

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Материалы XX Международного
симпозиума**

14–18 марта 2016 г., Нижний Новгород

Том 1

Секции 1, 2, 4, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2016

Влияние пространственной когерентности нейтронного пучка на дифракцию на движущейся фазовой решетке

В.А. Бушув^{1*}, А.И. Франк²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, Москва, 119991.

² Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, ул. Жолио-Кюри, 6, Дубна, 141980.

*vabushuev@yandex.ru

В рамках формализма, развитого в статистической оптике и радиофизике, рассмотрено влияние пространственной когерентности квазимонохроматического потока ультрахолодных нейтронов (УХН) на их дифракцию на движущейся периодической фазовой решетке и проведен анализ спектрального распределения интенсивности дифрагированных нейтронов различных порядков дифракции при произвольной степени пространственной когерентности пучка УХН.

Введение

В работах [1-5] было показано, что периодическая дифракционная решетка, движущаяся поперек пучка УХН, является квантовым модулятором энергетического спектра дифрагированных нейтронов. Это явление, в частности, было уже использовано в гравитационных экспериментах [4-6] по проверке слабого принципа эквивалентности для нейтрона.

Известно, что такие характеристики излучения произвольного типа как длина волны, угловая расходимость, спектральное распределение, поляризация и т.п. самым существенным образом влияют на рассеяние и дифракцию в кристаллах, многослойных структурах и периодических решетках. К настоящему времени статистические свойства пучков УХН в реальных экспериментах на нейтронных реакторах практически не изучены. В настоящей работе с привлечением таких понятий как корреляционная функция, длины пространственной и временной когерентности нейтронного пучка рассмотрена дифракция нейтронов на движущейся периодической фазовой решетке.

Методы расчета

Рассмотрим дифракцию однородного в среднем потока УХН на движущейся решетке. Этот поток формируется в результате прохождения в общем случае хаотического ансамбля УХН, находящегося в накопительной входной камере, через нейтронный интерференционный фильтр с амплитудным коэффициентом пропускания $T(\omega - \omega_0)$ [2-5]. Вол-

новую функцию нейтронов, падающих на решетку в плоскости $z = 0$, можно представить в виде $\Psi_{in}(x, t) = \Psi_0(x)b(t)$, где $b(t) = \int b(\omega)\exp(-i\omega t)d\omega$. Здесь $b(\omega) = a(\omega)T(\omega - \omega_0)$, $a(\omega)$ – спектральные амплитуды стационарного случайного процесса $a(t)$ в камере с УХН с функцией временной когерентности $\gamma(\tau) = \langle a(t)a^*(t + \tau) \rangle$, $\omega = \hbar k_z^2/2M$, M – масса нейтрона, $\omega_0 = MV_{0z}^2/2\hbar$, V_{0z} – вертикальная проекция скорости нейтронов, соответствующая максимуму ω_0 функции пропускания. В системе координат, которая движется вместе с решеткой со скоростью V_{gr} вдоль оси x , функция $\Psi_0(x)$ имеет вид

$$\Psi_0(x) = A_0(x)\exp(-ik_V x) = \int \Psi_0(k_x)\exp(ik_x x)dk_x, \quad (1)$$

где $A_0(x)$ – случайная амплитуда с функцией пространственной когерентности $\gamma(\rho) = \langle A_0(x)A_0^*(x+\rho) \rangle$, $k_V = MV_{gr}/\hbar$, $\Psi_0(k_x) = A_0(k_x + k_V)$. Формально (1) представляет собой совокупность плоских волн с x -проекциями волновых векторов $(k_x - k_V)$ и полным волновым числом $k(\omega) = [(k_x - k_V)^2 + k_z^2]^{1/2}$, где $k_x = MV_x/\hbar$. Здесь V_x – горизонтальные проекции скорости нейтронов в камере с УХН, которые не меняются при прохождении нейтронов через монохроматор и случайным образом распределены в интервале $|V_x| \leq V_{xmax}$, определяемом граничной скоростью явления полного внешнего отражения от стенок камеры и вертикального нейтронотода.

