

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

621.384.612(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР****(29—30 ноября 1978 г.)**

29 и 30 ноября 1978 г. в Физическом институте имени П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. Д. Ф. Алферов, Ю. А. Башмаков, К. А. Беловинцев, Е. Г. Бессонов, П. А. Черенков. Источники ондуляторного излучения (теория, эксперимент, применения).

2. Ю. М. Александров, А. Д. Кривоспицкий, М. Н. Якименко. Рентгенолиитография в пучках синхротронного излучения.

3. Ю. М. Каган. Когерентное возбуждение изомерных состояний ядер в кристалле синхротронным излучением.

4. А. Н. Артемьев, В. А. Кабанник, Ю. Н. Казаков, Г. Н. Кулипанов, Е. А. Мелешко, В. В. Скляревский, А. Н. Скринский, Е. П. Степанов, В. Б. Хлестов, А. И. Чечин. Эксперимент по возбуждению мёссбауэровского уровня ^{57}Fe с помощью синхротронного излучения.

5. М. А. Мокульский. Применение синхротронного излучения для рентгеновских дифракционных исследований биополимеров.

6. А. А. Вазина. Исследования динамики структурных превращений в биомолекулярных системах методами скоростной дифрактометрии с использованием синхротронного излучения.

7. В. В. Михайлин. Синхротронное излучение в спектроскопии твердого тела.

8. С. П. Капица. Источники синхротронного излучения в настоящем и будущем.

Ниже публикуется краткое содержание пяти докладов.

539.121.75(048)

Д. Ф. Алферов, Ю. А. Башмаков, К. А. Беловинцев, Е. Г. Бессонов, П. А. Черенков. Источники ондуляторного излучения (теория, эксперимент, применения). В последнее время, в связи с широким внедрением в практику научных исследований источников синхротронного излучения (СИ) и развитием работ по улучшению его характеристик, значительно возрос интерес к излучению ультрарелятивистских электронов в ондуляторах. Ондуляторное излучение (ОИ) выгодно отличается от СИ более высокой направленностью, спектральной интенсивностью и степенью поляризации, видом которой можно оперативно управлять.

Идея ондулятора была высказана В. Л. Гинзбургом в 1947 г.¹ Дальнейшее развитие и практическую реализацию эта идея получила в работах Моца и других авторов².

Ультрарелятивистская заряженная частица, двигаясь вдоль оси ондулятора, совершает периодические колебания относительно некоторого равномерно движущегося центра. Такое движение может быть реализовано в статических магнитных полях, в поле электромагнитной волны, в кристалле и т. п. Движение заряженных частиц в ондуляторе сопровождается электромагнитным излучением на частотах, определяемых эффектом Доплера:

$$\omega_k = \frac{k\Omega}{1 - \beta_{\parallel} \cos \theta} \approx \frac{2\Omega\gamma^2 k}{1 + (\beta_{\perp} \gamma)^2 + (\theta\gamma)^2} \quad (\theta \ll 1, \gamma \gg 1), \quad (1)$$

© Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», «Успехи физических наук», 1979.

здесь $\gamma = \epsilon/mc^2$, ϵ — энергия, m — масса покоя частицы, $\Omega = 2\pi\beta_{||}c/\lambda_0$ — частота, λ_0 — период колебаний частицы, θ — угол относительно направления продольной составляющей скорости частицы $\beta_{||}c$, под которым распространяется излучение, k — номер гармоники излучения.

Отличительной особенностью ОИ является однозначная зависимость частоты излучения на данной гармонике от направления наблюдения (1) — пространственная монохроматичность ОИ. Относительная ширина спектральной полосы излучения на частоте ω_k определяется длиной ондулятора $L = K\lambda_0$ и равна $\Delta\omega/\omega_k \approx 1/kK$.

Интенсивность излучения пучка частиц, распределенных случайным образом, пропорциональна числу частиц N (спонтанное некогерентное ОИ). Пучок частиц, сформированный в серию сгустков, характерный размер которых порядка длины излучаемой волны, будет испускать когерентное ОИ с интенсивностью, пропорциональной N^2 . При определенных условиях возможно эффективное усиление электромагнитной волны пучком заряженных частиц в ондуляторе (индуцированное ОИ).

Теория спонтанного некогерентного, когерентного и индуцированного ОИ изложена в работах ¹⁻¹¹ и в приведенной в них литературе.

Характеристики излучения существенно зависят от соотношения между максимальным углом β_{\perp} поворота вектора скорости частиц в ондуляторе и углом $1/\gamma$.

1. Если $\beta_{\perp}\gamma \ll 1$ (дипольное приближение), то основная часть энергии излучения сосредоточена вблизи оси ондулятора в диапазоне углов $\sim 1/\gamma$. При гармоническом движении частицы испускается только первая гармоника, спектр излучения которой резко спадает на частотах $\omega \gg 2\Omega\gamma^2$ ^{10,11}.

