

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 78 -55

**О.П.Алешко - Ожевский, Ю.Г.Кузнецов,
В.Ф.Пиндюрин, В.Н.Рожанский, М.А.Шеромов**

**РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОПОГРАФИЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРО -
НОВ ВЭПП - 3**

Новосибирск

1978

О.П.Алешко-Ожевский, Ю.Г.Кузнецов, В.Ф.Пиндюрин, В.Н.Ро-
жанский, М.А.Шеромов

РЕНТГЕНОВСКАЯ ТОПОГРАФИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЭШ-3.

АННОТАЦИЯ

Обсуждаются преимущества накопителей электронов, как источников синхротронного излучения, для целей рентгеновской топографии кристаллов. Приводятся выражения, удобные для оценки характеристик излучения различных источников. Рассмотрены особенности методики работы для случаев "белого" и монохроматизированного излучений. Приводятся примеры использования накопителя ВЭШ-3 для наблюдения фазовых переходов, электрических и магнитных доменов, для получения топограмм от сильно нарушенных и сильно поглощающих кристаллов. Обсуждаются другие возможности использования синхротронного излучения.

I. Введение.

Одна из характерных особенностей физики высоких энергий в последнем десятилетии - появление синхротронов и накопительных колец, позволяющих ускорять электроны (позитроны) до энергии в несколько Гэв. Возникающее при работе этих установок магнитно-тормозное излучение (синхротронное излучение, СИ) оказалось чрезвычайно перспективным для проведения исследований в различных областях физики, в том числе и для рентгеновской топографии кристаллов. Синхротронное излучение обладает уникальными свойствами, позволяющими приступить к задачам, решение которых было нерешимым при использовании обычных рентгеновских источников. Появившиеся сообщения [1-5] о применении синхротронного излучения для рентгеновской топографии свидетельствуют о том, что новый источник излучения быстро осваивается исследователями разных стран.

Цель настоящей работы - обсудить некоторые перспективы развития этих исследований.

II. Источник излучения.

Принципы получения изображения (топограммы) кристалла с помощью рентгеновского излучения и механизм формирования контраста изображения дефектов обсуждаются в недавно опубликованном обзоре [4] и более ранних работах. Для получения топограмм хорошего качества желательно иметь источник, дающий возможно более интенсивный,

высоко параллельный пучок рентгеновских лучей определенной длины волны (источник с высокой спектральной яркостью или удобного спектрального состава). Кроме того желательно, чтобы площадь сечения пучка рентгеновских лучей была достаточной для освещения исследуемой части кристалла. Этим условиям хорошо удовлетворяют пучки СИ, получаемые от электронных синхротронов и накопителей на энергии в несколько ГэВ.

Наиболее привлекательными источниками излучения являются накопительные кольца, на которых в настоящий момент выполняется основная часть работы с СИ. По сравнению с синхротронами накопители имеют больший средний ток, высокую стабильность орбиты, постоянство спектра и интенсивности синхротронного излучения, существенно меньшие поперечные размеры электронного пучка и меньший собственный угловой разброс электронов. Время жизни электронного пучка в накопителе (время, за которое ток уменьшается в e раз) составляет несколько часов, что обуславливает низкий уровень радиационного фона вблизи кольца накопителя и дает возможность работать с СИ на близких расстояниях от точки излучения. Все это обеспечивает большую яркость накопителей и существенно упрощает постановку экспериментов. В ближайшие годы намечается ввод в действие накопителей на еще более высокие энергии и модернизация некоторых существующих с целью создания специализированных источников СИ. Предполагается многократное увеличение интенсивности пучков синхротронного излучения. Однако, указанные преимущества накопителей перед синхротронами несколько не исключают возможности получения с помощью последних уникальных результатов [2,4,5].

Синхротронное излучение выводится из накопителя (синхротрона) по специальным вакуумным каналам. В случае проведения экспериментов в рентгеновской области спектра такие каналы обычно заканчиваются окном из бериллиевой фольги.

СИ является классическим, точно рассчитываемым эффектом, теория которого хорошо развита и подтверждена экспериментальными исследованиями. Качественное рассмотрение свойств синхротронного излучения дается в [6-II], строгие количественные результаты изложены в работах [6,9-14]. Здесь мы лишь кратко остановимся на некоторых свойствах СИ, существенно отличающих его от излучения рентгеновских трубок. Мы ограничим также свое рассмотрение описанием СИ из накопителей, как основных источников такого излучения.

Мощность пучка СИ. Электроны, движущиеся в магнитном поле накопителя, излучают со всех точек своей траектории. Мощность пучка

СИ, просуммированная по всем длинам волн излучения, проинтегрированная по вертикальному углу, в миллирадиан радиального угла (в плоскости накопительного кольца) дается выражением:

$$P(\text{Вт/мрад}) = 14 E^4 I / R, \quad (1)$$

где: E – энергия электронов в ГэВ, I – средний ток в накопителе в Амперах, R – радиус кривизны траектории электронов в точке излучения в метрах. Практически вся высокочастотная мощность, получаемая ускоряющим резонатором накопителя, выделяется в виде синхротронного излучения. Общая мощность СИ (со всей орбиты электронов) некоторых накопителей достигает десятков и сотен Квт [7], что является огромной величиной при сравнении с рентгеновскими трубками, преобразующими в коротковолновое излучение меньше 0,1% энергии бомбардирующих анод электронов. Большая мощность пучка СИ может потребовать в некоторых случаях принятия специальных мер по предохранению кристаллов от теплового и радиационного повреждений.

Спектр. Синхротронное излучение имеет непрерывное спектральное распределение, простирающееся от области жестких рентгеновских лучей до видимого диапазона длин волн. Спектральная мощность пучка СИ из накопителя – мощность излучения на данной длине волны λ в относительный интервал длин волн $\Delta\lambda/\lambda$ и в единицу радиального угла может быть описана выражением:

$$P_\lambda(\text{Вт/мрад}) = 48,6 \frac{E \cdot I}{\lambda} \eta\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right) \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \quad (2)$$

Здесь:

$$\lambda_c = 5,59 R / E^3 \quad (3)$$

– так называемая критическая длина волны синхротронного излучения в ангстремах,

$$\eta(\lambda/\lambda_c) = \frac{1}{(\lambda/\lambda_c)} \int_{1/(\lambda/\lambda_c)}^{\infty} K_{5/3}(x) dx \quad (4)$$

– универсальная спектральная функция СИ, график которой показан на рис.1; $K_{5/3}(x)$ – функция Макдональда.

