



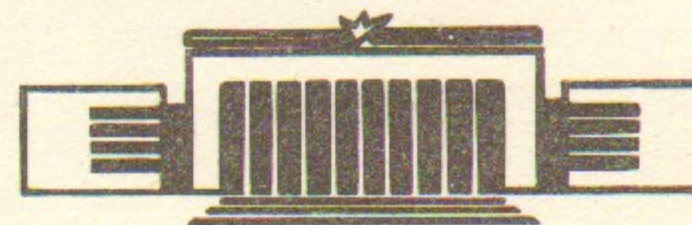
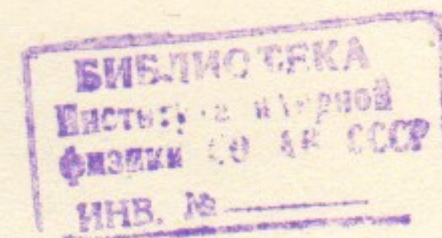
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

30

Е.С.Глускин, П.П.Ильинский, Г.Я.Кезерашвили,
Г.Н.Кулипанов, В.Ф.Пиндюрин, А.Н.Скринский,
А.С.Соколов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ СПИРАЛЬНОГО
ОНДУЛЯТОРА, УСТАНОВЛЕННОГО НА
НАКОПИТЕЛЕ ВЭПП-2М, КАК ИСТОЧНИКА
ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ
И ГОЛОГРАФИИ

ПРЕПРИНТ 83-145



НОВОСИБИРСК

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА,
УСТАНОВЛЕННОГО НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭШ-2М, КАК ИСТОЧ-
НИКА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ И ГОЛОГРАФИИ

Е.С.Глускин, Г.Я.Кезерашвили, Г.Н.Кулипанов,
В.Ф.Пиндурин, А.Н.Скринский, А.С.Соколов

Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск

П.П.Ильинский

Новосибирский Государственный Университет

АННОТАЦИЯ

В данной работе оцениваются возможности использования ондуляторного излучения (ОИ) в голографической микроскопии. С целью исследования реальных параметров ондулятора проведены абсолютные измерения спектрально-угловой плотности ОИ и эксперименты по наблюдению пространственной когерентности ОИ.

Появление мощных источников синхротронного излучения (СИ), стимулировало развитие различных видов рентгеновской микроскопии. Наиболее впечатляющие результаты получены в контактной микроскопии /1/, сканирующей микроскопии /2/, развивается микроскопия с использованием элементов рентгеновской оптики: зонных пластинок Френеля /3,4/, многослойных интерференционных зеркал /5/. В последние годы активно обсуждаются /6,7/ и продемонстрированы принципиальные возможности рентгеновской голографической микроскопии /8,9,10,11/.

Важным достоинством голографической микроскопии является то, что контрастность голограммы (при оптимальном подборе опорного освещения) не зависит прямо от контрастности образца и может оставаться высокой даже для очень слабопоглощающих и слабофазосдвигающих образцов, поскольку центральная часть прошедшего пучка несет лишь малую долю голографической информации (о форме объекта), и часто эту часть можно просто не регистрировать. Кроме того, по голограмме может быть одновременно определено и продольное положение элементов объекта.

Анализ требований к источникам рентгеновского излучения для различных схем рентгеновской микроскопии, в том числе и голографической, показывает /6/, что полное число "полезных" квантов от источника определяется только спектральной яркостью источника B_λ

$$\dot{N}_\lambda = B_\lambda \cdot \lambda^2 \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (1)$$

Необходимость монохроматизации излучения, однако, ограничивает возможности использования пучков СИ из поворотных магнитов, т.к. монохроматоры, как правило, "портят" фазовую плотность пучка квантов, поскольку полоса пропускания монохроматора $\Delta\lambda/\lambda$ определяет вносимый в поток квантов разброс углов $\Delta\theta \sim \Delta\lambda/\lambda$. Вот почему для рентгеновской голографии представляет принципиальный интерес использование, не требующих предварительной монохроматизации, сверхярких пучков рентгеновского излучения из ондуляторов.

