

УДК 534.615 : 635.211

В. В. Вершинин, А. В. Тарасенко, Г. И. Фролов

(Красноярск)

ТЕРМОУПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МАГНИТНЫХ ПЛЕНКАХ
ПРИ ОПТИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ

Исследовано влияние термоупругих напряжений и деформаций на процесс магнитооптической записи лазерным лучом. Приведено описание установки для лазерного возбуждения и регистрации акустических колебаний в образцах, покрытых тонкой металлической пленкой. Описана методика, позволяющая измерять абсолютную величину смещения поверхности порядка 0,1 нм. Измерена амплитуда смещения поверхности пленки $Dy_{48}Fe_{52}$ в процессе термомагнитной записи с длительностью импульсов 30 нс. Проведен термодинамический анализ процесса записи с использованием результатов измерений. Показано, что при некоторых условиях термоупругие напряжения уменьшают энергию записи.

Введение. Влияние на процесс оптической записи температуры нагрева магнитной пленки за время воздействия лазерного излучения достаточно хорошо изучено как теоретически, так и экспериментально [1, 2]. Пленки, используемые для магнитооптической записи, содержащие редкоземельные металлы — тербий или диспрозий, как правило, обладают большой величиной термоупругой связи, что делает их чувствительными к механическим напряжениям и деформациям, неизбежно возникающим при термонагреве лазерным лучом.

В работах [3—6] предложен механизм, объясняющий влияние упругих напряжений на процесс магнитной записи, а также приведены данные о качественном эксперименте магнитной записи давлением.

В настоящей работе ставилась задача экспериментально измерить деформации, возникающие в магнитной пленке в процессе термозаписи, и на основе измеренных величин оценить реальный вклад термоупругих напряжений в величину энергии записи.

Известно [7—10], что воздействие коротких импульсов лазерного излучения на твердое тело или жидкость вызывает в них генерацию акустических волн. В случае термомагнитной записи, когда используются относительно низкие интенсивности лазерного излучения, не приводящие к изменению агрегатного состояния вещества, реализуется термоупругий механизм возбуждения акустических волн. Тонкая магнитная пленка, находящаяся на поверхности оптически прозрачной подложки, частично поглощает энергию излучения. В результате электрон-фононного взаимодействия происходит разогрев электронной плазмы. Характерное время разогрева электронов, т. е. приобретение ими дополнительной кинетической энергии, составляет 10^{-12} с. Последующие процессы генерации акустических фононов и волн деформации обусловлены передачей поглощенной электронами энергии колебаниям кристаллической решетки, а также тепловой диффузией в подложку. Волна деформации, возникшая в приповерхностном слое подложки, распространяется в ней, достигает противоположной поверхности и вызывает ее смещение. Это смещение измерялось сконструированной для этих целей установкой, использующей интерференционные методы [11—15] и позволяющей измерять смещения в абсолютных единицах.

Установка для лазерного возбуждения и регистрации акустических волн. Функционально установку можно разделить на две части — возбуждажен оптическим прицелом 1, собранным на базе гелий-неонового лазера ЛГ-207Б, луч которого вводится в оптический тракт поворотным зеркалом 4. Часть энергии возбуждающего импульса, отраженная светоделительной пластинкой 5, попадает на фотоприемник 6, предназначенный для запуска развертки запоминающего осциллографа 3 (С8-12). Светоделительная пластинка 8 отражает часть излучения ОГМ-20 на блок измерения энергии лазерного импульса 7 (ИКТ-1М).

Основная часть энергии лазерного импульса попадает на плоскопараллельную стеклянную пластину 10, на левую (по рисунку) плоскость которой нанесена магнитооптическая пленка, а на правую — оптически непрозрачный зеркальный слой меди.

