

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

537, 531

**ОПТИКА ДЛИННОВОЛНОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ \*)***Э. Шпиллер, Р. Федер*

*Рентгеновское излучение, применяемое в кристаллографии и медицинской рентгенографии, является «жестким» или коротковолновым. Изучается возможность использования «мягкого», или длинноволнового, рентгеновского излучения в микроскопии, астрономии и микроэлектронике.*

Между ультрафиолетовым и коротковолновым рентгеновским излучением лежит ранее мало изученная область электромагнитного спектра: «мягкое» или длинноволновое рентгеновское излучение. До последнего десятилетия физики не занимались этим излучением в основном потому, что его трудно генерировать в лабораторных условиях. С другой стороны, коротковолновое, рентгеновское излучение легко генерировать, и на протяжении более чем шестидесяти лет особенности рассеяния и проникающая способность жесткого рентгеновского излучения использовались для исследования структуры вещества и внутреннего строения человеческого тела. С помощью метода рентгеновской кристаллографии были достигнуты значительные успехи в изучении атомной структуры твердых тел. Когда жесткие рентгеновские лучи падают на кристалл, они дифрагируют, т. е. рассеиваются, известным образом, так что можно выяснить геометрическую структуру атомов кристалла. Кроме того, использование жесткого рентгеновского излучения сделало возможной медицинскую радиологию.

За последнее десятилетие выяснилось, что источником мягкого рентгеновского излучения, достаточным для любого применения, могут быть синхротронные ускорители частиц. Электроны, двигаясь по круговой траектории в синхротроне со скоростями, близкими к скорости света, интенсивно излучают мягкие рентгеновские лучи. Оказывается, что с помощью мягкого рентгеновского излучения можно анализировать структуру объектов с размерами от хромосомы живой клетки до горячей плазмы, наблюдающейся в экспериментах по термоядерному синтезу и в короне Солнца (в последних двух случаях, конечно, рентгеновское излучение генерируется в самих наблюдаемых явлениях). Способы применения зависят от того, как вещество поглощает и излучает мягкое рентгеновское излучение.

\*) Spiller Eberhard, Feder Ralph. The Optics of Long-wavelength X Rays. — Scientific American, November 1978, v. 239, p. 60—68. — Перевод А. П. Силина. Э. Шпиллер и Р. Федер — физики в составе руководства Исследовательского центра имени Т. Дж. Уотсона корпорации I.B.M.

Поглощение мягкого рентгеновского излучения является также основным методом новой технологии — рентгеновской литографии, в которой микроэлектронные схемы запечатываются на ячейках полупроводниковой пластины (полупроводниковых «чипах») с плотностью в принципе более, чем на два порядка, превышающей плотность, достигнутую обычными методами.

Основным механизмом поглощения веществом рентгеновского излучения является фотоэффект. Когда рентгеновский фотон сталкивается с атомом, он освобождает один из электронов атома, если энергия фотона превосходит энергию связи электрона. Электроны в атоме имеют различные энергии связи; эта энергия максимальна для электронов, расположенных ближе к положительно заряженному ядру атома.

Каждый вид атомов имеет свои, только ему присущие характеристики поглощения, которые соответствуют энергиям связи электронов. Это дает

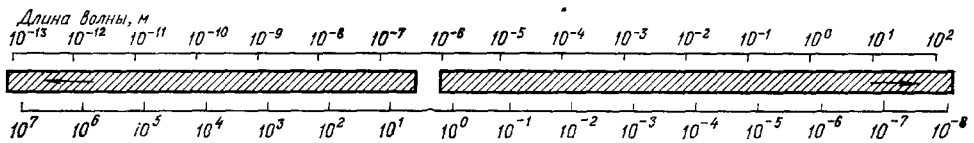


Рис. 1. В электромагнитном спектре разные излучения располагаются соответственно их длине волны (или энергии фотона — кванта электромагнитного излучения).

Длина волны обратно пропорциональна энергии фотона. Рентгеновское излучение занимает область между коротковолновым ультрафиолетовым излучением и длинноволновым гамма-излучением. До последнего времени мягкое рентгеновское излучение привлекало мало внимания из-за того, что его трудно генерировать. Теперь это излучение легко может быть получено при помощи синхротронов, которые зачастую специально строятся с этой целью.

возможность определять состав неизвестных веществ при облучении их рентгеновскими лучами и регистрации энергий, при которых волны сильно затухают (см. рис. 4). Затухание световых волн, проходящих через вещество, характеризуется величиной, называемой длиной поглощения, которая для данной длины волны равна толщине вещества, необходимой для ослабления излучения на 37% от интенсивности падающего излучения.

У различных материалов интервал длин поглощения для видимого света огромен. В большинстве металлов свет полностью затухает менее чем на  $1000 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ мм}$ ). В некоторых стеклах свет слабо затухает даже при прохождении нескольких миль вещества.

□

Длина волны обратна пропорциональна энергии и, следовательно, коротковолновое рентгеновское излучение имеет большую энергию, чем длинноволновое. Во многих случаях короткие волны имеют чересчур большую энергию для взаимодействия с электронами вещества; они проходят сквозь вещество, не взаимодействуя с локальными изменениями атомной структуры. Более длинные волны, с другой стороны, имеют энергии, которые часто соответствуют энергиям электронов. Изучая спектры поглощения мягкого рентгеновского излучения, можно вычислить расстояние между атомами и молекулами в твердых телах и жидкостях с точностью порядка  $0,01 \text{ \AA}$ .

