

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

543.422.6

ВОЗРОЖДЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОПТИКИ*)

Дж. Х. Андервуд, Д. Т. Аттвуд

Благодаря созданию новых оптических элементов, таких как многослойные зеркала и зонные пластинки, оптические методы получения изображений и голография могут быть использованы в спектральной области с длинами волн короче 300 Å.

В последние несколько лет происходит интенсивное возрождение интереса к мягкой рентгеновской и далекой ультрафиолетовой областям спектра электромагнитного излучения. В некоторой степени это обусловлено появлением новых рентгенооптических приборов, которые дали нам удивительные картины природных объектов как микроскопического, так и астрономического масштабов (рис. 1).

Еще совсем недавно возможность создания оптических систем для получения рентгеновских изображений предметов казалась невероятной. Теперь, однако, мы обладаем техникой изготовления и обработки сверхгладких поверхностей с очень точно выдержанным профилем для использования их в качестве зеркал в рентгеновских микроскопах и телескопах. Ученые, занимающиеся синтезом и исследованием новых материалов, окончательно отработали методы осаждения атомных слоев для получения многослойных интерференционных покрытий, повышающих отражательную способность зеркал на избранных длинах волн в спектральной области мягкого рентгеновского излучения и далекого ультрафиолета (охватывающей диапазон от 3 до 300 Å). И, наконец, успехи электронной промышленности в производстве миниатюрных микросхем привели к разработке методов изготовления структур с размерами в несколько сотен ангстрем. Благодаря этому стало возможным создание элементов дифракционной рентгеновской оптики, таких как зонные пластинки и пропускающие решетки. Одновременно с этим проводилось усовершенствование чувствительных детекторов изображения с высоким разрешением, а также быстродействующих детекторов, таких как электронно-оптические регистраторы.

В то же самое время мы являемся свидетелями появления новых интересных источников мягкого рентгеновского и далекого ультрафиолетового излучения, которые в свою очередь требуют создания новых видов оптических приборов для диагностики их свойств и исследования их характеристик. Среди таких источников — горячая плотная нестационарная плазма, генерируемая лазерами или электрическими разрядами, современные генераторы синхротронного излучения, релятивистские ондуляторы, а также термоядерная

*) Underwood J. H., Attwood D. T. The Renaissance of X-ray Optics// Phys. Today. April 1984. V. 37, No. 4. P. 44—51.— Перевод А. В. Виноградова.

Джеймс Х. Андервуд и Дэвид Т. Аттвуд — сотрудники Центра рентгеновской оптики Лаборатории им. Лоренса, Беркли, Калифорния, США.

© American Institute of Physics 1984

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1987

плазма в установках с магнитным удержанием. Достигнуты также значительные успехи по получению когерентного излучения в области вакуумного ультрафиолетового излучения как путем осуществления различных лазерных схем, так и методами нелинейного преобразования с повышением частоты. Особый интерес, в связи с возможностью создания широко перестраиваемых источников когерентного рентгеновского излучения, представляет разработка магнитных ондуляторов со ста и более периодами в специализированных накопительных кольцах с малым эмиттансом пучка. Разработка таких электронных накопителей означала бы, по существу, создание когерентных

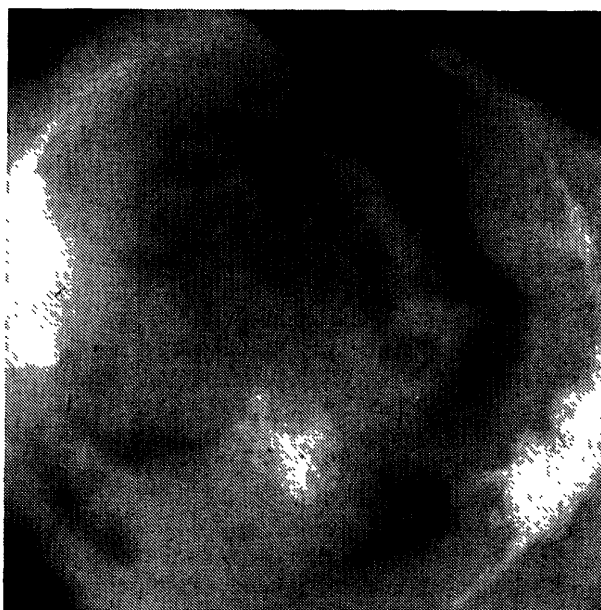


Рис. 1. Фотография Солнца в рентгеновских лучах.

Диапазон спектра от **3 до 44 Å**. Получена с помощью телескопа Вольтера I рода (см. рис. 3), установленного на орбитальной станции «Скайлэб». Из фотографии видно, что рентгеновское излучение испускается преимущественно участками короны, расположенными над областями солнечной активности. Большие темные структуры — это корональные дыры, т. е. области аномально низкой плотности

источников рентгеновского излучения с высокой яркостью и диапазоном перестройки от 100 эВ до нескольких кэВ, т. е. в спектральном диапазоне, крайне важном для рентгеновского микроанализа, микроскопии и голографии, имеющих широкую область применения.

В этой статье мы обсудим результаты исследований в области рентгеновской оптики, дополняющие упомянутое достижение в создании источников рентгеновских лучей. Мы увидим, что эти достижения открывают новые захватывающие применения рентгеновской оптики в таких различных областях, как физика, астрономия, биология, медицина, химия и материаловедение — применения, которые несколько лет тому назад никто не стал бы рассматривать серьезно.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ

Вильгельм Рентген после своего открытия в 1895 г. решил сам попытаться провести эксперименты по исследованию преломления, отражения и фокусировки рентгеновских лучей. Но он потерпел неудачу, и причина этого была понятна лишь несколько лет спустя, когда было показано, что рентгеновские лучи представляют собой короткие электромагнитные волны, частоты которых лежат выше резонансных, собственных частот внутренних атомных электронов для большинства элементов.