2. В случае $\beta_{\perp}\gamma \approx 1$ растет амплитуда колебаний и уменьшается продольная скорость частицы, что приводит к уменьшению частоты излучения в заданном направлении. С ростом поля увеличивается доля излучения на высших гармониках. Важной характеристикой ондулятора является наличие оптимального значения поля, при котором интенсивность излучения на первой гармонике вдоль оси ондулятора максимальна ³. При полях, близких к оптимальному и меньших, основная часть энергии излучения приходится на первую гармонику. Полуширина спектра ОИ в этом случае много меньше полуширины спектра СИ.

3. В предельном случае больших полей в ондуляторе ($\beta_{\perp}\gamma \gg 1$) увеличивается полная интенсивность и жесткость излучения. Спектр ОИ приближается по форме к спектру СИ, однако спектрально-угловые и поляризационные характеристики отличаются от соответствующих характеристик СИ ^{3, 4}. Так, интервал между соседними гармониками ОИ в заданном направлении значительно больше, чем в спектре СИ.

Поляризационные характеристики ондуляторного излучения зависят от вида траектории частиц в ондуляторе ^{3, 4}. При движении частицы по синусоидальной траектории, излучение в направлении вдоль оси ондулятора состоит из набора нечетных гармоник и независимо от величины поля в ондуляторе полностью линейно поляризовано на заданной частоте. В случае движения по винтовой линии вдоль оси ондулятора излучается только первая гармоника, поляризованная по кругу. В спиральном ондуляторе с оптимальным полем излучение характеризуется высокой степенью циркулярной поляризации в диапазоне углов $\theta \sim 1/2\gamma^4$.

Получение интенсивного ОИ возможно при установке ондуляторов в прямолинейные промежутки синхротронов и накопителей. Недавно ^{12, 13} на синхротроне ФИАН «Пахра», а затем и на синхротроне ТПИ «Сириус» ¹⁴ были выполнены первые эксперименты по исследованию ОИ с орбиты циклического ускорителя. Ондулятор, установленный в прямолинейном промежутке синхротрона «Пахра», имеет 20 элементов периодичности. Длина каждого элемента $\lambda_0 = 4$ см. В условиях эксперимента поперечное магнитное поле ондулятора изменялось вдоль оси пучка по синусоидальному закону с амплитудой $H_m \sim 360$ э ($\beta_{\perp}\gamma \sim 0,13$).

ОИ практических моноэнергетических электронов регистрировалось в диапазоне длин волн 2000—5500 Å с помощью фотопластинок.

В проведенных опытах была подтверждена возможность порогового измерения энергии заряженных частиц, отмеченная в работе ¹⁰.

Исследование особенностей углового распределения интенсивности излучения, проведенное с помощью оптических фильтров, подтвердило свойство пространственной монохроматичности ОИ. На рис. 1 представлены фотографии излучения электронов с различной энергией на длине волны $\lambda = 3850$ Å, $\Delta\lambda/\lambda = 4,4\%$. С увеличением энергии электронов растет угол, под которым распространяется излучение на данной длине волны. При углах $\theta \sim 1/\gamma$ ($E \sim 163$ Мэв) заметно уменьшается интенсивность излучения в плоскости колебаний частиц. Ширина углового распределения излучения существенно уменьшается с увеличением угла наблюдения.

Зависимость частоты излучения от направления наблюдения при фиксированной энергии электронов особенно наглядно проявляется на цветных фотографиях, полученных в данном эксперименте.

Распределения излучения, поляризованного в плоскости колебаний электронов (σ -компонента) и в перпендикулярной плоскости (π -компонента) представлены на рис. 2. Азимутальные зависимости распределения этих компонент существенно отличаются и согласуются с теоретическими представлениями.

Проведенные измерения спектра излучения также показали хорошее согласие экспериментальных данных с теорией¹³.

Заметим, что в данных экспериментах плотность потока ОИ в несколько раз превышала соответствующую плотность потока СИ.

Благодаря своим уникальным свойствам, ОИ может найти широкое применение в физических исследованиях⁴. Например, представляется перспективным использование ондуляторов для получения интенсивных потоков поляризованных монохроматических фотонов высоких энергий на установках со встречными пучками и на электронных пучках сверхвысоких энергий крупнейших протонных синхротронов. Особенности

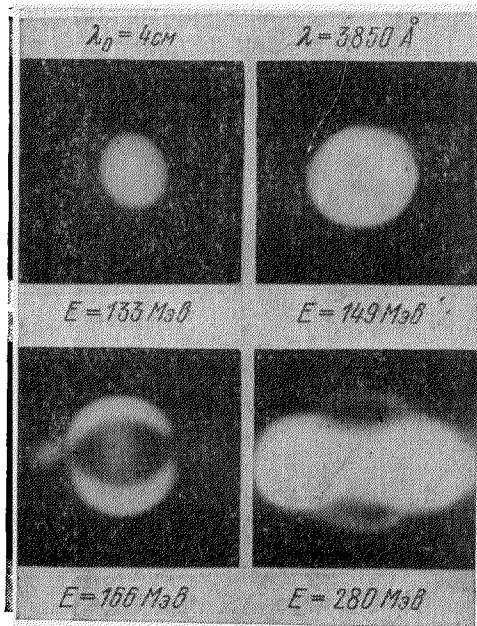


Рис. 1.

