

06

Возможность использования платиновых фольг с гофрированной поверхностью в качестве дифракционных решеток

© В.Е. Корсуков, А.В. Анкудинов, П.Н. Бутенко, С.А. Князев,
М.М. Корсукова, Б.А. Обидов, И.П. Щербаков

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: vjacheslav.korsukov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.

Методами дифракции медленных электронов, атомной силовой и сканирующей туннельной микроскопии исследован поверхностный рельеф тонких холоднокатаных платиновых фольг в процессах рекристаллизационного отжига и нагружения в сверхвысоком вакууме. При высокотемпературном нагреве и одноосном растяжении рекристаллизованных фольг Pt получены образцы, поверхность которых образует фрактальную структуру однонаправленных разномасштабных гофров. Измерены общая фрактальная размерность поверхности — $D_{GW} = 2.3$, размерности вдоль поверхности — $D_{\parallel} \approx 1$ и поперек гофров — $D_{\perp} \approx 1.3$. Записаны оптические спектры галогенной лампы и лампы ПРК-2 с использованием этих фольг Pt в качестве отражательных дифракционных решеток. Показано, что фольги Pt с подобным рельефом поверхности могут быть использованы как отражательные дифракционные решетки в широком диапазоне электромагнитного излучения.

Нано- и микроразмерные структуры, в том числе фрактальные, на поверхности металлов, полупроводников, аморфных сплавов и других создают путем воздействия лазерного излучения, ионной бомбардировки, механической нагрузки, электрохимическими технологиями [1–7]. Подобные структуры играют большую роль в оптических явлениях,

физике прочности и деформации, механике сплошных сред, в гетерокатализе.

Дифракционные решетки, работающие в инфракрасной (ИК), видимой, ультрафиолетовой (УФ) областях спектра, в вакуумном ультрафиолете (ВУФ) и мягком рентгене (МР), изготавливаются либо механической нарезкой штрихов, либо литографическим способом [8,9]. Решетки, изготовленные нарезкой, устойчивы к интенсивным потокам света и рентгеновского излучения. Они хорошо работают в ИК-, видимом и ближнем ультрафиолетовом (БУФ) диапазонах. Однако при переходе к диапазонам ВУФ и МР эффективность таких решеток понижается. Это происходит из-за того, что нарезкой нельзя сделать период решетки меньше, чем $1/2500$ мм. Решетки, изготовленные методом литографии, могут иметь меньший период, но большинство из них не стойки к высоким температурам и интенсивному излучению.

В работах [2,3,5] описаны фрактальные нано- и микроструктуры на поверхностях тонких фольг платины и лент аморфного сплава (АС) на основе железа $Fe_{77}Ni_1Si_9B_{13}$. В работах [2,5] изучены поверхности с однонаправленным гофрированным рельефом фольг Pt и лент АС, приготовленных методом спиннингования. В работе [2] было высказано предположение, что такие поверхности могут послужить основой для изготовления отражательных дифракционных решеток. Целью предлагаемой работы является проверка этого предположения.

Для получения однонаправленных гофрированных нано- и микроструктур на поверхности тонких платиновых фольг нами разработана специальная методика. Фольги готовятся методом холодной прокатки, полировки поверхности, ее предварительной очистки в спирте, ацетоне и нормальном гептане. В качестве образцов используются полоски полученной таким образом платиновой фольги размерами $30 \times 4 \times (0.02-0.06)$ мм.

Окончательная очистка и рекристаллизация поверхности происходят в сверхвысоком вакууме (СВВ). Процедура производилась путем чередования циклов прогрева образцов в атмосфере кислорода при парциальном давлении $O_2 \sim 10^{-4}$ Па при температуре 750–1100 К и отжига в СВВ при температуре 800–1900 К. При проведении процедур осуществляется мониторинг поверхности фольг методами дифракции медленных электронов (ДМЭ) и электронной оже-спектроскопии (ЭОС). Основы методики изготовления тонких фольг платины с атомно-

чистыми поверхностями Pt(111) и фрактальным гофрированным рельефом описаны в [2,3].

