

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА РАН

УДК 539.125.5

на правах рукописи

СЕМЕНИХИН
Сергей Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВЕРШЕНСТВА СТРУКТУРЫ
МОНОКРИСТАЛЛОВ МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИЗУЧЕНИЮ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ
НЕЙТРОНА

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в Отделении нейтронных исследований Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук В.В. Воронин,

доктор физико-математических наук В.В. Федоров.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Н.А. Иванов,

кандидат физико-математических наук,
с.н.с. А.А. Набережнов.

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет.

Защита состоится “ 21 ” октября 2010 г. в 14 час. на заседании диссертационного совета Д 002.115.01 в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН по адресу: 188300, г. Гатчина Ленинградской области, Орлова роща.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан “ 15 ” сентября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Митропольский

Актуальность проблемы. Представленная работа относится к области исследований структурного совершенства монокристаллов методом нейтронной дифрактометрии и посвящена созданию нового прецизионного метода для относительного измерения параметров элементарной ячейки монокристаллов при сравнительном анализе двух образцов с относительной точностью $10^{-7} - 10^{-8}$. Работа проводилась в рамках подготовки к экспериментам по поиску электрического дипольного момента нейтрона кристалл-дифракционным методом [1, 2] и дифракционного эксперимента по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона [3, 4], для проведения которых необходимы монокристаллы с малыми нарушениями кристаллической решетки по всему объему кристалла по сравнению с брэгговской шириной. Количественной мерой указанных нарушений, в частности, является относительная величина изменения межплоскостных расстояний исследуемых монокристаллов. Наличие примесей и дефектов приводит к изменению параметров элементарной ячейки кристаллов. Известно, что даже изменение изотопного состава исходного материала (например, в кремнии) приводит к существенному изменению параметров решетки выращиваемых кристаллов и, как следствие, к изменению их физических характеристик. Таким образом, создание новых методов определения степени совершенства монокристаллов является исключительно важной и актуальной задачей при выращивании кристаллов с заданными свойствами для различной полупроводниковой и оптической промышленности, а также при создании кристалл-дифракционных приборов высокого разрешения, применяемых в физических исследованиях.

Основной целью данной работы является создание нового точного метода исследования относительного изменения межплоскостных расстояний больших совершенных монокристаллов с целью дальнейшего их использования в дифракционных экспериментах по исследованию фундаментальных свойств нейтрона.

Научная новизна. Предложен оригинальный метод проверки качества кристаллов в геометрии обратного рассеяния нейтронов. Такая геометрия позволяет исследовать структуру кристалла по всему объему и не требует наличия предварительной информации об ориентации кристаллографических плоскостей относительно огранки кристалла с высокой точностью. Использование регулируемой разницы температур двух кристаллов (исследуемого и эталонного) для определения разницы межплоскостных расстояний также существенно упрощает и удешевляет данную методику, позволяя отказаться от необходимости абсолютного измерения углов с высокой точностью. Использование нейтронов, обладающих высокой

проникающей способностью, позволяет определять совершенство кристаллического материала по всему объему образца или уже готового изделия без его разрушения. Данная методика измерения межплоскостных расстояний решетки совершенных монокристаллов позволяет достичь высокой относительной точности измерения $\Delta d/d \sim (10^{-7} - 10^{-8})$ и не имеет мировых аналогов.

Научно-практическая ценность. Результаты работы открывают возможность постановки новых экспериментов: по поиску электрического дипольного момента нейтрона, а также для проверки эквивалентности инертной и гравитационных масс нейтрона. Кроме того, отбор "затравочных" монокристаллов заданной степени совершенства, в принципе, дает возможность выращивать кристаллы с заранее заданными свойствами.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан новый метод измерения относительных изменений межплоскостных расстояний монокристаллов, основанный на использовании дифракции нейтронов под углом Брэгга $\sim 90^0$, обладающий следующими достоинствами:
 - данный метод позволяет производить анализ межплоскостных расстояний исследуемого кристалла относительно эталонного с точностью лучше чем $\delta d/d \sim 10^{-7}$;
 - размер исследуемого образца ограничен длиной поглощения нейтронов в кристалле и для таких монокристаллов как кварц может достигать 50 см;
 - метод не требует предварительной подготовки исследуемого образца, поэтому монокристалл может иметь любую форму и огранку;
 - не требуется высокая точность предварительной угловой юстировки образцов;
 - сравнительно невысокие требования к точности экспериментального оборудования, необходимого для проведения таких исследований.
2. Создана экспериментальная установка с рабочим диапазоном длин волн $\lambda = (3 - 6)\text{Å}$, что позволяет исследовать межплоскостные расстояния в диапазоне $d = (1,5 - 3)\text{Å}$. Отработана методика юстировки установки и анализа экспериментальных данных.

3. Проведен анализ образцов монокристаллов кварца различного происхождения. Анализ показал, что большой класс искусственно выращенных кристаллов обладает высокой степенью пространственной однородности по всему объему и они практически не отличимы от идеальных. Кристаллы, имеющие природное происхождение, обладают существенно большей степенью неоднородности, что не позволяет изготовление из них кристаллических пластин большого размера необходимого качества.
4. Проведено исследование и отбор монокристаллов кварца для эксперимента по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона кристалл-дифракционным методом. Отобранные образцы кварца имеют разброс межплоскостных расстояний $\Delta d/d_0 \leq 5 \cdot 10^{-6}$ и суммарный размер $100 \times 100 \times 500 \text{ мм}^3$. Предварительные расчеты показывают, что использование такого составного кристалла в ЭДМ-эксперименте позволит достичь точности измерения ЭДМ на уровне $(2 - 3) \cdot 10^{-26} \text{ е} \cdot \text{см}$ за 100 суток измерений.
5. Изготовлен двухкристальный кремниевый интерферометр ($90 \times 94 \times 140 \text{ мм}^3$) для эксперимента по проверке принципа эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона. Проведено исследование неоднородности межплоскостных расстояний монокристалла интерферометра $\Delta d/d_0$, которое составило не более чем $2,4 \cdot 10^{-6}$ по всему объему.