Как показано в ряде работ /12,13,14,15,16/ ондуляторное излучение (ОИ) обладает рядом новых свойств по сравнению с СИ. Ондулятор, состоящий из N периодов испускает квазимонохрома-

тичное излучение в $N \div N^2$ раз большей спектральной яркости. Кроме того, ОИ характеризуется высокой степенью монохроматичности ($\Delta\lambda/\lambda \sim 1/N$) и ярко выраженной угловой направленностью ($\Delta\theta_\lambda \sim 1/\gamma\sqrt{N}$). Эти свойства позволяют без применения монохроматора, выбором оптимального размера диафрагмы добиться высокой интенсивности без существенного ухудшения монохроматичности ОИ. Эффективные размеры источника ОИ определяются параметрами электронного пучка в накопителе.

Во вторых, следует заметить, что в последнее время, в основном благодаря развитию технологии рентгенолитографии, появилось достаточно большое количество рентгенорезистов — пленок различных материалов (в основном органического происхождения), скорость травления которых зависит от дозы рентгеновского излучения, поглощенной в единице объема рентгенорезиста (типичная величина от 10 мДж/см³ до 500 Дж/см³). Пространственный рельеф, получаемый на рентгенорезисте после травления, можно считать с помощью сканирующего электронного микроскопа. В области мягкого рентгеновского излучения ($\lambda \sim 50+100 \text{ \AA}$) рентгенорезисты имеют прекрасное пространственное разрешение (50+200 \AA) и чувствительность, приближающуюся к чувствительности идеального детектора, когда минимальная регистрируемая доза соответствует поглощению 1+10 квантов в элементарной ячейке объема резиста, линейные размеры которой равны пространственному разрешению.

Использование ондулятора в качестве источника рентгеновского излучения и рентгенорезиста в качестве регистратора открывает новые возможности для работ по рентгеновской микроголографии. В данной работе экспериментально исследуются параметры ОИ, из реального ондулятора, определяющие его использование в голографических схемах.

Не углубляясь в детали теоретического анализа характеристик ОИ, ранее проделанного в ряде работ [12, 16] напомним характерные спектрально-угловые свойства ОИ. Как известно, n -ая гармоника ОИ от отдельного электрона, наблюдаемая под углом θ к оси ондулятора, имеет длину волны λ_n и спектральную ширину $(\Delta\lambda/\lambda)_n$, определяемые соотношениями:

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} (1 + K^2 + \gamma^2 \theta^2), \quad \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_n = \frac{1}{N \cdot n}, \quad \Delta\theta_{\lambda_n} = \frac{1}{\gamma\sqrt{Nn}} \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}$ — релятивистский фактор электронов, $K = 0,0934 \cdot \lambda_0 (\text{см}) \cdot H_0 (\text{кГс})$ — параметр ондуляторности, λ_0 — длина магнитного периода ондулятора, H_0 — амплитуда магнитного поля на оси ондулятора, N — полное число магнитных периодов.

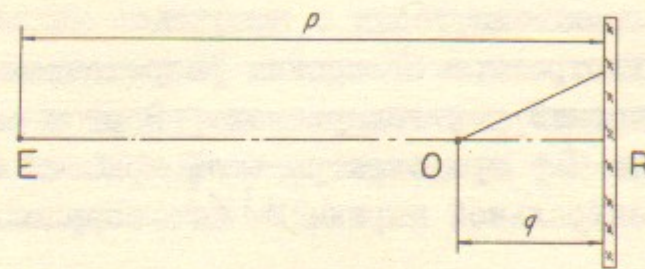


Рис. I. Схема получения осевой голограммы:

- p — расстояние между источником излучения (E) и экраном-регистратором (R);
 q — расстояние между объектом (O) и экраном (R).

Для дальнейшего рассмотрения возможности использования ОИ в голографии выберем конкретный пример — схему осевой голографии Габора-Фраунгофера (пример малоугловой рентгеновской голографии с использованием СИ рассмотрен в [18]). Схема получения осевой рентгеновской голограммы представлена на рис. I. Основные соотношения для разрешающей способности этой голографической схемы: ($p \gg q$)

а) поперечное разрешение δ_1 , обусловленное поперечными размерами источника излучения δ_x, δ_y

$$\delta_1 \approx \frac{q\delta}{p}, \quad \delta = \max[\delta_x, \delta_y] \quad (3)$$

б) поперечное разрешение, обусловленное разрешающей способностью экрана-регистратора δ_R

$$\delta_1 \approx \delta_R \quad (4)$$

в) поперечное разрешение, обусловленное монохроматичностью используемого излучения $\Delta\lambda/\lambda$:

$$\delta_{\perp} \approx \frac{1}{2} \sqrt{q \lambda \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda}} \quad (5)$$

