

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

539.122.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ *)

Э. Роув, Дж. Уивер

Электроны, движущиеся по круговой орбите со скоростью, близкой к световой, испускают интенсивное ультрафиолетовое и рентгеновское излучение. Использование этого излучения открывает уникальные возможности в исследовании строения вещества.

Когда Ньютон в 1666 г. проводил свои замечательные опыты, пропуская свет через призмы, весь известный спектр электромагнитных колебаний ограничивался узкой полосой длин волн видимого света. Сейчас мы знаем, что этот спектр на много порядков шире и простирается от низкочастотных радиоволн до γ -лучей очень высокой энергии. Важно и то, что в наши дни экспериментатор не связан, как Ньютон, естественными источниками излучения. Практически любой вид излучения можно искусственно создать в лаборатории. Для генерации электромагнитных волн в диапазоне видимого света и в близких к нему инфракрасной и ультрафиолетовой областях используются обычные лампы накаливания, газоразрядные лампы, а также лазеры. Радиоволны весьма просто генерировать с помощью электронных устройств. γ -лучи получаются в столкновениях частиц высокой энергии на ускорителях и испускаются также при радиоактивном распаде некоторых атомных ядер.

Имеется лишь одна область электромагнитного спектра, где обычные лабораторные методы непригодны. Она начинается от частот, слегка превышающих частоту видимого света, и охватывает ультрафиолетовую и рентгеновскую области спектра вплоть до частот мягкого γ -излучения. Длины волн этой широкой области отвечают размеру характерных структур атомов и молекул твердого тела. Именно поэтому такое электромагнитное излучение очень хорошо взаимодействует с веществом. Располагая надежным способом его генерации, мы имели бы исключительно удобный инструмент для исследования структуры вещества.

Приблизительно в последние 10 лет появился новый источник электромагнитного излучения, почти идеально отвечающий этим требованиям. Им является излучение электронов, движущихся по круговой орбите со скоростью, близкой к скорости света. Поскольку это явление впервые наблюдалось в виде светового излучения на электронных ускорителях — синхротронах, оно получило название синхротронного излучения. С тех

*) Rowe Ednor M., Weaver John H. The Use of Synchrotron Radiation. — Scientific American, June 1977, v. 236, No. 6, p. 32—41. — Перевод Г. И. Мерзона. Эднор М. Роув — директор Центра по применению синхротронно излучения Висконсинского университета, штат Мэдисон, Джон Г. Уивер — научный сотрудник того же Центра, США.

© Scientific American, Inc., 1977.

© Перевод на русский язык, Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1978.

пор на ускорителях, предназначенных главным образом для экспериментов по ядерной физике и физике элементарных частиц, было выполнено множество исследований с использованием синхротронного излучения.

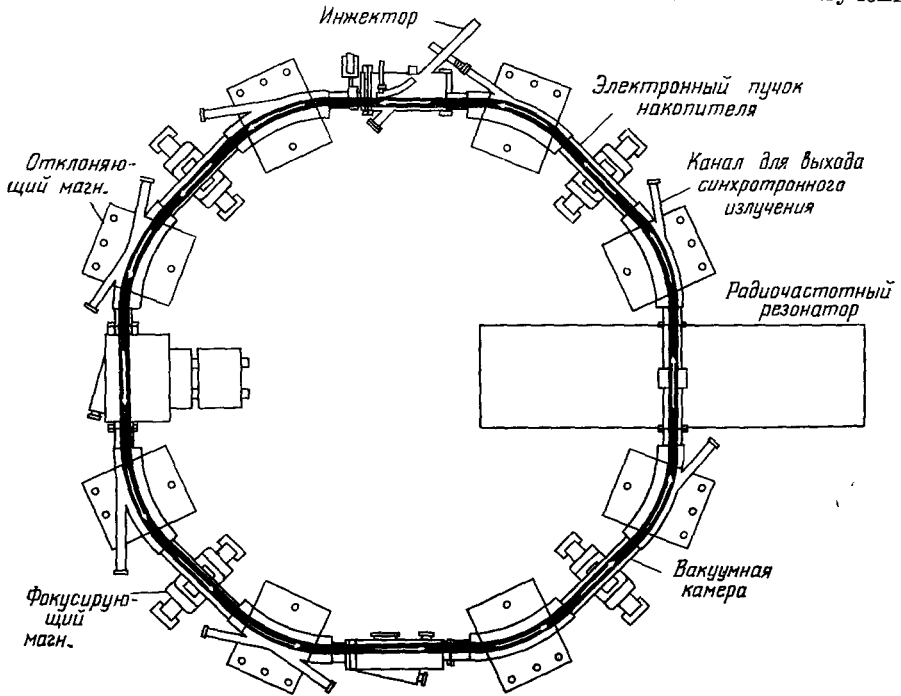


Рис. 1. Электронный накопитель «Танталус-1» служит источником синхротронного излучения.

Излучение возникает при движении электронов по круговой траектории со скоростью, близкой к скорости света. В «Танталусе-1» такая траектория создается с помощью отклоняющих магнитов, в магнитном поле которых орбита электрона представляет собой дугу окружности. Электроны вводятся в накопительное кольцо через инжектор, показанный в верхней части рисунка. После ускорения их до необходимой энергии они могут длительное время циркулировать на постоянной орбите. Потери энергии электронов на излучение компенсируются благодаря их ускорению в радиочастотном резонаторе. Синхротронное излучение испускается узким пучком по касательной к орбите электронов. Поэтому экспериментальные установки, использующие синхротронное излучение, также ориентированы по касательной к основному кольцу.

Сейчас имеется несколько проектов создания ускорителей специально для генерации синхротронного излучения. Эти ускорители частиц, по существу, будут такими же источниками электромагнитного излучения, как и лампы накаливания.

□

Электромагнитное излучение в видимой части спектра генерируется главным образом нагретыми твердыми телами или возбужденными электронами в горячем газе. Свет, излучаемый газами, содержит яркие дискретные линии, каждая с характерной длиной волны, изменить которую невозможно. Свет испускается при переходе электрона из возбужденного состояния в состояние с меньшей энергией. Энергия генерируемого излучения равна разности энергий начального и конечного состояний. Она, как известно, обратно пропорциональна длине волны: чем больше энергия фотона, или кванта света, тем короче соответствующая длина волны. Энергию принято выражать в электрон-вольтах; электрон-вольт определяется как энергия, приобретаемая электроном, когда

он ускоряется в электрическом поле с разностью потенциалов в один вольт.

Видимый свет обычно испускается при переходах валентных, или внешних, атомных электронов. Эти электроны испытывают сильное влияние окружающих атомов, поэтому их энергетические уровни заметно искажаются при конденсации вещества из газообразного в твердое состояние. В принципе валентные электроны твердого тела, конечно, по-прежнему имеют дискретные, квантованные уровни энергии, однако из-за близости других атомов эти уровни размазаны в широкие полосы. В твердом теле уже невозможно различить отдельные энергетические уровни или

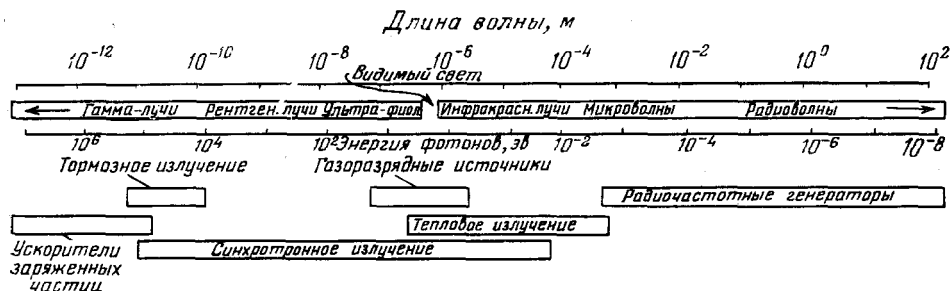


Рис. 2. Электромагнитный спектр изображает излучение соответственно длине волны, или в другом представлении соответственно энергии фотонов, или квантов электромагнитного излучения.

