

Таким образом, применение АМД-методов позволяет непосредственно рассчитывать степень деформации по акустическим снимкам, или определять эту характеристику по значениям скорости ПАВ в образцах.

Список литературы

1. Кустов А.И., Мигель И.А. и др. // М и ТОМ. 1998. № 4. С. 29 – 32.
2. Кустов А.И. // "Физика и химия стекла", 1998 - т.24 - №6 - с.817-824.
3. Кустов А.И., Буданов А.В. и др. // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естест. и техн. науки. 2000. Т. 5. Вып. 2-3. С. 320 - 322.
4. Кустов А.И., Мигель И.А., Щербинин И.А. // Сб. Трудов XX С.-Петербур. Чтений по проблемам прочности, апр.2010, ч.1 – 368 с (с. 243-245).
5. Кустов А.И., Мигель И.А. // "Материаловедение", №8, 2011 г - с. 15 – 19.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ КРИСТАЛЛОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ АМД-МЕТОДАМИ

Кустов А.И.¹, Мигель И.А

¹ Воронежский государственный педагогический университет, Россия
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия
akvor@yandex.ru

Изучение свойств кристаллов – отдельная область исследований, нуждающаяся в постоянном совершенствовании методов исследования степени совершенства структурного строения материалов. Особое внимание при этом уделяется контролю дефектных структур и анализу их трансформации. Весьма перспективны в этой области неразрушающего контроля методы исследований, построенные на применении акустических волн и имеющие ряд преимуществ [1,2]. В частности, АМД-методы позволяют получать серии структурных акустических изображений на различной глубине от поверхности, оценивать по ним степень однородности и изотропности материалов. Не менее информативным методом анализа структуры кристаллов является метод $V(Z)$ -кривых [3]. Он основан на получении интерференционных картин для зеркально отраженных и переотраженных приповерхностными слоями объекта волн (при сканировании акустической линзы вдоль оси Z , перпендикулярной поверхности). Эти интерференционные картины формируются в виде характерных кривых, главный максимум которых связан с величиной коэффициента затухания акустических волн в материале объекта ($\Delta V/V\%$), а лежащая правее область периодических осцилляций определяет значение характерного расстояния ΔZ_N [4]. Значение ΔZ_N позволяет рассчитать величину скорости v_R приповерхностных акустических волн (ПАВ):

$$\Delta Z_N = \frac{v_l}{2 \cdot f} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v_l}{v_R} \right)^2} \right]^{-1} \quad (1) \quad v_R = v_l \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{v_l}{2 \cdot f \cdot \Delta Z_N} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

При изменении кристаллографической ориентации приповерхностных слоев объекта меняются и характеристики распространения акустических волн в нем. По величине этих изменений судят о трансформации свойств кристалла. На рис.1 представлена характерная кривая для Ge $\langle 111 \rangle$. Акустическое изображение участка исследований демонстрируется на рис.2.

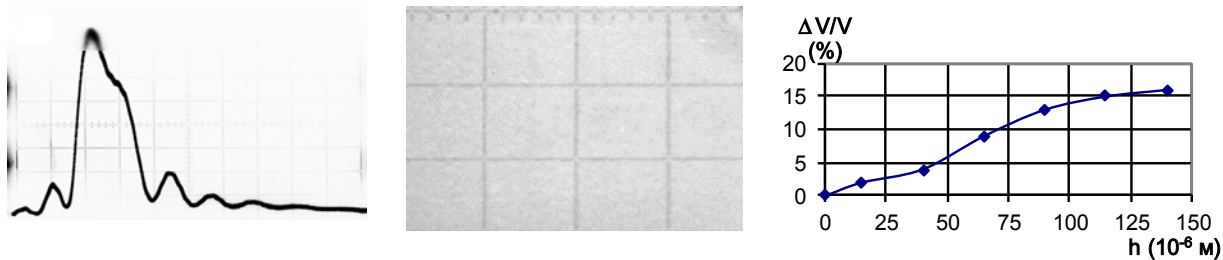


Рис.1. Экспериментальная $V(Z)$ -кривая для монокристаллического кремния Ge $\langle 111 \rangle$ ($v_R = 2,85 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 13,23$ мкм, масштаб вертикал. 1 дел.= 0,25 В, горизонт. 1 дел.=11 мкм)