В течение ряда лет физики хотели сконструировать рентгеновский микроскоп, который бы использовал способность мягкого рентгеновского излучения обнаруживать микроструктуры. Потребность в таком приборе очевидна. Разрешение оптических микроскопов ограничено тем, что видимый свет имеет довольно большую длину волны. Просвечивающие электронные микроскопы, хотя они имеют много большее разрешение, характеризуются малой проникающей способностью, и поэтому их применение

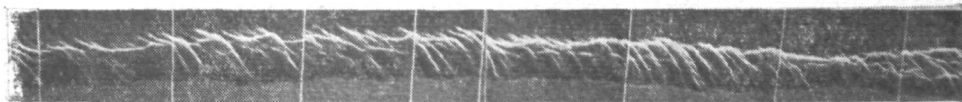


Рис. 2. Рентгеновая реплика хромосомы фруктовой мушки дрозофилы, полученная при облучении мягкими рентгеновскими лучами (с длиной волны  $44,8 \text{ \AA}$ ) хромосомы, помещенной на полимер, чувствительный к рентгеновскому излучению.

Рентгеновские лучи по-разному затухают для различных компонент хромосомы. Если полимер положить в растворитель, то слабее облученные поверхности растворяются медленнее, чем более сильно облученные. Этот (оставленный из частей) рисунок реплики сделан растровым электронным микроскопом. Предварительную обработку провел Дж. Седат.

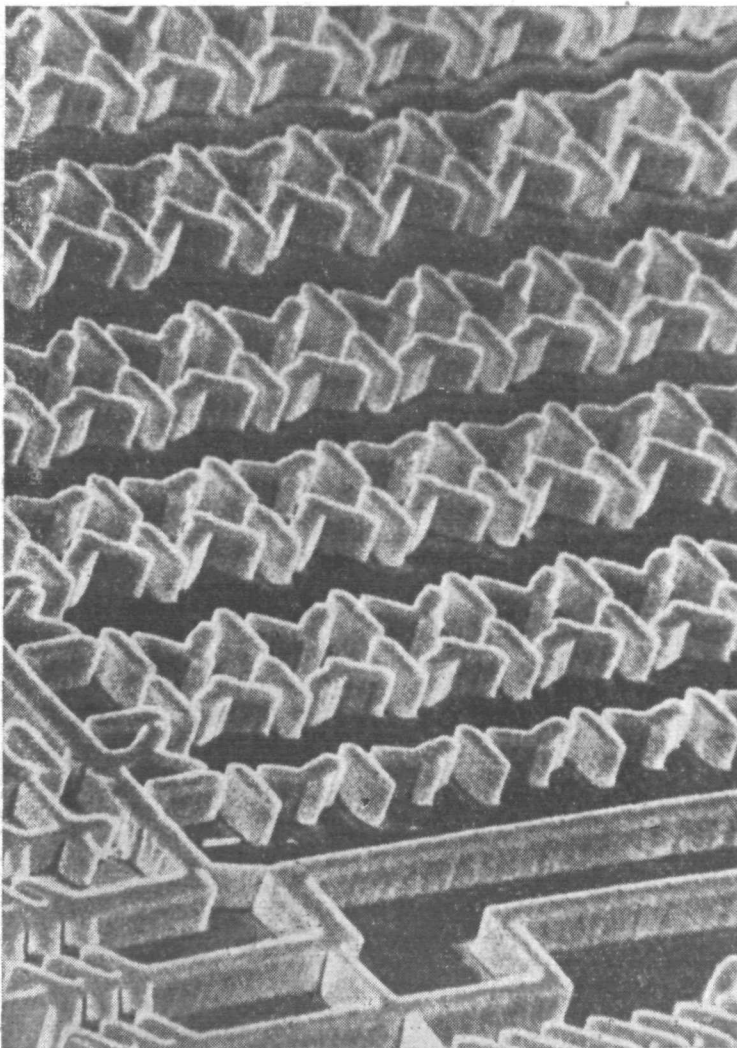


Рис. 3. Микроэлектронная схема, произведенная при помощи рентгеновской литографии, увеличенная в 4690 раз при помощи растровой электронной микрографии.

Схема из цилиндрических магнитных доменов была образована при прохождении через золотой шаблон мягкого рентгеновского излучения, направленного на полимер, чувствительный к такому излучению. Линии схемы имеют толщину  $1 \text{ мкм}$  и высоту около  $3 \text{ мкм}$ . Возможность с помощью рентгеновской литографии создавать рельефные линии является преимуществом этого метода.

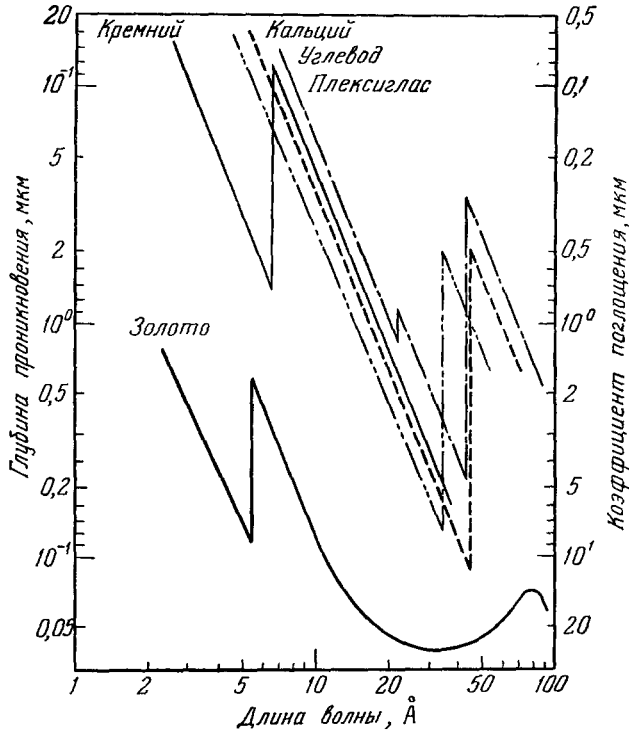


Рис. 4. Спектр поглощения мягкого рентгеновского излучения показан для различных веществ.

