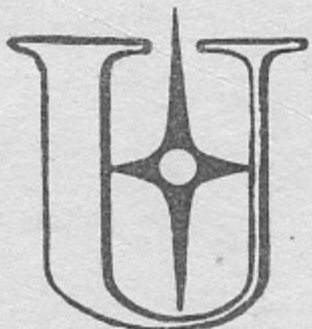


25

ИАЭ-2385



Ордена Ленина

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

Институт ядерной физики
сибирского отделения АН СССР

*Т. Д. Мокульская, М. А. Мокульский,
А. А. Никитин,
В. В. Анашин, Г. Н. Кулипанов,
В. А. Лукашов, А. Н. Скринский*

Использование синхротронного излучения
накопителя ВЭПП-3
для рентгеноструктурных исследований

Москва—Новосибирск

1974

Ключевые слова: пучок, накопитель ВЭПП-3, синхротронное излучение, рентгенограмма, фольга, монохроматор.

Описан канал для вывода рентгеновского синхротронного излучения (СИ) из накопителя ВЭПП-3. Приведены основные параметры пучка синхротронного излучения, даны характеристики условий проведения экспериментов.

Публикуются первые результаты по использованию рентгеновского излучения накопителя ВЭПП-3 для структурных исследований. Описана установка СИД-1 для регистрации дифракционных картин в прямом и монохроматизированном пучке. Приводятся некоторые рентгенограммы, полученные на пучке СИ, описаны особенности этих рентгенограмм.

По результатам экспериментов проведено сравнение интенсивности пучка СИ накопителя ВЭПП-3 с рентгеновскими трубками. Обсуждаются перспективы постановки рентгеноструктурных исследований на пучке СИ.

© Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова, 1974

Техн. редактор Е.Д.Маркова
Корректор В.П.Горячева

Т-05448.16.04.74г.Формат 60x90/8

Уч.-изд.л.1,02.Тираж 230.Заказ 680

Цена 10 коп.ОНТИ.ИАЭ

ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение является важным фактором формирования орбиты электронов и позитронов в накопителях этих частиц. Оно обеспечивает сжатие пучка (уменьшение его фазового объема) и создает условия накопления частиц на орбите [1 - 4]. На большие возможности использования синхротронного излучения для спектроскопии в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения было указано еще в 1956 г. в обзоре Д.Томбулиана и П.Гартмана [5] в связи с пуском синхротрона с энергией электронов 300 Мэв.

Создание синхротронов с энергией 1 Гэв и выше существенно расширило спектр возникающего синхротронного излучения, сдвинув максимум спектра в область нескольких ангстрем - наиболее интересную для дифракционных структурных исследований. Одновременно сильно увеличивалась интенсивность излучения. За последние годы интерес к использованию синхротронного излучения для физических, химических и биологических исследований резко возрос.

Сегодня лаборатории, использующие синхротронное излучение, созданы или создаются при всех работающих синхротронах. Большой размах приняли работы по применению синхротронного излучения в лабораториях при Гамбургском синхротроне **DESY** (7,5 Гэв), много работ выполнено на синхротроне **CEA** (3,5 Гэв, Кэмбридж, США).

В ряде стран (США, Англия, ФРГ и др.) осуществляются программы развертывания больших лабораторий при имеющихся синхротронах и создания специализированных накопительных колец для работы исключительно с синхротронным излучением (накопительные кольца как источники синхротронного излучения имеют ряд преимуществ перед обычными синхротронами). Существует обширная литература о разнообразных применениях синхротронного излучения для физических, радиационно-химических, медицинских и других исследований [6 - 8].

Одним из важнейших применений синхротронного излучения являются дифракционные структурные исследования. Возможности, которые здесь открываются, очень привлекательны, однако сегодня еще нет публикаций о каких-либо новых научных результатах, полученных благодаря использованию синхротронного излучения. Имеются лишь сообщения о методических результатах. Описаны схемы каналов для выведения пучков излучения, устройства монохроматоров, коллиматоров и других деталей, приведены данные о полученных интенсивностях излучения [10].

В настоящем отчете изложены первые результаты работы, проводимой совместно Институтом ядерной физики СО АН СССР и Институтом атомной энергии им. И.В.Курчатова, по использованию синхротронного излучения для структурных исследований.

В декабре 1972 г. было принято решение о создании канала для вывода рентгеновской части синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 (Институт ядерной физики, Новосибирск) для постановки рентгеноструктурных исследований в области молекулярной биологии (биологический отдел ИАЭ им. И.В.Курчатова, Москва).

Выбор накопителя ВЭПП-3 в качестве источника синхротронного излучения обусловлен тем, что уже при энергии электронов $E = 1,6 \div 2,5$ ГэВ максимум в спектре синхротронного излучения лежит в области $\lambda = 4 \div 1 \text{ \AA}$, наиболее подходящей для рентгеноструктурных исследований. Большое время жизни пучка в накопителе обеспечивает низкий уровень радиационного фона вокруг установки, что позволяет работать в непосредственной близости от эффективного источника излучения (на расстоянии около 2,5 м). В сочетании с малыми поперечными размерами пучка электронов это позволяет обеспечить большую плотность потока монохроматических фотонов в пучке.

В июле 1973 г. канал СИ на накопителе ВЭПП-3 был смонтирован и пучок рентгеновского синхротронного излучения был выведен в атмосферу. Вслед за этим были проведены первые эксперименты по получению рентгенограмм различных веществ на установке СИД, специально сконструированной для работы на этом канале.

Цели первых экспериментов: проверка работоспособности всех узлов, выявление особенностей работы на пучке СИ, сравнение интенсивности монохроматического пучка СИ с интенсивностью острофокусных рентгеновских трубок, работающих на характеристическом излучении меди ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$).

