

SYNCHROTRON RADIATION IN MATERIALS STUDIES

V. V. MIKHAILIN

A short history of the discovery, development and the general properties of synchrotron radiation (SR) is presented. Electron accelerators and storage rings as SR sources, as well as SR applications in solid state physics, atomic and molecular spectroscopy, biology, medicine and materials science, are discussed.

Краткая история открытия и исследований синхротронного излучения (СИ). Основные свойства. Ускорители электронов и накопители как источники СИ. Применение СИ в физике твердого тела, атомной и молекулярной спектроскопии, в биологии и медицине, в материаловедении.

СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

В. В. МИХАЙЛИН

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение в последнее время стало важнейшим инструментом исследования свойств вещества. Во всем мире создаются центры по использованию синхротронного излучения, строятся дорогостоящие источники. В ближайшее время в Москве, в Российском научном центре “Курчатовский институт” начинает функционировать источник синхротронного излучения — накопитель электронов на 2,5 ГэВ (и это дополнительно к шести уже действующим в России источникам — синхротронам и накопителям в Москве, Новосибирске и Томске). Синхротронное излучение используется сегодня практически во всех областях современной науки, где изучается взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. В школьном курсе физики синхротронному излучению не уделено пока достаточного внимания, но основы для понимания этого уникального явления и многих его применений имеются: есть описание циклического ускорителя, введены элементы теории относительности, понятие электромагнитного излучения, поляризации света и т.п.

Мы начнем с истории открытия и исследования синхротронного излучения (СИ), в которой российские физики сыграли не последнюю роль. Познакомимся с физикой явления, устройством источников СИ и некоторыми применениями в физике твердого тела, в атомной и молекулярной спектроскопии, в биологии и медицине. История СИ, которое вначале воспринималось как препятствие для ускорения частиц (то есть отрицательное явление) и стало одним из важнейших инструментов исследования материи, весьма поучительна.

ОТКРЫТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИ

Синхротронное излучение — это электромагнитное излучение ультрарелятивистских электронов (позитронов), ускоряемых в циклических ускорителях. Если посмотреть шире, то это излучение заряженных частиц, движущихся по криволинейным траекториям, так как и это соответствует ускорению. То, что ускоряемый заряд излучает, известно давно, еще с прошлого века. Особый интерес к излучению ускоряемых заряженных частиц появился в сороковых годах нашего века из-за предельной

энергии электронов, достижимой в бетатронах. Уже тогда (в 1944 году) Д.Д. Иваненко и И.Я. Померанчук опубликовали статью, в которой показали, что потери на магнитотормозное излучение в циклическом ускорителе пропорциональны четвертой степени энергии, до которой ускорены электроны. Первоначально это явление называлось “светящийся электрон”. Но в работе Иваненко и Померанчука не говорилось, в какой области спектра излучает светящийся электрон. Потери на излучение безусловно стали учитываться при конструировании циклических ускорителей. Поиск излучения “светящегося электрона” начали экспериментаторы. Американский физик Д. Блюитт попытался обнаружить СИ на синхротроне на 80 МэВ фирмы “Дженерал Электрик”, однако неправильно оценил спектральное распределение и искал излучение в СВЧ-области. На том же синхротроне несколько позже (в 1947 году) аспирант Х. Поллака Ф. Хаббер при проведении профилактических работ на камере ускорителя (в одном месте было снято металлизированное непрозрачное покрытие стеклянной камеры ускорителя) увидел яркий голубоватый свет с орбиты электронов. Поскольку экспериментально излучение впервые было обнаружено на синхротроне, его и назвали синхротронным.