Длина волны обратно пропорциональна энергии фотона. Ни один из источников излучения не покрывает весь электромагнитный спектр. Большинство их эффективно лишь в узком диапазоне длин волн. Синхротронное излучение обладает высокой интенсивностью начиная от длин волн несколько больших, чем у видимого света, и захватывает всю ультрафиолетовую и мягкую рентгеновскую области спектра. В большей части этого диапазона оно является единственным источником излучения с непрерывным спектром (в отличие от дискретного спектра с яркими линиями на некоторых длинах волн и темными провалами между ними).

четкий линейчатый спектр, связанный с переходами между ними. Наоборот, испускаемый спектр является непрерывным. Максимум его интенсивности приходится на ту же самую длину волны, однако, испускание происходит также и на всех других соседних длинах волн. Для идеального излучающего твердого тела распределение длин волн имеет характерную форму, называемую спектром излучения черного тела.

Непрерывный спектр свечения дает экспериментатору очевидные преимущества. Опыты уже не ограничиваются теми длинами волн, которые отвечают имеющимся дискретным линиям испускания, а могут производиться на любой желаемой длине волны.

Длина волны, соответствующая максимуму спектра излучения черного тела, определяется прежде всего его температурой. При повышении температуры максимум смещается в сторону меньших длин волн. Однако фактически максимум спектра нельзя сдвинуть в область с длиной волны, значительно более короткой, чем у красного или желтого света, так как необходимая для этого температура превышает точки кипения всех твердых тел. Так, например, вольфрамовая нить лампы, накаливаемая до температуры 3000°K , наиболее интенсивно излучает на волне 9000 \AA . Видимый спектр простирается приблизительно от 4000 \AA (фиолетовая область) до 7000 \AA (красная область), так что 9000 \AA отвечают инфракрасной области. Максимум спектра излучения черного тела можно было бы сдвинуть к 3000 \AA в ближнюю ультрафиолетовую область, нагревая нить до $10\,000^\circ\text{K}$. Однако металлическая вольфрамовая нить плавится уже при 3410°K , а при 5927°K вольфрам кипит.

Из-за температурных ограничений, присущих спектру черного тела, источниками ультрафиолетового излучения традиционно служат газоразрядные лампы. Основная доля излучения этих источников испускается в виде дискретных спектральных линий. В рентгеновской области спектра имеется возможность снова вернуться к твердотельным источникам излучения, однако эти источники также дают преимущественно линейчатый спектр с очень слабым континуумом. Рентгеновское излучение возникает не при возбуждении валентных электронов, а электронов более глубоких атомных оболочек. Эти внутренние электроны сильно связаны, но при их переходах также испускаются дискретные линии, как если бы они были почти свободны подобно внешним электронам в атомах газа.

□

В основе появления электромагнитного излучения лежит ускорение электрических зарядов. Это правило является следствием уравнений электромагнитного поля, которые были сформулированы в конце XIX века Джеймсом Кларком Максвеллом. Почти всегда такими зарядами являются легчайшие заряженные частицы — электроны, которые проще всего ускорить.

В качестве примера ускоренного заряда возьмем отдельный электрон, совершающий прямолинейное осциллирующее движение с синусоидально

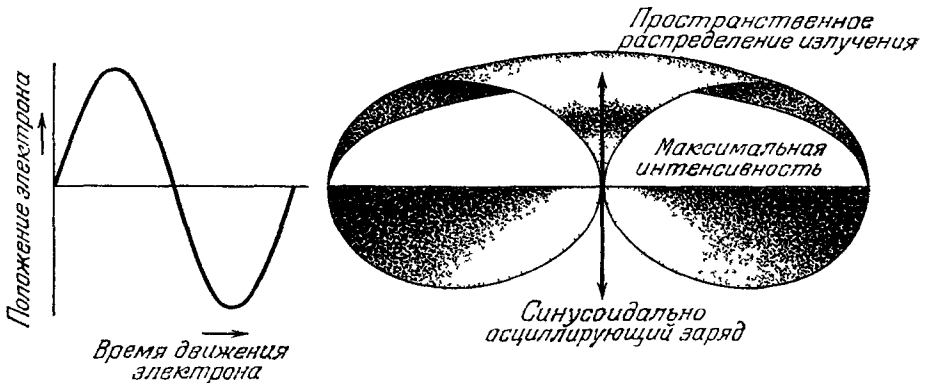


Рис. 3. Испускание излучения всегда происходит при ускорении электрического заряда.

Этим зарядом обычно является электрон, легчайшая и потому наиболее просто ускоряемая заряженная частица. Примером является электрон с синусоидально осциллирующим прямолинейным движением, как изображено на графике слева. Такой электрон излучает электромагнитную энергию, причем картина излучения имеет характерное пространственное распределение. Максимальная интенсивность излучается в плоскости, перпендикулярной к направлению движения, а излучение вдоль этой оси отсутствует вовсе. Характерная частота излучения совпадает с частотой осцилляций электрона.

меняющейся скоростью, как, скажем, гирька длинного маятника или груз, подвешенный на пружине. В каждом цикле электрон дважды ускоряется и замедляется. В результате он излучает электромагнитную волну, распространяющуюся во всех направлениях. Излучение имеет характеристическую частоту, совпадающую с частотой осцилляций электрона. Можно также различить гармоники или обертона этой основной частоты. Излучение обладает также характерной пространственной картиной: оно наиболее интенсивно в плоскости, перпендикулярной к оси, вдоль которой осциллирует электрон, и падает до нуля в направлении этой оси. Именно такие синусоидальные движения описывают электроны в клистронной лампе, которая служит генератором микроволнового радиозлучения.

Переходы между энергетическими уровнями также сопровождаются ускорением зарядов, хотя обычно описывать их таким образом не принято. Ускорение электрона легче всего представить, опираясь на упрощенную планетарную модель атома, где электрон, перемещающийся с одной орбиты на другую, обязательно меняет свою орбитальную скорость. Такая модель является весьма наглядным инструментом для понимания происходящих процессов, но для количественного описания атомных спектров необходима еще более сложная квантовомеханическая модель. В самом деле, без квантовой механики не обойтись даже при объяснении стабильности электронных оболочек атома, а также того факта, почему электроны не излучают полностью всю свою энергию.

Связь между ускорением и излучением становится более очевидной на примере спектра, испускаемого некоторыми рентгеновскими трубками. В таких трубках ускоренные до большой энергии электроны ударяют по металлическому электроду. Движение электронов внутри электрода подвержено влиянию сильных атомных полей, поэтому они замедляются и даже останавливаются на небольших расстояниях от его поверхности, иными словами, резко тормозятся. Возникающее при этом излучение получило название тормозного излучения.