В приемную часть входит интерферометр Майкельсона со светоделительной пластинкой 13, одним из зеркал которого является отражающая поверхность образца 10. Второе опорное зеркало 12 укреплено на пьезокерамических пластинках 11. Интерферометр имеет систему автоподстройки положения опорного зеркала, состоящую из светоделительной пластинки 16, фотоприемника 15 и усилителя автоподстройки 19. В качестве источника зондирующего излучения 20 использован гелий-неоновый лазер ЛГН-207Б мощностью 1 мВт.

Акустическая волна, возникающая при облучении импульсами света, приводит к смещению поверхности образца 10, вызывая разбаланс плеч интерферометра и изменение интенсивности света на его выходе. Лучи света с выхода интерферометра, после отражения от светоделительной пластинки 17 и зеркала 14, попадают на фотоприемник 18. Разностный сигнал с фотоприемника через усилитель 21 и фильтр 9 попадает на вход запоминающего осциллографа 3.

Образцы и экспериментальная методика. Для проведения акустических измерений был специально изготовлен образец на толстом стекле. На стеклянную плоскопараллельную подложку толщиной 6 мм с высоким классом обработки поверхности осаждена методом термического испарения магнитооптическая пленка с процентным весовым составом 48% Dy — 52% Fe толщиной 50 нм. Сверху на пленку нанесено покрытие SiO толщиной 150 нм. На противоположную поверхность подложки термическим испарением нанесен слой меди толщиной 1 мкм.

Для определения минимальной плотности энергии записи магнитооптическая пленка, предварительно намагниченная насыщающим полем 20 кЭ, облучалась одиночными импульсами лазерного излучения в небольшом

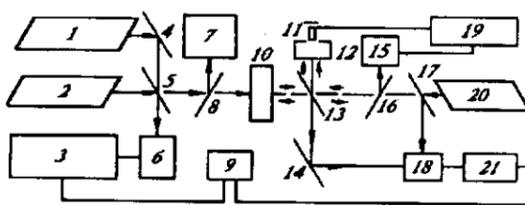


Рис. 1

реверсивном магнитном поле величиной 300 Э. Наличие термомагнитной записи определялось с помощью поляризационного микроскопа.

Измерения проводились для трех случаев: свободной пленки, пленки, прижатой толстым полированным стеклом, и гидравлически зажатой пленки, когда между пленкой и зажимающим стеклом наносился тонкий слой жидкости. Эти случаи различаются с точки зрения возникающих в процессе термозаписи упругих деформаций и напряжений.

При термозаписи на свободной пленке нормальные напряжения на ее поверхности в силу граничных условий равны нулю. Экспериментальные исследования [16—18] показывают, что в месте облучения импульсом света возникает вздутие поверхности, так называемый «тепловой пузырь». Эффективность возбуждения акустических волн при этом невелика, и возникают трудности, связанные с измерением амплитуды волны по вышеизложенной методике при малых уровнях облучения.

Прижатие пленки стеклом приводит к возникновению в ней нормальных к плоскости пленки напряжений, так как пленка с обеих сторон зажата. При этом значительно увеличивается эффективность возбуждения акустической волны, которая распространяется в подложке.

Наличие субмикронного зазора между пленкой и прижимающим стеклом, который всегда реально существует, ввиду неидеальной плоскостности, приводит к ослаблению эффективности возбуждения акустических волн при малых величинах деформаций. Для исключения этого зазора наносится капля жидкости между прижимающими стеклами.

Во всех трех случаях минимальная энергия записи оказалась одинаковой, в пределах ошибки, составляющей 25 %, и имела значение $2,5 \text{ мДж/см}^2$ с учетом коэффициента отражения пленки, равного 0,5. Для случая свободной поверхности измерено критическое значение максимальной плотности энергии, при которой происходит механическое разрушение пленки, составившее 300 мДж/см^2 . Дальнейшие измерения проводились в области энергий, меньших критической энергии разрушения.

