

ЯДЕРНЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ МИКРОЗОНД: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В МИРЕ, ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Г. Пономарев

Институт прикладной физики Национальной академии наук Украины, ул. Петропавловская, 58, 40030, Сумы, Украина, тел.: +38 0542 333018, e-mail: ponom@ipflab.sumy.ua

Рассмотрены физические принципы ядерного сканирующего микронзонда. Дан анализ современного состояния микронзондовых установок, приведены параметры разрешения и чувствительность методов микроанализа. Проведен обзор областей применения микронзондов. При рассмотрении перспектив развития аппаратных комплексов ядерного сканирующего микронзонда уделено внимание направлениям улучшения разрешающей способности и системам сбора информации из процессов взаимодействия ионов сфокусированного пучка с атомами исследуемых образцов.

Введение

Проведение исследований различных свойств материалов и объектов, структурированных в микро- и нано-размерных масштабах, а также возможность фабрикации таких малоразмерных структур, является одним из приоритетных направлений современной науки и технологий. К одним из сравнительно новых аппаратных комплексов, предназначенных для исследований микроструктуры и элементного состава образцов и протонной пучковой литографии, относится ядерный сканирующий микронзонд (ЯСМЗ), в котором используется сфокусированный пучок легких ионов (ионов водорода или гелия) с энергией нескольких МэВ [1]. Такой пучок, двигаясь в исследуемом образце, претерпевает лишь незначительное поперечное расширение и проникает на глубину до нескольких десятков микронметров, при этом тормозной фон от вторичных электронов имеет очень низкий уровень. Поэтому пространственное разрешение в ЯСМЗ определяется размерами зонда на поверхности образца, а чувствительность микроанализа ряда ядерно-физических методов находится на уровне 1 ppт. Это позволяет исследовать приповерхностные слои толстых образцов без значительного уменьшения пространственного разрешения и чувствительности [2]. В настоящее время ЯСМЗ нашел широкое применение в различных направлениях исследований: в материаловедении, микроэлектронике, геологии, ботанике и биофизике, археологии и исследованиях предметов искусства, окружающей среды, микроимплантации, технологии фабрикации 3-х мерных микро- и нано-размерных структур и др. [3].

Современное состояние ЯСМЗ

В большинстве современных установок ЯСМЗ [4-7] ускорение пучка ионов до энергии нескольких МэВ осуществляется с помощью одноконечных или тандемных электростатических ускорителей производства голландской компании HVEE [8]. Отличительной особенностью этих ускорителей является малый относительный энергетический разброс ионов в пучке ($\sim 10^{-5}$), низкий уровень вибраций и сравнительно высокая яркость пучка. Магнитная жесткость ионного пучка на выходе из ускорителя значительно выше магнитной жесткости электронного пучка и пучка тяжелых ионов низких энергий. Поэтому методы и устрой-

ства формирования этих пучков, разработанные для аппаратных комплексов растровых электронных микроскопов (РЭМ) и вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), здесь неприемлемы. Как правило, в ядерном микронзонде применяются зондоформирующие системы (ЗФС) на основе мультиплетов магнитных квадрупольных линз, которые не обладают аксиальной симметрией и имеют более высокие аберрации по сравнению с системами формирования пучка в РЭМ и ВИМС. Общая схема ЯСМЗ показана на рис.1.



Рис. 1. Общая схема ЯСМЗ [3]

Наилучшее разрешение ЯСМЗ, полученное в режиме микроанализа, $0,29 \times 0,45 \text{ мкм}^2$ при токе пучка протонов около 50 пкА [4], которое позволяет получать двумерное распределение элементов с помощью детектирования характеристического рентгеновского излучения (PIXE). Применение матричных детекторов PIXE дает возможность улучшить чувствительность до уровня $< 1 \text{ ppт}$ [9]. В силу того, что энергетические потери ионов пучка при взаимодействии с атомами исследуемого образца с высокой точностью могут быть определены за счет детектирования обратно рассеянных ионов (RBS) или γ -излучения из ядерных реакций (NRA), то существует возможность определения распределения элементов по глубине. Разрешение в этом случае зависит от энергетического разрешения спектрометров и может достигать нескольких монослоев.

Другой класс методов микроанализа, для которых ток пучка достаточен на уровне $0,1 \dots 1,0 \text{ фА}$, включает сканирующую трансмисси-

онную ионную микроскопию (STIM), измерение заряда индуцированного ионным пучком (IBIC) в полупроводниках и эффекты вызванные одиночными событиями (SEE - Single Event Effect). Для этого класса методов полученное разрешение находится на уровне 40 нм [5,10].