Сейчас кажется странным, почему излучение пытались обнаружить в СВЧ-области, так как даже учет хотя бы эффекта Доплера дает смещение максимума излучения в область высоких частот пропорционально γ^2 (γ – фактор Лоренца), а острая направленность излучения (“прожекторный эффект” – релятивистский эффект из-за большой скорости движения электрона) добавляет еще порядок. Итак, искали не там, а обнаружили, где надо. Теоретики довольно скоро показали (эксперимент подсказал!), что максимум излучения смещен в область высоких частот (по отношению к частоте вращения электрона на орбите $\omega_0 = c/2\pi R$, где c – скорость света, R – радиус орбиты электрона) и даже для такой слабой еще машины (всего-то 80 МэВ!) уже уходит в область вакуумного ультрафиолета, а для современных синхротронов и накопителей – в рентгеновскую область и даже в область γ -излучения. В 1948 году появилась работа А.А. Соколова и Д.Д. Иваненко по спектральному и угловому распределению СИ (а годом позже – в 1949 году – независимо аналогичная работа Ю. Швингера). Именно в этих работах приведена формула для расчета спектральных и угловых характеристик СИ, которая и сейчас используется.

Следующим этапом было экспериментальное исследование свойств СИ и проверка теории. В 1956 году была опубликована работа П. Гартмана и Д. Томбуляна по экспериментальному исследованию спектральных и угловых характеристик ультрафиолетового излучения Корнельского синхротрона (США) на 300 МэВ. В эти же годы поляризационные характеристики СИ активно исследуют физики

Московского университета (О.Ф. Куликов и другие). С начала 60-х годов началось использование СИ в эксперименте, сначала в атомной спектроскопии, а вскоре и в физике твердого тела. С 1967 года в совместных работах Московского университета и Физического института АН СССР (ФИАН) синхротронное излучение начали применять в спектроскопии твердого тела и для исследования высокоэнергетического возбуждения люминесценции. На синхротроне ФИАН на 680 МэВ С-60 был построен первый в России вакуумный ультрафиолетовый канал СИ.

ЦИКЛИЧЕСКИЙ УСКОРИТЕЛЬ

Вспомним, как устроен циклический ускоритель электронов (рис. 1). Из инжектора 1 (это, как правило, линейный ускоритель или микротрон) предварительно ускоренные электроны попадают на круговую орбиту ускорителя. Захват электронов в режим синхротронного ускорения возможен при достижении релятивистских скоростей частиц, ибо синхротронная равновесная орбита, по которой электрон движется с постоянной средней угловой частотой и медленно меняющимся радиусом, требует уже в начальном периоде, чтобы энергия частицы была релятивистской ($E > m_0 c^2$), поэтому синхротронному режиму ускорения предшествует предварительный этап ускорения – либо бетатронный, либо специального инжектора типа линейного ускорителя, или микротрона. На круговой орбите электроны 5 удерживаются магнитным полем поворотных магнитов 4. В индукционном ускорителе (бетатроне) и несущее, и ускоряющее поля – магнитные. Мы уже знаем, что предел энергии, до которой ускоряются электроны в бетатроне, около 300 МэВ. В синхротроне магнитное поле в поворотных магнитах увеличивается по мере увеличения энергии электронов, чтобы удержать электроны на

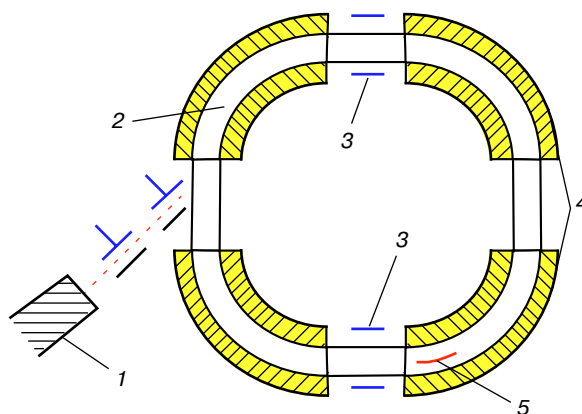


Рис. 1. Схема циклического ускорителя: 1 – инжектор, 2 – вакуумная камера, 3 – ускоряющие промежутки, 4 – квадранты магнита, 5 – сгусток электронов.