Апробация работы. Результаты были представлены на различных международных конференциях: 13-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-13, Dubna, Russia, 2005), The 5-th UCN & CNS Workshop (Peterhof, Russia, 2005), International Workshop on Relativistic Channeling and Coherent Phenomena in Strong Fields (Frascati, Italia, 2005), International Symposium: Radiation From Relativistic Electrons In Periodic Structures (RREPS'07, Prague, Czech Republic, 2007), International Workshop on Particle Physics with Slow Neutrons (Institut Laue Langevin, Grenoble, France, 2008), XX International Workshop on Neutron Scattering in Condensed Matter Investigations (NSCMI-2008, Gatchina, Russia, 2008), 18th Particle and Nuclei International Conference (PANIC08, Eilat, Israel, 2008), Workshop on Neutron, Neutrino, Nuclear, Muon and Medical Physics at ESS (Lund, Sweden, 2009).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех основных глав, заключения и списка литературы (страниц - 90, рисунков - 42).

Во введении приведен краткий обзор кристалл-дифракционных методов для физических исследований, проводимых в Петербургском институте ядерной физики. Отмечено, что при создании кристалл-дифракционных приборов высокого разрешения необходимы монокристаллы с высокой степенью совершенства. В частности, для планируемых экспериментов по поиску электрического дипольного момента кристалл-дифракционным методом [1, 2] и проверки эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона [3, 4] требуются кристаллы с разбросом межплоскостного расстояния $\Delta d/d < 10^{-5}$. Дан обзор существующих методов для определения степени совершенства монокристаллов.

Первая глава посвящена описанию нового метода исследования совершенства монокристаллов нейтроноскопическим методом с использованием дифракционного отражения под углом Брэгга $\sim 90^\circ$. Основные преимущества данного метода по отношению к существующим аналогам заключаются в следующем:

- относительная точность измерения изменения межплоскостных расстояний может превосходить $\Delta d/d \sim 10^{-7}$;
- толщина исследуемого образца ограничена только лишь длиной поглощения нейтрона и для таких монокристаллов как кварц или кремний может достигать ~ 50 см;
- не требуется высокая точность предварительной угловой юстировки кристаллов;
- не требуется предварительная обработка кристалла, т. е. можно исследовать образцы любой формы и огранки;
- сравнительно невысокие требования к точности экспериментального оборудования, необходимого для проведения таких исследований.

На рис. 1 приведена принципиальная схема измерения и объясняется методика исследования монокристаллов.

Коллимированный пучок нейтронов после прохождения через исследуемый монокристалл-образец направляется на кристалл-отражатель (анализатор), который одновременно является эталоном. Плоскости монокристаллов образца и отражателя перпендикулярны оси пучка нейтронов. Для выделения нейтронов, отраженных кристаллом-отражателем, используется кристалл из пиролитического графита (PG) с коэффициентом отражения $\sim 50\%$, который служит в качестве пространственного разделителя падающей и отраженной волн. Минимальная интенсивность, регистрируемая детектором, при параллельном расположении кристаллографических плоскостей образца и кристалла-отражателя будет наблюдаться при равенстве их межплоскостных расстояний $d_0 = d$. В этом случае все нейтроны,

которые могли бы отразиться анализатором, отразятся исследуемым образцом и не дойдут до детектора.

Если эти расстояния изначально отличаются, то минимума интенсивности можно достичь, меняя межплоскостное расстояние одного из кристаллов, например, кристалла-отражателя d_0 , изменяя его температуру от исходного значения T_0 до $T_0 + \Delta T$ таким образом, чтобы $d_{|T_0} = d_{0|T_0 + \Delta T}$. Разность температур ΔT образца и кристалла-отражателя связана с относительным изменением межплоскостного расстояния соотношением

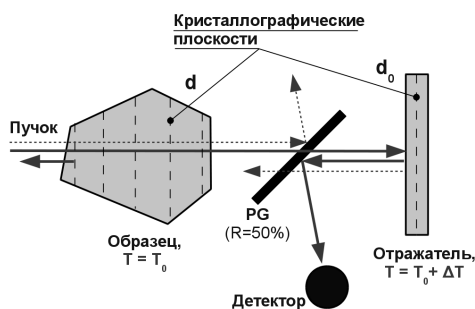


Рис. 1: Принципиальная схема

измерением $\Delta d/d_0 = \xi \cdot \Delta T$, где ξ - коэффициент теплового расширения кристалла-отражателя. Измерив ΔT в минимуме кривой отражения кристалла-отражателя, можно определить $\Delta d/d_0$.

Существенным является то, что угловая брэгговская ширина отражения $\Delta\theta_B$ существенно возрастает при приближении угла дифракции к $\pi/2$. Например, для плоскости (110) кристалла кварца брэгговская ширина вместо обычных $\Delta\theta_B = (1-2)''$ при $\theta_B \sim 45^\circ$ составляет $\Delta\theta_B \sim 0,5^\circ$, т. е. величину в 1000 раз большую. На те же три порядка снижается требование к предварительной ориентации кристаллографических плоскостей относительно огранки кристалла.

На рис. 2 приводится схема экспериментальной установки на пучке №2 реактора ВВР-М для исследования совершенства монокристаллов с подробным описанием основных узлов.

Основные параметры установки:

1. диапазон рабочих длин волн нейтронов $\lambda = (3 - 6) \text{ \AA}$ позволяет исследовать межплоскостные расстояния в диапазоне $d = (1.5 - 3) \text{ \AA}$;
2. плотность потока нейтронов на образце $\Phi = 1 \cdot 10^6 \text{ н/(см}^2\text{с\AA)}$;
3. точность угловых перемещений образца - $0,01^\circ$ по двум осям, перпендикулярным пучку нейтронов;
4. диапазон изменения температуры кристалла-отражателя $T = (0-50)^\circ\text{C}$; точность измерения разницы температур кристалла-отражателя и образца $\delta T = (0,01)^\circ\text{K}$;

