

УДК 539.1.07, 539.216.2

КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОМЕТРОВЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ ПО ГЛУБИНЕ

Камышан А. С., Комаров Ф. Ф., Данилевич В. В., Гришан П. А.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

Разработан и изготовлен измерительный комплекс, предназначенный для количественного анализа содержания и распределения по глубине примесных атомов в приповерхностных слоях кристаллов и тонких пленок методом регистрации энергетических спектров ионов, испытавших резерфордское рассеяние на углы более $\pi/2$. В основу конструкции комплекса заложен модульно-блочный принцип. В состав модулей включены микроконтроллеры, что позволило существенно сократить элементную базу этих устройств. Проведена калибровка комплекса. Определены: энергетическое разрешение, составляющее 1,3 %, энергетическая ширина канала – 281 эВ, диапазон регистрируемых энергий от 37 до 281 кэВ, чувствительность 5×10^{14} ат/см².

Введение

В связи с процессом все возрастающей интеграции элементов твердотельной электроники, созданием многослойных структур, модификации поверхности твердых тел ионными пучками существенно возросли требования к точности количественных методов контроля примесного состава и распределению примесей по глубине приповерхностных (0,1–0,5 мкм) слоев и наносимых тонких пленок.

Среди методов послойного анализа особое место занимает метод обратного рассеяния быстрых легких ионов, в основе которого лежит облучение образца пучком быстрых ионов с последующей регистрацией энергетических спектров ионов, испытавших упругое рассеяние на большие углы.

Основным достоинством этого метода является возможность определять профили распределения концентрации атомов без разрушения образца. Одновременно можно определять содержание нескольких химических элементов в образце.

Модернизация этого метода с целью существенного улучшения энергетического разрешения позволит поднять точность анализа по глубине исследуемых объектов до нескольких нанометров.

Состав измерительного комплекса

В основу функционирования разработанного комплекса для элементного анализа примесного состава твердотельных материалов положен принцип регистрации и математической обработки энергетических спектров обратного рассеяния ионов.

При измерении энергетических спектров заряженных частиц с использованием газовых или твердотельных детекторов одним из основных измерительных узлов является анализатор амплитуд импульсов.

Это связано с тем, что амплитуда импульса на выходе вышеуказанных типов детекторов прямо пропорциональна выделенной в них энергии и задачей измерения является построение зависимости скорости счета (количества зарегистрированных импульсов в единицу времени) от их амплитуды, т.е. энергии частиц.

В случае использования электростатического анализатора энергии ионов (ЭСА) измеряется скорость счета в зависимости от напряжения питания ЭСА.

При фиксированном питании ЭСА вырезает из спектра полосу, ширина которой (ширина канала) определяется конструкцией анализатора. Из курса общей физики известно, что движение заряженных частиц в однородных электростатических полях неизбежно сопро-

вождается изменением энергии иона. Поэтому для получения преломляющей системы, не меняющей энергии ионного пучка, используется неоднородное поле цилиндрического конденсатора. На рисунке 1 приведен схематический чертеж ЭСА.

Так как потенциал, подаваемый на обкладки цилиндрического конденсатора, прямо пропорционален энергии частицы, двигающейся по окружности с радиусом r_0 , то коэффициент пропорциональности определяется только геометрическими размерами конденсатора, то есть:

$$U_{\text{ЭСА}} = 2U_{\text{оде}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right),$$

где $U_{\text{уск}}$ – ускоряющий потенциал ускорителя ионов, r_1 и r_2 – радиусы внутреннего и внешнего электродов конденсатора соответственно.

Секторное электрическое поле может фокусировать по направлению ионный пучок определенной энергии с малым углом раствора при любых значениях угла поворота пучка Φ_e . Для построения хода лучей необходимо принять, что угол сектора равен $\Phi_e / 2^{0,5}$, а радиус кривизны траектории сектора равен $r_0 / 2^{0,5}$. Данная система эквивалентна оптической линзе в сочетании с призмой, преломляющий угол которой равен $\Phi_e / 2^{0,5}$.

