

РЕЗОНАНСНОЕ УСИЛЕНИЕ ДИФFUЗНОГО РАССЕЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ ВОЛНОВОДНОГО ТИПА

*А.В.Андреев¹⁾, Ю.В.Пономарев, И.Р.Прудников, Н.Н.Салащенко**

*Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова
119899 Москва, Россия*

** Институт физики микроструктур РАН
603600 Н.Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 9 июля 1997 г.

Проведено исследование диффузного рассеяния рентгеновских лучей в четырехслойной гетероструктуре волноводного типа. Экспериментально зарегистрирован динамический эффект усиления диффузного рассеяния в областях, отвечающих возбуждению волноводных мод как по падающей, так и по рассеянной волнам.

PACS: 78.70.Ck

Настоящая статья посвящена исследованию особенностей диффузного рассеяния рентгеновских лучей в многослойных непериодических наноструктурах волноводного типа. Экспериментально зарегистрирован эффект резонансного усиления диффузного рассеяния в областях, отвечающих возбуждению волноводных мод как по падающей, так и по рассеянной волнам. Эффект имеет динамическую природу и связан с возникновением в исследуемой структуре стоячего интерференционного поля. В области возбуждения волноводных мод фаза интерференционного поля сильно зависит от угла падения или угла рассеяния. Это дает возможность прецизионного измерения статистических характеристик шероховатостей внутренних границ раздела структуры.

Диффузное рассеяние рентгеновских лучей является эффективным методом определения статистических характеристик шероховатых поверхностей [1–5], границ раздела аморфных и кристаллических пленок [4–7], многослойных наноструктур [8–10], пленок Ленгмюра–Блоджет [11]. Интенсивное применение для исследования многослойных структур этот метод нашел после развития теории когерентного диффузного рассеяния [12, 8, 9], показавшей, что интенсивность рассеяния как функция углов падения θ_0 и рассеяния θ , имеет последовательность максимумов, определяемых условием $\theta_s + \theta_0 = 2n\theta_B$, где $n = 1, 2, \dots$, $\theta_B = \lambda/2d$ – брэгговский угол, d – период структуры. Профиль максимумов, получивших название брэгговских поверхностей, существенно зависит от статистических и корреляционных свойств шероховатостей внутренних границ раздела структур, что и послужило основой практического применения эффекта. Недавно теория когерентного диффузного рассеяния была перенесена на случай непериодических многослойных структур [13]. Для волноводных гетероструктур в этом случае наряду с брэгговскими поверхностями появляются новые поверхности максимумов, которые отвечают возбуждению волноводных мод. В настоящей работе указанные максимумы обнаружены экспериментально и исследованы особенности их возбуждения.

¹⁾ e-mail: andreev@sr.phys.msu.su

Экспериментальные методы исследования. Четырехслойная структура, представляющая собой последовательность слоев углерода и хрома (Cr/C/Cr/C), изготовлена в ИФМ г.Н.Новгород путем магнетронного напыления на стеклянную подложку размером 25×70 мм. По технологическим оценкам толщины слоев имели значения: Cr(100 Å), C(300 Å), Cr(30 Å), C(100 Å), а среднеквадратичная высота шероховатости поверхности подложки не превышала 5 Å. Верхний слой углерода C(100 Å) играл роль буфера и предотвращал окисление слоя хрома.

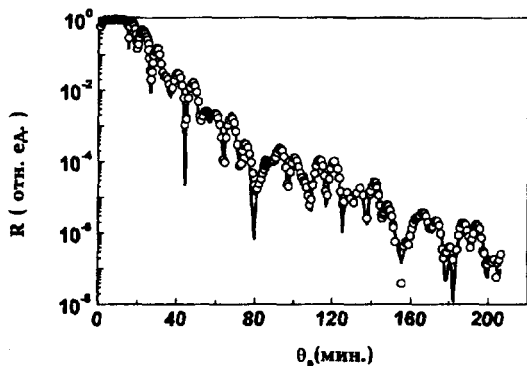


Рис.1. Экспериментальная (точки) и расчетная зависимости коэффициента отражения R от угла скольжения

Эксперимент проводился на рентгеновском двухкристальном спектрометре (рентгеновская трубка 1.5 кВт с медным анодом, монохроматор Ge(220)). Расходимость падающего на образец монохроматизированного излучения не превышала $40''$. Излучение, рассеянное образцом, регистрировалось сцинтилляционным детектором (при записи кривых качания) и рентгеновским координатным детектором (при записи угловых спектров рассеяния) с размерами окна 40×10 мм и пространственным разрешением 0.2 мм.