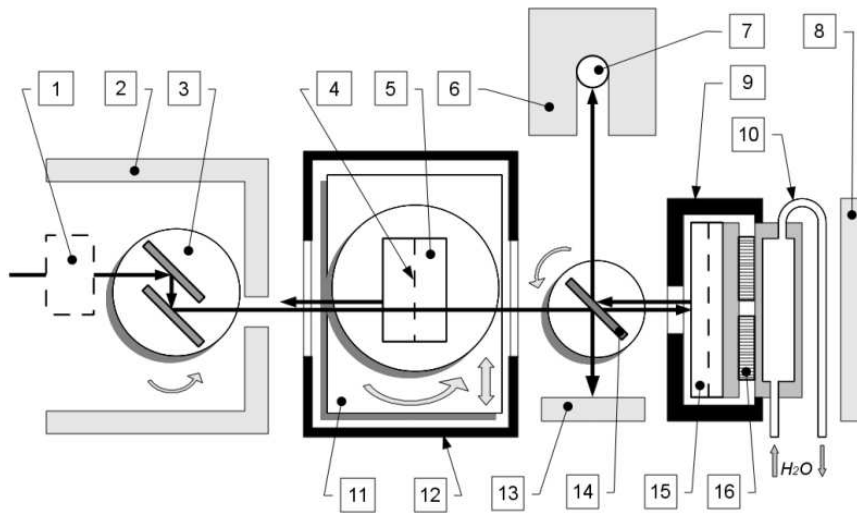


Рис. 2: Схема экспериментальной установки: 1 – поликристаллический фильтр для подавления высших порядков отражения (Be, BeO), 2 – защита, 3 – монохроматор, 4 – кристаллографические плоскости, 5 – образец, 6 – защита детектора, 7 – детектор, 8 и 13 – ловушка пучка, 9 – термостат отражателя, 10 – система охлаждения, 11 – платформа горизонтального перемещения образца, 12 – термостат образца, 14 – кристалл пирографита ($R \sim 50\%$), 15 – кристалл-отражатель, 16 – элементы Пельтье

5. максимальное перемещение образца в горизонтальной плоскости ± 5 см; точность позиционирования – 100 мкм.

Одним из основных факторов, влияющих на точность относительных измерений межплоскостных расстояний, является угловая юстировка отдельных элементов установки. Систематическая ошибка, обусловленная неточной угловой ориентацией кристаллов, составляет [5]

$$(\delta d/d)_\theta \simeq \frac{\theta_s^2 - \theta_0^2}{2}, \quad (1)$$

где θ_s и θ_0 – углы между направлением нейтронов и нормалью к отражающей плоскости исследуемого кристалла и кристалла отражателя соответственно (см. рис. 3).

Для относительных измерений межплоскостных расстояний в монокристалле на уровне $\Delta_d < 10^{-5}$ необходимо иметь относительную точность измерения лучше чем $\delta d/d \sim 10^{-6}$, т. е. систематическая ошибка (1) должна быть $< 10^{-6}$. Нетрудно видеть, что $\delta d/d \sim 10^{-6}$ соответствует $\sigma(\theta_s) \approx \sigma(\theta_0) \sim 10^{-3}$ рад.

Процедура юстировки заключается в одновременном сканировании по углу образца (ϕ_s или θ_s , рис. 3) и разнице температур ΔT между исследуемым образцом и кристаллом-отражателем. Величину разъюстировки можно определить из результатов подгонки зависимостей регистрируемой интенсивности от разницы температур ΔT при различных углах ориентации кристалла θ_s (рис. 4).

Каждая кривая на рис. 4 характеризуется положением минимума интенсивности T_c и шириной кривой w . Пример зависимостей T_c и w от угла θ_s приведен на рис. 5.

Количественной характеристикой разъюстировки кристалла-отражателя будет $\Delta\theta_0 = \theta_T - \theta_w$. Из рис. 5 следует, что $\Delta\theta_0 = (3,35 \pm 0,14) \times 10^{-3}$ рад. Подставив эти значения в (1), получим систематическую ошибку $(\delta d/d)_\theta \approx 0,6 \cdot 10^{-5}$, что недостаточно для относительного измерения межплоскостных расстояний на уровне $\Delta_d < 10^{-5}$. Следовательно для уменьшения систематической ошибки необходимо скорректировать положение кристалла-отражателя на указанный выше угол $\Delta\theta_0$.

Отдельная часть главы посвящена системе выведения пучка в узле кристалла отражателя, которая состоит из кристалла пиролитического графита-

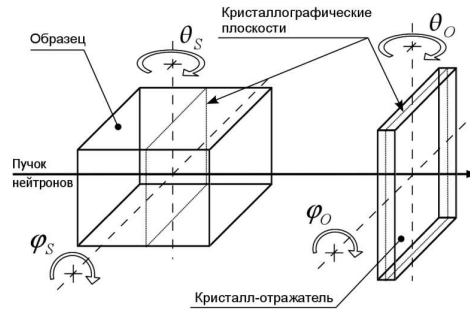


Рис. 3: Схема юстировки кристаллов

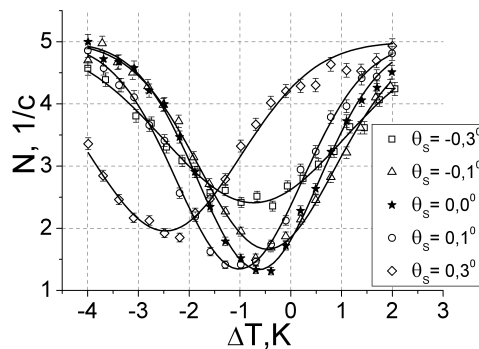


Рис. 4: Зависимости регистрируемой интенсивности от разницы температур кристаллов ΔT для различных углов ориентации образца θ_s

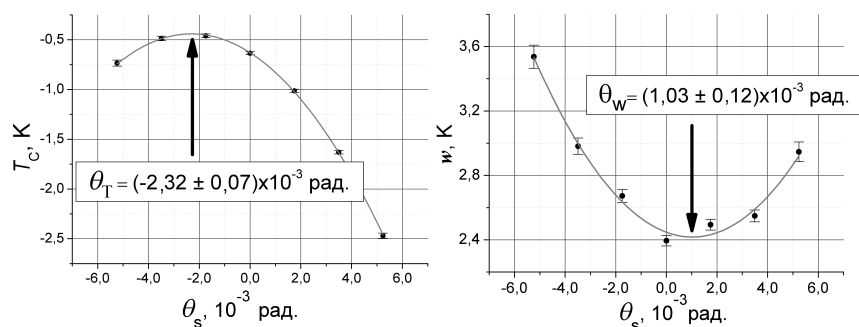


Рис. 5: Зависимость положения минимума и ширины линии (см. рис. 4) от угла θ_s исследуемого образца

та (рис. 2, поз. 14). Подробно рассмотрена зависимость интенсивности от коэффициента отражения R этого кристалла. Приведены расчетные кривые зависимостей коэффициента пропускания системы K при различных значениях R , из которых следует, что при оптимальном значении $R = 1/2$ коэффициент пропускания имеет максимальное значение, равное $K = 1/4$.