1. ОПИСАНИЕ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

Схематически жесткофокусирующий накопитель ВЭПП-3 [9] представляет собой два полукольца, разделенных длинными прямолинейными промежутками, фокусировка в которых осуществляется с помощью квадрупольных линз (рис. 1). В полукольцах расположено шестнадцать магнитов, каждый из которых состоит из четырех частей: двух заворачивающих магнитов с однородным полем и коротких, но сильных фокусирующих и дефокусирующих магнитов. Радиус кривизны в заворачивающих магнитах $R_M = 6,15$ м, в дефокусирующем $R_D = 9,8$ м, в фокусирующем $R_F = 16,8$ м. Средний радиус траектории частиц в полукольцах $R_{cp} = 8,05$ м, полный периметр траектории с учетом прямолинейных промежутков $\Pi = 74,4$ м, частота обращения частиц в накопителе $f = 4,03$ МГц.

Инжекция электронов в накопитель производится на энергии $E = 300$ МэВ из синхротрона Б-4. Подъем энергии в накопителе осуществляется за время ~ 80 сек. Магнитная система накопителя рассчитана на получение энергии $E = 3,5$ ГэВ. В июле 1973 г. основная работа проводилась при энергии электронов $E = 2$ ГэВ, определяемой существующей системой ВЧ-питания. Увеличение энергии до $E = 3$ ГэВ будет произведено в 1974 г.

Средний вакуум по длине накопителя составлял $\sim 10^{-8}$ тор, что обеспечивало время жизни электронов $\tau = 3$ ч на малом токе. Однако при токе $I = 10$ мА и $E = 2$ ГэВ время жизни уменьшалось до $\tau = 20$ мин из-за сильного гашения стенок вакуумной камеры под действием синхротронного излучения. В дальнейшем мы надеемся устранить такое резкое уменьшение времени жизни и довести рабочие токи до $I = 100$ мА при нормальном времени жизни.

Измерение величины тока в накопителе производится по регистрации интенсивности СИ с помощью ФЭУ. Калибровка осуществляется по измерению интенсивности СИ от одного электрона. При токе выше 100 мкА для измерения тока используются также интегральные пикап-электроды.

Положение равновесной орбиты в накопителе измеряется с помощью системы дифференциальных пикап-электродов.

Специальная система, основанная на регистрации видимой части СИ, позволяет получать осциллограммы распределения плотности пучка в радиальном или вертикальном направлении. При энергии $E > 0,8$ ГэВ радиальный размер электронного пучка в накопителе определяется квантовыми флуктуациями синхротронного излучения и составляет $2 \sigma_r$ (мм) = $5 \cdot 10^{-2} \sqrt{\beta(\text{см})E}$ (ГэВ). В заворачивающем магните бетатронная функция $\beta = 250$ см. Вертикальный размер пучка по измерениям составлял $\sigma_z = 0,1 \sigma_r$. В наших опытах эти величины составляли $2 \sigma_r \sim 1,5$ мм, $\sigma_z \sim 0,08$ мм.

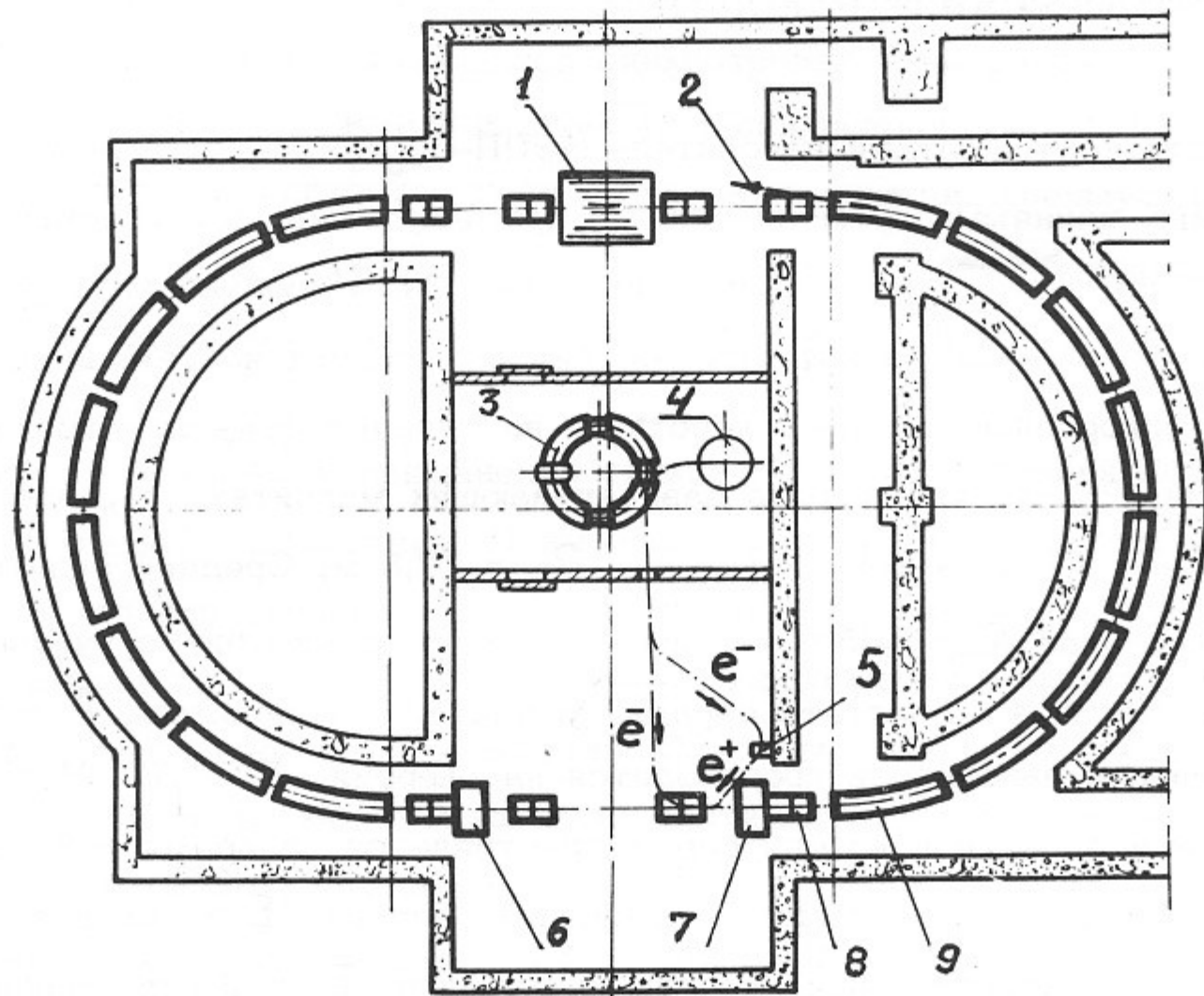


Рис. 1. Схема накопителя ВЭПП-3:

