

539.26(049.3)

НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ! ФИЗИКИ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

X-ray Optics: Applications for Solids/Ed. H.-J. Queisser.—Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1978.—227 p.—(Topics in Applied Physics. 22).

Первое, что бросается в глаза, это следующее. Книга издана в 1977 г. При небольшом объеме в 255 страниц она содержит 430 литературных ссылок. И среди них мы находим ссылки на журнальные статьи, вышедшие в свет в 1977 г.!

Разумеется, только так и надо. Книга, пролежавшая в издательстве 3—4 года (а именно эта судьба, к сожалению, ждет многие из издаваемых нами книг), значительно устарела уже в день своего выхода в свет.

Однако малый интервал между написанием и изданием влечет за собой и некий недостаток. Создание серьезной книги, содержание которой доведено до дня появления в книжном магазине, не под силу одному автору, если речь идет о мало-мальски широкой области. А в настоящее время даже такая область знания, как рентгеновская оптика, которой несколько десятков лет назад достаточно было посвятить десяток страниц, уже разбилась на подспециальности.

Оба эти обстоятельства, т. е. фантастическое увеличение потока информации и все возрастающая узкая специализация, приводят к тому, что большинство книг представляет собой сборники, а не монографии в прямом смысле этого слова.

Мне нетрудно подтвердить справедливость сказанного. Вот новый каталог книг по физике, издаваемых издательством «Академик Пресс» в декабре 1977 г. Всего книг 40. Из них 28 — это сборники обзоров такого же типа, что и рецензируемая книга.

Так в чем же состоит недостаток таких книг, которые составитель компокует из нескольких обзоров, составленных узкими специалистами. Разумеется, в том, что такая книга будет неровной, будет содержать повторения. Мы не найдем в ней общего стержня, на который нанизано содержание книги. Мы не получим взгляда на всю область науки с высоты птичьего полета, что затруднит нам понимание относительной ценности отдельных ее глав и оценку перспектив развития тех или иных направлений.

Вводные статьи, которые пишутся редакторами таких сборников, лишь в незначительной степени улучшают дело.

И тем не менее полезность таких книг трудно переоценить. Сборник обзоров помогает войти в область. А войти в нее, пользуясь четырьмя-пятью оригинальными статьями, задача, — которая мало кому под силу.

Еще одно острое замечание — и я приступаю к обзору обзоров сборника.

И для этого и для других подобных книг характерен прагматизм. Полезность области является основным критерием ее ценности.

Не случайно в первом абзаце предисловия сказано: «Оптика приобрела вторую молодость благодаря открытию лазеров. Рентгеновская оптика получила новые стимулы развития благодаря развитию техники изучения плазмы, из-за развития астрономии. Синхротроны создали новые возможности для использования рентгеновских лучей...».

Все это совершенно справедливо, и действительно, рентгеновская оптика, так же как и оптика видимого излучения, переживает второе рождение.

Составитель поместил в книгу обзоры следующих тем: источники рентгеновских лучей большой интенсивности (авторы Йошиматсу и Козаки), рентгеновская литография (Шпиллер и Федер), рентгеновская и нейтронная интерферометрия (Бонзе и Графф), двумерная (секционная) топография (Отге), телевизионная топография (Гартманн).

Имея в виду огромную роль микроэлектроники, пожалуй, на первое место по значимости следует поставить статью, посвященную рентгеновской литографии. Эта область рентгеновской оптики имеет целью контроль и создание методов уплотнения интегральных схем, рисуемых на поверхности кристалла кремния или иного полупроводника. Авторы определяют рентгеновскую литографию, как применение рентгеновской микроскопии для изготовления микроэлектронных схем. Для этой цели нужно располагать маской, изготовленной из материала, поглощающего рентгеновские лучи, нужен «резист» высокого разрешения, чувствительный по отношению к рентгеновским лучам, и сильный источник мягких рентгеновских лучей, которые действовали бы через маску на «резист».

Рентгеновские лучи производятся обычным способом — бомбардировкой электронами охлаждаемого водой анода (энергия электронов 5—10 кэв). Маска позволяет рентгеновским лучам воздействовать лишь на нужные участки резиста, который после проявления дает изображение маски.

Статья построена как техническое описание области. Сначала обсуждается вопрос о том, какие длины волн рентгеновских лучей наиболее подходят для целей литографии. Затем идет речь о выборе материала для мембран, из которых изготавливаются маски. Годятся силиконовые мембраны, нитрид кремния, органические пленки. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Далее рассматриваются подходящие источники рентгеновских лучей. Для литографии не подходят обычные трубки, поскольку излучаемый ими спектр содержит лучи слишком жесткие, чтобы обеспечить контрастность маски и заставить их поглощаться в достаточной степени в материале резиста. Авторы приводят схемы нескольких подходящих установок, но в конце рассмотрения напоминают, что к. п. д. всех подобных установок, как известно, очень низкий, а именно меньше одной десятой доли процента.

