

05;07

## Особенности механолюминесценции тонких металлических пленок, возбуждаемой длинными и короткими лазерными импульсами

© А.Ф. Банишев, В.Я. Панченко, А.В. Шишков

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Шатура  
E-mail:banishev@laser.nictl.msk.su

Поступило в Редакцию 5 сентября 2003 г.

Представлены результаты исследования деформационно-стимулированного свечения тонких мелкозернистых металлических пленок, возникающего при воздействии коротких (субмикросекундных) и длинных (миллисекундных) лазерных импульсов. Делается предположение относительно механизма возбуждения свечения, согласно которому оно связано с реакциями взаимодействия зернограничных дислокаций с примесями, находящимися в межзеренной области.

Деформационно-стимулированная люминесценция металлов (механолюминесценция — МЛ) исследовалась в основном авторами работ [1–4]. К сожалению, в литературе встречается очень мало работ, посвященных изучению механизмов этого вида люминесценции. В то же время способность материалов люминесцировать при пластической деформации представляет определенный научный и практический интерес, например для изучения процессов рождения и взаимодействия структурных дефектов при пластической деформации и разрушении материалов.

В работах [1–4] МЛ металлов связывают с излучением квантов света в момент выхода подвижных дислокаций из объема материала на поверхность. Но с уменьшением толщины образца до микронных и субмикронных размеров число подвижных (слабозакрепленных) дислокаций в объеме образца должно уменьшаться (дислокации выходят на поверхность). Например, известно [5], что в объеме нитевидных кристаллов (усы) и тонких пленок дислокации практически отсутствуют. Поэтому можно ожидать, что в тонких пленках МЛ будет затруднена. Тенденция к возрастанию пороговых напряжений  $\sigma_{th}$  ( $\sigma_{th}$  — мини-

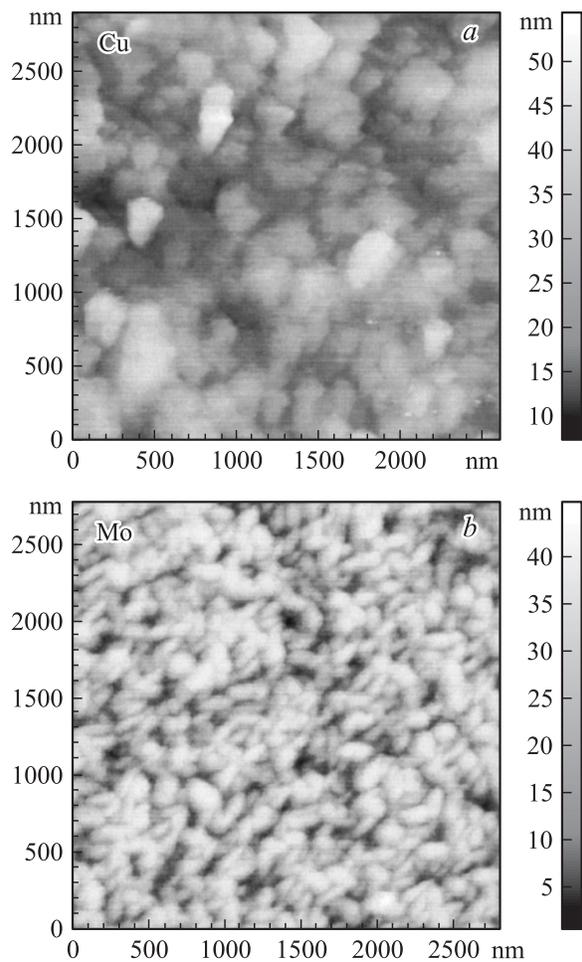
мально необходимое для данного образца напряжение, при котором начинает регистрироваться сигнал МЛ) при уменьшении толщины образца действительно наблюдалась в работе [6], что согласуется с представлениями об участии подвижных дислокаций в возбуждении МЛ металлов.

В данной работе представлены результаты экспериментов по исследованию люминесценции тонких, мелкозернистых, металлических пленок из разных металлов, возбуждаемой в результате импульсной термомодеформации при воздействии длинных (миллисекундных) и коротких (субмикросекундных) лазерных импульсов.