г) продольное разрешение δ_{\parallel} , обусловленное монохроматичностью излучения $\Delta \lambda / \lambda$:

$$\delta_{\parallel} \approx \frac{q}{4} \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \approx \frac{\delta_{\perp}^2}{\lambda} \quad (6)$$

В качестве экрана-регистратора с высоким разрешением в схеме используется органический рентгенорезист. В этом случае время экспозиции голограммы t при спектральной яркости источника излучения B_{λ} спектральной ширины $\Delta \lambda / \lambda$ определяется следующими соотношениями:

$$t \approx \frac{D}{\mu} \cdot \frac{S}{B_{\lambda} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda}} \approx \frac{D}{\mu} \cdot \frac{q^2}{B_{\lambda} \cdot \delta_{\perp}^2 \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda}} \approx \frac{D}{\mu} \cdot \frac{p^2}{B_{\lambda} \cdot 2\pi \delta_x \delta_y \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda}} \quad (7)$$

где D - объемная доза экспозиции резиста (Дж/см³), μ - линейный коэффициент поглощения излучения в резисте (см⁻¹), S - регистрируемая площадь голограммы.

Проведем численную оценку для использования в качестве источника излучения ондулятора, установленного в прямолинейном промежутке накопителя ВЭШ-2М /17/. Это спиральный ондулятор с длиной магнитного периода $\lambda_0 = 2,4$ см и полным числом периодов $N = 10$. Максимальная амплитуда магнитного поля на оси ондулятора $H_0 = 1,3$ кГс. С учетом параметров электронного пучка в месте постановки ондулятора на накопителе ВЭШ-2М при энергии электронов $E_e = 0,67$ ГэВ (режим с малой связью $\mathcal{L} = \sqrt{\delta_y \delta_y' / \delta_x \delta_x'} \ll 1$) $\delta_x' = 0,82$ мрад; $\delta_y' = 0,22$ мрад; $\delta_x = 0,035$ см; $\delta_y = 0,00067$ см спектральная яркость ондулятора B_{λ} с полем $H_0 = 1,3$ кГс на первой гармонике ОИ $\lambda_1 = 79$ Å при токе 50 мА оценивается как $B_{\lambda} = 7,7 \cdot 10^8 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{стер} \cdot \Delta \lambda / \lambda}$

при полной спектральной ширине ОИ $\Delta \lambda / \lambda = 0,20$. С другой стороны, оценки спектральной яркости источника, необходимой для получения рентгеновской голограммы с пространственным разрешением ~ 500 Å за время экспозиции 1 с дают величину

$$B_{\lambda} \approx 10^7 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{стер}}, \text{ полученную без учета дополнительных потерь излучения в объекте, подложке и т.д.}$$

Сравнение с оценками по использованию в рентгеновской голографии СИ из поворотных магнитов накопителей с учетом необходимой монохроматизации излучения /18/ еще более подчеркивает перспективность применения ОИ при решении таких задач.

Отметим также принципиальную возможность получения рентгеновских голограмм с пространственным разрешением ~ 50 Å при использовании ОИ с длиной волны ~ 50 Å. Получение еще более высокого пространственного разрешения (≤ 50 Å) ограничено дифракцией излучения и пробегом фотоэлектронов в существующих рентгенорезистах /19/.

Абсолютные измерения параметров ОИ из спирального ондулятора, установленного на накопителе ВЭШ-2М, проводились при энергии электронов в накопителе $E_e = 390$ и 510 МэВ в области длин волн 100-300 Å. Амплитуда магнитного поля на оси ондулятора составляла 1,0+1,1 кГс, что соответствует значениям $K = 0,224+0,247$. Основная цель данных исследований - проверка соответствия характеристик ОИ требованиям рентгеновской голографии.

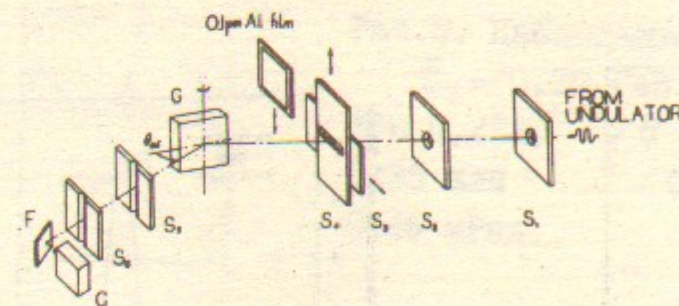


Рис.2. Схема проведения абсолютных измерений спектрально-угловых характеристик ОИ.