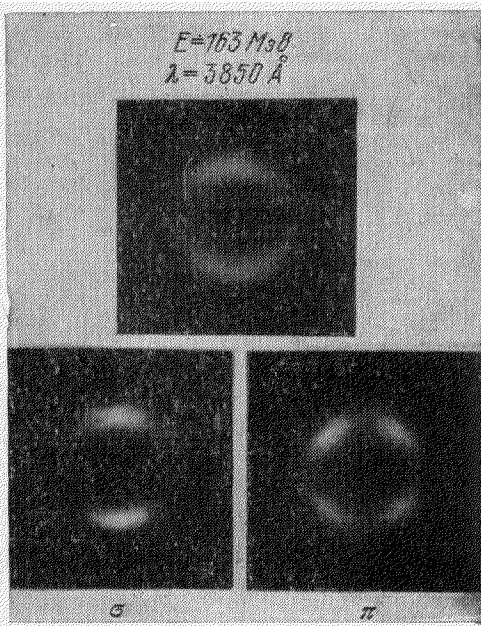


Рис. 2.

ОИ открывают принципиально новые возможности для использования оптических систем регистрации параметров пучков протонов, антипротонов и других частиц. Большой интерес представляет создание источников индуцированного ОИ, которые позволят получить интенсивное когерентное электромагнитное излучение в широкой области спектра вплоть до $\lambda \sim 1000 \text{ Å}$, частотой которого можно оперативно управлять. Возможна также генерация когерентного ОИ и в более жесткой области спектра⁵.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзбург В. Л. — Изв. АН СССР. Сер. физ., 1947, т. 11, с. 165.
2. Моц Х. — В кн. Миллиметровые и субмиллиметровые волны. — М.: ИЛ, 1959. — С. 194.
3. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. — Тр. ФИАН СССР, 1975, т. 80, с. 100.
4. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Беловинцев К. А., Бессонов Е. Г., Черенков П. А. Препринт ФИАН СССР № 139. — М.: 1977 (анг.); Препринт ФИАН СССР № 13. — Москва: 1978 (русс.).
5. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. — ЖТФ, 1978, т. 48, с. 1592, 1598.
6. Elias L. R., Fairbank W. M., Madey J. M. J., Schwettman H. A., Smith T. I. — Phys. Rev. Lett., 1976, v. 36, p. 717.
7. Baier V. N., Milstein A. I. — Phys. Lett. Ser. A, 1978, v. 65, p. 319.

8. Коломенский А. А., Лебедев А. Н.— Квант. электрон., 1978, т. 5, с. 1543.
9. Алферов Д. Ф., Бессонов Е. Г., Препринт ФИАН № 162.— Москва: 1977; ЖТФ, 1979, т. 49, № 4.
10. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г.— ЖТФ, 1972, т. 42, с. 1921.
11. Байер В. Н., Катков В. М., Страховенко В. М.— ЖТФ, 1972, т. 63, с. 2121.
12. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Беловинцев К. А., Бессонов Е. Г., Черенков П. А.— Письма ЖЭТФ, 1977, т. 26, с. 525.
13. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Беловинцев К. А., Бессонов Е. Г., Лившиц А. М., Михайлин В. В., Черенков П. А.— Письма ЖТФ, 1978, т. 4, с. 625.
14. Диденко А. Н., Кожевников А. В., Медведев А. Ф., Никитин М. М. Ibid., с. 689.

539.122.2 (048)

Ю. М. Александров, А. Д. Кривоспицкий, М. Н. Якименко. Рентгенолитография в пучках синхротронного излучения. Микроэлектроника наших дней широко использует структуры с размерами элементов $\sim 1,5-2,0$ мкм. Такие структуры получают методом фотолитографии; при этом в качестве источников света используются ртутные кварцевые лампы. Дальнейшая микроминиатюризация, т. е. переход к субмикронным размерам элементов, позволит



Рис. 1.

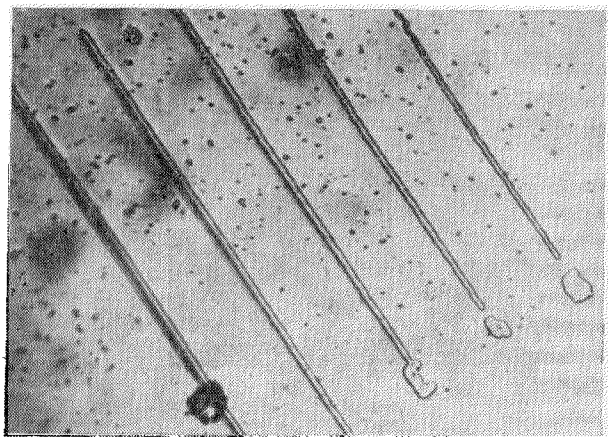


Рис. 2.

