

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-ИМПЛАНТАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И МОДИФИКАЦИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.С. Камышан¹⁾, А.Е. Лагутин¹⁾, Ч. Карват²⁾

¹⁾ Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» Белгосуниверситета, ул. Курчатова 7, 220064 Минск, Беларусь

Тел.: +375-17-2126812; e-mail: Laqutin@bsu.by

²⁾ Люблинский технический университет

Разработан и создан исследовательско-имплантационный комплекс на базе электростатического ускорителя ионов ЭСУ-2 для анализа элементного состава, структуры и модификации твердотельных материалов.

Введение

Модификация приповерхностных слоев материалов ускоренными ионными пучками широко используются при изготовлении полупроводниковых приборов и интегральных схем.

Проблемы совершенствования методов элементного и структурного анализа, технологии создания материалов твердотельной электроники определяют направления разработок электрофизических комплексов на основе ускорителей частиц, использующих взаимодействие управляемых потоков высокоэнергетических ионов с твердым телом для направленного изменения его свойств. Современные исследования в области физики твердого тела, новые сферы применения аналитических методик при решении фундаментальных и прикладных задач материаловедения в качестве ряда наиболее приоритетных приложений включают: субмикронные технологии, приборы интегральной оптоэлектроники, квантовые приборы на геттероструктурах, СВЧ приборы на материалах A^3B^5 и структурах кремний-на-изоляторе, многослойные и многокомпонентные наноматериалы. Созданный исследовательско-имплантационный комплекс состоит из: 1) аналитического модуля резерфордовского обратного рассеяния с использованием электростатического анализатора энергии (ЭСА); 2) экспериментальной установки для изучения процессов взаимодействия заряженных частиц с твердым телом; 3) высокоэнергетического имплантационного модуля [1].

Исследовательско-имплантационный комплекс

В связи с возрастающей интеграцией элементов твердотельной электроники, созданием многослойных и многокомпонентных структур, развитием технологий получения наноматериалов существенно возросли требования к точности количественных методов контроля состава и распределения примесей по глубине приповерхностных слоев и наносимых тонких пленок. Как следствие, приобрели особую остроту проблемы дальнейшего совершенствования этих методов, в частности, разработки и создания спектрометров резерфордовского обратного рассеяния (РОР) с повышенным энергетическим разрешением, использующих электростатический анализатор энергии ионов.

Разработан аналитический модуль РОР с использованием ЭСА для прецизионных измерений энергетических спектров обратно рассеянных ионов, представлена ядерно-физическая методика анализа состава, структуры и пространственного распределения примесей в приповерхностных слоях твердых тел и тонких пленок с глубинным разрешением около 1 нм [2].

Создан имплантационный модуль для высокоэнергетической (200 + 1000 кэВ) имплантации ионов газов от H^+ до Ar^+ в мишени диаметром до 100 мм при диапазоне температур 20–500° С. Используя модуль решены следующие задачи: формирование высокоомных термостабильных слоев в кремнии субстехиометрической имплантацией ионов азота; разработка технологического процесса формирования межприборной изоляции на полупроводниках A^3B^5 полиэнергетической имплантацией ионов водорода; изготовление пассивных элементов интегральной оптики имплантацией ионов в диэлектрические материалы.

Представлена модернизированная экспериментальная установка для изучения процессов взаимодействия заряженных частиц с твердым телом, включая оценку влияния кристаллографической ориентации на прохождение ионов водорода через тонкие монокристаллы кремния, анализ малоуглового рассеяния ионов поверхностью мишени при скользящих углах падения, измерение потерь энергии заряженных частиц, изучение взаимодействия быстрых ионов с поверхностью диэлектрических капилляров. Установка имеет следующие характеристики: диапазон сканирования составляет 0÷7,0 град.; скорость сканирования угловых распределений не превышает 2,5 10³ град./с; измеренная угловая расходимость зондирующего пучка ± 2·10⁻² град; измеренное энергетическое разрешение не более 19 кэВ.

Результаты исследований с использованием комплекса

Обсуждаются результаты исследований с использованием разработанного исследовательско-имплантационного комплекса.