Спектр тормозного излучения в пределах характерного для него диапазона длин волн является непрерывным, но заметная интенсивность может быть достигнута только при энергиях больше, чем приблизительно 10 000 эв (или, что то же самое, при длинах волн меньше одного ангстрема). Таким образом, тормозное излучение не может служить источником ультрафиолетового или мягкого рентгеновского излучения. Более того, электроны столь высокой энергии, ударяющие об электрод, обычно возбуждают глубоколежащие электроны внутренних оболочек атомов металла, которые затем переходят в основное состояние, испуская линейчатый рентгеновский спектр в том же волновом диапазоне, что и тормозное излучение. В результате излучение обогащается дискретными линиями, интенсивность которых во много раз выше, чем интенсивность непрерывного спектра.

□

Электрон, вращающийся с постоянной скоростью по круговой орбите, обладает весьма простым ускоренным движением. Это и есть условия, характерные для возникновения синхротронного излучения. Подобное излучение в действительности впервые было зарегистрировано не на ускорителях частиц, а с помощью астрономических наблюдений. Электроны, движущиеся в сильных магнитных полях остатков сверхновых, совершают круговое (или спиральное) движение и, следовательно, излучают по синхротронному механизму. В земных условиях генерация синхротронного излучения в кольцевом электронном ускорителе была впервые исследована в сороковых годах нашего столетия.

Следует подчеркнуть, что ускорением является любое изменение скорости как по величине, так и по направлению движения. Так, частица на круговой орбите испытывает постоянное центростремительное ускорение. Если размеры орбиты неизменны, а орбитальная скорость постоянна, то ускорение также постоянно. При этом электрон непрерывно излучает.

Пространственная картина излучения такого вращающегося заряда была впервые рассчитана английским математиком и физиком сэром Джозефом Лармором. Он показал, что для наблюдателя, неподвижного относительно электрона (и следовательно, совершающего вместе с ним вращательное движение), излучение будет наиболее интенсивным в плоскости, касательной к орбите электрона. Интенсивность падает до нуля

в направлениях, параллельных радиусам орбиты электрона. Таким образом, картина излучения имеет вид тора, ось которого совпадает с радиусом орбиты, вращающегося вместе с электроном.

При небольшой скорости электрона для наблюдателя, неподвижного относительно лабораторной системы координат, картина излучения будет почти той же самой. В этом случае релятивистские эффекты весьма малы и вызывают лишь слабое уменьшение интенсивности излучения в заднюю полусферу и его небольшое усиление в направлении вперед.

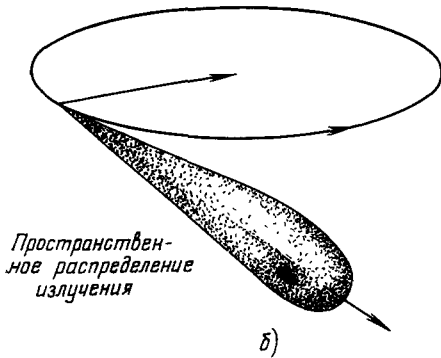
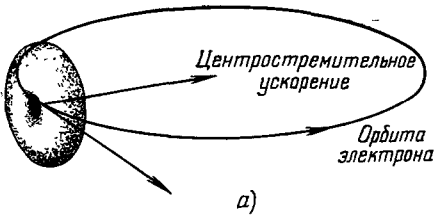


Рис. 4. Электрон на круговой орбите испытывает постоянное центростремительное ускорение и потому непрерывно излучает.

При сравнительно небольшой орбитальной скорости (существенно меньшей, чем скорость света) пространственная картина излучения напоминает тор, центром которого является сам электрон, а плоскость максимальной интенсивности проходит через касательную к его орбите (а). По мере возрастания скорости картина излучения меняется. Когда скорость электрона приближается к скорости света, все излучение сосредотачивается в узком конусе, осью которого является касательная к орбите (б). Одновременно меняется частота в максимуме излучения. При малой скорости она совпадает с частотой обращения электрона. При релятивистских же скоростях энергия излучения распределена среди большого числа высоких гармоник частоты обращения, и спектр излучения является непрерывным.

и вся картина несколько напоминает вылет грязи из-под буксующего автомобильного колеса. Излучение испускается, конечно, во всех точках орбиты, но лишь в узком конусе, ось которого лежит в плоскости орбиты. Для наблюдателя, находящегося в орбитальной плоскости, взгляд которого направлен по касательной к орбите навстречу пучку электронов, излучение представляет собой яркое пятно с размером, приблизительно равным поперечному сечению пучка.

□

По мере ускорения электронов до релятивистских скоростей меняется не только пространственная картина, но также и спектральный состав синхротронного излучения. При малых скоростях электрон излучает

Однако ларморовская картина сильно трансформируется по мере того, как скорость электрона приближается к скорости света. При этом для наблюдателя в лабораторной системе координат интенсивность излучения назад и в стороны существенно падает и оно все более концентрируется в переднем конусе. При скоростях, близких к световой, этот конус становится очень узким. Половинный угол раствора конуса, составленный прямой, касательной к орбите электрона, и образующей конуса, с хорошей точностью описывается выражением $\sqrt{1 - (v^2/c^2)}$, где v — скорость электрона, а c — скорость света. Если бы v и c сравнялись, то угол раскрытия конуса был бы равен нулю, а все излучение испускалось по касательной к орбите. Этот угол может быть в действительности очень малым. Для электронов с энергией 240 Мэв (240 млн. электрон-вольт), т. е. с весьма умеренной для синхротрона энергией, v составляет $0,9999975$ скорости света. Подставляя это значение в выражение, приведенное выше, найдем, что угол раствора конуса едва достигает $0,1^\circ$. Из этих вычислений следует, что электрон, движущийся по круговой орбите, излучает по касательной

главным образом на частоте орбитального вращения, в точности так же, как и при гармоническом движении. На орбите с фиксированным радиусом частота излучения возрастает с ростом скорости электрона, но важно то, что при интересующих нас энергиях основная частота остается неизменной. Однако с увеличением скорости электрона существенно меняется распределение излученной энергии между основной частотой и различными ее гармониками. При малых скоростях почти вся энергия излучается на основной частоте (частота обращения электрона). Чем больше скорость электрона приближается к скорости света, тем большая доля энергии идет на высокие гармоники. Частота наивысшей гармоники, на которой еще излучается заметная доля энергии, по порядку величины равна $(1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)})^3$. По мере того, как v приближается к c , этот параметр становится очень большим. Для электронов с энергией 240 Мэв и скоростью 0,9999975с он приблизительно равен 10^8 . Релятивистский электрон на круговой орбите радиусом 10 м имеет основную частоту обращения около 10^7 гц, которая лежит в радиодиапазоне спектра электромагнитных волн. Гармоника этого спектра, превышающая основную в 10^8 раз, отвечает частоте 10^{15} гц и лежит в ультрафиолетовой области спектра.

Строго говоря, спектр синхротронного излучения отдельного электрона содержит очень большое число дискретных линий, представляющих собой гармоническую последовательность частот, кратных основной частоте обращения. В действительности же спектр излучения является самым настоящим континуумом. Все высокие гармоники расположены чрезвычайно близко друг к другу, и поскольку спектральные линии обладают конечной шириной, они взаимно перекрываются. Когда скорость электрона приближается к скорости света, спектр синхротронного излучения становится непрерывным в широкой полосе частот с максимумом интенсивности, лежащим гораздо выше основной частоты обращения. Подавляющая доля интенсивности излучения, приходящаяся на высокие гармоники, переходит сначала в видимую, затем в ультрафиолетовую и, наконец, в рентгеновскую области электромагнитного спектра.

