

# **Исследования факторов, ограничивающих применимость модели однократного резерфордского обратного рассеяния ионов: учет состава исходного пучка частиц**

## **Кибардин А.В.**

*Кибардин Алексей Владимирович / Kibardin Alexey Vladimirovich - кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра вычислительной техники, физико-технологический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

**Аннотация:** *в работе рассматриваются вопросы численного моделирования факторов, влияющих на формирование спектров резерфордского обратного рассеяния ионов в тонких пленках: состава исходного пучка ионов, энергетического распределения ионов в пучке и аппаратной функции измерительной системы.*

**Abstract:** *the work deals with the numerical modeling of factors influencing the formation of the Rutherford backscattering spectra of ions in thin films: the original structure of the ion beam, the energy distribution of the ions in the beam and the instrumental function of the measuring system.*

**Ключевые слова:** *тонкие пленки, ионы, состав ионного пучка, упругое рассеяние, энергетические спектры, аппаратная функция, математическое моделирование.*

**Keywords:** *thin films, ions, composition of the ion beam, elastic scattering, the energy spectra, the instrumental function, mathematical modeling.*

### **Учет влияния состава пучка ионов на формирование энергетических спектров обратного рассеяния ионов**

В предыдущей статье [1] мы рассмотрели модель, позволяющую эффективно описывать спектры однократного резерфордского рассеяния ионов многослойными структурами. Для исследования образцов данным методом используют электростатические ускорители (генераторы Ван-дер-Граафа). Генераторы Ван-дер-Граафа считаются наиболее исследованными и усовершенствованными ускорителями прямого действия. Преимуществами этих аппаратов считается высокая стабильность и моноэнергетичность ускоренных ионов. Ввиду этого практически не предпринималось попыток измерения энергетических спектров ионов, ускоренных на генераторе Ван-дер-Граафа. Нами была предложена методика анализа состава пучка ускоренных ионов с целью исследования влияния различных режимов формирования пучка на электростатическом ускорителе на его состав. Схема эксперимента и результаты исследований представлены в работах [2,3], здесь мы рассмотрим те результаты, которые имеют отношение к основной нашей цели – моделированию спектров обратного рассеяния. Предложенная методика позволяет выполнить прямое измерение энергетического спектра ускоренных частиц за счет уменьшения интенсивности исходного потока ионов в результате прохождения его через постоянное магнитное поле. В результате нам удалось отделить нейтральную фракцию пучка от заряженной фракции и снизить интенсивность пучка до величины, находящейся в пределах нагрузочной способности полупроводникового детектора. Пример измеренного спектра нейтральных частиц представлен на рис.1. Энергия ускоренных ионов протонов составляет 600 кэВ. На спектре выделяются два пика на энергиях 600 и 150 кэВ. В интервале 150-600 кэВ наблюдается непрерывный спектр энергий.