Также приведены экспериментальные кривые, подтверждающие эту теорию. Из анализа экспериментальных данных установлено, что величина R_{exp} используемого в установке кристалла пирографита $\approx 0,8$ и определяется толщиной кристалла ($L_{PG} \approx 0,8$ мм). Для получения оптимального значения $R = 1/2$ необходим кристалл меньшей толщины ($L_{PG} \approx 0,3$ мм).

Дальнейшее изложение посвящено экспериментальной проверке предлагаемого метода при помощи тестовых измерений различных образцов монокристаллов. Пример экспериментальной зависимости регистрируемой интенсивности от разницы температур образца и кристалла отражателя пока-

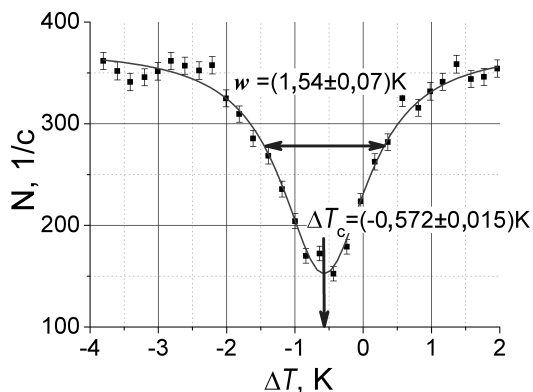


Рис. 6: Зависимость регистрируемой интенсивности нейтронов на детекторе от разницы температур образца (рис. 2, поз. 5) и кристалла-отражателя (рис. 2, поз. 15)

зан на рис. 6. Используя значение коэффициента теплового расширения материала, можно получить характеристики исследуемого образца, такие как вариацию его межплоскостных расстояний относительно кристалла-отражателя $\Delta d/d_0$ и ширину отражения W_d в единицах величины межплоскостного расстояния $\Delta d/d$. Нетрудно подсчитать, что точность определения положения линии на рис. 6, т. е. величины относительного межплоскостного расстояния образца, составляет $\delta(\Delta d/d) \approx 2 \cdot 10^{-7}$ (табличное значение коэффициента теплового расширения кварца $1,32 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$). Кроме этого, для одного из образцов более подробно снималось пространственное распределение величины $\Delta d/d_0$ и W_d по всему объему, т. к. в дальнейшем предполагалось использовать его в установке в качестве кристалла-отражателя. Проведенное исследование показало, что разброс межплоскостного расстояния для этого кристалла в его рабочей области отражения пучка нейтронов не превышает $\Delta d/d \sim 2 \cdot 10^{-6}$ (рис. 7).

Вторая глава посвящена исследованиям кристаллов кварца, которые могут быть использованы для кристалл-дифракционного эксперимента по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона.

В начале главы описана проблема существования ЭДМ, наличие которого требует одновременного нарушения инвариантностей относительно инверсии как времени (T), так и пространства (P), при этом нарушение T возможно только при нарушении CP -инвариантности в силу CPT -теоремы. Хотя обнаружить ЭДМ нейтрона пока не удастся, установленные экспериментально ограничения на его величину позволят исключить большинство теорий CP -нарушения, предсказывающие различные его значения.

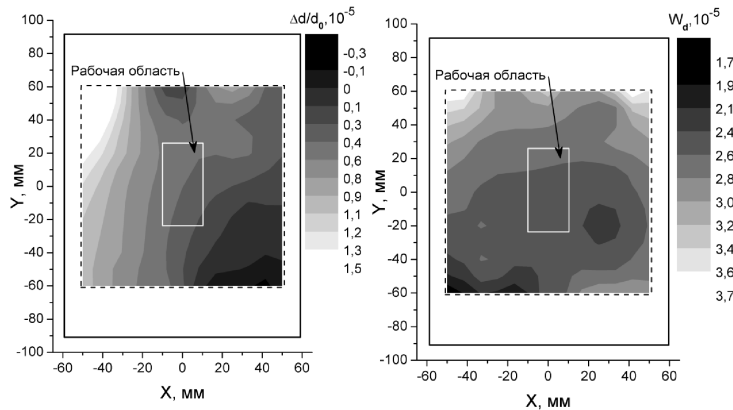


Рис. 7: Пространственное распределение $\Delta d/d_0$ и ширины рефлекса W_d по образцу кристалла кварца

Далее идет описание самого ЭДМ эксперимента, основанного на взаимодействии нейтрона с сильным внутрискристаллическим электрическим полем, действующим на нейтрон в нецентросимметричном кристалле, каким является α -кварц. В таких кристаллах для некоторых систем кристаллографических плоскостей положения максимумов электрического потенциала могут быть смещены относительно максимумов ядерного потенциала. Поэтому пролетающие через такой кристалл нейтроны оказываются в сильных ($10^8 - 10^9$ В/см) межплоскостных электрических полях противоположного знака $\pm \mathbf{E}_g$ [6]. Величина и знак электрического поля, действующего на нейтрон, определяются свойствами кристалла и отклонением от условия Брэгга

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_g \cdot v_g^N / \Delta_g, \quad (2)$$

где \mathbf{E}_g – межплоскостное электрическое поле, действующее на нейтрон при точном выполнении условия Брэгга, v_g^N – амплитуда g -гармоники ядерного потенциала, Δ_g – отклонение от условия Брэгга, выраженное в энергетических единицах.

Присутствие электрического поля приводит к тому, что в системе отсчета движущегося нейтрона возникнет швингеровское магнитное поле $\mathbf{H}_S = 1/c[\mathbf{E} \times \mathbf{v}_{\parallel}]$. Соответственно, угол поворота вокруг поля \mathbf{H}_S будет равен:

$$\varphi_s = \frac{2\mu H_S L_c}{\hbar v_{\perp}}, \quad (3)$$

где L_c – толщина кристалла, v_{\parallel} и v_{\perp} – компоненты скорости нейтрона, направленные параллельно и перпендикулярно кристаллографическим плоскостям соответственно.

