

## **О НОВОЙ МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ТОНКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

*Х.Б. Толипов, Д.Г. Клещев, В.М. Березин*

Описана экспериментальная установка, позволяющая определить микрометровую толщину тонких металлических пленок с использованием пьезодатчиков. Предложенный метод основан на зависимости фазовой скорости распространяющихся вдоль пленки гармонических антисимметричных волн Лэмба от ее толщины.

Ключевые слова: волны Лэмба, акустические методы, пьезодатчики, усилитель сигналов.

Одной из актуальных проблем современного приборо- и машиностроения является проблема экспрессного определения толщины ультратонких металлических пленок. Широко используемые акустические методы, основанные на возбуждении объемных волн, например, эхоимпульсный способ [1], применяются в основном для контроля массивных изделий, толщина которых значительно больше длины акустической волны.

В данной работе разработана методика и описана лабораторная установка для определения толщины тонких металлических пленок микрометрового размера, позволяющая быстро и с достаточной точностью проводить измерения.

В установке были использованы акустические антисимметричные волны Лэмба [2], скорость распространения которых вдоль пленки зависит от ее толщины (рис. 1).

Общепринято, что скорость распространения волны определяется временем ее прохождения между двумя пьезодатчиками, расположенными на определенном расстоянии  $L$  друг от друга ( $L$  – база измерения). Нами установлено, что вследствие явления дисперсии импульсный метод измерения скорости дает большую погрешность. Это связано с тем, что импульс волны, представляющий собой по сути волновой пакет, по ходу движения существенно изменяется по форме, что приводит к неопределенности измерения времени между исходным и пришедшим импульсами. Для исключения этой неопределенности был использован непрерывный режим возбуждения гармонических акустических волн строго определенной частоты, позволяющий непосредственно определять фазовую скорость волны [3].

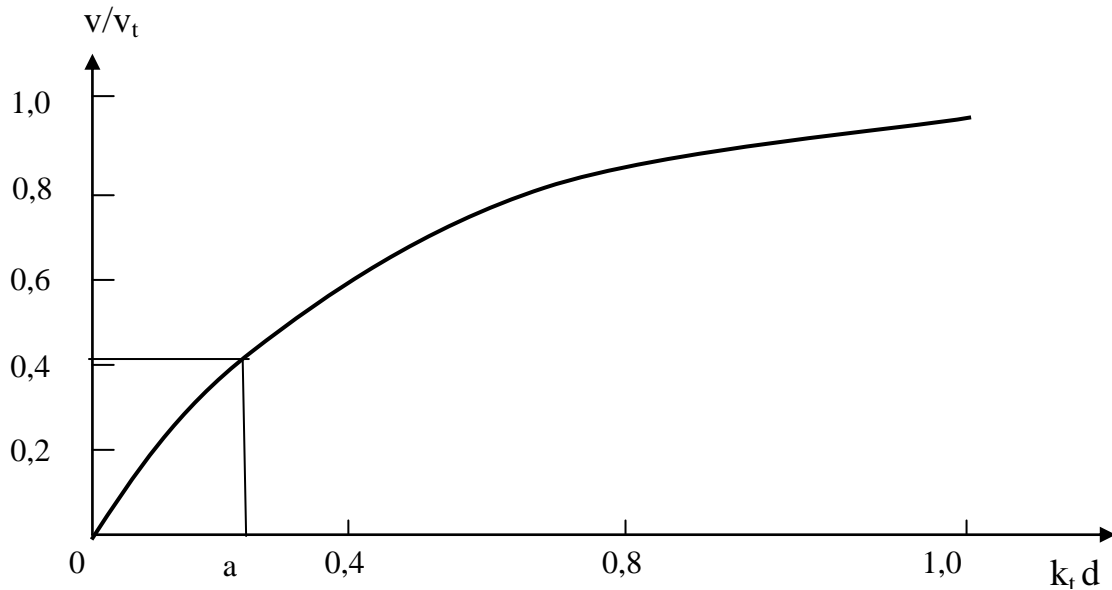


Рис. 1. Зависимость относительной скорости ультразвуковой антисимметричной волны Лэмба от толщины металлических пленок

Лабораторная установка состоит из генератора стандартных сигналов ГСС Г4–18А, высоковольтного усилителя, излучающего и приемного пьезодатчиков марки П-121 и двухлучевого осциллографа TDS-2202 (рис. 2).