Достаточно успешными были попытки использовать для литографии в качестве источника рентгеновских лучей горячую плазму, создаваемую неодимовым лазером, а также синхротронное излучение.

Пленки органических полимеров служат в качестве резистов. Авторы приводят подробные данные в отношении полиметилметакрилата. Фотографии полученных в этом материале профилей с помощью α -излучения алюминия оставляют сильное впечатление (использовались золотые маски толщиной 0,9 и 0,4 мкм; начальная толщина резиста была 1,5 мкм). В статье приводится много фотографий и таблиц, дающих представление о достигаемом разрешении. Рассматриваются все шаги создания на объекте интегральной схемы и дается описание технологического процесса, выбранного авторами. Рентгеновская литография уже использовалась для создания диодов, полевых и других транзисторов. Авторы высоко оценивают будущее этого метода.

Остановимся на другой большой статье сборника, трактующей проблемы рентгеновской и нейтронной интерферометрии. Этот метод был предложен 13 лет назад.

Интерферометрия волн малой длины является мощным инструментом исследования дефектов в кристаллах, близких к идеальным. Эта же техника позволяет измерять рассеивающие способности атомов и абсолютные значения параметров решетки кристаллов.

Осуществление интерференции рентгеновских лучей и нейтронов происходит совсем не так, как в оптике. Из крупных монокристаллов кремния, германия, кварца (я перечисляю вещества, которые больше всего были изучены этим методом) изготавливаются причудливые геометрические фигуры, позволяющие расщепить первичный луч так, чтобы две компоненты были раздвинуты по крайней мере на 0,5 см. Далее лучи отражаются от кристаллических плоскостей (чаще используется так называемое лауэнское отражение, т. е. тот случай, когда при селективном отражении от атомных плоскостей кристалла луч входит в кристалл с одной стороны, а выходит с другой) и потом сводятся в одну точку с той или иной разностью хода. Изготовление интерферометров происходит с помощью алмазной пилы и последующей полировки смесью кислот.

Основное применение — это дефектоскопия. Интерференция создает муаровые картины, весьма чувствительные к дефектам, возникающим из-за самых незначительных смещений или поворотов отражающих атомных плоскостей. Метод позволяет обнаружить одиночные дислокации, точечные дефекты и т. д. Вполне возможно, что методика рентгеновской и нейтронной интерферометрии благодаря своей большой точности позволит решать весьма тонкие задачи, такие, как, скажем, выяснение роли тяготения в распространении нейтронов. Эти эксперименты представляют интерес для решения проблемы рентгеновских лазеров, для решения фазовой проблемы в голографии.

К сожалению, статья написана не лучшим образом. Много математических расчетов и лишь бегло изложены физические принципы и идеи, лежащие в основе этого интересного метода.

В Советском Союзе, насколько известно пишущему эти строки, работы в области рентгеновской интерферометрии ведутся лишь на кафедре физики твердого тела в Ереванском университете под руководством П. А. Безиргамяна. Опубликованные труды этой группы цитируются в обзоре.

Статья, посвященная источникам рентгеновских лучей большой интенсивности, излагает как теоретические основы получения сильных пучков, так и детали конструкции трубок. Приведены расчеты для стационарных анодов и для вращающихся. Две страницы уделены описанию электронных пушек. В общих чертах рассмотрено устройство трубок с вращающимся анодом. Несколько слов сказано о трубках, в которых за счет фокусирования электромагнитными линзами удается достигнуть диаметра пучка в несколько миллимикрон. В разделе под названием «Специальные генераторы» даны сведения о трубках, дающих мягкие лучи, о сверхмощных трубках, которые позволяют получать картины дислокаций и наблюдать за их движением. Для этого интересного генератора приведены конструктивные данные. Статья заканчивается достаточно четкими рекомендациями. Авторы полагают, что наиболее правильный путь получения сильного рентгеновского луча — это использование трубок с анодами, которые вращаются с большой скоростью. Авторы полагают, что мощность существующих трубок не является предельной. Чтобы превзойти лучшие из имеющихся трубок, надо добиться скоростей вращения, превосходящих 160 м/сек . Авторы не считают, что использование синхротронного излучения вытеснит трубки с вращающимся анодом. Изготовление синхротронных генераторов и работа на них стоит слишком дорого.

Технические свойства материала существенным образом зависят от дислокаций, ошибок в наложении атомных слоев, границ между зернами, двойников, напряжений и пр. Самые различные приемы наблюдения дифракции рентгеновских лучей пригодны для этой цели. Кристалл можно рассматривать в отраженном свете, можно также исследовать отдельные лауэвские отражения. Информация о дефектах содержится в распределении интенсивности поперек дифрагированного луча. Полная картина дефектов может быть получена путем разного типа взаимных перемещений рентгеновского луча и объекта.

Этот метод изучения кристаллов представляет большой практический интерес для микроэлектроники. Не удивительно, что топография кристаллов превратилась в большую отрасль рентгеновской оптики. Статьи Отье и Гартманна рассматривают лишь две главы этой дисциплины. Метод секционной топографии, разработанный Отье и другими исследователями, представляет особый интерес для тех случаев, когда мы хотим получить сведения о глубине распределения дефектов в относительно толстых образцах.