Таким образом, для рентгеновских лучей действительная часть коэффициента преломления n меньше единицы лишь на малую величину δ , и поэтому их преломление незначительно. Напротив, частоты видимого света близки

к частотам атомных переходов или меньше их, и поэтому коэффициент преломления для видимого света значительно больше единицы. Создание оптических приборов для рентгеновских лучей осложняется еще и тем, что все материалы являются поглощающими. Для того чтобы подчеркнуть это обстоятельство, коэффициент преломления обычно записывают в комплексной форме:

$$n = 1 - \delta + i\beta = 1 - \frac{N_a r_e \lambda^2}{2\pi} (f_1 + if_2),$$

где N_a — плотность атомов, r_e — классический радиус электрона и λ — длина волны. Зависимость декремента δ и показателя поглощения β от атомного номера содержится в атомном факторе рассеяния $f_1 + if_2$, который является комплексной величиной.

Недавно Бёртон Хенке и его коллеги из Гавайского университета составили таблицы вещественной (f_1) и мнимой (f_2) частей фактора атомного рассеяния¹. Эти таблицы, полученные на основании максимального соответствия

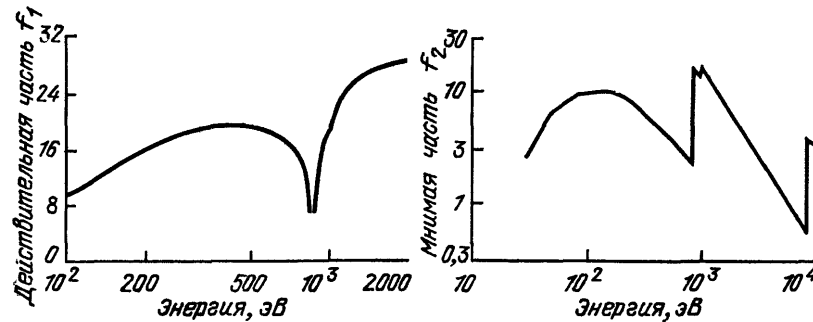


Рис. 2. Атомные факторы рассеяния для никеля.

Атомный фактор рассеяния, вещественная и мнимая части которого изображены на графиках, определяет энергетическую зависимость показателя преломления вещества. В частности, для никеля комплексный показатель преломления равен $n = (1 - 4,1) \cdot 10^{-5} \lambda^2 (f_1 + if_2)$, где λ — в Å

с имеющимися экспериментальными и теоретическими значениями атомного фактора для элементов от водорода до плутония, представляют собой ценные данные для исследователей, работающих в области рентгеновской оптики и оптики далекого ультрафиолета. На рис. 2 для примера представлены данные для никеля. Из приведенного графика и выражения для n видно, что декремент δ и показатель поглощения β имеют порядок 10^{-4} для рентгеновских лучей с длиной волны 10 Å (или энергией 1240 эВ). При столь близком к единице показателе преломления вогнутые преломляющие никелевые линзы должны были бы иметь неприемлемо большое фокусное расстояние и настолько большую кривизну (в частности, у линз толщина на краях была бы так велика), что почти все рентгеновские лучи поглотились бы в линзе. Аналогичное положение имеет место для всех материалов.

Обычные зеркала также неприменимы в этом случае. Коэффициент отражения по интенсивности I/I_0 дается известными формулами Френеля. Для границы раздела вакуум — вещество и волны с электрическим вектором, перпендикулярным плоскости падения, этот коэффициент имеет вид

$$\frac{I}{I_0} = |R|^2 = \left| \frac{\cos \varphi - n \cos \varphi'}{\cos \varphi + n \cos \varphi'} \right|^2.$$

Угол падения φ измеряется от нормали к поверхности, а комплексный угол преломления φ' формально определяется по закону Снеллиуса $\sin \varphi = n \sin \varphi'$, где n — комплексный показатель преломления. При падении, близком к нормальному, косинусы близки к единице и приведенное выше

уравнение Френеля сводится к следующему: $I/I_0 = (\delta^2 + \beta^2)/4$. Вспоминая, что декремент δ и показатель поглощения β малы ($\sim 10^{-4}$), мы видим, что отражение рентгеновских лучей от одной поверхности крайне незначительно.

ОТРАЖЕНИЕ ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕМ ПАДЕНИИ

Положение меняется при углах падения, близких к 90° (случай скользящего падения). Поскольку рентгеновские лучи падают из среды с большим показателем преломления (вакуум) на среду с меньшим показателем преломления (любое вещество, для которого $n < 1$), то закон Снеллиуса дает для угла преломления φ' мнимые значения в том случае, когда угол падения Φ больше критического угла Φ_c , равного $\arcsin n$. Следовательно, во вторую среду волна не может проникнуть, и падающее излучение отразится обратно в первую среду аналогично полному внутреннему отражению для видимого света. Френелевские уравнения справедливы для обоих случаев — как видимого света, так и рентгеновских лучей. Коэффициент отражения рентгеновских лучей обычно выражается в виде функции угла скольжения $\theta = 90^\circ - \varphi$. Термин «полное отражение» несколько дезориентирует в тех случаях, когда коэффициент поглощения является конечной величиной. Переход от высокого коэффициента отражения, когда угол скольжения θ меньше критического угла θ_c , к очень малому значению коэффициента отражения, когда θ больше θ_c , при больших значениях отношения β/δ происходит более плавно.

Отражение рентгеновских лучей при скользящем падении было впервые продемонстрировано Артуром Комптоном в 1922 г. Физики вскоре поняли, что это явление предоставляет возможность использования изогнутых зеркал для создания рентгеновской оптики, формирующей изображения предметов. Однако прошло много лет, прежде чем ученые смогли устранить большие аберрации оптических элементов со скользящим падением — в особенности астигматизм. При падении, близком к нормали, вогнутые сферические зеркала дают хорошее изображение точечного объекта на оптической оси, но, по мере удаления объекта от оси, изображение все более растягивается. При скользящем падении этот астигматизм максимален: изображение точки становится линией, что и ограничивает использование одного сферического зеркала в качестве прибора, дающего изображение объекта.

