

С.В. Алексеев, М.Л. Таубин, А.А. Ясколко

Нанокompозиты в рентгеновской технике

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2014

УДК 620.3 + 622.386

ББК 22.3 + 32.995

A47

A47 Алексеев С.В., Таубин М.Л., Ясколко А.А.

Нанокompозиты в рентгеновской технике

Москва: Техносфера, 2014. – 208 с., ISBN 978-5-94836-379-0

В книге рассмотрены физические принципы генерации рентгеновского излучения при взаимодействии пучка электронов с поверхностью металла. Обсуждается принципиальная возможность снижения температуры эксплуатации рентгеновских систем путем использования углеродных нанотрубок для эмиттеров и повышения эксплуатационных характеристик рентгеновских трубок использованием моно- и наноструктурных материалов. Представлено математическое моделирование структурной стабильности наноматериалов с использованием методов механики сплошной среды. Затронуты технологические аспекты получения наноструктурных материалов применительно к условиям работы рентгеновских трубок. Даны практические рекомендации по изменению конструктивной схемы существующих рентгеновских источников за счет использования наноматериалов. Содержание монографии представляет несомненный интерес для специалистов в приграничной области между нанотехнологией и рентгеновской техникой. Студенты, аспиранты и преподаватели соответствующих дисциплин могут воспользоваться конкретными научными результатами, а также методическим подходом при решении практических задач.

УДК 620.3 + 622.386

ББК 22.3 + 32.995

© 2014, Алексеев С.В., Таубин М.Л., Ясколко А.А.

© 2014, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-379-0

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Литература	14
Глава 1. Физическая природа рентгеновского излучения	16
1.1. Спектры рентгеновского излучения	16
1.2. Поглощение и рассеяние рентгеновского излучения	19
1.3. Фотоэффект и термоэлектронная эмиссия	20
1.4. Тормозное излучение с учетом каналирования электронов	23
1.5. Физические основы тепловых и термоупругих процессов при взаимодействии электронов с поверхностью металла	25
Литература	29
Глава 2. Математическое моделирование структурной стабильности наноматериалов	30
2.1. Структурные дефекты наноматериалов	30
2.2. Физические основы структурной нестабильности наноматериалов	38
2.3. Внутренние напряжения в окрестности структурных дефектов наноматериалов	45
2.4. Фазовые превращения в окрестности стереодислокаций	49
2.5. Фазовые превращения в окрестности нанокристаллов с пентагональной симметрией	57
2.6. Водородное охрупчивание и разрушение наноматериалов	65
Литература	74
Глава 3. Нанотехнологии и наноматериалы: история, классификация, состояние и перспектива	77
3.1. Основные понятия и определения	77
3.2. История развития нанонауки и нанотехнологий	82
3.3. Классификация наноматериалов и нанотехнологий	91
3.4. Свойства наноматериалов и направления их использования	93
3.5. Научные основы нанотехнологий	95
Литература	101
Глава 4. Технологии получения наноматериалов применительно к их использованию в рентгеновской технике	102
4.1. Обзор перспективных технологических направлений получения конструкционных наноматериалов	102
4.2. Методы порошковой металлургии при получении наноматериалов	113

4.3. Технология интенсивной пластической деформации	122
4.4. Термическая плазма в нанотехнологиях	126
Литература	129
Глава 5. Углеродные нанокomпозиты — перспективные материалы	
для катодов и анодов рентгеновских трубок	131
5.1. Технология изготовления углеродного нанокomпозита	131
5.2. Углерод-углеродный нанокomпозит	137
5.3. Углеродные нанотрубки	138
5.4. Получение углеродных нанотрубок	142
5.5. Свойства углеродных нанотрубок применительно к их использованию в рентгеновских трубках	145
Литература	152
Глава 6. Перспективы использования наноматериалов в рентгеновской	
технике	154
6.1. Микрофокусная рентгенография в медицинских исследованиях . .	154
6.2. Нанофокусные рентгеновские источники	158
6.3. Катоды рентгеновских систем на основе углеродных нанотрубок	169
6.4. Рентгеновская трубка с катодом из углеродных нанотрубок и рекордным размером фокусного пятна	174
6.5. Сверхминиатюрная рентгеновская трубка с катодом из углеродных нанотрубок	176
6.6. Рентгеновские источники стационарного сканирования с «холодными» эмиттерами на основе углеродных нанотрубок . . .	179
6.7. Моно- и нанокристаллы в рентгеновской технике	183
Литература	199
Заключение	202

ВВЕДЕНИЕ

XXI век характеризуется интенсивным развитием нанотехнологий и наноматериалов. Они уже используются в основных областях человеческой деятельности (промышленности, обороне, информационной сфере, радиоэлектронике, энергетике, транспорте, биотехнологии, медицине).

Анализ инвестиций, количества публикаций по нанотехнологиям и наноматериалам, а также темпов внедрения фундаментальных разработок позволяет предположить, что в ближайшие годы использование нанотехнологий и наноматериалов будет являться одним из определяющих факторов научного, экономического, оборонного и социального развития государств.