Абсолютные измерения спектрально-угловых характеристик ОИ были выполнены с использованием монохроматора скользящего падения (рис.2) со сферической решеткой (G) радиуса 2м, $p = 600$ нт/мм, покрытой золотом. Угол дифракции $\theta_{dif} = 5^\circ$ выбран

вследствии того, что при меньшем угле дифракции увеличивается рассеянный фон, а при большем — существенно уменьшается коэффициент отражения дифракционной решетки в первом порядке.

Калибровка монохроматора по длинам волн проводилась по $L_{2,3}$ -краю поглощения Al при введении алюминиевой пленки толщины $\sim 1000 \text{ \AA}$. Регистрация излучения осуществлялась с помощью канального умножителя (С) ВЭУ-6 с фотокатодом $CsI(F)$.

Монохроматор работает без входной щели, возможность чего обусловлена малыми размерами источника излучения $\delta_x \times \delta_y = 0,25 \times 0,081 \text{ мм}$ (режим с полной связью $\mathcal{E} \sim 1$). Коллиматоры $S_1 S_2$ и $S_5 S_6$ необходимы для подавления фона, связанного с излучением из краев поворотных магнитов. Как показали спектральные измерения, интенсивность излучения из поворотных магнитов в диапазоне длин волн $100+300 \text{ \AA}$ составляет не более 5% от интенсивности ОИ при $\theta = 0$. Угловая апертура наблюдения определялась входной диафрагмой ($S_3 S_4$) $0,2 \times 0,2 \text{ мм}$ и расстоянием до источника 555 см и составляла $0,036 \text{ мРад}$. Эффективный угловой размер области наблюдения первой гармоники определяется как в (2), таким образом при $E_e = 510 \text{ МэВ}$ $\Delta\theta_{\lambda_1} = 0,32 \text{ мРад}$, а при $E_e = 390 \text{ МэВ}$ $\Delta\theta_{\lambda_1} = 0,41 \text{ мРад}$. Как видно, угловая апертура примерно в 10 раз меньше углового размера первой гармоники. Малый угловой размер входной диафрагмы позволил исследовать непосредственно спектрально-угловую плотность ОИ.

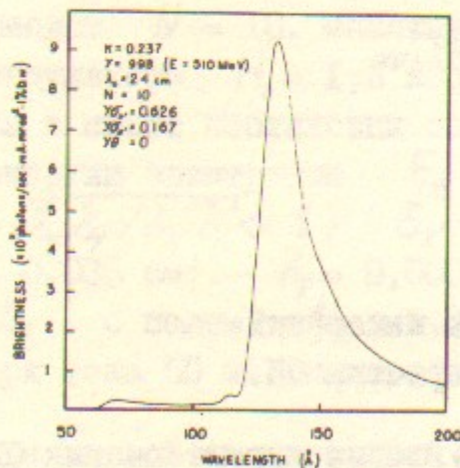


Рис.3. Расчетный спектр ОИ.
 $E_e = 0,51 \text{ ГэВ}$ ($\gamma = 998$),
 $K = 0,237$, $\theta = 0$.

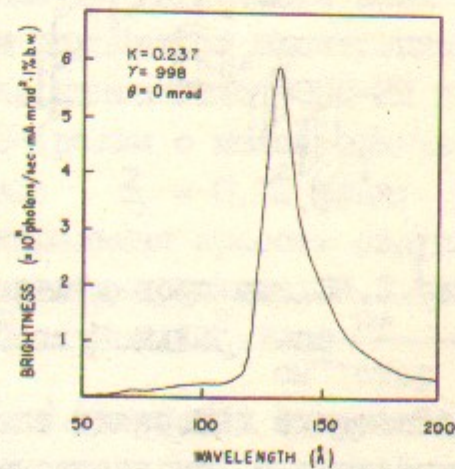


Рис.4. Наблюдаемый спектр ОИ.
 $E_e = 0,51 \text{ ГэВ}$ ($\gamma = 998$), $K = 0,237$, $\theta = 0$.

