

Измерение толщины тонких плёнок с использованием гармонических антисимметричных волн Лэмба

Х. Б. ТОЛИПОВ

*Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия, e-mail: tolipovkb@susu.ru*

Предложен метод измерения толщины тонких плёнок в микрометровом диапазоне с использованием акустических волн. Метод основан на нелинейной зависимости антисимметричных гармонических волн Лэмба от толщины зондируемого материала. Рассмотрены погрешности измерений толщины тонких плёнок с применением бесконтактного электромагнитоакустического преобразователя акустической волны.

Ключевые слова: акустическое поле, тонкие плёнки, электромагнитоакустический преобразователь упругих волн, пьезодатчик.

Method of thickness measurement using acoustic waves in micron-rated range of thin films is propose. The method is based on the use of non-linear dependence of harmonic antisymmetric Lamb waves for thickness. Considered when using electromagnetic acoustic (EMA) receiver of the acoustic wave, the measurement error of the thickness of thin films.

Key words: acoustic field, thin films, electromagnetic acoustic receiver of elastic waves, piezoelectric transducer.

В связи с постоянным повышением требований к качеству продукции машиностроения необходимо внедрять современные технологии производства. Это важно для того, чтобы соблюдать параметры изделий с высокой точностью и уменьшать время контроля качества изделия с использованием высокоскоростных автоматических установок. Особенно это актуально при изготовлении тонких металлических плёнок толщиной менее

долей миллиметров, наиболее широко распространённых в электронной технике и нанотехнологиях.

Определение толщины тонких плёнок является одной из важнейших проблем современных технологий. Применяемые методы контроля толщины плёнок, такие как измерение электросопротивления, растровая и трансмиссионная электронные микроскопии и другие, требуют высоких трудозатрат, и не могут обеспечить необходимую скорость измерения на высокоскоростных установках [1, 2].

Широко распространённый эхо-импульсный акустический метод, основанный на возбуждении объёмных волн [3], в основном применяется для контроля изделий, толщина которых значительно больше длины акустической волны. Длина волны определяется выражением

$$\lambda = v_t / f ,$$

где v_t – скорость сдвиговой волны; f – частота колебаний.

При скорости сдвиговой волны в металлах $v_t \approx 3000$ м/с и максимальной частоте $f_{\max} = 10 \dots 15$ МГц волн, возбуждаемых серийными пьезодатчиками, длина волны $\lambda \approx 0,3 \dots 0,2$ мм. Это значение является нижним пределом толщины плёнок, которую можно измерить эхо-импульсным акустическим методом.

В данной работе для измерения толщины плёнок в виде фольги был использован инновационный метод, основанный на нелинейной зависимости скорости распространения акустических антисимметричных волн Лэмба [4] от толщины d плёнки и частоты волны (рис. 1). При больших частотах по граням плёнки распространяются две рэлеевские волны. С уменьшением частоты колебаний генератора эти волны взаимодействуют и разделяются на антисимметричную и симметричную составляющие. Целесообразно рассматривать антисимметричную составляющую волны, скорость которой монотонно падает до нуля с уменьшением толщины, что позволяет дополнительно расширить диапазон измеряемых толщин от долей миллиметра до десятка микрометров. Указанный диапазон на рис. 1

определяется безразмерным произведением $k_t d = 0 \dots 1$, где $k_t d = 2\pi f / v_t$ – волновое число, т. е. с уменьшением толщины необходимо увеличивать частоту до её попадания в этот диапазон.

Как правило, скорость распространения волны обычно обусловлена временем прохождения её импульса между двумя пьезодатчиками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга. Это расстояние называют базой измерения. Однако импульс волны, по сути представляющий волновой пакет и состоящий из набора частот, усложняет использование такого способа измерения скорости. Скорость волны зависит также от частоты, поэтому в процессе движения существенно изменяется форма импульса, что приводит к неопределённости измерения времени между исходным и пришедшим импульсами.

В работе [5] использовали непрерывный режим возбуждения гармонических акустических волн со строгой фиксированной частотой, позволяющий непосредственно определять фазовую скорость волны. Для достижения достаточной точности измерения толщины база измерения была достаточно большой (50 мм). Такая база обусловлена необходимостью уменьшения погрешности измерения, связанной с неконтролируемым слоем контактной жидкости, а также большими размерами выпускаемых пьезодатчиков. На практике это вызывает большие неудобства при эксплуатации и трудности автоматизации контроля. Впервые уменьшить базу измерения удалось с применением электромагнитоакустического (ЭМА) преобразователя. Данный преобразователь содержит магнит и находящийся между его полюсами индуктор, выполненный в виде проводника [5, 6]. При прохождении волны колебания частиц среды на поверхности изделия в магнитном поле преобразователя создают электромагнитное поле, индуцирующее в индукторе электродвижущую силу.

В настоящей работе, являющийся продолжением исследований [5], колебания возбуждались пьезоэлементом, их приём – ЭМА-преобразователем оригинальной конструкции с фиксированной базой, изготовленной

с высокой точностью [7]. Индуктор ЭМА-преобразователя выполнен в виде двух прямых проводников, жёстко закреплённых на определённом расстоянии друг от друга в магнитном поле (рис. 2). Сигналы этих проводников поступают через повышающий трансформатор на вход усилителя. Трансформаторы выполняют роль согласующих устройств с высокоомным входом усилителя. Для защиты от внешних наводок трансформаторы закрыты кожухом и размещены на заземляемом одностороннем фольгированном гетинаксе, а проводники индуктора находятся на противоположной стороне индуктора.