Имеются два принципиальных пути преодоления этой трудности. В 1948 г. Поль Киркпатрик и Альберт Баец из Стэнфордского университета построили первую оптическую систему для получения изображения в рентгеновских лучах — рентгеновский микроскоп, использующий пару сферических вогнутых зеркал в тандеме². Оси вращения этих зеркал были перпендикулярны друг к другу, так что каждое зеркало исправляло астигматизм другого. Как мы увидим далее, этот метод используется в диагностике лазерной плазмы. Во втором методе используется зеркало, радиус кривизны которого значительно больше в одном направлении, чем в другом³. Подобную форму имеет внутренняя поверхность трубы, слабо изогнутой по длине.

В 1952 г. Ганс Вольтер из Кильского университета внес значительный вклад в теорию и применение такого типа рентгеновской оптики скользящего падения⁴. Вольтер разработал несколько систем для фокусировки рентгеновских лучей, используя поверхности вращения конических сечений. На рис. 3 показаны три такие системы. Параболическое зеркало скользящего падения фокусирует лучи параллельные оси и, очевидно, свободно от сферической аберрации, как показано на рис. 3, а. Однако такое зеркало имеет следующий недостаток: степень увеличения изображения меняется по апертуре, т. е. страдает от комы. Вольтер показал⁴, что кома может быть ослаблена при использовании двух различных поверхностей второго порядка, как это показано на рис. 3, б и в. На рис. 3, б изображена вольтеровская система I рода. Лучи сначала отражаются от параболоида, подобного параболоиду, пока-

данному на рис. 3, а, а затем от гиперboloида, один из фокусов которого совпадает с фокусом параболоида. В вольтеровской системе II рода (см. рис. 3, в) вторым элементом является гиперboloид с внешним отражением;

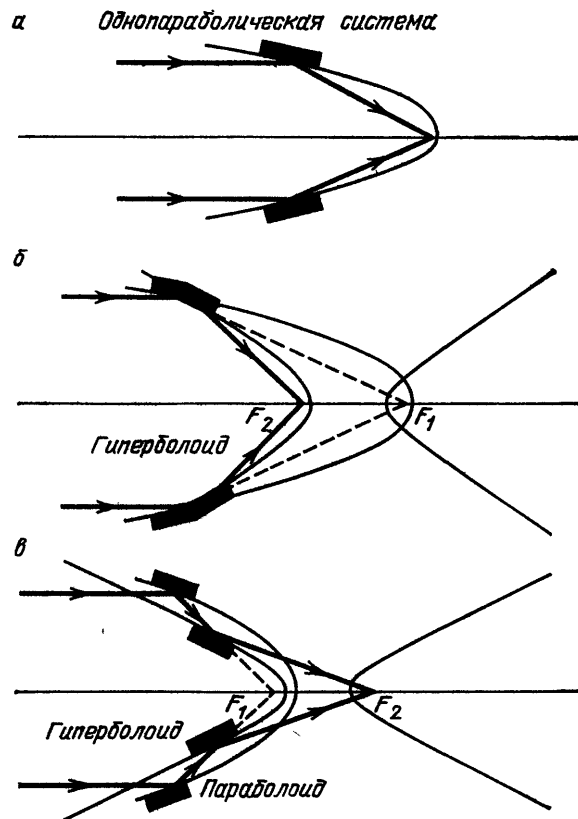


Рис. 3. Оптические системы скользящего падения, использующие в качестве отражателей поверхности второго порядка.

Ганс Вольтер предложил эти системы для получения рентгеновских изображений. а — Однопараболическая система, являющаяся аналогом ньютоновского телескопа нормального падения. б — Вольтеровская система I рода; оптическими элементами в ней служат отражающие внутренние поверхности параболоида и гиперboloида. в — Вольтеровская система II рода; оптическими элементами в ней служат отражающие внутренняя поверхность параболоида и внешняя поверхность гиперboloида.

Этот аналог известного кассегреновского телескопа. Вольтер показал, что можно было бы еще более улучшить качество изображения этих систем, если изменить форму поверхности зеркала из строго конической в форму, описываемую теорией астронома Карла Шварцшильда.

ПРИМЕНЕНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ ОПТИКИ

Методы рентгеновской оптики, основанные на отражении при скользящем падении, являются в настоящее время наиболее разработанными и находят наиболее широкое применение.

Зеркальная оптика с одним отражением, несмотря на большие аберрации, используется в целом ряде областей. Сферические, цилиндрические и тороидальные зеркала применяются в спектрометрии мягкого рентгеновского и далекого ультрафиолетового излучения, а также в исследованиях по синхротронному излучению для разделения и поворота пучков. Двухзеркальная оптика используется для получения изображения источников рентгеновского излучения — электронов в накопительных кольцах. Одуляторы и накопительные кольца следующего поколения (см.: *Viene nstock A., Winick H.//Phys. Today. June 1983. P. 48*) будут генерировать столь мощные потоки излучения, что станет существенным нагрев и изменение формы оптических поверхностей. Поэтому предстоит разработка методов спектральной фильтрации излучения для уменьшения потока, а также специальных материалов, таких как карбид кремния, способных противостоять большим тепловым нагрузкам.

Несмотря на то что физики построили несколько микроскопов Киркпатрика — Баэца, отражательная микроскопия скользящего падения не достигла пока уровня разрешения устройств, которые будут описаны в следующих разделах. Разрешение отражающих микроскопов составляет величину ~ 1 мкм и ограничивается аберрациями, рассеянием на шероховатостях, а также трудностями изготовления зеркал строго заданной формы.

