

упругого и пондеромоторного сигналов. Во всех трех рассмотренных геометриях облучения по амплитуде пондеромоторного сигнала можно отслеживать проводимость образцов и их дефектность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аркаев Е. А., Беспалько А. А., Тонн Р. В. Нелинейность акустического отклика Si и Ge, облучаемых мощными пучками электронов, вследствие электрострикции // Тез. докл. XIII Всесоюз. конф. по акустоэлектронике и квантовой акустике. Черновцы: 1986. Ч. 1. С. 73-74.
2. Громов В. В. Электрический заряд в облучаемых материалах. М.: Энергоиздат, 1982. 112 с.
3. Желудев И. С. Физика кристаллических диэлектриков. М.: Наука, 1978. 463 с.

Институт сильноточной электроники
СО Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18.05.90

УДК 620.179.16

© 1990 г.

Е. А. Аркаев, А. А. Беспалько, С. И. Твердохлебов

ЭЛЕКТРОННО-АКУСТИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПОКРЫТИЙ И ТОНКИХ СЛОЕВ МАТЕРИАЛОВ

Взаимодействие мощных потоков электронов с конденсированными средами сопровождается возбуждением в них интенсивных импульсов термоупругих напряжений [1]. В приближении мгновенного ввода энергии в мишень связь между полем упругих напряжения сжатия $\sigma(x, t)$ и профилем распределения плотности поглощенной энергии пучка электронов описывается как $\sigma(x, t) = (\Gamma/2)E(x-ct)$, где Γ — параметр Грюнайзена, c — продольная скорость звука [2]. Такое приближение справедливо при облучении мишеней потоками электронов с максимальной энергией $E_{\max} \geq 10^2$ кэВ и длительностью импульса облучения $\tau_u \leq 10^{-8}$ с. В экспериментах использовался ускоритель типа «РАДАН-150», отвечающий этим требованиям и обеспечивающий $E_{\max} = 170$ кэВ, ток за анодом на воздухе до 400 А, длительность импульса тока $5 \cdot 10^{-9}$ с. Регистрация возбуждаемых акустических импульсов проводилась широкополосным апериодическим пьезопреобразователем по методике, описанной в работе [2]. Из ранее проведенных исследований [3] следует, что особенно устойчивым параметром термоупругих напряжений при $E_{\max} = \text{const}$ является длительность импульса сжатия, которая в однородном материале определяется как $\tau = R/\rho c$, где R — массовая толщина пробега электронов облучения в материале, ρ — плотность.

В двухслойной системе с толщиной покрытия $x_c < R_c/\rho_c$ длительность регистрируемого сигнала τ_p определится суммой длительностей импульсов сжатия, возникающих в слое покрытия $\tau_c = x_c/c_c$ и подложки $\tau_n = R'_n/\rho_n c_n$, где R'_n — максимальная толщина пробега электронов в материале подложки, прошедших покрытие x_c . На рис. 1 приведены типичные осциллограммы результирующего импульса сжатия для различных толщин покрытия в системе полиэтилен — медь.

Изменения τ_p определяются также соотношением волновых сопротивлений материалов слоя ω_c и подложки ω_n . Зависимость τ_p и τ_n от x_c для двухслойной системы с $\omega_c < \omega_n$ приведена на рис. 2. Здесь увеличение толщины слоя ведет к возрастанию τ_p . Для двухслойной системы с $\omega_c > \omega_n$ (медь — стеклотекстолит) увеличение x_c сопровождается уменьшением τ_p . На рис. 2 имеются две характерные точки. Первая из них определяется длительностью импульса сжатия τ_{nn} , возникающего при облучении в материале подложки в отсутствие покрытия, а вторая — длительностью импульса сжатия в материале слоя покрытия τ_{cn} при толщине, полностью поглощающей электроны облучения $x_{cn} \geq R_c/\rho_c$. Длительности τ_{cn} и τ_{nn} находились экспериментально по методике, описанной в работе [2]. Они являются постоянными величинами при неизменной максимальной энергии электронов облучения. Значения τ_{cn} и τ_{nn} могут быть рассчитаны по известной E_{\max} и параметрам материалов двухслойной системы. Так, при $E_{\max} < 1,0$ МэВ удобно пользоваться выражением [3]

$$\tau_{\max} = 0,5(\rho c)^{-0,85} E_{\max}^{1,45}.$$

По зависимостям, приведенным на рис. 2, найден общий вид выражения для промежуточных толщин покрытия:

$$x_c = c_c \tau_{cn} \frac{\tau_p - \tau_{nn}}{\tau_{cn} - \tau_{nn}}. \quad (1)$$