Для изготовления поверхностей с однонаправленными разномасштабными гофрами на последнем этапе производилась динамическая рекристаллизация (отжиг в процессе растяжения).

Методы ДМЭ, ЭОС и СТМ показали, что атомно-чистая поверхность образована кристаллами Pt(111) [3]. Кроме того, метод ДМЭ позволяет оценивать и рельеф поверхности в процессе циклического отжига по разработанной нами методике [2], что невозможно делать атомной силовой и сканирующей туннельной микроскопией (АСМ и СТМ). После остывания образцов они переносились в другие экспериментальные установки. Презиционное измерение рельефа поверхности производилось методами АСМ и СТМ, а оптические измерения проводились на спектрометре. Результаты экспериментов приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 представлены изображения поверхности в оптическом диапазоне и топограммы поверхности, полученные методом АСМ.

Из рис. 1, *a* видно, что латеральные размеры кристаллов порядка $100\ \mu\text{m}$. Поскольку диаметр электронного пучка, который использовался нами в методе ДМЭ, составляет величину $\approx 500\ \mu\text{m}$, то он покрывает одновременно несколько кристаллов, от поверхности которых формируется дифракция. При этом картины ДМЭ показали, что дифракция формируется от плотноупакованной грани Pt(111) [2,3]. Подобные картины ДМЭ фиксируются от различных областей поверхности фольги. Из этих фактов был сделан вывод о том, что разориентация различных кристаллов не превышает 1° [2,3].

На рис. 1, *b, c, d* представлены топограммы поверхности, записанные методом АСМ в различных масштабах. Из рисунков видно, что несколько систем гофров различного масштаба накладываются друг на друга. Такие рельефы поверхности характерны для фрактальных структур [4,5,10]. Методами покрытий (box counting), с помощью программ „box counting, Gwiddion и box counting, Fraclab“ измерены общая фрактальная размерность рельефа D_{GW} , а также размерности вдоль D_{\parallel} и поперек D_{\perp} гофров. В нашем случае $D_{GW} = 2.3$. Фрактальная размерность вдоль направления гофров $D_{\parallel} \approx 1$, т.е. поверхность в этом направлении эвклидова, в то время как $D_{\perp} \approx 1.3$, т.е. поверхность в этом направлении фрактальна. Таким образом, количественно оценена

1* Письма в ЖТФ, 2014, том 40, вып. 18

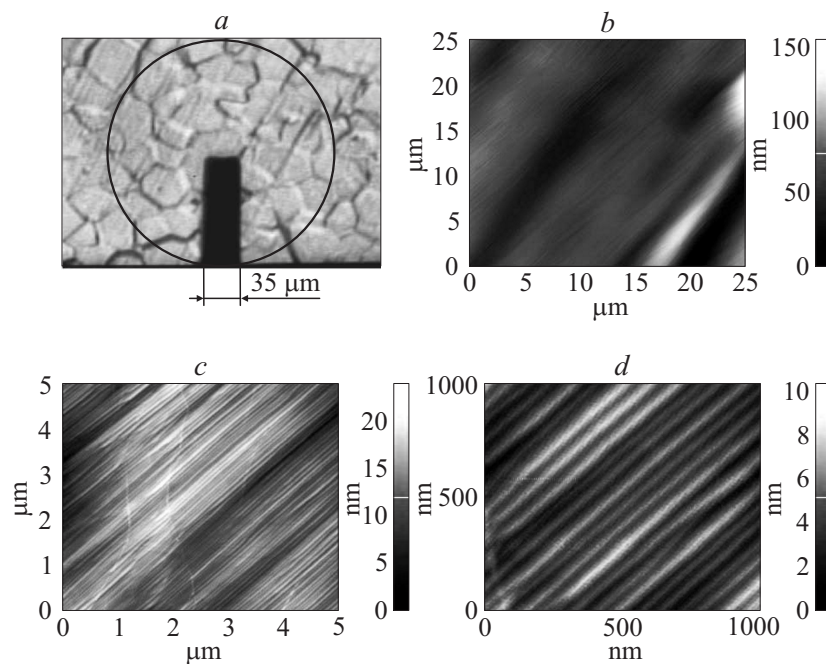


Рис. 1. Изображения поверхности фольги Pt, полученные с помощью оптической и атомной силовой микроскопии: *a* — оптическое изображение, черная полоса — кантилевер, кругом показан размер электронного пучка, который использовался в методе ДМЭ; *b* — топограммы АСМ при различных масштабах.

