

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ СЛАБЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В. Д. Русов, М. Ю. Семенов, Т. Н. Зеленцова, И. В. Кочиков,  
Б. И. Резник, С. Н. Кравченко, А. Г. Ягола

Необходимость разработки надежного и эффективного метода усиления и восстановления тонкой структуры слабых рентгеновских изображений является очевидной и актуальной задачей рентгеноструктурного анализа, где фотографическое изображение как форма представления экспериментальной информации является одновременно результатом и объектом измерений.

Многие практические приложения метода основаны на небольших изменениях кристаллической решетки, и поэтому для их измерения необходима наивысшая возможная прецизионность. Это относится в первую очередь к таким методам рентгеноструктурного анализа, как уширение и сдвиг интерференционных линий, прецизионные измерения параметров элементарной ячейки кристаллических веществ и др.

Главной особенностью указанных рентгеновских методов является то, что точность интерпретации рентгенограмм при использовании специальных методов расчета параметров по экспериментальным данным существенно зависит от точности измерения профиля интерференционных линий и промера расстояния между ними [1].

Целью настоящей работы явилась разработка принципиально нового прецизионного способа измерения профиля интерференционных линий рентгенограмм посредством автордиографического усиления с последующим восстановлением тонкой структуры слабых рентгеновских изображений.

Суть метода заключается в следующем. Рентгенограмма обрабатывается в радиоактивном растворе, в результате чего ее фотографическое серебро связывается с радиоактивным изотопом. Затем путем обычной автордиографии (АРГ) на монослое ядерной фотоэмульсии получают АРГ копию. С помощью электронного микроскопа снимают информацию о числе проявленных зерен серебра вдоль профиля этой копии, а первичный профиль рентгеновской линии восстанавливают посредством решения двумерного интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода типа свертки [2, 3]

$$f(x_n, z_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x_m, z_m) K(x_n - x_m, z_n - z_m) dx_m dz_m, \quad (1)$$

где  $f(x_m, z_m)$  — функция плотности числа проявленных зерен серебра в зависимости от их координат на рентгенограмме  $x_m$  и  $z_m$  первичного профиля искомой линии;  $f(x_n, z_n)$  — функция числа проявленных зерен серебра в зависимости от их координат  $x_n$  и  $z_n$  на АРГ копии;  $K(x_n - x_m, z_n - z_m)$  — функция поглощенной дозы, описывающая свойства и характеристики изотопа и поглощения излучения в ядерной фотоэмульсии.

Использование предлагаемого способа АРГ усиления и восстановления тонкой структуры рентгеновских изображений обеспечивает следующие преимущества.

1) Получение максимального отношения сигнал—шум профиля интерференционной линии за счет снятия информации с поверхностного слоя рентгенограммы, обращенного к характеристическому излучению, и применения источников мягкого  $\beta$ -излучения, обладающих минимальным пробегом в фотоэмульсии (0.5—1.0 мкм).

2) Восстановление тонкой структуры (в частности, разделение на дублеты  $K_\alpha$  излучения при малых углах дифракции) не только видимых, но и визуально ненаблюдаемых рентгеновских линий, т. е. таких, интенсивность которых соизмерима с интенсивностью фона.

3) Высокое пространственное разрешение автордиографического восстановления профиля интерференционных линий рентгенограмм (0.1 мкм).

Восстановление тонкой структуры интерференционных линий, получаемых на рентгенограммах, в частности разделение на дублеты характеристического излучения, существенно зависит от вклада фонового излучения, влияние которого проявляется в размытии краев линии и смещения их центра тяжести. Следовательно, при восстановлении тонкой структуры необходимо либо учитывать фон, либо частично или полностью от него избавляться. Это в первую очередь относится к восстановлению линий, интенсивность которых

соизмерима с интенсивностью фона и которые предвременно необходимо усиливать. Выделение таких линий после усиления возможно, так как экспериментально доказано различие в компактности проявленных зерен серебра полезного и фоновый сигнала, что и обуславливает различную степень связывания их с радиоактивным изотопом и, следовательно, различное их усиление [4].