Используя аналитический модуль исследования процессы сегрегации имплантированной примеси на границе раздела кремний – оксид кремния при быстром термическом отжиге. Образцы кремния, легированного ионами мышьяка с энергией 32 кэВ и дозой 1 10¹⁵ ион/см², затем термиче-

ски окисленные (оценочная толщина SiO_2 – 4 нм), подвергались быстрому термическому отжигу в течение 10 секунд при температуре 1050°C . На рисунке 1 представлены спектр РОР с использованием ЭСА отожженного образца (а) и рассчитанный по нему профиль распределения атомов мышьяка по глубине (б). На профиле виден острый пик с максимумом на глубине около 6 нм, отсутствовавший до отжига. Рассчитанное слоевое содержание мышьяка в образце с точностью не хуже 10 % соответствует дозе легирования [3].

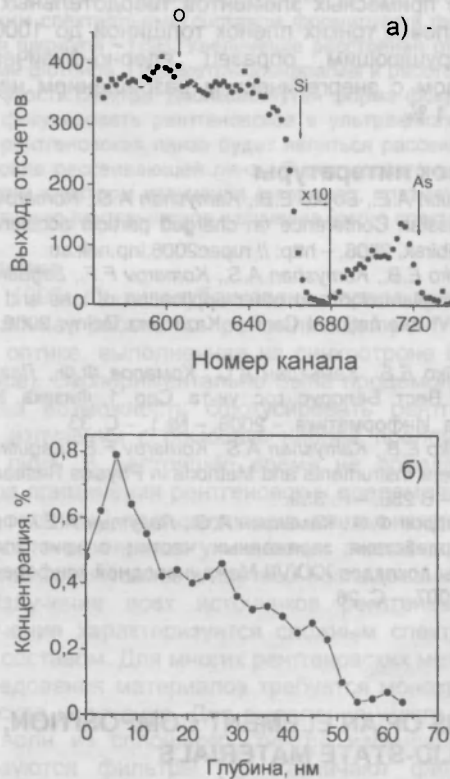


Рис.1. Энергетический спектр РОР протонов с энергией 214 кэВ в отожженном образце (а), рассчитанный по нему профиль распределения по глубине атомов мышьяка в кремнии (б)

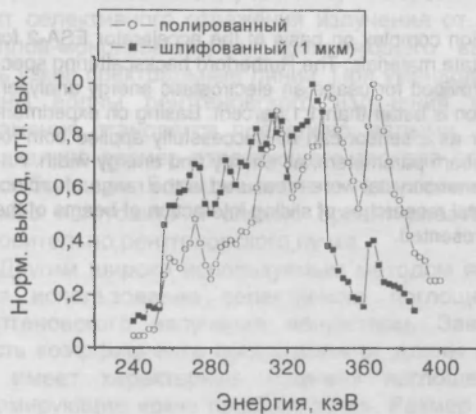


Рис.2. Энергетические спектры протонов с энергией 380 кэВ рассеянных поверхностью кремния при угле влета относительно поверхности $0,5^\circ$ и угле регистрации 1°



Рис.3. Угловые распределения протонов с энергией 380 кэВ рассеянных поверхностью кремния при угле падения $0,3^\circ$ (1) и $0,5^\circ$ (2)



угол между протонным пучком и капиллярами $0,0^\circ$

Рис.4. Угловые распределения протонов с энергией 240 кэВ после прохождения капилляров диаметром 0,5 мм и длиной 178 (1) и 65 (2) мм

С использованием экспериментальной установки изучены процессы взаимодействия протонов с поверхностью кремния при скользящих углах падения на мишень. На рисунке 2 представлен энергетический спектр, полученный для образца полированного кремния при угле падения протонов относительно поверхности $0,5^\circ$ и угле регистрации 1° , состоящий из нескольких пиков, расстояния между которыми практически не отличаются друг от друга, а амплитуды слабо уменьшаются при сдвиге в область меньших энергий. Это свидетельствует о том, что взаимодействие с мишенью имеет регулярный характер, а вид распределения рассеянных частиц по энергиям обусловлен последовательным рассеянием на (111) кристаллографических плоскостях кремния. Ухудшение качества поверхности приводит к заметной трансформации формы спектра: амплитуда поверхностного пика уменьшается более чем в два раза; сглаживаются внутренние пики, обусловленные кристаллической структурой мишени; в высокоэнергетической части спектра появляется резкая граница. На рисунке 3 приведены угловые распределения протонов с энергией 380 кэВ, отраженных полированной поверхностью кремния при углах падения $0,3^\circ$ и $0,5^\circ$. Видна су-

ущественная разница в этих распределениях и положении максимумов пиков отраженных частиц. При угле падения $0,3^\circ$ максимум выхода в угловом распределении протонов наблюдается при угле $0,48^\circ$, а при угле падения $0,5^\circ - 0,90^\circ$, что существенно меньше, чем это должно быть при зеркальном отражении падающих ионов. То же положения максимума имеет место и при больших углах падения, например, при угле падения $0,8^\circ$ максимум находится под углом $1,4^\circ$ [4].