равновесной синхротронной орбите (синхронно с ускорением — отсюда и название синхротрон). Обычно круговая камера 2 синхротрона разделяется на 4 части (квадранты 4), между которыми образуются прямолинейные промежутки 3. В один из них устанавливается резонатор с меняющимся электрическим полем, в котором электроны “подталкиваются” (ускоряются). Преимущества синхротрона существенны, так как магниты, в отличие от бетатрона, установлены только на криволинейных участках траектории, а потери энергии на СИ компенсируются. Предел достижимой энергии определяется теперь линейными размерами ускорителя, магнитными полями и потерями на СИ. Итак, в синхротроне ускоренный электрон движется с ультррелятивистской скоростью, то есть со скоростью v , близкой к скорости света c .

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИ

Известно, что для нерелятивистских электронов излучение имеет угловое распределение, характерное для диполя Герца (рис. 2). Для релятивистских частиц это распределение сдвигается в направлении движения из-за эффекта Доплера (источник движется со скоростью $v \rightarrow c$). При этом при продольном ускорении (линейный ускоритель) векторы скорости и ускорения совпадают и распределение симметрично относительно направления v . При поперечном ускорении распределение искажено в направлении движения, которое перпендикулярно ускорению. Деформированный конус излучения имеет здесь средний угол раскрытия $\delta\psi \approx m_0 c^2 / E$ (рис. 3). При таком узком угловом распределении внешний наблюдатель видит электроны не на всем круговом пути, а на коротком участке орбиты. Он регистрирует не только частоту обращения электронов, но, вследствие ультррелятивистских скоростей, также и высшие ее гармоники вплоть до гармоник, лежащих в высокоэнергетической области спектра (для синхротрона ДЭЗИ, например, при 0,1 Å). Из-за синхротронных и бетатронных колебаний электронов на орбите происходит перекрытие отдельных высоких гармоник в континуум.

Выделим особо свойства СИ, наиболее важные для практических применений. Как мы уже знаем, СИ ультррелятивистского электрона сосредоточено в плоскости орбиты электрона и благодаря релятивистским эффектам является остронаправленным. В каждый момент излучение заключено в конусе с углом раствора $1/\gamma$ и направлено по касательной к траектории в точке излучения (γ — релятивистский фактор, $\gamma = E/(m_0 c^2)$). Благодаря острой направленности излучение приходит в точку наблюдения в виде короткого импульса

$$\Delta\tau = \frac{1}{\omega_0 \gamma},$$

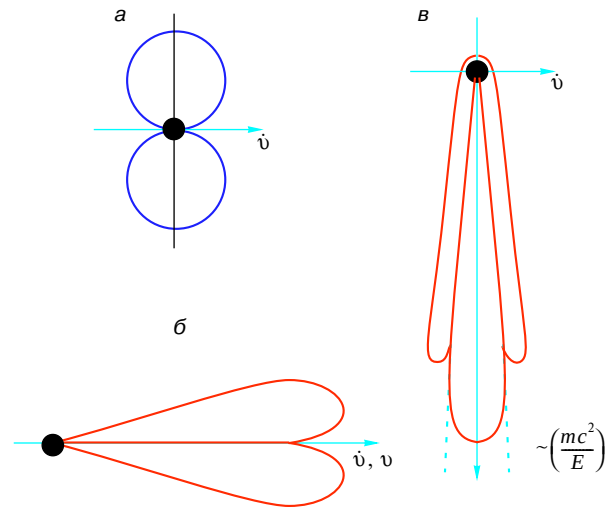


Рис. 2. Угловое распределение излучения ускоряемого электрона: а — нерелятивистский электрон, б — релятивистский продольно ускоряемый электрон, в — релятивистский поперечно ускоряемый электрон.