не только повысить степень интеграции микросхем до уровня 10^5-10^6 элементов на кристалл, но и создать ряд принципиально новых приборов. Однако на длинах волн видимого света дифракционные искажения не позволяют получать линии шириной менее 1 мкм.

В связи с этим большой интерес представляет использование более жесткого электромагнитного излучения — метод рентгенолитографии. По ряду технологических и физических причин наиболее перспективным является излучение с длинами волн $10-50$ Å.

Источниками такого излучения могут быть рентгеновские трубки большой мощности и синхротронное излучение (СИ) циклических ускорителей и накопителей электронов. Можно показать, что СИ предпочтительнее, так как при этом лучше воспроизводится рисунок структур и существенно меньше в 100—1000 раз экспозиция облучения.

В Физическом институте им. П. Н. Лебедева АН СССР на базе синхротрона С-60 совместно с научно-исследовательским институтом физических проблем создан специализированный канал СИ для отработки технологии получения пропечаток субмикронных структур. Канал оборудован камерой для экспозиции образцов и аппаратурой оптической диагностики электронного пучка. Система автоматического сканирования образца под пучком СИ позволяет получать пропечатки субмикронных структур

больших размеров ($100 \times 100 \text{ мкм}^2$). На рис. 1 приведена фотография рисунка топологии структуры, полученного с помощью СИ в пленке РММА толщиной $0,4 \text{ мкм}$. Время экспонирования при толщине кремниевой мембраны шаблона 2 мкм составляло 30 сек , размер элементов схемы $\approx 1,2 \text{ мкм}$. На рис. 2 приведена фотография изображения эталонных линий, полученного в пленке рентгенорезиста; минимальная ширина линий $0,3 \text{ мкм}$. Видно высокое качество полученных отпечатков, которое достигается благодаря высокой естественной коллимации синхротронного излучения.

ЛИТЕРАТУРА

Александров Ю. М. и др. Препринт ФИАН СССР № 237.— Москва, 1978.
 Spiller E. et al. Preprint DESY SR 76/11.
 Fedev R. et al. Preprint DESY SR 77/06.

539,121,75 : 621.384.012 (048)

А. Н. Артёмьев, В. А. Кабанник, Ю. Н. Казаков, Г. Н. Кулипанов, Е. А. Мелешко, В. В. Скляревский, А. Н. Скринский, Е. П. Степанов, В. Б. Хлестов, А. И. Чечин. Эксперимент по возбуждению мёссбауэровского уровня ^{57}Fe с помощью синхротронного излучения. Возможности использования синхротронного излучения (СИ) для мёссбауэровских исследований и ядерной спектроскопии обсуждались рядом авторов^{1,2}. Наш эксперимент является попыткой возбуждения с помощью СИ коллективного ядерного состояния в монокристалле в условиях брэгговской дифракции и исследования его временных характеристик. Работа ведется объединенной группой ИЯФ СОАН и ИАЭ им. И. В. Курчатова.

При постановке опыта необходимо решить следующие основные задачи:

1) Выделение узкой линии с нужной энергией из сплошного спектра СИ;
 2) обеспечение долговременной стабильности полосы пропускания монохроматора в условиях, когда на его первый кристалл падает пучок СИ большой мощности (до 2 вт/мм^2);

3) подавление фонового рассеяния на электронах в образце, что необходимо, так как полоса пропускания даже лучших монохроматоров на много порядков превышает ширину возбуждаемого уровня ($\Delta E/E = 3 \cdot 10^{-13}$).

Мы использовали монокристалл гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, обогащенный изотопом ^{57}Fe . Этот выбор диктовался следующими обстоятельствами:

— соответствием параметров возбуждаемого уровня параметрам пучка СИ (энергия, время жизни, частота следования импульсов СИ);
 — хорошей изученностью стационарной дифракции γ -лучей на монокристаллах гематита^{3,4} и наличием у гематита чисто ядерных отражений;
 — наличием изотопно-обогащенных кристаллов гематита достаточно высокого качества и нужных размеров*).

В эксперименте выходящий из накопителя электронов пучок СИ падает на двухкристалльный монохроматор, отклоняется им на угол $\sim 30^\circ$ вниз от плоскости ускорителя и затем отражается от рабочего кристалла гематита. Ось вращения гематита лежит в вертикальной плоскости и перпендикулярна к пучку СИ.

Монохроматор представляет собой два совершенных монокристалла германия, смонтированных на общем основании в положении высокой дисперсии. Такой монохроматор обладает узкой полосой пропускания, энергия которой зависит только от угла между кристаллами. Он настраивается с помощью γ -излучения с энергией $14,4 \text{ кэВ}$ от радиоактивного источника ^{57}Co . Последующая юстировка на пучке СИ сводится к вращению его как целого и поиску положения, в котором интенсивность проходящего пучка максимальна.

Кристалл гематита устанавливается в положение, соответствующее чисто ядерному отражению (777). Из предыдущих измерений⁴ следует, что в этом отражении рассеяние на электронах подавлено по отношению к разрешенным отражениям не менее чем в 10^5 раз. Дополнительное подавление нерезонансного фона достигается за счет поляризации пучка СИ, близости угла рассеяния к 90° ($\theta_B \approx 41^\circ$) и соответствующей ориентации плоскости рассеяния.

