

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДИСЛОКАЦИИ И ОБРАЗОВАНИЕ НАНОРЕЛЬЕФА В НЕОБЛУЧАЕМОЙ ОБЛАСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МИШЕНЕЙ

© 2004 г. К. Б. Абрамова, доктор физ.-мат. наук; И. П. Щербаков, канд. физ.-мат. наук

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

Проведено экспериментальное исследование формы и количества дефектов, а также интенсивности люминесценции тыльной поверхности молибдена при облучении фронтальной стороны образцов лазерными импульсами. Показано, что в согласии с дислокационной моделью люминесценции существует корреляция между интенсивностью люминесценции и количеством дефектов, образующихся при облучении.

Коды OCIS: 260.0260, 1000.10000.

Поступила в редакцию 23.12.2003.

Установлено [1, 2], что при облучении поверхности металлических пластин импульсом лазера их обратная сторона люминесцирует. Это явление объяснено выделением энергии, запасенной в ядрах дислокаций, при их выходе на поверхность металла под воздействием полей напряжений. Согласно теории [3–4] интенсивность механолюминесценции прямо пропорциональна плотности дислокаций. Известно, что плотность дислокаций в металлах растет при механической деформации и уменьшается при отжиге. Поэтому интенсивность механолюминесценции поверхностного слоя деформированного образца выше, чем поверхности отожженного [1].

Известно, что при выходе дислокаций на поверхность металла образуются “ступеньки”, “выступы” и другие дефекты [5]. Измерив высоту “ступенек” до нагружения и после и зная величину вектора Бюргерса [6, 7], можно оценить количество дислокаций, вышедших на поверхность в результате нагружения. Далее, сопоставляя число таких дислокаций с интенсивностью механолюминесценции, можно количественно подтвердить справедливость теории. Кроме этого, в работе [1] при исследовании механолюминесценции, возникающей на тыльной стороне металлического образца при облучении его фронтальной стороны лазерными импульсами одной мощности, было обнаружено, что с увеличением числа облучающих лазерных импульсов интенсивность механолюминесценции уменьшается. В этой работе высказывалось предположение, что уменьшение интенсивности механолюминесценции вызвано уменьшением числа дислокаций, способных выйти на поверхность металлического образца, т. е. опять должна наблюдаться корреляция между интенсивностью механолюминесценции и изменением количества дислокаций на поверхности. Работа посвящена проверке этих предположений.

Эксперименты выполнены с молибденовыми пластинами толщиной 0,5 мм. Изменения рельефа

поверхности исследовали с помощью сканирующего туннельного профилометра РТП-1. Для регистрации люминесценции изучаемую поверхность пластины располагали на расстоянии $r = 3$ см от входного окна фотоэлектронного умножителя ФЭУ-136, чувствительного к излучению в области длин волн 300–800 нм и работающего в аналоговом режиме в комплексе с цифровым запоминающим осциллографом.

На обратную сторону пластины воздействовали импульсами лазера, имеющего следующие параметры: длительность 1,5 мс, энергия в режиме свободной генерации 24 Дж, поперечные размеры пучка света от 2 до 8 мм. Мощность света, падающего на поверхность пластинки, варьировали с помощью нейтральных светофильтров.

В работе [2] показано, что при облучении образца импульсом лазера на противоположной стороне возникают сжимающие напряжения и люминесценция начинается, когда напряжения на поверхности становятся близки к пределу текучести. Эти напряжения и заставили часть дислокаций выйти на поверхность металла.

В серии опытов исследовалась эволюция нанометровых дефектов на тыльной поверхности молибденового образца при облучении его фронтальной стороны лазерными импульсами одной мощности, возбуждающими люминесценцию тыльной поверхности, в зависимости от числа облучающих лазерных импульсов.

На рис. 1 показаны примеры фрагментов трехмерных топограмм поверхности молибденового образца до (рис. 1а) и после (рис. 1б, 1в) облучения его фронтальной стороны лазерными импульсами одной мощности. При сравнении топограмм видно, что облучение его фронтальной стороны лазерными импульсами одной мощности изменяет субмикрорельеф его тыльной поверхности и что рельеф поверхности, которая подвергалась только полировке