Глубина проникновения, измеряемая здесь в мкм, определяется толщиной вещества, необходимой для того, чтобы излучение с данной длиной волны ослабло на 37% от интенсивности падающего излучения. С ростом длины волны (следовательно, при уменьшении энергии) глубина проникновения уменьшается. Коэффициент поглощения, который обратно пропорционален глубине проникновения, является мерой количества излучения, поглощенного материалом. Всякий раз, когда энергия рентгеновских лучей больше, чем энергия, необходимая для того, чтобы выбить электроны из атомов, поглощение возрастает. На эти энергии будут указывать края поглощения, т. е. разрывы кривых. Например, край поглощения в спектре углерода при 44,8 Å соответствует энергии, необходимой для выбивания внутреннего электрона из атома углерода.

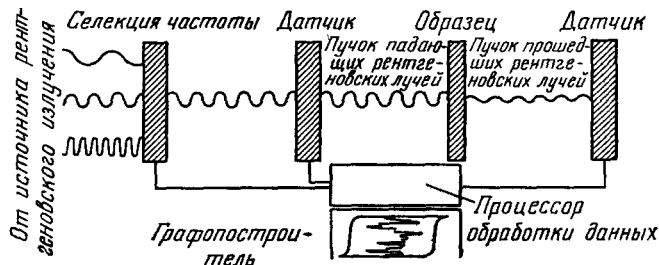


Рис. 5. На этой очень схематичной диаграмме изображена экспериментальная установка для измерения характеристик поглощения веществами рентгеновского излучения. Пучок рентгеновских лучей с различными длинами волн проходит сначала через прибор, который может быть построен для выбора рентгеновского излучения с определенной частотой или энергией. Затем рентгеновское излучение при прохождении через вещество определяется по сравнительно интенсивности падающего пучка с интенсивностью прошедшего пучка.

ограничивается очень тонкими образцами. Более того, в просвечивающих электронных микроскопах образец обычно подвергается травлению и помещается в вакуумную камеру. Подобное приготовление, изменяющее биологический материал, не требуется для рентгеновской микроскопии. Однако оказывается, что трудности в конструировании рентгеновского микроскопа значительны из-за того, что рентгеновские лучи сложно фиксировать для получения изображения.

Хотя линзы могут фокусировать видимый свет, они не фокусируют рентгеновские лучи. Электромагнитные волны (например, свет или рентгеновские лучи), проходя сквозь вещество, распространяются со скоростями, отличающимися от их скорости в вакууме или в воздухе, следовательно, они преломляются, т. е. изменяют направление. Степень преломления зависит как от длины волны излучения, так и от природы вещества.

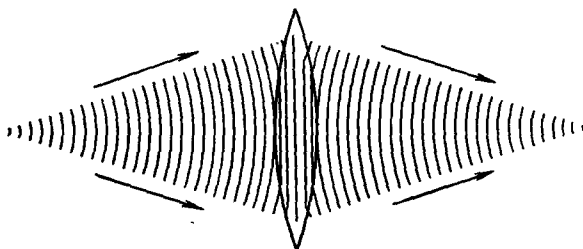


Рис. 6. Классические линзы могут фокусировать световые волны, но не могут фокусировать рентгеновские лучи.

Здесь показано, как сферическая волна, расходящаяся из точки, трансформируется линзой в волну, сходящуюся в точку. Линза задерживает волновые фронты, проходящие через ее центр, сильнее, чем волновые фронты, проходящие через ее края, таким образом, чтобы время, необходимое для того, чтобы свет дошел от объекта до изображения, было одинаковым для всех путей.

Для видимого света, распространяющегося через стекло линзы или призмы, этот эффект является достаточно сильным для того, чтобы сфокусировать световые волны. Запаздывание и преломление волновых фронтов происходит таким образом, что все они пересекаются в одной точке. Например, сферическая волна, расходящаяся из точечного источника света, может быть преобразована линзой в сферическую волну, сходящуюся в точку изображения. Линза задерживает волновые фронты, проходящие через центр, больше, чем волновые фронты, проходящие через края, таким образом, что время прохождения от объекта до изображения волновых фронтов одинаково для всех возможных траекторий. В отличие от видимого света, эффекты запаздывания и преломления во многих веществах пренебрежимо малы для мягкого рентгеновского излучения. Только очень толстые линзы из некоторых веществ могут так задерживать и преломлять мягкие рентгеновские лучи, что их можно сфокусировать. Однако мягкое рентгеновское излучение не обладает столь большой энергией, чтобы распространяться через такие толстые линзы; волны бы полностью поглотились прежде чем они вышли бы с другой стороны линзы. Для жесткого рентгеновского излучения, несмотря на его большую проникающую способность, возможность фокусировки столь же плоха из-за того, что самые толстые линзы слабо отклоняют жесткие рентгеновские лучи.

□

Простейший и наиболее успешный метод получения изображения при помощи рентгеновского излучения связан с рентгеновской микроскопией. В этом методе, который позволяет достичь разрешений существенно

лучших, чем оптическая микроскопия, создается рентгеновский снимок образца. Размер и состав образца, а также детали его рельефа определяют длины волн, дающие наиболее резкие тени. Оптимальная длина волны определяется из условия получения максимально возможной проникаемости и максимальной контрастности. Для прохождения излучения через образец требуется достаточно жесткое рентгеновское излучение, однако, при изучении деталей рельефа образца требуется мягкое рентгеновское излучение, достаточное для получения требуемой контрастности. Для прохождения излучения через объекты большой толщины требуются длины волн порядка  $2 \text{ \AA}$ , тогда как для получения наилучшей контрастности при изучении деталей с размерами порядка  $1'$  требуются длины волн до  $100 \text{ \AA}$ .