наблюдаемая анизотропия рельефа. Отметим, что выполняется соотношение

$$D_{GW} = D_{\parallel} + D_{\perp}. \quad (1)$$

Подобное равенство характерно для поверхностей переноса [10].

Наличие регулярных гофров разного масштаба в принципе позволяет использовать поверхности фольг как отражательные дифракционные решетки для различных длин волн падающего на них излучения. Можно выделить 3 типа гофров: 1) с расстоянием между максимумами $d \approx 70$ nm, что соответствует постоянной решетки $1/14000$ mm; 2) с рас-

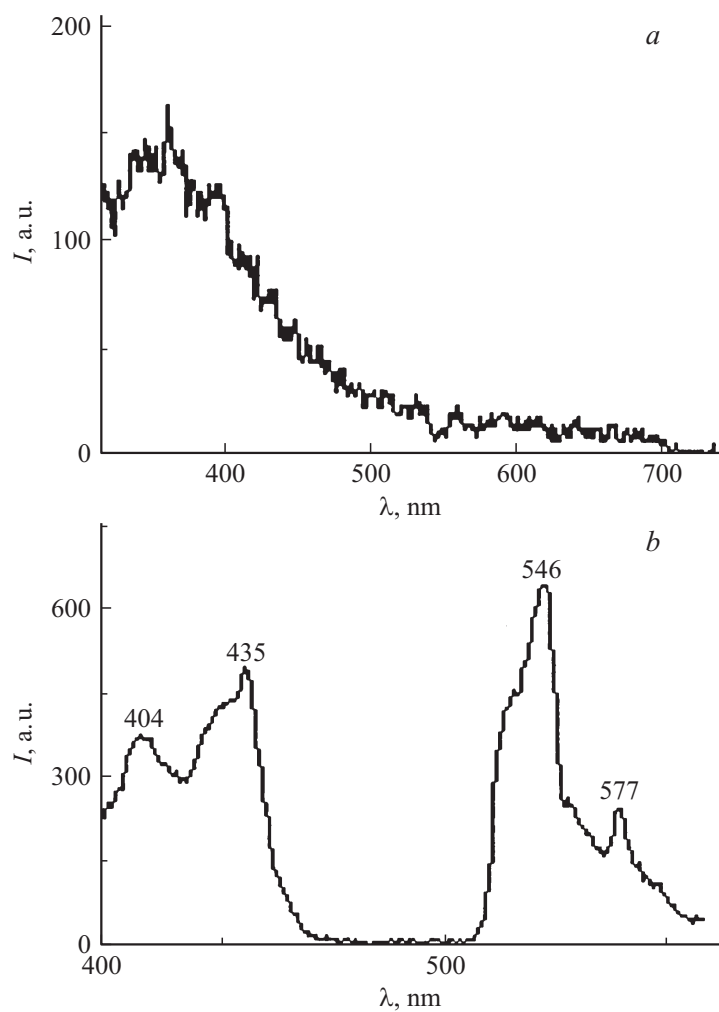


Рис. 2. Оптические спектры от фольги Pt (абсцисса — длина волны, ордината — интенсивность в условных единицах): *a* — часть спектра галогенной лампы; *b* — часть спектра лампы ПРК-2.

стоянием между максимумами $d \approx 1 \mu\text{m}$, что соответствует постоянной решетки $1/1000 \text{ nm}$; 3) с расстоянием между максимумами $d \approx 10 \mu\text{m}$, что соответствует постоянной решетки $1/100 \text{ nm}$. Ранее нами были получены гофрированные структуры и с меньшим расстоянием между гофрами $d \approx 100 \text{ \AA}$, что соответствует постоянной решетки $1/100000 \text{ nm}$ (см. рис. 4 из [3]).