1 - система регистрации для опытов со встречными пучками; 2 - выход синхротронного излучения (вакуумная камера накопителя не изображена); 3 - инжектор-синхротрон Б-4; 4 - фор-инжектор; 5 - конвертор для получения позитронов; 6 и 7 - резонаторы; 8 - дублет квадрупольных линз; 9 - заворачивающий магнит накопителя.

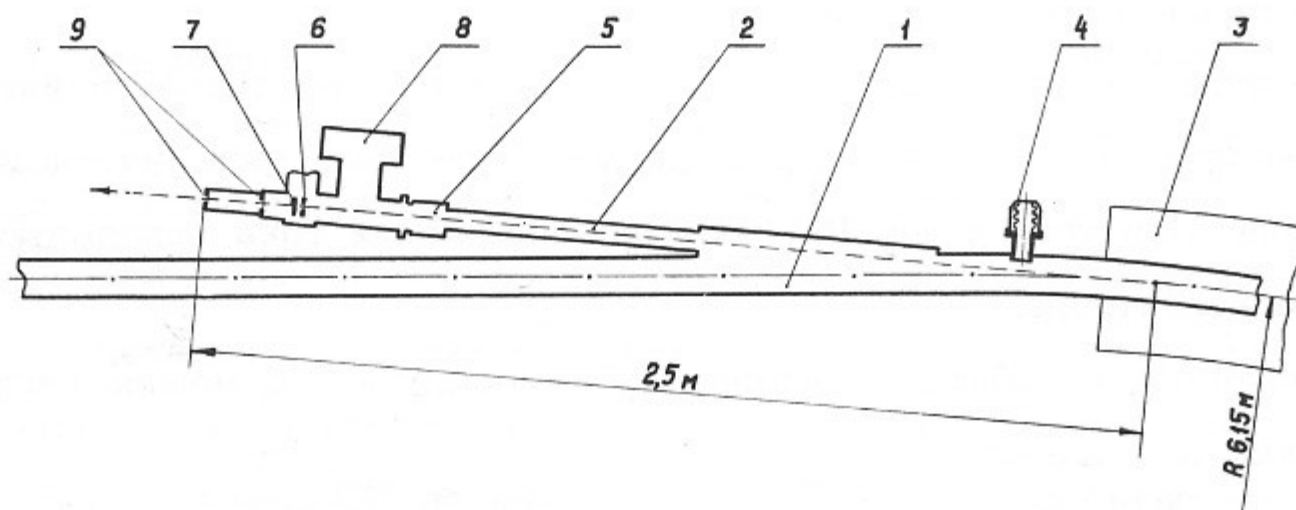


Рис. 2. Схема канала для вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 (канал СИ):

9 - выходная фольга из бериллия толщиной 0,15 мм; 7 - ослабляющий фильтр из бериллия; 6 - диафрагмы; 8 - магниторазрядный насос МЭРН-150; 2 - канал СИ; 4 - штыревой приемник излучения; 3 - заворачивающий магнит накопителя; 1 - вакуумная камера накопителя; 5 - форвакуумный объем выходного отсека.

II. КАНАЛ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3

При проектировании накопителя ВЭПП-3 не предполагалось выводить СИ за пределы вакуумной камеры. Конструкция вакуумной камеры включает приемник СИ – позолоченную охлаждаемую водой трубку, расположенную на наружном радиусе в круговой части накопителя. Поэтому только на участках стыковки полуколец с прямолинейными промежутками можно вывести СИ, не изменяя конструкции вакуумной камеры в магнитах и конструкции самих магнитов.

Одно из таких мест и было выбрано для постановки канала СИ (рис. 2). Излучение выводится из заворачивающего магнита, с участка траектории, лежащего на расстоянии 45 см от края магнита. Ось канала расположена под углом $\alpha = 4^\circ$ к оси прямолинейного промежутка. Длина канала $L_k \sim 2,5$ м.

Канал содержит:

- а) штыревые приемники излучения, которые могут полностью перекрывать канал СИ;
- б) высоковакуумный клапан, после которого подсоединяется выходной узел канала СИ;
- в) диафрагмы размером 1 мм и 3 мм для уменьшения размера пучка СИ на выходной фольге;
- г) фильтр из бериллия переменной толщины, который расположен перед выходной фольгой и при введении в пучок СИ обрезает длинноволновую часть спектра для уменьшения тепловой нагрузки выходной фольги;
- д) магниторазрядный насос МЭРН-150 для откачки газа, выделяющегося под действием СИ из диафрагмы, фильтра и выходной фольги;
- е) выходное окно из бериллиевой фольги толщиной 0,15 мм;
- ж) форвакуумный объем и вторую выходную фольгу из бериллия толщиной 0,15 мм, назначение которых – обезопасить вакуумную камеру ВЭПП-3 от попадания атмосферного воздуха при случайном или радиационном повреждении выходной фольги.