За образцом помещается экран или фотопленка, которые регистрируют интенсивность рентгеновских лучей, прошедших сквозь образец. Как было показано выше, интенсивность резко падает, когда энергия волн равна энергии, необходимой для освобождения электронов из атомов. Такое загущение дает богатую информацию о составе образца. Например, энергия рентгеновского излучения с длиной волны  $44,8 \text{ \AA}$  соответствует энергии, требуемой для удаления внутреннего электрона из атома углерода. Если объект, состоящий в основном из углерода, облучается рентгеновскими лучами с длинами волн, несколько большими  $44,8 \text{ \AA}$  и, следовательно, с энергиями, недостаточными для удаления внутренних электронов, объект будет слабо поглощать излучение и его изображение будет иметь низкую контрастность. Если тот же самый объект облучается рентгеновскими лучами с длинами волн, равными или несколько меньшими  $44,8 \text{ \AA}$ , объект будет значительно сильнее поглощать и его изображение будет иметь большую контрастность. Различие между двумя изображениями, одно из которых сделано при длинах волн, чуть больших «края поглощения» для данного элемента, а другое при длинах волн, чуть меньших края поглощения, будет в общих чертах описывать распределение элемента в объекте.

Недостатком контактной рентгеновской микроскопии является то, что изображение получается не большим, чем сам объект. До недавнего времени изображение, записываемое на фотопленку, надо было рассматривать при помощи оптического микроскопа. Это означало, что получаемое разрешение определялось разрешением, достигаемым для видимого света, даже если ограничения, накладываемые рентгеновской микроскопией, можно преодолеть. Тем не менее подобная микроскопия является полезным методом исследования ввиду большой проникающей способности рентгеновского излучения и контрастности получаемого изображения.

В 1972 г. Д. Л. Спирс и Г. И. Смит из Линкольновской лаборатории Массачусетского технологического института модифицировали метод контактной рентгеновской микроскопии так, что стало возможным применение этого метода для литографического изготовления микроэлектронных схем. Этот рентгеновский процесс, который пока еще находится в стадии лабораторных исследований, может облегчить получение точной копии сложных узлов схем большого размера в микроэлектронном масштабе. Только при помощи рентгеновской литографии можно воспроизводить мелкие детали. Детали микрорельефа, которые обычной литография, связанная с ультрафиолетовым излучением, может воспроизвести, ограничены длиной волны порядка одного микрона ( $10^{-3} \text{ мм}$ ), хотя обычно воспроизводятся только структуры порядка нескольких микрон. Так как рентгеновское излучение имеет длины волн порядка нанометра ( $10^{-6} \text{ мм}$ ), оно открывает перспективу более высокого разрешения. Структуры с размерами менее одной десятой микрона уже стали достижимыми.



Рис. 7. Солнечная корона излучает рентгеновские лучи, которые изображены с помощью различных цветов на этой фотографии, сделанной с помощью рентгеновского телескопа станции «Скайлэб», который приведен ниже на рис. 14.

Цвет изменяется от красного (слабое излучение) до белого (интенсивное излучение). Области радужного цвета соответствуют районам, которые испускают большее количество рентгеновского излучения, и показывают, что имеется активность в более низких уровнях в атмосфере Солнца. Большая корональная дыра является областью пониженных плотностей, температуры и интенсивности рентгеновского излучения; она окружена магнитными полями с незамкнутыми силовыми линиями и связана с быстрыми потоками солнечного «ветра».

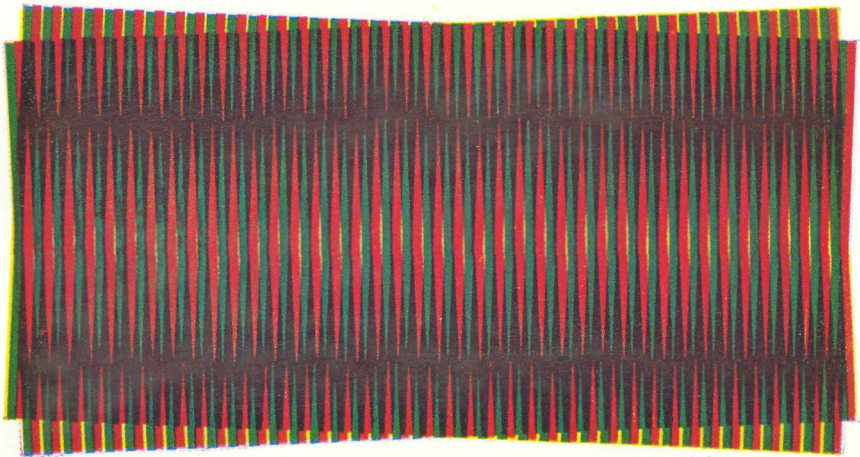


Рис. 8. Две плоские волны равной амплитуды, каждая из которых представлена рядом красных и зеленых линий, причем красные линии соответствуют впадинам, а зеленые — гребням, могут складываться, образуя интерференционную картину, которая характеризуется точками максимальной интенсивности, называемыми пучностями, и неподвижными точками, называемыми узлами.

Узлы соответствуют темным областям, где гребни одной из плоских волн точно погашаются впадинами другой. Пучностям соответствуют и интенсивные красные области, где совпадают впадины, и интенсивные зеленые области, где совпадают гребни. Интерференционная картина соответствует стоячей волне, когда впадины и гребни остаются на том же месте, хотя сами плоские волны распространяются со скоростью света.







Рис. 9. Расстояния между узлами и расстояния между пучностями уменьшаются, когда угол между бегущими плоскими волнами увеличивается. Поверхность зеркала соответствует узлу на интерференционной картине между падающей плоской волной и отраженной.

