

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

525/82

1/2-82

P13-81-698

Г.Мюллер, Р.Пильц, Г.Шорнак

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЛУЧЕЙ
В ТРЕХГРАННЫХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЯХ
ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

1981

1. ВВЕДЕНИЕ

В Отделе новых методов ускорения ОИЯИ для измерения характеристического рентгеновского излучения ионизированных атомов, которые находятся в электронных кольцах коллективного ускорителя тяжелых ионов ^{1/}, разрабатывается рентген-дифракционный спектрометр высокого разрешения по типу спектрометра Йоганссена ^{2/}, который применяется в области энергии характеристического рентгеновского излучения тяжелых ионов. При разработке спектрометра выбрано такое решение процесса измерения, при котором кристалл-анализатор остается на одном месте и только поворачивается вокруг своей оси вращения, чтобы получить различные углы отражения. Этот принцип измерения позволяет использовать оптические способы измерения при определении угла поворота кристалла /лазерная интерферометрия/ и обеспечивает сверхточное измерение угла поворота кристалла. Такой способ удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к точности измерения, и позволяет работать на линии с ЭВМ.

Так как энергии недиаграммных рентгеновских линий ионизированных атомов часто отличаются друг от друга только на тысячные доли процента, необходима высокая точность определения угла поворота кристалла. Выполняя это требование, можно пренебречь позиционными ошибками, которые малы относительно погрешностей, возникающих из геометрических условий измерения ^{3/}.

Отражение рентгеновских лучей кристаллической решеткой происходит по закону Брэгга:

$$2d \sin\theta = n\lambda = n \frac{hc}{E}, \quad /1/$$

где d - расстояние между выбранными плоскостями кристалла; λ - длина волны анализируемого квантового излучения; θ - угол Брэгга; n - порядок отражения; c - скорость света; h - постоянная Планка и E - энергия квантового излучения. Из уравнения /1/ следует, что ошибка измерения энергии квантового излучения

$$\frac{\Delta E}{E} = - \frac{\Delta(\sin\theta)}{\sin\theta} = - \cot\theta \Delta\theta. \quad /2/$$

Для реализации заданных требований необходима точность определения угла поворота $\Delta\theta \leq 0,1''$. Такую точность измерения можно получить при помощи лазерного интерферометра на основе лазера,

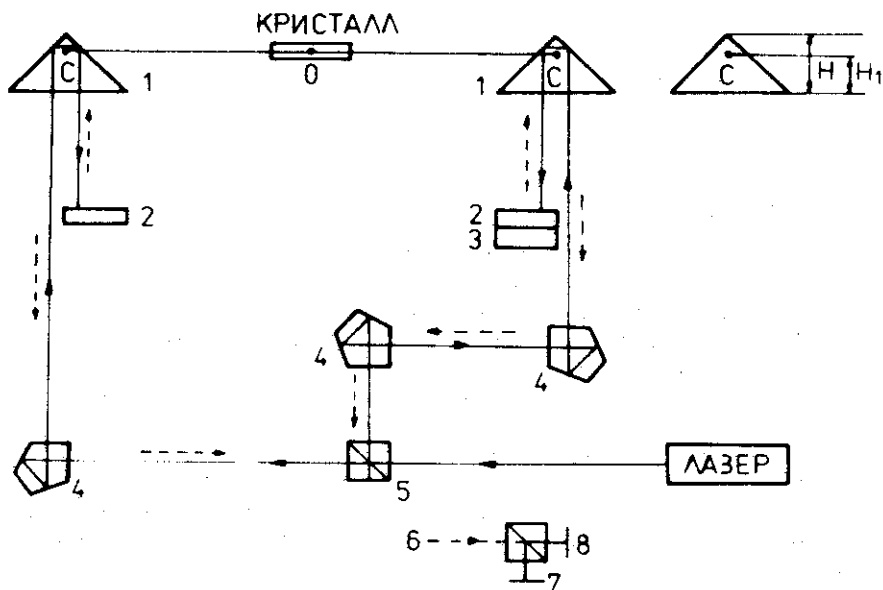


Рис.1. Основная схема хода лазерных лучей в угловом интерферометре: 0 - ось вращения кристалла; 1 - трипель-призма; 2 - поворотная призма; 3 - пьезорезонатор; 4 - пентапризма; 5 - делитель лучей; 6 - обратный луч; 7,8 - фотоприемники. Для простоты обратный луч нарисован отдельно, но на практике он проходит между делителем /5/ и лазером.