Наличие ЭДМ у нейтрона приведет к повороту спина вокруг \mathbf{E} на угол

$$\varphi_d = \frac{2d_n \mathbf{E} L}{\hbar v_{\perp}}, \quad (4)$$

где L/v_{\perp} – время пребывания нейтрона в кристалле, $v_{\perp} \approx \frac{\hbar g}{2m} \equiv const$ – компонента скорости нейтрона вдоль вектора обратной решетки \mathbf{g} , т. е. перпендикулярно кристаллографическим плоскостям. Чтобы измерить ЭДМ нейтрона, необходимо иметь возможность менять знак электрического поля \mathbf{E} . Это можно сделать, изменив знак параметра отклонения Δ_g (см. выражение 2).

Для реализации ЭДМ эксперимента была предложена двухкристальная схема (рис. 8) отражения под $\pi/2$, при котором дополнительный поворот

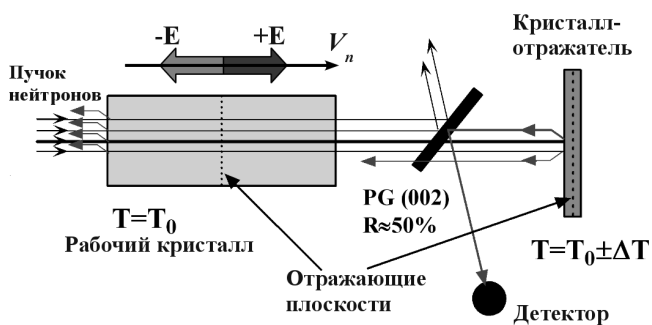


Рис. 8: Принципиальная схема эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона при отражении под углом Брэгга $\pi/2$, где $\pm E$ – межплоскостное электрическое поле, действующее на нейтрон, V_n – направление скорости нейтрона

спина за счет швингеровского взаимодействия становится равным нулю:

$$\varphi_s = \frac{2\mathbf{E} \cdot v_{\parallel} \cdot \mu \cdot L}{c\hbar v_{\perp}} = \frac{2\mathbf{E} \cdot \mu \cdot L}{c\hbar} \operatorname{ctg}(\theta_B) \xrightarrow{\theta_B \rightarrow \pi/2} 0. \quad (5)$$

Для того, чтобы ввести разъюстировку между отражателем и рабочим кристаллом, используется тепловое расширение кварца. Температура рабочего кристалла T^0 поддерживается постоянной, а температура отражателя варьируется относительно рабочего кристалла в пределах $T = T^0 \pm \Delta T$, что приводит к изменению его межплоскостного расстояния $\tilde{d} = d_0(1 + \alpha_T \Delta T)$, где α_T – коэффициент теплового расширения кварца в направлении, перпендикулярном отражающим плоскостям. Изменение температуры отражателя приводит к смещению положения рефлекса отражения, причем изменение знака ΔT приведет к изменению знака смещения Δ_g (см. выражение 2) и, как следствие, к перемене знака электрического поля, которое воздействует на нейтрон, проходящий через кристалл. Пример экспериментально измеренной зависимости угла поворота спина нейтрона за счет швингеровского взаимодействия (угол дифракции $\theta_B = 86^\circ$) при прохождении через монокристалл кварца от разницы температур двух кристаллов показана на рис. 9. В максимуме величина электрического поля, действующего на нейтрон в кристалле кварца, достигает $\sim 10^8$ В/см. Слева и справа от точного брэгговского условия поле имеет противоположный знак.

Далее более подробно рассмотрена работа отдельных узлов экспериментальной установки, приведена ее схема и изложены основные требо-

вания к параметрам установки, необходимые для достижения точности измерения ЭДМ нейтрона лучше чем $\sim 10^{-26}$ е·см. Особое внимание уделено системе трехмерного анализа поляризации пучка с помощью сверхпроводящей системы CRYOPAD [7], а также использованию позиционно чувствительного детектора (ПЧД) нейтронов для измерения угловой зависимости исследуемых эффектов. В заключение описания предлагаемого ЭДМ эксперимента указаны основные достоинства кристалл-дифракционной методики, такие как: большое по величине электрическое поле ($> 10^8$ В/см); простой способ изменения знака эффекта; реализация схемы под $\pi/2$ позволяет избавиться от ложного швингеровского эффекта; большая брэгговская ширина дает возможность использовать большой составной кристалл; а также предъявляются не очень высокие требования к качеству монокристаллов.

Во второй части главы рассмотрен вопрос о том, какие именно кристаллы кварца могли бы быть использованы для ЭДМ эксперимента, а также показаны результаты непосредственного тестирования таких кристаллов. Был проведен анализ различных образцов кварца как природного, так и искусственного происхождения. Анализ показал, что природные кристаллы имеют большой разброс в параметрах решетки даже по отдельному образцу. Хотя в них присутствуют области очень высокого совершенства, размер этих областей обычно мал, и собрать из них кристалл большого объема и необходимого качества, который требуется для ЭДМ эксперимента, представляется сложной задачей.

Тестирование искусственных кристаллов, выращенных во Всероссийском научно-исследовательском институте синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС), показало, что они имеют большую степень однородности по сравнению с природными. Результаты измерения $\Delta d/d$ двух партий та-

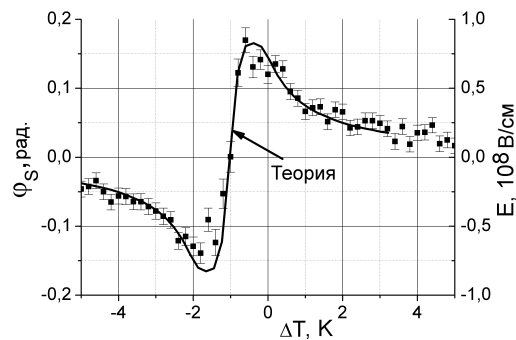


Рис. 9: Зависимость угла поворота спина нейтрона в швингеровском поле при дифракции на плоскости (110) кристалла кварца длиной 14 см при угле дифракции равном 86° . На правой оси ординат отложена величина электрического поля, действующего на нейтрон в кристалле

