твердых тел под влиянием пучка ионов средних энергий. Ряд тестов показал, что данная аппаратура вполне пригодна для исследования процессов ионного распыления практически любой комбинации ион–мишень. Из полученных данных: энергетических и массовых спектров вторичных ионов, а также характеристик замедления вторичных электронов и их энергетических спектров — следует, что на величину измеряемых токов вторичных ионов существенно влияет экстракционное напряжение  $U_e$ . Однако с увеличением этого напряжения, с одной стороны, растет интенсивность измеряемых ионных токов, а с другой — уменьшается влияние вто-

ричных электронов на точность получаемых результатов. Кроме того, рост  $U_e$  ухудшает разрешающую способность квадрупольного анализатора масс, поскольку увеличивается кинетическая энергия входящих в анализатор вторичных ионов. Определена оптимальная величина  $U_e = 90$  В, при которой величина токов является удовлетворительной ( на уровне пА) и разрешающая способность QMA находится на уровне  $R = 185$ .

В качестве тестовых измерений аппаратуры определены относительные коэффициенты вторичной эмиссии ионов, выбиваемых из мишеней Ti и Si, бомбардируемых пучками ионов  $Ar^+$  с энергиями 20, 25 и 30 кэВ. В этом пределе энергии величины этих коэффициентов практически неизменны и похожи на суммарные коэффициенты распыления.

Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке Университета Марии Кюри-Склодовской в Люблине в рамках гранта проректора по науке и гранта РФФИ № 08-02-00622.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Żuk W. Spektrometria mas i elektromagnetyczna separacja izotopów. PWN, 1980.
2. Benninghoven A., Rudenauer F. G., Werner H. W. Secondary Ion Mass Spectroscopy. New York: John Wiley & Sons, 1987.
3. Drożdźiel A., Pyszniak K., Sielanko J., Turek M., Wojtowicz A. // Rapid Commun. Mass Spectrom. 2006. V. 20(2). P. 298.
4. Pyszniak K., Drożdźiel A., Turek M., Wójtowicz A., Sielanko J. // Vacuum. 2007. V. 81(10). P. 1145.
5. Yamamura Y., Tawara H. // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1996. V. 62. P. 149.

Получено 24 октября 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 24.11.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,84. Тираж 310 экз. Заказ № 56410.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)