

УДК 534.838.4

**УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ФАЗО-ВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ
НЕПРЕРЫВНОЙ ДИАГНОСТИКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАШИНОСТРОЕНИЯ**

**А.А. Волчек¹, В.П. Данилевский², Д.А. Костюк³, Ю.А. Ку-
завко⁴**

¹Отдел проблем Полесья НАНБ

Брест, Беларусь

²НПК ООО «Корунд»

Брест, Беларусь

³Брестский государственный технический университет

Брест, Беларусь

⁴Институт радиотехники и электроники РАН

Москва, РФ

Ультразвуковые методы и средства диагностики материалов, изделий и веществ нашли и находят обширное применение в различных отраслях промышленности, медицины и экологии. В недавнее время лабораторией ультразвуковых технологий и диагностики Брестского государственного технического университета впервые предложен и разработан ультразвуковой диагностический комплекс

визуализации твердотельных изделий, апробированный при исследованиях процессов трения в машиностроительных изделиях [1].

Акустические измерения являются весьма чувствительными к локальным изменениям плотности и упругих модулей исследуемых объектов. Так, современные ультразвуковые приборы позволяют регистрировать изменение плотности материалов изделий в 0,01%, несмотря на достаточно большое затухание зондирующих объектов акустических сигналов. Важнейшей характеристикой средств акустической визуализации является достигаемое малое пространственное разрешение локальных областей в объекте, линейные размеры которых близки к длине волны ультразвуковых колебаний.

Отметим, что широко используемая в машиностроении ультразвуковая дефектоскопия является одномерной и позволяет определить лишь глубину залегания дефектов в изделии и частично их геометрические и прочностные характеристики. Предложенная нами акустическая визуализация твердотельных объектов является более информационной, так как позволяет получать двухмерные изображения сечений исследуемых объектов в реальном масштабе времени и даже трехмерные изображения при соответствующей доработке датчиков визуализации и программного обеспечения.

В устройствах ультразвуковой диагностики используются амплитудно-временные методы обработки принятых эхо-сигналов, временные задержки которых относительно излученных сигналов однозначно определяют координаты локальных областей, а их амплитуды — контрастность границы локальной области по сравнению с окружающим ее объемом вещества. Из информационной теории измерений известно [2], что амплитудные измерения являются наименее точными и слабо помехозащищенными по сравнению с временными (частотными) и фазовыми методами измерений. Если бы контрастность границ в исследуемом объекте удалось бы связать с фазовыми или частотными методами измерений, то тем самым значительно увеличилась бы чувствительность методов акустической визуализации к выявлению слабо выраженных неоднородностей исследуемых структур, материалов и веществ.

В ряде работ [3, 4] нами рассматривались теоретические задачи распространения продольных и поперечных акустических сигналов (непрерывных и импульсных) в слоистых структурах, одной из компонент которых являлась сильно диссипативная среда (СДС), т. е. среда со значительным поглощением акустических колебаний. В ча-

стности при отражении продольного акустического сигнала от границы с СДС возникала существенная зависимость коэффициента отражения R_ω и его фазы ψ_ω^R от вязкости и теплопроводности СДС, имевшая вид:

$$R_\omega = \frac{1 - \tilde{\varepsilon}}{1 + \tilde{\varepsilon}}, \quad \operatorname{tg} \psi_\omega^R = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot (1 + \aleph^2)^{1/4} \cdot \sin \frac{\psi}{2}}{1 - \varepsilon^2 \cdot (1 + \aleph^2)^{1/2} \cdot \cos \psi} \quad (1)$$

где $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon \cdot (1 - i \cdot \aleph)^{1/2}$, $\varepsilon = Z_2/Z_1$, $\aleph = \omega/\omega_c$, $Z_1 = \rho_1 S_{c1}$ и $Z_2 = \rho_2 S_{c2}$ — соответственно акустические импедансы первой и второй сред (в отсутствие диссипации), $\omega_c = \rho_2 S_{c2,0}^2/b$ — эффективная частота, характеризующая СДС; b — параметр диссипативных потерь, $S_{c2,0}$ — скорость звука (при $\omega \rightarrow 0$), ρ — плотность, $\psi = -\operatorname{arctg} \aleph$.

В современной электронике при изготовлении как полупроводниковых, так и твердотельных элементов используется многообразие физических и химических процессов, из которых можно выделить наиболее распространенные и повторяющиеся: молекулярная и лазерная эпитаксия, электро- и фотолитография, плазменное и вакуумное напыление, электрохимическое осаждение, пайка припоем. При этом в большинстве из них имеет место сильный локальный нагрев, фазовые, агрегатные и химические превращения в отдельных областях изделия, которые в таких условиях являются по своим физическим свойствам СДС, т. е. в них возникает изменение плотности, упругих модулей и возрастание поглощения ультразвуковых колебаний в таких областях. Так как комплексные коэффициенты отражения (прохождения) для акустических сигналов существенно зависят от вышеуказанных параметров, а те в свою очередь определяются параметрами состояния локальных областей: их геометрическими размерами, температурой, химическим составом и структурой, то очевидной становится возможность высокоточной технической диагностики состояния таких изделий в процессе их изготовления и эксплуатации акустическими методами и средствами. При этом, в силу особенности слабого ультразвукового диагностического воздействия на вещество не возникает никаких изменений функциональных и прочих характеристик приготавливаемых, а в последствии эксплуатируемых изделий, т. е. контроль является неразрушающим, непрерывным и гибким, позволяющим вносить определенные тех-

нологические изменения в маршрут режимов техпроцесса и повышения количества выхода годных.

Экспериментально исследовался процесс микродулового плазменного оксидирования алюминиевых пластин в электромагнитной ванне с образованием корундовых покрытий толщиной до 300 мкм. По проведенным исследованиям удалось подобрать оптимальный выбор токов питания гальванической ванны и химический состав рабочей электролитической жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Akulich Ya. A., Kostiuk D. A., Kuzavko Yu. A. Program improvement of quality of the images at 2D acoustic visualization. / Proceedings of international conference on neural networks and artificial intelligence. Brest, 12–15 October, 1999. p.p. 189–192.
2. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968, 248 с.
3. Костюк Д. А., Кузавко Ю. А. Особенности граничного отражения поперечных волн от диссипативной среды. // «Вестник БГТУ. — Машиностроение, автоматизация, ЭВМ», №4, 2000. с. 48–51.
4. Костюк Д.А., Кузавко Ю.А. Аномалии граничного отражения ультразвука от диссипативной среды. // Письма в ЖТФ, 2001, том 27, вып.23 — с. 31–40