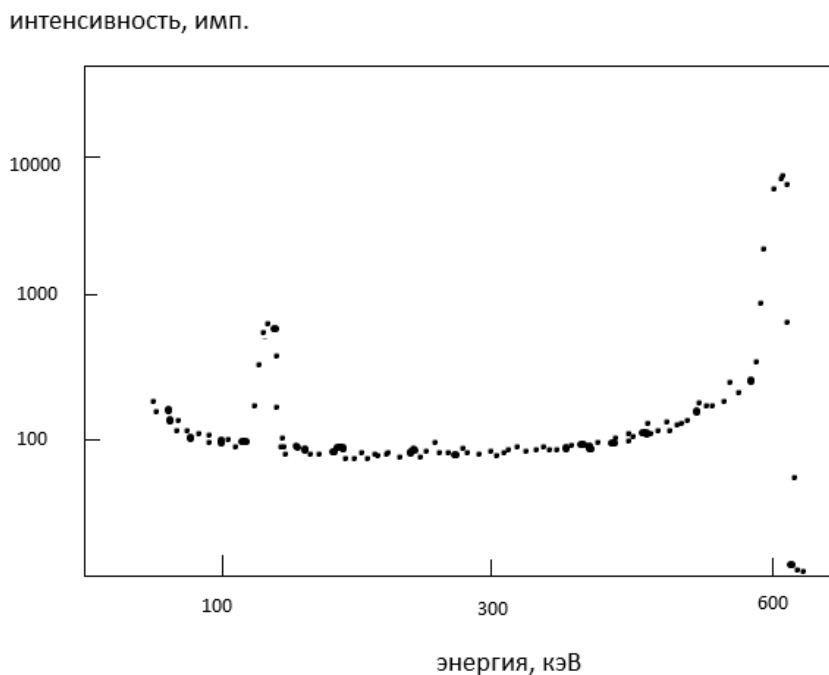


Рис. 1. Энергетический спектр нейтрального компонента пучка частиц

Пик на энергии 600 кэВ соответствует нейтральной энергетической компоненте пучка, получающейся при ускорении ионов  $H^+$ , т.е. атомарному водороду. Второй пик соответствует молекулярному водороду, получающемуся при перезарядке ускоренных ионов  $H_2^+$ , определенная доля которых всегда присутствует в высокочастотном ионном источнике. Следует пояснить, что при прохождении поворотного магнита на ускорителе вырезается фракция  $H^+$  энергией 600 кэВ и фракция  $H_2^+$ , имеющая энергию 300 кэВ. При взаимодействии с атомами остаточного газа в исследовательской камере ионы  $H_2^+$  диссоциируют на ионы  $H^+$  и атомарный водород  $H^0$ , имеющие половинную энергию от 300 кэВ, т.е. 150 кэВ. Наши исследования показали, что доля молекулярного водорода в ускоренном пучке частиц может составлять  $\sim 1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$  по отношению к протонной составляющей пучка. Непрерывный спектр в интервале 150-600 кэВ обусловлен рассеянием на малые углы и энергетическими потерями ускоренных частиц в системе коллимации пучка.

Для исследований атомпереноса в тонких пленках методом обратного резерфордского рассеяния ионов необходимо проанализировать влияние немоноэнергетичности пучка ионов на формирование спектров. При рассмотрении этого вопроса нам представляется наиболее интересным учесть вклад в образование спектров рассеяния участка энергетического спектра исходного пучка в интервале между пиками (150 и 600 кэВ). Этот вклад может быть причиной фона в энергетических спектрах рассеяния от образцов типа «легкая» подложка / «тяжелая» пленка. На рис. 2 представлены спектры резерфордского обратного рассеяния ионов от тонкой самоподдерживающейся пленки золота толщиной 0,15 мкм: полученный экспериментально и рассчитанный по методике [1] с учетом спектра исходного пучка ионов.

ИНТЕНСИВНОСТЬ, ИМП.