Максимум распределения спектральной мощности P_λ в заданном интервале $\Delta\lambda/\lambda$ приходится на длину волны излучения $\lambda_{max} = 0,75 \lambda_c$.

Для современных накопителей на энергии в несколько ГэВ λ_{max} лежит в области рентгеновских длин волн. Так, например, для накопителя ВЭШ-3 (встречные электрон-позитронные пучки, Новосибирск; $R = 6,15$ м, $E_{max} = 2,2$ ГэВ, $I = 0,1$ А), работающее при энергии электронов $E = 2$ ГэВ, $\lambda_{max} = 3,2$ Å.

Существенным свойством спектра СИ является крутое спадание интенсивности со стороны длин волн короче λ_c . Такой характер изменения спектра позволяет, в случае необходимости, выбрать на коротковолновом склоне определенную длину волны и этим в значительной степени избавиться при монохроматизации излучения от присутствия в отраженном пучке высших порядков отражения, соответствующих коротким длинам волн, кратным выбранной длине волны. В этом отношении наиболее удобны те системы плоскостей кристалла, для которых второй порядок отражения запрещен законом погасания пространственной группы. При этом вклад интенсивности с $\lambda/2$ отсутствует, а вклад от $\lambda/3$ — исчезающе мал. Так, например, для монохроматоров со структурой алмаза (кремний, германий) будет отсутствовать вклад с $\lambda/2$ для рефлексов с низшими нечетными значениями индексов. Возможны также другие способы подавления коротковолновых порядков отражения [9].

Со стороны длин волн излучения, больших чем λ_c , спектральное распределение мощности при фиксированном $\Delta\lambda/\lambda$ медленно спадает как $\lambda^{-4/3}$. Бериллиевая фольга на выходе канала СИ существенно меняет вид длинноволновой части спектра, поглощая кванты с малой энергией. Реально для ВЭШ-3 при толщине бериллиевой фольги в 300 мкм в спектре остается излучение с длинами волн от 0,5 до 6 Å, что хорошо соответствует требуемому спектральному интервалу для целей рентгеновской топографии.

Угловая расходимость. По своей природе синхротронное излучение — остро направленное, что существенно для целей топографии. Ультррелятивистский электрон излучает кванты СИ вперед по касательной к своей орбите.

Точнее — внутрь узкого конуса; угол раствора которого уменьшается с увеличением энергии электрона. В результате, практически вся мощность СИ электронов, движущихся в накопителе с энергией 2–3 ГэВ, оказывается сосредоточенной вблизи плоскости орбиты накопителя.

Для оценок вертикальной угловой расходимости пучков СИ, являющейся также функцией длины волны, можно использовать выражение:

$$\Psi_{\text{СИ},\lambda} (\text{мрад}) = \sqrt{\Psi_{\lambda}^2 + \theta_e^2} \quad (5)$$

Здесь: θ_e — угловой разброс электронов в точке излучения по вертикали, Ψ_{λ} — собственная угловая расходимость синхротронного излу-

чения для произвольной длины волны.

$$\Psi_{\lambda} = \Psi_{\lambda_c} \nu(\lambda/\lambda_c) \quad (6)$$

где: $\nu(\lambda/\lambda_c)$ — универсальная функция углового распределения (рис.2); Ψ_{λ_c} — полуширина углового распределения мощности излучения при $\lambda = \lambda_c$, определяемая выражением:

$$\Psi_{\lambda_c} (\text{мрад}) = 0,82/E. \quad (7)$$

Для накопителя ВЭШ-3 при работе с $E = 2$ ГэВ естественная вертикальная расходимость для длин волн 0,5 – 2 Å имеет значение $(1 \pm 4) \cdot 10^{-4}$ радиан. Горизонтальная (радиальная) расходимость определяется геометрией канала СИ. В настоящее время на ВЭШ-3 выводится сектор излучения 10 мрад, который затем делится на несколько пучков. Такие условия позволяют получать топограммы кристаллов не заботясь о добавочной коллимации.

Яркость. Удобной характеристикой, по которой можно сравнивать различные источники, является спектральная яркость B_{λ} — мощность излучения определенного интервала длин волн с единицы площади источника в единицу телесного угла. Спектральная яркость накопителя-источника СИ сильно зависит от размеров и углового разброса электронного пучка в точке излучения и может быть оценена как:

$$B_{\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{\Delta_r \Delta_z \sqrt{\Psi_{\lambda}^2 + \theta_e^2}} \quad (8)$$

где: Δ_r, Δ_z — соответственно, эффективные радиальный и вертикальный размеры источника излучения (для ВЭШ-3 при $E=2$ ГэВ $\Delta_r \times \Delta_z = 2 \times 0,2 \text{ мм}^2$).

Расчетные данные и эксперимент показывают, что по спектральной яркости современные накопители типа ВЭШ-3 превосходят лучшие источники рентгеновского излучения (трубка с вращающимся анодом, 30–60 кВт) примерно в 10^3 раз в интервале характеристической длины волны. Зависимость спектральной яркости от длины волны излучения для накопителя ВЭШ-3 показана на рис.3.

Поляризация. В отличие от обычного рентгеновского излучения СИ в значительной степени поляризовано. В плоскости орбиты поляризация линейная и равна 100%. При этом вектор напряженности электрического поля перпендикулярен направлению СИ и лежит в плоскости орбиты, а вектор магнитного поля перпендикулярен ей. Излучение, не лежащее в орбитальной плоскости, поляризовано эллиптически, причем по разные стороны от неё имеет место левая и правая поляризации.

Поляризация зависит от длины волны и угла отклонения от орбиты [6,9-14].

Наличие поляризации является существенным при оценке интенсивности рефлексов и при анализе контраста изображения дефектов реальной структуры кристалла. Для того, чтобы исключить влияние этого фактора, следует работать с рефлексами, располагающимися в вертикальной плоскости, так как при такой геометрии электрический вектор падающей волны перпендикулярен дифракционному вектору. Однако, поляризация СИ может оказаться очень ценным свойством при исследовании анизотропных или поляризованных объектов. В этом случае изменение направления электрического вектора или степени поляризации пучка может дать информацию, которая не может быть получена другими методами.

III. Методика эксперимента.

Исследования с использованием "белого" спектра.

Наличие у синхротронного излучения хорошей естественной коллимации позволяет производить топографирование кристаллов без монохроматизации первичного пучка. Эта методика имеет ряд преимуществ.