Исследуемый образец устанавливался в специальный держатель непосредственно перед фотоумножителем. Исследовались два режима возбуждения МЛ: длинными импульсами, с параметрами выходного излучения  $\tau_{las.} \approx 1.4 \text{ ms}$ ,  $E_{\text{max}} \approx 3.5 \text{ J}$  и короткими импульсами,  $\tau_{las.} \approx 0.3 \mu\text{s}$ ,  $E_{\text{max}} \approx 1 \text{ mJ}$ . Излучение лазера фокусировалось на поверхность образца в пятно размером  $2r_0 = 1.2\text{--}2 \text{ mm}$ . Люминесценция регистрировалась с тыльной по отношению к воздействию лазера поверхности образца. Для регистрации МЛ использовался фотоумножитель, работающий в спектральном диапазоне 400–800 nm, установленный на расстоянии 8–10 mm от тыльной поверхности образца. Сигнал с фотоумножителя подавался на цифровой осциллограф и далее на персональный компьютер. В работе использовались пленки из молибдена, титана, алюминия и меди толщиной  $d \approx 1 \div 2 \mu\text{m}$ . Пленки получены методом вакуумного напыления на стеклянные подложки и имели мелкозернистую структуру. Наиболее мелкозернистыми были пленки из молибдена, а более крупнозернистыми — пленки из алюминия и меди.

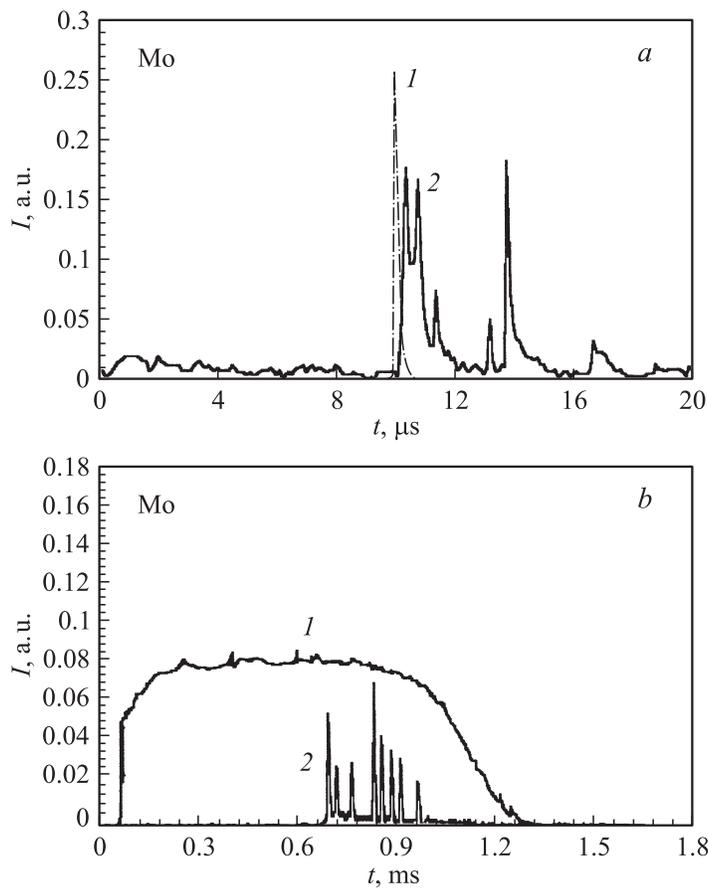
На рис. 1, *a, b* в качестве иллюстрации показаны топограммы поверхности медной и молибденовой пленок, полученные с помощью атомно-силового микроскопа. Видно, что пленки имеют мелкодисперсную структуру с размерами зерен  $d \approx 50\text{--}150 \text{ nm}$  в молибденовой и  $d \approx 150\text{--}250 \text{ nm}$  в медной пленке.