где $\omega_0 = c/(2\pi R)$ — частота обращения электрона по орбите. Эффект Доплера приводит к тому, что максимум мощности излучения не приходится на частоту обращения ω_0 , а смещен в область более высоких частот, соответствующих

$$\Delta t = \Delta\tau(1 - \beta \cos\psi) \approx \Delta\tau \frac{1}{\gamma^2} = \frac{1}{\omega_0 \gamma^3},$$

где Δt — время, в течение которого наблюдатель видит импульс СИ электрона, а ψ — угол наблюдения, $\beta = v/c$. Отсюда естественно следует, что максимум излучения смещен в область частот

$$\omega_c \sim \frac{1}{\Delta t} \sim \omega_0 \gamma^3,$$

а критическая длина волны излучения

$$\lambda_c = \frac{4\pi R}{3} \frac{1}{\gamma^3} = 5,59 \frac{R}{E^3}.$$

С учетом того, что $\lambda_{\max} = 0,42\lambda_c$, оценка для длины волны максимума излучения $\lambda_{\max} = 2,54R/E^3$, где R в метрах, а E в гигаэлектронвольтах.

Даже такое элементарное рассмотрение дает две важные для практики характеристики СИ — угол раствора излучения и длину волны максимума излучения. Кривая спектрального распределения СИ по виду напоминает планковское распределение для абсолютно черного тела. При таком условном сопоставлении синхротрон ФИАН на 680 МэВ подобен черному телу с температурой около 10^6 К, а синхротрон ДЭЗИ — с температурой 10^7 К. Другими наземными источниками, обладающими таким спектром,

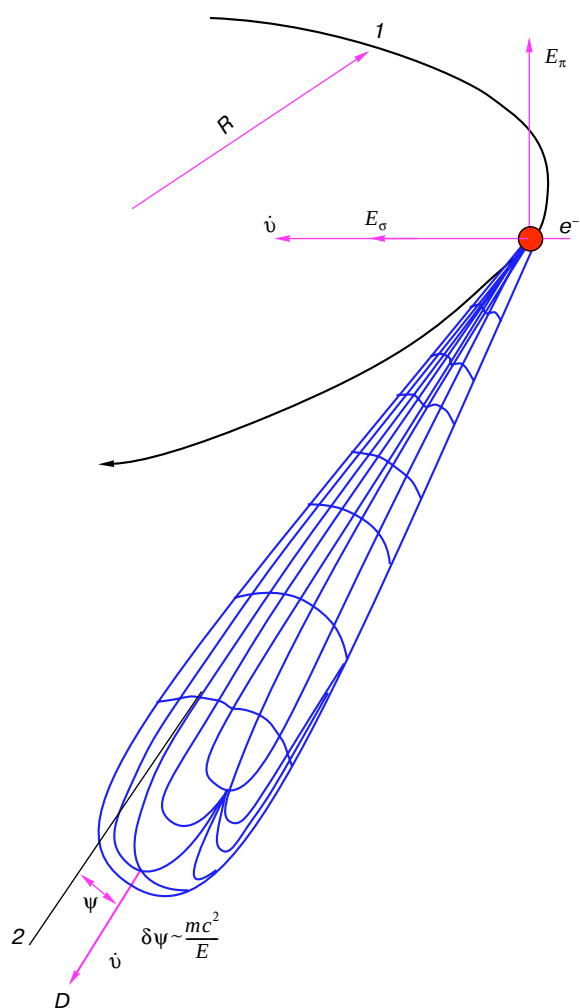


Рис. 3. Угловое распределение излучения релятивистского электрона, движущегося по круговой орбите: 1 – орбита, 2 – направление излучения, D – точка наблюдения.

могут быть высокотемпературная плазма или ядерный взрыв – существенно менее удобный источник для целей спектроскопии.

Одними из первых (в 1956 году) исследовали спектральное распределение интенсивности СИ Ю.М. Адо и П.А. Черенков. Исследования были проведены в видимой области спектра при энергиях электронов 150 – 250 МэВ; результаты хорошо согласуются с теоретическими данными. Пионерами в исследовании поляризационно-угловых характеристик СИ были О.Ф. Куликов с соавторами. На синхротроне ФИАН на 680 МэВ ими были получены фотографии углового распределения интенсивности СИ в компонентах линейной поляризации излучения для энергии электронов 250 МэВ. Сравнение экспериментальных данных, полученных в этих работах, с теорией представлено на рис. 4, где