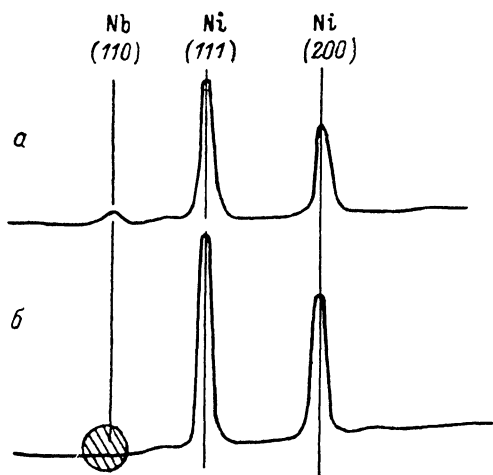


Рис. 1. Микрофотографии рентгенограмм эталонов и образца.

Заштрихованная область — местоположение линии (100) Nb на рентгенограмме, которая обрабатывалась по предлагаемому способу. *a* — Ni (90 %) + Nb (10 %), *б* — Ni (99 %) + Nb (1 %).

В качестве исследуемого образца была выбрана смесь Ni и Nb. Эталоном служили рентгенограммы смеси Ni—Nb в различных пропорциях. Тщательно перемешанные порошки набивались в коллодиевые капилляры с внутренним диаметром 0.5 мм и экспонировались в камере Дебая при следующих режимах: излучение  $\text{CuK}\alpha$  фильтрованное ( $\alpha_1 = 1.54050 \text{ \AA}$ ,  $\alpha_2 = 1.54433 \text{ \AA}$ ),  $U = 45 \text{ кВ}$ ,  $I = 15 \text{ мА}$ , время экспозиции 3 ч, тип пленки РТ-5. Режимы проявления рентгенограмм во всех случаях были одинаковы. Микрофотографии таких рентгенограмм представлены на рис. 1.

Для АРГ усиления был выбран участок рентгенограммы (Nb 1 % + Ni 99 %), содержащий первую (визуально ненаблюдаемую) линию ниобия (100). Выбранный участок после отбеливания в бромной воде обрабатывался в растворе, содержащем радиоактивный изотоп  $^{125}\text{I}$ . В результате реакции обмена каждое зерно серебра первичного изображения становится радиоактивным. Затем копирующий слой, представляющий собой монослой ядерной фотоэмульсии ПР-2, нанесенный на электронно-микроскопические бленды с коллодиевой подложкой, приводился в контакт с исследуемым участком рентгенограммы и экспонировался в течение 24 ч. Проявление осуществлялось в физическом проявителе.

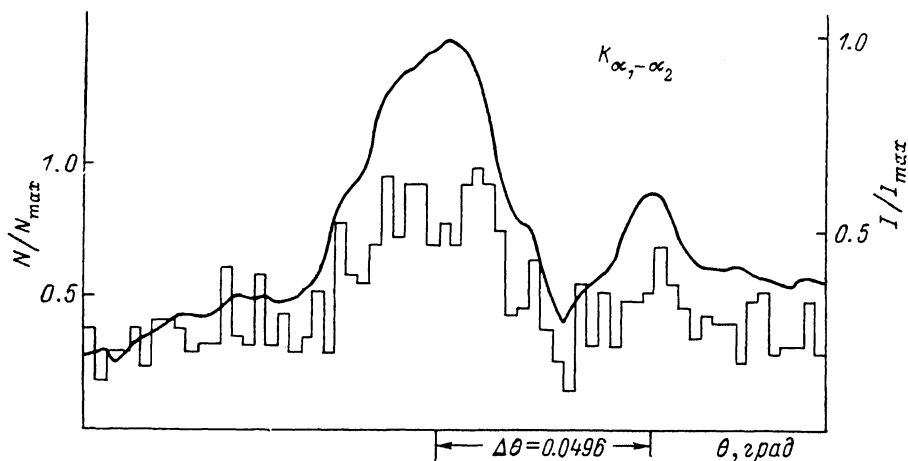


Рис. 2. Гистограмма распределения плотности числа проявленных зерен серебра, соответствующая невидимой линии ниобия (100) порошковой рентгенограммы (1 % Nb + 99 % Ni) (1), и ее восстановленный спектр (2).