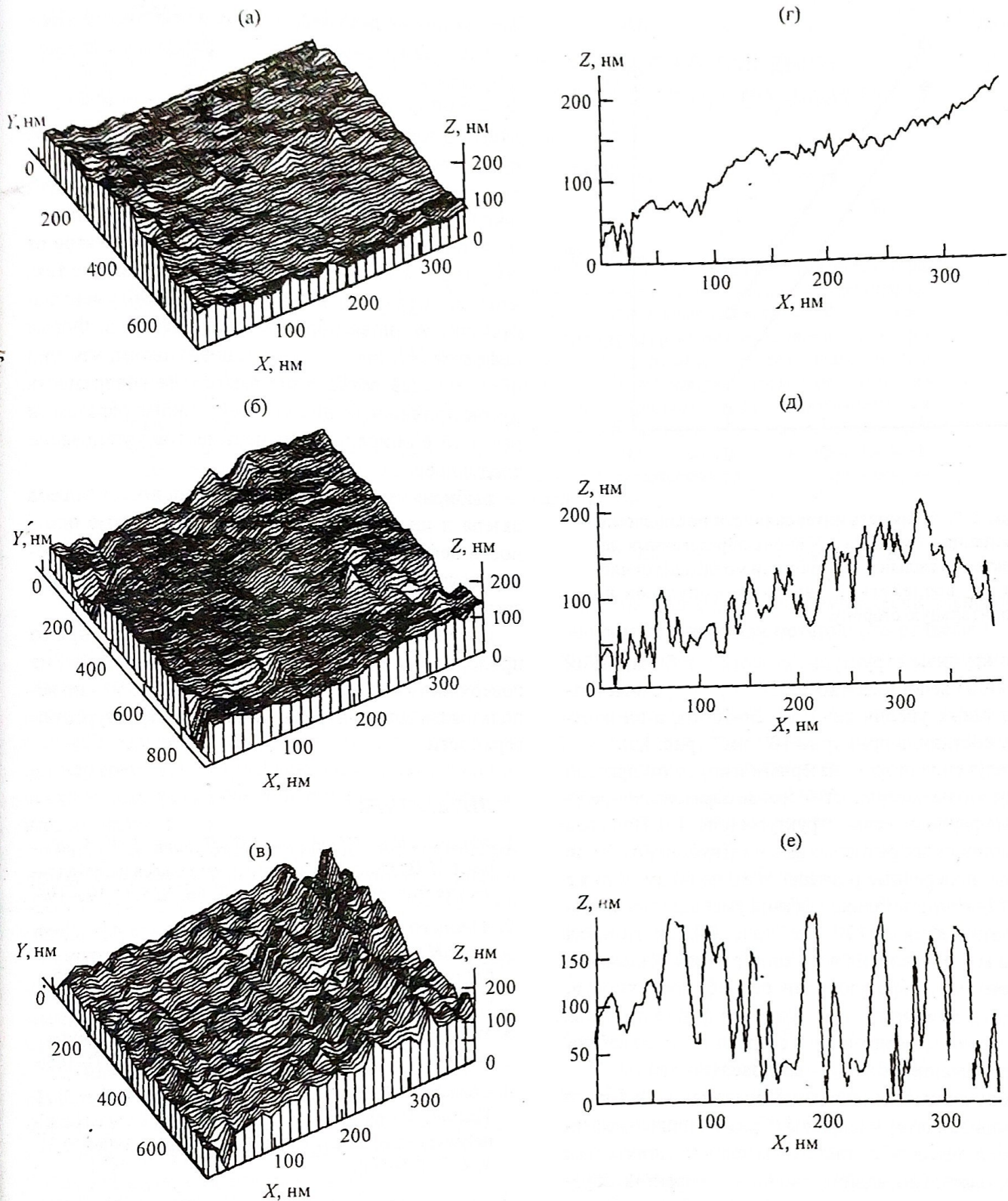


Рис. 1. Топограммы (а, б, в) и соответствующие профили топограмм (г, д, е) тыльных поверхностей молибдена после облучения фронтальной стороны лазерным импульсом: а, г – поверхность образца после полировки, б, д – поверхность образца после облучения 1-м импульсом, в, е – поверхность образца после облучения 2-м импульсом.

(рис. 1а), отличается от рельефа поверхностей, образцы которых подверглись после полировки облучению фронтальной стороны лазерными импульсами одной мощности (рис. 1б, 1в). На рис. 1г представлен профиль топограммы поверхности молибденового образца в сечении плоскостью XZ после его полировки. Видно, что размеры неровностей

микрорельефа варьируют по высоте (глубине) от 5 до 15 нм, а поперечные размеры от 10 до 30 нм с плотностью дефектов примерно $0,5 \times 10^{-1} \text{ нм}^{-1}$.

Облучение фронтальной стороны образца первым лазерным импульсом (рис. 1б) изменило размеры и плотность дефектов. Так, после облучения из первоначальных дефектов начали формироваться