Таким образом, задавая значения r_0 , r_2 , r_1 и Φ_e , получим расстояние от границ сектора действия электростатического поля до места установки входной и выходной диафрагм, а также коэффициент пропорциональности между кинетической энергией частицы и потенциалом, подаваемым на пластины анализатора.

Энергетическое разрешение ЭСА определяется выражением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{s_1 + s_2}{r_0}, \tag{1}$$

где s_1 , s_2 – ширины входной и выходной диафрагм, соответственно; r_0 – радиус центральной траектории движения ионов в ЭСА.

Конструктивно ЭСА состоит из трех узлов: входного переходника, корпуса с электродами и блока детектирования.

Таким образом, основные отличия при измерении энергетического спектра заряженных частиц при использовании ЭСА по сравнению с твердотельными и газовыми спектрометрическими детекторами заключаются в следующем:

- 1) электростатический анализатор энергии ионов регистрирует частицы определенной энергии интенсивметром, а не анализатором импульсов;
- 2) для реализации измерения спектра требуется прецизионный, регулируемый с малым шагом, высоковольтный источник питания;

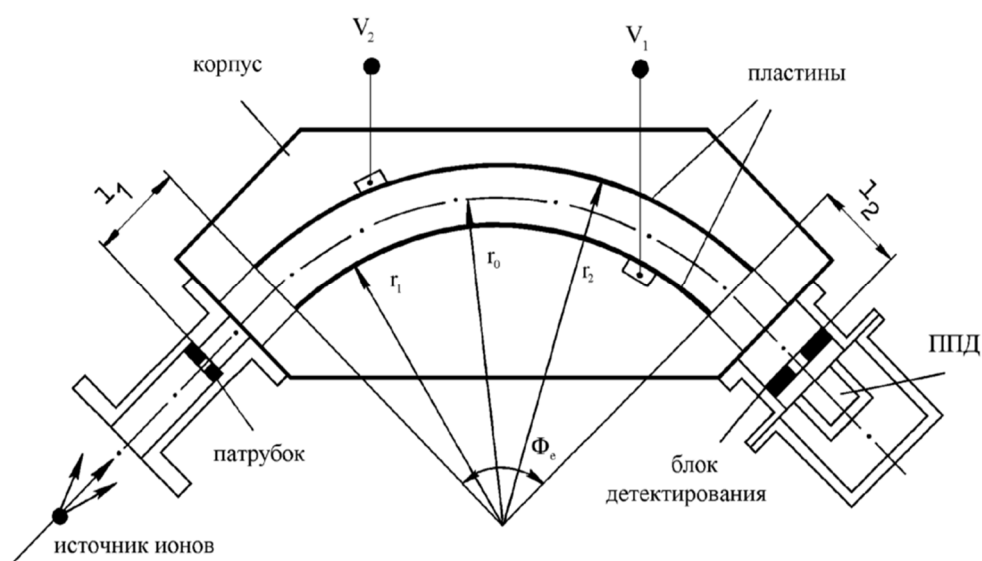


Рисунок 1 – Схема ЭСА

3) нормировка натекающего за счет ионного тока пучка на мишень заряда в случае ЭСА должна проводиться для каждого канала, что обусловлено слабой светосилой и показанным измерением спектра, на что требуются большие затраты времени измерений, в течение которых колебания тока ионного пучка могут быть достаточно большими (более 1 %).

В состав комплекса входят: ионопровод с системой коллимации пучка; электростатический анализатор энергии ионов; вакуумная камера с гониометром, на котором установлен держатель образца; система регистрации и управления. На рисунке 2 приведена структурная блок-схема аналитического модуля.

Функционально электрическая часть комплекса делится на две подсистемы – регистрации и управления.

Первая из них составляет основу информационно-измерительного комплекса. Она включает в себя объединенные локальной информационной шиной (системной магистралью): БУС2-97 – спектрометрический усилитель; МОД – модуль программируемого одноканального дискриминатора; МИ – модуль программируемого интенсивметра; ИП – источник питания подсистемы.

Подсистема управления включает в себя два программируемых модуля высоковольтных источников питания МВИП (до 7,5 кВ) и источник питания ИП.

Связь подсистем с управляющей персональной ЭВМ реализуется через интерфейс USB при помощи концентратора.