С полученной АРГ копии с помощью электронного микроскопа «Хитачи Н-500» подсчитывали число проявленных зерен серебра вдоль профиля АРГ копии исследуемой рентгеновской линии и строили гистограмму (рис. 2, 1). Построение гистограммы проводили с шагом 0.3 мкм. Однако из-за невозможности графического изображения такого большого числа точек гистограмма на рис. 2 (кривая 1) представлена в виде ступенек, каждая из которых соответствует среднему значению 10 линий.

Восстановление тонкой структуры первичной исследуемой рентгеновской линии (рис. 2, 2) осуществлялось решением уравнения (1) методом регуляризации по Тихонову [5].

Как видно из рис. 2, применение предлагаемого способа позволило не только выявить ранее визуально ненаблюдаемую на рентгенограмме линию Nb, но и разделить ее на дублеты характеристического излучения. Сравнение значения междублетного расстояния  $\Delta\lambda$ , полученного расчетом на основе экспериментальных данных  $\Delta\lambda_{\text{эксп}} = 2'58, 560'' \pm 1.08''$ , показывает хорошее согласие с теоретическим значением  $\Delta\lambda_{\text{теор}} = 2'58.812''$ .

Очевидно, что одновременно решена и задача повышения чувствительности качественного фазового анализа: для рассмотренного примера более чем в 10 раз.

В заключение отметим, что предложенный метод может быть также успешно применен в рентгеноспектральном анализе (например, для изучения структуры уровней энергии электронов), в дифракционной микрорентгенографии, в рентгеновской топографии, для регистрации быстропротекающих процессов (горение, взрыв) и свечения слабых объектов (звезды и т. п.), в ядерной спектроскопии и т. д.

### Литература

- [1] Русаков А. А. Рентгенография металлов. М.: Атомиздат, 1977. 480 с.
- [2] Русов В. Д., Семенов М. Ю., Бабикова Ю. Ф. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 10. С. 2215—2219.
- [3] Русов В. Д., Семенов М. Ю., Бабикова Ю. Ф. // ДАН СССР. 1982. Т. 268. №. 2. С. 377—381.
- [4] Картужанский А. Л. // Успехи науч. фотогр. 1966. Т. 12. С. 91—96.
- [5] Русов В. Д., Кочкиков И. В., Семенов М. Ю., Ягола А. Г. // Методы решения некорректных задач и их применение. Новосибирск, 1982. С. 229.

Одесский государственный университет им. И. И. Мечникова

Поступило в Редакцию  
13 мая 1987 г.

03; 04

Журнал технической физики, т. 59, в. 7, 1989

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ГАЗЕ ПОСЛЕ СКОЛЬЗЯЩЕГО РАЗРЯДА ПО ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКА

О. А. Журавлев, А. В. Кислицев, А. И. Кравцов, А. Л. Муркин,  
А. И. Федосов

Повышенный интерес к работе скользящего разряда (СР) в импульсно-периодическом режиме [1] связан с перспективами применения его в качестве эффективного плазмостового УФ преионизатора в прокачных ТЕА лазерах. Этому способствуют высокая скорость

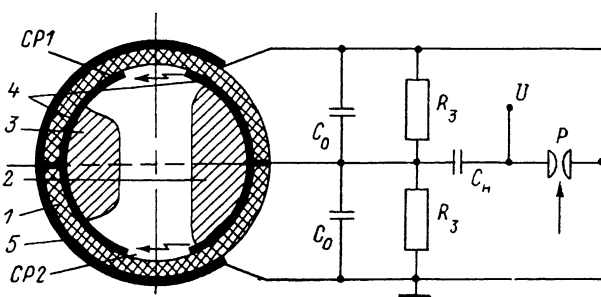


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

восстановления электрической прочности промежутка после СР [2], возможность сохранения излучательных характеристик разряда при частоте следования импульсов тока до  $10^4$  Гц [3].

К числу недостаточно изученных относятся вопросы, связанные с уровнем газодинамических возмущений, создаваемых СР в активной среде лазера. Отсутствие газодинамической модели СР можно объяснить высокой однородностью разряда как в моноимпульсном,