

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ Н-100 М ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФИЗИКЕ ТВЕРДОГО ТЕЛА



В.Е. Иващенко, И.М. Карнаухов, Н.В. Ковалёва, А.А Щербаков

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,

г.Харьков, Украина; E-mail: shcherbakov@kipt.kharkov.ua

Синхротронное излучение и его уникальные свойства, особенно непрерывный спектр и высокая степень поляризации широко используются в исследованиях твердого тела. Приведены основные характеристики синхротронного излучения из накопительного кольца Н-100 М (NESTOR) и рассмотрены примеры применения в вакуумной ультрафиолетовой спектроскопии твердого тела, в исследовании анизотропии оптических свойств кристаллов с применением методов эллипсометрии, в исследовании люминесценции, XANES - спектроскопии.

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) в последнее время стало играть определяющую роль в интенсивном развитии наиболее перспективных научных исследований, направленных на создание новейших технологий в области физики, химии, биологии, новых материалов, микроэлектроники, томографии, материаловедения, элементного анализа и др. [1]. Исследования с помощью СИ имеют полувековую историю. Результаты описаны в тысячах публикаций и сотнях книг (монографий, учебников). Работами по применению СИ занимаются десятки крупнейших лабораторий мира, созданы и создаются национальные центры по использованию СИ. Действуют, проектируют и строятся специализированные источники СИ, на которых проводят и планируют проводить научно-исследовательские и технологические работы, в США, Германии, Японии, Англии и др. [2]. Уникальные свойства СИ сделали его мощнейшим инструментом в проведении научных исследований и решении прикладных задач.

В ННЦ ХФТИ разрабатывается генератор рентгеновского излучения Н-100 М (NESTOR) (New Electron Storage Ring) на основе обратного комптоновского рассеяния интенсивного лазерного пучка на релятивистском пучке электронов в реконструируемом накопителе Н-100 [3]. Кроме генерации жестких рентгеновских фотонов, в накопителе Н-100 М (NESTOR) из поворотных магнитов будет выводиться СИ, которое может найти широкое применение.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИ

Схема с возможными каналами вывода СИ, параметры и основные характеристики СИ проектируемого накопителя Н-100 М (NESTOR) приведены на рисунке и в таблице соответственно [4].

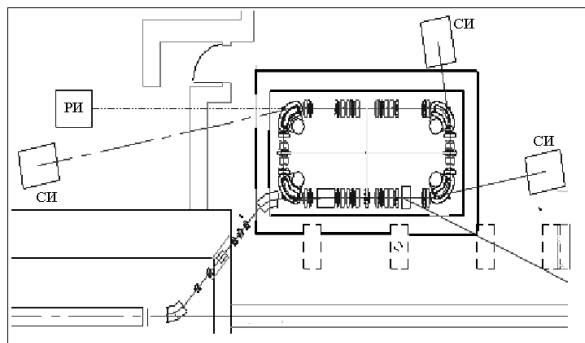


Схема накопителя Н-100 М (NESTOR) с возможными каналами вывода СИ

СИ из поворотных магнитов Н-100 М обладает необходимой интенсивностью как в ультрафиолетовой, так и в инфракрасной областях. Многочисленные применения этого излучения могут быть реализованы в физике конденсированных сред, физике полупроводников и сверхпроводников, в физике твердого тела и в ряде других областей.

ПРИМЕНЕНИЕ

Среди ряда практических применений СИ наиболее интересным оказалось его использование в экспериментах по вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) спектроскопии твердого тела. Исследования в этой области дают очень важную информацию для понимания электронной структуры твердого тела.

Фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС) является универсальным методом исследования электронной структуры твердых тел и их поверхности. С помо-

**Параметры и основные характеристики
СИ накопителя Н-100 М (NESTOR)**

Энергия пучка электронов E , МэВ	40...225
Максимальный накопленный ток I , А	0.36
Радиус поворота в магнитах ρ , м	0.5
Бетатронные частоты Q_x, Q_y	3.155, 2.082
ВЧ – частота, МГц	700
Число сгустков	36
Размеры пучка электронов в точке излучения σ_x, σ_z , мм	0.226, 0.13
Расходимость электронного пучка σ'_z , мрад	0.13
Критическая энергия излучения, эВ	0.5...50
Критическая длина волны СИ, Å	245
Расходимость СИ ψ , мрад	0.012...0.0023
Максимальная мощность пучка фотонов, Вт/мрад	0.025
Максимальная яркость СИ B_λ , фотон/(0,1%Ш.П. мм ² ·мрад ² ·с)	$3.9 \times 10^{12} \dots 2 \times 10^{13}$
Максимальный поток фотонов, фотон/с/0,1%Ш.П./мрад	1.4×10^{12}

щью ФЭС возможно получать уникальную информацию об электронном спектре валентной зоны и о тонких особенностях электронного спектра в непосредственной близости от уровня Ферми, что очень важно для многих задач (ВТСП, манганаты, квазикристаллы и др.).

