1982 г. Декабрь *Том 138, вып. 4*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

БИБЛИОГРАФИЯ

621.384.8(049.3)

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ВТОРИЧНЫХ ИОНОВ

Secondary Ion Mass Spectrometry. SIMS — III: Proccedings of the III International Conference / Ed. A. Benninghoven, J. Giber, J. Laszlo, M. Riedel, H. W. Werner.— Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1982.— 444 p.— (Springer Series in Chemical Physics. V. 19).

Бурное развитие физики твердого тела и ее величественного детища — полупроводниковой микроэлектроники — вызвало к жизни целый спектр новых методов и адекватных средств исследований. Заметное место среди них занимает масс-спектрометрия вторичных ионов (МСВИ). В классическом варианте масс-спектрометрия основана на создании ионов, разделении их по массам во внешних полях и регистрации токов массовых компонент. Для получения ионов в обычном ионном источнике необходимо иметь в нем анализируемое вещество в газовой фазе. Однако именно перевод твердой фазы в паровую, уничтожающий информацию о специфичности твердого образца (физико-химические свойства, распределения атомов примесей по объему и т. п.), с очевидностью является неприемлемым. Явление вторичной ионной эмиссии (ВИЭ), вызываемой бомбардировкой коллимированным пучком энергичных (~нескольких килоэлектронвольт) ионов или атомов, позволяет преодолеть возникающее препятствие. Именно ВИЭ является основой метода МСВИ и открывает путь к прямому исследованию твердого тела в трех его ипостасях — поверхность, объем, тонкая пленка. МСВИ, по-существу, дает способ проводить многомерный — пространственный и элементный— анализ образцов. Физические процессы, лежащие в основе метода МСВИ, известны давно, но появление первых приборов, использующих ВИЭ, датируется серединой 60-х годов.

Эффективность применений МСВИ обусловлена уровнем понимания процесса ионообразования и разработкой приложений метода в различных — и особенно нетрадиционных — областях. Именно этим двум аспектам и было уделено главное внимание последней, III международной конференции по МСВИ в Будапеште (сентябрь 1981 г.). Регулярные двухгодичные конференции позволяют оперативно подводить итоги и стимулировать дальнейшее развитие МСВИ. Выпуск рецензируемого сборника трудов менее чем через полгода после конференции является не только достойным подражания издательским рекордом, но и отражением правильного понимания роли научно-технической информации в непрерывно ускоряющемся развитии науки и ее приложений.

В трудах конференции, изданных в серии «Химическая физика» (т. 19), представлено 69 докладов, из которых 13 являются приглашенными обзорными докладами.

Материалы сгруппированы в четыре раздела — аппаратура, основы метода, проблемы количественного анализа, приложения — и вряд ли имеет смысл в этих тесных рамках говорить об отдельных докладах. Попытаемся однако представить (с неизбежностью субъективную) картину вырисовывающихся тенденций.

Аппаратура. Как отмечалось, рождение МСВИ как инструментального метода относится к 60-м годам, а сегодня мы находимся на пороге появления приборов четвертого поколения. Они обеспечат проведение пространственного количественного анализа с локализацией в пределах субмикронных площадок. Они смогут работать как в режиме сканирующего ионного микрозонда, обеспечивающего предельно высокое разрешение по размеру площадки, так и в режиме ионного микроскопа, создающего ионное изображение анализируемого участка.

В приборах этого поколения будет применяться имплантация в поверхностную зону «реперных» ионов, обеспечивающая надежное количественное определение пространственного распределения элементов в изучаемом образце. В качестве устройств формирования и отработки изображения используются микроканальные пластины, ЭОП и видеозапись. Однако, очевидно, более перспективным решением является отказ

от формирования промежуточного изображения и видеозаписи в пользу применения устройств прямого считывания изображений — координаточувствительных детекторов (см. Горн Л. С., Хазанов Б. И. Позиционно-чувствительные детекторы.— М.: Энергоиздат, 1982). Применение ЭВМ позволит в приборах этого поколения реконструировать распределения элементов в любых плоскостях без ориентирования образцов относительно первичного пучка.