Эта формула справедлива при условии мгновенного ввода энергии пучком электронов $\tau_u = 0$ и для бесконечно малой постоянной времени, регистрирующей аппара-

Рис. 1. Осциллограммы импульсов сжатия двухслойной системы полиэтилен — медь: 1 — нет полиэтиленового слоя; 2 — толщина слоя 65 мкм; 3 — 190 мкм; 4 — 530 мкм. Масштаб развертки по времени — 50 нс/дел

Рис. 2. Зависимость длительностей акустических импульсов сжатия τ_p двухслойной системы полиэтилен — медь ($\omega_c < \omega_n$) и подложки τ_{np} от толщины контролируемого покрытия x_c

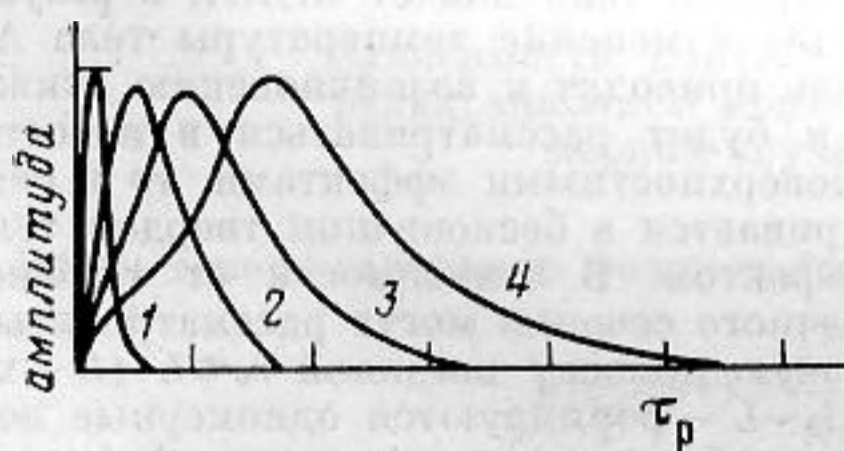


Рис. 1

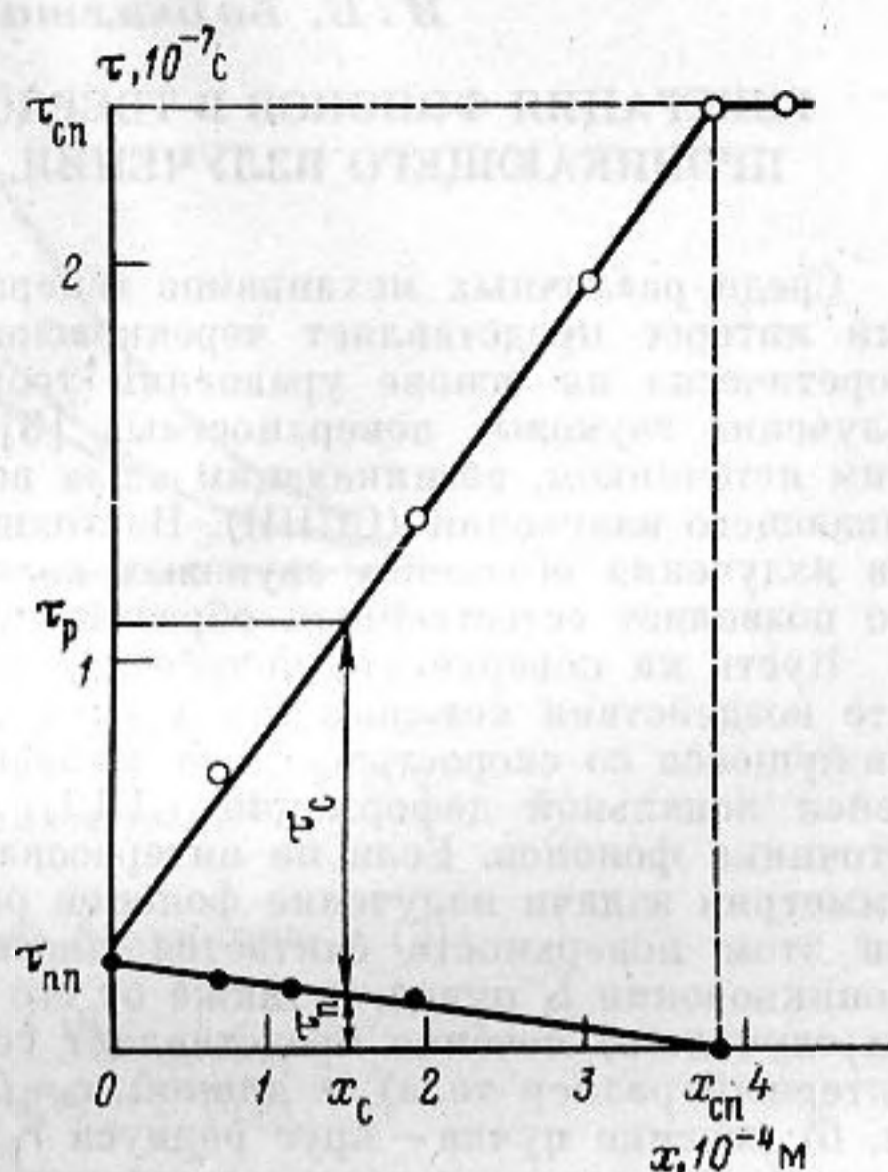


Рис. 2

туры τ_{nx} . На практике указанные временные характеристики потока заряженных частиц и регистрирующих приборов имеют определенные конечные значения. В формуле (1) можно учесть τ_u и τ_{nx} , вычитая их из τ_p , τ_{np} и τ_{cp} , что требует дополнительных измерений. Замена в (1) $c_s \tau_{cp}$ на x_{cp} исключает точное определение τ_u и τ_{nx} , так как вносимые ими погрешности, являясь постоянными величинами, не оказывают влияния на вычисляемое значение x_c . Поэтому для нахождения промежуточных толщин покрытий целесообразно пользоваться формулой

$$x_c = x_{cp} \frac{\tau_p - \tau_{np}}{\tau_{cp} - \tau_{np}}. \quad (2)$$

При расчетах необходимо учитывать, что τ_u и τ_{nx} не должны быть существенно больше τ_{cp} и τ_{np} . Полученные выражения (1) и (2) справедливы и для двухслойных систем с $\omega_c > \omega_n$.