Угловой разброс электронов в пучке данного накопителя составляет $\delta_{x'} = 0,628$, $\delta_{y'} = 0,167$ на энергии $E_e = 0,51 \text{ ГэВ}$. Расчетная кривая спектрально-угловой плотности ОИ, учитывающая угловой разброс электронов и поперечные размеры пучка, приведена на рис.3. Длина волны первой гармоники ОИ $\lambda_1 = 132,9 \text{ \AA}$, спектральная ширина $(\Delta\lambda/\lambda)_1 = 0,144$, абсолютная спектрально-угловая плотность составляет $9,3 \cdot 10^{11} \text{ фот/с} \cdot \text{мА} \cdot \text{мРад}^2$ 1% спек. ширины, что в 1,4 раза выше по сравнению с наблюдаемой (рис.4), которая составляет $6,5 \cdot 10^{11}$. СИ из поворотного магнита ВЭП-2М при $E_e = 0,51 \text{ ГэВ}$ на той же длине волны составляет $3,1 \cdot 10^{10}$, что в 21 раз меньше наблюдаемого ОИ.

Как видно, на измеренном спектре не наблюдается вторая гармоника ОИ. Этот факт связан с малым коэффициентом отражения дифракционной решетки в соответствующей области длин волн излучения. Кроме того, спектрально-угловая плотность второй гармоники ОИ в данном случае в пятьдесят раз меньше первой. Для одновременного наблюдения первой и второй гармоник ОИ измерения были проведены при энергии электронов $E_e = 0,39 \text{ ГэВ}$. В этом случае длины волн обеих гармоник ОИ попадают в полосу пропускания используемого монохроматора $100+300 \text{ \AA}$.

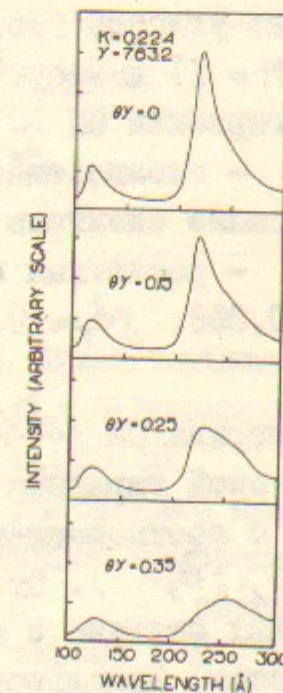


Рис.5. Наблюдаемые спектры ОИ.
 $E_e = 0,39 \text{ ГэВ}$ ($\gamma = 763$),
 $K = 0,224$, $\gamma\theta = 0; 0,15; 0,25;$
 $0,35$ или $\theta = 0; 0,20; 0,33;$
 $0,46 \text{ мРад}$.

Спектры ОИ, полученные при $E_e = 0,39$ ГэВ ($\gamma = 763,2$), $K = 0,224$ для $\theta = 0; 0,20; 0,33; 0,46$ мРад, или $\gamma\theta = 0; 0,15; 0,25; 0,35$ — приведены на рис.5. Спектры не нормированы на коэффициент отражения решетки, поэтому соотношения гармоник на спектре не является истинным. На рис.6 приведена зависимость длины волны первой и второй гармоник ОИ от угла наблюдения θ .

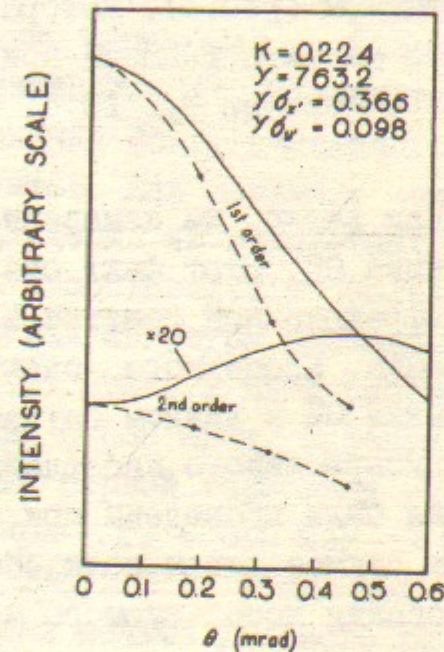
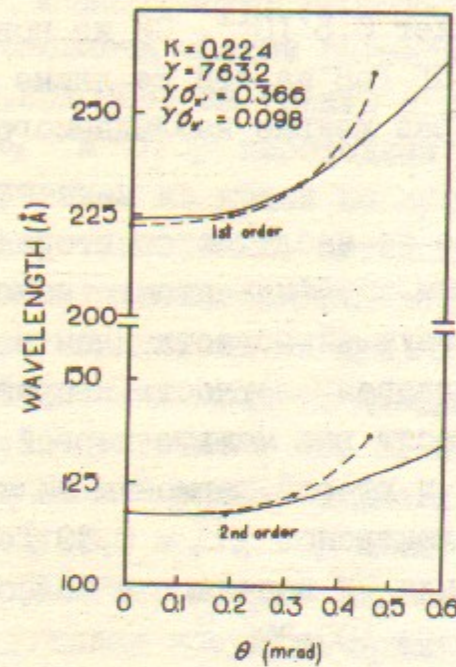