Новый интерес к рентгеновской отражательной микроскопии вызвала программа инерциального лазерного термоядерного синтеза. Цель ее — сжать с помощью лазера маленькую мишень, содержащую дейтерий — тритиевое топливо, до высоких плотностей при термоядерных температурах (см. N u s k o l l s J. // Phys. Today. September. 1982. P. 24). Пространственное, спектральное и временное распределение рентгеновского излучения горячей плазмы содержит ценную информацию о том, как протекает процесс

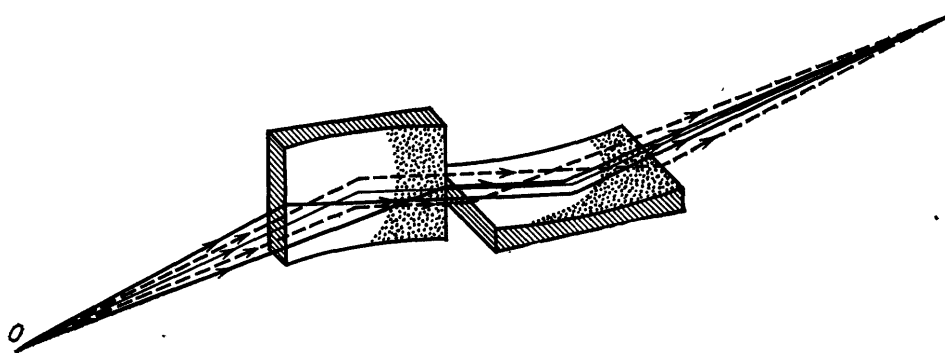


Рис. 4. Принципиальная схема микроскопа, исправляющего астигматизм сферических зеркал при скользящем падении.

Оси вращения сферических зеркал взаимно перпендикулярны. Этот так называемый микроскоп Киркпатрика — Баэца использовался для получения рентгеновских изображений лазерных термоядерных мишеней

этого сжатия. В этом случае требуется пространственное разрешение порядка 1 мкм. Это, конечно, значительно больше, чем 100 \AA , необходимых для биологических исследований, но, с другой стороны, сам объект существует очень короткое время и испускает другие виды излучения и микрочастицы, что исключает использование проекционных и контактных методов.

Ф. Суорд, Т. Палмиери и их коллеги из Лоуренсовской ливерморской Национальной лаборатории изготовили серию микроскопов Киркпатрика — Баэца⁵, один из которых давал одновременно четыре изображения взрывающейся мишени. Используя зеркала, изготовленные из различных материалов, меняя углы падения, а также внося на пути пучков различные поглощающие фильтры, они получили достаточное количество спектральной информации, чтобы построить изображение сжатой плазмы и определить ее температуру с умеренным разрешением. Рис. 4 иллюстрирует принципиальную схему такого микроскопа.

В экспериментах с лазерной плазмой вольтеровский микроскоп 1-го рода также использовался для взрывающихся мишеней⁶. Комбинация рентгенооптических систем со сверхскоростными электронно-оптическими преобразователями позволила достичь пространственного разрешения 1 мкм и временного — 20 пс. Таким образом удалось значительно расширить представление о механизме переноса энергии внутри сжимаемой мишени⁷.

Вольтеровская оптика нашла также широкое применение в рентгеновской астрономии. Корона Солнца и многих звезд, так же как и более экзотические объекты — остатки сверхновых, галактики, квазары, пульсары, нейтронные звезды, а возможно, и черные дыры, испускают рентгеновское излучение. Механизм испускания может быть как тепловым, так и нетепловым, связанным с обратным комптоновским рассеянием, магнитотормозными

процессами и т. п. Рикардо Джакони и Бруно Росси из Массачусетского технологического института первыми предложили использовать оптику скользящего падения для изучения внеатмосферных рентгеновских источников с борта ракет и спутников⁸. В начале 60-х годов маленькие рентгеновские телескопы были вынесены за пределы атмосферы с помощью ракет и сфотографировали Солнце. Длительная работа над совершенствованием технологии и повышением пространственного разрешения увенчалась в 1973 г. установкой на орбитальной станции «Скайлэб» двух солнечных рентгеновских телескопов⁹. Полученные на них многочисленные рентгеновские фотографии показали, что корона Солнца — сложный и изменяющийся во времени объект. Это значительно продвинуло наше понимание физики верхней атмосферы Солнца. Среди обнаруженных или впервые детально исследованных явлений следует назвать корональные дыры, петлевые структуры и яркие рентгеновские точки. Все их можно различить на рентгеновском снимке, представленном на рис. 1.

Внесолнечная рентгеновская астрономия требует более крупных и более высоко чувствительных телескопов. Самый крупный был запущен в ноябре 1978 г. как составная часть Второй астрономической обсерватории высоких энергий (HEAO-2), названной орбитальной обсерваторией «Эйнштейн». Телескоп, который действовал до апреля 1981 г., состоял из четырех вольтеровских систем I рода, вложенных одна в другую и имеющих общий фокус («гнездо»). Диаметр внешнего зеркала составлял 58 см, длина фокуса 344 см и полная аффективная площадь 400 см². Приемная система, установленная в фокальной плоскости, содержала координатно-чувствительный пропорциональный счетчик, микроканальные пластины высокого разрешения, кристаллический спектрометр и твердотельный детектор. Чтобы получить спектры с низким разрешением, по команде с Земли на пути пучка за телескопической оптикой устанавливалась пропускающая дифракционная решетка. Хотя обсерватория «Эйнштейн» обследовала лишь около 1 % неба, она дала нам очень информативную и волнующую картину Вселенной в рентгеновских лучах и убедительно показала, что рентгеновская оптика превратила рентгеновскую астрономию в мощное средство исследования не только рентгеновских источников, но и эволюции и активности звезд, которые ранее считались рядовыми. Подробный обзор результатов, полученных этой обсерваторией, дан в работе¹⁰.

Астрофизика высоких энергий ожидает в конце 80-х годов запуска еще более крупной и оснащенной обсерватории, называемой сокращенно АХАЕ. Имея по сравнению с обсерваторией «Эйнштейн» втрое большую эффективную площадь и такой же выигрыш в угловом разрешении, АХАЕ распространит рентгеновские астрономические наблюдения на значительно более слабые в удаленные объекты на значительно большей части неба.

МНОГОСЛОЙНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ЗЕРКАЛА

Новый тип рентгеновских изображающих и фокусирующих устройств, разрабатываемых в настоящее время, может заменить или по крайней мере дополнить оптику скользящего падения в ряде лабораторных и космических приложений. Сейчас уже вполне доступны многослойные покрытия, которые усиливают отражающую способность зеркал в широком диапазоне углов и в то же время обеспечивают спектральную селективность. В простейшем варианте эти покрытия представляют собой чередующиеся тонкие слои двух веществ с различными показателями преломления и вполне аналогичны многослойным зеркалам, используемым в оптическом и инфракрасном диапазонах. Высокая отражающая способность таких зеркал есть результат когерентного сложения слабых отражений от большого числа поверхностей раздела. Коэффициент отражения от одной поверхности, I/I_0 , как отмечено выше, составляет 10^{-4} при $\lambda = 45 \text{ \AA}$, т. е. амплитудный коэффициент отра-

жения $|R|$ равен 10^{-2} , и, следовательно, чтобы достигнуть полного отражения, необходимо порядка сотни поверхностей. Условие конструктивной интерференции и, следовательно, максимума коэффициента отражения определяется хорошо известным соотношением Брэгга:

$$2d \sin \theta = m\lambda.$$

В этом уравнении, которое должно быть еще исправлено с учетом рефракции и поглощения, d — период структуры, m — порядок отражения. Поскольку $2d$ по порядку величины равно λ , то ясно, что для углов скольжения θ , больших нескольких градусов, многослойные рентгеновские зеркала требуют слоев толщиной около 10 \AA , то есть порядка нескольких атомных диаметров. Рассчитать отражающие свойства рентгеновских покрытий можно как методами теории распространения волн в слоистых средах, так и методами теории дифракции рентгеновских лучей в кристаллах, представляя покрытие как искусственный кристалл.

Многослойные рентгеновские зеркала только недавно стали практически осуществимы благодаря развитию техники вакуумного нанесения исключительно тонких однородных слоев на сверхгладкие подложки. Эта техника развивалась в лабораториях Э. Шпиллера из Ватсоновского исследовательского центра ИБМ и Т. Барби из Стэнфордского университета¹¹. Отражающая структура изготавливается из чередующихся слоев тяжелого элемента с большим коэффициентом преломления, такого как вольфрам или молибден, и легкого элемента, такого как углерод. Комбинация материалов с сильно различающимися коэффициентами преломления дает зеркало с высоким отражением в довольно широкой полосе длин волн: отношение длины волны к ширине полосы $\lambda/\Delta\lambda$ изменяется обычно от 10 до 100. Комбинация легких элементов с почти одинаковыми показателями преломления дает, наоборот, узкую полосу: здесь $\lambda/\Delta\lambda$ может достигать 1000. Необходимо тщательно выбирать пары материалов с тем, чтобы получить атомно-гладкие слои и избежать проблем, связанных с химическими реакциями и взаимной диффузией.

Параметры многослойных зеркал были измерены в спектральном диапазоне от $0,5$ до 120 \AA и во многих случаях согласие с теоретическими предсказаниями было превосходным. Наряду с группами, успешно занимающимися созданием зеркал, ряд лабораторий проявляет активность с целью использовать многослойную оптику в непрерывно расширяющейся сфере рентгеновских научных и технологических исследований. Многослойные зеркала могут использоваться как дисперсионные элементы в спектрометрах и монохроматорах, как узкополосные отражающие фильтры, расщепители пучка, поляризаторы, а также для фокусировки излучения, и получения изображений. Например, они могут быть использованы с тем, чтобы увеличить отражение вольтеровской оптики на определенной длине волны или при определенном угле скольжения и тем самым увеличить светосилу телескопа или микроскопа. Технология многослойных зеркал разработана меньше, чем оптических приборов скользящего падения. Поэтому хотя во многих экспериментальных работах продемонстрированы принципиальные возможности многослойных зеркал, однако в настоящее время работающих инструментов создано мало.

Разработка многослойных зеркал, применение которых возможно в рентгеновском спектральном диапазоне с длиной волны короче 100 \AA , вызвала большой интерес и открыла перспективы распространения преимуществ оптической техники нормального падения на диапазон мягкого рентгеновского излучения и далекого ультрафиолета. Патрик Генри из Гавайского университета, работая вместе со Шпиллером и Мартином Вайскопфом из НАСА, использовал систему с одним многослойным зеркалом и добился разрешения в одну угловую секунду на длине волны 68 \AA ¹². Барби и Андервуд получили отчетливые изображения на длине волны 45 \AA , используя многослойное покрытие, нанесенное на изогнутую по сфере кремниевую подложку¹³. Оба

эксперимента имели целью создание телескопа, работающего в диапазоне мягкого рентгеновского излучения по простой (однозеркальной) или комбинированной схеме. Шпиллер и его коллеги из ИБМ, используя составную многослойную оптику, существенно продвинулись на пути к созданию сканирующего рентгеновского микроскопа для работы на длине волны 68 \AA ¹⁴, а Рольф Хэльбих описал аналогичный инструмент, который можно использовать на длине волны около 200 \AA ¹⁵.

ДИФРАКЦИОННАЯ РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА

Френелевские зонные пластинки так же, как зеркала и линзы, могут фокусировать свет и формировать изображения. В зеркалах и линзах это достигается соответствующей корректировкой фазы в различных точках волнового фронта. В отличие от этого в зонной пластинке просто вырезаются участки волнового фронта, в которых фаза более чем на полпериода отличается от фазы в центре пластинки. В своей простейшей форме зонная пластинка представляет собой дифракционную маску, состоящую из чередующихся прозрачных и непрозрачных концентрических зон. Они должны иметь одинаковые площади, коатому радиусы границ между зонами увеличиваются пропорционально корню квадратному из их номера. Разрешающая способность зонной пластинки на данной частоте пропорциональна ширине внешней прозрачной зоны.