*) Обогащенные кристаллы гематита были выращены И. Новаком в Физическом институте ЧСАН (Прага).

Выбранные отражения ((111) в монохроматоре и (777) на гематите) позволяют также погасить гармоники с энергиями $2E_0$ и $3E_0$. Излучение с энергией $4E_0 \approx 57,5$ кэв попадает на детектор, но его интенсивность мала и не мешает измерениям. Более того, это излучение может быть использовано для установки гематита в положение брэгговского отражения.

Гамма-лучи, отраженные от гематита, регистрируются сцинтилляционным детектором (ФЭУ-85 с кристаллом NaI (Tl) толщиной 0,1 мм). Для обнаружения эффекта на пути пучка ставится резонансный поглотитель из обогащенного поликристаллического гематита, соединенный с вибратором.

Согласно оценкам в пучке СИ содержится 10^3 фот/мрад·сек (при токе 100 мА и $E_0 = 2,2$ Гэв) и в предлагаемой схеме можно ожидать величину эффекта $\approx 7\%$ при скорости счета ≈ 10 имп/сек.

Электронная часть установки позволяет анализировать временное распределение излучения с энергией 14,4 кэв. Время жизни состояния с этой энергией для изолированного ядра ^{57}Fe составляет ≈ 100 нсек, однако коллективное ядерное возбуждение в кристалле должно жить значительно меньше, причем его распад не подчиняется простому экспоненциальному закону⁵. Приближенная оценка дает для среднего времени жизни 15—20 нсек, что согласуется с наблюдаемым уширением резонансных линий в спектрах чисто ядерного отражения⁴.

Измерения проводились на пучке СИ электронно-позитронного накопителя ВЭПП-3 ИЯФ СОАН (г. Новосибирск) во второй половине 1977 г. К сожалению, в это время накопитель мог работать только в пониженных режимах (энергия до 2 Гэв, ток до 30 мА). Наблюдать эффект в этих условиях было невозможно и нам пришлось ограничиться измерениями уровней фона и его временного распределения. Эксперимент показал удовлетворительное согласие между расчетными и измеренными значениями интенсивностей. Полуширина фонового пика мгновенных совпадений равнялась 9 нсек, уровень фона между импульсами СИ составил $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ от высоты этого пика. Принятая конструкция крепления первого кристалла монохроматора (тонкий кристалл германия на толстой медной подложке — радиаторе) обеспечила удовлетворительное постоянство параметров монохроматора во всем диапазоне интенсивностей СИ. Более подробное описание эксперимента содержится в препринте⁶.

Мы считаем, что выбранная нами схема опыта обладает значительными преимуществами перед предложениями других групп^{7, 8}, в основном за счет использования чисто ядерного отражения от монокристалла.

Работы будут продолжены в конце этого или начале следующего года после завершения реконструкции накопителя ВЭПП-3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. — УФН, 1977, т. 122, с. 369.
2. Synchrotron Radiation Research: SSRP Rept. 76—100.— Stanford: 1976.
3. Артемьев А. Н. и др. — ЖЭТФ, 1973, т. 64, с. 261.
4. Степанов Е. П. и др. — ЖЭТФ, 1974, т. 66, с. 1150.
5. Kagan Yu., Afanasev A. M., Kohn V. G. Препринт ИАЭ им. И. В. Курчатова IAE-2991.— Москва: 1978.
6. Артемьев А. Н. и др. Препринт ИЯФ СОАН СССР 77-106.— Новосибирск: 1978.
7. Cohen R. L., Miller G. L., West K. W. Nuclear Resonance Excited by Synchrotron Radiation: SSRP Rept. No. 77/09.— Stanford: 1977 P. VI-43.
8. Ruby S. L., Flinn P. A., Brown G. S., Monochromatic X Ray Beam Project: SSRP Rept. No. 77/09.— Stanford: 1977.— P. VI-112.

539,121.75 : 621.584.012 (048)

А. А. Вазина. Исследования динамики структурных превращений в биомолекулярных системах методом скоростной дифрактометрии с использованием синхротронного излучения. Работа по применению СИ к исследованию структуры биополимеров у нас в стране начата по инициативе Г. М. Франка в 1971 г. Институтом биологической физики на базе синхротрона «АРУС». Ереванского физического института. В 1973 г. эти работы систематически проводятся на накопителе ВЭПП-3 совместно с Институтом ядерной физики СОАН СССР.