На выходе из решетки $\Psi(x) = \Psi_{in}(x)F(x)$, где $F(x) = \sum_m F_m \exp(ig_m x)$ – периодическая функция пропускания решетки, $g_m = mg_0$, $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $g_0 = 2\pi/d$, d – период решетки. В случае тонкой решетки амплитуды F_m равны коэффициентам Фурье-

разложения функции $F(x) = \exp[i\phi(x)]$ [1-6]. В более общем случае 3D-решетки эти амплитуды находятся из решения многоволновой динамической системы уравнений для связанных медленно меняющихся амплитуд [7]. Переходя в лабораторную систему, получим, что в произвольной плоскости z

$$\Psi(x, z, \omega) = \sum_m b(\omega - \omega_{mz}) F_m \int A_0(k_x) \exp(i\phi_m) dk_x, \quad (2)$$

где $\phi_m = k_{mx}x + k_{mz}z$, $k_{mx} = k_x + g_m$, $k_{mz} = [k_z^2(\omega) + 2(k_y - k_x)g_m - g_m^2]^{1/2}$, $\omega_{mz} = \hbar k_{mz}^2 / 2M$. Наличие переменной k_x в (2) описывает уширение углового и спектрального распределений порядков дифракции.

Для нахождения интенсивности $\langle \Psi \Psi^* \rangle$ воспользуемся тем, что для статистически однородной функции $A_0(x)$ коррелятор $\langle A_0(q) A_0^*(q') \rangle = G(q) \delta(q - q')$, где $G(q)$ - угловой спектр, связанный с поперечной функцией пространственной когерентности $\gamma(\rho)$ соотношением (теорема Винера-Хинчина)

$$G(q) = (1/2\pi) \int \gamma(x) \exp(-iqx) dx. \quad (3)$$

В предположении о гауссовой статистике $a(t)$ и $A_0(x)$ из (2) и (3) получим следующее выражение для спектрального распределения интенсивности дифрагированных нейтронов вдоль оси z :

$$I(E) = \sum_m \frac{|F_m|^2}{\sigma_m \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E - E_0 - m\hbar\Omega)^2}{2\sigma_m^2}\right], \quad (4)$$

где $\Omega = 2\pi V_{gr}/d$ - спектральное расщепление между соседними порядками дифракции, $\sigma_m^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{mx}^2$, σ_T - среднеквадратичная ширина гауссовой функции пропускания монохроматора, $\sigma_{mx} = |m|\hbar^2 g_0 / M \rho_c$, ρ_c - длина поперечной пространственной когерентности падающего пучка нейтронов, определяемая согласно соотношению $\gamma(x) = \exp(-x^2/2\rho_c^2)$.

Результаты и обсуждение

Из (4) видно, что спектральное расстояние между порядками Ω увеличивается с увеличением скорости решетки V_{gr} ; спектральные ширины порядков отражения σ_{mx} не зависят от скорости решетки, увеличиваются с ростом номера порядка m , с уменьшением периода решетки, а также с уменьшением длины пространственной когерентности ρ_c (см. рис. 1), или, что эквивалентно, с увеличением величины характерного разброса ΔV_x горизонтальной скорости нейтронов, так как $\sigma_{mx} = m\hbar\Delta V_x g_0$ [7]. Интерференционный фильтр

резко сужает энергетический спектр прошедших нейтронов по сравнению со спектром в камере УХН и, естественно, увеличивает время когерентности $\tau_c = \hbar/\sigma_T$ и длину продольной (временной) когерентности $l_\tau = \tau_c V_{0z}$.

При расчетах ниже использовались следующие данные [2-6]: энергия $E_0 = 107$ нэВ, $V_{0z} = 4.52$ м/с, $\lambda_{0z} \approx 0.09$ мкм, относительная ширина $\sigma_T/E_0 \approx 0.04$, $d = 5$ мкм, $V_{gr} = 2\pi Rf$, где f - частота вращения диска с радиусом решетки $R = 6$ см. При частоте вращения $f = 100$ Гц скорость $V_{gr} \approx 38$ м/с и энергия $\hbar\Omega \approx 31$ нэВ. Время когерентности $\tau_c \approx 0.15$ мкс, а длина $l_\tau \approx 0.7$ мкм. Если принять, что $V_{xmax} \approx 4.5$ м/с [2], то уширение $\sigma_{1x} \approx 3.7$ нэВ и длина пространственной когерентности пучка УХН $\rho_c \approx 140$ Å.