Интерес современной науки и техники к новому классу материалов существенно возрастает. Это обусловлено следующим причинами:

- стремлением к миниатюризации изделий;
- уникальными свойствам материалов в наноструктурном состоянии;
- развитием новых технологических приемов и методов, основанных на принципах самосборки и самоорганизации;
- практическим внедрением современных приборов исследования, диагностики и модификации наноматериалов (например, сканирующая зондовая микроскопия);
- развитием и внедрением технологий получения нанопорошков.

Следует также акцентировать внимание на том, что исследования в этой сфере деятельности смещаются от получения и изучения нанокристаллических материалов в область нанотехнологии, то есть создания изделий, устройств и систем с наноразмерными элементами.

В рамках данной монографии следует отметить, что наноматериалы (в особенности нанокompозит вольфрама и углеродные нанотрубки) активно начали исследоваться применительно к их использованию для повышения эксплуатационных характеристики современных мощных рентгеновских трубок, а также при разработке и изготовлении новых типов источников рентгеновского излучения.

1. Что такое наноматериалы?

К наноматериалам относят материалы, содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки, кластеры и т.п.), геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми функциональными и эксплуатационными характеристиками. Хотя современные исследователи отмечают, что верхняя граница является субъекто условным определением.

Среди основных разделов науки о наноматериалах можно выделить следующие:

- фундаментальные исследования свойств наноструктурных материалов;
- развитие нанотехнологий для целенаправленного создания наноматериалов и изделий;
- интеграция наноматериалов и нанотехнологий в различные отрасли промышленности и науки;
- развитие средств и методов исследования структуры и свойств наноматериалов, а также методов контроля и аттестации изделий и полуфабрикатов для нанотехнологий.

Вопрос о том, что такое нанотехнологии, является предметом дискуссии и в настоящее время. К нанотехнологиям принято относить технологии, обеспечивающие возможность контролируемым образом создавать и модифицировать наноматериалы.

Так, в Интернете можно найти такое определение:

«Нанотехнология — область прикладной науки и техники, занимающаяся изучением свойств объектов и разработкой устройств размеров порядка нанометра (по системе единиц СИ, 10^{-9} метра)».

В популярной литературе иногда используется простое определение:

«Нанотехнологии — это технологии манипулирования веществом на атомном и молекулярном уровне».

Или вот определение профессора Г.Г. Еленина (МГУ, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН):

«Нанотехнологией называется междисциплинарная область науки, в которой изучаются закономерности физико-химических процессов в пространственных областях нанометровых размеров с целью управления отдельными атомами, молекулами, молекулярными системами при создании новых молекул, наноструктур, наноустройств и материалов со специальными физическими, химическими и биологическими свойствами».

Федеральное агентство по науке и инновациям в «Концепции развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий до 2010 года» дает такое определение:

«Нанотехнология — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 10 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществить их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба; в более широком смысле этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и исследований таких объектов».

Министр образования и науки Российской Федерации Дмитрий Ливанов определяет нанотехнологии как «набор научных, технологических и производственных направлений, которые объединены в единую культуру, основанную на проведении операций с материей на уровне отдельных молекул и атомов».

А вот определение академика Ю.Д. Третьякова (МГУ):

нанотехнологии — «это область знания, ориентированная на изучение и применение материалов, которые наноструктурированы и имеют размер частиц от 1 до 100 нанометров (нано — 10^{-9})».

Финансово-промышленная группа «Онэксим» (М. Прохоров) — один из основных инвесторов этого направления в России — в своей презентации дает такое определение:

«Нанотехнология — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать объекты и материалы из отдельных атомов, молекул и компонентов с размерами от 1 до 100 нм, хотя бы в одном измерении».

В своем фундаментальном обзоре, цитируя Гляйтера [1], который предложил считать нанокристаллическими материалы, у которых размер зерен лежит в интервале 10–100 нм. Р.А. Андриевский акцентирует внимание на том, что эта концепция условна и не имеет строгих физико-химических обоснований [2].

2. Размерные границы наноматериалов

Представляется интересным проанализировать аргументы, приводящиеся различными авторами в обоснование своих определений и трактовок размеров нанокристаллитов.

Первый подход. Нижняя граница обусловлена критическим размером существования нанокристаллического материала, то есть имеющего кристаллическую решетку, а верхний предел определяется заметными изменениями физико-механических свойств.

Второй подход. Размер зерна в наноматериалах определяется из того, что доля поверхностей раздела составляет половину от общего объема. Эта доля оценивается из соотношения $3s/L$, где s — ширина приграничной области. Если s — 1 нм, то размер зерна — 6 нм. Исходя из этого, Гляйтер определяет наноматериалы как двухфазные системы, в которых приграничная область — одна фаза и собственно зерна — вторая фаза.

Третий подход. Размерные эффекты в наноматериалах сопровождаются квантовыми эффектами, когда размер кристаллитов становится соизмерим с дебройлевской длиной волны ($mE^{-1/2}$, где m — эффективная масса электронов, E — энергия Ферми). Для металлов $\lambda \approx 0,1$ –1 нм, а для полуметаллов (карбиды и т.д.) $\lambda \approx 100$ нм, то есть для тугоплавких металлов и их сплавов нижняя граница может быть существенно выше, чем для обычных металлов. По этой концепции наноматериалами следует называть материалы с характерным

параметром, например длиной свободного пробега электронов, соизмеримой с размером зерна.