На действующих специализированных источниках СИ (малое накопительное кольцо курчатовского источника СИ) [2] созданы станции ФЭС для ВУФ-области. Такие станции позволяют проводить исследования свойств поверхности, так как глубина выхода фотоэлектронов зависит от энергии возбужденного состояния. Меняя энергию фотонов, можно работать с фотоэлектронами, вылетающими с разной глубины, и, таким образом, получать информацию как об объеме, так и о поверхностном слое образца. Работая с поверхностными фотоэлектронами, можно изучать целый комплекс задач (окисление, диффузию, поверхностный катализ и др.).

Резонансная ФЭС (РФЭС) позволяет получать информацию о парциальном вкладе атомов отдельных элементов сложного соединения в формирование валентной зоны (так как в процессе РФЭ участвует сильно локализованное состояние глубокого уровня, то этот процесс выделяет состояния в валентной зоне, генетически связанные с атомными электронными волновыми функциями).

ФЭС с угловым разрешением (ФСУР), если электрон возбуждается в твердом теле и без рассеяния выходит из него, то угол эмиссии в принципе будет прямо связан с импульсом $\hbar k$ того состояния кристалла, в которое электрон возбуждается излучением. Если процесс оптического возбуждения прямой, т.е. если при переходе между начальным и конечным состояниями k не изменяется, то ФЭСУР можно использовать для получения информации о зон-

ной структуре. ФЭСУР позволяет также получать информацию об ориентации электронных состояний атомов, адсорбированных на поверхности.

Таким образом, применение метода ФЭС для изучения электронной структуры твердых тел помогает успешно решать фундаментальные задачи физики твердого тела, физики поверхности, материаловедения, микроэлектроники, поверхностного катализа и ряда других областей науки, определяющих современный научно-технический прогресс.

Одним из уникальных свойств СИ является высокая степень поляризации. Изменение состояния поляризации света при отражении является основой метода определения оптических свойств материалов [5]. На накопителе Н-100 М можно эффективно применять методы эллипсометрии (определение оптических констант, толщины тонких пленок, изучение адсорбции, окисления поверхности полупроводников и металлов и др.), проводить исследования массивных и тонкопленочных, изотропных и анизотропных образцов.

Необходимость применения СИ для исследования люминесценции вызвана тем, что в качестве оснований люминофоров применяются, как правило, широкозонные кристаллы [6,7]. Характерный для этих кристаллов электронный спектр лежит в ВУФ-области 5...20 эВ. Именно в этой области фундаментального поглощения проявляются межзонные переходы валентных электронов, экситоны плазмоны. Для понимания механизма возбуждения люминофоров особенно важны и более высокоэнергетические возбуждения люминесценции кристаллофосфоров при энергиях, во много раз превышающих ширину запрещенной зоны. При этом возбуждаются уже переходы электронов из внутренних оболочек образующих кристалл атомов. Понимание процессов возникновения и миграции этих высокоэнергетических возбуждений к центру свечения является фундаментальной задачей люминесценции кристаллофосфоров. При этом важную роль играют механизмы размножения элементарных возбуждений.

Исследование спектров возбуждения люминесценции и отражения твердых тел с использованием СИ привело к пониманию ряда общих черт процесса релаксации энергии. Этот процесс может быть разделен на следующие стадии: размножение электронных возбуждений (ЭВ) благодаря неупругому электрон – электронному рассеянию (характерные времена порядка 10^{-15} с), термализации на фотонах (10^{-12} с) и миграции энергии к центрам люминесценции. На последней стадии проявляется роль корреляции ЭВ, созданных одним фотоном (генетическая рекомбинация). На этой же стадии происходит выход возбуждений на поверхность кристалла (поверхностные потери). С помощью СИ был накоплен большой экспериментальный материал, который позволил объяснить новые типы люминесценции (например, кросслюминесценцию) [2].

Возбуждение люминесценции является удобным средством исследования энергетической и пространственной структуры твердых тел. Благодаря приповерхностному тушению и нелинейности люми-

несценции структура коэффициента поглощения в спектрах возбуждения люминесценции может быть более ярко выражена, чем в спектрах отражения. Для порошковых образцов исследование спектров возбуждения является уникальным способом получения информации об энергетической структуре.

Большинство физико-химических свойств веществ в конденсированном состоянии в значительной мере определяется локальной структурой материала [8]. Для анализа структуры материи используются различные физические методы. Одним из мощных методов изучения электронной подсистемы и локальной структуры твердых тел стало исследование ближней тонкой структуры рентгеновского поглощения (международный термин – X-ray Absorption Near Edge Structure, XANES).