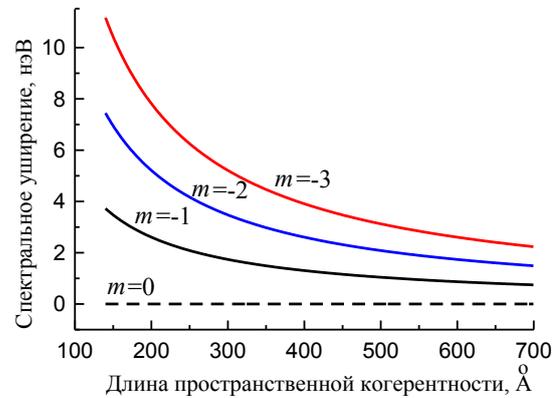


Рис. 1. Зависимость спектрального уширения σ_{mx} разных порядков дифракции m от длины пространственной когерентности ρ_c

Таким образом, измерения спектрального уширения разных порядков дифракции позволяют в принципе определять характерную длину пространственной когерентности пучка УХН, а возможно, и явный вид функции пространственной когерентности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 15-02-02367, 15-02-02509).

Литература

1. A.I. Frank, V.G. Nosov // Phys. Lett. A, V. 188, 120 (1994).
2. A.I. Frank, S.N. Balashov, I.V. Bondarenko, et al. // Phys. Lett. A, V. 311, 6 (2003).
3. А.И. Франк, П. Гелтенборг, Г.В. Кулин и др. // Письма в ЖЭТФ, Т. 81, 541 (2005).

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33
Н-25

Нанозлектроника и нанозлектроника. Материалы XX Международного симпозиума (Нижний Новгород, 14–18 марта 2016 г.) В 2 т. Том 1. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2016. — 434 с.
ISBN 978-5-91326-378-0

Организаторы

Федеральное агентство научных организаций РФ
Отделение физических наук РАН
Научный совет РАН по физике полупроводников
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Институт физики микроструктур РАН
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
Нижегородский фонд содействия образованию и исследованиям

Сопредседатели Симпозиума

С.В. Гапонов, академик РАН, ИФМ РАН
З.Ф. Красильник, д.ф.-м.н., ИФМ РАН

Учёный секретарь Симпозиума

А.В. Новиков, к.ф.-м.н., ИФМ РАН

Программный комитет

В.В. Бельков, д.ф.-м.н., ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.А. Бушуев, д.ф.-м.н., МГУ, Москва
В.А. Быков, д.т.н., ЗАО «НТ-МДТ», Москва
В.А. Волков, д.ф.-м.н., ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
В.И. Гавриленко, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
К.Н. Ельцов, д.ф.-м.н., ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Москва
С.В. Иванов, д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Е.Л. Ивченко, д.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
В.В. Кведер, чл.-корр. РАН, ИФТТ РАН, Черногловка
А.В. Латышев, чл.-корр. РАН, ИФП СО РАН, Новосибирск
А.С. Мельников, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
В.Л. Миронов, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
С.А. Никитов, чл.-корр. РАН, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва
Д.В. Рошупкин, д.ф.-м.н., ИПТМ РАН, Черногловка
В.В. Рязанов, д.ф.-м.н., ИФТТ РАН, Черногловка
Н.Н. Салашенко, чл.-корр. РАН, ИФМ РАН, Н. Новгород
А.А. Саранин, чл.-корр. РАН, ИАПУ ДВО РАН, Владивосток
Н.Н. Сибельдин, чл.-корр. РАН, ФИАН, Москва
В.Б. Тимофеев, академик РАН, ИФТТ РАН, Черногловка
Ю.А. Филимонов, д.ф.-м.н., Саратовский филиал ИРЭ РАН, Саратов
А.А. Фраерман, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.Р. Хохлов, чл.-корр. РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва
А.В. Чаплик, академик РАН, ИФП СО РАН, Новосибирск
Е.В. Чупрунов, д.ф.-м.н., ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород
Н.И. Чхало, д.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н.Новгород

Организационный комитет

В.Г. Беллюстина, ИФМ РАН, Н. Новгород
М.В. Зорина, ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Иконников, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
Д.А. Камелин, ИФМ РАН, Н. Новгород
Р.С. Малофеев, ИФМ РАН, Н. Новгород
А.В. Новиков, к.ф.-м.н., ИФМ РАН, Н. Новгород
Н.А. Байдакова, ИФМ РАН, Н. Новгород

УДК 538.9
ББК 22.37; 22.33

ISBN 978-5-91326-378-0

© Институт физики микроструктур
РАН, 2016
© Нижегородский госуниверситет
им. Н.И. Лобачевского, 2016