Рис. 2. Акустическое изображение участка плавленого кварца (SiO_2) (масштаб 18 мкм/дел., $Z = -12$ мкм)

Рис.3. Зависимость затухания АВ ($\Delta V/V\%$) в стали 40ХН от глубины зондирования (h).

В дополнение к определению значений физических характеристик кристаллов отдельный интерес представляют слоистые структуры (или покрытия различной природы и толщины, способов получения). В настоящее время одна из актуальных проблем в области твердотельной электроники - проблема контроля толщин микро- и нанослоёв покрытий, а также измерение различных характеристик таких слоев. Успешно решить данную проблему позволяет разработанные в последние десятилетия АМД-методы [3,4]. В частности, благодаря различию импедансов подложек и покрытий с помощью АМД-измерений можно получить дисперсионные зависимости v_R , по которым надёжно рассчитываются значения толщины покрытий.

На рис.1 демонстрируется $V(Z)$ -кривая для монокристаллического кремния Ge $\langle 111 \rangle$, которая при нанесении покрытий трансформируется, изменяя характерное расстояние ΔZ_N и позволяет рассчитать v_R . При этом точность измерений, достигающая для ряда материалов для используемого САМ десятков ангстрем, обеспечивается, прежде всего, при высокой однородности подложек. Оценка однородности обеспечивается акустической визуализации области, для которой рассчитывается толщина покрытия. Пример такой визуализации представлен на рис.2. На рис.3 демонстрируется зависимость коэффициента затухания акустических волн в зависимости от глубины от поверхности объекта. На эту поверхность предварительно воздействовали путем диффузии. Анализ зависимости показывает, что слой материала с измененными свойствами составляет ~ 100 мкм.

Заметные преимущества АМД-методов проявляются при возникновении отслоений, или даже участков с пониженной адгезией, за счёт существенных различий акустических импедансов. Пример выявления таких участков для никелевого покрытия на пьезокерамике представлен на рис.4. На рис.4а видны лишь дефекты микронного уровня и сетка трещин (толщина которых по измерениям составляет 2–5 мкм). Однако, каких-либо признаков пониженной адгезии не наблюдается. На рис.4б – результаты сканирования изучаемого участка в режиме $V(Z)$ -кривых. Выявлены подповерхностные области пониженной адгезии и отслоения покрытия с шириной от 10 до 25 мкм (что позднее было подтверждено и акустической подповерхностной визуализацией).

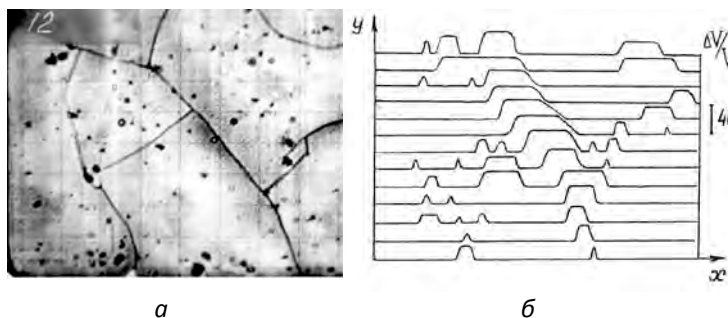


Рис.4. Выявление областей пониженной адгезии покрытий (а – слой никеля на ЦТС-подложке – акустическая визуализация, $Z = -1$ мкм; ЦТС- 35, масштаб 40 мкм/дел., б – $V(Z)$ -сканирование)