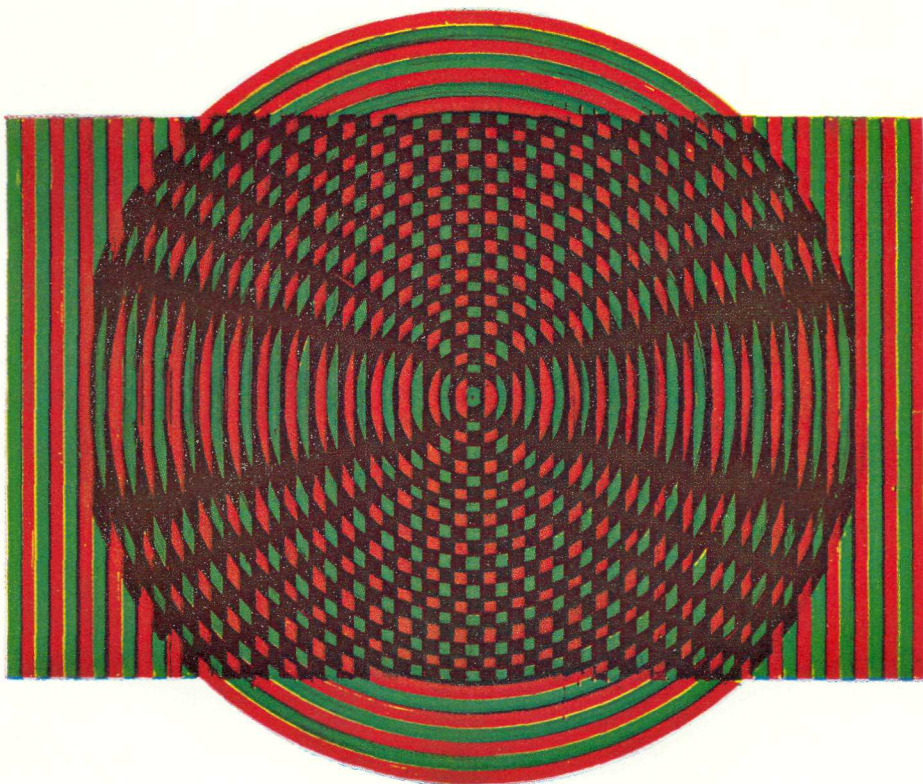


Рис. 10. Параболическая конфигурация узлов характеризует интерференционную картину сферической и плоской волн. Поперечное сечение дифракционной картины, представляющее собой ряд концентрических окружностей, называется зонной пластинкой, которая показана на рис. 13.



В рентгеновской литографии микроэлектронные схемы создаются слой за слоем на верхней поверхности «вафли» (пластинки, выпиленной из кристалла полупроводника), которую образуют ряд чипов. В процессе работы требуется промывание вафли в растворителях или травителях и затем повторное облучение вафли. Первоначально вафля покрывается органическим полимером, чувствительным к рентгеновскому излучению, который называется рентгеновским резистом. Покрытие создается при помощи нанесения капли раствора полимера на поверхность вафли. Вафля затем быстро вращается, при этом капля растекается и растворитель испаряется, оставляя тонкую ровную пленку резиста на поверхности вафли.

□

Покрытая резистом вафля облучается затем рентгеновскими лучами через шаблон, на котором нанесена проектируемая схема. Модель схемы на шаблоне сделана из тяжелого вещества, например, золота, которое поглощает большую часть падающих рентгеновских лучей; тонкая подложка шаблона состоит из легких веществ, через которые может пройти большая часть рентгеновского излучения. В рентгеновской литографии длина волны находится в интервале от 4 до 50 Å. Подложка шаблона толщиной до 50 мкм достаточно хорошо пропускает рентгеновские лучи с длинами волн меньше 4 Å. Более тонкие подложки, хотя с ними и труднее работать, пропускают рентгеновские лучи с длинами волн до 50 Å, которые могут дать большее разрешение; причины этого будут изложены ниже.

Основным свойством рентгеновского резиста является то, что после облучения его рентгеновскими лучами изменяется скорость, с которой этот резист растворяется в соответствующем растворителе. Если вафлю, облученную через шаблон рентгеновскими лучами, промыть в растворителе, то растворится та часть резиста, над которой шаблон был прозрачным. Таким образом, эскиз микросхемы с шаблона переводится на резист. Последний этап в литографии включает в себя перенос эскиза микросхемы с резиста собственно на вафлю. Это можно сделать несколькими способами. Например, при промывании вафли из кремния в плавиковой кислоте она травится всюду, где на ней нет резиста. В результате схема запечатлевается на вафле. Весь процесс промывания и облучения должен быть повторен для других слоев схемы.

Оказалось, что в контактной рентгеновской микроскопии рентгеновские резисты не менее важны, чем в рентгеновской литографии. Они могут использоваться как регистрирующая среда вместо фотографической пленки. Растворимость слоя резиста, расположенного за образцом, возрастает в наиболее облученных точках. Когда слой промывается в растворителе, то из-за различной растворимости участков слоя на нем образуется рельефное изображение образца, в котором более высокие участки рельефа соответствуют областям большего поглощения в образце. Топографию образовавшегося на резисте рельефа можно исследовать при помощи растрового электронного микроскопа, разрешение которого много больше, чем у оптического микроскопа.

Полиметилметакрилат (плексиглас) является рентгеновским резистом, дающим очень высокое разрешение: 50 Å для длины волны 50 Å. Более короткие длины волн не могут дать лучшего разрешения, так как они изменяют растворимость не только облучаемого материала, но также и граничащих с ним материалов. Можно довольно легко указать на основную причину этого. Фотон с большой энергией жесткого рентгеновского излучения, который проходит через образец, проникает вглубь

резиста до тех пор, пока не выбьет электрон из атома. Выбивание электрона всегда вызывает локальное изменение химических свойств резиста, такое, например, как нарушение связей в полимерной цепи. Энергия, полученная электроном, больше, чем энергия, которая требуется для освобождения электрона из атома. Сталкиваясь с другими атомами, электрон отдает избыточную энергию, выбивая вторичные электроны. Они в свою очередь также будут выбивать электроны до тех пор, пока энергия связи электронов в полимерной цепи резиста не превысит энергии свободных электронов.

Таким образом, энергия коротковолнового рентгеновского фотона будет распределена между многими электронами плексигласа в некоторой

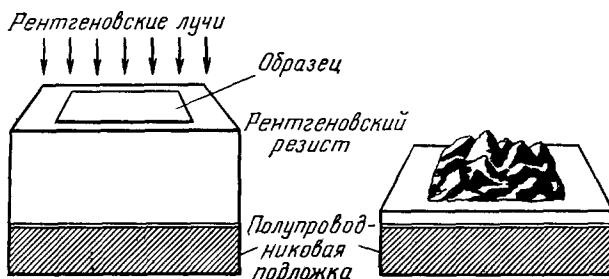


Рис. 11. Рентгеновским резистом является полимер, используемый для литографии микросхем и в микроскопии, использующей метод реплик.