Области применения ЯСМЗ

Классическим приложением ЯСМЗ является определение распределения микропримесей в материалах различного происхождения, включая биологические объекты. Благодаря высокой чувствительности методов микроанализа, таких как PIXE, NRA, RBS, удается определять малые концентрации элементов в локальных зонах с разрешением ~ 1 мкм. К этому типу задач относятся определение зон сегрегации и выделения микропримесей в конструкционных материалах в условиях эксплуатационных нагрузок. Повышенная локальная концентрация некоторых элементов в биологических образцах дает основание судить о факторах определяющих различные болезни [11]. Достаточно эффективно ЯСМЗ применяется для геологических образцов [12]. Методы, RBS и ERDA (elastic recoil detection analysis) наиболее распространены и дают высокую точность при анализе профилей распределения элементов по глубине, включая содержание водорода и гелия в приповерхностных слоях исследуемых образцов. Для общепринятых полупроводниковых детекторов заряженных частиц разрешение этих методов по глубине ~ 10 нм, а для методов детектирования, основанных на специализированных спектрометрах, разрешение достигает ~ 1 Å. Метод IBIC наибольшего развития получил в 1990-х годах для исследования устройств микроэлектроники, который дает информация о распределении дефектов в полупроводниковых детекторах излучения, солнечных элементах и т.д. [13]. В этом методе в полной мере используются особенности прохождения легких ионов ускоренных до энергий нескольких МэВ в полупроводниковых материалах и изоляторах. Наибольший интерес, связанный с методами, основанными на применении одиночных ионов (SEE), был вызван в связи с развитием применения космических аппаратов как гражданского, так и военного назначения. Среди космического излучения наиболее опасными являются высокоэнергетичные частицы способные проникать на достаточную глубину в устройства микроэлектроники. Такого рода воздействие приводит к целому ряду эффектов, которые могут вызывать сбои работы устройства либо к полному его выходу из строя. Поэтому при разработке устройств микроэлектроники необходимо учитывать их радиационную устойчивость, что и вызывает определенный интерес к экспериментальному моделированию этих процессов с применением ЯСМЗ. Другое направление исследований с применением режима одиночных ионов, которое в настоящее время имеет широкое распространение, связано с радиационной биологией. Так, например, в Сюррее, Англия, создан уникальный специализированный аппаратный комплекс на базе ЯСМЗ, предназначенный для реализации проекта по исследованию раковых

клеток [14]. Первые работы, посвященные прямому экспонированию протонным пучком (PBW) для модификации материалов с целью создания малоразмерных 3D структур, были опубликованы в конце 1990-х годов. В этих работах продемонстрировалась возможность применения сфокусированных пучков протонов с энергией 2 МэВ для создания микрокомпонент, также был отмечен ряд физических принципов, которые позволяли рассматривать такое применение как перспективную технологию для создания нанокомпонент. Одним из преимуществ технологии PBW является возможность получения нанокомпонент с высоким аспектным отношением (160:1), что позволяет рассматривать такую структуру как существенно трехмерную. Экспериментально установлено, что шероховатость боковых поверхностей находится в пределах 3...7 нм в зависимости от типа резистивного материала и алгоритма облучения. Эта характеристика важна в приложениях, где нанокомпоненты используются в качестве каналов для течения жидкости и при создании наностампов (nanoimprint). Важной характеристикой является также величина призматичности боковых стенок. Было показано, что благодаря прямолинейности траектории протонов в резистивном материале угол боковой стенки с поверхностью составляет $89,5^\circ$. В работе [15] получена структура в виде отдельно стоящей линии с характерной шириной 22 нм, показанная на рис. 2.

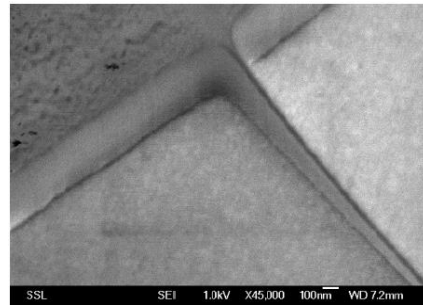


Рис. 2. Изображение отдельно стоящей линии, полученной экспонированием сфокусированным пучком H_2^+ с энергией 2 МэВ

Перспективы развития ЯСМЗ

Развитие ЯСМЗ связано с повышением его разрешающей способности и усовершенствованием системы сбора данных. Сравнение яркости штатных источников ионов в электростатических ускорителях с яркостью электронных пушек показывает, что ионные источники имеют яркость на два-четыре порядка меньшую, чем электронные пушки в РЭМ. В настоящее время проведен ряд исследований и разработан геликоновый ВЧ-источник ионов, стендовые испытания которого показали, что его яркость практически на порядок превышает действующие аналоги [16]. По мере разработки новых высокояркостных источников ионов возникает потребность в исследованиях оптики ЗФС. В работе [17] предложен новый тип ЗФС со свободными параметрами, который позволяет увеличить коэффициенты уменьшения в квадрупольных системах на порядок. Для таких

систем разработан новый тип квадрупольных линз в виде интегрированного дублета [18]. Для создания условий коммерческой привлекательности ЯСМЗ разработана концепция компактной установки на базе иммерсионной ЗФС [19]. Однако при уменьшении размеров зонда плотность тока не может быть увеличена до уровня, когда будут наблюдаться радиационные повреждения исследуемых материалов и радиационно-стимулированная диффузия микроэлементов. Поэтому будет наблюдаться уменьшение выхода вторичных продуктов взаимодействия ионов пучка с атомами исследуемого образца и следовательно должен быть увеличен телесный угол детекторов без уменьшения их эффективности. Выше уже упоминались матричные детекторы PIXE, которые являются одним из решений этой задачи. Кроме новых типов детекторов необходимо разрабатывать управляющие электронные системы в виде специализированных процессоров, которые позволили бы в реальном масштабе времени обеспечивать сбор и обработку этого огромного количества информации.