Для электрона, движущегося по круговой орбите, полные потери энергии на синхротронное излучение пропорциональны $(1/\sqrt{1 - (v^2/c^2)})^4$, т. е. четвертой степени его энергии. Таким образом, возрастание энергии электрона в 10 раз увеличивает интенсивность его синхротронного излучения примерно в 10 000 раз. С точки зрения удержания электрона на

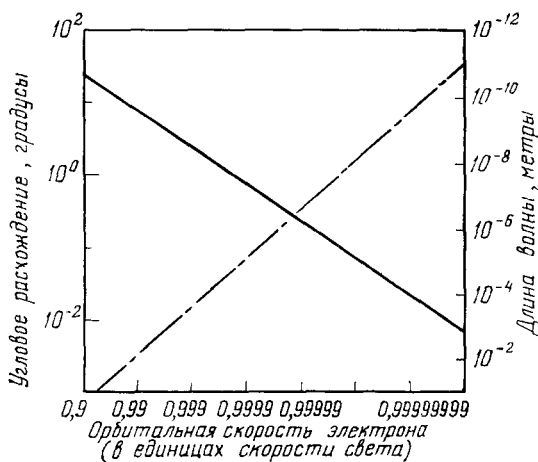


Рис. 5. Длина волны и угловое распределение (сплошная линия, левая шкала) синхротронного излучения быстро меняются с возрастанием энергии электронов и приближением их скорости к скорости света.

На рисунке скорость электрона изображена в логарифмическом масштабе и выражена в единицах скорости света. На графике показаны самые короткие длины волн, на которые при заданной энергии электрона еще приходится заметная доля интенсивности синхротронного излучения. Угловое распределение излучения сужается с ростом энергии электрона, так что постепенно оно превращается в узкий коллимированный почти параллельный пучок.

стационарной круговой орбите ускорителя потери энергии на синхротронное излучение, конечно, являются нежелательным фактором. Однако в то же время они дают нам в руки уникальный источник интенсивного регулируемого излучения.

Существуют два типа ускорителей, пригодных для генерации синхротронного излучения: электронные синхротроны и электронные накопительные кольца. Как те, так и другие имеют тороидальную вакуумную камеру, окруженную отклоняющими и фокусирующими магнитами и имеющую промежутки для ввода радиочастотной энергии. Отклоняющие магниты необходимы для создания круговой орбиты электронов. В любой точке орбиты ее радиус обратно пропорционален напряженности магнитного поля.

□

Сгусток электронов впрыскивается в вакуумную камеру синхротрона и затем в результате многократных последовательных оборотов ускоряется до некоторой максимальной энергии. Ускорение происходит в одном или нескольких резонаторах, составляющих единое целое с вакуумной камерой, в которые подается радиочастотная энергия. По мере возрастания скорости электрона и синхронно с его ускорением увеличивается магнитное поле. Отсюда и произошло название такого ускорителя — синхротрон. Наконец, когда электроны достигнут своей конечной энергии, они выводятся из ускорителя.

Электронное накопительное кольцо по своей конструкции и принципу действия очень похоже на синхротрон. Электроны также впрыскиваются в тороидальную вакуумную камеру и удерживаются на круговой орбите с помощью отклоняющих магнитов. Основное отличие от синхротрона заключается в том, что после цикла ускорения электроны не выводятся из ускорителя. Наоборот, их вынуждают циркулировать по круговой орбите с постоянной скоростью иногда в течение нескольких часов. Для компенсации энергетических потерь на синхротронное излучение здесь по-прежнему остается необходимой подпитка радиочастотной энергией. Некоторые накопители получают электроны высокой энергии от внешнего ускорителя, в другие — впрыскиваются электроны малой энергии, и они ускоряются в самом кольце, которое на короткое время становится синхротроном. В любом случае образовавшиеся электроны могут длительное время существовать на стационарной орбите. Их скорость остается постоянной благодаря небольшим добавкам электромагнитной энергии, поставляемой при каждом обороте. Размеры орбиты задаются отклоняющими магнитами, а расхождение пучка предотвращается с помощью фокусирующих магнитов. Электроны обращаются внутри кольца, образуя сгустки длиной в несколько сантиметров. В кольце одновременно могут находиться один или несколько сгустков.

С точки зрения генерации синхротронного излучения накопительные кольца имеют очевидные преимущества перед синхротронами. В синхротронах спектр излучения меняется с каждым оборотом по мере увеличения энергии электронного сгустка. Радиус орбиты сгустка в вакуумной камере, а следовательно, и положение источника излучения за время цикла ускорения также меняются. В накопительном же кольце как спектр, так и положение пучка остаются неизменными (хотя в случае необходимости их можно регулировать). Спектральное распределение и интенсивность синхротронного излучения, генерированного в накопителе, можно легко рассчитать, если известны следующие три параметра: число электронов в кольце, их энергия, а также радиус кривизны орбиты. Электронный пучок накопителя достаточно стабилен, и его характеристики очень

хорошо известны, так что создаваемое им синхротронное излучение можно использовать в качестве стандарта для калибровки других источников синхротронного излучения или его детекторов.

Независимо от того, каким образом генерировано синхротронное излучение — непосредственно синхротроном или в накопителе, оно обладает несколькими свойствами, делающими его уникальным источником электромагнитных волн. Основным его достоинством, конечно, является высокая интенсивность излучения в широком диапазоне длин волн. Спектр же синхротронного излучения простирается от близкой инфракрасной области до жесткого рентгена, т. е. до длин волн менее одного ангстрема или того же порядка.

□

Во множестве измерений, где используется электромагнитное излучение, желательно, чтобы оно было поляризованным, т. е. чтобы вектор электрического поля на всех длинах волн был направлен в одну сторону. Одинаковая поляризация устраняет неопределенность в интерпретации результатов измерений и расширяет экспериментальные возможности. Поляризация является неотъемлемым свойством синхротронного излучения, при этом направление электрического поля всегда параллельно плоскости орбиты электрона. Степень поляризации зависит как от длины волны, так и от угла излучения к плоскости орбиты. При длинах волн, отвечающих максимальной интенсивности, излучение, лежащее в орбитальной плоскости, полностью поляризовано.

Тот факт, что электроны в накопительном кольце циркулируют не как постоянный ток, а в виде отдельных небольших сгустков, также влияет на характер синхротронного излучения, определяя еще одно его отличительное свойство, которое часто оказывается чрезвычайно полезным для экспериментатора. Синхротронное излучение, регистрируемое в любой фиксированной точке, расположенной на периметре кольца, не является непрерывным во времени, а состоит из серии коротких импульсов. Каждый раз при появлении сгустка электронов возникает импульс излучения, когда же сгусток находится где-то в других точках орбиты, излучение не наблюдается. Для многих экспериментов такое пульсирующее излучение является исключительно удобным. Это позволяет, например, исследовать возбужденные состояния атомов, время жизни которых укладывается в короткое время паузы между соседними сгустками.