показаны теоретические кривые для углового распределения излучения электронов и экспериментальные данные, полученные в результате суммирования излучения электронов за все время цикла ускорения. Эксперимент в согласии с теорией показал, что компонента линейной поляризации с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости орбиты (π -компонента), имеет характерное угловое распределение с минимумом в плоскости орбиты. Компонента с электрическим вектором, параллельным плоскости орбиты (σ -компонента), имеет максимум в плоскости орбиты. Непосредственно в плоскости орбиты излучение почти полностью линейно поляризовано (эксперимент показал, что провал в угловом распределении компоненты все же не до нуля). Вырезая излучение в плоскости орбиты, можно получить линейную поляризацию, достигающую 98%. Усредненная по всем углам и длинам волн степень линейной поляризации все еще очень высока и достигает 75%. В выражении для линейной поляризации

$$P = \frac{I_{\sigma} - I_{\pi}}{I_{\sigma} + I_{\pi}}$$

I_{σ} – интенсивность компоненты с электрическим вектором в плоскости орбиты, I_{π} – с вектором, перпендикулярным плоскости орбиты.

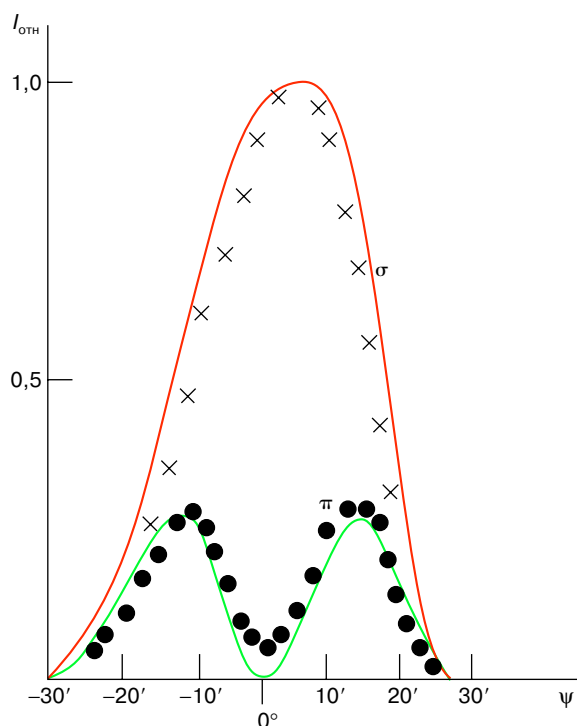


Рис. 4. Сравнение теоретических данных (кривые) с экспериментальными (точки) по зависимости от угла ψ интенсивности σ - и π -компоненты линейной поляризации СИ (по данным О.Ф. Куликова).

О.Ф. Куликовым экспериментально проверено и другое предсказание теоретиков о том, что между колебаниями векторов компонент существует сдвиг по фазе, который равен $-\pi/2$ для излучения электронов выше плоскости орбиты (то есть излучение должно быть циркулярно поляризовано с левым вращением) и равен $\pi/2$ для излучения ниже плоскости орбиты (то есть излучение поляризовано с правым вращением). Таким образом, мы имеем левую циркулярную поляризацию над плоскостью орбиты и правую — под плоскостью (или наоборот — в зависимости от направления вращения электрона).

Временная структура СИ связана с типом машины. На синхротроне цикл ускорения, как правило, повторяется с частотой 50 Гц, и с такой же частотой повторяются пакеты импульсов СИ, промодулированные внутри пакетов с частотой обращения электронов на орбите $\omega_0 = c/2\pi R$. Длина сгустка электронов на орбите определяет длительность этого минимального импульса, которая достигает сотен пикосекунд. Если на орбите несколько сгустков, то частота повторения будет кратной частоте обращения $\omega' = N\omega_0$, где N — число сгустков. В накопителях электроны живут на орбите часами. Здесь важно учесть длину сгустка, достигающую нескольких сантиметров (длительность до 100 пс), число сгустков на орбите и частоту обращения электрона. Постепенно интенсивность импульсов СИ снижается из-за потери частиц с орбиты.