Одиночные импульсы света длительностью 30 нс подавались от лазера ОГМ-20 на магнитооптическую пленку. Возникающие при этом акустические импульсы распространялись через подложку к ее противоположной поверхности, многократно отражаясь от поверхностей. Нормальные смещения поверхности подложки, преобразованные интерферометром в электрический сигнал, наблюдались на экране запоминающего осциллографа в виде серии затухающих импульсов. По амплитуде этих импульсов определялась величина смещения поверхности магнитооптической пленки. В некоторых случаях, для увеличения чувствительности и упрощения измерений, использовался вместо интерферометра пьезодатчик, прокалиброванный с помощью интерферометра.

На рис. 2 приведена измеренная зависимость амплитуды смещения поверхности магнитооптической пленки, прижатой сверху стеклом, от величины плотности энергии падающего излучения. Видно, что при плотности падающей энергии, соответствующей порогу записи 5 мДж/см^2 (поглощенной энергии $2,5 \text{ мДж/см}^2$ с учетом коэффициента отражения), величина смещения поверхности составляет примерно 0,1 нм.

Анализ влияния магнитоупругих деформаций. Есть сведения, что магнитная анизотропия некоторых магнитооптических пленок

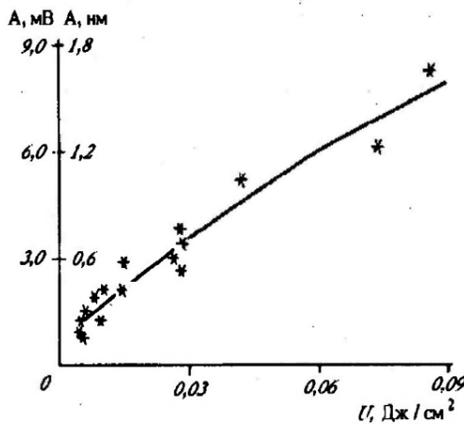


Рис. 2

на основе редкоземельных элементов Tb и Dy в основном обусловлена магнитоупругими напряжениями. Отметим тот факт, что для исследованных пленок DyFe минимальная энергия записи на единицу объема составила $0,5 \cdot 10^{10}$ эрг/см³, что намного превосходит энергию перпендикулярной анизотропии пленок, равную $3 \cdot 10^5$ эрг/см³. Оценка энергии деформации пленки при тепловом нагреве по формуле

$$U_{\text{деф}} = \frac{E}{2} \left[\frac{\Delta h}{h_0} \right]^2 \quad (1)$$

(E — модуль Юнга пленки, равный $3 \cdot 10^{11}$ Н/м²; Δh — тепловое утолщение пленки (по нашим измерениям 0,1 нм); $h_0 = 50$ нм — толщина пленки) дает величину $U_{\text{деф}} = 6 \cdot 10^6$ эрг/см³, также превосходящую энергию анизотропии. Баланс энергий показывает, что деформации также могут служить причиной переманчивания пленки.

Рассмотрим более детально механизм деформационного переманчивания пленок исходя из выражения для магнитоупругой энергии

$$E_{\text{МУ}} = \sum_i B_1 U_i \alpha_i^2 + \sum_{i \neq j} B_2 U_{ij} \alpha_i \alpha_j, \quad (2)$$

где B_i — магнитоупругие константы, U_{ij} — компоненты тензора деформации, α_i — направляющие косинусы намагниченности.

Из соображений симметрии для одноосной пленки с перпендикулярной магнитной анизотропией выражение (2) можно преобразовать к виду

$$E_{\text{МУ}} = B_1 [U_n \alpha_1^2 + U_t (1 - \alpha_1^2)] + 2B_2 U_{\text{св}} \alpha_1 \sqrt{1 - \alpha_1^2}, \quad (3)$$

где $U_n = U_{11}$ — нормальная к плоскости деформация, $U_t = \sqrt{U_{22}^2 + U_{33}^2}$ — продольная деформация в плоскости, $U_{\text{св}} = \sqrt{U_{12}^2 + U_{13}^2}$ — сдвиговая деформация в плоскости.