При работе накопителя на энергии $E = 2$ Гэв бериллиевый фильтр не использовался и пучок СИ всегда выходил в атмосферу через бериллиевые фольги суммарной толщины $d = 300$ мк. Диаметр выходной фольги 9 мм, при необходимости выходная фольга может быть увеличена до размеров канала СИ, диаметр которого на выходе равен 30 мм.

Выход канала СИ и установка для получения рентгенограмм расположены вблизи от накопителя и не имеют никакой специальной защиты от жестких γ -квантов и нейтронов. Однако даже при сравнительно малом времени жизни электронов в на-

копителе $\tau = 40$ мин, токе $I = 10$ мА и энергии $E = 2$ ГэВ максимальный уровень радиации за счет жестких γ -квантов составляет всего $\sim 0,2$ мкр/сек в меридианной плоскости накопителя, расположенной на уровне $H = 2,2$ м от пола.

Гораздо большую опасность представляет сам пучок СИ, однако сравнительно малая энергия фотонов в пучке СИ позволяет с помощью легкой локальной защиты из свинца толщиной 2 мм убрать рассеянные фотоны в районе выхода канала СИ.

III. ПАРАМЕТРЫ ПУЧКА СИ

Основным параметром, определяющим время, необходимое для получения рентгенограммы, является число монохроматических фотонов, падающих на 1 мм^2 образца за 1 сек. Эта величина зависит от тока накопителя и сечения пучка электронов, от пропускания выходных фольг, длины канала СИ и качества используемого монохроматора:

$$N(\lambda) \frac{\text{фотон}}{\text{мм}^2 \text{сек}} = I_{\text{МА}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \cdot \frac{1}{h_{\text{мм}} L_{\text{м}}} \eta(\lambda) \xi(\lambda) \Delta\lambda$$

где $I_{\text{МА}}$ - ток в накопителе, $\frac{dn}{d\lambda}$ - поток фотонов (проинтегрированный по всем вертикальным углам), испускаемый током 1 мА в радиальный угол 1 мрад, $\frac{\text{фотон}}{\text{сек} \cdot \text{А} \cdot \text{МА} \cdot \text{мрад}}$;

L - длина канала СИ, м; h - высота, т.е. вертикальный размер пучка на выходе канала СИ, мм; $\eta(\lambda)$ - коэффициент пропускания выходных фольг канала СИ; $\xi(\lambda)$ - коэффициент отражения кристалла монохроматора; $\Delta\lambda$ - ширина полосы, пропускаемой монохроматором.

Величина $\frac{dn}{d\lambda}$ вычисляется достаточно точно по известным формулам [5]:

$$\frac{dn}{d\lambda} \frac{\text{фотон}}{\text{сек} \cdot \text{А} \cdot \text{МА} \cdot \text{мрад}} = 7,9 \cdot 10^4 \frac{E^7_{\text{ГэВ}}}{R^2_{\text{м}}} G(y) \lambda(\text{А})$$

Здесь E - энергия электронов в накопителе, ГэВ; R - радиус кривизны в месте излучения, м; $G(y)$ - табулированная функция [5], где $y = \frac{5,59 \cdot R_{\text{м}}}{E^3_{\text{ГэВ}} \cdot \lambda \text{А}}$

Высота пучка h на выходе канала СИ является менее определенной величиной и зависит от размера пучка электронов $2\sigma_z$ в накопителе, углового разброса в пучке электронов $\psi_{эл}$, углового расхождения пучка СИ ψ_z и длины канала L :

$$h = \sqrt{4\sigma_z^2 + L^2(\psi_z^2 + \psi_{эл}^2)}$$

Ввиду малости вертикального размера электронного пучка в накопителе при определении высоты пучка СИ почти всегда можно пренебречь размером и угловым разбросом пучка электронов. Угловое расхождение пучка СИ для длин волн λ , при которых

$y \leq 2$, не зависит от энергии электронов и определяется выражением:

$$\Psi_{z \text{ мрад}} = 5,75 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\lambda \text{ \AA}}{R_M} \right)^{1/3}.$$

Тогда $h_{\text{мм}} = L_M \Psi_{\text{мрад}} = 0,575 \left(\frac{\lambda \text{ \AA}}{R_M} \right)^{1/3}.$

В нашем случае для $\lambda = 2 \text{ \AA}$ высота пучка $h \sim 1 \text{ мм}$.

На рис. 3 приведены кривые, характеризующие интенсивность и спектральное распределение синхротронного излучения на выходе канала СИ накопителя ВЭПП-3 при энергиях 2, 2,5 и 3 ГэВ и токе 1 мА. Длина канала, т.е. расстояние от точки излучения фотона до его выхода в атмосферу, $\sim 2,5 \text{ м}$.

IV. УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ КАРТИНЫ ДИФРАКЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Установка для регистрации картины дифракции синхротронного излучения СИД-1 (рис. 4, 5) состоит из монохроматора, рентгеновской камеры и ряда вспомогательных устройств. Установка СИД-1 закрепляется с помощью юстировочных и прижимных винтов на платформе, подвешенной к поворачивающим магнитам накопителя.

На основной стойке установки СИД укреплены держатель кристалла монохроматора и поворотная скамья. Кристалл и скамья могут независимо друг от друга поворачиваться (червячными передачами) вокруг общей для них горизонтальной оси (перпендикулярной пучку СИ). На скамье укреплены рентгеновская камера и сцинтилляционный детектор излучения "Аракс". В качестве дифракционного монохроматора был использован монокристалл кварца (вырезанный параллельно плоскости $10\bar{1}1$ с межплоскостным расстоянием $d = 3,34 \text{ \AA}$).

При повороте кристалла кварца на угол θ , а скамьи на угол 2θ относительно медианной плоскости прямой пучок СИ, выходящий из канала, падает на поверхность кристалла под углом θ . Отраженный (монохроматизированный) пучок идет вниз от медианной плоскости под углом 2θ , проходит через входной коллиматор рентгеновской камеры, попадает на образец, а затем, пройдя сквозь отверстие в рентгеновской пленке, - на вход детектора.