Для трехслойной системы, когда промежуточный слой является дефектом между покрытием и подложкой или дефектом в тонком слое материала, акустический импульс сжатия складывается из трех составляющих. Если дефект заполнен газом или жидкостью, то потери энергии электронов облучения в нем существенно ниже, чем в материалах слоя и подложки. В результате регистрируемый импульс сжатия будет иметь провал, а τ_p возрастет по сравнению с реакцией двухслойной системы. Это подтверждают эксперименты на трехслойных образцах Al — минеральное масло (ВМ6) — Cu, KCl ВМ6 — Cu и др. Изменения длительности τ_p наблюдалось и при наличии твердых дефектов.

Таким образом, описанный электронно-акустический метод позволяет контролировать по акустическому импульсу сжатия толщину покрытий и следить за качеством его нанесения и дефектностью тонких слоев материалов на глубину, соизмеримую со свободным пробегом электронов облучения в образцах или изделиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. White R. M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption // J. Appl. Phys. V. 34. P. 2123—2124.
2. Беспалько А. А., Геринг Г. И. Акустическая дозиметрия интенсивных электронных пучков // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 1. С. 213—215.
3. Беспалько А. А., Геринг Г. И. Радиационно-акустический метод исследования материалов при облучении электронными пучками наносекундной длительности // Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии / Под ред. Месяца Г. А. Новосибирск: Наука, 1983. С. 93—101.

Институт сильноточной электроники
СО Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18.05.90