Из-за низкой дифракционной эффективности (~10 %) зонные пластинки редко используются в видимом диапазоне. Однако в мягком рентгеновском и далеком ультрафиолетовом диапазонах именно через них, может быть, лежит наиболее прямой путь к теоретическому дифракционному пределу разрешения. Альберт Баэц первым продемонстрировал возможность использования зонных пластинок в указанном диапазоне¹⁶. Работая вместе с компанией «Вакби Миэрз», он разработал зонные пластинки с двадцатимикронной внешней зоной и испытал их на ультрафиолетовом излучении 2537 \AA . Как и предвидел Баэц, в технологии зонных пластинок произошел значительный прогресс. Используя интерференционные методы и электронно-лучевую литографию, несколько групп во много раз превзошли результаты Баэца. Так, группы в Гёттингене, Массачусетском технологическом институте и ИБМ создали зонные пластинки с толщиной внешней зоны порядка 1000 \AA .

На рис. 5, а показано изображение зонной пластинки в сканирующем электронном микроскопе на одном из промежуточных этапов изготовления. Концентрические окружности были нарисованы электронным лучом на резисте, который затем был стравлен. На получившуюся форму гальваническим методом был нанесен слой золота, поглощающий рентгеновское излучение. Затем резист был удален и осталась открытая золотая структура. Хотя золото широко используется в электронной промышленности, для рентгеновской оптики оно не является идеальным материалом. В будущем развитие полупропускающих фазовых зонных пластинок обещает более высокие дифракционные эффективности, что снизит одновременно фон недифрагированного излучения.

Зонные пластинки уже применяются в рентгеновской астрономии, однако наиболее многообещающе их использование в микроскопии¹⁷ и микрофотографии. Малая длина волны рентгеновского излучения теоретически позволяет довести разрешение рентгеновской микроскопии до 100 \AA — значительно лучше, чем в видимой области. Рентгеновское излучение может проникать сквозь сравнительно толстые, влажные биологические ткани. Поэтому опадает необходимость в вакуумных камерах, в высушивании, окрашивании и фиксации живых образцов, в приготовлении тонких срезов, как этого требует электронная микроскопия. Это открывает волнующую перспективу исследования динамических процессов в живой материи. Наконец, селективность поглощения излучения позволит установить распределение химических

элементов внутри объекта. Для биологических применений подходят длины волн 23,3; 31,2 и 43,6 Å, соответствующие К-краям поглощения кислорода, азота и углерода. Таким образом, рентгеновская микроскопия как раз дополняет электронную микроскопию, которая обладает более высоким пространственным разрешением на тонких неживых образцах и ограниченными возможностями пространственного элементного анализа.

Несколько групп объявили о программах разработки микроскопов (в том числе сканирующих) на зонных пластинках. На рис. 5, б показано изображение диатомовой водоросли, полученное в Гёттингенском университете. В качестве источника использовалось синхротронное излучение. Эта группа недавно достигла разрешения ~ 700 Å¹⁸.

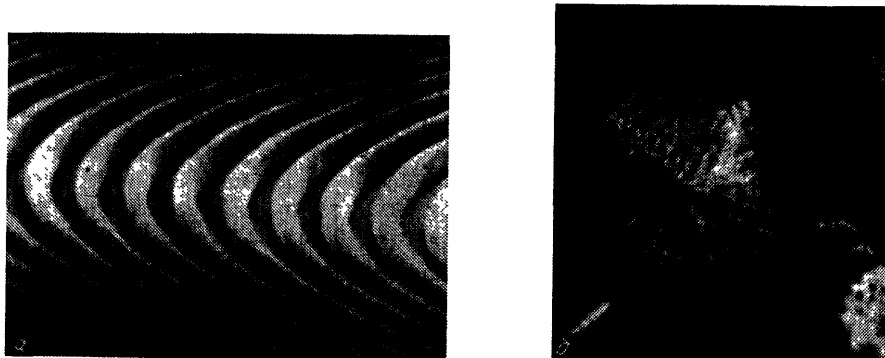


Рис. 5. Зонная пластинка.

a — Изображение рельефа, созданного на резисте методами электронной литографии. Получено в сканирующем электронном микроскопе. После нанесения тонкого слоя золота и растворения подложки остается золотая френелевская зонная пластинка, способная фокусировать рентгеновские лучи. *б* — Ячеистая структура — это диатомовая водоросль диаметром несколько микрон. Изображение получено в пучке синхротронного излучения $\lambda = 44$ Å с помощью микроскопа, использующего зонную пластинку. Поперечный размер минимального разрешаемого элемента 1500 Å. Чувствительность к химическому составу, пространственное разрешение, совместимость с нефиксированными мокрыми биологическими объектами — вот главные преимущества этой новой техники. (Фотография зонной пластинки приводится с разрешения Д. Керна из IBM, а диатомы — с разрешения С. Шмаля, Д. Рудольфа и В. Нимана.)

Зонные пластинки не являются единственной альтернативой отражательной рентгеновской микроскопии. Впечатляющие результаты получены сегодня с помощью так называемой контактной микроскопии. Для этой простой, но эффективной методики вообще не требуются рентгенооптические системы. Исследуемый образец приводится в контакт с чувствительным по отношению к излучению материалом, например рентгеновской пленкой или фоторезистом. После экспонирования и проявления изображение, полученное на пленке, увеличивается в обычном световом микроскопе, а на фоторезисте — в электронном микроскопе. В последнем случае удалось вплотную приблизиться к разрешению 100 Å. Просвечивающая электронная микроскопия в этом случае более предпочтительна, чем сканирующая, так как она дает количественную информацию, которую легче интерпретировать. Несмотря на то, что эта методика очень удобна, по-видимому, она не позволит исследовать динамические процессы. Таким образом, сохраняется важный стимул развития микроскопии на зонных пластинках.

