

Применение ускорителей и ядерных методов в ХФТИ в смежных науках. Каналирование частиц

Н.А.Скакун

ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков

На первых порах применения ускорителей и ядерных методов в смежных с ядерной физикой областях науки и технологий существенная трудность состояла в их специфике и радикальном отличии от традиционных методов и подходов, что приводило к настороженности, граничившей со скептицизмом, со стороны ряда ученых, в том числе весьма авторитетных, и не только в ХФТИ. Однако, убедительные результаты и очевидная перспектива вскоре сняли фактор недоверия и привлекли к этому научному направлению исследователей, работающих в таких областях как физика полупроводников, металлофизика, твердотельная электрохимия, микро- и оптоэлектроника, металлургия, геохимия, археология, экология, медицина и другие области, что явилось залогом интенсивного развития этого направления в дальнейшем.

В мировом сообществе ученых отсчет времени использования ускорителей для анализа веществ по мгновенному излучению принято начинать с известных работ Салевана Рабина, которые были опубликованы в 1949-1962 гг. На Западе это событие отмечалось как заметная веха в развитии науки. В июле 1989 г. на авторитетной 9-й международной конференции в г. Кингстон (Канада) по анализу с помощью ионных пучков [1] этому вопросу было посвящено специальное пленарное заседание.

В Союзе начало применения ускорителей и методов ядерной физики с регистрацией мгновенного излучения для аналитических целей, по нашим данным, было положено работой Е.В.Инопина и С.П.Цитко (ХФТИ) и М.И.Гусевой (Ин-т атомной энергии им. Курчатова) опубликованной в 1959г. [2]. Авторы исследовали глубину залегания и характер распределения атомов изотопа кремния, внедренных в тантал и медь. Использовался резонанс реакции (p,γ) на атомах ^{30}Si .

В 1964-70г. много внимания в ХФТИ уделялось разработке и применению ядерных методов и ускорителей для исследования подвижности кислорода в цирконии, ниобии и их сплавах. Известно, что конструкции реакторов, изготовленные из этих металлов, работают в контакте с

теплоносителем (пары воды). К сожалению, цирконий и ниобий обладают низкой коррозионной стойкостью. Для предсказания насыщения металлов кислородом определялись коэффициенты его диффузии в широком диапазоне температур [3], установлен механизм переноса анионов и катионов в процессе окисления в газовой среде и парах воды. Для решения задачи предложено использовать резонансы реакций, возбуждаемых на ядрах изотопа ^{18}O с выходом γ -квантов и α -частиц. Следует подчеркнуть, что методы являются прямыми и общими. С их помощью может быть исследована подвижность изотопов таких элементов, как водород, гелий, литий, бериллий, бор, углерод, азот, фосфор и других в металлах, сплавах и полупроводниках.

Впервые в Союзе в ХФТИ был разработан и широко использовался метод анализа состава веществ по характеристическому рентгеновскому излучению, которое возбуждается ускоренными ионами [4]. Решение этой, как оказалось в последствии, весьма плодотворной и широко используемой в настоящее время в различных лабораториях мира для аналитических целей проблемы, удалось осуществить благодаря разработке технологии и производству в ХФТИ полупроводниковых Si(Li)-детекторов, а на их основе спектрометров рентгеновского излучения.

Качественно новый этап в использовании ускорителей и методов ядерной физики наступил после того, как были открыты и изучены ориентационные эффекты, возникающие при движении положительно заряженных частиц в монокристаллической среде. Фундаментальный эффект – перераспределение плотности потока протонов в поперечной плоскости канала – одной из первых в мире экспериментально наблюдала группа сотрудников ХФТИ [5]. Использование эффекта позволило впервые определить местоположение атомов кислорода в ниобии, бора в вольфраме, азота в ниобии и молибдене, углерода в рении и никеле, кислорода в тантале.

Методом каналирования установлена локализация имплантированных в кремний атомов основных, широко используемых в технологии изготовления

элементов микроэлектроники – бора и фосфора. Определены профили залегания внедренных атомов, радиационно – смещенных атомов кремния, установлена термическая устойчивость дефектов, определены оптимальные условия формирования базовых структур.