Без сомнения, накопитель имеет серьезные преимущества перед синхротронами как источник СИ, в частности, благодаря возможности длительного использования излучения моноэнергетических электронов. На синхротроне в отличие от накопителя в каждом цикле ускорения необходимо при помощи прерывателя (механического модулятора) выделять временной участок (при 50 Гц порядка 5 мс), на котором электроны можно считать моноэнергетическими (вершина синусоиды). Это существенно снижает эффективность использования синхротрона в качестве источника. Есть и другие важные преимущества у накопителей как источников СИ, связанные с меньшим сечением пучка электронов, возможностью накопления большого числа частиц на орбите, более высоким вакуумом (10^{-9} Торр), более низким радиационным фоном вокруг накопителя, что позволяет располагать аппаратуру в непосредственной близости от источника СИ, и др. Синхротроны как источники СИ сыграли важную историческую роль в освоении СИ: на них было обнаружено СИ, исследованы его основные характеристики, начаты (и идут до сих пор) эксперименты по использованию СИ. Но будущее, конечно, за накопителями: именно на основе накопителей созданы и разрабатываются специализированные источники СИ.

КАНАЛЫ СИ

Использование СИ для спектроскопии начинается уже с работ П. Гартмана и Д. Томбуляна (1958 год) по применению СИ в атомной спектроскопии. Более систематическое использование СИ начинается с работ Р. Хэнзела и К. Кунца (1964 год) на немецком синхротроне ДЭЗИ. На этом синхротроне на 6 ГэВ был создан канал СИ, и излучение начало использоваться в широкой области спектра от ультрафиолетовой до рентгеновской в основном для спектроскопии твердого тела, атомной и молекулярной спектроскопии, метрологии. Со временем ДЭЗИ превратился в крупнейший в Европе центр СИ практически с универсальной программой исследований (физика, химия, биология, микрофотография и др.). Новые каналы синхротронного излучения созданы также на накопителе ДОРИС, инжектором для которого служит синхротрон ДЭЗИ. Однако все эти работы ведутся наряду с основными работами центра ДЭЗИ по физике высоких энергий, которые определяют режим работы машины. Такой стиль работы вообще характерен для источников СИ первого поколения, то есть машин, предназначенных для физики высоких энергий, а не для получения СИ. Среди ряда практических применений СИ наиболее интересным оказалось его использование в экспериментах по спектроскопии твердого тела. Исследования подобного ряда в нашей стране начались с 1967 года группой синхротронного излучения МГУ на синхротроне С-60 ФИАН и получили развитие на многих ускорителях и накопителях России. Особые свойства источников СИ обусловили создание специализированного оборудования, которое существенно отличается от традиционного, применявшегося с обычными источниками излучения. Эксперименты по использованию СИ в спектроскопии твердого тела, начавшиеся у нас в стране на синхротроне С-60 ФИАН, продолжались на ускорителе “Пахра” ФИАН. На синхротроне “Сириус” впервые у нас в стране СИ начали использовать для исследования фотоэмиссии. Все три синхротрона, о которых мы говорили, являются источниками в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра (источниками первого поколения). Источниками второго поколения являются накопители. Накопитель электронов “Сибирь-1” Курчатовского института — это первый в России специализированный источник СИ. Он был сдан в эксплуатацию в 1983 году. “Сибирь-1” — это источник вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения. В этом же комплексе начинает действовать источник рентгеновского СИ “Сибирь-2” — накопитель электронов на энергию 2,5 ГэВ.

ПРИМЕНЕНИЯ СИ

Основными областями спектра, в которых наиболее эффективно применяется СИ, являются

вакуумная ультрафиолетовая, мягкая рентгеновская и рентгеновская области. Именно в этих областях СИ имеет наибольшее преимущество перед другими источниками. Исследование в области ВУФ и мягкого рентгена дают очень важную информацию для понимания электронной структуры твердого тела. Существенный прогресс в этой области стал возможен благодаря, с одной стороны, применению СИ, с другой, — теоретическим расчетам зонной структуры. Теоретический расчет дает дисперсию энергии от волнового вектора и приведенную плотность состояний в зависимости от энергии.