Во-первых, это максимальная светосила. При условии, когда образец помещается в непосредственной близости от вакуумированного канала, синхротронное излучение попадает на исследуемый кристалл без потерь на монохроматизацию, и экспозиции минимальны. Если при этом есть возможность далеко (20-50 м) удалиться от источника, то можно иметь пучок с размерами, достаточными для получения топограмм от больших кристаллов без применения сканирования. В этом случае может быть легко обеспечено хорошее пространственное разрешение.

Во-вторых, простота эксперимента. Непрерывный спектр позволяет не производить точную установку кристалла в пучке, поскольку исследуемая плоскость кристалла "сама выбирает" из спектра длину волны, соответствующую брэгговскому условию. В результате этого возможно существенное упрощение гониометрических устройств и понижение требований к точности сканирующих устройств в сравнении с обычной рентгеновской топографией.

В-третьих, это большая информация, получаемая за счет одновременной регистрации на фотопластинке многих лауэ-пятен, представляющих собой различные топографические проекции кристалла при разных длинах волн.

Недостатком работы со сплошным спектром является то, что большинство рефлексов представляет собой суперпозицию изображений от некоторой основной длины волны и её высших порядков. Это затрудняет интерпретацию полученных картин, поскольку присутствующие волны обладают различными экстинкционными длинами. Эффект наложения отражений высших порядков и рассеяние немонахроматического излучения на разориентированных областях кристалла или его дефектах может приводить к уширению изображения дислокаций и существенному изменению контраста дефектов по сравнению с обычной рентгеновской топографией. По тем же причинам эта методика очень чувствительна к напряжениям, вызывающим искажения в решетке кристалла. В местах значительных напряжений, приводящих к изгибу плоскостей решетки, на изображении в направлении плоскости дифракции появляются полосчатые тени, выходящие иногда за контуры кристалла [5]. Величина теней увеличивается с возрастанием кривизны плоскостей кристалла и с расстоянием образец-детектор. Этот эффект дает полезную информацию о кривизне в нарушенных местах, однако может затруднять рассмотрение других деталей.

Заметим, что наличие непрерывного спектра может явиться причиной появления сильного фона, если в первичном пучке окажутся держатель кристалла или другие детали устройства. Дифракция от микрокристаллитов этих деталей образует мощный "дождь", который многократно усиливается, если в эксперименте производится сканирование.

Пространственное разрешение при рентгеновской синхротронной топографии можно определить выражением:

$$\delta_{r,z}^2 = \delta_p^2 + \left(\frac{\Delta_{r,z}}{L_1} L_2\right)^2 + \delta_k^2, \quad (9)$$

где δ_p - разрешение регистрирующего устройства, L_1 - расстояние от источника до образца, L_2 - расстояние от образца до регистрирующего устройства, $\Delta_{r,z}$ - эффективные размеры источника, δ_k - разрешение, обусловленное дифракцией от дефектов кристалла. Последний член зависит от спектрального состава рассеянного излучения (присутствия высших порядков), размеров и характера дефектов, их расположения в кристалле. В случае, если при съёмке используется монохроматическое излучение, в выражение (9) следует также ввести член, определяемый характеристиками монохроматора (геометрия размещения, спектральная ширина излучения, выделяемая монохроматором, или ширина его кривой качания. Из выражения (9) следует,

что для получения высокого разрешения желательно иметь монохроматическое излучение, малые эффективные размеры источника, достаточно большое расстояние источник - кристалл и возможно меньшее кристалл-детектор. Для избавления от вклада отражений высших порядков можно воспользоваться свойствами спектра СИ и соответствующим выбором брэгговского угла (см. раздел "спектр"). Детектор должен обладать высоким разрешением (не хуже 10 мкм) и располагаться перпендикулярно к дифрагированному лучу. Для регистрации топограмм с успехом можно использовать фотопластинки для ядерных исследований (например, МР-10 мкм или Р-50 мкм). Их собственное разрешение может составлять 1-5 мкм при условии проявления при пониженной температуре.

Однако, техника фоторегистрации не адекватна тем возможностям, которые представляет интенсивность СИ. В этом отношении перспективными являются системы визуализации изображения с помощью высокоразрешающего, достаточно чувствительного и контрастного флуоресцентного экрана. Изображение на экране увеличивается до желаемых размеров с помощью оптической системы и регистрируется телевизионной аппаратурой. Подобная система регистрации описана в работе [15] и была успешно применена для целей топографии при обычном рентгеновском источнике. Возможно также использование телевизионных систем с ортиконом, плембиконом и другими видиконами [16,17], которые превосходят упомянутую систему по светосиле и на три порядка более чувствительны к рентгеновскому излучению, чем фотопластинки. К сожалению, в настоящее время их разрешение не лучше 15-25 мкм, что не всегда достаточно для наблюдения деталей картины. Система визуализации позволяет непосредственно наблюдать динамические изменения дифракционного изображения и, при необходимости, производить их регистрацию.

Использование монохроматического излучения.

Большая яркость источника синхротронного излучения позволяет надеяться на получение интенсивных пучков квантов с высокой степенью монохроматичности ($\Delta\lambda/\lambda \sim 10^{-6}$) и малой угловой расходимостью (~ 1 угл.сек). Для этого могут быть использованы многокристалльные системы монохроматизации, подобные описанным в работах [16,18]. Имея интенсивность, достаточную для работы системы визуализации, такая система, кроме того, может иметь чувствительность во много раз более высокую, чем у лучших установок с обычными источниками. Это открывает возможности наблюдения незна-

чительных искажений решетки кристалла вблизи дефектов или полей напряжений, обусловленных электрическими, магнитными, температурными и концентрационными факторами. Уступая по светосиле и простоте эксперимента случаю непрерывного спектра, методика использования монохроматического излучения может обеспечить большую точность и однозначность получаемых результатов, а также относительно меньший фон. Кроме того, использование кристаллов с косым срезом в системе монохроматизации позволяет, в принципе, менять геометрию пучка - увеличивая или уменьшая его сечение по сравнению с первоначальным. Это может оказаться полезным для оптимизации работы с кристаллами различного размера. Важным качеством этой методики является возможность непрерывного изменения длины волны, что позволяет приступить к решению принципиально новых задач.