Четвертый подход предлагает А.И. Гусев в своей монографии [3]. Он предложил поликристаллы с размером зерна от 300 до 40 нм называть субмикрокристаллическими, а ниже 40 нм — нанокристаллическими.

3. Нанокompозиты

Наиболее точное, на взгляд авторов, определение нанокompозитов дано в монографии, написанной под редакцией академика Ю.Д. Третьякова [4]:

«Нанокompозит — это композит, в котором размеры одной, нескольких или всех составляющих частей находятся в области наноразмеров».

Приняв за базу это определение и суммируя мнения других авторов, следует привести определение нанокompозитов как поликристаллов, в которых есть зерна или частицы с размерами, хотя бы в одной проекции измеряемыми в нанометрах, и свойства которых существенно отличаются от свойств крупнозернистых (размеры зерен составляют от единиц до десятков микрон) материалов.

Так, известно, что модификация стандартных порошков наноразмерными частицами увеличивает прочность материалов на 10—30%, пластичность в 1,5—2 раза, износостойкость в 1,3—1,6 раза [5].

Можно в связи с этим предположить, что у тугоплавких наноматериалов, наиболее перспективных для использования в рентгеновской технике, диапазон размеров зерен или включений может быть шире, чем у материалов с невысокой температурой плавления.

С учетом изложенного наблюдаемые авторами данной монографии эффекты в вольфраме, в котором на границах зерен обнаружены включения пор размерами 50—140 нм [6], позволяют отнести такой материал к нанокompозитам.

Здесь уместно напомнить, что в науке и технике много примеров, когда отдельные разделы имеют целый ряд подразделов. Например, физика. Есть физика элементарных частиц, есть физика твердого тела, есть физика спекания и т.д. Это дает основания подразделять наноматериалы на материалы, имеющие только структурные составляющие наноразмерного уровня, и на те, у которых хотя бы одна составляющая (см. определение Ю.Д. Третьякова) имеет размеры в области от 10 до 100 нм, то есть нанокompозиты.

При этом следует учесть мнение [7], что верхний предел размеров даже для одного и того же материала может быть различен для различных свойств материала. Так, для вольфрама, как это отмечалось ранее, верхний предел может быть ≈ 150 нм.

Учитывая большое количество публикаций по рассматриваемой тематике, (например, [8—12]), мы ограничились кратким описанием общих положений, изложенных в этих публикациях, но уделили больше внимания анализу ин-

формации по высокотемпературным наноматериалам (тугоплавкие материалы, углеродные нанотрубки и др.), которые можно рассматривать как перспективные для применения в современных образцах рентгеновской техники.

Данная монография и посвящена перспективному научно-техническому направлению — использованию наноструктурных материалов в элементах конструкций рентгеновской техники. Настоятельная необходимость развития данного направления исследований обусловлена многими причинами. Краткое знакомство с ними во введении никоим образом не претендует на полноту представления, а приводится исключительно для осознанного понимания логической схемы изложения содержания монографии.

Во-первых, тенденция развития рентгеновских исследований в технических и медицинских приложениях характеризуется увеличением мощности рентгеновских установок при сохранении или уменьшении размеров фокусных пятен. Особенно такая потребность возникает при исследовании динамических процессов. Так, например, за счет увеличения интенсивности рентгеновского излучения возможно сократить время получения одного снимка, что позволяет более четко отслеживать движущиеся органы человеческого организма или крови (например, выявление патологических изменений сердечно-сосудистой системы в ангиографии). Необходимость ограничения интенсивности рентгеновского излучения обусловлена структурной нестабильностью материала катода и анода в процессе эксплуатации рентгеновских трубок. В качестве иллюстрации рассмотрим взаимодействие поверхности анода с потоком электронов. Физический принцип работы любой рентгеновской трубки достаточно прост. Эмиттер катода при определенной температуре испускает пучок электронов. Последние, ускоренные электрическим полем, попадают на анод и вследствие их торможения на мишени анода генерируется рентгеновское излучение. При этом на долю тормозного излучения приходится не более 5% энергии электронного пучка. Поэтому приповерхностный слой анода подвергается весьма сильному циклическому тепловому воздействию. Это приводит к диффузионно-дислокационной перестройке структуры материала. В макроскопическом масштабе наблюдают изменение теплофизических и прочностных характеристик материала, его повреждаемость вплоть до образования микротрещин. Характер взаимодействия электронного пучка с поврежденным материалом меняется, и наблюдают снижение интенсивности рентгеновского излучения. При этом наиболее уязвимы поликристаллические материалы, поскольку развитие нарушений сплошности протекает по границам зерен. Монокристаллические материалы обладают повышенным уровнем свойств и поэтому, при прочих равных условиях, увеличивают ресурс эксплуатации при сохранении качества рентгеновского излучения [13]. Однако и эти материалы не решают ключевой проблемы — продления ресурса эксплуатации при сохранении интенсивности излучения. Это обусловлено тем, что при пла-

стической деформации монокристаллов формируется фрагментированная структура, и монокристалл постепенно теряет свои привлекательные свойства. Поэтому для решения указанных проблем возникает заманчивая перспектива использования наноструктурных материалов.