Растворимость слоя резиста, помещенного за образцом (левый рисунок), меняется от точки к точке в соответствии с количеством излучения, полученного слоем. Когда слой помещается в растворитель, он растворится по-разному, образуя рельефное изображение образца, причем части поверхности с максимальной высотой соответствуют областям с максимальным поглощением в образце (правый рисунок).

области вокруг атома, первоначально поглотившего рентгеновский фотон. Энергия фотона мягкого рентгеновского излучения освобождает значительно меньше электронов в соответственно меньшей области. Это означает, что фотоны жесткого рентгеновского излучения увеличивают растворимость на больших участках резиста, чем фотоны мягкого рентгеновского излучения, и, следовательно, используя рельеф, полученный при помощи мягкого рентгеновского излучения, можно достичь лучшего разрешения. Для рентгеновских лучей с длинами волн порядка  $50 \text{ \AA}$  предельное разрешение, определяемое областью вторичных электронов, приблизительно равно также  $50 \text{ \AA}$ . Использование еще больших длин волн для уменьшения этой области не увеличивает разрешения из-за возникающих дифракционных эффектов. Другими словами, используя полимерные рентгеновские резисты, нельзя получить разрешения лучше  $50 \text{ \AA}$ .

□

В электронной микроскопии достижимо более высокое разрешение, чем в контактной рентгеновской микроскопии, так как длины волн электронов могут быть меньше, чем у мягких рентгеновских лучей. Тем не менее имеются две основные причины, по которым удобнее направлять электроны на рентгеновскую реплику образца, а не на сам образец. Во-первых, при помощи рентгеновской микроскопии можно определить внутреннюю структуру образца, которую с помощью электронов выявить трудно, и, во-вторых, можно изучать живые организмы. Достижения контактной рентгеновской микроскопии уменьшают необходимость наличия рентгеновского микроскопа, который увеличивал бы непосредственно в рентгеновском диапазоне. Уже полученное разрешение близко к пре-

делу, обусловленному дифракционными эффектами, и в рентгеновском микроскопе с фокусирующими элементами нельзя достигнуть лучшего разрешения.

Фокусирующие устройства для рентгеновского излучения, однако, необходимы, но по другим причинам: с их помощью легче регулировать рентгеновские лучи, фокусирующие элементы сильно облегчат конструирование многих научно-исследовательских приборов. Более того, без фокусирующих элементов невозможно было бы проводить наблюдения

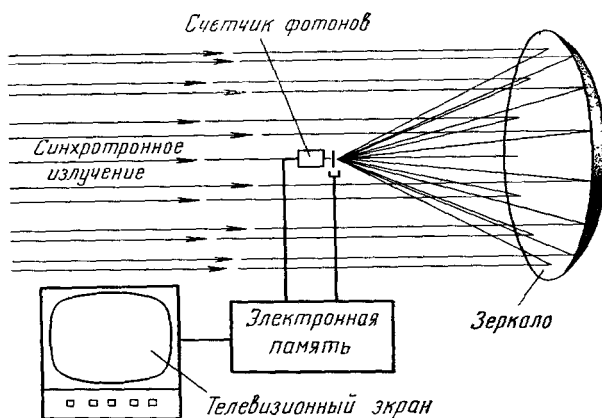


Рис. 12. Рентгеновские микроскопы будущего могут иметь счетчик фотонов в качестве регистрирующего устройства вместо рентгеновского резиста.

Если микроскоп оборудован таким фокусирующим элементом, как зеркало, он может давать изображение того же качества, что и контактный рентгеновский микроскоп, используя, однако, всегда сотую часть излучения. Меньшее облучение приводит к меньшему повреждению образца. Электронная память будет регистрировать интенсивность рентгеновских лучей, которые проходят через образец, и на телевизионном экране появится изображение особенностей поглощения образца. Занесение изображения в электронную память облегчит количественный анализ спектра.

рентгеновского излучения в астрономии. Фокусирующие устройства полезны также и для рентгеновской микроскопии, так как они позволяют уменьшить величину облучения, которое должно пройти через образец. Любое облучение, дающее высокое разрешение, повреждает облучаемый объект. Согласно вычислениям Д. Сейре и его коллег при оптимальных условиях мягкое рентгеновское излучение вызывает гораздо меньше повреждений, чем электроны. Однако это преимущество играет положительную роль только, если вся радиация, которая проходит сквозь объект и разрушает его, используется для анализа этого объекта. Это условие не выполняется в случае контактной рентгеновской микроскопии. Резист поглощает очень малую часть (меньше 1%, даже для максимального разрешения) падающих рентгеновских фотонов. Большинство фотонов, проходя через вещество, не дают никакого вклада в получение изображения. Если удастся сконструировать растровый рентгеновский микроскоп с фокусирующим устройством, то можно будет получить изображения такого же качества, причем радиационные разрушения будут приблизительно в 100 раз меньше.

В таких рентгеновских микроскопах будущего регистрирующей средой могла бы быть уже не фотопленка или какой-либо рентгеновский резист, а счетчик фотонов. Снабженный электронной памятью счетчик фотонов сможет регистрировать интенсивность пришедших рентгеновских лучей, которыми сканируется образец и будет проектировать изображение характеристик поглощения вещества на телеэкран. Занесение в электронную память информации об изображении облегчит дальнейший анализ.

Например, исследователь может получить изображение распределения в образце таких элементов, как кальций, проектируя на телеэкран разность всего двух изображений, одно из которых сделано на длинах волн, чуть больших границы поглощения этого элемента, а другое — на длинах волн, чуть меньше ее. Выполнение подобной процедуры для двух изображений, полученных на резистах, было бы крайне трудно. Первый вариант растрового рентгеновского микроскопа, основанного на прохождении синхротронного излучения через узкую диафрагму для ограничения облучаемой площади образца, сделали в 1972 г. П. Горовитц и Дж. А. Хоуэлл из Гарвардского университета. Диаметр этой диафрагмы ограничивает разрешение приблизительно одним микроном, но оно может быть существенно улучшено с помощью фокусирующих устройств.