Рис.6. Угловая зависимость длины волны первой ($n = 1$) и второй ($n = 2$) гармоник ОИ.

----- наблюдаемая кривая (на основе спектров рис.5)
 ————— расчетная кривая ($\gamma\delta_x = 0,366, \gamma\delta_y = 0,098$)

Рис.7. Угловая зависимость спектрально-угловой плотности первой ($n = 1$) и второй ($n = 2$) гармоник ОИ

----- наблюдаемая кривая (на основе спектров рис.5)
 ————— расчетная кривая ($\gamma\delta_x = 0,366, \gamma\delta_y = 0,098$)

Угловой разброс электронов и спектральная ширина ОИ $(\Delta\lambda/\lambda)_n = 1/Nn$ приводит к смещению длины волны первой и второй гармоник ОИ и нарушению зависимости от θ^2 по сравнению с соотношением (2) в области малых углов наблюдения ($\theta \ll \delta_x, \delta_y$). Отличие наблюдаемых угловых зависимостей от расчетных связано с неточностью величин углового разброса электронов, использованных в расчетах. Этим же вызвано отличие, наблюдаемое в зависимостях спектрально-угловой плотности ОИ от угла наблюде-

ния θ . Полученные кривые нормированы на расчетное значение при $\theta = 0$.

Измерения спектрально-угловых характеристик ОИ не обеспечивают непосредственной информацией об эффективном поперечном размере источника излучения, имеющей важное значение при постановке голографических экспериментов. Согласно размерам электронного пучка в накопителе, излучение из спирального ондулятора ВЭПП-2М должно обладать достаточно высокой степенью пространственной когерентности. Для энергии электронов $E_e = 0,51$ ГэВ при поперечных размерах пучка в ондуляторе $d_x = 2,36 \cdot \delta_x = 0,059$ см, $d_y = 2,36 \cdot \delta_y = 0,019$ см размеры области когерентности на расстоянии $R = 520$ см от источника составляют $c_x = \lambda_1 R / d_x = 110$ мкм, $c_y = \lambda_1 R / d_y = 360$ мкм на длине волны ОИ $\lambda_1 = 130$ Å. Эксперименты по наблюдению реальной пространственной когерентности ОИ ондулятора ВЭПП-2М проводились методом получения интерференционной картины от двух малых (~ 6 мкм) отверстий в кремниевой мембране толщиной 2 мкм, покрытой 0,3 мкм золота, и последующего увеличения расстояния между отверстиями до исчезновения интерференционных полос.

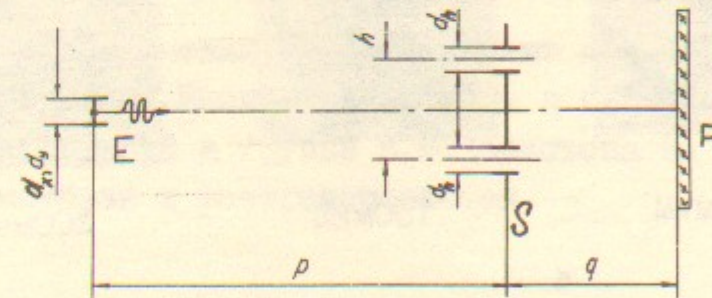


Рис.8. Схема наблюдения пространственной когерентности ОИ.

d_x, d_y — поперечные размеры источника излучения (E) ($d_x = 0,059$ см, $d_y = 0,019$ см);
 p — расстояние между источником (E) и поглощающим экраном (кремниевой мембраной) (S) ($p = 520$ см);
 h, d_h — расстояние между отверстиями и диаметр отверстий в экране (S) соответственно ($d_h \sim 6$ мкм);
 q — расстояние между экраном (S) и экраном-регистратором (рентгенорезистом) (R) ($q = 31$ см).