IV. Примеры использования синхротронного излучения.

Приведем несколько примеров получения рентгеновских топограмм при использовании "белого" спектра. Источником служил канал СИ накопителя ВЭШ-3. Кристалл размещался на расстоянии 5 м от точки излучения. Первые 2,5 м пучок проходил по вакуумированной трубе, а затем, после бериллиевого окна, по воздуху внутри толстостенной стальной трубы, заканчивающейся свинцовой пробкой с отверстием для свободного прохода СИ. Сечение пучка в месте расположения исследуемого кристалла: $1 \times 10 \text{ мм}^2$. Режим работы накопителя: $E = 2 \text{ ГэВ}$, $I = 10 \pm 30 \text{ мА}$. В 20-30 мм за кристаллом устанавливалась ловушка прямого пучка. Выше или ниже её в вертикальной плоскости на расстоянии 40-70 мм от кристалла размещалась кассета с фотоленкой для ядерных исследований. Для увеличения исследуемой площади образца в ряде случаев использовались сканирующие устройства. Кристалл приклеивался воском к краям отверстия в свинцовой шайбе, которая помещалась в гониометрическое устройство, либо зажимался в специальном держателе. Такая геометрия и использование специального проявления фотопластинок обеспечивали разрешение в вертикальном направлении 2-3 мкм и в горизонтальном направлении 5-6 мкм. Исследование топограмм показало, что детали размером меньше 12-15 мкм не наблюдались.

В этой работе мы не ставили целью подобное обсуждение деталей полученных топограмм, а лишь хотели на некоторых примерах продемонстрировать широкие возможности применения синхротронного излучения для целей рентгеновской топографии.

Фазовые переходы, наблюдение электрических и магнитных доменов.

Уникальные свойства СИ делают возможным непосредственное наблюдение поведения дислокаций, доменов и других элементов реальной структуры в зависимости от таких факторов, как температурное, магнитное, электрическое, силовые поля. При этом можно наблюдать преобразования сегнетоэлектрических и магнитных доменов, исследовать явления гистерезиса, реальную структуру при фазовых переходах, процессы рекристаллизации и деформации.

На рис.4а представлена часть лауэ-топограммы от кристалла ДКДР при комнатной температуре. Толщина пластинки 380 мкм. При охлаждении одной поверхности образца жидким азотом на картине дифракции (рис.4б) появляются тройные изображения кристалла, что хорошо видно для рефлексов типа $11\bar{6}$ (рис.4в,г). Одним из объяснений появления новых изображений может быть возникновение в сегнетоэлектрической фазе (ниже 213°K) разориентированных полидоменных комплексов [19]. В этом случае при дифракции может происходить расщепление узла обратной решетки, причем число новых узлов должно соответствовать количеству комплексов. В нижней части кристалла, где произошел фазовый переход, наблюдается два таких комплекса, разориентированных по отношению друг к другу на угол около 1° . Полученный эффект требует дополнительных исследований, однако, ясно, что методика использования "белого" синхротронного излучения позволяет одновременно и независимо (под разными брэгговскими углами) наблюдать поведение доменных комплексов и новых структурных фаз. Это практически недоступно для обычных источников.

Используя ту же технику для образца ДКДР с другой ориентировкой (Z - срез, оптическая ось наклонена на $3,5^{\circ}$ в вертикальной плоскости по отношению к первичному пучку), мы получили изображение сегнетоэлектрических доменов (рис.5а,б). Видны два взаимно перпендикулярных направления доменов - вдоль осей $[010]$ и $[100]$. Ширина изображений доменов ~ 50 мкм, проекция стенок доменов имеет ширину 20-25 мкм.

Заметим, что при рентгенотопографическом методе наблюдаются не сами стенки, а напряжения (искажения) в решетке кристалла, которые обусловлены природой домена. Это справедливо и для случая магнитных структур, где причиной возникновения контраста служат магнитострикционные напряжения. О регистрации антиферромагнитных доменов методом синхротронной топографии в кристалле KCoF_3 при 77°K упоминается в работе [4]. Мы наблюдали магнитные домены при 300°K

в эпитаксиальных пленках со структурой граната при съёмке методами отражения (рис.6) и прохождения.

Наблюдение сегрегационных полос. На рис.7 приведена топограмма поверхности среза самарий-галлиевого граната. Ось $[111]$ перпендикулярна поверхности пластинки. Среди различных дефектов хорошо видны сегрегационные полосы, причиной появления которых на снимке является периодическое изменение параметра решетки кристалла из-за выделения примесей в процессе выращивания его из раствора в расплаве.

В методе "белого" пучка получается одновременно большое количество рефлексов, причем каждый из них обусловлен рассеянием излучения определенной длины волны. Используя метод отражения и зависимость глубины проникновения от энергии падающего кванта, можно, рассматривая рефлекс от разных длин волн, получить представление о совершенстве структуры образца на различной его глубине. Такие сведения важны при исследовании или производстве эпитаксиальных пленок. Метод прохождения дает проекцию дефектов структуры от всего объема образца. Точная настройка на определенную длину волны может быть обеспечена с помощью устройства монохроматизации.

Топография сильно поглощающих кристаллов. В этой области исследований синхротронная рентгеновская топография представляет большие возможности благодаря огромной интенсивности источника и присутствию в спектре коротких волн, для которых коэффициенты поглощения существенно меньше. За несколько минут можно получить набор топограмм от образца со значением показателя поглощения $\mu t \sim 1000$, где: μ - линейный коэффициент поглощения кристалла, а t - его толщина. На рис.8 представлен участок лауэ-топограммы от кристалла бастрона. Ось C кристалла располагалась в направлении первичного пучка. Рефлексы в значительной степени перекрываются, однако, несмотря на это, на них хорошо видны сегрегационные кольца. Выделения примесей более отчетливы вблизи края кристалла. При длине волны около $1,5 \text{ \AA}$ $\mu t \sim 1000-1300$.

Сильно нарушенные кристаллы. Для кристалла с относительной разориентировкой зерен порядка 500 угл.сек. обычная рентгеновская топография при одной съёмке дает изображение только около 15% поверхности кристалла [2]. В случае использования синхротронного излучения выявляется структура практически всего кристалла, поскольку непрерывный спектр обеспечивает выполнение брэгговского условия для блоков значительно разориентированных. На рис.9 представлены несколько рефлексов для кристалла гидросодалита, ширина кривой

зращения которого составляла 150–200 угл.сек. Видна сильно нарушенная структура роста, однако, не выявленных дифракцией областей не наблюдается.

У. Другие возможности топографии с использованием СИ.

Наличие непрерывного спектра и возможность сколь угодно плавно перемещаться по нему с помощью поворота монохроматора открывает новые возможности при экспериментах с длинами волн, близкими к К-краю поглощения различных элементов, образующих кристалл. Топографирование при длинах волн слева и справа вблизи К-края поглощения какого-либо из них должно давать существенное изменение контраста в случае неравномерного распределения этого элемента в образце. Это методика должна обладать несравненно большей, по сравнению с обычной рентгеновской топографией, чувствительностью в вопросах выявления сегрегационных полос, распределения примесей на дислокациях, дефектах упаковки и других несовершенствах структуры. Такие эксперименты помогут выяснить природу деформаций, получить сведения о глубине нарушенных слоев.