Д и ф р а к ц и о н н ы е р е ш е т к и

Обсуждавшиеся выше методы изготовления френелевских зонных пластинок — электронно-пучковая и оптическая запись, рентгеновская и оптическая литография — были использованы для изготовления и других рентгеновских дифракционных элементов. В 1974 г. Гэри Бьёрклунд и его коллеги из Стэнфордского университета, используя интерференцию пучков коге-

рентгового излучения с длиной волны $\lambda = 1182 \text{ \AA}$ на фоторезисте РММА, получили линейную дифракционную решетку с периодом 836 \AA . Следующий шаг сделали в 1982 г. Эндрю Хэурилюк и его коллеги из Массачусетского технологического института — они сделали пропускающую золотую решетку с периодом 3000 \AA .

Эти новые элементы значительно расширяют возможности спектроскопического эксперимента не столько благодаря их разрешающей способности, сколько благодаря простоте и удобству применения. Они без труда могут быть введены в существующие диагностические и рентгенооптические устройства — пикосекундные электронно-оптические регистраторы, отражающие телескопы и микроскопы. Э. Гаврилюк, Н. Цеглио и другие ученые в Массачусетском технологическом институте, в Ливерморской и Рочестерской лабораториях уже использовали такие гибридные устройства в различных экспериментах, в том числе в исследованиях переноса энергии и тепла при лазерном воздействии на мишени.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ И ГОЛОГРАФИЯ

В 1965 г. Ульрих Бонзе, теперь работающий в Мюнстерском университете, и Майкл Харт из Бристольского университета изобрели рентгеновский интерферометр¹⁵. Их моноблочные кристаллические интерферометры стали ценным и удобным инструментом, используемым в метрологии, а также для

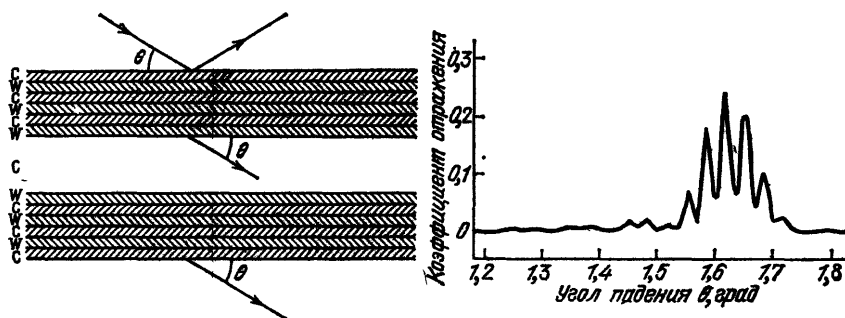


Рис. 6. Рентгеновский эталон Фабри — Перо.

Левый рисунок объясняет принцип его работы. Два многослойных зеркала, наготовленных из пар слоев вольфрама и углерода, разделены прокладкой из углерода. На графике показан расчетный коэффициент отражения излучения $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ для следующих параметров системы: число пар слоев в каждом из зеркал — 15, толщина слоя вольфрама — $8,5 \text{ \AA}$, углерода — $19,1 \text{ \AA}$, толщина прокладки из углерода, разделяющей зеркала, — 961 \AA .

изучения дефектов в кристаллах и фазовой структуры материалов при энергиях фотонов несколько кэВ. Теперь, благодаря развитию технологии многослойных рентгеновских покрытий и микролитографии, представляется вполне реальным распространить интерферометрическую технику на мягкий рентгеновский и далекий ультрафиолетовый диапазоны спектра.

Рентгеновский интерферометр с многослойными отражателями был впервые осуществлен в виде эталона Фабри — Перо²⁰. Как и его оптический аналог, рентгеновский эталон представляет собой два отражателя, разделенные промежутком. В данном случае это две многослойные структуры, разделенные толстым слоем более легкого вещества (рис. 6). Если сканировать эталон по углу при фиксированной длине волны, то брэгговская кривая отражения зеркал окажется промодулирована серией узких темных полос (линии равного наклона). Угловое положение этих полос зависит от толщины прокладки, ее показателя преломления и сдвига фазы, возникающего при отражении от границ раздела.

На рис. 6 показана схема рентгеновского эталона и расчетная кривая для вольфрамоуглеродных зеркал, разделенных слоем углерода толщиной 1000 \AA . Согласно с экспериментом, как правило, необыкновенно хорошее, хотя пиковая интенсивность и контраст колец оказываются несколько меньше из-за шероховатостей поверхности и расходимости рентгеновского пучка. Одно из применений такого интерферометра — измерение толщины пленок с высокой точностью, но, возможно, наиболее полезными станут измерения кривых аномальной дисперсии показателя преломления в рентгеновской области.

Значительный интерес проявляется к использованию рентгеновских элементов для осуществления рентгеновской голографии. С. Кикута, С. Аоки и их коллеги в Японии в начале 70-х годов получили высококачественные рентгеновские голограммы с использованием в ряде случаев оптического восстановления. В область их исследований входили самые разные

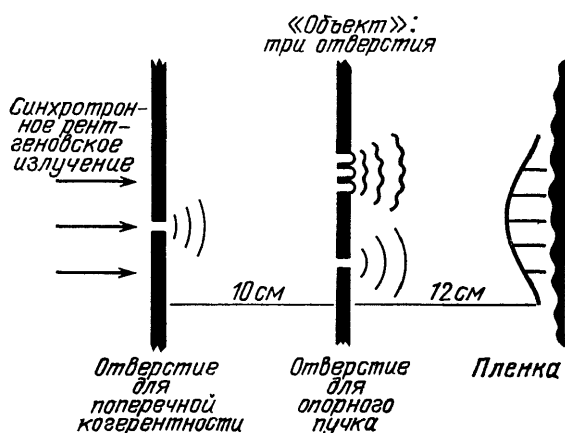


Рис. 7. Рентгеновская голография.