Предположим, что перпендикулярная анизотропия обусловлена остаточными (после напыления пленки) напряжениями, т. е. $U_i = 0$. Тогда деформация пленки по толщине $U_n = -\nu U_t$, где ν — коэффициент Пуассона. Без учета сдвиговых деформаций

$$E_{\text{МУ}} = B_1 U_t [1 - (1 + \nu) \alpha^2] = B_1 \frac{\sigma_t}{E} [1 - (1 + \nu) \alpha^2], \quad (4)$$

где σ_t — тангенциальное упругое напряжение. При наличии только нормальных напряжений

$$E_{\text{МУ}} = B_1 U_n [\alpha^2 (1 + \nu) - \nu] = B_1 \frac{\sigma_n}{E} [\alpha^2 (1 + \nu) - \nu], \quad (5)$$

где σ_n — нормальное напряжение.

Для детального анализа влияния упругих напряжений необходима информация о величине и знаке магнитоупругих констант исследуемых пленок. Рассмотрим два случая:

1. $\lambda_1 > 0$ (λ_1 — коэффициент магнитоупругости). Тогда магнитоупругая константа $B_1 < 0$ и из условия минимума магнитоупругой энергии (2) перпендикулярная анизотропия возможна только в случае остаточных деформаций $U_t < 0$ в плоскости пленки. Из формулы (5) следует, что нормальные деформации приводят к уменьшению магнитоупругой энергии и, следовательно, возможна запись давлением. Тепловой нагрев лазерным лучом увеличивает энергию анизотропии и соответственно минимальное значение энергии записи.

2. $\lambda_i < 0$. В этом случае остаточные напряжения должны быть растягивающими: $U_i > 0$. Запись нормальным давлением невозможна, при этом энергия записи уменьшается.

Термодинамический анализ. Рассмотрим случай, когда пленка зажата между подложкой и толстой стеклянной пластинкой, в предположении изохорического процесса. При отсутствии теплообмена изменение температуры пленки под действием лазерного излучения равно

$$\Delta T = U/(VC\rho), \quad (6)$$

где U — поглощенная энергия лазерного импульса; ρ — плотность пленки; V — объем пленки, в котором происходит поглощение; C — теплоемкость. При минимальной плотности энергии термомагнитной записи 50 Дж/м^2 , коэффициенте отражения $0,5$, $\rho = 8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, толщине пленки $h = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ и $C = 400 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ изменение температуры составит $T = 160^\circ$.

Наиболее точную оценку величины возникающего при этом давления дает использование коэффициента всестороннего сжатия χ , а не модуля Юнга, как это сделано в [6]. Увеличение объема пленки при нагревании определяется формулой

$$\Delta V \approx V_0 3\alpha \Delta T, \quad (7)$$

где α — коэффициент линейного расширения. Связь между изменениями объема и давления дает выражение

$$\Delta P = \Delta V / \chi V_0. \quad (8)$$

Подставляя (7) в (8),

$$\Delta P = 3\alpha \Delta T / \chi. \quad (9)$$

При значениях $\alpha = 10^{-5} \text{ град}^{-1}$, $\chi = 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ атм}^{-1}$ и $\Delta T = 160^\circ$ оценка по формуле (9) дает $\Delta P = 8 \cdot 10^3 \text{ атм}$.

В реальном эксперименте изохорический процесс не реализуется из-за деформации, возникающей в стеклах, зажимающих пленку. Сила, действующая на стекло со стороны пленки, $F = PS$, где S — площадь поверхности пленки. При $S = 1 \text{ см}^2$ нормальная и тангенциальная составляющие силы соответственно имеют величины $F_n = 8 \cdot 10^3 \text{ кгс}$ и $F_t = 0,06 \text{ кгс}$, что должно приводить только к нормальным относительно плоскости пленки деформациям.