Хороший обзор возможностей применения синхротронного излучения для топографических исследований при высокотемпературной кристаллизации, кристаллизации из растворов и для изучения ранних стадий пластической деформации сделан в работе [4]. Можно полагать, что СИ окажется верным помощником при контроле процессов роста и качества кристаллов.

Синхротронное излучение открывает широкие перспективы для исследований в области рентгеновской оптики идеальных кристаллов. Высокая яркость источников, возможности изменения длины волны и получения высоко коллимированных пучков с узким спектральным интервалом позволяют подвергнуть проверке положения теории динамического рассеяния, выведенные при допущениях плоской волны и когерентности излучения. Привлекательна также возможность получения топограмм при когерентном освещении, которое может быть обеспечено на основе СИ.

Авторы благодарны А.Н.Лобачеву, Л.А.Шувалову, Ю.С.Кузьминову и В.П.Чепарину за предоставление образцов.

Институт кристаллографии АН СССР, Москва
Институт ядерной физики СО АН СССР, Новосибирск.

Литература

1. T. Tuomi, K. Naukkarinen, P. Rabe. Phys. Stat. Sol (a), 25, 93, 1974
2. M. Hart. J. Appl. Cryst., 8, 436, 1975
3. J. Bordas, A. M. Glaser, H. Hauser. Phil. Mag., 32, 471, 1975
4. B. K. Tanner. Prog. Crystal Growth Charact., 1, 23, 1977
5. B. K. Tanner, D. Midgley and M. Safa. J. Appl. Cryst., 10, 281, 1977
6. Синхротронное излучение в исследовании твердых тел. Сборник статей, М., "Мир", 1970
7. С. П. Капица. Природа, №10, 22, 1971. Вестник АН СССР, №8, 28, 1975
8. М. А. Мокульский. Природа, №3, 6, 1976
9. Г. Н. Кулипанов, А. Н. Скринский. УФН АН СССР, 122, 369, 1977
10. Дж. Джексон. Классическая электродинамика, М., "Мир", 1965
11. В. Н. Байер, В. М. Катков, В. С. Фадин. Излучение релятивистских электронов, М., "Атомиздат", 1973
12. О. Куликов. Труды ФИАН, 80, 3, 1975
13. А. А. Соколов, И. М. Тернов. Релятивистский электрон, М., "Наука", 1974
14. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Теория поля, М., "Наука", 1973
15. W. Hartmann, G. Markewitz, U. Rattenmaier and H. J. Queisser. Appl. Phys. Lett., 27, 308, 1975
16. H. Hashizume, A. Iida, K. Kohra. Jap. J. Appl. Phys., 14, 1433, 1975
17. H. Hashizume, K. Kohra and Y. Oguro. J. Appl. Cryst., 8, 249, 1975
18. J. H. Beament, M. Hart. J. Phys. E. Sci. Instrum., 7, 823, 1974
19. С. Х. Акназаров, Л. Г. Шабельников, В. Ш. Шехтман. ФТТ, 17, 30, 1975

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1. Универсальная спектральная функция синхротронного излучения.
 Рис.2. Универсальная функция углового распределения СИ.
 Рис.3. Спектры синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 при различных энергиях электронов. Спектральная яркость представлена в зависимости от длины волны. Ток накопителя - 100 мА, магнитный радиус 6,15 м. Пунктиром показано изменение в спектрах при поглощении длинноволновых квантов бериллиевой фольгой.
 Рис.4. Часть лауэ-топограммы от кристалла X-среза ДКПР.
 а) $T = 300^\circ\text{K}$,
 б) образец со стороны первичного пучка охлаждался жидким азотом, в, г, д) рефлексы II6, II6 и I03 для случая охлажденного образца. Толщина пластинки - 380 мкм. Вектором g обозначено направление дифрагированной волны. Экспозиция - 3 мА·мин.
 Рис.5. Отражение (200) для Z-среза кристалла ДКПР.
 а) $T = 300^\circ\text{K}$,
 б) образец со стороны первичного пучка охлаждался жидким азотом. В верхней части рефлекса наблюдаются электрические домены. Толщина пластинки - 200 мкм. $\lambda = 0,45 \text{ \AA}$. Экспозиция - 3 мА·мин.
 Рис.6. Магнитная доменная структура в эпитаксиальной пленке со структурой граната. Ось [111] перпендикулярна поверхности образца. Метод отражения. Экспозиция - 1 мА·мин.
 Рис.7. Топограмма поверхности кристалла $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, полученная дифракцией синхротронного излучения. Снимок сделан на отражение. Экспозиция - 3 мА·мин.
 Рис.8. Участок лауэ-топограммы от кристалла $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{Nb}_2\text{O}_6$. Наблюдаются сегрегационные полосы. Толщина образца - 200 мкм. Экспозиция - 12 мА·мин.
 Рис.9. Лауэ-топограмма от кристалла гидросодалита $\text{Na}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Толщина образца - 500 мкм. Экспозиция - 8 мА·мин.