Тонкая околороговая структура спектров поглощения XANES является очень чувствительной как к электронному состоянию поглощающего атома, так и к его локальному окружению. Поэтому все большее число исследователей начинает применять метод XANES для получения данных об электронном и кристаллическом строении вещества. XANES-спектроскопия занимает энергетический интервал приблизительно до 50 эВ выше края поглощения. Средняя длина свободного пробега фотоэлектрона в твердом теле существенно зависит от энергии и в области низких энергий имеет большое значение, что позволяет фотоэлектрону пройти большее расстояние в веществе и рассеяться несколько раз. Большая длина свободного пробега позволяет вовлекать в процесс рассеяния большое количество атомов окружения, находящихся на значительных расстояниях от поглощающего. В режиме многократного рассеяния результирующая интерференционная картинка будет складываться из первичной электронной волны нескольких вторичных, многократно отраженных от соседних атомов. Изменение симметрии окружения даже без изменения расстояния между поглощающим атомом и его соседями будет приводить к изменению спектра XANES. Анализируя структуру спектра XANES можно определять расстояния до соседних атомов в кристаллической решетке, изучать симметрию распределения соседних атомов, т.е. полную геометрическую структуру исследуемого вещества.

Данный метод успешно применяется в настоящее время для исследования локальной структуры различных веществ, в том числе таких уникальных новых материалов, как высокотемпературные сверхпроводники, фуллерены, тонкие монокристаллы, сверхлегкие сплавы, цеолиты и другие кластерные материалы, молекулы катализаторов у поверхности и многие другие.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены некоторые примеры применения СИ накопителя H-100 M (NESTOR) в ВУФ-спектроскопии твердого тела, в исследовании люминесценции. Поляризационные характеристики СИ этого источника позволяют проводить детальные исследования анизотропии оптических свойств кристаллов. На накопительном кольце H-100 M (NESTOR) допустимы исследование твердых тел с помощью XANES - спектроскопии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Herman Winick. *Synchrotron radiation sources: a primer*. Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific, 1994.
2. Материалы Международного рабочего совещания «Синхротронный источник ОИЯИ: перспективы исследований» //Дубна: ОИЯИ, 1999.
3. P. Gladkikh, I. Karnaukhov, A. Zelinsky, et al. Intense X – Ray Sources Based on Compton Scattering in Laser Electron Storage Ring //VANT. Series: Nuclear Physics Investigation(40). 2002, №2, p 72-74.
4. V.E. Ivashchenko, I.M. Karnaukhov, N.V. Kovalyova, A.A. Shcherbakov, A.Yu. Zelinsky. Characteristics of synchrotron radiation of storage ring NESTOR and its applications //VANT. Series: Nuclear Physics Investigation, в печати.
5. Р. Аззам, Н. Башара. *Эллипсометрия и поляризованный свет*. М.: «Мир», 1981, с 474-527.
6. *Синхротронное излучение в исследовании твердых тел*. М.: «Мир», 1970.
7. И.М. Тернов, В.В. Михайлин. *Синхротронное излучение. Теория и эксперимент*. М.: «Энергоатомиздат», 1986, с. 219-250.
8. А.В. Солдатов. От спектроскопии EXAFS к спектроскопии XANES: новые возможности исследования материи // *Соросовский образовательный журнал*. 1998, №12, с. 101-104.

ВИКОРИСТАННЯ СИНХРОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НАГРОМАДЖУВАЧА H-10 M ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ У ФІЗИЦІ ТВЕРДОГО ТІЛА

В.Є. Іващенко, І.М. Карнаухов, Н.В. Ковальова, О.О. Щербаків

Синхротронне випромінювання і його унікальні властивості, особливо безперервний спектр і високий ступінь поляризації широко використовується в дослідженнях твердого тіла. Приведено характеристики синхротронного випромінювання накопичувального кільця H-100 M (NESTOR) та розглянуті приклади застосування у вакуумній ультрафіолетовій спектроскопії твердого тіла, у дослідженні анізотропії оптичних властивостей кристалів, застосовуючи методи еліпсометрії, у дослідженні люмінесценції, XANES - спектроскопії.

USE OF SYNCHROTRON RADIATION OF STORAGE RING N-100 M FOR RESEARCH IN SOLID STATE PHYSICS

V.E. Ivashchenko, I.M. Karnaukhov, N.V. Kovalyova, A.A. Shcherbakov

The synchrotron radiation and its unique properties, especially continuum spectrum and high degree of polarization are widely used for research of a solid state. In article, characteristics of synchrotron radiation of an storage ring N-100 M (NESTOR) is adduce and the examples of application in a vacuum ultraviolet spectroscopy of a solid state, in research of

an anisotropy of optical properties of crystals, applying methods of an ellipsometry, in research of a luminescence, of XANES - spectroscopy are considered.