Заключение

Рассмотрение физических принципов ядерного сканирующего микрозонда показывает, что, несмотря на сложность установки, особенности прохождения сфокусированных пучков легких ионов МэВ-ных энергий обладают рядом преимуществ перед аналогичными установками РЭМ и ВИМС, сочетая в себе высокую чувствительность, широкий спектр неразрушающих методов количественного анализа толстых образцов. Наиболее часто ЯСМЗ применяется для получения информации о распределении микропримесей в приповерхностных областях материалов на глубинах ~10 мкм и дефектной структуры полупроводников. В настоящее время вызывают особый интерес режимы одиночных ионов в исследованиях устройств микроэлектроники и живых клеток. Одним из новых приложений ЯСМЗ является экспонирование протонным пучком резистивных материалов, что можно отнести к прямым литографическим методам фабрикация наноструктур с высоким аспектным отношением. Однако стоит

отметить, что разрешающая способность и размеры ЯСМЗ пока значительно уступают установкам, использующим пучки заряженных частиц, РЭМ и ВИМС. Поэтому ведутся исследования направленные на улучшение этих параметров.

Список литературы

1. Мордик С.Н., Пономарев А.Г., Сторижко В.Е., Сулкио-Клефф Б. // ВАНТ, Серия: Физика ядерных реакторов. – 2002. - выпуск 1/2. - С. 239.
2. Johansson S.A.E., Campbell J.L., Malmqvist K.G. Particle-Induced X-Ray Emission Spectrometry (PIXE). - John Wiley and Sons Inc., New York, - 1996. – 451 p.
3. Breese M.B.H., Jamieson D.N., King P.J.C. Materials Analysis using a Nuclear Microprobe. - John Wiley and Sons Inc., New York, - 1995. – 428 p.
4. Butz T., Flaggmeyer R.-H., Heitmann J. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2000. – Vol. 161-163 - P. 323.
5. Watt F., van Kan J.A., Rajta I. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2003. - Vol. 210. - P. 14.
6. Kirkby K.J., Grime G.W., Webb R.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2007. – Vol. 260. - P. 97.
7. Barberet Ph., Incerti S., Andersson F. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2009. – Vol. 267. - P. 2003.
8. Mous D.J.W., Haitsma R.G., Butz T. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 1997. – Vol. 130. - P. 31.
9. Ryan C.G., Kirkham R., Siddons D.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2010. – Vol. 268. - P. 1899.
10. Spemann D., Reinert T., Vogt J. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2002. - Vol. 190. - P. 312.
11. Barapatre N., Morawski M., Butz T. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2010. - Vol. 268. - P. 2156.
12. Ryan C. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2004. – Vol. 219-220. - P. 534.
13. Breese M. B. H., Vittone E., Vizkelethy G., Sellin P.J. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2007. - Vol. 264. - P. 345.
14. Kirkby K.J., Grime G.W., Webb R.P. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2007. – Vol. 260. - P. 97.
15. van Kan J. A., Bettiol A. A., Watt F. // Nano Lett. – 2006. – Vol. 6, No. 3. – P. 579.
16. Miroshnichenko V., Mordyk S., Shulha D. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2007. – Vol. 260. - P. 39.
17. Ponomarova A.A., Melnik K.I., Vorobjov G.S., Ponomarev A.G. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2011. - doi:10.1016/j.nimb.2011.02.025.
18. Rebrov V.A., Ponomarev A.G., Palchik V.K., Melnik N.G. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2007. - Vol. 260. - P. 34.
19. Ignat'ev I.G., Magilin D.V., Miroshnichenko V.I. et al. // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2005. - Vol. 231. - P. 94.

NUCLEAR SCANNING MICROPROBE: STATE OF THE ART, APPLICATIONS AND PROGRESS TRENDS

A.G. Ponomarev

Institute of Applied Physics National academy of sciences of Ukraine, Petropavlovskaja Str., 58, 40030, Sumy, Ukraine, tel.: +38 0542 333018, e-mail: ponom@iplab.sumy.ua

The physical principles of nuclear scanning microprobe are considered. The analysis of state of the art of the microprobe setup from point of view of its spatial resolution and sensitivity of microanalysis techniques is given. The regions of nuclear microprobe applications are reviewed. The ways of spatial resolution and data acquisition system improvement under consideration of microprobe setup progress trends are considered.