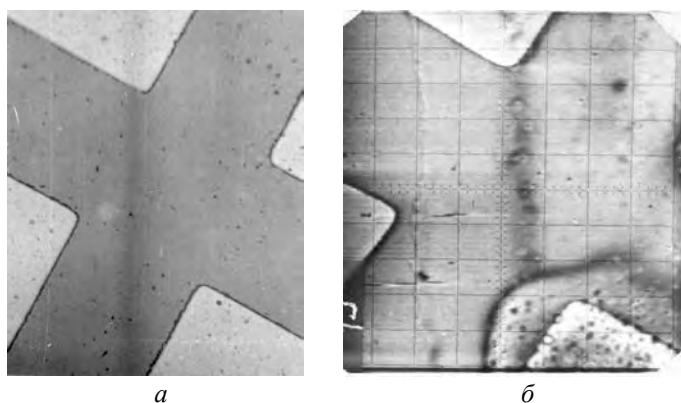


Рис.5. Оценка адгезии диэлектрических покрытий на стеклянной подложке *а*) оптическое изображение слоев Al_2O_3 в 0,3 мкм (темный фон) и ZnS в 0,7 мкм (светлый фон) на подложке из стекла (350×450 мкм²); *б*) акустическое изображение слоев Al_2O_3 в 0,3 мкм (темный фон) и ZnS в 0,7 мкм (светлый фон) на подложке из стекла (масштаб 45 мкм/дел., $Z = -2$ мкм).

Не менее важно определять адгезионные свойства покрытий на материалах высокой однородности, например, на стеклах или кристаллических полупроводниках. Пример результатов таких измерений для реальных промышленных объектов демонстрируется на рис. 5. На оптическом изображении (*а*) признаков дефектов нет, а на акустическом изображении (*б*) они явно видны. Количественная оценка адгезионных свойств производилась по анализу высоты главного максимума $V(Z)$ -кривых.

Применяемые в АМД-методах для расчёта толщины покрытий $V(Z)$ -кривые нечувствительны к природе как подложек, так и материала покрытий. Поэтому, эти методы демонстрируют высокий уровень надёжности и точности измерений и для подложек из спекаемых (порошковых) материалов. На рис. 6 представлена характерная $V(Z)$ -кривая для ЦТС-35, на поверхность которой нанесены медные электроды различной толщины (для образца, $V(Z)$ -кривая которого представлена на рисунке толщина покрытия составляет 0,3 мкм).

Разработанные АМД-методы позволяют определять и глубину измененных слоев материала, обусловленную параметрами внешних воздействий. Например, при шлифовке и полировке поверхности диэлектрических материалов, наблюдается изменение количества микротрещин, что приводит к трансформации значений скорости ПАВ, по которому можно оценить воздействие на материал.

И, наконец, представим результаты построения дисперсионных зависимостей скоростей акустических волн от толщины покрытий и физических характеристик подложек. На рис.7 представлена зависимость для корунда на стекле. Благодаря существенному различию значений скоростей ПАВ для изучаемых материалов точность определения толщины составляет ~ 60 ангстрем.

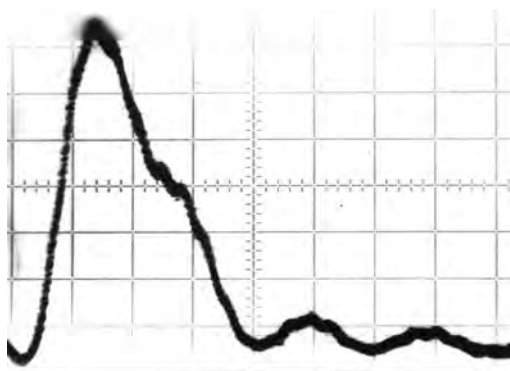


Рис. 6. Экспериментальная $V(Z)$ – кривая для пьезокерамики с медным покрытием толщиной 0,3 мкм (масштаб по горизонтали 4 мкм/дел, по вертикали – 1 В/дел.)