Такая геометрия опыта с выводом пучка из медианной плоскости по некоторым чертам удобнее, чем другая - с вертикальной осью вращения кристалла и скамьи, при которой отраженный пучок остается в медианной плоскости. В последнем случае из-за поляризационных эффектов отраженный луч гаснет при отражении излучения от кристал-

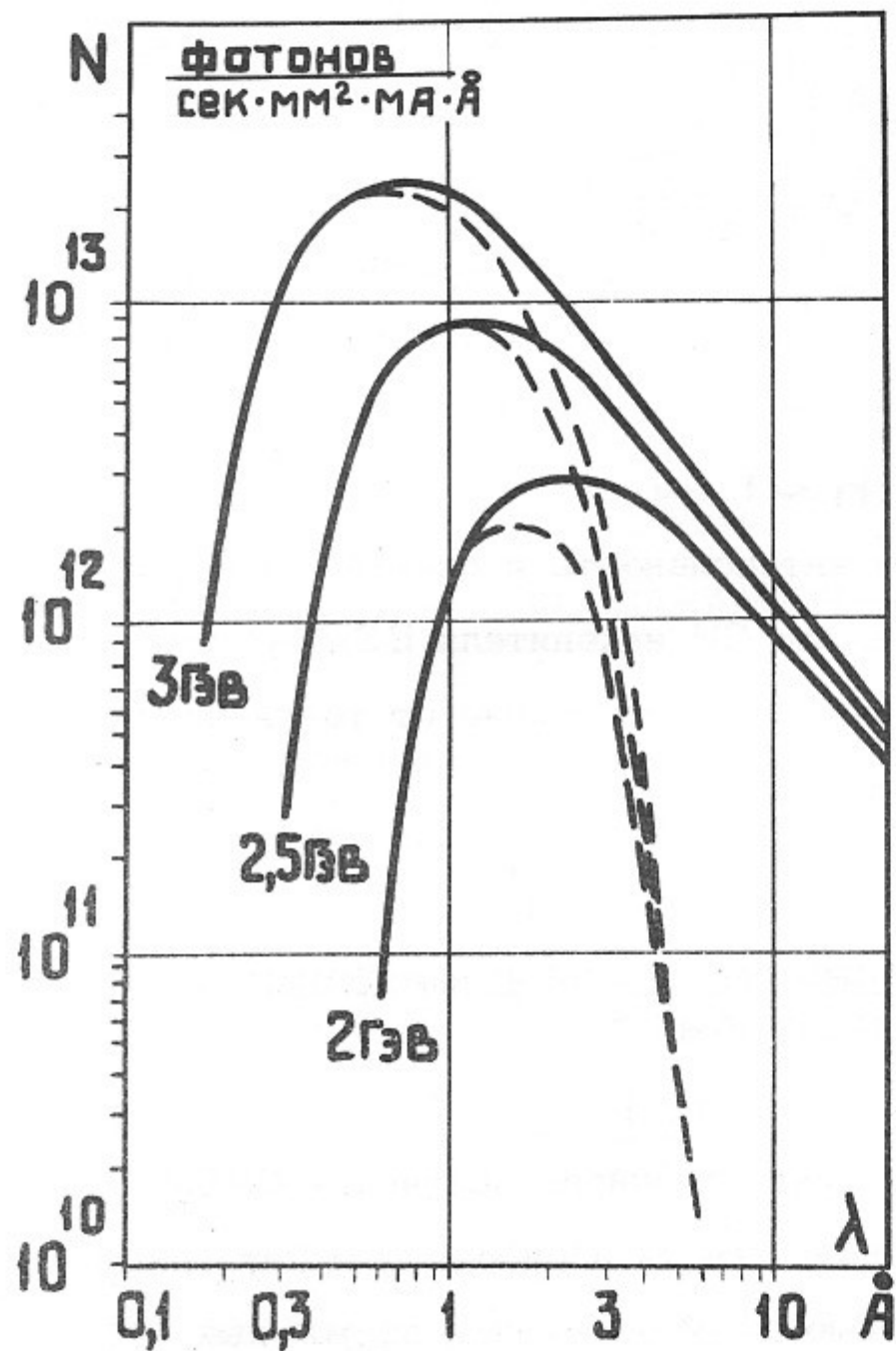


Рис. 3. Зависимость числа фотонов на выходе канала СИ длиной $L = 2,5$ м от длины волны для разных энергий электронов: — — — — спектр излучения до прохождения через выходные фольги; - - - - спектр излучения, прошедшего бериллиевые фольги общей толщиной 0,3 мм. Коэффициент поглощения бериллия для разных λ вычислен по формуле Йонсона.