Результаты эксперимента и численного моделирования. На рис.1 приведена кривая зеркального отражения исследуемой гетероструктуры. Минимум на кривой при угле падения $\theta_0 \approx 15'$ связан с возбуждением первой волноводной моды в слое углерода, расположенном между слоями хрома [14,15]. Минимум при $\theta_0 \approx 21'$ по положению практически совпадает с критическим углом для хрома и отражает возбуждение квазиволноводной моды. Последующие осцилляции представляют собой результат интерференции лучей, отраженных от различных границ раздела. В результате численного моделирования кривой зеркального отражения были получены следующие оценки параметров гетероструктуры: $\rho_C = 2.3 \text{ г/см}^3$, $\rho_{Ni} = 7.2 \text{ г/см}^3$, SiO₂(/3.9), Cr(103.8/3.9), C(251.4/4.9), Cr(33.4/5.0), C(109.6/9.1) (в скобках указаны в ангстремах толщина слоя d_j и среднеквадратичная высота шероховатости σ_j верхней границы j -го слоя, нумерация границ раздела j начинается с подложки, для которой $j = 0$).

На рис.2а показан набор угловых спектров диффузного рассеяния, записанных для углов падения в области первой волноводной моды, а на рис.2б приведена зависимость интенсивности рассеянной волны от угла падения при фиксированном угле выхода и показаны вклады каждой границы раздела в диффузное рассеяние. Рис.2 демонстрирует усиление диффузного рассеяния при возбуждении волноводной моды. Это связано с образованием внутри структуры стоячей волны по падающему полю [13], приводящей к тому, что

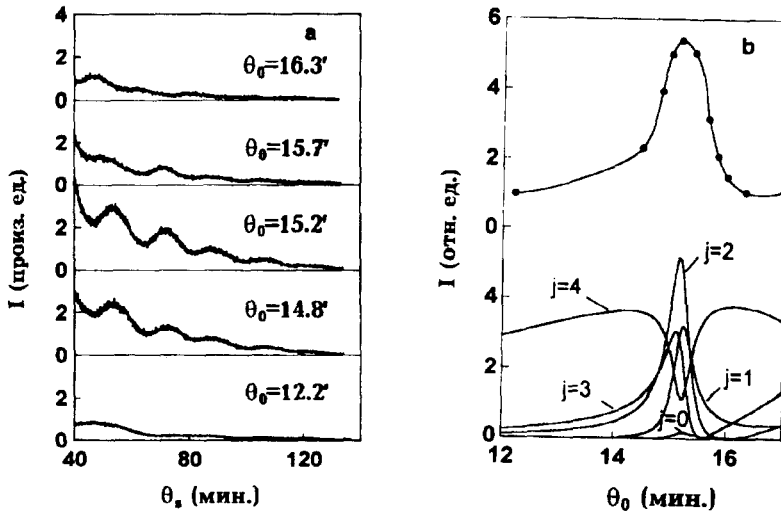


Рис.2. *a* – Экспериментальные угловые спектры диффузного рассеяния; *b* – рассчитанная интенсивность стоячего волнового поля на различных границах раздела j и экспериментально измеренная (кривая с точками) интенсивность диффузного рассеяния для угла $\theta_s \approx 40'$ в области первой волноводной моды

амплитуда суммарного поля на внутренних границах увеличивается, а на внешних – падает (рис.2*b*).

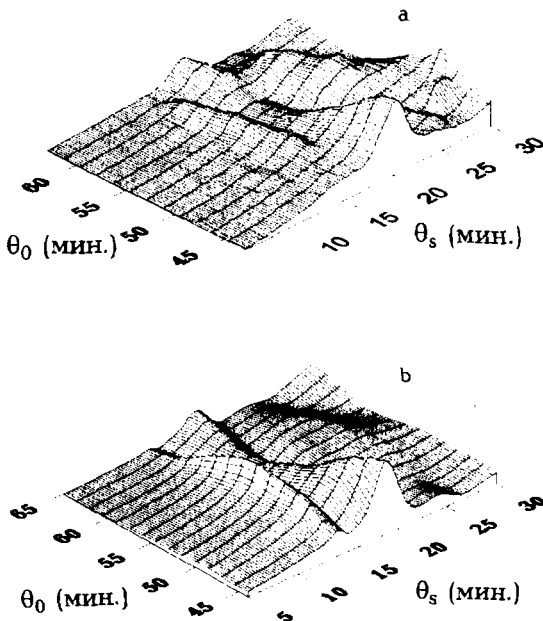


Рис.3. Экспериментальный (*a*) и рассчитанный (*b*) трехмерные угловые спектры интенсивности диффузного рассеяния

Усиление диффузного рассеяния экспериментально наблюдается и при возбуждении волноводной моды по рассеянной волне. На рис.3 представлены