Предусмотрена возможность подключения модулей высоковольтных источников и системного контроллера подсистемы регистрации непосредственно к USB портам ПЭВМ.

Калибровка измерительного комплекса

Для калибровки измерительного комплекса, то есть определения соответствия значений подаваемого на ЭСА высокого напряжения энергии регистрируемых ионов, имеются два варианта.

Первый заключается в следующем. В качестве мишени используется образец, представляющий собой пленку достаточно тяжелого металла, напыленную на подложку из более легкого материала. Затем измеряются энергетические спектры рассеянных пленкой ионов

при четырех-пяти значениях энергии падающего на образец ионного пучка и проводится оценка соответствия между положением точки на половине высоты высокоэнергетической границы измеренного спектра и значением потенциала, подаваемого на анализатор.

Разность между положениями этих точек на шкале энергий при разных значениях энергии анализирующего пучка, деленная на разность потенциалов, соответствующих этим точкам, даст искомым коэффициент перехода со шкалы потенциалов на электродах ЭСА в шкалу энергий.

Во втором способе при фиксированной энергии измеряются спектры от нескольких образцов, на которые напылены пленки металла с разным Z , например, Au и Cr, и определяются расстояния между границами спектров в единицах энергии ионов ΔE и потенциала ΔV , подаваемого на анализатор. Разделив ΔE на $\Delta V / 7,5$, определяем энергетическую ширину канала анализатора, так как 7,5 В – минимальный шаг, с которым может изменяться высокое напряжение на ЭСА. Эта операция проводится для трех-четырех значений энергии. После этого ширина канала определяется как среднее этих измерений.

Второй способ предпочтительнее, так как два измерения ведутся при фиксированной (с точностью установки) энергии и в слагаемые ошибок войдет только одно значение погрешности установки энергии, а не два, как в первом случае. При калибровке анализатора мы использовали второй способ.

В качестве мишеней использовались кремниевые пластины с напыленными на них пленками золота и хрома толщиной 200 и 300 Å соответственно. Значения энергии испытавших однократное рассеяние на поверхности пленок ионов определялись по формуле:

$$\Delta E(\theta) = E \left\{ 1 - \left[\frac{M^2}{(M + M_A)} \right] \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{M_A}{M} \right)^2 - \sin^2 \theta} + \cos \theta \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

где ΔE – потеря энергии иона, рассеянного на угол θ , при одном столкновении; E – энергия налетающих ионов; M – масса атомов мишени; M_A – масса анализирующих ионов.

Для нашего случая (анализирующие ионы – протоны, угол рассеяния $\theta = 108^\circ$) получим следующие значения энергии ионов, рассеян-

Средства измерений

ных атомами золота, хрома и кремния: $E^{Si}=0,878E$; $E^{Au}=0,9801E$; $E^{Cr}=0,9266E$.

С другой стороны, граничная энергия спектра определяется как $n\Delta U$, где n – число каналов, ΔU – ширина канала в эВ.

Таким образом:

$$E^{Au} - E^{Cr} = (K_1 - K_2)E = (n_1 - n_2)\Delta U, \quad (3)$$

где K_1 и K_2 – кинематические факторы исследуемых мишеней, откуда:

$$\Delta U = \frac{(K_1 - K_2)E}{n_1 - n_2}. \quad (4)$$

Подставляя значения K_1 и K_2 для Au и Cr, получим:

$$\Delta U = \frac{0,0535 E}{n_1 - n_2}. \quad (5)$$

Изменение энергии пучка дает возможность определить зависимость ширины канала от энергии. На рисунках 3 и 4 приведены экспериментальные спектры от пленок золота и хрома на кремнии для энергий пучка протонов 240 кэВ.

Такие же спектры были получены для энергий протонов 190 кэВ, 220 кэВ, 260 кэВ, 280 кэВ. Во всем измеренном диапазоне энергий регистрируемых рассеянных ионов ширина канала постоянна и составляет 281 ± 5 эВ. Для определения энергетического разрешения всего спектрометрического тракта, включая анализатор ЭСА, воспользуемся рисунком 3.