Метод секционной топографии заставляет прибегнуть к довольно сложной теории (динамическая теория интерференции), связывающей «вид» дифракционного пятна со структурой кристалла с малым числом дефектов. Задача получения информации о структуре по данным об искажении волнового поля внутри кристалла далеко не тривиальна.

Наблюдение статической картины дислокаций оставляет многих исследователей и инженеров не удовлетворенными. Требуется метод, который позволял бы следить за перемещениями дефектов под действием внешних сил или изменения температуры. Естественно, что в этом случае фотографический метод наблюдения желательнее заменять установкой, которая позволяет перенести дифракционное пятно на телевизионный экран.

В статье Гартманна рассмотрена техника такого наблюдения. Фотопластинка заменяется флуоресцирующим экраном, изображение увеличивается оптическими приемами и после этого подается на телевизионный экран. Великолепные фотографии разных объектов показывают, что такая «динамическая топография» приводит к замечательным результатам. Трубки с вращающимся анодом дают удовлетворительные результаты, но в этом методе преимущества синхротронного излучения весьма существенны и, возможно, в ряде случаев заставят забыть о дороговизне метода. Важно не только то, что интенсивность излучения может быть увеличена на порядок. Существенна возможность работы с длинами волн около 3 \AA , а также много меньшая расходимость пучка.

Для того чтобы наблюдать динамику дефектов, приходится предъявлять большие требования к детектору. Пространственное разрешение должно быть порядка нескольких миллимикрон, а временное не хуже 1 сек . Флуоресцирующий экран должен быть мелкозернистым (несколько миллимикрон) и хорошо поглощать рентгеновские лучи. В настоящее время ведутся работы по получению подходящих материалов и имеются надежды удовлетворить всем этим высоким требованиям.

Сборник обзоров представляет существенный интерес как для специалистов в области физики рентгеновских лучей, так и для лиц, изучающих дефекты кристаллов. Не должны обойти вниманием эту книгу и исследователи, работающие в области микроэлектроники.

А. И. Китайгородский

546.02(038)(049.3)

СТРУКТУРНЫЕ ДАННЫЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. New Series (K.-H. Hellwege, Ed.). Group III: Crystal and Solid State Physics. Vol. 7: Pies W., Weiss A. Crystal Structure Data of Inorganic Compounds. Part I. Key Elements: d^4 ... d^8 -Elements/Ed. K.-H. Hellwege, A. M. Hellwege.—Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag, 1977.—778 p.

Седьмой том справочника Ландольта — Бёрнштейна «Структурные данные неорганических соединений» продолжает ранее вышедшие тома этой серии, содержащие структурные данные органических соединений (том 5) и элементов и интерметаллических фаз (том 6). В связи с большим объемом том разбит на 8 частей, из которых к настоящему времени опубликованы 5. Две последние части содержат список литературы и указатели к тому, включая алфавитный формульный. Весь фактический материал сосредоточен в первых шести частях. Отнесение соединения к той или иной части производится по «ключевому» элементу, т. е. тому элементу, который самостоятельно или вместе с другими элементами выполняет «анионную» функцию в соединении. В соответствии с этим принципом в части а собраны структурные данные по простым и сложным галогенидам (ключевые элементы F, Cl, Br, I); часть b включает в себя соединения, содержащие O, S, Se, Te (окислы и гидрокислы, сульфиды, сульфаты и т. д.); часть с — соединения, содержащие N, P, As, Sb, Bi, C, и т. д. Материал представлен в табличной форме и охватывает период от первых пионерских работ в области структурного анализа до конца 1971 г. В таблицах приведены соединения, для которых указаны хотя бы параметры решетки или установлена изотипия с другим соединением, структура которого известна. Во введении к каждому выпуску тома приведены сведения о распределении соединений по частям и пояснения к таблицам.

Часть III/7f включает в себя структурные данные оксосоединений переходных элементов с электронными конфигурациями (свободных атомов) от d^4 до d^8 (ключевые элементы — Cr, Mo, W, Mn, Tc, Re, Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt). Таблицы содержат сведения о 4079 индивидуальных соединениях или системах твердых растворов. Авторы стремятся привести в таблицах максимум доступной информации: после химической формулы даны пространственная группа, параметры решетки, число формульных единиц в элементарной ячейке, плотность, структурный тип, использованные структурные методы, характеристика кристаллов, физические свойства, сведения о фазовой диаграмме и т. п. Значительная часть информации содержится в многочисленных примечаниях. В списке литературы первая ссылка относится, как правило, к одной из ранних работ, в которой приводится описание структуры.

Справочник представляет собой наиболее полную из существующих сводку структурных данных для неорганических соединений и, несомненно, полезен всем исследователям, имеющим дело с физикой, химией и технологией кристаллического состояния.

Б. В. Миль