Внимание физиков, занимающихся проблемами высококачественной фокусировки, сосредоточено на зеркалах со скользящим падением. Недавно начаты также работы с зонными пластинками и зеркалами с нормальным падением. Для того чтобы объяснить, как работают эти приборы, кратко обсудим получение изображения с точки зрения волновой механики. Если две или более волн пересекаются друг с другом, они интерферируют, образуя волну, амплитуда которой в каждой точке равна сумме амплитуд интерферирующих волн (см. рис. 8—9). Там, где волны находятся точно в фазе (гребни волн совпадают друг с другом и впадины волн совпадают друг с другом), амплитуда возрастает, а там, где они сходятся точно в противофазе (гребни совпадают с впадинами), амплитуда уменьшается.

Если волны складываются, образуя стоячую волну, создается интерференционная картина, которая характеризуется точками максимальной интенсивности, называемыми пучностями, и точками минимальной интенсивности, называемыми узлами. Узлы имеют нулевую интенсивность, если интерферирующие волны имеют одинаковую амплитуду. Термин «стоячая волна» означает тот факт, что пучности и узлы стационарны, даже хотя сами интерферирующие волны распространяются со скоростью света. Так как пучности соответствуют точкам максимума интенсивности, а узлы — точкам минимума интенсивности, фотография интерференционной картины будет наиболее светлой в пучностях и наиболее темной в узлах.

□

Во многих случаях можно по интерференционным картинам воспроизвести интерферирующие волны, что уже используется. Если дифракционную решетку, сделанную в форме интерференционной картины двух волн, облучить одной из волн, будет генерироваться другая волна. Этот эффект реконструкции, на котором основывается голография, является определяющим в одном из последних достижений в фокусировке рентгеновского излучения. Для изготовления дифракционной решетки, называемой френелевской зонной пластинкой, используется интерференционная картина, образуемая плоской волной и сферической волной (рис. 10 и 13). Если зонная пластинка освещается рентгеновской плоской волной, то образуется сходящаяся сферическая волна. Таким образом, зонная пластинка фокусирует лучи.

Используя зонную пластинку, которая состоит из ряда концентрических окружностей, становящихся тоньше и располагающихся все ближе друг к другу по мере увеличения их радиуса, можно достичь разрешений, равных ширине наименьшей зоны, т. е. наименьшему расстоянию между окружностями. Достижение такого разрешения требует, однако, чтобы зонная пластинка была произведена при таком же разрешении. Электрон-

но-лучевые системы могут иметь подобную разрешающую способность, и в течение последнего десятилетия группа физиков из Тюбингенского университета получила зонные пластинки при помощи их. Хотя уже сделаны пластинки с зонами, меньшими  $300 \text{ \AA}$ , ни одна из них не дает лучшего разрешения, чем оптический микроскоп. Наилучшее разрешение рентгеновского микроскопа, снабженного зонной пластинкой в качестве фиксирующего устройства, составляет около  $0,5 \text{ мкм}$  т. е. в пять раз хуже, чем теоретический предел  $0,1 \text{ мкм}$ ; это разрешение получено в приборе, который сконструировали в Геттингенском университете Е. Ниманн, Д. Рудольф и Г. Шмаль. Ввиду того, что техника получения зонных пластинок совершенствуется, через несколько лет разрешение, несомненно, будет ближе к теоретическому пределу.

Основное неудобство зонных пластинок как прибора для получения изображения состоит в том, что требуется монохроматическое излучение. Фокальное расстояние зонной пластинки пропорционально длине волны падающего излучения, тем самым только одна длина волны в немонохроматическом излучении будет давать четкое изображение. Это означает, что зонные пластинки неудобны для рентгеновских лучей, генерируемых синхротронами, обладающими широким спектром излучения. Если когда-нибудь будет обнаружен интенсивный источник монохроматического мягкого рентгеновского излучения, то с помощью зонных пластинок можно будет получить четкое изображение.

В отличие от зонных пластинок, зеркала могут одновременно фокусировать различные длины волн. С точки зрения волновой механики поверхность идеального зеркала может быть описана как поверхность, которая совпадает с узлами интерференционной картины, созданной волной, падающей на зеркало, и волной, отражающейся от него. Другими словами, если зеркало обладает 100%-й отражательной способностью, т. е. падающая и отраженная волны имеют одинаковую амплитуду, то при этом поверхность зеркала соответствует области нулевой интенсивности. Если на зеркале не образуется узел с нулевой интенсивностью в падающей волне, от него отражается волна с меньшей интенсивностью, чем интенсивность падающей волны. На поверхности зеркала падающая волна должна полностью затухать на расстоянии меньшем, чем длина волны, если на зеркале образуется узел с нулевой интенсивностью. Неполное затухание будет приводить к образованию узла с ненулевой

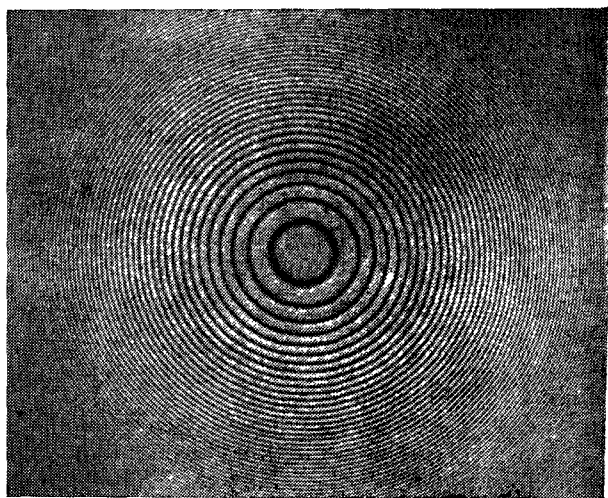


Рис. 13. Френелевская зонная пластинка ряд concentрических окружностей, которые становятся уже и ближе друг к другу по мере увеличения их радиуса) является поперечным сечением интерференционной картины, которая приведена на рис. 110.