Другим дополнительным преимуществом использования накопительных колец в качестве источника синхротронного излучения является наличие в них глубокого вакуума. Нормальная работа накопителя электронов требует сверхвысокого вакуума — 10^{-10} — 10^{-11} тор, в противном случае произойдет рассеяние электронов на остаточном газе и время жизни пучка внутри кольца сократится. Пучкопроводы, по которым синхротронное излучение транспортируется к экспериментальным установкам, соединяют с кольцевой вакуумной камерой, поддерживая в них то же самое разрежение. Поскольку многие эксперименты с синхротронным излучением требуют хорошего вакуума, облучаемые образцы часто помещают в экспериментальную камеру, сообщающуюся с вакуумной системой электронного накопителя.

Синхротронное излучение было открыто всего 30 лет назад, а его широкое применение в физических исследованиях началось только около 10 лет назад. Первый успешный эксперимент с синхротронным излучением был выполнен в 1963 г. Робертом П. Мэдденом и Кейтом Кудлингом из Национального Бюро стандартов США. Используя в качестве источника излучения электронный синхротрон с энергией 180 Мэв, они сумели про-

вести уникальные измерения поглощения мягких рентгеновских лучей в газах.

В настоящее время появились гораздо более интенсивные источники синхротронного излучения. Одним из первых таких источников стал электронный синхротрон в Гамбурге, сокращенно именуемый ДЕЗИ. Накопитель этого синхротрона предназначен в первую очередь для исследований по физике высоких энергий, и синхротронное излучение получается здесь как «побочный» продукт. Аналогичная система создана и на

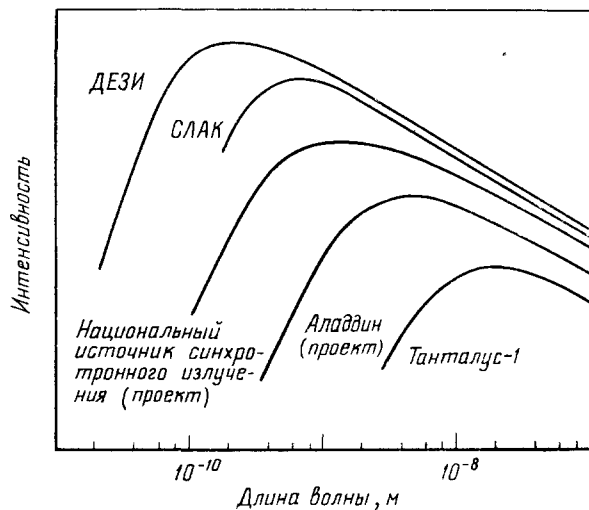


Рис. 6. Источники синхротронного излучения обладают непрерывным спектром с максимумом интенсивности на длине волны, зависящей от энергии ускоренных электронов и радиуса кривизны их орбиты.

Самую большую энергию электронов и самые короткие длины волн синхротронного излучения можно получить на Гамбургском электронном синхротроне (ДЕЗИ) или Стэнфордском линейном ускорителе (СЛАК). Накопитель «Танталус-1» всецело предназначен для генерации синхротронного излучения с максимумом интенсивности в ультрафиолетовой части спектра. Национальный источник синхротронного излучения и накопитель «Аладдин» будут также применяться исключительно для генерации синхротронного излучения.

Стэнфордском линейном ускорителе, где синхротронное излучение генерируется в накопительном кольце, носящем название СПИР. Оба накопителя — ДЕЗИ и СПИР — накапливают пучки вращающихся навстречу друг другу электронов и их античастиц (позитронов), однако для получения синхротронного излучения используются только электроны.

До настоящего времени существует лишь один ускоритель, предназначенный исключительно для генерации синхротронного излучения. Им является «Танталус-1», созданный в Висконсинском университете для Национальной научной ассоциации. «Танталус-1» был построен для технологических исследований в области ускорителей частиц, но в 1966 г. было предложено приспособить его к работе в качестве источника электромагнитного излучения для спектроскопических измерений в газах и твердых телах. Это предложение было принято, и уже в 1968 г. был получен первый пучок синхротронного излучения.

«Танталус-1» является электронным накопителем с энергией 240 Мэв. Электроны впрыскиваются в кольцо небольшим ускорителем-микротроном, который сообщает им начальную энергию 40 Мэв. Накопитель вначале работает как синхротрон, до тех пор, пока электроны не достигнут своей конечной энергии.

«Ганталус-1» имеет девять каналов для пучков синхротронного излучения, причем некоторые из этих пучков расщепляются на несколько частей, так что способны обслужить не один, а несколько экспериментов. Каждый год здесь могут работать до 40 экспериментальных групп.

□

В типичном эксперименте с использованием синхротронного излучения оно выводится из ускорителя или накопительного кольца с помощью вакуумпровода, расположенного по касательной к кольцу. Глядя навстречу пучку во время работы ускорителя, можно было бы увидеть в центре вакуумпровода яркое пятно, как правило, диаметром не более 2 мм. Это пятно является изображением электронного пучка той точки, где испущенное по касательной излучение отходит от орбиты электронов.

Синхротронное излучение испускается в виде узкого карандашного пучка, однако в большинстве случаев оно затем еще сильнее коллимируется и из него с помощью монохроматора, смонтированного в конце

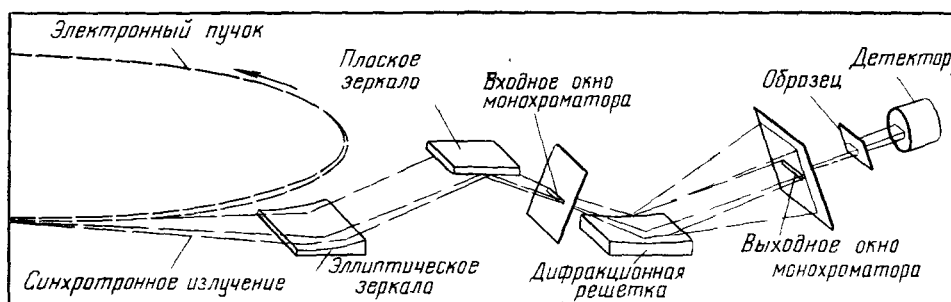


Рис. 7. Пучок синхротронного излучения наиболее часто используется в тех спектроскопических исследованиях, где изучается взаимодействие излучения с веществом в зависимости от длины волны.

Синхротронное излучение образуется в виде хорошо коллимированного параллельного пучка, однако с помощью эллиптического или параболического зеркал оно трансформируется в сходящийся пучок. Зеркала необходимо располагать таким образом, чтобы пучок падал на них под скользким углом. В противном случае значительная часть коротковолнового излучения может поглотиться. Далее пучок попадает в монохроматор, где разбивается дифракционной решеткой в спектр, точно так же, как это делает со светом стеклянная призма. Для ультрафиолетовой части излучения решеткой монохроматора обычно служит литриванная стеклянная пластинка; для рентгеновских лучей эту функцию выполняет упорядоченная атомная решетка кристалла. Монохроматический пучок направляется на образец, которым могут быть твердое тело или газ. Измерение доли излучения, поглощенной или отраженной образцом (или прошедшей через образец), дает информацию об электронной структуре вещества.

тракта, выбирается узкая полоса длин волн. Для наиболее интересных волновых диапазонов эту задачу невозможно осуществить с помощью обычных оптических элементов, скажем, линз или призм, так как стекло или другие материалы поглощают ультрафиолет и рентген. Вместо них пучок бросают на отражающие поверхности, причем для самых коротких длин волн даже эти поверхности приходится использовать при скользких углах падения.