Лабораторная установка. Разработана методика измерения толщины тонких металлических плёнок в виде фольги в диапазоне толщин от долей миллиметра до десятка микрометров и создана лабораторная установка, включающая стандартные приборы и позволяющая за непродолжительное время и с достаточной точностью проводить операции. Установка состоит из генератора стандартных сигналов Г4–18А, высоковольтного усилителя сигналов, пьезодатчика, возбуждающего упругие волны, ЭМА-преобразователя и двухлучевого осциллографа TDS-2202 (рис. 3). Пьезодатчик и ЭМА-преобразователь помещены на плёнку (металлическую фольгу), расположенную на рабочем столе.

Монохроматическая волна с фиксированной частотой излучается пьезодатчиком, распространяется по тонкой плёнке и фиксируется приёмным ЭМА-преобразователем 4. Индукторы находятся в магнитном поле ЭМА-преобразователя, сигналы которого поступают на различные входы двухлучевого осциллографа, позволяющего определять время прохождения волны. Приёмные индукторы (проводники) изготовлены методом литографии и расположены друг от друга на фиксированном расстоянии 5 мм.

Вначале двухлучевым осциллографом измеряли временной интервал. Затем с использованием графика (см. рис. 1) по значению скорости v_t определяли произведение $k_t d = \omega d / v_t$ ($\omega = 2\pi f$, где f – частота колебаний

генератора) и находили толщину плёнки с учётом частоты f генератора. Так, при частоте $f = 2,5$ MHz и относительной скорости $v/v_t = 0,2$ толщина плёнки $d = 50$ мкм. Погрешность определения относительной скорости v/v_t волны составила 6 %.

Для нахождения погрешности измерения толщины дисперсионную зависимость скорости от толщины, полученную численным решением уравнений в [4], целесообразно аппроксимировать в виде функции

$$v/v_t = 1 - \exp(-0,5k_t d). \quad (1)$$

В этом случае относительную погрешность измерения толщины d из (1) можно вычислить как

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta v \exp(-0,5k_t d)}{0,5v_t [-\ln(1 - v/v_t)]}. \quad (2)$$

Согласно (2) погрешность измерения толщины указанной выше плёнки с учётом погрешности относительной скорости волны составила 10 %. Основной вклад в погрешность измерения толщины вносит погрешность определения скорости волны. Также на погрешность измерения толщины плёнки влияет и значение d , что обусловлено нелинейным характером зависимости $v(d)$ (см. рис. 1). Однако если с уменьшением толщины увеличивать частоту ω , чтобы при этом $\omega d/v_t = \text{const}$, то относительная погрешность измерения толщины плёнки практически не будет зависеть от значения d .

Важно отметить, что для измерения толщины более тонких плёнок необходимо возбуждать более высокочастотные колебания. Тогда возникают трудности другого рода. В этой ситуации плёнку изготавливают напылением на подложку, волновое сопротивление которой должно быть сравнимо с волновым сопротивлением плёнки или больше него, чтобы большая часть энергии упругой волны была бы сосредоточена в материале плёнки. В противном случае для получения достаточной амплитуды волны уход упругой волны в подложку компенсируют увеличением энер-

гии возбуждаемой волны. Это приводит к необходимости выбора материала подложки с более высоким волновым сопротивлением, что требует дополнительных исследований.

Заключение. Разработана и испытана специализированная установка для определения толщины тонких металлических плёнок. В процессе работы установки плёнки зондируют гармоническими антисимметричными акустическими волнами Лэмба. Метод измерений основан на использовании зависимости скорости этих волн от толщины плёнки. Главное достоинство метода – его экспрессность в сочетании с достаточной для технических потребностей точностью. К преимуществам данного метода также можно отнести достаточно высокое разрешение (от десятых долей миллиметров до десятков микрометров) и неразрушающий характер. Точность измерения толщины плёнок можно существенно повысить при использовании бесконтактного метода приёма излучения индуктора ЭМА-преобразователя, выполненного в виде двух жёстко закреплённых проводников.

Работа выполнена при поддержке Правительства РФ (Постановление №211 от 16.03.2013 г.), соглашение № 02. А03.21.0011.

Литература

1. **Готра З. Ю.** Контроль технологии гибридных интегральных схем. Львов, Каменяр, 1981.
2. **Технология** тонких плёнок. Справочник в 2 т. / Под ред. Л. Майсенла, Р. Гленга. М.: Советское радио, 1977.
3. **Королев М. В.** Эхо-импульсные толщиномеры. М.: Машиностроение, 1980.
4. **Викторов И. А.** Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966.

5. **Толипов Х. Б., Клещев Д. Г., Березин В. М.** Использование волн Лэмба для измерения толщины тонких металлических пленок // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 2. С. 137–139.

6. **Tolipov Kh.** Stagnant Nonuniform Acoustic Waves // Advanced Res. 2013. V. 684. P. 667–670. Trans Tech Publications. Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.684.667

7. **Толипов Х. Б.** Возможности повышения эффективности бесконтактного излучателя акустических волн // Дефектоскопия. 2017. № 4. С. 71–74.

Дата принятия: 13.03.2018.

Подрисуночные подписи

Рис. 1. Зависимость относительной скорости ультразвуковой антисимметричной волны Лэмба от толщины металлических плёнок

Рис. 2. Индуктор электромагнитоакустического преобразователя:

1 – проводники (расстояние между проводниками 5 мм); 2 – фольга;
3 – гетинакс

Рис. 3. Функциональная схема лабораторной установки:

1 – высоковольтный усилитель; 2 – генератор стандартных сигналов Г4 – 18А; 3, 6 – излучатель и приёмник ультразвуковых волн, соответственно; 4 – осциллограф TDS-2202C; 5 – алюминиевая плёнка