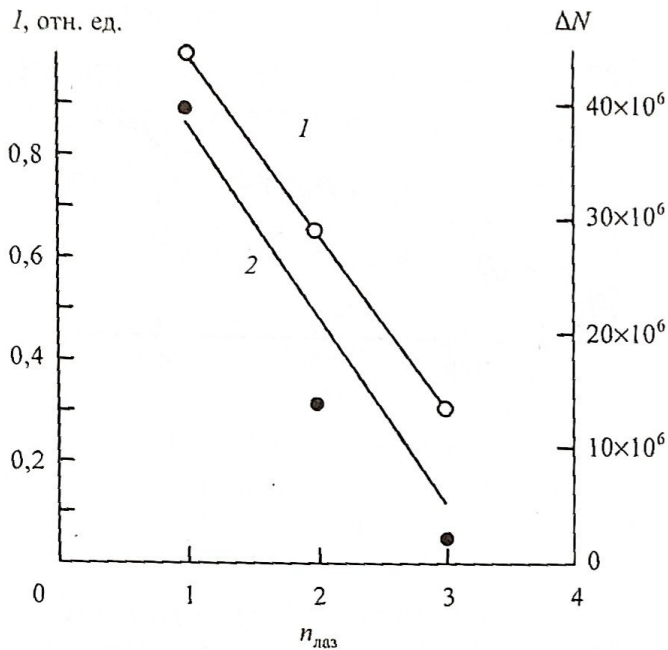


Рис. 2. Зависимость интенсивности механолюминесценции I и числа ΔN вновь образованных дефектов на тыльной поверхности молибдена от числа $n_{\text{лаз}}$ воздействий лазерных импульсов на фронтальную сторону.

более крупные структуры. Высота (глубина) таких дефектов увеличилась до 30–50 нм, поперечные размеры также увеличились до 20–50 нм, а их плотность составила примерно 10^{-1} нм^{-1} (рис. 1д).

Облучение вторым лазерным импульсом привело к тому, что на поверхности образца образовались регулярные периодические структуры (рис. 1в). При этом увеличились их размеры: высота (глубина) от 50 до 150 нм, поперечные размеры от 40 до 60 нм, в то же время плотность таких дефектов уменьшилась и составила примерно $0,5 \times 10^{-1} \text{ нм}^{-1}$ (рис. 1е). При этом, как видно из рисунков, на всех топограммах основными элементами, образующими рельеф поверхности, являются примерно одинаковые по форме дефекты, которые при суперпозиции и создают контуры наблюдаемых сечений исследуемых поверхностей.

Полученные топограммы позволяют не только установить форму и размеры образовавшихся дефектов, но и оценить их число N на каждой топограмме и, следовательно, количество новых дефектов, образовавшихся в результате первого, второго и т. д. нагружений. Измерив размеры и сосчитав количество дефектов на топограммах и зная величину вектора Бюргерса для молибдена [6], можно оценить количество дислокаций ΔN , вышедших на поверхность.

На рис. 2 приведена зависимость числа вновь образованных дислокаций ΔN , возникших в результате последовательных нагружений, от номера нагружения (кривая 2). Там же представлена зависимость интенсивности импульса люминесценции (кривая 1) тех же образцов от номера нагружения.

Как видно из рисунка, эти зависимости подобны. Результаты этой серии опытов показывают, что циклическое нагружение молибденовых образцов импульсами лазера одной и той же мощности, не разрушающими поверхность, приводит к изменению субмикрорельефа и возбуждению люминесценции тыльной поверхности. При каждом последующем облучении уменьшается интенсивность люминесценции, хотя общее число первичных дефектов от облучения к облучению растет. Это связано с тем, что при каждом последующем облучении уменьшается число вновь образованных дефектов. Форма дефектов [6], несомненно, говорит о том, что они образовались вследствие выхода на поверхность цугов подвижных дислокаций. Таким образом, в результате описанных экспериментов установлено следующее:

выбирая интенсивность облучающих импульсов лазера и их число, можно получить разные плотность дефектов и их размер на необлучаемой поверхности металлического образца, т. е. сформировать нужную наноструктуру поверхности;

интенсивность механолюминесценции прямо пропорциональна числу дислокаций, вышедших на поверхность металлического образца. Это можно использовать для контроля динамики структуры поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Пухонто И.Я., Кондырев А.М. Воздействие лазерных импульсов на металлические мишени // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 5. С. 190–196.
2. Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Семенов А.А., Русаков А.И. Люминесценция металлов при быстром неразрушающем нагружении // ФТТ. 1998. Т. 40. № 6. С. 957–965.
3. Молоцкий М.И. Дислокационный механизм люминесценции металлов // ФТТ. 1978. Т. 20. № 6. С. 1651–1656.
4. Chandra B.R., Ryan M.S., Seema R. Simon, Ansari M.H. Theoretical Approach to the Deformation-induced Luminescence in Metals // Cryst. Res. Technol. 1996. № 31. V. 4. P. 495–500.
5. Веттегрень В.И., Рахимов С.Н., Светлов В.Н. Изучение динамики субмикродфектов на поверхности нагруженной меди при помощи туннельного профилометра // ФТТ. 1995. Т. 37. № 12. С. 3635–3644.
6. Башкарев А.Я., Веттегрень В.И., Светлов В.Н. Иерархия статистических ансамблей нанодфектов на поверхности напряженного молибдена // ФТТ. 2002. Т. 44. № 7. С. 136–139.
7. Абрамова К.Б., Веттегрень В.И., Щербаков И.П., Рахимов С.Ш., Светлов В.Н. Механолюминесценция и субмикрорельеф поверхности меди // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 12. С. 102–104.