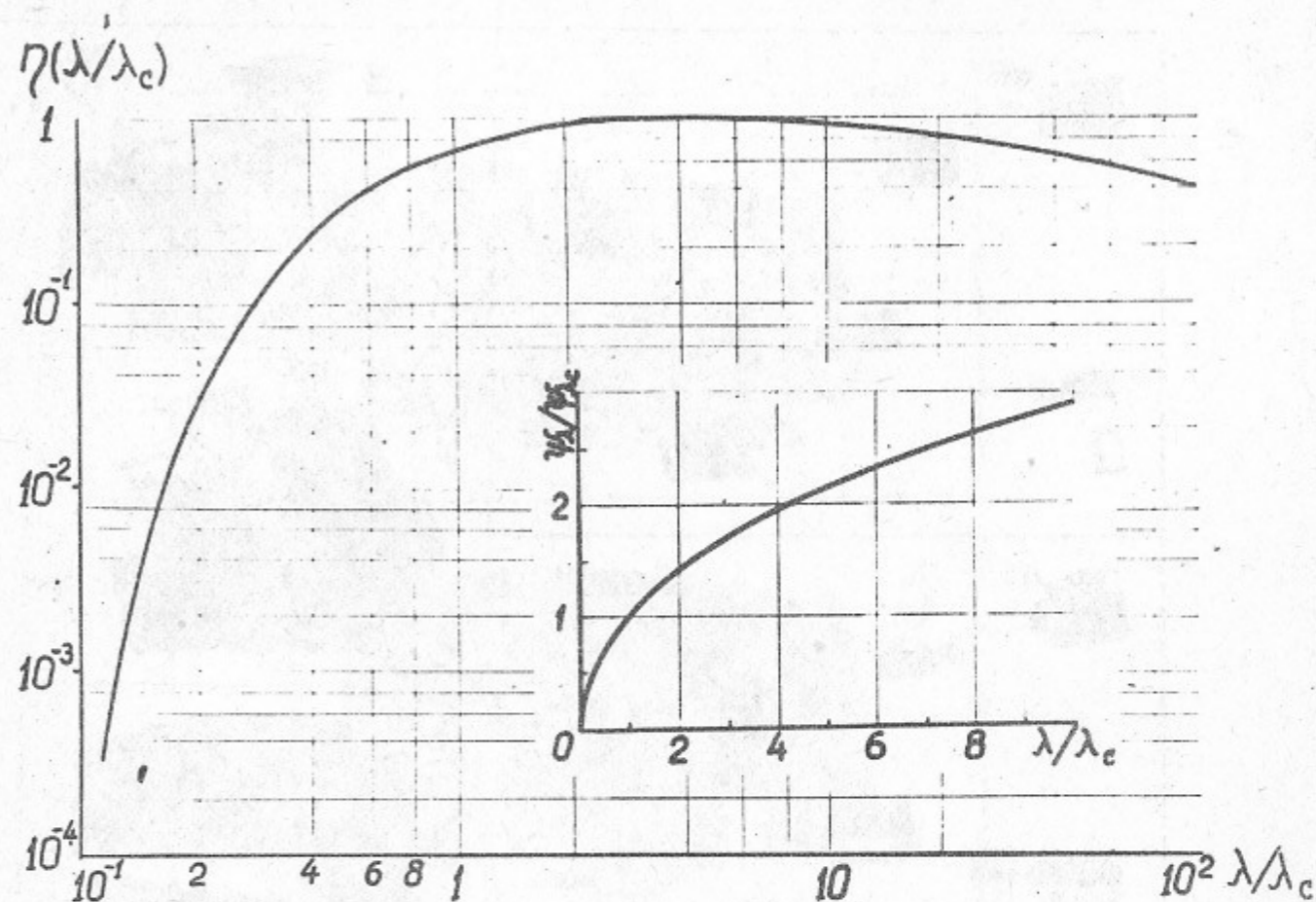


Рис.1 и Рис.2

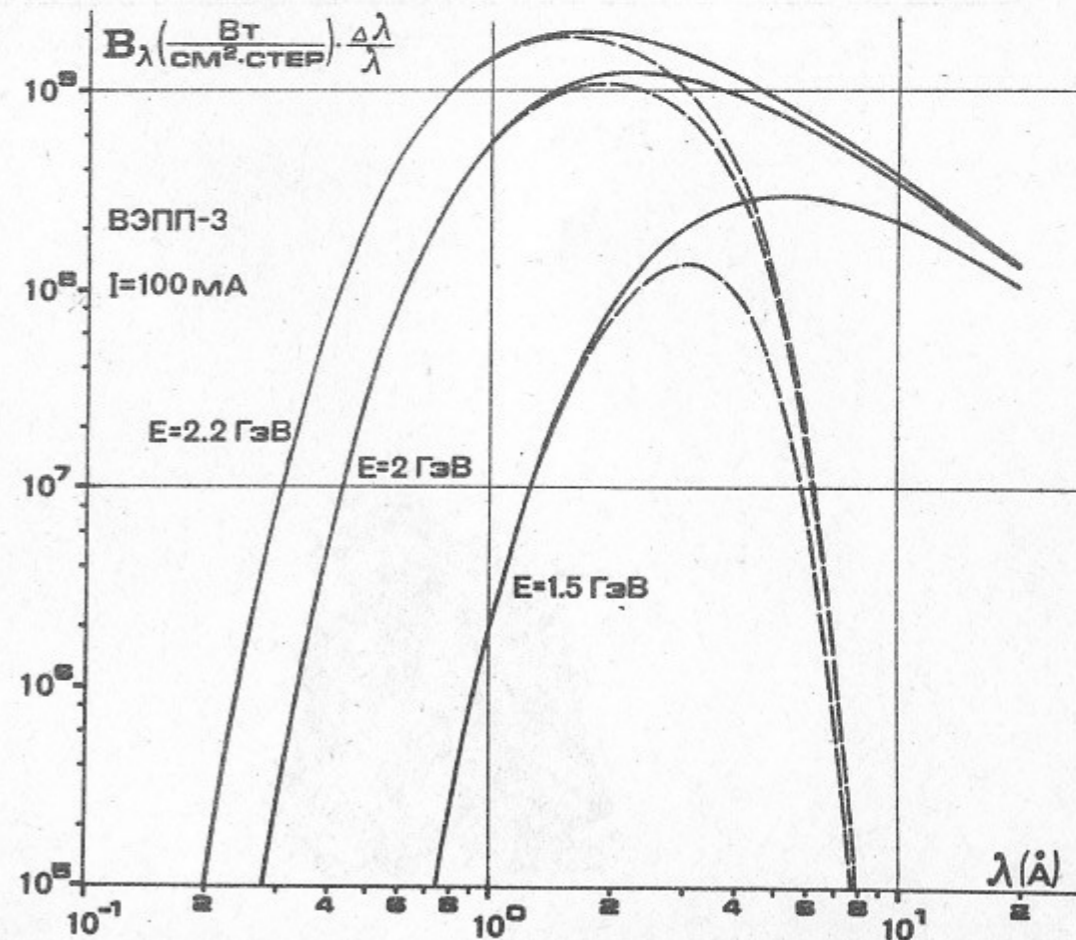


Рис.3

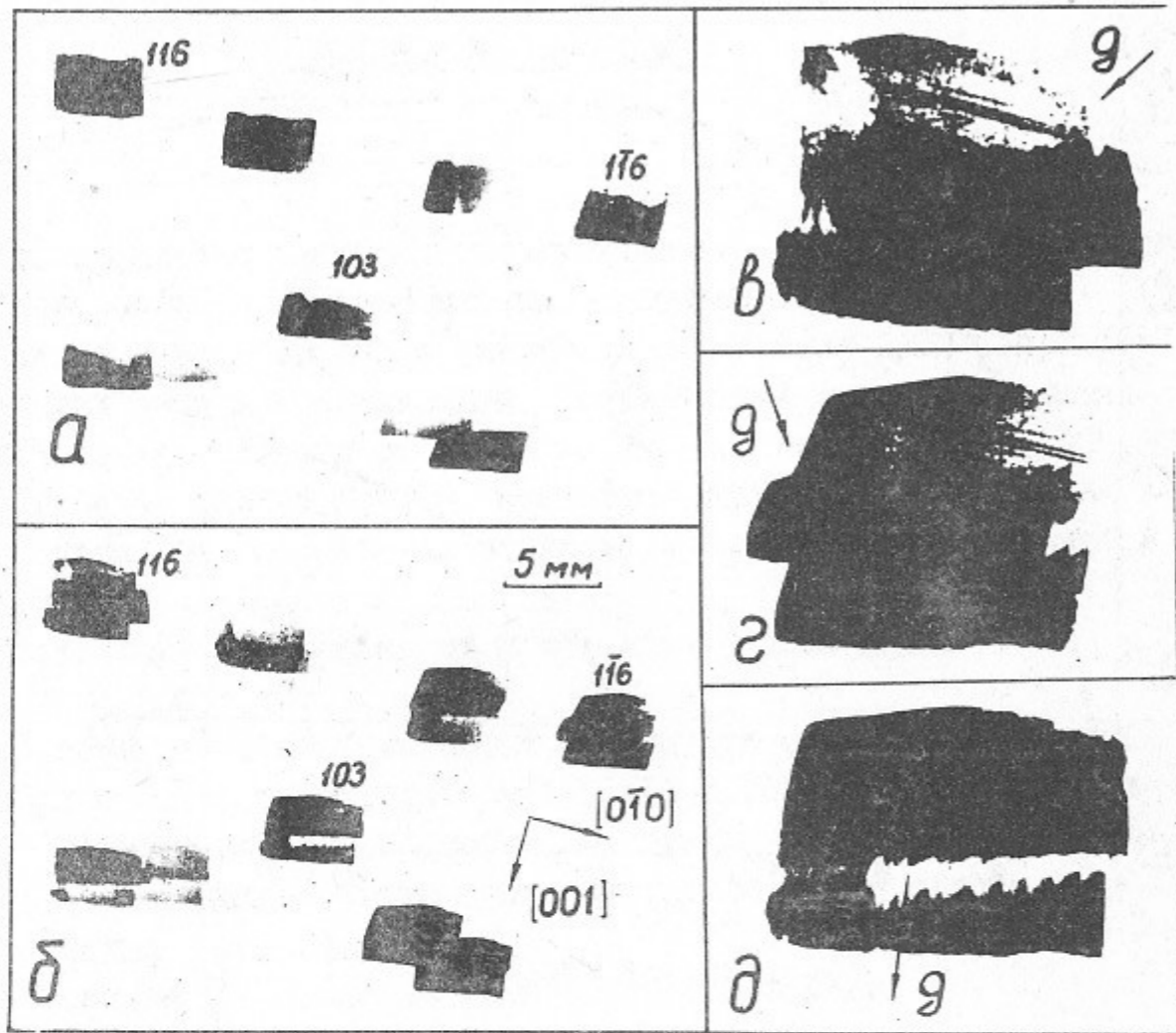


Рис. 4

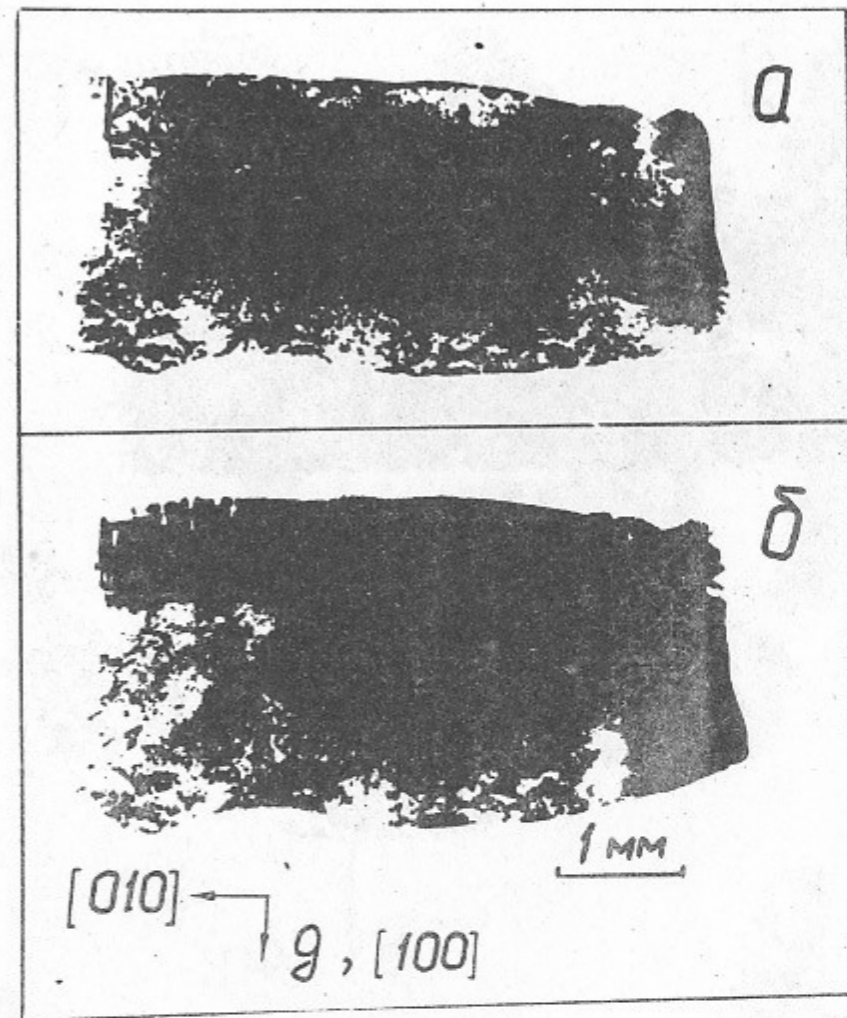