На основе использования СИ ВЭПП-3, фокусирующей системы коллимации и высокочувствительных детекторов создан метод скоростной малоугловой рентгеновской дифрактометрии. Малоугловая дифрактометрия позволяет получать информацию

о больших периодах структуры, что особенно важно при изучении биологических объектов, таких как мембраны, двигательные аппараты простейших, мышцы. Время

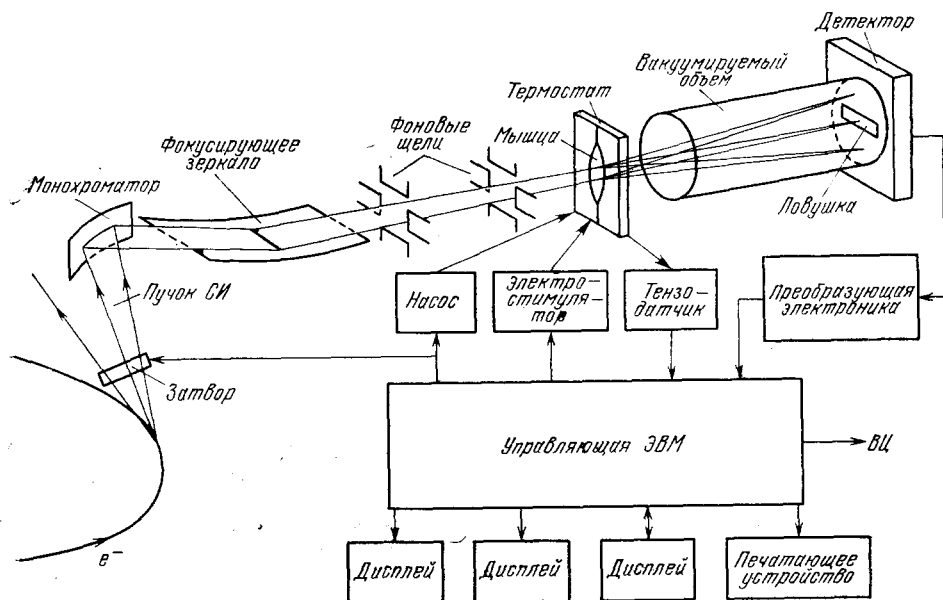


Рис. 1. Блок-схема метода дифракционного кино.

экспозиции, обычно измеряемое часами, было уменьшено до десятых и сотых долей секунды¹⁻³.

Малые времена экспозиции позволили поставить задачу исследования динамики структуры в процессе реализации биологической функции, например, мышечного сокращения, длящегося десятые доли секунды. Совместно с ИЯФ нами была создана методика дифракционного кино, позволяющая с высоким временным разрешением — порядка нескольких миллисекунд — исследовать изменение структуры мышцы в процессе одиночного сокращения⁴. Методика позволяла

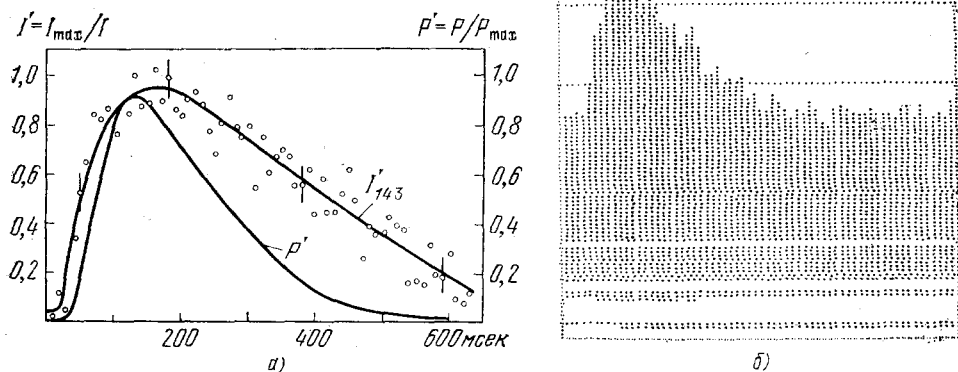


Рис. 2. а) Изменение интенсивности меридионального рефлекса 143 \AA в процессе развития одиночного сокращения (фильм № 17, меридиан, 10.07.1977 г., длительность кадров 0—63 10 мсек, изометрический режим, мышца frog sartorius); б) гистограмма отношения интенсивностей экваториальных рефлексов 10 и 11.

регистировать 64 дифракционные картины — кадра — с интервалом 1—100 мсек; эксперимент управлялся ЭВМ; блок-схема представлена на рис. 1.

Проведено исследование одиночного сокращения портняжной мышцы лягушки в изометрическом режиме. Для получения хорошей статистики дифракционных картин суммировалось от 30 до 100 циклов одиночного сокращения. В эксперименте следили за изменением меридиональных дифракционных линий, обусловленных структурой толстых миозиновых нитей (наиболее характерный рефлекс 143 \AA) и экваториальных линий, обусловленных гексагональной упаковкой толстых и тонких нитей (рефлексы плоскостей 10 и 11). На рис. 2 представлен временной ход интегральных интенсивностей — меридионального рефлекса 143 \AA (а), гистограмма отношения интенсивностей экваториальных рефлексов 10 и 11 (б). Как видно из рис. 2, характер структурных кривых напоминает кривую сокращения — P : наличие латентного периода, линейная фаза нарастания, максимум и медленный спад. Фронты кривых незначительно сдвинуты — структурная кривая опережает кривую сокращения; хвосты расходятся более значительно. Приведенные кривые являются яркой демонстрацией связи структуры и функции и являются экспериментальным доказательством, что именно наблюдаемое структурное изменение ответственно за развитие мышечного сокращения. Представленная работа является пионерской: в Стэнфорде начаты работы по исследованию динамики структуры нерва в процессе прохождения потенциала действия; методика позволяет регистрировать 2 кадра, соответствующих состоянию покоя и возбуждения⁵.