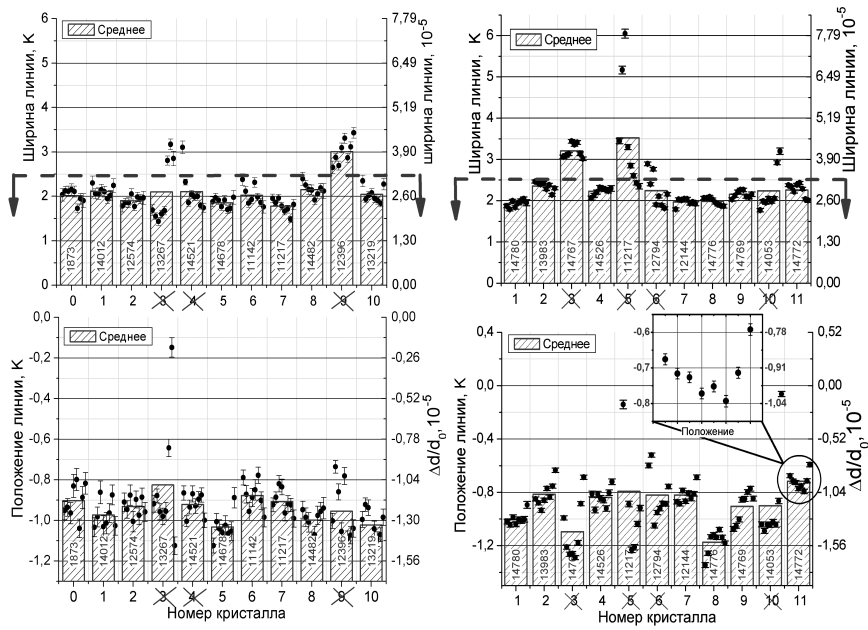


Рис. 10: Результаты анализа двух партий образцов оптического кварца

ких кристаллов представлены на рис. 10. Размеры кристаллов $100 \times 100 \times (25 - 45) \text{ мм}^3$ каждый. Пунктирной линией на рисунке указана граница допустимой ширины рефлекса W_d , ниже которой уменьшение величины электрического поля, действующего на нейтрон в кристалле, не превышает 20% [5]:

$$E_m = E_0 \cdot \frac{\Delta_B}{\sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_d^2}}, \quad (6)$$

где $\Delta_B \equiv \Delta \lambda_B / \lambda$, $\Delta \lambda_B$ – брэгговская ширина отражения в единицах длин волн, E_0 – электрическое поле, действующее на нейтрон в идеальном кристалле, $\Delta_d = \Delta d/d$ – разброс межплоскостного расстояния. По указанному выше критерию в общей сложности были отобраны 15 монокристаллов кварца (отбракованные кристаллы №№ 13267, 14521, 12396, 14767, 11217, 12794 и 14053 зачеркнуты на рис. 10) из представленных двадцати двух. Максимальный разброс межплоскостных расстояний в этих кристаллах составил $\sim 4 \cdot 10^{-6}$. Такое количество почти совершенных кристаллов позволяет использовать составной кристалл с суммарными размерами $100 \times 100 \times 500 \text{ мм}^3$, что является достаточным для достижения в экс-

перименте по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом точности $(2 - 3) \cdot 10^{-26}$ е·см за 100 суток измерений.

Третья глава посвящена эксперименту по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона и исследованию качества двухкристального интерферометра, являющегося основным элементом этого эксперимента. Основная задача эксперимента заключается в развитии нового дифракционного метода, обладающего высокой чувствительностью к внешнему воздействию на нейтрон и проведению в дальнейшем серии экспериментов по обнаружению малых сил, действующих на нейтрон. Эквивалентность инертной и гравитационных масс является основой общей теории относительности. Для макроскопических объектов эта эквивалентность проверена с колоссальной точностью ($\sigma(m_i/m_g) \sim 10^{-12}$), но для элементарных частиц эта величина лучше всего измерена для нейтрона и составляет $\sim 2 \cdot 10^{-4}$. Основная идея предлагаемого дифракционного эксперимента заключается в использовании эффектов дифракционного усиления влияния малых воздействий на нейтрон, дифрагирующий по Лауэ в совершенном кристалле при углах дифракции, близких к $\pi/2$ [8].

Рассмотрена реализация эксперимента в виде двухкристальной схемы. В такой схеме симметричной дифракции по Лауэ известен эффект дифракционной фокусировки [9, 10], который заключается в том, что половина интенсивности продифрагировавшего пучка фокусируется на выходной грани второго кристалла с шириной пятна на выходе при точечном источнике на входе (пространственное разрешение системы) [9]:

$$x_w = \frac{\Lambda \operatorname{tg}(\theta_B)}{2\pi} = \frac{1}{2m_0}, \quad (7)$$

где $\Lambda = \pi/(m_0 \operatorname{tg}(\theta_B))$ – длина экстинкции, $m_0 \equiv 2dF_g/V_c$ – так называемая "масса" Като (F_g – нейтронный структурный фактор отражения, V_c – объем кристаллической ячейки, d – межплоскостное расстояние).

При наличии щелей на входной и выходной поверхностях присутствие внешней силы приведет к искривлению траекторий нейтрона внутри кристалла, смещению положения фокуса и, вследствие чего, к изменению интенсивности регистрируемых нейтронов.

Проблема заключается в том, что для разных волн $\psi^{(1)}$ и $\psi^{(2)}$, которые формируются в результате взаимодействия нейтрона с периодическим ядерным потенциалом системы кристаллографических плоскостей [11], смещение имеет разный знак, что обусловлено разным знаком эффективной "силы Като" для различных волн (рис. 11). Поэтому для получения максимальной чувствительности к искомой внешней силе F необходимо

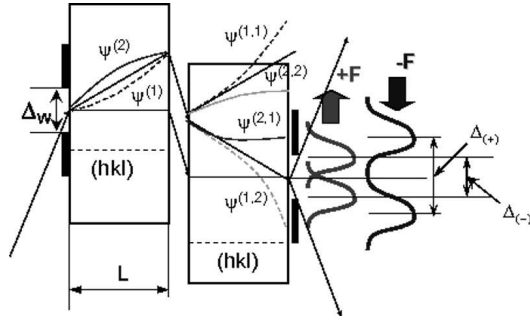


Рис. 11: Эффект двухкристальной фокусировки при наличии внешней силы

приложить небольшую постоянную силу

$$F_{\text{ext}} = \Delta_w \frac{2m_0 d E_n}{\pi c^2 L^2}. \quad (8)$$

Эта сила сдвинет положение фокуса для каждой пары волн на выходной поверхности второго кристалла на половину ширины входной щели, как это показано на рис. 11. Регулировать величину и знак постоянной внешней силы можно с помощью небольшого наклона всей установки, при этом появится проекция силы тяжести на вектор обратной решетки g , что собственно и требуется. Сдвиг фокуса при приложении внешней силы F_{ext} будет равен