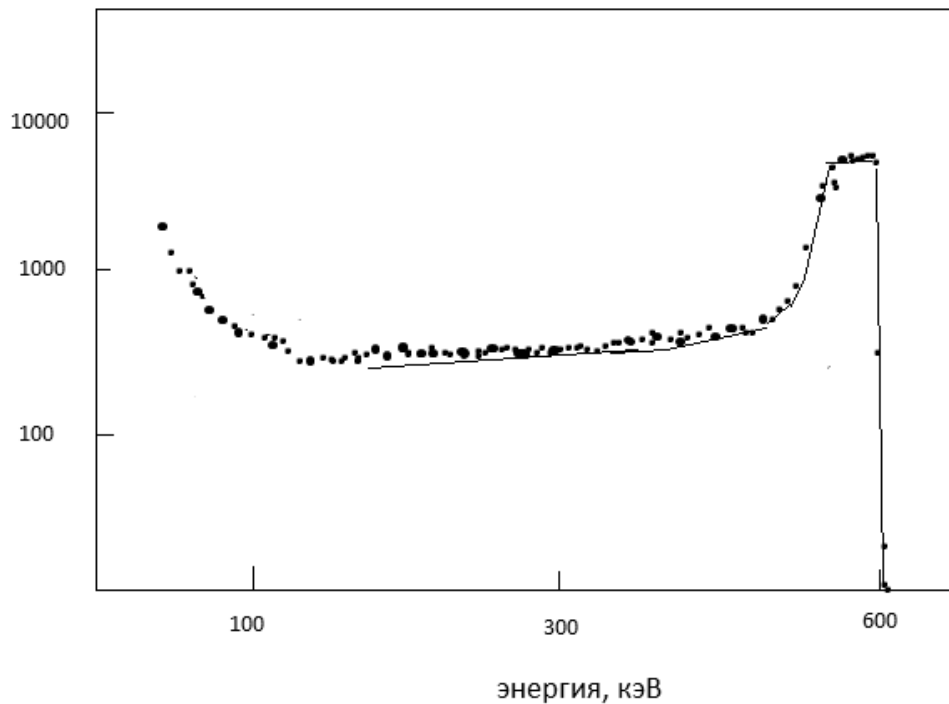


Рис. 2. Энергетические спектры обратнорассеянных протонов от самоподдерживающейся пленки золота толщиной 0,15 мкм: • эксперимент, — расчет

Компонент пучка, связанный с молекулярным водородом, дает существенный вклад в области низких энергий. Участок энергетического спектра исходного пучка частиц в интервале 150-600 кэВ также дает вклад в обратное рассеяние, которое нельзя не учитывать при анализе процессов взаимодиффузии на границе пленка-подложка. Условия формирования и транспортировки пучка могут вести к значительному увеличению доли частиц, имеющих энергии в этом интервале и, соответственно, к значительному вкладу в спектры обратного рассеяния, – что мы и наблюдали в наших исследованиях. Однако провести систематизацию такого влияния не представляется возможным, поскольку это сугубо индивидуальная характеристика каждой экспериментальной установки.

Тем не менее следует отметить, что анализ процессов взаимодиффузии атомов на границе раздела тонких пленок методом упругого рассеяния ионов на электростатических ускорителях требует учета немоноэнергетичности исходного пучка. Поэтому следует проводить измерения энергетического спектра падающих на мишень частиц с целью максимально уменьшить вклад частиц с энергиями в интервале  $[0,25E_0, E_0]$ .

#### **Учет энергетического распределения ионов при прохождении слоя вещества и аппаратной функции измерительного канала**

Для того, чтобы получить реальный спектр обратного рассеяния ионов, необходимо учесть флуктуации потерь энергии частицей из-за страгглинга  $\Gamma_s$  и конечное энергетическое разрешение измерительной системы (так называемую аппаратную функцию)  $\Gamma_0$ . Методика расчетов с учетом этих факторов описана в нашей статье [1]. Здесь уточним способы получения аппаратной функции. Ранее нами был предложен способ измерения аппаратной функции с помощью математической обработки спектра обратного рассеяния ионов от полированной мишени [4]. Однако описанная выше методика измерения энергетического распределения частиц в исходном пучке позволяет получить аппаратную функцию непосредственно: поскольку энергетический разброс частиц в пучке, ускоренном на электростатическом ускорителе очень мал и составляет 0,01-0,1%, а уширение пучка ионов за счет рассеяния на атомах остаточной атмосферы в ускорительном канале не превышает 200 эВ, то форма пиков на рис.1 определяется только аппаратной функцией измерительной установки.

#### **Литература**

1. Кибардин А.В. Численное моделирование спектров Резерфордского обратного рассеяния ионов от многослойных многокомпонентных мишеней. Проблемы современной науки и образования. 2016. №1(43). С.30-34.

2. *Bazhukov S.I., Kibardin A.V., Pyatkova T.M.* Analysis of the composition of incident hydrogen ion beams accelerated by Van der Graaf electrostatic accelerator. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1991. Т. 58. № 2. С. 242-246.
3. *Кибардин А.В.* Изменение профилей концентрации атомов в тонкопленочных структурах Me-Si при тепловом и радиационном воздействиях.: Дисс... канд. физ.- мат. наук. Екатеринбург.: УГТУ. 1996.
4. *Уфуков П.П., Кибардин А.В., Пяткова Т.М.* О простом способе определения аппаратной функции. // Тезисы докладов XII Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва). 1982. С.58