На рис. 5 показана упрощенная зонная схема твердого тела с указанием переходов, вызванных взаимодействием излучения с твердым телом. Край фундаментального поглощения кристалла связан с шириной запрещенной зоны E_g и вызван переходом электрона из валентной зоны $ЗВ$ в зону проводимости $ЗП$. В запрещенной зоне показаны уровни, связанные с примесями и собственными дефектами решетки. На схеме приведены оптические переходы, определяющие структуру поглощения кристалла, как фундаментального, так и примесного. Однако лишь одна зонная схема без включения экситонных переходов не позволяет надежно интерпретировать всю наблюдаемую структуру в области фундаментального поглощения. На схеме показаны переходы, связанные с экситонами, коллективными возбужденными состояниями кристалла. Кулоновское взаимодействие электрона и дырки приводит к образованию связанных состояний и появлению во-

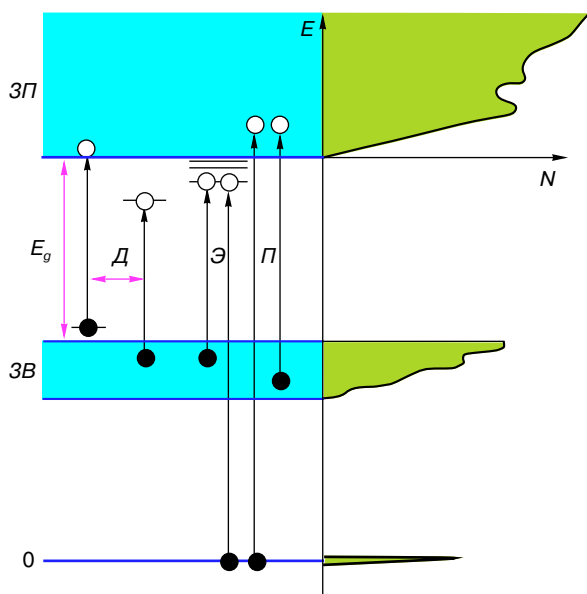


Рис. 5. Схема взаимодействия синхротронного излучения с твердым телом: E — ось энергий, E_g — ширина запрещенной зоны, D — переходы с уровней дефектов, $\mathcal{E}$ — экситоны, P — основное поглощение, N — приведенная плотность состояний.

дороподобной дискретной структуры для плотности состояний для значений энергий, лежащих ниже края поглощения. Использование СИ для исследования спектров твердых тел позволило расширить спектральную область измерений и систематически исследовать переходы из внутренних состояний истова, являющихся плоскими в пространстве квазиимпульса. Исследование таких переходов позволяет получить дополнительную информацию о структуре зоны проводимости. На схеме показаны также и переходы, связанные с фотоэмиссией электронов.

С поглощением в рентгеновской области связан успешно развиваемый метод измерения протяженной тонкой структуры рентгеновского поглощения EXAFS.¹ Метод EXAFS основан на измерении с высоким разрешением тонкой структуры в коэффициенте поглощения при энергиях на сотни электрон-вольт выше K -края поглощения исследуемого атома. Модуляция поглощения вызвана интерференцией электронной волны, излученной возбужденным атомом, и волн, отраженных соседними атомами. Метод позволяет определить взаимное расположение атомов в твердом теле с точностью до сотых долей ангстрема. Применяется метод и для исследования поверхности.

Разработана модификация метода, в которой для получения информации о структуре EXAFS используются спектры возбуждения люминесценции. Этот вариант метода, развитый итальянским физиком А. Бьянкони, позволяет исследовать структуру кристаллов и биологических объектов, обладающих люминесценцией. Необходимость применения СИ для исследования люминесценции вызвана тем, что в качестве оснований люминофоров применяются, как правило, широкозонные кристаллы. Характерный для этих кристаллов электронный спектр лежит в вакуумной ультрафиолетовой области (5 — 50 эВ). Именно в этой области — области фундаментального поглощения — проявляются межзонные переходы валентных электронов, экситоны и плазмоны. Для понимания механизма возбуждения люминофоров особенно важны и более высоко энергетические возбуждения люминесценции кристаллофосфоров при энергиях, во много раз превышающих ширину запрещенной зоны. В этом случае 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. При поглощении фотонов с энергией, большей

¹ См. статью Р.В. Ведринского “EXAFS-спектроскопия — новый метод структурного анализа” в “Соросовском Общественном Журнале”, 1996, № 5, с. 79 — 84. (Примечание редакции.)