$$\Delta_F = \frac{\pi c^2 L^2}{2m_0 d E_n} F_{\text{ext}}, \quad (9)$$

при этом возрастание величины F_{ext} приведет к изменению интенсивности. Разрешение W_F будет определяться размером щелей Δ_w на входе и выходе:

$$W_F = \frac{2m_0 d E_n}{\pi c^2 L^2} \Delta_w. \quad (10)$$

В таблице приведена численная оценка возможного разрешения и чувствительности к внешней силе для различных кристаллов. Оценка приведена для кристаллов размером $10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$ при угле $\Theta_B = 84^\circ$ ($\tan \Theta_B = 10$), ширина щелей на входе и выходе кристалла $\Delta_w = 0,1 \text{ мм}$, поток нейтронов $\Phi_0 = 10^9 \text{ н/(с}\cdot\text{см}^2\cdot\text{Å)}$. Для проверки принципа эквивалентности предлагается использовать гравитационное притяжение Солнца.

Принцип данного эксперимента показан на рис. 12. Для Земли, находящейся на стационарной орбите, гравитационное притяжение Солнца,

Таблица : Численная оценка разрешения и чувствительности к внешней силе для различных кристаллов и кристаллографических плоскостей

	Разрешение эВ/см	Светосила н/с	Чувствительность эВ/см в сутки
Кварц (110) $\lambda = 4.9\text{\AA}$	$1.5 \cdot 10^{-13}$	2200	$5 \cdot 10^{-18}$
Кварц (200) $\lambda = 4.2\text{\AA}$	$0.3 \cdot 10^{-13}$	250	$3 \cdot 10^{-18}$
Кремний (220) $\lambda = 3.8\text{\AA}$	$2 \cdot 10^{-13}$	600	$12 \cdot 10^{-18}$

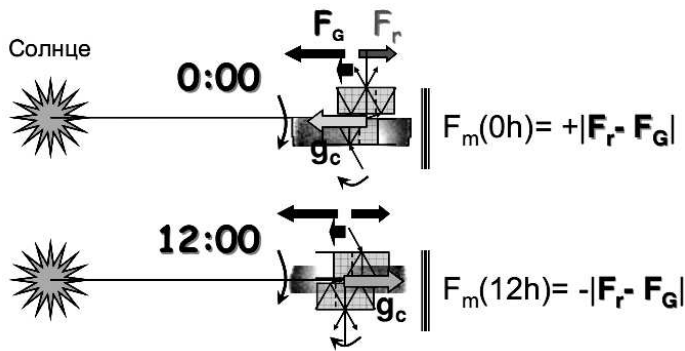


Рис. 12: Основная идея эксперимента по проверке принципа эквивалентности для нейтрона

пропорциональное гравитационной массе, уравновешено центробежной силой, пропорциональной инертной массе. Если для нейтрона имеется другое отношение инертной и гравитационной масс чем для Земли, то в системе отсчета Земли на нейтрон будет действовать добавочная сила. Идея этого эксперимента аналогична хорошо известному опыту Брагинского по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона [12]:

$$F_{(G-i)} = \frac{(m_i - m_G) \cdot GM_S}{R_S^2}, \quad (11)$$

где m_G и m_i – гравитационная и инертная массы нейтрона, G – гравитационная постоянная, M_S – масса солнца, R_S – радиус орбиты Земли. Более того, эта сила будет испытывать суточные вариации за счет вращения Земли вокруг своей оси. Сила притяжения Солнца на орбите Земли

составляет $F_G = Gm_G M_S / R_S^2 = 6 \cdot 10^{-13}$ эВ/см, таким образом, чувствительность $\sigma(F_{\text{ext}}) \sim 5 \cdot 10^{-19}$ эВ/см за 100 дней накопления статистики (см. таб.) соответствует точности $\sigma(m_i/m_G) \sim 10^{-6}$, что более чем на два порядка лучше, чем современное значение [13].

Следующая часть главы посвящена изготовлению и исследованию качества интерферометра для предлагаемого выше эксперимента. В качестве кристаллов для двухкристальной установки в эксперименте по проверке эквивалентности инертной и гравитационной масс нейтрона были выбраны монокристаллы кремния. В общем монокристаллическом блоке размерами $\varnothing 105 \times 140$ мм³ был сделан разрез перпендикулярно рабочей плоскости (рис. 13), т. е. реализована система из двух кристаллов, объединенных общим основанием (интерферометр). Рабочая входная поверхность имеет размеры 70×45 мм². Ширина разреза между кристаллами 0,3 мм, что необходимо для достижения пространственного разрешения $\sim 0,1$ мм. Статистическая чувствительность в эксперименте при современных потоках холодных нейтронов для кристалла такого размера может составить $\sigma(m_i/m_G) \sim 3 \cdot 10^{-5}$ за сутки измерений.

Изучение качества кремниевого интерферометра производилось по той же схеме и на той же установке, что в работе по изучению качества кристаллов кварца, необходимых для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона (рис. 2). Для исследования степени неоднородности межплоскостного расстояния использовался рефлекс (220) с длиной волны $\lambda = 3,84$ Å от кристаллографической плоскости (110), ориентированной параллельно входной поверхности.

На рис. 14(а) показаны результаты исследования двухкристального кремниевого интерферометра, где $\Delta d/d$ – величина изменения относительного межплоскостного расстояния кристалла для данной плоскости, L – положение пучка нейтронов относительно центральной области кристалла, которая была принята за нулевое положение.