На рис. 3 схематически изображена часть поверхности пленки. Оценим реальную величину нормальной деформации, возникающей в процессе нагрева. Конечное положение поверхности определяется равенством давлений со стороны пленки и прижимающего стекла.

Величина термодформации свободной пленки, вычисленная по формуле

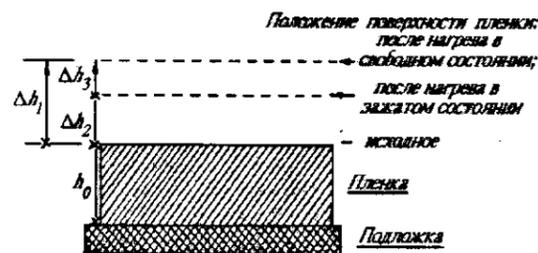


Рис. 3

$$\Delta h_1/h_0 = \alpha \Delta T(1 + \nu), \quad (10)$$

при $\nu = 0,28$ составляет $2 \cdot 10^{-3}$. Стеклянная пластина, прижимая пленку, ограничивает смещение ее поверхности, и возникающее при этом давление со стороны пленки на прижимающее стекло

где $E_{ст}$ — модуль Юнга стекла; $\lambda = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{\nu \tau}$ — длина распространения деформации (11), равная произведению скорости звука на время действия светового импульса ($\lambda = \nu \tau$).

Из условия равенства давлений на границе пленка — стекло, с учетом того, что $\Delta h \ll h_0$, получаем

$$\Delta h_2 = \frac{\lambda E \Delta h_1}{h_0 E_{ст} + \lambda E}. \quad (13)$$

Поскольку $h_0 \ll \lambda$ ($h_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ см, $\lambda = 15 \cdot 10^{-3}$ см) и $E_{ст} \cong E$, членом $h_0 E_{ст}$ в знаменателе можно пренебречь и записать (13) как

$$\Delta h_2 \cong \Delta h_1. \quad (14)$$

Используя (10), (12) и (14), определяем величину нормального давления:

$$P_n = E_{ст} \frac{\Delta h_1}{\lambda} = \frac{E_{ст} \alpha \Delta T(1 + \nu) h_0}{\nu \tau}, \quad (15)$$

что при $E_{ст} = 6,6 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\alpha = 10^{-5}$, $\Delta T = 160^\circ$ и $\nu = 0,28$ дает значение $P_n = 0,44$ кгс/см² = 0,44 атм.

Полученные оценки свидетельствуют, что прижатие пленки стеклом практически не влияет на величину нормальной деформации и приводит лишь к возникновению небольшого нормального напряжения. Однако в отличие от свободного в зажатом состоянии при воздействии на поверхность лазерным импульсом возбуждается акустическая волна с амплитудой, равной температурному утолщению пленки.

Вычисленная по формуле (10) величина смещения поверхности составила 0,1 нм, что совпадает с экспериментально полученным значением.

Тангенциальные напряжения, возникающие в пленке при нагреве, оцениваются по формуле

$$\sigma_t = \alpha \Delta T E, \quad (16)$$

которая дает при $E = 3 \cdot 10^{11}$ Н/м² значение $\sigma_t = 4,8 \cdot 10^3$ атм.

Заключение. Экспериментально определено, что при воздействии импульсов лазерного излучения на магнитооптические пленки в процессе термозаписи в последних возникают нормальные к поверхности деформации с амплитудой смещения около 0,1 нм, при плотности поглощаемой энергии 2,5 мДж/см².

Термодинамический анализ на основе проведенных измерений показывает, что термоупругий механизм магнитной записи может реализоваться благодаря большим тангенциальным механическим напряжениям в пленке, порядка $5 \cdot 10^3$ кгс/см².

Термоупругий механизм приводит к увеличению минимального значения энергии записи при константе магнитострикции $\lambda_s > 0$ и к уменьшению при $\lambda_s < 0$.