стабилизированного по частоте на лэмбовском провале. Ход лазерного луча в лазерном интерферометре показан на рис.1.

Источником лазерного света служит стабилизированный на лэмбовском провале He-Ne-лазер, который излучает свет с длиной волны $\lambda = 632,8$ нм и достаточной длиной когерентности. Расщепление лазерного луча происходит на оптическом кубе /5/. Получаемые две компоненты лазерного света отклоняются через пентапризмы на трипельпризмы. Поскольку трипельпризмы жестко фиксированы относительно кристалл-анализатора, поворот кристалла вокруг своей оси вращения на угол θ соответствует противоположному повороту трипельпризм.

Трипельпризмами /1/ /трехгранными угловыми отражателями/ лучи отражаются под углом 180° , затем крышеобразными призмами /2/ отражаются таким образом, чтобы лучи пробегали тот же самый обратный путь, но только по траектории, сдвинутой по высоте.

Для измерения правильного по знаку угла поворота кристалла используется принцип внутренней фазовой модуляции^{/4/}. Фазовая модуляция выходных сигналов интерферометра осуществляется за счет периодических изменений оптической разности хода с помощью пьезоэлектрического модулятора /3/ и соединенного с ним соответствующего отражателя /2/.

2. РАСЧЕТ ТРАЕКТОРИИ ЛУЧЕЙ В ТРЕХГРАННЫХ УГОЛКОВЫХ ОТРАЖАТЕЛЯХ

В качестве отражательных элементов в вышеописанном интерферометре используются две вращающиеся вокруг общей точки вращения трипельпризмы. При этом значение измеряемого угла вычисляется как отношение оптической разности хода $\Delta x_{\text{опт}}$ лучей трипельпризм к расстоянию между призмами R:

$$\sin \theta = \frac{\Delta x_{\text{опт}}}{4R} \quad /3/$$

Для расчета возможного диапазона измерения углов и для необходимого анализа ошибок надо определить ход лазерных лучей, показанных на рис. 2. На основе исследований Пека^{/5/} можно трактовать геометрию лучей в трипельпризмах как плоскостную проблему. В соответствии с этим оптическая длина пробега в стекле трипельпризмы равна оптической длине пробега соответствующей крышеобразной призмы. В работах^{/6-8/} указаны приближенные аналитические выражения для возможного диапазона измерения и для зависимости точности измерения от угла поворота в предположении отдельно выбранных источников ошибок. Однако при разработке угловых интерферометров возникает необходимость наряду с ходом лучей в отражающих призмах комплексно анализировать все влияния ошибок. С этой целью разработана программа GE80, которая рассчитывает ход лучей, разность оптических длин пробега и ошибку измерения углов при заданных отклонениях размеров призм и ошибках юстировки. Расчеты проводятся на основе векторов в комплексной плоскости. При этом легко формулировать проблемы вращения, трансляции, преломления, отражения и точки пересечения двух прямых, так что возникает соответствующий данной физической проблеме алгоритм.

При расчете хода лучей в трипельпризме сначала определяется положение угловых точек эквивалентной крышеобразной призмы в плоскости. Расчет проводится относительно оптического центра тяжести трипельпризмы, который находится на расстоянии

$$H_1 = H/n \quad /4/$$

от нижнего края призмы и определяется показателем преломления материала призмы и высотой призмы H. При таких обозначениях