Рассмотрены особенности прохождения быстрых протонов через диэлектрические капилляры с целью разработки новых систем преобразования, управления и транспортировки пучков заряженных частиц. Измерены угловые распределения протонов с энергией 240 кэВ (рисунок 4), прошедших через стеклянные (боросиликатные) капилляры диаметром 0,5 мм и длиной 65 и 178 мм, в диапазоне тока пучка протонов от 10^{-12} до $5 \cdot 10^{-11}$ А при углах влета протонов относительно оси капилляра от $-0,20^\circ$ до $+0,20^\circ$. Форма угловых распределений протонов, прошедших через стеклянный капилляр длиной 65 мм определяется в значительной мере однократным рассеянием заряженных частиц внутренней поверхностью капилляра. Увеличение длины капилляра до 178 мм приводит к изменению формы и ширины угловых распределений, прошедших через капилляр протонов. При нулевом угле влета в угловом распределении вместо центрального пика, обусловленного в предыдущем случае, долей частиц, прошедших через капилляр без рассеяния, имеют место два пика с минимумом в центре. Такая трансформация центральной части углового распределения обусловлена влиянием заряда, накапливающегося на внутренней поверхности капилляра, что и приводит к перераспределению центральной части пучка по углам вылета из капилляра [5].

Заключение

Созданный исследовательско-имплантационный комплекс позволяет проводить экспериментальные работы по физике взаимодействия высокоэнергетических ($200 + 1000$ кэВ) ионов газов от H^+ до Ag^+ с твердыми телами и анализировать состав, структуру и пространственное распределение примесных элементов твердотельных материалов и тонких пленок толщиной до 1000 нм неразрушающим образец ядерно-физическим методом с энергетическим разрешением не более 1,1 %.

Список литературы

1. Lagutin A.E., Boyko E.B., Kamyshan A.S., Komarov F.F. XX Russian Conference on charged particle accelerators, Novosibirsk, 2006. – <http://rupac2006.inp.nsk.su>
2. Boyko E.B., Kamyshan A.S., Komarov F.F., Lagutin A.E. // Ion implantation and other application of ions and electrons: VI International Conf. – Kazimierz Dolny, 2006. – P. 90.
3. Бойко Е.Б., Камышан А.С., Комаров Ф.Ф., Лагутин А.Е. // Вест. Белорус. гос. ун-та. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2006. – № 1. – С. 33.
4. Boyko E.B., Kamyshan A.S., Komarov F.F., Lagutin A.E. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2007. – В 256. – P. 359.
5. Комаров Ф.Ф., Камышан А.С., Лагутин А.Е. // Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: Тезисы докладов XXXVII Международной конференции. – М., 2007. – С. 26.

RESEARCH-IMPLANTATION COMPLEX FOR ANALYSIS OF AN ELEMENT COMPOSITION, STRUCTURE AND MODIFICATION OF SOLID-STATE MATERIALS

Kamyshan A.S.¹⁾, Lagutin A.E.¹⁾, Karvat C.²⁾

¹⁾ A.N. Sevchenko Institute for Applied Physical Problems of Belarussian State University, Kurchatov st. 7, 220064 Minsk, Belarus

Phone: +375-17- 2126812; e-mail: Lagutin@bsu.by

²⁾ Lublin Technical University

The purpose of work was the development of a research-implantation complex on basis of the accelerator ESA-2 for analysis of an element composition, structure and modification of solid-state materials. The Rutherford backscattering spectrometer has been designed and assembled. It has a high resolution provided for usage an electrostatic energy analyzer. The energy range of detected ions is 40 to 300 keV. The energy resolution is better than 1.1 percent. Basing on experimental results it is shown that RBS spectrometer with electrostatic analyzer as a sensor can be successfully applied both for shallow depth impurities profiling and also for measurements such ion beam parameters, as energy and energy width. Angular distributions of 380 keV protons reflected from (111) surface of Si monocrystal were measured in the range of projectiles glancing angle from 0.3° up to 0.8° . The outcomes of the experimental researches of sliding interaction of beams of the accelerated protons 240 keV with a surface of a dielectric capillary are presented.