Такие зеркала изготавливаются из полированного металла или стекла, и для осуществления фокусировки их поверхности придается слегка эллиптическая, гиперболическая или параболическая форма. При перпендикулярном падении коротковолнового ультрафиолетового или рентгеновского излучения даже тщательно отполированные поверхности плохо бы отражали падающий пучок, однако если пучок почти параллелен поверхности, отражение получается достаточно хорошим. (Вспомним, что довольно грубая поверхность асфальтового шоссе начинает отражать солнечные лучи, если смотреть на нее под скользким углом.)

Зеркала фокусируют пучок на входное окно монохроматора. Для ультрафиолетовой части спектра активным элементом монохроматора служит дифракционная решетка — стеклянный или металлический брусок с очень часто расположенными делениями или штрихами (несколько тысяч на дюйм). В рентгеновском же диапазоне эти функции осуществляются регулярной атомной решеткой большого монокристалла, обычно кварца, но в последнее время чаще кремния или германия. Попадая на дифракционную решетку или кристалл, узкий пучок расщепляется в спектр подобно солнечному лучу в стеклянной призме. Монохроматор настраивается таким образом, что его выходное окно выбирает из расходящегося пучка излучения нужную длину волны.

Может показаться парадоксальным, что мы проделали такой длинный путь, чтобы найти источник излучения с непрерывным спектром, из которого используется всего лишь одна длина волны. Почему бы не обойтись вместо монохроматора, а заодно и синхротрона, обычным линейчатым источником? Ответ заключается в том, что монохроматор является эквивалентом регулируемого линейчатого источника, тогда как реальному линейчатому источнику присуща фиксированная длина волны. Типичная экспериментальная задача заключается в измерении зависимости некоторой величины от длины волны. Располагая линейчатыми источниками, можно провести такую серию измерений, если каждое из них производится с отдельным источником. В результате мы получим набор измерений, выполненных каждое с дискретной длиной волны. В случае же источника с непрерывным спектром искомая зависимость может быть изучена при любых длинах волн, если, конечно, монохроматор охватывает весь исследуемый диапазон.

□

Самыми первыми и во многих отношениях самыми простыми экспериментами с использованием синхротронного излучения были измерения коэффициентов поглощения газов. В экспериментах такого рода измеряется интенсивность излучения, прошедшего через слой газа во всем диапазоне длин волн, регулируемом настройкой монохроматора.

Электромагнитное излучение поглощается атомом газа только в том случае, когда падающий фотон может каким-либо образом изменить состояние атомного электрона. Этот процесс является обратным процессу испускания фотона атомом. Переходы между различными возможными орбитальными состояниями электрона приводят к появлению дискретных линий поглощения. В простейшей атомной системе — атоме водорода — спектральные линии объединены в четкие серии, названные по именам их первооткрывателей — сериями Лаймана, Бальмера, Пашена, Брэкетта и Пфунда. Если предположить, что вначале атом находился в основном состоянии (это условие является исходным для серии Лаймана), то существует минимальная энергия фотона, ниже которой переходы невозможны. Фотоны с энергией ниже пороговой просто не поглощаются. Фотоны же с энергией, отвечающей разности энергий между основным и первым возбужденным состояниями, поглощаются очень сильно, но если энергия слегка возрастает, то они также не будут поглощаться до тех пор, пока она не достигнет второго возбужденного состояния. Более высокие возбужденные состояния, где электрон связан весьма слабо, расположены близко друг к другу и их последовательность сходится к пределу, который называется энергией ионизации. Если атом ионизован, электрон уже не ограничен спектром дискретных состояний и все фотоны с энергией выше энергии ионизации могут поглощаться газом.

Хотя основные правила атомной спектроскопии были сформулированы более 50 лет назад, многие аспекты взаимодействия электромагнитного излучения с атомами до сих пор еще не поняты до конца. Так, например, во всех атомах тяжелее водорода можно возбудить два электрона одновременно. Результирующее состояние не является простой суммой двух компонент возбуждения, поскольку эти электроны, которые можно рассматривать квантовомеханически как две волны, могут интерферировать друг с другом. Подобные одновременные возбуждения образуются в заметных масштабах только пучками фотонов большой интенсивности, поэтому их гораздо легче изучать в опытах с синхротронным излучением, чем с другими источниками. Возбужденный электрон может также интерферировать с «дыркой», которую он образовал в своем начальном состоянии.

Газы, состоящие не из отдельных атомов, а из молекул, также обладают весьма интересными спектрами, к тому же, как правило, гораздо более сложными, чем атомные. Молекулы имеют линии поглощения, главным образом, в инфракрасной области, отвечающие их вибрационному и ротационному движениям. При больших энергиях фотонов спектр поглощения молекул становится непрерывным и это приводит к их расщеплению. Поглощение энергичного фотона может высвободить отдельный электрон (ионизация) либо расщепить молекулу на отдельные атомы или группы атомов (диссоциация). Исследования спектра поглощения и продуктов расщепления молекул, которые удобно проводить с помощью синхротронного излучения, дают исчерпывающую информацию о химии молекул. Они могут рассказать нам об энергии внутриатомных связей, временах жизни возбужденных состояний, а также каналах, по которым идет релаксация этих состояний. Тем же способом можно изучать скорости и пути осуществления химических реакций.

Спектры поглощения отнюдь не являются единственными свойствами газов, которые удается изучить с помощью синхротронного излучения. Атом или молекула могут в ряде случаев высветить энергию возбуждения путем испускания другого фотона с несколько большей длиной волны. Это явление называется флуоресценцией. Изучая спектр флуоресценции газа, удается определить время жизни и способ распада возбужденного состояния. Периодическая во времени структура синхротронного излучения дает возможность использовать очевидную экспериментальную методику: образец облучается коротким импульсом синхротронного излучения, испускаемым при прохождении электронного сгустка, а за время последующей паузы регистрируется флуоресценция. Если время флуоресценции значительно больше периода обращения электронов, циркулирующий электронный пучок можно отвести с помощью импульсного магнита, так что образец будет облучаться лишь один раз за несколько оборотов.

Другой способ исследования свойств газов заключается в анализе энергии и углового распределения электронов, вылетающих при облучении. Эти измерения позволяют узнать, каким было начальное состояние электрона. В таких экспериментах энергия падающих фотонов сохраняется постоянной и измеряется энергия вылетевших электронов. Анализируя не только энергию этих электронов, но и их пространственное распределение по отношению к падающему поляризованному пучку, можно определить квантовые числа начального состояния атома. Таким способом удастся полностью описать квантовомеханическое состояние атома.

□

Одним из самых важных применений синхротронного излучения была и остается спектроскопия твердого тела. Твердое тело представляет собой

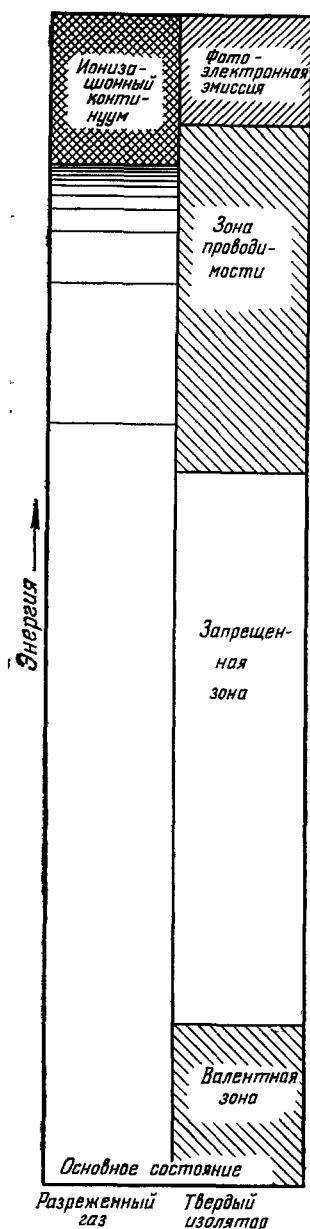


Рис. 8. Электронная структура газов и твердых тел отличается главным образом тем, что электроны почти изолированных атомов газа могут занимать только дискретные уровни энергии, тогда как в твердом теле они имеют любую энергию, лежащую внутри довольно широкой полосы.