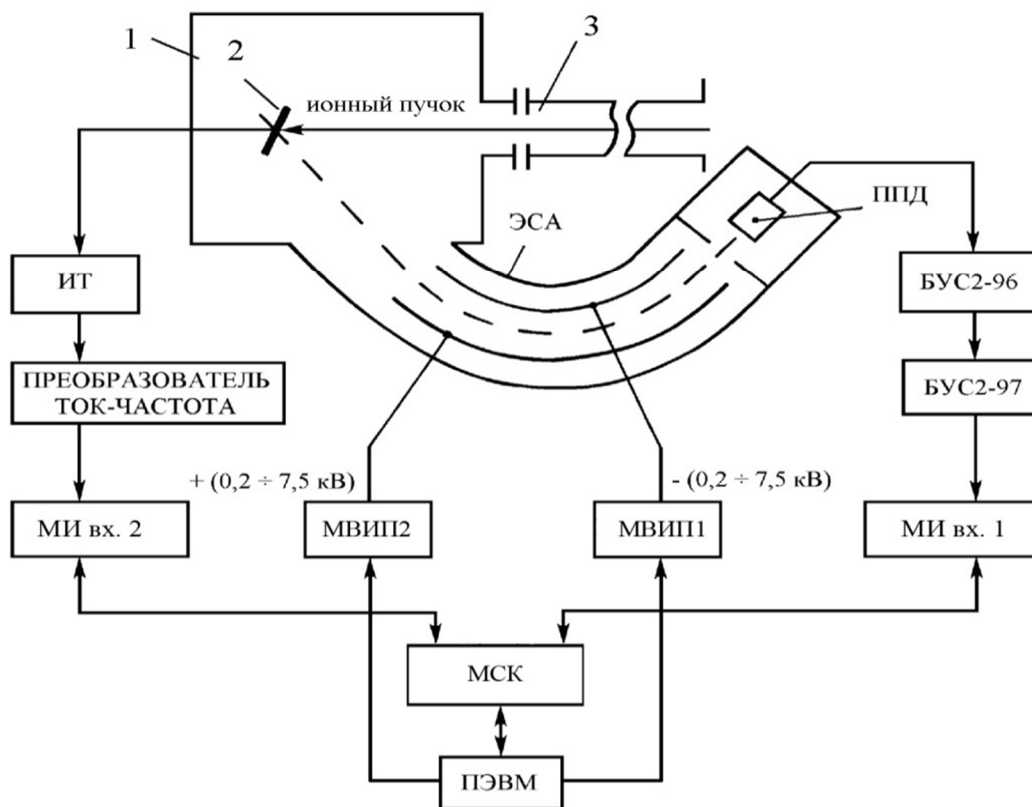


Рисунок 2 – Структурная блок-схема аналитического модуля: ЭСА – электростатический анализатор; ППД – полупроводниковый детектор; БУС2-96 – предварительный блок усиления спектрометрический; БУС2-97 – основной блок усиления спектрометрический; МИ – модуль программно-управляемого интенсивметра; МВИП – модуль программно-управляемого высоковольтного источника питания; ИТ – измеритель тока; МСК – модуль системного контроллера; 1 – вакуумная камера; 2 – образец; 3 – ионопровод

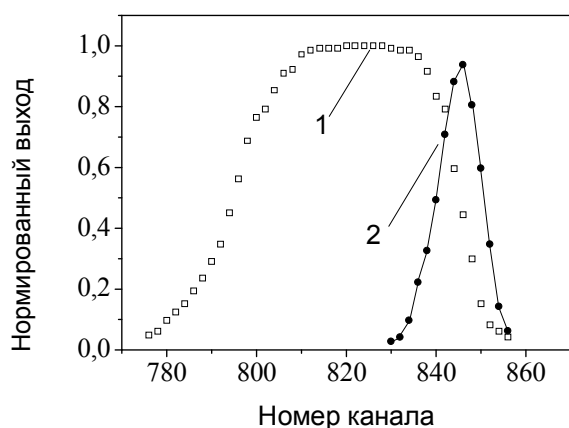


Рисунок 3 – Энергетический спектр обратно рассеянных протонов с энергией 240 кэВ пленкой Au (1 – спектр, 2 – производная от края спектра соответствующего однократному рассеянию атомами поверхности)