На рис. 2, *a, b* показаны сигналы люминесценции молибденовой пленки, возникающие при воздействии соответственно короткого и длинного лазерного импульса с плотностью мощности  $I_{las.}$  выше порога возбуждения МЛ  $I_{las.th}$  ( $I_{las.th}$  — минимально необходимая для данной пленки плотность мощности лазерного импульса, при которой начинает регистрироваться сигнал МЛ). Видно, что при воздействии короткого



**Рис. 1.** Топограммы рельефа поверхности исследованных пленок: *a* — меди, *b* — молибдена.

лазерного импульса свечение продолжается значительное время после окончания лазерного импульса, т.е. с практически остывшей поверхности. При воздействии же длинных импульсов МЛ начинается и



**Рис. 2.** Осциллограммы сигнала механолюминесценции молибденовой пленки ( $h \approx 1 \mu\text{m}$ ):  $a$  —  $\tau_{las.} \approx 0.3 \mu\text{s}$ ,  $b$  —  $\tau_{las.} \approx 1.4 \text{ms}$ ; 1 — лазерный импульс, 2 — механолюминесценция.

заканчивается за время действия лазерного импульса. Интенсивность и длительность сигнала МЛ зависят от плотности мощности воздействующего лазерного импульса  $I_{las.}$ : с увеличением  $I_{las.}$  увеличиваются число и плотность пиков в сигнале МЛ.

Из приведенного сравнения сигналов МЛ, возбуждаемых длинными и короткими лазерными импульсами, можно сделать вывод, что характерное время структурных изменений (время релаксации внутренних напряжений, возникающих в результате действия лазерного импульса), в течение которых происходит возбуждение МЛ, значительно больше, чем длительность коротких импульсов ( $\approx 0.3 \mu\text{s}$ ) и соизмеримо или меньше длинных импульсов ( $\approx 1.4 \text{ms}$ ). Известно, что такие длительные процессы релаксации внутренних напряжений характерны для дислокационного возврата. Этот результат также указывает в пользу дислокационного механизма возбуждения МЛ в металлах. Однако исследованные в данной работе пленки имеют достаточно мелкозернистую структуру (рис. 1). Известно, что материалы с размерами зерен  $d < 100 \text{nm}$  имеют ряд особенностей, связанных с их строением. В частности, в таких материалах пластическая деформация происходит в основном за счет зернограничного проскальзывания с участием зернограничных дислокаций [7–11]. Тот факт, что на всех исследованных в данной работе пленках (имеющих разные зонные структуры) при пластической деформации наблюдается люминесценция в видимой области спектра, указывает на то, что она практически не зависит от зонной структуры самого металла (от типа металла зависит только порог возбуждения). В работе [6] было сделано предположение, что причиной МЛ мелкозернистых металлов при их пластической деформации является взаимодействие зернограничных дислокаций с примесными атомами, находящимися в межзеренной области. Проведенные в данной работе исследования МЛ мелкозернистых тонких пленок разных металлов в целом согласуются с предложенным в работе [6] механизмом возбуждения МЛ в мелкозернистых металлах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 02–02–17028.

## Список литературы

- [1] *Абрамова К.Б., Щербаков И.П.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. № 9. С. 75–88.
- [2] *Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Пухонто И.Я.* и др. // ЖТФ. 1996. Т. 66. № 5. С. 190–196.
- [3] *Абрамова К.Б., Русаков А.И., Семенов А.А.* и др. // ФТТ. 1998. Т. 40. № 6. С. 957–965.
- [4] *Молоцкий М.И.* // ФММ. 1983. Т. 55. № 1. С. 43–47.

- [5] *Комник Ю.Ф.* Физика металлических пленок. М.: Атомиздат, 1979. С. 179.
- [6] *Банишев А.Ф., Панченко В.Я., Шишков А.В.* // ЖТФ. 2002. Т. 73. № 5. С. 90–94.
- [7] *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987. С. 320.
- [8] *Андриевский Р.А., Глезер А.М.* // ФММ. 1999. Т. 88. № 1. С. 50–73.
- [9] *Андриевский Р.А., Глезер А.М.* // ФММ. 2000. Т. 89. № 1. С. 91–112.
- [10] *Поздняков В.А., Глезер А.М.* // ФТГ. 2002. Т. 44. № 4. С. 705–710.
- [11] *Поздняков В.А., Глезер А.М.* // Докл. РАН. 2002. Т. 384. № 2. С. 177–180.