Основы метода. МСВИ использует эффект распыления поверхности образца для получения ионов, подвергаемых масс-спектроскопическому детектированию. Между током вторичных ионов и локальной концентрацией атомов существует однозначная связь, установление которой составляет существенную часть разработки основ метода. Здесь уместно отметить, что пионерские разработки основ МСВИ были начаты в нашей стране работами школы ныне покойного Я. М. Фогеля (см. УФН, 1967, т. 91).

Техника распыления позволяет в едином процессе совместить формирование ионов и обнажение новых слоев, т. е. получать разрезы по глубине образца. Регистрация вариаций интенсивности массовых линий в ходе постепенного распыления поверхности, т. е. обнажения все более глубоких относительно исходной поверхности слоев — основа получения концентрационных разрезов. Качество такого разреза характеризуется разрешением, т. е. измеренной толщиной зоны перехода между двумя слоями с резкой границей. Реально достигаемое сегодня разрешение составляет несколько десятков Å. Чувствительность при глубинном зондировании может характеризоваться пороговой регистрируемой концентрацией атомов в матрице — она отвечает относительному содержанию $\gtrsim 10^{-6}$. Линейное разрешение при анализе поверхности определяется в основном качеством зондирующего пучка и может достигать субмикронных размеров. Разрабатываемые ионные пушки (на основе автоионной эмиссии с поверхности жидкого металла) имеют теоретический предел размера фокусируемого пятна в несколько сотен Å.

Количественный анализ. Информативность МСВИ в значительной мере связана в конечном итоге с возможностью уверенного перехода от измеренных интенсивностей линий к локальным концентрациям атомов. Если вспомнить, что коэффициенты ВИЭ для чистых материалов различаются на три-четыре порядка, то сложность стоящих здесь задач достаточно ясна. Эта сложность породила простой обходный способ проведения столь нужных для практики количественных измерений. Речь идет о технике имплантирования контролируемых количеств желаемых ионов, т. е. о создании калибрующего эталонного образца in situ. Этот прием, позволяя получать известные концентрации любых элементов в любых матрицах, эффективно решает проблему количественной характеризации измерений.

Приложения. Механические и физико-химические свойства материалов сильно зависят от уровня и распределения примесей в матричной структуре — возможности МСВИ в материаловедении трудно переоценить. Коэффициенты ВИЭ чувствительны к состоянию поверхности и поэтому МСВИ может использоваться в исследованиях кинетики поверхностных процессов (адсорбции, катализа, окисления). МСВИ доказала свою жизненную необходимость при исследовании физических основ и разработке приборов твердотельной электроники.

Наступающая эра использования сверхбольших и сверхбыстрых интегральных схем (ИС) только увеличивает прикладную ценность метода. Рост плотности элементов в ИС приводит к ряду проблем, связанных как с разработкой, так и изготовлением и аттестацией приборов. Одним из примеров требований сегодняшнего дня является разработка ИС из сверхпроводящих приборов на джозефсоновских переходах. Они считаются перспективной элементной базой сверхбыстрых ЭВМ 90-х годов. Критический или максимальный ток перехода из проводящего в непроводящее состояние является основной характеристикой прибора и она крайне чувствительна к толщине окисного изолирующего слоя. Для обеспечения разброса критического тока в пределах % толщина должна выдерживаться с точностью до единичных атомных слоев. Отсюда видна и реальная стимуляция и острая потребность в развитии МСВИ.

Из нетрадиционных заманчивых приложений МСВИ отметим два — изучение термической истории образцов (в том числе и внеземного происхождения) по измерениям вариаций локальных изотопных отношений, обусловленных диффузией. Вторым является исследование нелетучих органических соединений. Сегодня удается проводить анализы субнамограммных образцов; совершенствование МСВИ и комбинирование его с хроматографией снизит этот порог на порядки и откроет новые возможности исследований.

Целесообразность краткого рецензирования работы шестидневной конференции, собравшей около 250 участников, была бы более чем сомнительна без оперативной публикации ее материалов. Доступность их позволит каждому заинтересованному составить свою картину общего состояния дел, а главное — получить важную для него конкретную информацию.

В. Б. Леонас