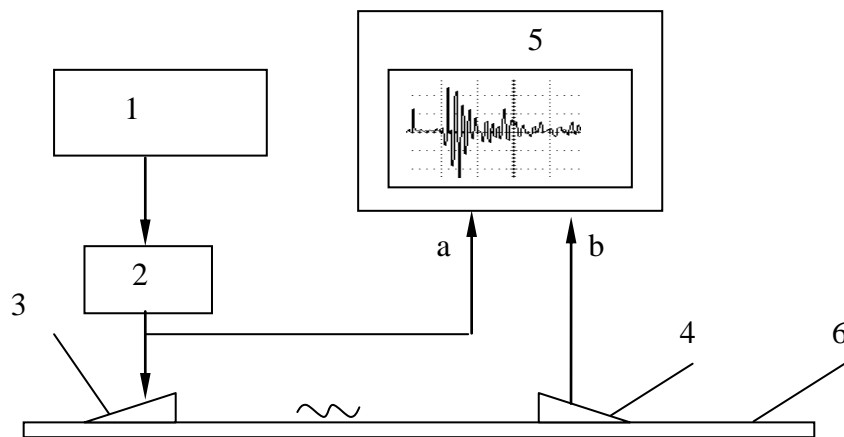


Рис. 2. Блок-схема лабораторной установки. 1 – генератор стандартных сигналов Г4 – 18А, 2 – высоковольтный усилитель, 3, 4 – излучатель и приемник ультразвуковых волн, 5 – осциллограф TDS-2202С, 6 – алюминиевая пленка. Расстояние между датчиками – 50 мм

Монохроматическая волна с фиксированной частотой возбуждается излучающим пьезодатчиком 3, распространяется вдоль тонкой пленки и фиксируется приемным пьезодатчиком 4. Сигналы от этих пьезодатчиков

поступают на различные входы двухлучевого осциллографа, что позволяет определить время  $t_1$  прохождения волны.

На рис. 3 приведена осциллограмма, полученная при прохождении волны Лэмба вдоль алюминиевой пленки толщиной 53 мкм. Частота колебаний волны составила 1,8 МГц, а база измерения  $L$  – 50 мм. Ошибка в определении скорости  $v$  составляет 4 %.