Газ поглощает лишь те фотоны, энергия которых отвечает разности энергий между двумя разрешенными состояниями. Твердое тело имеет более или менее непрерывный спектр поглощения. Фотоны, обладающие достаточной энергией, могут вырвать электрон из атома газа (ионизация) или из твердого тела (фотоэлектрическая эмиссия).

обширное «игровое поле» для электронов, и затеваемые ими игры носят весьма сложный характер. Наблюдать за ними с помощью небольшого числа дискретных линий все равно что следить за игрой в футбол на нескольких ограниченных участках футбольного поля. Имея такие скудные и отрывочные данные, почти ничего нельзя было бы сказать о правилах игры.

В твердом теле атомные ядра образуют решетку точечных зарядов, между которыми распределены электроны. Более того, электроны далеко не всегда находятся вблизи атома, которому они номинально принадлежат. Ионные химические связи в непроводящем твердом теле соответствуют эффективному переносу заряда от атома к атому. Для ковалентных связей в полупроводниках характерно то, что каждый электрон находится в совместном владении двух соседних атомов.

Наконец, в проводниках зарядовые распределения атомов перекрываются, и электроны могут свободно странствовать внутри металла. Ясно, что свойства таких блуждающих электронов должны резко отличаться от поведения электронов на стабильных атомных орбитах. Высокая степень симметрии атомной решетки в кристаллах также изменяет поведение электронов. Поскольку кристаллическая решетка представляет собой периодическую структуру, распределение заряда оказывается одинаковым в эквивалентных точках каждой кристаллической ячейки. Благодаря такой периодической структуре состояние электрона в кристалле зависит уже не только от его энергии, как это имеет место в изолированном атоме, но также и от импульса, который определяет направление движения электрона в пространстве. Таким образом, если уровни энергии в атоме резко отделены друг от друга, то в аморфном теле они размыты в энергетические зоны, а в кристалле эти зоны характеризуются четко определенными функциями от энергии и импульса электрона.

Однако в образовании таких энергетических зон в твердом теле участие принимают не все электроны, а лишь те, которые находятся на внешних валентных орбитах. Электроны более глубоких атомных оболочек, сильнее связанные с ядром и экранированные от внешнего воздействия валентными электронами, весьма слабо ощущают присутствие соседних атомов. Использование синхротронного излучения дает возможность изучить как зонную структуру, создаваемую внешними электронами, так и прежде недоступную высокоэнергетическую часть спектра поглощения, связанную с электронами внутренних оболочек.

В спектроскопии твердого тела различают два основных метода. Общим для них является то, что в обоих используется облучение образцов интенсивным пучком фотонов, который частично поглощается, частично отражается и, если образец достаточно тонок или прозрачен, частично проходит через последний. Первый метод основан на регистрации отраженных или прошедших через образец фотонов, второй — на собирании и анализе электронов, испущенных в результате поглощения фотонов.

В типичном эксперименте с применением метода спектроскопии фотонов измеряется отражательная способность образца, т. е. отношение интенсивностей отраженного и падающего излучений в выделенном диапазоне длин волн. Это отношение позволяет определить вероятность поглощения фотона отдельными электронами твердого тела и возбуждения электрона в более высокое энергетическое состояние. При реконструкции ожидаемого спектра поглощения возникают, однако, некоторые трудности, связанные с тем, что не известны ни начальное, ни конечное состояния электрона, а лишь только разность их энергий.

Дополнительную информацию об электронной структуре твердого тела дает исследование эмиссии электронов с облучаемой поверхности образца. Для большинства веществ порог фотоэлектрического эффекта (аналогично энергии ионизации атома) лежит в ультрафиолетовой области, поэтому применение синхротронного излучения позволяет изучать эмиссию в широком диапазоне спектра фотонов. В некоторых экспериментах, где необходим перестраиваемый источник фотонов, происходит одновременное сканирование энергии падающих фотонов и регистрируемых электронов. Полученный спектр дает энергетическое распределение конечных состояний электронов.

Электрон, вылетевший из твердого тела, может дать информацию о своем начальном состоянии лишь в том случае, если по дороге он не испытал отклонения в поле других атомов. Поэтому фотоэлектронная спектроскопия особенно полезна при изучении поверхностей, так как зондирует внешние атомные слои. В определенном смысле, поверхности являются более сложными системами, чем весь объем вещества, поскольку вблизи них периодичность кристаллической решетки нарушена. Поверхности же, содержащие адсорбированные атомы, молекулы или скопления молекул, поддаются описанию еще труднее. Измерение фотоэлектронной эмиссии обнаруживает разительные изменения оптических свойств, когда чистая поверхность последовательно покрывается слоем чужеродных атомов.

□

Спектры поглощения твердого тела можно измерять обычным способом, определяя отношение интенсивностей проходящего и падающего излучения, т. е. поступая точно так же, как и в случае газов. Однако непрозрачность твердых веществ затрудняет эти измерения и требует, чтобы исследуемые образцы были очень тонкими — толщиной не более нескольких сотен ангстрем.

Спектры поглощения в ультрафиолетовой и рентгеновской областях имеют характерные «края поглощения», соответствующие порогу возбуждения электронов внутренних атомных оболочек. Некоторые из этих краев являются очень острыми, т. е. поглощение здесь резко меняется при небольшом изменении длины волны. Если изучить такой край поглощения с помощью прибора с высоким разрешением, то можно зарегистрировать даже слабые изменения состояния внутренних электронов, отражающие изменения конфигурации окружающих атомов. Такие изменения можно проследить только с помощью синхротронного излучения, поскольку никакой другой источник не обладает достаточно интенсивным непрерывным спектром излучения.

До настоящего времени синхротронное излучение использовалось главным образом в ультрафиолетовой и мягкой рентгеновской областях длин волн. Накопительные кольца, такие как СПИР или ДЕЗИ, позволяют получать пучки рентгеновских фотонов более высокой энергии. В последнее время многие исследователи разработали также необходимую

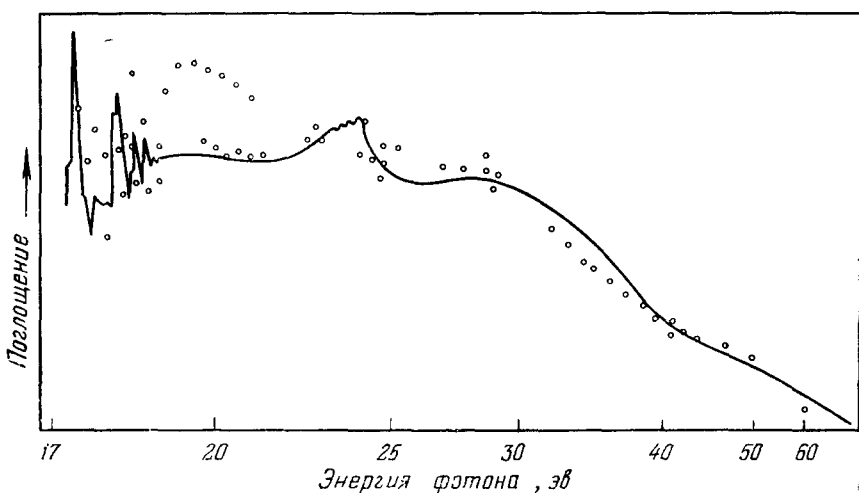


Рис. 9. Спектр поглощения молекулярного азота (N_2), измеренный с помощью синхротронного излучения.