Показан принцип эксперимента японской группы. «Объект» представляет собой три трехмикронных отверстия, разделенных девятимикронными промежутками. Опорный пучок образуется путем дифракции на другом отверстии, удаленном от объекта на 30 мкм и имеющем диаметр $2,5 \text{ мкм}$. Геометрия эксперимента подобрана таким образом, чтобы визуализацию изображения можно было осуществлять излучением гелий-неонового лазера. Эта группа использовала различные источники рентгеновского излучения и схемы записи для того, чтобы можно было исследовать такие объекты, как красные кровяные тельца и искусственные волокна

объекты — от простых решеток с микронным шагом до искусственных волокон и красных кровяных телец. Рис. 7 иллюстрирует технику внеосевой безлинзовой рентгеновской голографии. Чтобы обеспечивать продольную когерентность, вырезали монохроматором узкую линию из спектра синхронного излучения, а чтобы обеспечить поперечную когерентность — пропускали пучок через отверстие, как показано на рис. 7. Они сумели записать голограммы излучением с длиной волны 60 \AA , а визуализовать их — излучением гелий-неонового лазера, $\lambda = 6328 \text{ \AA}$. Малькольм Хауэллс ведет сейчас подобные эксперименты на Брукхейвском национальном синхротроне. Применение этой техники к важным проблемам биодинамики требует координированного развития ряда программ, которые вполне находятся в рамках современных возможностей научных центров.

Получение внеосевых микроголограмм требует значительной мощности квазикогерентного излучения лучших синхротронных источников. Кроме того, для выделения узких линий из спектра ондуляторов нужны будут многослойные зеркала, так же как и более сложные дифракционные микроструктуры — френелевские линзы совместно с соответствующими пропускающими решетками — для получения опорного пучка. Чтобы разрешить сложные трехмерные структуры, необходима быстродействующая рентгеновская оптика и, кроме того, особое внимание должно быть уделено обеспечению надежности процесса записи изображений.

Судя по всему, происходящее сейчас быстрое совершенствование рентгеновской оптики высокого разрешения будет продолжаться. А с развитием новых источников мягкого рентгеновского и далекого ультрафиолетового излучения мы можем ожидать и новых интересных ее приложений во многих областях науки и техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henke B. L., Lee P., Tanaka T. J., Shimabukuro R. L., Fujikawa B. K. // *At. Data and Nucl. Data Tables*. 1982. V. 27. P. 1.
2. Kirkpatrick P., Baez A. V. // *J. Opt. Soc. Am.* 1948. V. 38. P. 766.
3. Jentsch F. // *Phys. Zs.* 1929. Bd 30. S. 268.
4. Wolter H. // *Ann. d. Phys.* 1952. Bd 10. S. 94, 286.
5. Seward F. D., Dent J., Boyle M., Koppel L., Harper T., Stoe-ring P., Toor A. // *Rev. Sci. Inst.* 1976. V. 47. P. 464.
6. a) Price R. H. // *Low-energy X-ray Diagnostics — 1981/Eds D. T. Attwood, B. L. Henke.* — AIP Conf. Proc. — New York: American Institute of Physics, 1981. — P. 189.
- 6) Silk J. K. // *Proc. SPIE.* 1979. V. 184. P. 40.
7. Attwood D. T. // *J. Quantum Electron.* 1978. V. QE-14. P. 909.
8. Giacconi R., Rossi B. // *J. Geophys. Res.* 1980. V. 65. P. 773.
9. Vaiana G. S., van Speybroeck L., Zombeck M. V., Krieger A. S., Silk J. K., Timothy A. F. // *Space Sci. Instr.* 1977. V. 3. P. 19. Underwood J. H., Milligan J. E., deLoach A. C., Hoover R. B. // *Appl. Opt.* 1977. V. 16. P. 858.
10. *X-ray Astronomy with the Einstein Satellite/Ed. R. Giacconi: Proceedings of the High Energy Astrophysics Division of the AAS meeting, 28—30 January 1980.* — Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1980.
11. Spiller E. // 6a. — P. 124.
Barbee T. W. // *Ibidem.* — P. 131.
12. Henry J. P., Spiller E., Weisskopf M. // *Proc. SPIE.* 1981. V. 316. P. 166; *Appl. Phys. Lett.* 1982. V. 40. P. 25.
13. Underwood J. H., Barbee T. W. // *Nature.* 1981. V. 294. P. 429.
14. Lovas I., Santy W., Spiller E., Tibbetts R., Wilczynsky J. // *Proc. SPIE.* 1980. V. 316. P. 90.
Spiller E. // *Scanned Image Microscopy/Ed. Ash.* — New York: Academic Press, 1980. — P. 365.
15. Haelbich R. P. // *Ibidem.* — P. 413.
16. Baez A. V. // *J. Opt. Soc. Amer.* 1952. V. 42. P. 756; 1961. V. 51. P. 405.
17. Kirz J., Sayre D. // *Synchrotron Radiation Research/Eds H. Winick, S. Doniach.* — New York: Plenum Press, 1980. — P. 277.
18. *Science.* 8 January 1983.
19. Bonse U., Hart M. // *Appl. Phys. Lett.* 1965. V. 6. P. 155.
20. Barbee T. W., Underwood J. H. // *Opt. Commun.* 1983. V. 48. P. 161.
21. Kikuta S., Aoki S., Kosaki S., Kohra K. // *Ibidem.* 1972. V. 5. P. 86.
Aoki S., Ichihara Y., Kikuta S. // *Japan J. Appl. Phys.* 1972. V. 11. P. 1957.
- Aoki S., Kikuta S. // *Ibidem.* 1974. V. 13. P. 1385.
22. Schmahl G., Rudolph D., Niemann B. // *Proc. SPIE.* 1981. V. 361. P. 100.
Rudolph D., Niemann B., Schmahl G. // *Ibidem.* P. 103.