Если плоская волна рентгеновского излучения падает на френелевскую зонную пластинку, то после дифракции она трансформируется в сферическую волну, сходящуюся в точку изображения. Френелевская зонная пластинка обладает разрешением, равным ширине самой узкой зоны, или расстоянию между concentрическими окружностями.

интенсивностью, что соответствует падающей и отраженной волнам с разными амплитудами, или низкой отражающей способности.

Однако для всех материалов поглощение мягких рентгеновских лучей слишком мало для получения нужного затухания. Например, волна с длиной волны  $50 \text{ \AA}$  пройдет по крайней мере  $500 \text{ \AA}$  в любом материале. При такой длине волны и при падении, близком к нормальному, зеркала отражают только сотую или даже тысячную часть падающего излучения.

Зеркало обычно имеет одну гладкую отражающую поверхность. Исследование рентгеновских зеркал, выполненное в исследовательском

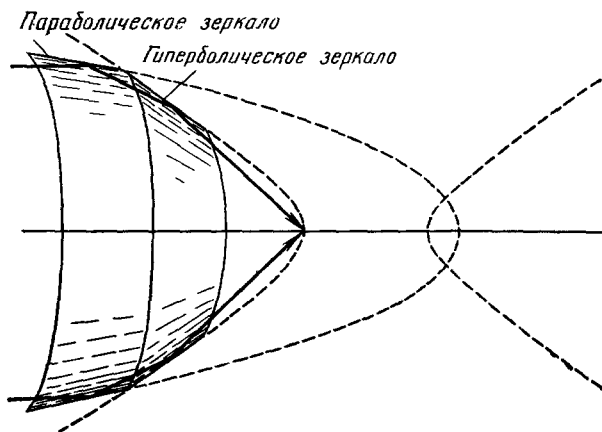


Рис. 14. Рентгеновский телескоп, установленный на борту станции «Скайлэб», является телескопом типа Уолтера, в котором излучение, приходящее при скользющем угле  $0,916^\circ$ , фокусируется гиперболической и параболической поверхностями.

Здесь угол падения увеличен, отражающие поверхности продолжены штриховой линией, чтобы показать конические сечения, частями которых являются поверхности отражения. Телескоп может фокусировать рентгеновские лучи с длинами волн больше  $6 \text{ \AA}$  с разрешением около  $1''$ ; это разрешение в 1000 раз хуже, чем теоретический предел.

центре имени Томаса Дж. Уотсона фирмы I.V.M, было нацелено на достижение лучшего отражения при помощи зеркал, состоящих из нескольких поверхностей, расположенных одна над другой. Если две плоские волны (например, падающая и отраженная) пересекают друг друга, возникает много узлов на интерференционной картине. Располагая поглощающий материал так, чтобы он занимал большое число узлов на интерференционной картине, можно получить более высокую отражательную способность, чем для зеркала, состоящего только из одной гладкой отражающей поверхности. Давно известно, что естественные кристаллы сильно отражают жесткие рентгеновские лучи, если атомы кристалла совпадают с узлами, но только недавно стала очевидной возможность синтеза веществ, которые сильно отражают мягкие рентгеновские лучи при падении, близком к нормальному. Производство зеркал для мягкого рентгеновского излучения связано, таким образом, с синтезированием веществ, в которых сильно поглощающие области чередуются со слабо поглощающими, так что положение этих двух областей соответствует желаемой интерференционной картине. Мы предполагаем, что для таких материалов отражение может достигать 30%. В сотрудничестве с Р. П. Хэлбихом и С. Кунцем в Гамбурге на электронном синхротроне ДЭЗИ мы пытались сделать многослойные зеркала для длин волн от  $50$  до  $200 \text{ \AA}$ . Наша задача состоит в конструировании растрового рентгеновского микроскопа, использующего такие зеркала для фокусировки излучения.



□

Хотя обычное зеркало едва ли будет вообще отражать мягкие рентгеновские лучи, если падение их близко к нормальному, оно будет хорошо отражать те волны, которые падают на его поверхности под очень малыми углами. При таком скользящем падении узлы интерференционной картины падающей и отраженной волн будут расположены на больших расстояниях друг от друга. Большой масштаб интерференционной картины делает возможным размещение сильно поглощающего материала в узлах стоячих волн. По этой причине могут быть получены большие отражающие способности для всех материалов при скользящем падении. Более того, при падении под очень малым скользящим углом отражение возрастает из-за другого эффекта: полного внутреннего отражения. Зеркала этого рода пригодны для фокусировки мягких рентгеновских лучей в таких, например, приборах, как рентгеновский телескоп, помещенный на борту станций «Скайлаб» (рис. 14). Этот телескоп, работающий при скользящем угле  $0,916^\circ$ , может фокусировать мягкие рентгеновские лучи, длина волны которых больше  $6 \text{ \AA}$ . Разрешение этого телескопа ограничено, однако, неизбежными несовершенствами отражающих поверхностей, составляющими около  $1''$  (значение в 1000 раз худшее, чем теоретический предел). Это вновь указывает на главную задачу, связанную с высоким качеством фокусирующих элементов для рентгеновских лучей: эти элементы должны быть сделаны с большой точностью. Последние достижения технологии дают надежды на заметный прогресс в течение последующих нескольких лет.

## ЛИТЕРАТУРА

- Hall T. A., Röckert H. O. E., de C. H. Saunders R. L. X-Ray Microscopy in Clinical and Experimental Medicine.— Ch. C. Thomas Publ., 1972.  
Spears D. L., Smith H. I.— Electron. Lett., 1972, v. 8, p. 102.  
Underwood I. H., Milligan J. E., DeLoach A. C., Houver R. B.— Appl. Optics, 1977, v. 16, p. 858.