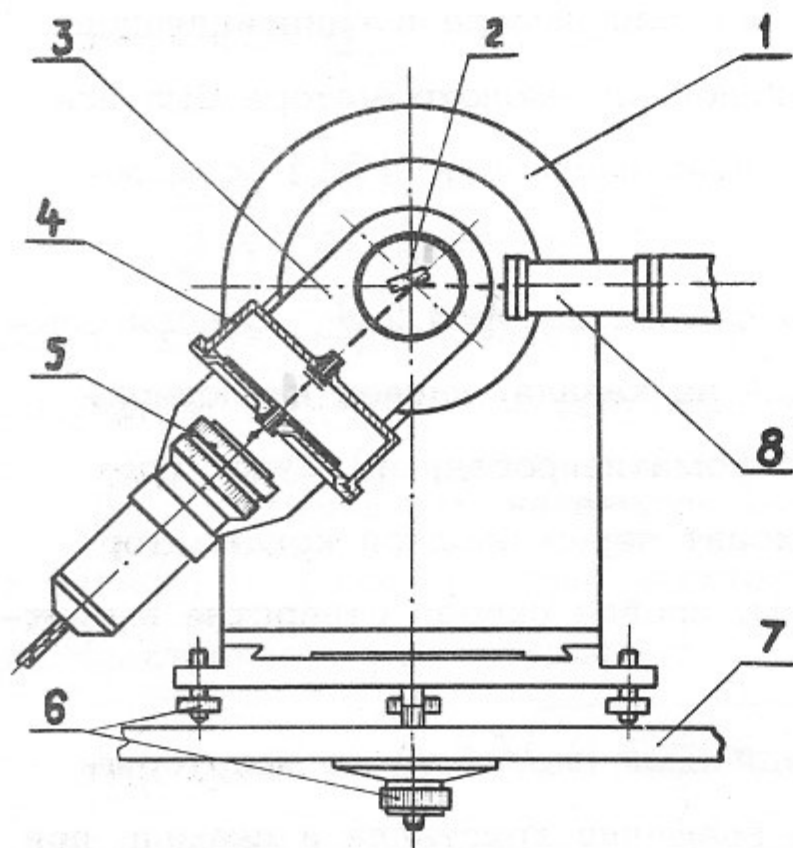


Рис. 4. Принципиальная схема установки СИД-1: 1 — основная стойка; 2 — кристалл монохроматора; 3 — поворотная скамья; 4 — рентгеновская камера; 5 — сцинтилляционный детектор излучения; 6 — установочные и прижимные винты; 7 — платформа; 8 — выходной отсек канала СИ.

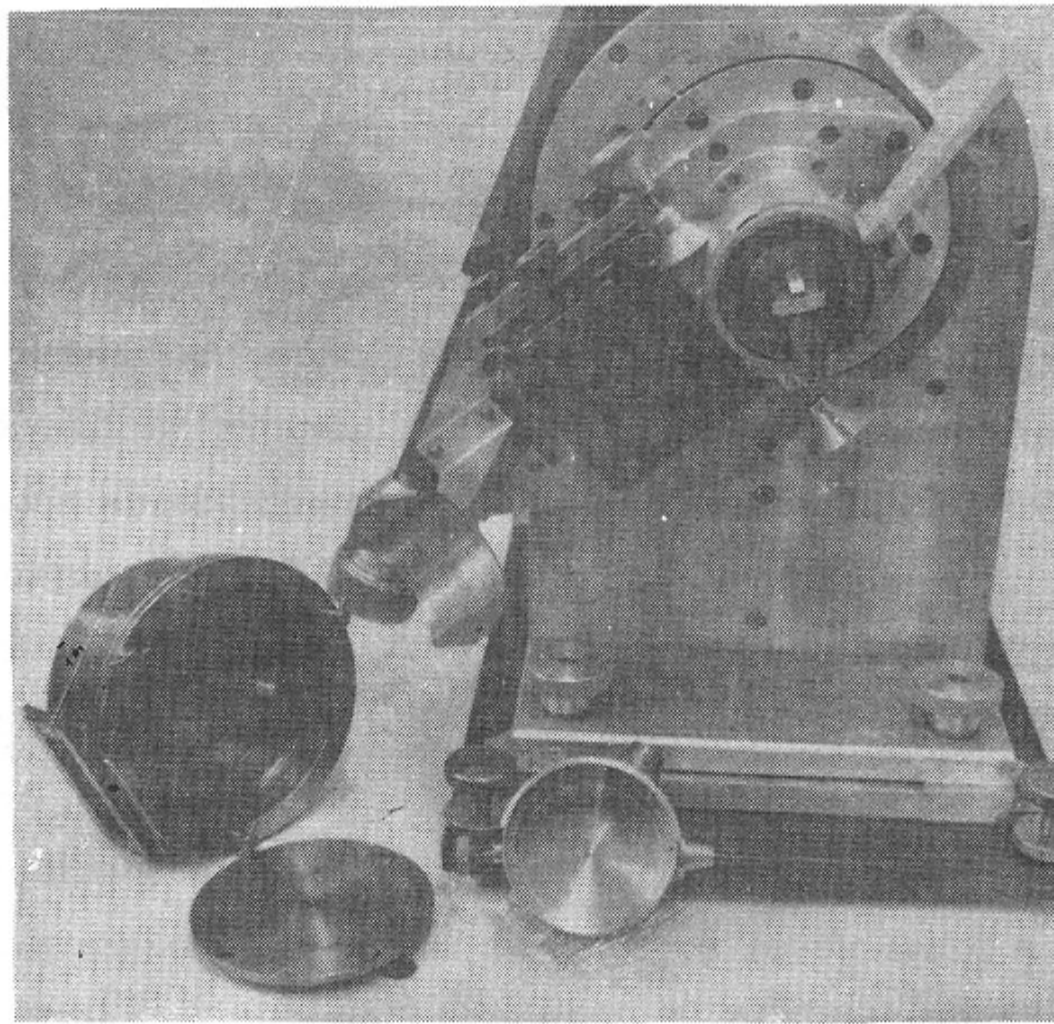


Рис. 5. Установка СИД-1.

Рис. 6. Лауэграмма алюминиевой фольги.

на под углом $\theta = 45^\circ$. В нашем случае электрический вектор падающей и отраженной волн перпендикулярен плоскости падения и этот эффект отсутствует.

Установка СИД позволяет работать в широком диапазоне углов θ — от 0 до 70° ($2\theta = 0 \div 140^\circ$), что соответствует диапазону длин волн отраженного излучения — от 0 до 6 \AA . Практически нижняя граница рабочего диапазона (по λ) определяется спектром синхротронного излучения и при энергии электронов $E \sim 2$ ГэВ находится в районе $0,5 \text{ \AA}$. Верхняя граница спектра определяется пропусканием бериллиевых фольг и находится в районе $4,5 \text{ \AA}$ (см. рис. 3). Спектр излучения, отраженного от кристалла, состоит из основной гармоники λ и высших гармоник $\frac{\lambda}{2}$, $\frac{\lambda}{3}$... (в соответствии с формулой Брегга $2d \sin \theta = n\lambda$). В нашем случае для кристалла кварца относительная интенсивность гармоники $\frac{\lambda}{2}$ составляет 8%, остальные гармоники в несколько раз слабее. Доля второй гармоники резко возрастает при работе с излучением $\lambda = 3 \text{ \AA}$ и более из-за того, что основная гармоника в этом случае сильно поглощается в бериллии.