Вторая причина пристального внимания к этим материалам кроется в том, что эти материалы позволят в будущем принципиально изменить конструктивные схемы существующих рентгеновских трубок. Сущность столь нетривиального подхода проиллюстрируем на примере анода и эмиттера. Одной из основных причин снижения интенсивности рентгеновского излучения, как уже было отмечено, является нарушение структурной стабильности приповерхностного слоя материала анода. Такое нарушение обусловлено, как правило, тепловыми и термоупругими процессами при взаимодействии ускоренных электронов с поверхностью металла. Принципиальный подход для снижения тепловых потерь энергии электронов заключается в использовании монокристаллов определенной кристаллографической ориентации. Его физический смысл заключается в следующем. Упорядоченное расположение атомов в монокристаллах создает атомные «каналы» значительной протяженности. Если электроны падают на поверхность монокристалла под малым углом к атомной цепочке, то их движение локализуется внутри канала. При движении электрона вдоль кристаллографического канала возникает тормозное рентгеновское излучение с минимальными тепловыми потерями. Другими словами, происходит перераспределение энергии ускоренных электронов в пользу тормозного рентгеновского излучения. Отсюда возникает предположение о возможности перевода в тормозное излучение большей части энергии падающего электронного пучка. Следует думать, что успехи нанотехнологий позволят сформулировать устойчивые структурные «каналы» (по образу и подобию углеродных нанотрубок) для каналирования электронов. Тогда отпадает надобность во вращающемся аноде и вспомогательных узлах для осуществления вращения. Львиная доля энергии электронного пучка переходит в тормозное рентгеновское излучение с минимальными тепловыми потерями в приповерхностном слое наноструктурного анода. Наноструктурные материалы в виде углеродных нанотрубок могут найти применение также в эмиттерах рентгеновских трубок. Известно, что плотность тока эмиссии определяется напряженностью внешнего электрического поля. Этим процессом можно управлять путем создания наноструктур для усиления внешнего электрического поля. Такими структурными элементами являются углеродные нанотрубки. Они усиливают приложенное электрическое поле без повышения температуры. Однако для конкретных применений физическая природа формирования рентгеновского излучения остается неизменной. Только теперь холодный эмиттер испускает пучок электронов, а холодный анод формирует рентгеновское излучение вследствие каналирования электронов. Внедрение наноструктурных материа-

лов в рентгеновскую технику может существенно изменить подходы к созданию конструкций рентгеновских трубок. Такие примеры в истории техники хорошо известны. При этом достаточно упомянуть размеры первых электронно-вычислительных машин и сравнить их с современными компьютерами.

И наконец, третья причина рассмотрения возможности применения наноструктурных материалов в рентгеновской технике заключается в бурном развитии нанонауки и соответствующих нанотехнологий. Научные достижения в любой отрасли знаний всегда были востребованы в технических приложениях. Об этом свидетельствует многовековой опыт развития технической цивилизации. Достижения нанонауки уже нашли воплощение в различных технических приложениях. Рентгеновская техника также способна воспринимать все лучшее из нового научного направления. Развитие нанонауки и нанотехнологий характеризуется двумя подходами. Их сущность заключается в следующем. Первый подход состоит в конструировании и создании материала любого вида путем направленного манипулирования атомами и молекулами. Такие материалы с наноразмерными элементами структуры (например, нанокompозиты и углеродные нанотрубки) могут найти достойное применение в различных технических приложениях, включая и рентгеновскую технику. Второй подход заключается в создании технических систем, не уступающих по своим возможностям живой природе. Здесь предполагается реализовать стремление технических цивилизаций приблизиться в своих технических конструкциях к недостижимому идеалу живой природы (например, квантовые компьютеры и головной мозг). Вполне естественно, что для элементов конструкций рентгеновской техники приемлем только первый подход. В самом деле, макроскопические размеры основных узлов рентгеновских трубок требуют для своего изготовления соответствующих материалов. Улучшение их теплофизических и прочностных характеристик возможно за счет структурных изменений. К последним относятся легирование, образование новых фаз наноразмерного диапазона, использование углеродных нанотрубок и т.п. Удачное сочетание структурных элементов позволит полнее использовать имеющиеся материалы и наметить пути получения новых материалов с требуемыми свойствами. Внедрение новых материалов (прежде всего, наноструктурных) в рентгеновскую технику может существенно изменить конструктивные схемы существующих установок.

Следует отметить еще одно весомое обстоятельство. Авторы монографии имеют непосредственное отношение к рентгеновской технике. На протяжении ряда лет под их руководством и участием проводились материаловедческие исследования тугоплавких материалов применительно к основным узлам рентгеновских установок (например, [14, 15]).