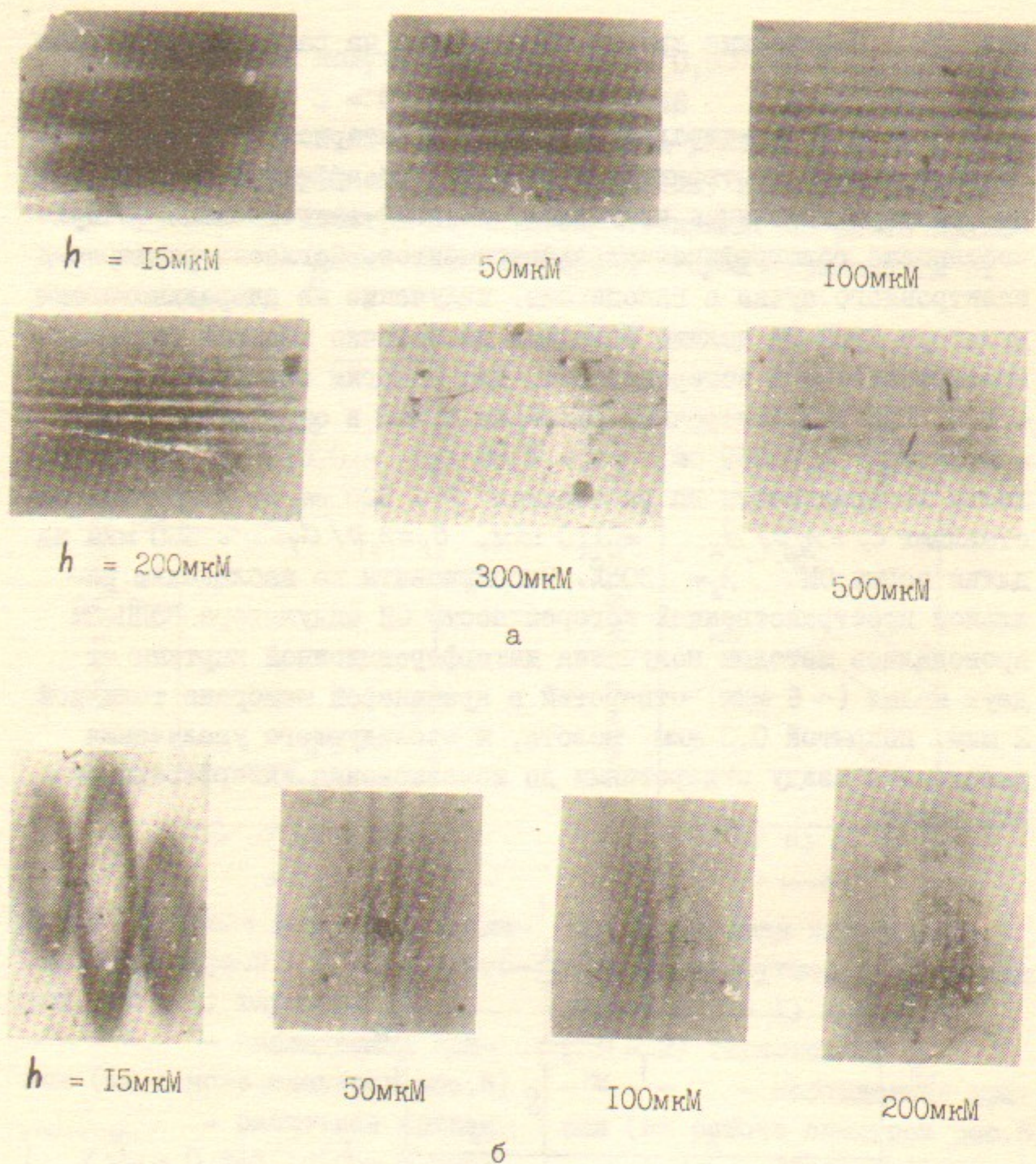


Рис.9. Интерференционные картины, полученные для различных расстояний между отверстиями h при наблюдении вертикальной (а) и горизонтальной (б) пространственной когерентности ОИ. Типичная экспозиция $I \cdot t \sim 20 \text{ А} \cdot \text{с}$.