двух или более ширины запрещенной зоны, в результате распада созданных непосредственно в момент поглощения высокоэнергетических электронных возбуждений каждый фотон генерирует в кристалле более одного электронного возбуждения меньшей энергии. Положение границы начала процесса размножения электронно-дырочных пар связано с отношением эффективных масс электрона и дырки и меняется для разных кристаллов от $2E_g$ до $4E_g$.

Высокая яркость источников СИ позволяет проводить спектроскопические исследования с экстремально высоким спектральным разрешением при более коротких экспозициях. Использование поляризационных свойств СИ позволяет исследовать пространственную анизотропию объектов. Исследование поглощения и флуоресценции газов и паров несет информацию о строении внутренних оболочек атомов. Исследование молекулярных спектров с помощью СИ позволяет получить информацию о процессах фотоионизации и фотодиссоциации в молекулярных системах. При этом удается зарегистрировать спектры поглощения молекул с предельным разрешением.

Наряду с многочисленными применениями СИ в научных исследованиях есть ряд работ, имеющих важное прикладное значение, в частности, применение СИ в микролитографии. В последнее время американская фирма IBM провела ряд исследований, показавших большие преимущества применения СИ в микролитографии для получения элементов микросхем. Стоимость специализированных источников СИ (накопителей электронов) довольно высокая: накопитель на 700 МэВ стоит порядка 20 миллионов долларов, однако качественное улучшение параметров микросхем и резкое повышение производительности в значительной мере окупают затраты на такой источник. Разрабатываются и другие применения СИ, имеющие прикладное значение. Мощность СИ можно использовать для фотосинтеза углеводов, окисей азота и др. СИ можно использовать для исследования радиационного воздействия на материалы и приборы вне атмосферы, что очень важно для космического материаловедения. Рентгеновское монохроматизированное СИ может найти применение в рентгенодиагностике,

что позволит на порядки снизить радиационную нагрузку на человека при рентгеновском обследовании. Возможно применение СИ в радиационной технологии и радиационно-химических процессах. В последнее время наблюдается бурное развитие работ по применению СИ и в науке, и в технике. Этими работами занимаются десятки крупнейших лабораторий мира, созданы национальные центры по использованию СИ (США, Англия, Франция, Германия, Италия, Швеция, Япония, Китай, Корея, Индия, Бразилия и др.). Как правило, такие центры создаются при университетах. Одним из ведущих центров по использованию СИ является Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН в Новосибирске (Сибирский центр синхротронного излучения). Этим же институтом созданы специализированные источники СИ для Курчатовского института в Москве (отсюда их название "Сибирь").

Возможности СИ еще далеко не исчерпаны и, если вспомнить о трех этапах истории СИ (открытие — исследование — использование), то можно сказать, что мы находимся еще только в начале третьего этапа, связанного с широким научным и промышленным использованием этого фантастического света.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлин В.В., Тернов И.М. Синхротронное излучение. М.: Знание, 1988. 64 с.
2. Тернов И.М., Михайлин В.В. Синхротронное излучение. Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1986. 296 с.
3. Тернов И.М. Успехи физических наук. 1995. Т. 165. С. 429 — 456.
4. Михайлин В.В. Краткие сообщения по физике ФИАН. 1995. № 3 — 4. С. 78 — 84.

* * *

Виталий Васильевич Михайлин, профессор, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой оптики и спектроскопии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, автор более 200 научных работ и изобретений и 7 книг, специалист в области люминесценции и спектроскопии твердого тела, синхротронного излучения и его применений.