Отдельные положения монографии опубликованы в отечественных и зарубежных журналах (например, [16]), ключевые идеи представлены в виде патентов (например, [17]), Результаты проведенных исследований неоднократно

докладывались и обсуждались на международных научных конференциях. На основе критического анализа литературных данных и собственных исследований авторы монографии пришли к выводу, что только принципиально новые материалы гарантируют успешное развитие рентгеновской техники различного функционального назначения. Это прежде всего монокристаллические материалы с элементами структуры наноразмерного диапазона (например, монокристаллические наноконпозиции).

Взаимосвязанная логика изложения ключевых вопросов монографии прослеживается от физических принципов генерации рентгеновского излучения до практических рекомендаций по использованию наноструктурных материалов в рентгеновской технике. Промежуточные разделы монографии посвящены различным аспектам нанонауки и нанотехнологии. При этом каждый раз рассматривается реальная конструкция рентгеновской трубки в сочетании с реальными материалами. Наноструктурные элементы в обычных материалах улучшают их теплофизические, упругие и прочностные характеристики. Далее кратко изложим содержание отдельных разделов монографии, неоднократно подчеркивая неизменность основной идеи — перспектива развития рентгеновской техники немыслима без наноструктурных материалов.

В главе 1 монографии рассматривается физическая природа генерации рентгеновского излучения при взаимодействии потока электронов с поверхностью металла. Необходимость данной главы обусловлена тем, что основные закономерности формирования рентгеновского излучения являются общезначимыми и потому остаются неизменными для различных материалов. Затрагиваются вопросы каналирования электронов в монокристаллических и наноструктурных материалах. Это приводит к существенному снижению тепловых потерь в приповерхностном слое анода, поскольку значительная доля энергии электронного пучка переводится в тормозное рентгеновское излучение. Обсуждается принципиальная возможность создания низкотемпературных эмиттеров на основе использования углеродных нанотрубок. Высокая плотность эмиссионного тока достигается за счет усиления внешнего электрического поля в углеродных нанотрубках. Направление последних вместе с вектором напряженности электрического поля перпендикулярно поверхности эмиттера.

Глава 2 монографии посвящена математическому моделированию диффузионно-дислокационных процессов в элементах конструкций рентгеновской техники на основе наноструктурных материалов. Основной характеристикой последних являются наличие разветвленной сети границ раздела, тройных стыков межфазных границ и их узлов. Качественное рассмотрение несовершенств структуры наноматериала осуществляется на основе кристаллографических представлений. Количественное описание структурных несовершенств наноматериалов проводится в континуальном приближении с использованием математических методов механики сплошной среды. Рассмотрена физическая

природа внутренних напряжений при внешнем нагружении наноматериалов в процессе эксплуатации рентгеновских установок. Исследовано влияние внутренних напряжений на кинетику физико-химических процессов в материалах рентгеновской техники. Основное внимание уделено внутренним напряжениям с логарифмической координатной зависимостью. Такая зависимость упрощает решение задач диффузионной кинетики с учетом внутренних напряжений различной физической природы.

Ключевые вопросы наноматериалов в рентгеновской технике изложены в следующих главах монографии. Они посвящены различным аспектам нанонауки и нанотехнологий. Единая логика изложения материала прослеживается от исторического экскурса в область нанотехнологий вплоть до практического использования углеродных нанотрубок для создания нового поколения эмиттеров. Приведена классификация наноматериалов и затронуты вопросы технологии их получения. При этом основное внимание уделяется улучшению теплофизических и прочностных характеристик обычных материалов путем введения наноразмерных структурных элементов. Иллюстративным примером является повышение сопротивления высокотемпературной ползучести фольги из поликристаллического вольфрама при формировании в нем структуры нанокомпозита. Применение наноматериалов в рентгеновских установках различного назначения направлено на улучшение их эксплуатационных характеристик: увеличение ресурса эксплуатации при сохранении качества рентгеновского излучения. Обсуждается перспективная возможность изменения конструктивной схемы существующих рентгеновских установок за счет использования наноматериалов.

Проблема наноматериалов весьма актуальна для развития новой техники и наукоемких технологий. Этим вопросам посвящены многочисленные публикации [18, 19, 20, 21].

Среди известных публикаций предлагаемая монография занимает особое место. Здесь впервые с исчерпывающей полнотой рассмотрено перспективное направление развития рентгеновской техники путем использования наноструктурных материалов. В основу такого рассмотрения заложен изначальный фундамент — многолетние исследования авторов в области материаловедения тугоплавких материалов и технологических проблем элементов конструкций рентгеновской техники. Содержание монографии представляет несомненный интерес для специалистов в приграничной области между нанотехнологией и рентгеновской техникой. Студенты, аспиранты и преподаватели соответствующих дисциплин могут воспользоваться конкретными научными результатами, а также методическим подходом при решении практических задач. Все содержание монографии пронизано весьма плодотворной мыслью — перспектива развития рентгеновской техники немыслима без использования наноструктурных материалов.

Авторы искренне признательны многим профессионалам за исчерпывающие консультации по вопросам, которые не входили в сферу их научных интересов.