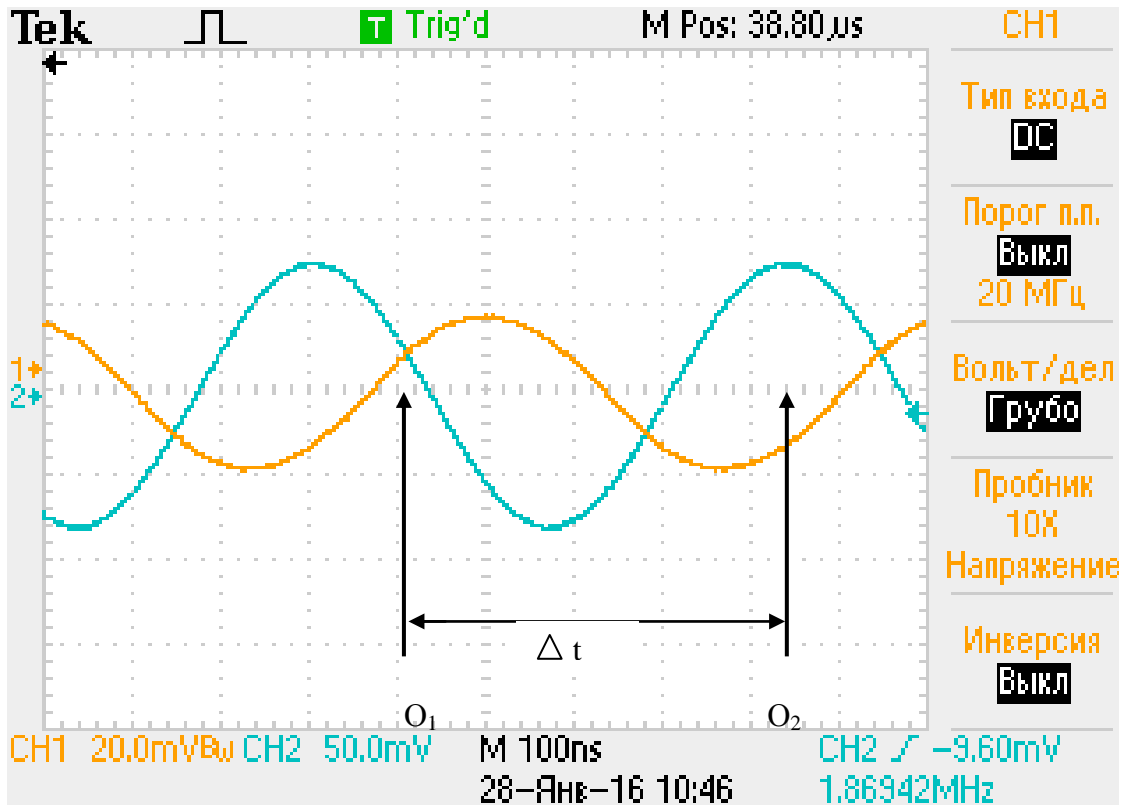


Рис. 3. Осциллограмма сигналов от двух пьезодатчиков.

Развертка 100 нс/дел., время между импульсами 1 и 2 составляет  $\Delta t = 3,5$  мкс

Для определения погрешности толщины дисперсионную зависимость скорости от толщины пленки  $d$  аппроксимируем в виде:

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

где  $k_t = \omega/v_t$  – волновое число,  $\omega$  – круговая частота,  $v_t$  – скорость распространения волны в пленке.

Тогда относительная погрешность в определении толщины пленки равна:

$$\frac{\Delta d}{d} = \Delta v \frac{\left( e^{-0,5 k_t d} \right)}{0,5 v_t \left( -\ln \left( 1 - \frac{v}{v_t} \right) \right)}. \quad (2)$$

Точность измерения толщины пленки при этих параметрах составляет 8 %. Из (2) следует, что основной вклад в ошибку измерения толщины вносит погрешность в измерении скорости  $v$ . Также на точность измерения величины  $d$  влияет сама толщина пленки  $d$ , что обусловлено нелинейным характером изменения скорости волны  $v$  в пленке от ее толщины (сравните точки  $a$  и  $b$  на рис.1). Будем считать, что погрешность изменения частоты генератора пренебрежимо мала. Тогда увеличить точность в определении скорости  $v$  можно путем увеличения базы измерения  $L$ , что ведет к увеличению времени прохождения волны  $t_1$  и, соответственно, к более точному его измерению.

Из (2) также следует, что если при уменьшении толщины пленки  $d$  увеличивать частоту генератора  $f$  так, чтобы произведение  $k_t d = \omega d/v_t$  оставалось неизменным, относительная погрешность измерения практически не будет зависеть от толщины пленки.

**Заключение.** Таким образом, разработана и испытана установка для определения толщины тонких металлических пленок микрометрового диапазона. Методика основана на использовании зависимости скорости гармонических антисимметричных акустических волн в непрерывном режиме Лэмба от толщины пленки. Главными преимуществами данной методики является отсутствие дисперсии скорости, что позволило поднять точность измерения, достаточную для технических потребностей, а также его экспрессность.

Следует отметить, что предложенный метод в принципе применим и к измерению толщины наноразмерных металлических пленок. В этом случае при малых толщинах значительно уменьшается скорость распространения волны Лэмба. Поэтому база измерения  $L$ , которая из-за сильного затухания волны должна составлять порядка десяти длин волн, уменьшается до микронных размеров. Это возможно при замене пьезодатчиков на бесконтактный метод возбуждения и приема акустических колебаний, позволяющий измерять скорость на малых базах, что требует проведения дальнейших дополнительных исследований.

#### Библиографический список

1. Королев, М.В. Эхо-импульсные толщиномеры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1980.
2. Викторов, И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике / И.А. Викторов. – М.: Наука, 1966.
3. Толипов, Х.Б. Ультразвуковой способ измерения толщины тонких пленок / Х.Б. Толипов, Д.Г. Клещев. – Заявка № 2016100979 от 13.01.2016.

[К содержанию](#)