трехмерные спектры интенсивности диффузного рассеяния как функции углов θ_0 и θ_s . Максимумы в области $\theta_s < 25'$ возникают в результате возбуждения волноводной ($\theta_s \approx 15'$) и квазिवолноводной ($\theta_s \approx 21'$) моды по диффузно рассеянной волне. Усиление диффузного рассеяния в области возбуждения волноводных мод по рассеянной волне иллюстрирует принцип взаимности электродинамики [16] (выражение для амплитуды диффузно рассеянной в гетероструктуре волны симметрично относительно замены $\theta_0 \leftrightarrow \theta_s$ [13]). В области возбуждения волноводных мод по углу выхода ($\theta_s \approx 15', 21'$) диффузные волны также образуют стоячую волну. При этом диффузное рассеяние от всей гетероструктуры зависит от амплитуды и фазы этой волны на каждой границе раздела. Максимумы в диффузном рассеянии при $\theta_s \approx 15', 21'$ (рис.3) иллюстрируют возрастание указанного интерференционного поля на внутренних границах раздела [13].

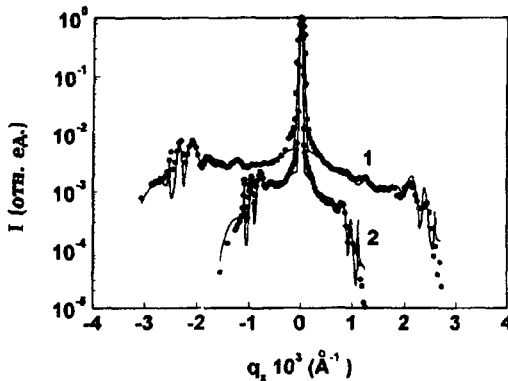


Рис.4. Экспериментальные (точки) и рассчитанные (сплошные линии) кривые качания в зависимости от продольной компоненты вектора рассеяния q_x ($q_x = (2\pi/\lambda) \cdot (\cos \theta_0 - \cos \theta_s)$). Угол $\theta^* \approx 69'$ (1), $48'$ (2)

Эффект усиления диффузного рассеяния при возбуждении волноводной моды по падающей ($\theta_0 \approx 15', 21'$) и рассеянной ($\theta_s \approx 15', 21'$) волнам виден также на кривых качания, представленных на рис.4 (при записи кривой качания выполняется условие $\theta_0 + \theta_s = 2\theta^* = \text{const}$).

Проведенные эксперименты показывают, что диффузное рассеяние на внутренних границах многослойных структур чрезвычайно чувствительно к фазе интерференционного поля стоячей волны, образующейся в структуре. В отличие от методов рентгеновских стоячих волн, основанных на регистрации вторичных процессов (флуоресценция, оже-электроны и др.), диффузное рассеяние по своей природе чувствительно к состоянию поверхности. Это дает возможность разработки методов изучения динамики модификации поверхности при различных внешних воздействиях. При исследованиях качества границ раздела многослойных структур возбуждение стоячих волн в структуре дает возможность выделения вкладов, вносимых в диффузное рассеяние различными границами раздела, что значительно повышает точность методов восстановления параметров структур по угловым спектрам диффузного рассеяния.

Работа была выполнена при поддержке РФФИ (проект 95-02-05256-а).

2. А.В.Андреев, УФН **145**, 113 (1985).
3. S.K.Sinha, E.B.Sirota, S.Garoff, and H.B.Stanley, Phys. Rev. B **38**, 2297 (1988).
4. В.М.Синайский, В.И.Сиденко, ПТЭ **6**, 5 (1974).
5. А.В.Виноградов, И.А.Брыгов, А.Я.Грудский и др., *Зеркальная рентгеновская оптика*, Л.: Наука, 1989.
6. S.Dietrich and A.Haase, Phys. Rep. **260**, 1 (1995).
7. W.Plotz, V.Holy, W.V.D.Hoogenhof, and K.Lischka, J. Phys. III **4**, 1565 (1994).
8. V.Holy and T.Baumbach, Phys. Rev. B **49**, 10668 (1994).
9. S.K.Sinha, M.K.Sanyal, S.K.Satiya et al., Physica B **198**, 72 (1994).
10. A.V.Andreev, Yu.V.Ponomarev, Yu.Ya Platonov, and N.N.Salashchenko, Proc. SPIE **2801**, 75 (1995).
11. U.Pietsch, T.Barberka, W.Mahler, and T.H.Metzger, Thin Solid Films **247**, 230 (1994).
12. A.V.Andreev, A.G.Michette, and A.J.Renwich, J. Mod. Opt. **35**, 1667 (1988).
13. А.В.Андреев, И.Р.Прудников, Кристаллография **41**, 220 (1996).
14. Y.P.Feng, S.K.Sinha, H.W.Deckmann et al., Phys. Rev. Lett. **71**, 537 (1993).
15. С.И.Желудева, М.В.Ковальчук, Н.Н.Новикова и др., Кристаллография **40**, 145 (1995).
16. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, М.: Наука 1992.