ЛИТЕРАТУРА

1. В а з и н а А. А. и др. — Биофизика, 1975, т. 20, с. 801.
2. В а з и н а А. А. — В кн. Молекулярная биология. — М.: ВИНТИ, 1976. т. 8, ч. 2, с. 242. — (Итоги науки).
3. Г и м а н о в В. П. и др. — Биофизика, 1978, т. 23, с. 393.
4. В а з и н а А. А. — Вестн. АН СССР, 1978, № 8, с. 15.
5. W e b b N. — SSRP, 1976, No. 7, p. 21.

539.121.75 : 621.384.012 (048)

С. П. Капица. Источники синхротронного излучения в настоящем и будущем. Синхротронное излучение (СИ) возникает в электронных синхротронах и накопительных кольцах и практически простирается от далекой инфракрасной области, через весь видимый диапазон, вакуумный ультрафиолет к жестким рентгеновским лучам. Исключительные свойства СИ привлекли внимание экспериментаторов из самых различных областей науки, а затем техники и медицины. В последние годы число работ по тематике СИ ежегодно удваивается. Требования к будущим специализированным машинам — источникам СИ и тенденции приборного оснащения этой области физического эксперимента выработаны interdisciplinaryными комплексными комиссиями по СИ в Советском Союзе, США и Западной Европе.

СИ некогерентно, представляя случайную сумму излучений от независимого рассеяния электронов на квантах электромагнитного поля. Представляет интерес получение вынужденного СИ в области субмиллиметровых и инфракрасных лучей или даже видимого света, несмотря на существование лазеров.

Хорошо установленная природа СИ позволяет рассматривать пучок электронов, излучающих в магнитном поле, как эффективный стандарт светимости, напоминая черное тело с $T \sim 10^6 - 10^7$.

Важным практическим применением СИ становится создание элементов микроэлектроники методом микролитографии. Проблема создания изображения с СИ стимулирует разработку элементов оптики, основанных на зеркалах скользящего падения и применении зонных пластинок. Создано новое поколение кристаллических монохроматоров, где достигнута степень монохроматизации до 10 мэв при 10 кэв (10^{-6}). После монохроматизации интенсивность СИ даже на существующих машинах в $100 - 1000$ раз превышает эффективную спектральную интенсивность самых мощных рентгеновских трубок. Продемонстрированы новые возможности в изучении биополимеров, а благодаря аномальному поглощению можно определить фазы рассеяния и тем придать интерпретации сложных структур более однозначный характер. Отметим рентгеноструктурные исследования при высоких давлениях методом рассеяния сплошного спектра на постоянный угол с энергетическим анализом рассеянного СИ.

В физике твердого тела наряду с традиционными оптическими измерениями, ведущими к детальному познанию зонной структуры и изучению экситонов, большое значение приобретают исследования поверхности. Плодотворно изучение фотоэмиссии от атомов, молекул и твердых тел. Путем неупругого рассеяния СИ возможно изучение спектра элементарных возбуждений в твердом теле — фононов и магнонов.

Неупругое рассеяние рентгеновских лучей и изучение тонкой структуры краев поглощения привело к быстрому развитию метода EXAFS. Этим методом получают

сведения о ближайшем окружении какого-либо атома в химическом соединении, решетке, аморфном теле или растворе. Могущим средством элементного анализа становится рентгеноспектальный метод на основе СИ. Итенсиивность и поляризация СИ в области инфракрасного диапазона спектра в сочетании с методами фурье-спектроскопии открывают интересные возможности. В отличие от атомной физики и физики твердого тела, пока мало предложений об использовании СИ в ядерной физике.

В настоящее время предвидится создание по крайней мере двух типов накопителей электронов. Малая машина на энергию 600—1000 Мэв при диаметре 5—6 м и $\lambda_c \approx 40 \text{ \AA}$ обладает небольшой мощностью СИ до 1 кет при токе пучка до 0,5—1 А на длины волн до 5 А. Вторым типом машин представляется крупный накопитель для работы до 0,5—0,2 А в рентгеновской области спектра на энергию 2—2,5 Гэв, током до 1 а диаметром $\sim 30\text{--}50 \text{ м}$, где мощность СИ будет измеряться сотнями кет. Следующим поколением или установкой, большей по своему масштабу, рассматриваются источники СИ с энергией 3—4 Гэв и током 0,1 а. Однако наиболее мощные установки на встречных пучках (ВЭПП-4, Cornell, PETRA и PEP) пока могут обеспечить те потребности в области СИ на высокие энергии, которые предвидятся. В основе концепции