При поглощении энергии записывающего импульса пленкой, зажатой между подложкой и толстым стеклом, в пленке возникает небольшая нормальная составляющая напряжения, равная $0,4 \text{ кгс/см}^2$, что свидетельствует о малом влиянии зажимающего стекла на процесс записи.

Авторы благодарят В. Ю. Яковчука за предоставление исследуемых образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen B. Magnetic materials for optical recording // *Appl. Opt.*—1974.—13, N 4.—P. 767.
2. Shin S.-C. Thermal analysis of magneto-optical thin films under laser irradiation // *JMMM.*—1985.—61, N 3.—P. 301.
3. Александров К. С., Середкин В. А., Фролов Г. И., Яковчук В. Ю. Оптическая запись в аморфных ферромагнитных пленках // *Автоматрия.*—1988.—№ 4.
4. Берман Г. П., Середкин В. А., Фролов Г. И., Яковчук В. Ю. Новый механизм оптической записи в аморфных ферромагнитных пленках // *Письма в ЖТФ.*—1988.—14, вып. 11.
5. Berman G. P., Frolov G. I., Seredkin V. A., Yakovchuk V. Yu. Analysis of interaction of laser radiation pulses with metal magnetostrictive film // *Sol. State Commun.*—1988.—57, N 2.—P. 1203.
6. Берман Г. П., Середкин В. А., Фролов Г. И., Яковчук В. Ю. Запись информации в аморфных пленках РЗМ-ПМ импульсами светового излучения // *Аморфные пленочные сплавы переходных и редкоземельных металлов: Сб. научн. трудов.*—Красноярск, 1988.
7. Лямшев Л. М. Лазерное термооптическое возбуждение звука.—М.: Мир, 1980.
8. Карабутов А. А. Лазерное возбуждение поверхностных акустических волн: новое направление в оптико-акустической спектроскопии твердого тела // *УФН.*—1985.—147, вып. 3.
9. Коломенский Ал. А. Лазерное возбуждение акустических волн в твердом теле при тепловом механизме // *Акуст. журн.*—1988.—34, вып. 5.
10. Аванесян С. М., Гусев В. Э. Возбуждение сверхкоротких импульсов деформации при поглощении оптического излучения в полупроводниках // *Квантовая электрон.*—1986.—13, № 6.
11. Rosencwaig A., Opsal J., Willenborg D. L. Thin-film thickness measurements with thermal waves // *Appl. Phys. Lett.*—1983.—43, N 2.—P. 166.
12. Jackson W. B., Amer N. M., Voccaro A. C., Fournier D. Photothermal deflection spectroscopy and detection // *Appl. Opt.*—1981.—20, N 6.—P. 1333.
13. Бондаренко А. Н., Маслов Б. Я., Рудая Б. Б., Троценко В. П. Оптическая установка для измерения сверхмалых акустических колебаний // *ПТЭ.*—1975.—№ 6.
14. Бондаренко А. Н., Дробот Ю. Б., Круглов С. В. Оптическое возбуждение и регистрация наносекундных акустических импульсов при неразрушающих испытаниях // *Дефектоскопия.*—1976.—№ 6.
15. Бондаренко А. Н. Возбуждение и регистрация акустических волн лазерным излучением: Автореф. дис. ... д-ра.—Владивосток, 1987.
16. Opsal J., Rosencwaig A., Willenborg D. L. Thermal-wave detection and thin-film thickness measurements with laser beam deflection // *Appl. Opt.*—1983.—29, N 20.—P. 3169.
17. Olmstead M. A., Amer N. M., Kohn S. Photothermal displacement spectroscopy: An optical probe for solids and surfaces // *Appl. Phys.*—1983.—A32.—P. 141.
18. Opsal J., Taylor M. W., Smith L., Rosencwaig A. Temporal behavior modulated optical reflectance in silicon // *J. Appl. Phys.*—1987.—61, N 1.—P. 240.

Поступила в редакцию 27 декабря 1993 г.