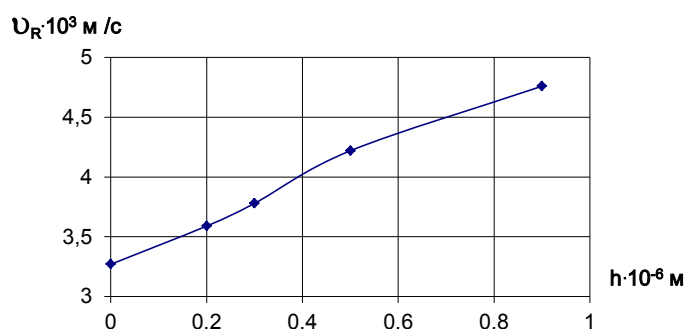


Рис.7. Дисперсионная зависимость скорости ПАВ от толщины покрытия из корунда (Al_2O_3) на подложке из стекла

Таким образом, АМД-методы позволяют:

- неразрушающим способом оценивать однородность подложек из диэлектрических и полупроводниковых материалов;
- определять толщину покрытий, как диэлектрических, так и металлических;
- оценивать адгезионные параметры покрытий, как качественно, так и количественно;
- рассчитывать глубину слоев, с измененными свойствами, благодаря внешним воздействиям (механическим, термическим, диффузионным).

Список литературы

1. Кулаков М.А., Морозов А.И. // Акуст. Журнал. Т. XXXI. вып.6. 1985.С.817-820.
2. Wilson R. G., Weglein R. D. // Appl. Phys. 1994. V. 55. N 9. P. 3261—3275.
3. Кустов А.И., Мигель И.А. // Металлофизика и новейшие технологии, междунар. науч.-техн. журн., Киев, 2009, Т.31, №3, с.381-388.
4. Кустов А.И., Мигель И.А. // Материаловедение, №2 (155), 2010, с.9 – 14.
5. Кустов А.И., Мигель И.А. // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. - Тамбов, 2013. – Т. 18.—Вып.4.Часть 2. – 612 с. (с.1875-1877).

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ И ЕЁ ОСОБЕННОСТЕЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Кустов А.И.¹, Мигель И.А

¹ Воронежский государственный педагогический университет, Россия
ВУНЦ ВВС ВВА им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А. Гагарина, Воронеж, Россия
akvor@yandex.ru

Определение значений параметров структуры и анализ картины структурных составляющих— основа определения характеристик материалов в конденсированном состоянии. Расширение возможностей анализа взаимосвязи свойств и структуры материалов, достоверность получаемых данных связаны с набором применяемых методов (в том числе и АМД-методов [1,2], всё более широко используемых последние два десятка лет). Они позволяют исследовать состояние структуры, выявлять и характеризовать её особенности. К таким особенностям, прежде всего, относятся локальные флуктуации плотности, изменения прочностных, акустических и иных характеристик.

Известно, что практически любой материал является сложной системой с характерной структурой. Так как проблема характеризации свойств материалов всегда является *актуальной*, из неё вытекает не менее значимая проблема - анализа отдельных структурных составляющих и оценка степени их влияния на конкретные характеристики и состояние материала в целом. При этом особый интерес вызывает разработка методов, позволяющих выявлять предельные состояния материалов, или близкие к ним.

Целью проведенной нами работы являлось наблюдение и анализ структуры материалов, а также определение значений их физико-механических параметров в зависимости от характера систем неоднородностей. Для достижения поставленной цели и применялись АМД-методы. В частности, они позволяют рассчитывать значения скорости поверхностных акустических волн (*ПАВ*) в твердотельных материалах. Этот физический параметр тесно связан с величинами, характеризующими внешние воздействия на материал, а также с такими важными характеристиками объектов исследования как упругие модули, коэффициент поглощения акустических волн, степень анизотропности структуры и проч. [3]. На рис.1 представлены изображения $V(Z)$ -кривых, которые демонстрируют изменение высоты главного максимума на ~60% в области микронеоднородности, что подтвер-