Спектральная ширина $\Delta\lambda$ основной гармоники, обусловленная полосой пропускания монохроматора и расходимостью пучка синхротронного излучения, оценивается нами как 10^{-3} \AA .

Рентгеновская камера имеет в качестве коллиматора капилляр из свинцового стекла диаметром $0,15$ мм, расстояние образец — пленка можно менять от 8 до 45 мм. В камере можно поддерживать заданное давление водяных паров, ставя внутрь камеры специальную кювету с насыщенными растворами солей. Это позволяет вести в камере съемку биологических препаратов, структура которых сильно зависит от влажности атмосферы. Картина дифракции регистрируется на рентгеновскую пленку.

У. ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ДИФРАКЦИОННЫХ КАРТИН

Съемка дифракционных картин велась при различных режимах работы накопителя (энергия электронов $1,6$ – 2 ГэВ, ток от долей миллиампера до 10 мА), соответственно интенсивность излучения в разных опытах была различной. Приводимые ниже данные о длительностях экспозиций получены пересчетом к такому режиму: $E = 2$ ГэВ, а $I = 2$ мА. Ниже перечисляются сделанные опыты (рис. 6–8).

а) Дифракция излучения со сплошным спектром. Съемка велась по обычной схеме опытов Лауэ. Образцы — слюда и алюминиевая фольга, длительность экспозиций — от 12 сек до 1 мин.



Рис. 7. Рентгенограмма полиэтилена. Ось вытяжки горизонтальна. Видны экваториальные рефлексы основной гармоники 3 \AA и второй гармоники $1,5 \text{ \AA}$.

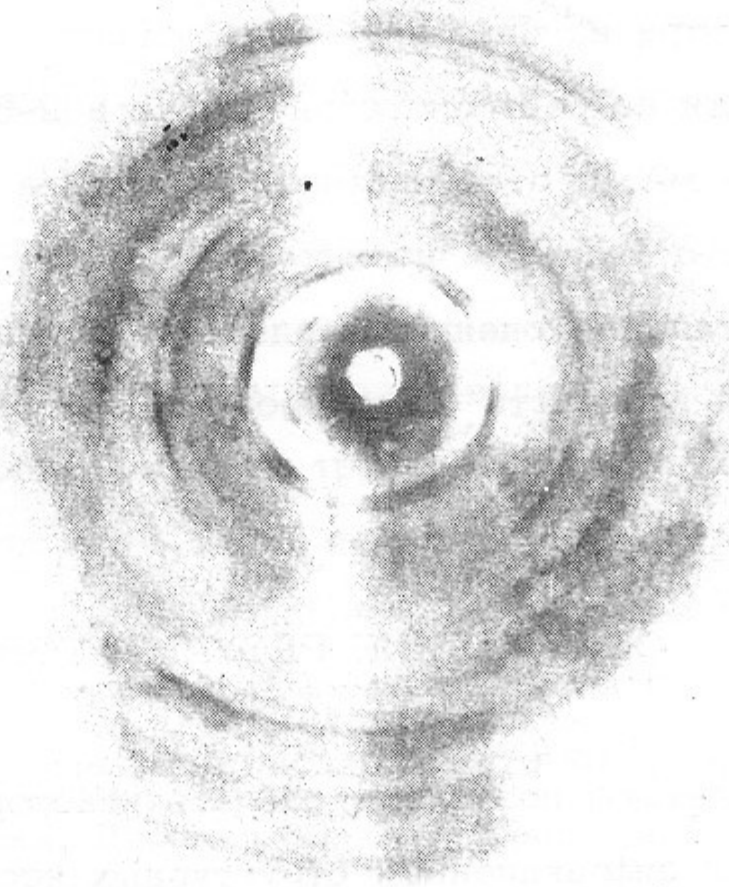


Рис. 8. Рентгенограмма NaДНК, $\lambda = 2 \text{ \AA}$, А - форма.

б) Дифракция монохроматизированного излучения. Все три образца – древесина, полиэтилен и ДНК* – представляют собой аксиальные текстуры. Древесина имеет природную ориентацию, пленки из полиэтилена и нить ДНК были ориентированы вытяжкой. Были получены такие рентгенограммы:

1. Древесина – $\lambda = 2 \text{ \AA}$, экспозиция 60 мин.
2. Полиэтилен – $\lambda = 2 \text{ \AA}$, экспозиция 50 мин, на снимке видны слабые рефлексы, порожденные излучением с длиной волны 1 \AA (вторая гармоника).
3. Полиэтилен – $\lambda = 3 \text{ \AA}$, экспозиция 60 мин. Рефлексы, порожденные второй гармоникой ($\lambda = 1,5 \text{ \AA}$), стали сильными.

Сравнение рентгенограмм полиэтилена, снятых при $\lambda = 2 \text{ \AA}$ и 3 \AA , показывает, что длина волны 3 \AA ближе к оптимальной для съемки данного образца. Действительно, число квантов излучения с длиной волны $\lambda = 3 \text{ \AA}$ при том же токе накопителя примерно в 3 раза меньше, чем для $\lambda = 2 \text{ \AA}$, однако при равных экспозициях в этих случаях получаются рентгенограммы с близкими плотностями.

4. ДНК – $\lambda = 2 \text{ \AA}$, экспозиция 135 мин. Образец имеет высокую степень кристалличности. Относительная влажность атмосферы в камере 75%, А – форма ДНК.