Накопительные кольца как источники синхротронного излучения

Название	Месторасположение	Е, Гэв	R, м	I _{Δ1}	ℰ, эв
H-100	Харьков	0,10	0,5	1300	10
Тавталус I	Висконсин, США	0,24	0,64	100	48
SURF II	Вашингтон, США	0,24	0,83	30	37
INS—SOR II	Токио, Япония	0,30	1,1	200	54
ACO	Орсэ, Франция	0,54	1,11	150	333
ВОПП-2М	Новосибирск	0,67	2	100	350
Брукхейвен I BNL	Аптон, США	0,70	1,90	1000	400
Алладин	Висконсин, США				
Бесси	Зап. Берлин	0,8	1,78	1000	500
ADONE-PULS	Фраскати, Италия	1,5	5,0	60	1 500
ПАМПУС	Амстердам, Голландия	1,5	4,17	500	1 800
	(проект)				(7 500)
SRS	Дарзбери, Англия	2	5,55	1000	3 200
Брукхейвен II BNL	Аптон, США	2,5	8,17	1000	3 200
ВЭПП-3	Новосибирск	2,2	6,15	100	3 800
Фотонная фабрика PF	Цукуба, Япония	2,5	8,0	500	4 300
Ерсинэ	Ереван, проект	2,5	6,4	750	5 000
ДОРИС	Гамбург, ФРГ	3,5	12,12	100	7 850
ДСI	Орсэ, Франция	1,8	3,82	400	3 390
ВЭПП-4	Новосибирск	6	33	100	14 200
SPEAR	Стэнфорд, США	4	12,7	60	11 200
Cornell	Итака, США	8	32	100	35 000
PETRA	Гамбург, ФРГ	19	170	90	75 000
PEP	Стэнфорд, США	15	200	100	44 000

источника СИ лежит принцип разделения функций его магнитной системы, в которой предусмотрены следующие элементы: 1) отклоняющие магниты, 2) фокусирующие квадруполь, 3) секступольные магниты, компенсирующие кубические нелинейности и 4) магнитные системы для генерации СИ, сверхпроводящие магниты, змейки, сидуляторы, а также СВЧ поля и пучки от лазеров, устанавливаемые в прямолинейных промежутках орбиты, где фокусирующие элементы создают минимальное сечение пучка для обеспечения максимальной яркости источника СИ.

Большое значение приобретает разработка счетчиков квантов и методов регистрации изображений, допускающих прямое соединение с ЭВМ при широкой автоматизации работ с СИ. В целом затраты на современное экспериментальное оснащение опытов с СИ будут в итоге больше, чем стоимость сооружения самих источников СИ. Организация работ с СИ потребует создания новых форм междисциплинарного сотрудничества специалистов различных направлений. Мы можем заключить, что СИ дает нам новый свет, озаряющий самые сложные и, быть может, самые нужные нам объекты нашего ближайшего окружения, где мощные централизованные источники СИ становятся решающим фактором для развития экспериментальных исследований.

Материалы доклада опубликованы в трудах 6-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1978) и на 4-й Генеральной конференции Европейского физического общества (Йорк, 1978).

ЛИТЕРАТУРА

1. Капица С. П. — Вестн. АН СССР, 1975, № 8, с. 28.
2. An Assessment of the National Need for Facilities Dedicated to the Production of SR. — Washington: NSF, 1976.
3. SR: a Perspective View for Europe. — Strassbourg: ESF, 1978.
4. Кулипанов Г. Н., Скринский А. Н. — УФН, 1977, т. 122, с. 369.
5. Marr V. G. et al. Synchrotron Radiation Bibliography. DNPL Rept. R 24-1972: Supplement DL/TM/1974. — Verzeichnis der Veröffentlichungen der Synchrotronstrahlungsgruppe am DESY, 1978.
6. Соколов А. А., Тернов И. М. Релятивистский электрон. — М.: Наука, 1974.
7. Алферов Д. Ф., Башмаков Ю. А., Бессонов Е. Г. — ЖТФ, 1973, т. 43, с. 2126; 1976, т. 46, с. 2392, Тр. ФИАН СССР, 1975, т. 80, с. 100.
8. Cohen R. L., Miller G. L., West K. W. — Phys. Rev. Lett., 1978 v. 41, p. 38.
9. Kagan Yu. et al. On excitation of isomeric nuclear status in a crystal by SR. — Moscow: Kurchatov IAE 2991, 1978.
10. Еремеев И. П. — Письма ЖЭТФ, 1978, т. 27, с. 13.
11. Барков Л. М. и др. Проект использования «Змейки» из сверхпроводящих магнитов для генерирования СИ на накопителе ВЭПП-3: Препринт ИЯФ СО АН СССР 78-13. — Новосибирск: 1978.
12. Pellegrini C. Free Electron Laser-theory, Experimental Situation and Perspectives: invited paper at 4th General Conference, of EPS. — York: 1978.
13. Применение синхротронного излучения для структурных исследований. Вестн. АН СССР, 1978, № 8.