Использование мгновенного излучения, возбуждаемого каналированными частицами, позволило на атомном уровне, выполнить цикл исследований имплантированных ионами бинарных соединений типа ${}^3\text{A}^5\text{B}$ (антимонид индия, арсенид индия, фосфид индия, арсенид галлия) [6]. Получены данные о локализации атомов первого и второго периодов таблицы Менделеева в ${}^3\text{A}^5\text{B}$, установлено изменение местоположения имплантированных атомов в процессе облучения и отжига легированных структур. Изучены закономерности образования и отжига радиационных дефектов в имплантированных слоях, определены профили залегания внедренных атомов и распределение дефектов в ${}^3\text{A}^5\text{B}$, установлен вклад подрешеток в процесс дефектообразования. Результаты этих работ послужили основой при оптимизации технологии базовых структур детекторов инфракрасного излучения (ИК). Показано, что ИК-детекторы с оптимальными параметрами могут быть получены на основе антимонида индия, имплантированного ионами бериллия, что имело решающее значение при разработке приборов ИК-излучения.

Перспективным является использование ускорителей и ядерных методов для исследования свойств и состава высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП). С целью оптимизации технологии кристаллов $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ и $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ выполнен цикл работ [7]. Изучалось изменение структуры этих кристаллов в зависимости от состава шихты и условий спекания. Показано, что кислородная подрешетка разупорядочена на 20% относительно подрешеток меди и лантана. Обнаружено различие в амплитуде колебания атомов O1 и O2. Установлено, что скорость радиационного разрушения кислородной подрешетки выше, чем у катионных подрешеток. Определена локализация атомов лития и бора в $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$.

Использование ускорителей и ядерных методов в изучении свойств феррит–металлооксидных соединений (используются в магнитооптике, вычислительной технике (феррит–гранатовые пленки) и квантовой электронике (тикор)) по существу только начинается. Показано [8], что ионы Tl^{4+} и Tl^{3+} в решетке тикора располагаются соответственно в тетраэдрических междоузлиях и междоузлиях, смещенных относительно алюминиевой подрешетки вдоль направления $\langle 0001 \rangle$. Установлено местоположение легирующих атомов бора и азота в решетке феррит-гранатовых пленок, определен тип дефектов и соотношение между профилями

радиационных дефектов и внедренных атомов [9], решены и другие вопросы.

Сведения об ориентационных эффектах в кристаллах в основном получают из спектров рассеянных частиц. Для исследования особенностей каналирования частиц в приповерхностной области в ХФТИ в последние годы предложен подход, основанный на использовании резонансов реакций. В данном случае, ядерные реакции, помимо других преимуществ, позволяют исследовать не только области, примыкающие к атомным цепочкам или плоскостям, как это имеет место в случае рассеяния, но и центральную область каналов. Применение реакций с узкими резонансами позволило изучить тонкую структуру аномально высоких выходов излучений при каналировании частиц в приповерхностной области кристаллов [10]. Предложен и используется новый способ определения тормозных потерь энергии у гиперканалированных частиц [11] и т.д.

Литература

1. Nucl. Inst. and Meth. B45 (1990), p. 7.
2. Гусева М.И., Инопин Е.В., Цитко С.П. - ЖЭТФ, (1959) т.36, С5.
3. Скакун Н.А., Харьков О.Н. Атомная энергия, (1969), т.24, С351.
4. Страшинский А.Г., Хомяков Г.К., Скакун Н.А. Атомная энергия (1974), т.36, С401.
5. Матяш П.П., Скакун Н.А., Дикий Н.П. Письма в ЖЭТФ, (1974) т.19, С31.
6. Deev A.S. et al. Journal <<Radiation Effects and Defects in Solid>> (1990), v.114, P202.
7. Skakun N.A., et al. Nucl Inst. and Meth. (1992), B64, P202.
8. Grinchenco A.Ju. et al. 14th International Conference on Atomic collisions in solids, University of Salford, (1991) P2A9, P131.
9. Скакун Н.А. и др. Материалы 20^{го} Всесоюзного совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (1990), Изд. МГУ, С158.
10. Svetashov P.A., Skakun N.A. 16th International Conference on Atomic collisions in solids, Linz, Johannes Kepler Universitet, Austria, Abstracts (1995), A112.
11. Светашов П.А., Скакун Н.А., Хомяков Г.К., ПОВЕРХНОСТЬ. Физика, химия, механика (1995), т.5, С115.

Статья поступила в редакцию 20 мая 1998г.,
в издательство 1 июня 1998г.