Острые пики и провалы в левой части рисунка отвечают переходам между уровнями энергии электронов отдельных атомов азота. Непрерывный спектр поглощения при больших энергиях соответствует ионизации. Последовательность небольших пиков на кривой поглощения в районе около 23 эВ связана с вращательными и колебательными возбуждениями двухатомных молекул. Кружки показывают результаты отдельных измерений, сделанных с помощью линейчатых источников излучения. Видно, что детальная структура спектра выявляется лишь при измерениях, проведенных с использованием синхротронного излучения.

для этого экспериментальную аппаратуру. Примером таких исследований является изучение тонкой структуры поглощения рентгеновских лучей, которое на основании данных о спектре поглощения позволяет судить о рассеянии фотоэлектронов атомами решетки вблизи места их эмиссии (см. статью Эдварда А. Стерна «Исследование состава материалов по поглощению рентгеновских лучей» в журнале «Scientific American», апрель 1976 г.)

Далее, применение синхротронного излучения обещает изменить технологию изготовления интегральных схем. Подобные микроэлектронные устройства готовятся методом травления последовательных слоев микросхемы, запечатленной в пластине кремния или другого полупроводящего материала. Конфигурация микросхемы задается облучением такой

фоточувствительной пластинки через «маску» или шаблон. Облученные части пластины затем вытравляются химическим способом.

Существующие ограничения на дальнейшее сокращение размеров интегральных схем определяются не требованиями к самим элементам микросхемы или трудностями приготовления маски. Минимальный размер микросхемы зависит лишь от дифракции, которая размывает картину, полученную методом облучения через маску. На длинах волн видимого света дифракционное разрешение лимитируется величиной, несколько превышающей $10\ 000\ \text{Å}$. Экспонируя пластину синхротронным излучением с длиной волны $20\ \text{Å}$, можно добиться разрешающей способности около $100\ \text{Å}$, улучшив ее примерно в 100 раз.

Та же технология используется в новейшей аппаратуре для рентгеновской микрографии. Образец (например, какая-либо биологическая

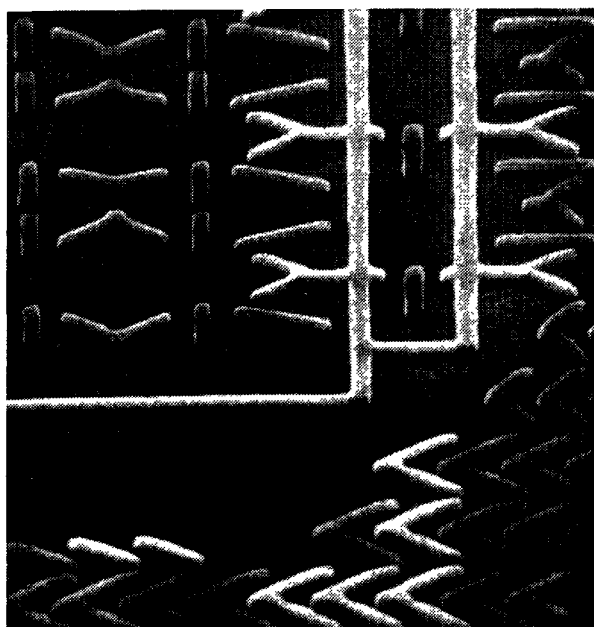


Рис. 10. Рентгеновская литография с помощью синхротронного излучения обеспечивает высокое разрешение, необходимое для изготовления микроэлектронных устройств. Конфигурация схемы наносится на светочувствительную полупроводящую пластинку путем ее облучения через шаблон. На длинах волн видимого света дифракция размывает любой элемент схемы размером меньше $10\ 000\ \text{Å}$. Толщина же самых тонких линий, показанных на рисунке, не превышает $100\ \text{Å}$. Это изображение представляет собой часть устройства памяти, элементы которой могут обладать противоположной магнитной полярностью. Облучение проведено на ускорителе ДЭСИ Эберхардом А. Спиллером и его коллегами из фирмы ИБМ.

структура) помещается над однородной полупроводящей пластинкой и облучается коротковолновым синхротронным излучением. Затем образец удаляется, а пластинка подвергается травлению. Оставшийся на ней рельеф является трехмерным изображением поглощения рентгеновских лучей в образце.

□

Самым сильным указанием на интерес, проявляемый научной общественностью к синхротронному излучению, является то, что потребность

в его источниках обгоняет предложение. Сейчас разработаны планы улучшения существующих ускорителей и постройки по крайней мере двух новых накопительных колец, которые были бы полностью нацелены на получение синхротронного излучения.

Электронно-позитронное накопительное кольцо ускорительного комплекса СПИР в настоящее время имеет два канала для выхода синхротронного излучения, которые разветвляются затем таким образом, чтобы обслужить восемь экспериментальных станций. Они предназначены в первую очередь для работы в области наиболее коротких рентгеновских длин волн. В ближайшее время планируется еще 14 дополнительных экспериментальных установок. Кроме того, сейчас вблизи СПИР создается новый электронно-позитронный накопитель ПЕП. Когда в 1980 г. он войдет в строй, большая часть рабочего времени СПИР, по-видимому, будет отдана исследованиям с использованием синхротронного излучения.

В центре по применению синхротронного излучения Висконсинского университета, где сейчас работает «Танталус-1», был также выдвинут проект создания нового накопительного кольца, получившего название «Аладдин». Новый накопитель должен обладать более высокой энергией (750 Мэв) и большей интенсивностью. Он также будет иметь от 30 до 40 каналов синхротронного излучения.

Наконец, в Брукхейвенской Национальной лаборатории был предложен совершенно новый источник синхротронного излучения с двумя накопительными кольцами. В относительно небольшом кольце с энергией 700 Мэв будет генерироваться синхротронное излучение в диапазоне длин волн от ультрафиолета до мягкого рентгена. Жесткий рентген будет генерироваться в большом накопительном кольце с максимальной энергией 2,5 Гэв. Этот комплекс, получивший название Национальный источник синхротронного излучения, будет иметь почти 50 пучков.

ЛИТЕРАТУРА

- Соколов А. А., Тернов И. М. Синхротронное излучение. — М.: Наука, 1966.
Godwin R. P. — In: Springer Tracts in Modern Physics. V. 51. — 1969. — P.1.
Research Applications of Synchrotron Radiation: Brookhaven National Laboratory Report No. 50381. — 1973.
An Assessment of the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation: The Panel to Assess the National Need for Facilities Dedicated to the Production of Synchrotron Radiation. — Solid State Sciences Committee, National Research Council, National Academy of Sciences, 1976.