Рис. 5



Рис. 6

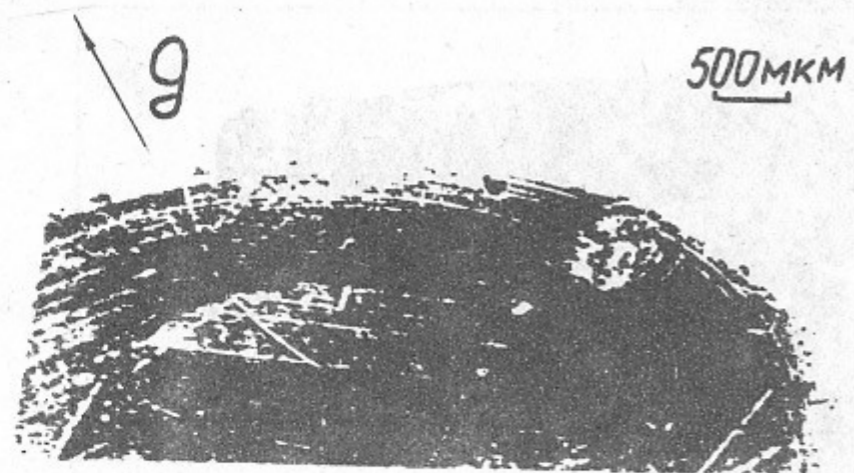


Рис.7

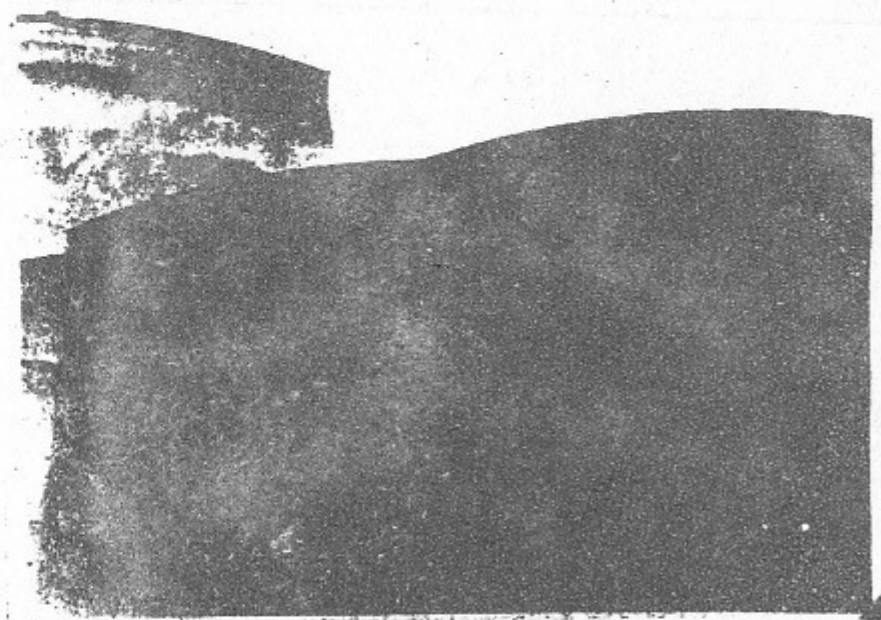


Рис.8

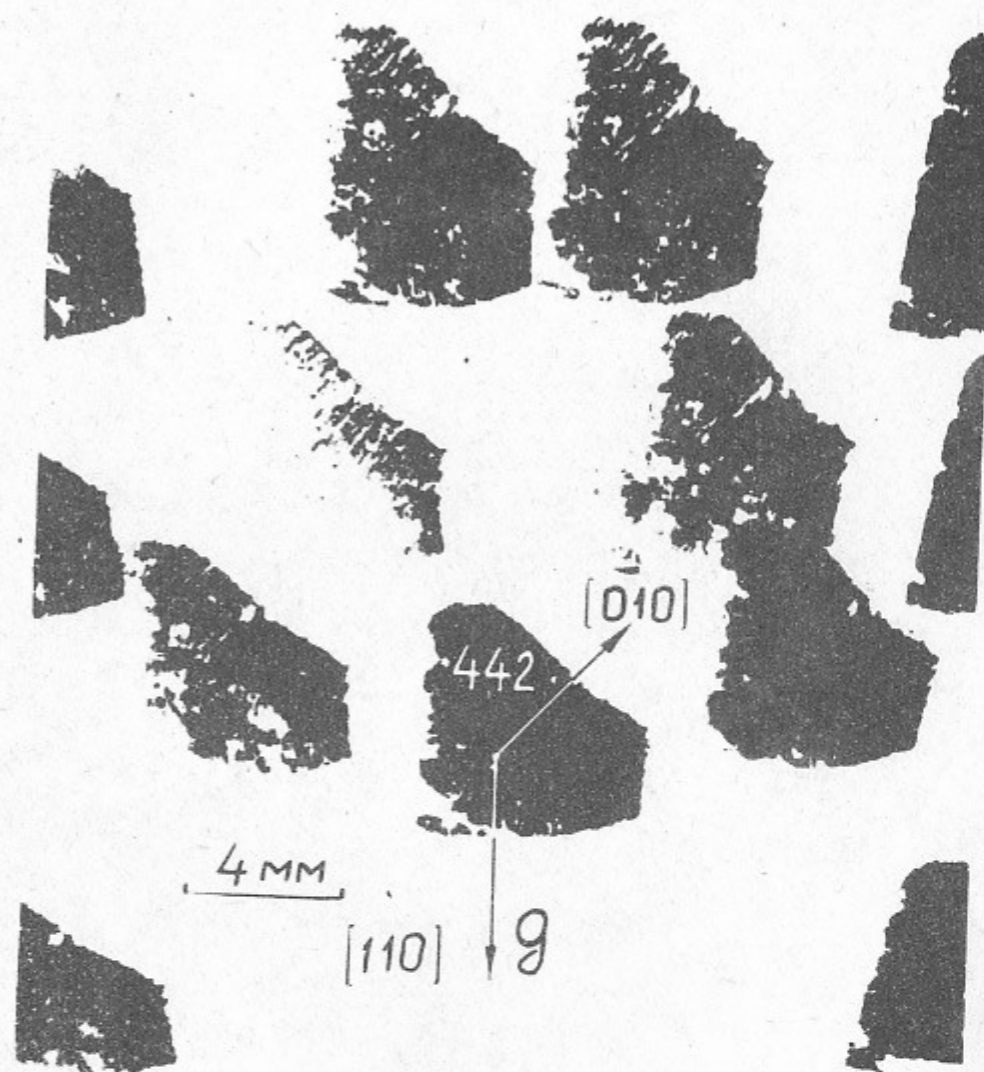


Рис.9

Работа поступила - 14 июня 1978 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 26.6.78г. МН 07 520
Усл. 1,1 печ.л., 0,9 учетно-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно
Заказ № 55

Отпечатано на ротапринте ИИФ СО АН СССР