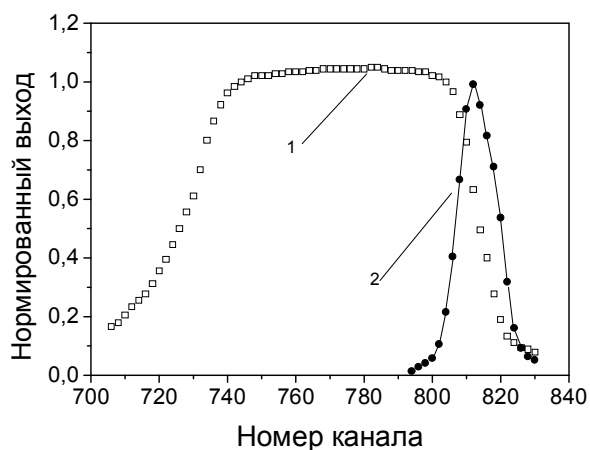


Рисунок 4 – Энергетический спектр обратно рассеянных протонов с энергией 240 кэВ пленкой Cr (1 – спектр, 2 – производная от края спектра, соответствующего однократному рассеянию атомами поверхности)

Разрешение определяется крутизной спада высокоэнергетической границы спектра, которая соответствует однократному рассеянию падающих на мишень ионов атомами поверхности и приповерхностного слоя толщиной в несколько десятков Å . За его величину принимается ширина пика производной dN/dE на полувысоте.

На рисунках 3 и 4 приведены эти производные. Таким образом, измеренные ширины производных от края спектров, соответствующих однократному рассеянию атомами поверхности для пленок Au и Cr, соответственно равны: $\Delta E_{Au}=3,1$ кэВ (1,3 %) и $\Delta E_{Cr}=3,9$ кэВ (1,6 %). Отличие в величине энергетического разрешения обусловлено различным качеством поверхности пленок золота и хрома.

Выводы

1. Разработан и изготовлен измерительный комплекс, предназначенный для количественного анализа содержания и распределения по глубине примесных атомов в приповерхностных слоях кристаллов и тонких пленок методом регистрации энергетических спектров ионов, испытавших резерфордовское рассеяние на углах более $\pi/2$.

2. В состав комплекса, построенного по модульно-блочному принципу, входят блоки: ЭСА, мишенной камеры, регистрации и управления. Блок регистрации состоит из модулей: дискриминатора, интенсиметра, измерителя тока, низковольтных источников питания блока регистрации. Блок управления состоит из модулей высоковольтных источников питания ЭСА и ПЭВМ. В состав модулей дискриминатора, интенсиметра и высоковольтных источников питания ЭСА входят микроконтроллеры, что позволило существенно сократить элементную базу этих устройств.

3. Проведена калибровка комплекса, в процессе которой определены:

- энергетическое разрешение, равное 1,3 %, что соответствует разрешению по глубине для золота 3 нм;
- энергетическая ширина канала – 281 эВ;
- диапазон регистрируемых энергий от 37 до 281 кэВ;
- диапазон регистрируемых элементов от Al до Au;
- чувствительность 5×10^{14} ат/см².

Данная работа выполнялась в рамках задания научно-технической программы «Эталонные и научные приборы» подпрограмма «Научные прибор».

Kamyshan A. S., Komarov F. F., Danilevich V. V., Grishan P. A.

Complex for elemental analysis of subsurface layers with nanometer depth resolution

A measuring complex for quantitative analysis of element contents and distributions of doping atoms in subsurface layers of crystals as well as in thin films by means of the registration of energy spectra of ions scattered to angles higher than $\pi/2$ has been designed and fabricated. The complex construction is based on a module-bloc principle. This complex includes microcontrollers which enables us to shorten elemental base of these devices. The measured energy resolution amounts to 1,3 %, energy width of one channel amounts to 281 eV, a range of registered energies amounts 37 to 281 keV, and method sensitivity amounts to 5×10^{14} at/cm².

Поступила в редакцию 08.09.2010.