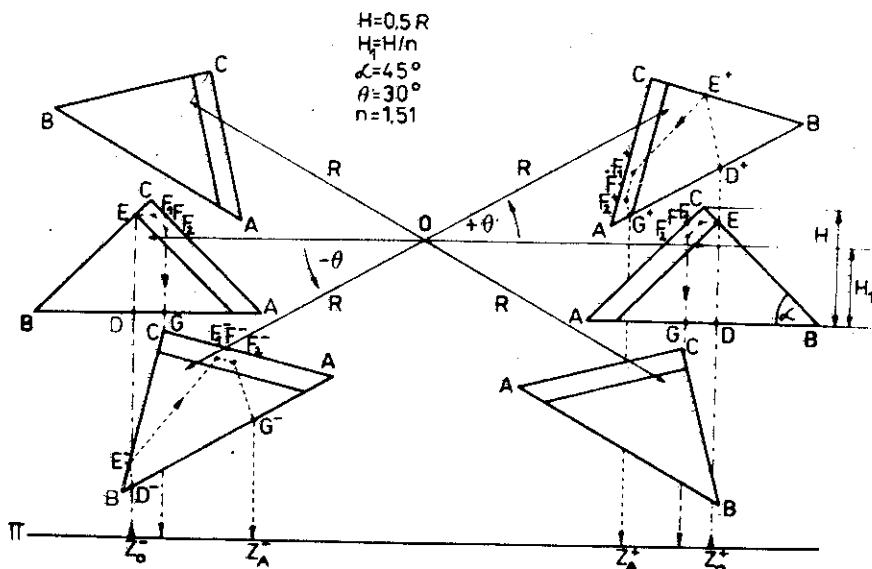


Рис. 2. Ход лазерных лучей в трехгранных уголкового отражателях.

для краевых точек призм можно, используя комплексные числа, записать:

$$A = \tan \alpha H - iH_1,$$

$$B = \cot \alpha H - iH_1,$$

$$C = i(H - H_1).$$

15/

На рис. 2 показана ситуация для бокового угла $\alpha=45^\circ$. Для учета перекоса призм при анализе возможных ошибок точки углов при помощи выражения

$$A, B, C \Rightarrow A, B, C \cdot e^{i\phi}$$

16/

поворачиваются в плоскости на угол перекоса. Затем действительная точка поворота O строится ее трансляцией на R направо и вниз до произвольной плоскости π , так что получаем

$$A, B, C, \Rightarrow A, B, C + R + i\pi.$$

17/

После дальнейшего поворота на угол θ угловые точки призм фиксируются в плоскости π , таким образом, можно рассчитать ход

лучей начиная с точки Z_0 . Входная точка D является точкой пересечения вертикальной входной прямой с прямой, проходящей через точки A и B:

$$D = Z_0 + i\lambda + \mu(B-A) \quad /8/$$

С помощью /8/ можно рассчитать действительные параметры λ и μ из обеих частей комплексного уравнения. Преломление в точке D происходит по закону

$$n_1 \sin \beta_1 = n_2 \sin \beta_2, \quad /9/$$

n_1 и n_2 являются соответствующими показателями преломления, а β_1 и β_2 - углами относительно нормали на плоскости. Из выражения

$$\beta_1 = \arg(B-A) \quad /10/$$

следует, что угол выхода лучей в точке D

$$\beta_2 = \arcsin\left(\frac{\sin \beta_1}{n}\right) \quad /11/$$

в предположении $n_1 = 1$ и $n_2 = n$.

Таким же образом может быть получена точка E как точка пересечения выходящего из D луча с прямой, проходящей через B и C. В точке E происходит полное отражение:

$$\beta_1 = \beta_2 \quad /12/$$

Отсюда получаем точку F и после дополнительного полного отражения - точку G на нижней поверхности призмы. От точки F можно определить положение точек F_1 и F_2 на боковых поверхностях трипельпризмы при помощи прямой, параллельной стороне AC. Положение точек F_1 и F_2 на боковых поверхностях трипельпризмы определяется точками пересечения прямой, проходящей через F параллельно стороне AC. Пространственной длине пробега $\overline{F_1 F_2}$ соответствует длина пробега луча $\overline{F_1 F F_2}$ на плоскости. В точке G луч испытывает дополнительное преломление на угол

$$\beta_2 = \arcsin(n \sin \beta_1) \quad /13/$$

и идет параллельно входящему лучу $Z_0 D$ до исходной плоскости в точке Z_A . Оптическая длина пробега тогда равна

$$x_{\text{опт}} = |D - Z_0| + |Z_A - G| + n(|E - D| + |F - E| + |G - F|). \quad /14/$$

Находя разность между оптическими длинами пробега луча для положительных и отрицательных углов поворота θ , получим

$$\sin \tilde{\theta} = \frac{x_{\text{ОПГ}}(+\theta) - x_{\text{ОПГ}}(-\theta)}{4R} \quad /15/$$

Угол $\tilde{\theta}$ включает ошибки результатов измерения. Все отклонения зависят от разности высот трипельпризм ΔH , угла перекоса и юстировки призм (ΔH_1).