Из этих результатов видно, что однородность в данном кристалле луч-

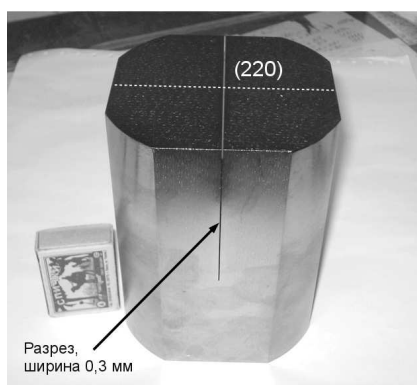


Рис. 13: Двухкристальный кремниевый интерферометр. Размеры $90 \times 94 \times 140$ мм

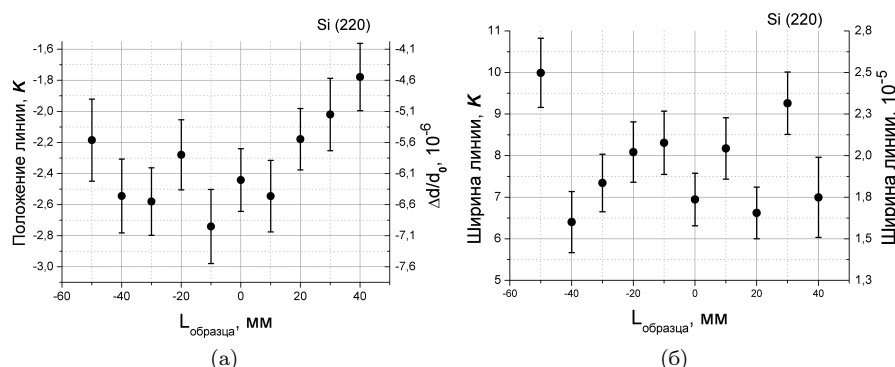


Рис. 14: Измерение распределения относительного изменения межплоскостного расстояния (а) и ширина рефлекса (б) в исследуемом образце кремния для рефлекса (220)

ше $\Delta d/d \sim 2,4 \cdot 10^{-6}$. На рис. 14(б) представлены ширины рефлексов в различных точках кристалла.

В заключении приведены основные результаты данной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. С.Ю. Семенихин, Ю.П. Брагинец, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин, В.В. Федоров, Я.А. Бердников, А.Я. Бердников, Е.О. Вежлев. Анализ совершенства кристаллов кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом. Препринт ПИЯФ-2818, Гатчина, 2009, 33 с.
2. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Diffraction enhancement and new way to measure neutron electric charge and the ratio of inertial to gravitational mass. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, **A 593** (2008) pp. 505-509.
3. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin, Yu.P. Braginetz, K.Yu. Amosov. Neutron volumetric test of interplanar distances of highly perfect crystals. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, **A 593** (2008) pp. 472-474.
4. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin, Yu.P. Braginetz, K.Yu. Amosov. Neutron volumetric analysis of a high perfect crystal quality. Preprint PNPI-2748, Gatchina, 2007, 11p.

5. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Crystal diffraction method to measure neutron electric charge and inertial to gravitational mass ratio. Preprint PNPI-2747, Gatchina, 2007, 16 p.
6. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Neutron spin optics in noncentrosymmetric crystals as a new way for nEDM search. Nucl. Instr. and Meth., **B 252**, No 1 (2006) 131-135.
7. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Neutron spin optics in a noncentrosymmetric crystals as a way for nEDM search. New experimental results. Physica B, Iss. 385–386 (2006) 1216-1218.
8. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Neutron Laue diffraction in a weakly deformed crystal at the Bragg angles close to $\pi/2$. Preprint PNPI-2698, Gatchina, 2006. 12 p.
9. V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Neutron Laue diffraction in a weakly deformed crystal at the Bragg angles close to $\pi/2$. Письма в ЖЭТФ, **85**, вып. 1 (2007) 90-93. (JETP Letters, **85**, No. 1 (2007) pp. 82–85).
10. В.В. Воронин, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин, С.Ю. Семенихин, В.В. Федоров. Эффект дифракционного усиления и новые возможности измерения заряда нейтрона и отношения его инертной массы к гравитационной. Ядерная физика, **72**, №3 (2009) с. 505-511.
11. Патент на изобретение "Способ определения относительного изменения межплоскостных расстояний совершенных монокристаллов" по заявке № 2009104107/28 (005467).

Список литературы

- [1] V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B252** (2006) 131.
- [2] V.V. Fedorov, M. Jentschel, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, E. Lelievre-Berna, V. Nesvizhevsky, A. Petoukhov, S.Yu. Semenikhin, T. Soldner, F. Tasset, V.V. Voronin, Yu.P. Braginetz. Test experiment for the neutron

- EDM search by crystal-diffraction method. Preprint PNPI-2789, Gatchina, 2008, 20p.
- [3] V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin, V.V. Voronin, Diffraction enhancement and new way to measure neutron electric charge and the ratio of inertial to gravitational mass. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, **A 593** (2008) pp. 505-509.
 - [4] В.В. Воронин, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин, С.Ю. Семенихин, В.В. Федоров. Эффект дифракционного усиления и новые возможности измерения заряда нейтрона и отношения его инертной массы к гравитационной. Ядерная физика, **72**, №3 (2009) с. 505-511.
 - [5] С.Ю. Семенихин, Ю.П. Брагинец, В.В. Воронин, И.А. Кузнецов, Е.Г. Лапин, В.В. Федоров, Я.А. Бердников, А.Я. Бердников, Е.О.Везлев, Анализ совершенства кристаллов кварца для эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона кристалл-дифракционным методом. Препринт ПИЯФ-2818, Гатчина, 2009, 33 с.
 - [6] Алексеев В.Л., Воронин В.В., Лапин Е.Г., Леушкин Е.К., Румянцев В.Л., Сумбаев О.И., Федоров В.В. Измерение сильного электрического внутрикристаллического поля в швингеровском взаимодействии дифрагирующих нейтронов. ЖЭТФ, **96** (1989) 1921-1926.
 - [7] F. Tasset, P.J. Brown, E. Lelie'vre-Berna, T. Roberts, S. Pujol, J. Allibon, E. Bourgeat-Lami. Physica B, **267-268** (1999) 69-74.
 - [8] V.V. Fedorov, I.A. Kuznetsov, E.G. Lapin, S.Yu. Semenikhin and V.V. Voronin. Письма в ЖЭТФ, **85** (2007) 90.
 - [9] В.Л.Инденбом, И.Ш.Слободецкий, К.Г.Труни. ЖЭТФ, **66**(3) (1974) 1110.
 - [10] J. Arthur, C. G. Shull and A. Zeilinger. Dynamical neutron diffraction in a thick-crystal interferometer. Phys. Rev. B, **32**(9) (1985) 5753.
 - [11] H. Rauch, D. Petráček. Neutron diffraction, ed. by H. Duchs (1978) 303-351.
 - [12] V.B. Braginsky and V.I. Panov. Sov JETPh, **61** (1971) 873.
 - [13] J. Schmiedmayer, Nucl. Instr. Meth. A, **284**, (1989) 59.