Отдельная благодарность д.т.н. Н.М. Власову за активную помощь в подготовке рукописи.

Литература

1. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure, Acta Materialia, 2000. Vol. 48. №1. p. 1–29.
2. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы //Российский химический журнал, 2002. Т. 46. №5. с. 50–56.
3. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000. — 224с.
4. Нанотехнологии. Азбука для всех / Под ред. акад. Ю.Д. Третьякова. М.:Физматлит, 2008. — 366 с.
5. Горынин И.В. Конструкционные материалы // Инновации. 2008. №6(116). С. 34–43.
6. Alekseev S., Taubin M., Yaskolko A. Influence of nanoscale inclusions on high temperature creep resistance of deformed tungsten 20th Workshop ISTC in Korea «Nanomaterials and nanotechnology». Seul, 2009.
7. Андриевский Р.А, Рагуля А.В. Наноструктурные материалы. М.: АСАДЕМА, 2005.
8. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. М.: Машиностроение-1. 2003. — 112 с.
9. Фейнман Р. Внизу полным полно места: приглашение в новый мир физики. // Химия и жизнь, 2002. № 12. С.20–26.
10. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. М.: Бинوم. Лаборатория знаний, 2008. — 134 с.
11. Белая книга по нанотехнологиям. Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокompозитов в Российской Федерации. По материалам Первого Всесоюзного совещания ученых инженеров и производителей в области нанотехнологий. М.: URSS, 2007. — 327 с.
12. Кормилицин О.П., Шукейло Ю.А. Механика материалов и структур нано- и микротехник. М.: АСАДЕМА. 2008 — 214 с.
13. Алексеев С.В., Таубин М.Л., Ясколко А.А. Наноструктурные и монокристаллические материалы для медицинской техники. Материалы 2 Всероссийского национального конгресса по радиологии, 2008. С.12–13.
14. Алексеев С.В., Игнатъев Д.Н., Павлов А.А, Таубин М.Л., Шестых, Д.Н. Ясколко А.А. Высокоэффективные источники рентгеновского излучения с катодами из наноматериалов. Сборник статей Международной конференции «Наноструктуры в конденсированных средах. Минск, 2011.
15. Alekseev S., Taubin M., Yaskolko A. Application of nanostructural materials in medical technic 20th Workshop ISTC in Korea «Nanomaterials and nanotechnology». Seul, 2009.
16. Development and Application of Nanostructural Materials in Medical X-ray Technique. Conference Abstract Books. BIT's 4th World gene Convention-2013, p. 301.
17. Таубин М.Л., Ясколко А.А. Рентгеновская трубка. Патент России № 237786, 27.12. 2009.
18. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения, Российские технологии. 2006. Т.1 № 1–2. С.71–81
19. Андриевский Р.А. Получение и свойства нанокристаллических тугоплавких соединений. Успехи химии,1994. Т.63. №5. С.431–448.

20. Рыжонков Д.И., Левина В.В., Дзидзигури Э.Л. Наноматериалы. М.:БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. — 364 с.
21. Коч К., Овидько И., Сил С., Вепрек С., Конструкционные нанокристаллические материалы. Научные основы и приложения /Перевод с англ. проф. А.Г. Ланина, под ред. проф. М.Ю.Гуткина. М.: Физматлит, 2012. — 447 с.

Рекомендуемые отечественные журналы:

1. Успехи физических наук.
2. Российский химический журнал.
3. ЖЭТФ.

Рекомендуемые зарубежные журналы:

- Physical review B.
Journal of Applied Physics.
Applied Physics Letters.
Nano Letters.
Nanotechnology.

ГЛАВА I

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

I.1. Спектры рентгеновского излучения

Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны в диапазоне $(10 \div 0,001)$ нм. Такие волны возникают при взаимодействии быстрых электронов с поверхностью металла. Если атомы элемента с большим атомным номером теряют внешние электроны, то энергия допустимых квантовых переходов составляет несколько электронвольт. Спектр излучения состоит из линий в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях. При удалении внутреннего электрона испускается фотон с энергией в десятки килоэлектронвольт. Такие фотоны получили название рентгеновских лучей. При этом кинетическая энергия пучка электронов должна превышать энергию связи внутренних электронов атома. Для определения этой энергии используется соотношение [1]

$$h\nu = 13,6(Z - 2)^2, \quad (1.1)$$

где h — постоянная Планка; ν — частота излучения; Z — порядковый номер атома в периодической системе элементов, 13,6 эВ — потенциал ионизации атома водорода. Для вольфрама получим $h\nu = 13,6(74-2)^2 = 70,50$ кэВ, что соответствует $\lambda = 0,018$ нм. Полученное значение длины волны укладывается в диапазон рентгеновского излучения.