Возможность использования гофрированных поверхностей платиновых фольг в качестве дифракционных решеток демонстрирует рис. 2. На рис. 2, *a* показан спектр галогенной лампы, который практически не отличается от спектра этой лампы, записанного с помощью диспергирующей призмы. На рис. 2, *b* помещен спектр лампы ПРК 2. Видны дискретные пики 404, 436, 546, 577 nm, характерные для спектра этой лампы. Спектры получены для видимой области и ближнего ультрафиолета. Следует отметить, что спектры записаны при падении светового пучка диаметром 0.8 mm на поверхность фольги, поскольку роль щели коллиматора выполнял кварцевый световод. В дальнейшем мы предполагаем записать спектры в диапазонах ВУФ и МР.

Необходимо подчеркнуть, что полученные таким образом решетки устойчивы к высоким температурам. Так, нагрев фольг в СВВ до 1500 К с последующим остыванием не нарушает поверхностные гофрированные структуры. Предполагается, что эти решетки должны быть устойчивы и к интенсивным радиационным излучениям, а также к агрессивным средам.

Таким образом, впервые получены фольги Pt, поверхность которых имеет фрактальную структуру однонаправленных разномасштабных гофров. Впервые продемонстрирована принципиальная возможность использования таких фольг в качестве дифракционных решеток.

Список литературы

- [1] Kvitik O., Siegel Ja., Hnatowicz V., Švorlík V. // J. Nanomaterials. 2013. V. 2013. Art. ID 743684. 15 p. doi: 10.1155/2013/743684.
- [2] Корсуков В.Е., Князев С.А., Буйнов А.Л., Корсукова М.М., Немов С.А., Обидов Б.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 8. С. 55–61. (Korsukov V.E., Knyazev S.A., Buiinov A.L., Korsukova M.M., Nemov S.A., Obidov B.A. // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. N 4. P. 384–387.)

- [3] Корсуков В.Е., Анкудинов А.В., Буйнов А.Л., Варкентин М.С., Князев С.А., Корсукова М.М., Обидов Б.А., Пронин И.И. // ФТТ. 2010. Т. 52. В. 7. С. 1423–1427. (Korsukov V.E., Ankudinov A.V., Buiinov A.L., Varkentin M.S., Knyazev S.A., Korsukova M.M., Obidov B.A., Pronin I.I. // Phys. Solid State. 2010. V. 52. N 7. P. 1423–1427.)
- [4] Berenschot E.J.W., Jansen H.V., Tas N.R. // J. Micromech. Microeng. 2013. V. 23. N 5. 055024. 10 p. doi:10.1088/0960–1317/23/5/055024.
- [5] Корсуков В.Е., Бетехтин В.И., Варкентин М.С., Гиляров В.Л., Кадомцев А.Г., Корсукова М.М., Обидов Б.А. // ФТТ. Т. 55. В. 4. С. 729–735. (Korsukov V.E., Betekhtin V.I., Varkentin M.S., Hilarov V.L., Kadomtsev A.G., Korsukova M.M., Obidov B.A. // Phys. Solid State. 2013. V. 55. N 4. P. 729–735.)
- [6] Arvia A.J., Salvarezza R.C., Triaca W.E. // J. New Materials for Electrochemical Systems. 2004. V. 7. P. 133–143.
- [7] Lei Yaohu, Du Yang, Li Ji, Zhao Zhigang, Liu Xin, Guo Jinchuan, Niu Hanben // J. Micromech. Microeng. 2014. V. 24. N 1. Art. ID 015007. 5p. doi:10.1088/0960–1317/24/1/015007.
- [8] Loewen E.G., Popov E. Diffraction Gratings and Applications // Optical Engineering Series. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1997. V. 58. 601 p.
- [9] Reichelt S., Tiziani H., Zappe H. // Proc. SPIE. 2006. V. 6292. P. 629 205(1–10).
- [10] Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с. (Feder Jens. Fractals. N.Y., London: Plenum Press, 1988.)