Оценка плотности и разрешения полученных дифракционных картин позволяет провести качественную оценку эффекта сокращения экспозиции, достижимого на данном накопителе и на данной установке СИД. При съемке в монохроматическом излучении на накопителе ВЭПП-3, работающем в режиме: энергия электронов $E = 2 \text{ ГэВ}$, ток

$I = 2 \text{ мА}$, экспозиция примерно равна той, которая необходима для съемки на нефльтрованном излучении $\text{Cu } K_{\alpha}$ острофокусной рентгеновской трубки с медным анодом. Применение фильтра из никелевой фольги (для ослабления линии $\text{Cu } K_{\beta}$) увеличивает время съемки на рентгеновской трубке в 2–3 раза. В наших опытах ток в накопителе достигал 10 мА, соответственно сокращение по сравнению со съемкой на рентгеновской трубке с фильтром из никеля при этом составляло примерно один порядок. Эти экспериментальные оценки находятся в хорошем согласии с расчетными значениями спектральной плотности синхротронного излучения и излучения рентгеновской трубки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПЕРСПЕКТИВ

Полученные результаты позволяют сделать некоторые заключения о возможных перспективах развития дифракционных структурных исследований на синхротронном излучении накопителя ВЭПП-3.

* Была взята натриевая соль ДНК из тимуса теленка.

1. Интенсивность излучения

При выходе накопителя на расчетный режим работы ($E = 3$ Гэв, $I = 100$ мА) спектральная плотность излучения существенно возрастает и сокращение экспозиции по сравнению с рентгеновской трубкой станет очень большим. Существенного увеличения количества падающих на образец квантов можно добиться, используя монохроматор с большей шириной полосы $\Delta\lambda$ и большим коэффициентом отражения (в этой полосе). Некоторое ухудшение монохроматичности пучка (увеличение $\Delta\lambda$ до $3 \cdot 10^{-3}$ Å) вполне допустимо в большинстве рентгеноструктурных работ. Применение фокусирующих устройств, может дать дополнительное увеличение интенсивности излучения в несколько раз. Таким образом представляется вполне реальным, используя синхротронное излучение, сократить время регистрации рентгеновской дифракционной картины в 10^2 раз по сравнению с лучшими рентгеновскими трубками с вращающимся анодом. Это само по себе обеспечит очень важные новые возможности для структурных исследований, в частности возникнет реальная перспектива получения рентгенограмм от образцов весом 10^{-9} г и меньше, что будет иметь принципиальное значение для многих биологических исследований.

2. Спектр излучения

Возможность проводить дифракционные исследования при любой длине волны излучения от десятых долей ангстрема до нескольких ангстрем позволит существенно развить прямые методы определения атомной структуры веществ. Действительно, как показано в ряде работ (например, [12]), точные измерения интенсивностей дифракции излучения различных длин волн, близких к краю К-полосы поглощения одного из атомов, позволят решить фазовую проблему без использования метода изоморфных производных.

Дифракционные исследования с излучением длиной волны $3-6$ Å, практически неосуществимые при помощи обычных рентгеновских трубок, облегчат изучение структур с большими периодами (сотни ангстрем), а также помогут исследованию дифракции от образцов малых размеров (например, для биологических образцов размером ~ 30 мк оптимальная длина волны, соответствующая наименьшей экспозиции, $\lambda \sim 5$ Å). В интервале $4-6$ Å лежат К-полосы аномальной дисперсии атомов фосфора и серы, входящих в нуклеиновые кислоты и белки. Дифракционные исследования при этих длинах волн представляются весьма перспективными. Вывод из накопителя излучения с длиной волны $4-6$ Å вполне возможен.

Общезначительный интерес представляют точные измерения полной комплексной функции атомного рассеяния. До сих пор проведение этой работы сдерживалось методическими затруднениями — отсутствием хороших источников излучения со сплошным спектром.

3. Естественная коллимация и поляризация синхротронного излучения

Хорошая коллимация синхротронного излучения позволяет чрезвычайно сильно (на несколько порядков) сократить длительность малоугловых исследований аморфных тел, растворов, биологических структур. В сочетании с поляризацией она дает возможность провести на новом уровне структурные исследования веществ в сильных магнитных и электрических полях и в других условиях, в которых применение обычных рентгеновских трубок невозможно.

СВОДКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Осуществлен вывод пучка синхротронного излучения в рентгеновском диапазоне из накопительного кольца ВЭПП-3.
2. Создана установка для регистрации картин дифракции монохроматизированного синхротронного излучения при разных длинах волн.
3. Получены (на фотопленке) картины дифракции синхротронного излучения от образцов различной природы (монокристалл, металл, фибриллярные полимеры).

ЛИТЕРАТУРА

1. J.O'Neil. CERN Symp., 1956.
2. C.Bernardini et al. The Frascati Storage Ring, Nuovo Cimento, v. XVIII, 1960.
3. Г.И.Будкер и др. Материалы Международной конференции по ускорителям. Дубна, 1963.
4. W.Barber et al. Ibidem.
5. D.N.Tombulian, P.L.Hartman. Phys. Rev., 102, 1423 (1956).
6. E.M.Rowe. Research Using Synchrotron Radiation, Nucl. Sci., v. NS-20, N 3, 973.
7. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел. Сб. статей. Под ред. А.А.Соколова. М., "Мир", 1970.
8. H.Winiok. Synchrotron Radiation at the CEA, Nucl. Sci., v. NS-20, N 3, 984.
9. Г.И.Будкер, И.Я.Протопопов, А.Н.Скринский. Установка со встречными электрон-позитронными пучками на энергию 3,5 Гэв (ВЭПП-3). Труды VII Международной конференции по ускорителям. Ереван, 1970. Т. 2, стр. 37.
10. G.Rosenbaum, K.C.Holmes, J.Witz. Nature, v. 230, N 5294, 434 (1971).
11. М.А.Блохин. Физика рентгеновских лучей. М., ГИТЛ, 1957.
12. A.Herzenberg, H.S.M.Lau. Acta Cryst., 22, 24 (1967).