Оптическая схема экспериментов изображена на рис.8. В качестве экрана-регистратора интерференционной картины использовался негативный рентгенорезист ЭЛН-200 ($D \sim 10 \text{ Дж/см}^3$, $\mu \sim 10^5 \text{ см}^{-1}$), нанесенный слоем толщиной $0,2 \text{ мкм}$ на кремниевую основу. В соответствии с описанными выше спектрально-угловыми измерениями, длительность экспозиции рентгенорезиста в данном эксперименте оценивается величиной $I \cdot t \sim 10 \text{ А} \cdot \text{с}$, где I - ток в накопителе. На рис.9 приведены интерференционные картины, полученные для различных расстояний между отверстиями при наблюдении вертикальной (а), горизонтальной (б) пространственной когерентности.

Согласно сделанным оценкам, ОИ удовлетворяет требованиям для использования в рентгеновской голографической микроскопии. Абсолютные измерения характеристик ОИ из спирального ондулятора, установленного на накопителе ВЭШ-2М, хорошо согласуются с расчетами спектрально-угловой плотности ОИ, учитывающими параметры электронного пучка в накопителе. Эксперименты по наблюдению пространственной когерентности ОИ по схеме Кнга демонстрируют правильность оценок чувствительности рентгенорезиста, используемого в качестве регистратора интерференционной картины, и величины пространственной когерентности ОИ.

В заключении авторы считают долгом выразить свою благодарность П.М.Иванову за помощь в проведении спектрально-угловых измерений и группе В.В.Чеснокова за изготовление кремниевых мембран и рентгенорезистов.

Литература

1. R.Feder et al.: Science, 197, p. 259, 1977.
2. P.Horowitz, J.A.Howell: Science, 178, p. 608, 1972.
3. B.Nieman et al.: Appl. Opt., 15, p. 1882, 1976.
4. B.Nieman et al.: NIM, p. 367, 1983.
5. R.P.Haelbich et al. A Scanning Ultrasoft X-ray Microscope with Large Aperture Reflection Optics for Use with Synchrotron Radiation: Preprint DESY SR-79/190, 1979.
6. А.М.Кондратенко, А.Н.Скринский: Автометрия, 2, стр.3, 1977.
7. Г.Н.Кулипанов, А.Н.Скринский: УФН, 122, вып.3, стр.369, 1977.
8. S.Kikuta et al.: Opt. Commun., 5, 86, 1972.
9. O.J.Sasoccio: J. Opt. Soc. Am., 57, p. 966, 1967.
10. S.Hoki et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 13, p. 1385, 1974.
11. V.V.Aristov et al.: Opt. Commun., 34, N 3, p. 332, 1980.
12. D.F.Alferov et al.: Part. Acceler., 9, p. 223, 1970.
13. A.N.Didenko et al.: Sov. Phys., 49, p. 973, 1979.
14. A.S.Artamonov et al.: NIM, 177, p. 239, 1980.
15. H.Maezawa et al.: NIM, 208, 151, 1983.
16. Д.Ф.Алферов, Ю.А.Башмаков: "Спектрально-угловые характеристики излучения пучка релятивистских заряженных частиц в ондуляторе", препринт ФИАН СССР, №77, 1983.
17. Г.Я.Кезерашвили и др.: Материалы Всесоюзной конференции по использованию СИ (СИ-82), Новосибирск, 1982.
18. A.M.Kondratenko, A.N.Skrinsky: "The use of radiation from the storage rings in X-ray holography of microobjects", Preprint INP 75-102, Novosibirsk, 1975.
19. E.S.Gluskin et al.: NIM, 208, p. 393, 1983.

Е.С.Глускин, П.П.Ильинский, Г.Я.Кезерашвили,
Г.Н.Кулипанов, В.Ф.Пиндурин, А.Н.Скринский,
А.С.Соколов

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ СПИРАЛЬНОГО ОНДУЛЯТОРА,
УСТАНОВЛЕННОГО НА НАКОПИТЕЛЕ ВЭП-2М, КАК ИСТОЧ-
НИКА ДЛЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ МИКРОСКОПИИ И ГОЛОГРАФИИ

Препринт
№ 83-146

Работа поступила - 22 декабря 1983 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 30.XII-1983 г. МН 03516
Фс мат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 166

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90