Спектр рентгеновского излучения состоит из двух частей. Одна из них возникает при торможении электронов на аноде и получила название тормозного излучения. Оно имеет сплошной спектр. На рис. 1.1 приведена спектральная интенсивность тормозного излучения при различных напряжениях на трубке для вольфрамового анода [2]. В сторону длинных волн кривая спектральной интенсивности асимптотически приближается к нулю. Со стороны коротких длин волн кривая интенсивности излучения резко обрывается при определенной длине волны. Ее называют коротковолновой границей сплошного рентгеновского излучения. Она определяется из следующих физических соображений. Для рентгеновских лучей энергия кванта $h\nu$ существенно превышает работу выхода электрона. Пренебрегая работой выхода, запишем:

$$hn = eV, \quad (1.2)$$

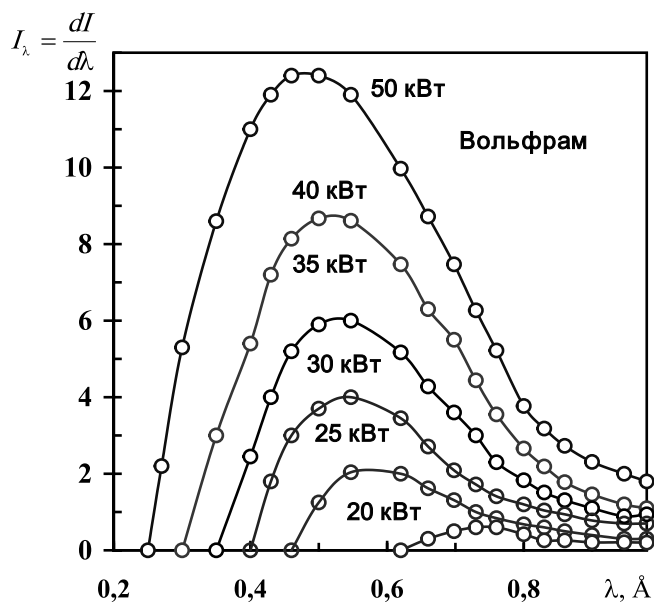


Рис. 1.1. Зависимость интенсивности тормозного рентгеновского излучения вольфрама от длины волны для разных напряжений на трубке [2]

где eV — энергия электрона, выраженная через ускоряющее напряжение. Минимальную длину волны тормозного излучения определяют из выражения (1.2)

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1,24}{V}, \quad (1.3)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света; e — заряд электрона; V — ускоряющая разность потенциалов между катодом и анодом. Для практических целей удобно пользоваться последним членом соотношения (1.3). Если V записывать в киловольтах, то λ_{\min} получают в нанометрах.

Физический смысл наличия коротковолновой границы сплошного рентгеновского спектра имеет простое объяснение в квантовой теории излучения. Величина кванта рентгеновского излучения $h\nu$ не может быть больше энергии электрона eV , поскольку появление кванта излучения обусловлено потерей энергии электрона при торможении. Это означает, что длина волны излучения не может быть меньше, определяемого соотношением (1.3). Относительное распределение энергии в спектре тормозного рентгеновского излучения не зависит от материала анода. Материал анода оказывает влияние только на интегральную интенсивность излучения. При прочих равных условиях последняя возрастает с увеличением порядкового номера элемента в периодической системе. Это положение хорошо иллюстрирует рис. 1.2, где интегральная интенсивность тормозного излучения для W (порядковый номер 74) существенно

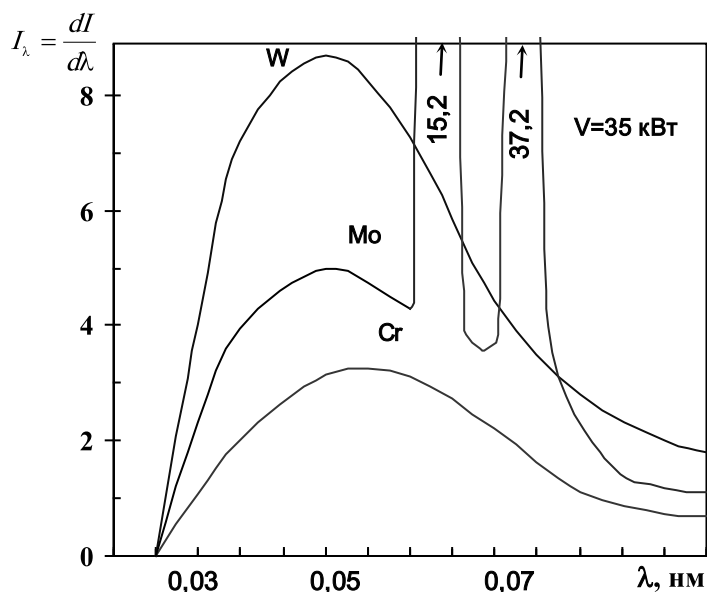


Рис. 1.2. Спектральное распределение энергии рентгеновского излучения для анодов из вольфрама, молибдена и хрома при напряжении между катодом и анодом 35 кВ [2]

превышает соответствующее значение для Cr (порядковый номер 24). Промежуточное положение занимает Mo (порядковый номер 42) при наличии двух линий характеристического рентгеновского излучения [2].