3. ИСПРАВЛЕНИЕ ОШИБОК ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА УРАВНИТЕЛЬНОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ

На практике для существующих допусков ΔH , ΔH_1 и ϕ точность измерения интерферометром угла поворота для использования в вышеназванном кристалл-дифракционном спектрометре является недостаточной. Однако можно скорректировать результат измерения $\sin \tilde{\theta}$ в зависимости от угла поворота θ так, что возникает возможность более точного измерения $\sin \theta$. Для этого воспользуемся выражением

$$\sin \tilde{\theta} = c + \gamma \sin \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3 + a_4 \theta^4, \quad /16/$$

в котором содержится точное значение для $\sin \theta$. При использовании определенного способа калибровки определяются коэффициенты c , γ , a_2 , a_3 и a_4 , причем для этого понадобятся, как минимум, 5 точек калибровки, которую можно провести при помощи угловых нормалей или при помощи кристалл-дифракционного спектрометра, применяя рентгено-спектроскопические нормали. После определения коэффициентов из уравнения /16/ по методу наименьших квадратов можно путем итерации определить улучшенное значение измерения:

$$\sin \theta = \frac{1}{\gamma} [\sin \tilde{\theta} - c - a_2 \theta^2 - a_3 \theta^3 - a_4 \theta^4]. \quad /17/$$

Как правило, достаточно одного итерационного шага. Точность улучшенного значения измерения тогда зависит только от точности использованных нормалей при калибровке. В следующем примере показано, какое улучшение точности измерения является возможным. Согласно рис.2 при $R = 150$ мм, $\Delta H^+ = 0,1$ мм, $\Delta H_1^+ = 0,1$ мм, $\phi^+ = 10''$ получается изображенное в верхней части рис.3 отклонение $\Delta \theta_1$ как функция от угла θ . Максимальная ошибка составляет около $10''$. При использовании 9 калибровочных точек определены коэффициенты функции /16/: $c = -0,5075 \cdot 10^{-4}$; $\gamma = 1,0000001$; $a_2 = 0,1666 \cdot 10^{-8}$; $a_3 = 0,2321 \cdot 10^{-4}$; $a_4 = 0,2212 \cdot 10^{-5}$. Остающееся отклонение $\Delta \theta_2$ показано в нижней

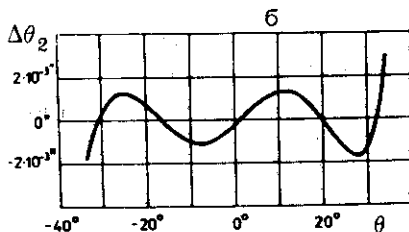
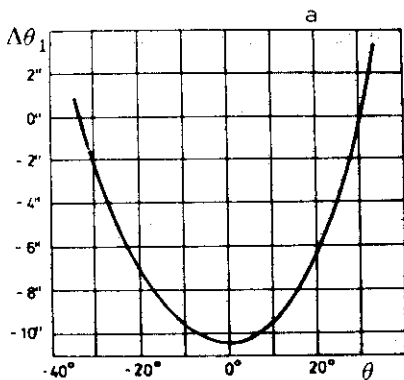


Рис.3. Погрешности измерения перед /а/ и после /б/ применения метода уравнительного вычисления.

части рис.3. Максимальная ошибка на весь диапазон меньше $2 \cdot 10^{-3}''$ и является пренебрежимо малой по сравнению с точностями калибровочных нормалей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенный способ расчета на основе векторов в комплексной плоскости позволяет вычислять траектории лучей в трехгранных уголковых отражателях лазерного интерферометра. Измеряя разность оптических длин пробега, можно рассчитать угол, точность определения которого улучшается методом уравнительного вычисления. На конкретном примере показано, что остающаяся ошибка является пренебрежимо малой по сравнению с допусками калибровочных нормалей.

Авторы выражают признательность проф. Г.Музиолу за полезные дискуссии во время выполнения настоящей работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щорнак Г., Музиоль Г. ОИЯИ, P13-12540, Дубна, 1979.
2. Johansson T. Z.Phys., 1933, 82, p.507.
3. Zschornack G., Müller G., Musiol G. JINR, E13-81-269, Dubna, 1981.
4. Ведерников В.Н. и др. В кн.: Лазерные интерферометры. Изд-во Института автоматики и электроники СО АН СССР. Новосибирск, 1978, с.10.
5. Peck E. Journ. of the Optical Society of America, 1948,38, p.1015.
6. Schwitz W. Nucl.Instr. and Meth., 1978, 154, p.95.

7. Debler E. Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB-Me-8, Braunschweig, 1978.
8. Mintrop H., Debler E. Feinwerktechnik und Meßtechnik, 1977, 85, p.2.

Рукопись поступила в издательский отдел
6 ноября 1981 года.