По мере повышения напряжения между катодом и анодом наряду со сплошным спектром появляется линейчатый. Он состоит из отдельных линий и зависит от материала анода. Каждый элемент имеет присущий ему характерный спектр. Отсюда и возникло название «характеристическое рентгеновское излучение». С увеличением напряжения на рентгеновской трубке коротковолновая граница сплошного спектра смещается в сторону более коротких длин волн. Однако линии характеристического излучения не меняют своего положения, а становятся лишь более интенсивными. Еще раз уделим внимание рис. 1.2. Для принятого напряжения $V = 35 \text{ кВ}$ лишь у Mo возбуждаются две спектральные линии характеристического излучения. Для W приведенного напряжения недостаточно для возбуждения спектральных линий. Последние возникают только при увеличении напряжения V . У Cr спектральные линии появляются на более длинных волнах и потому не приведены на рисунке. Спектральные линии возникают в результате перехода атома с одного энергетического уровня на другой. Разность энергий в конечном и начальном состояниях атома достаточно велика, поскольку рентгеновское излучение является коротковолновым. Поэтому квантовые переходы совершаются внутренними электронами атома. Для этого внутри электронной оболочки атома должны

быть свободные места, которые образуются при взаимодействии металла с быстрыми электронами. Свободные места в электронных оболочках замещаются электронами с вышележащих уровней. В результате этих процессов возникает весь спектр рентгеновского характеристического излучения.

Применение рентгеновского излучения связано с его поглощением и рассеянием в исследуемых объектах. Далее кратко затронем и эти вопросы.

1.2. Поглощение и рассеяние рентгеновского излучения

Если параллельный пучок рентгеновских лучей проходит через вещество, то он испытывает ослабление. Последнее обусловлено двумя причинами: рассеянием и абсорбцией. Под рассеянием понимают отклонение части лучей от первоначального распространения. По своим физическим проявлениям это явление аналогично рассеянию видимого света в мутных средах. Неоднородностями при рассеянии рентгеновских лучей являются отдельные атомы и электроны в атомах. При абсорбции ослабление пучка рентгеновских лучей происходит вследствие превращения его энергии в тепло. Количественно ослабление пучка рентгеновских лучей подчиняется закономерности

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x), \quad (1.4)$$

где I_0 — интенсивность падающего пучка; $I(x)$ — интенсивность ослабленного пучка; x — соответствующее расстояние; μ — коэффициент ослабления рентгеновских лучей. В общем случае коэффициент μ состоит из двух слагаемых:

$$\mu = \tau + \sigma, \quad (1.5)$$

где τ — коэффициент истинного поглощения (абсорбция); σ — коэффициент рассеяния. Все эти коэффициенты пропорциональны плотности вещества ρ . Поэтому при проведении практических расчетов иногда пользуются атомными коэффициентами

$$\mu_a = \frac{\mu}{\rho} \frac{A}{N_A}, \quad \tau_a = \frac{\tau}{\rho} \frac{A}{N_A}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma}{\rho} \frac{A}{N_A}, \quad (1.6)$$

где A — молекулярная масса (масса одного моля); N_A — постоянная Авогадро. Удобство введения этих коэффициентов состоит в том, что они имеют размерность площади. Теперь их можно интерпретировать как поперечное сечения атома по отношению к ослаблению, поглощению и рассеянию рентгеновских лучей. Атомный коэффициент поглощения рентгеновского излучения τ_a пропорционален четвертой степени порядкового номера элемента, то есть $\tau_a \sim Z^4$. Именно на этом основано применение рентгеновских лучей для просвечивания



различных объектов. В качестве иллюстрации сравним коэффициенты поглощения рентгеновских лучей для костей и тканей человеческого тела. В состав кости входит фосфорнокислый кальций $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, а поглощение ткани обусловлено водой H_2O . С учетом порядкового номера, плотности и молекулярных масс элементов показано, что коэффициент поглощения кости на порядок превышает таковой для ткани. Поэтому на рентгеновских снимках тень от кости выделяется более резко.

Если жесткое рентгеновское излучение взаимодействует с атомами легких элементов (графит, парафин), то наблюдают увеличение длины волны рассеянного излучения (эффект Комптона). Это обусловлено столкновением кванта излучения с электроном легкого атома (такой электрон можно считать практически свободным). Для количественного описания эффекта Комптона применяют законы сохранения энергии и импульса с учетом релятивистских эффектов. Несложные математические преобразования позволяют получить простое соотношение для изменения длины волны рассеянного излучения:

$$\lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta), \quad (1.7)$$

где λ — длина волны падающего излучения; λ' — длина волны рассеянного излучения ($\lambda' > \lambda$); θ — угол между направлениями падающего и рассеянного излучений; λ_c — комптоновская длина волны частицы рассеяния. Универсальная постоянная λ_c выражается через фундаментальные физические константы:

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}, \quad (1.8)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света; m — масса частицы рассеяния. Для электрона комптоновская длина волны равна $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$ м ($2,43 \cdot 10^{-3}$ нм).

Центральным узлом любой рентгеновской установки является катод. Он служит источником быстрых электронов для формирования рентгеновского излучения. Далее кратко остановимся на физическом принципе работы эмиттера с позиции фотоэффекта и термоэлектронной эмиссии.