

08;12

О возможности непосредственного определения упругих постоянных тонких пленок в направлении, поперечном к плоскости пленки

© С.В. Боритко

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
Москва
E-mail: boritko@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 марта 2012 г.

Приводится описание возможности определения величины упругих постоянных тонких пленок, нанесенных на свободный торец звукопровода, в поперечном к плоскости пленки направлении. В основе предлагаемой методики лежит измерение изменения частот собственных колебаний составного акустического резонатора, содержащего звукопровод и электроакустический преобразователь объемных акустических волн, при его нагрузке тонкопленочным покрытием. Приводятся результаты экспериментальной проверки предложенной методики для тонкой ($3.25 \mu\text{m}$) пленки каучука марки ДСТ-30, нанесенной на свободный торец резонатора из плавленого кварца с рабочим диапазоном 80–150 МГц. Показано, что эластичность пленки дивинил-стирольного каучука вдоль и поперек ее плоскости различаются почти на четыре порядка.

Уже более 30 лет не ослабевает интерес к структурам с пониженной размерностью, в частности, к двумерным структурам, к которым относятся тонкие пленки и тонкопленочные покрытия, образованные на поверхности другого материала, существенно большего размера. Физические характеристики таких покрытий в плоскости пленок хорошо изучены. Однако в поперечном к плоскости пленки направлении из-за малости геометрического размера объекта зачастую встают трудности. Ниже приводится обоснование методики непосредственного экспериментального определения величины упругих постоянных тонкопленочных покрытий в поперечном к плоскости пленки направлении.

Рассмотрим составной акустический резонатор, представляющий собой звукопровод, на одном из торцов которого находится электроакустический преобразователь, служащий для возбуждения объемных

акустических волн. Такой резонатор обладает набором собственных (в общем смысле вынужденных из-за наличия пьезопреобразователя) колебаний, частоты которых определяются, с одной стороны, длиной резонатора, с другой — рабочим частотным диапазоном преобразователя, и представляют собой эквидистантно расположенные узкие резонансные максимумы. При нанесении на свободный торец составного акустического резонатора тонкопленочного покрытия меняются условия резонанса (говорят, что резонатор „нагружается“), что приводит к сдвигу частот собственных колебаний. Это явление хорошо известно и широко применяется в аналитической химии при создании сенсоров [1–3].

Однако может сложиться более тонкая ситуация. Акустическая волна, возбужденная электроакустическим преобразователем, распространяется по звукопроводу, доходит до границы звуковод–пленка, частично отражается назад, частично проходит. Прошедшая волна доходит до границы пленка–воздух и отражается назад в структуру. Далее она опять встречает границу пленка–звукопровод, частично проходит, частично отражается назад, где вновь отражается от границы пленка–воздух и так далее. Если для некоей спектральной составляющей из набора собственных колебаний составного акустического резонатора оказывается, что фазы переотраженных волн, заключенных в пленке, совпадают, то эти волны суммируются и, следовательно, условия „нагрузки“ на резонатор для данной спектральной составляющей отличаются от остальных. Это приводит к тому, что эквидистантность сдвига набора собственных частот составного резонатора с тонкопленочным покрытием нарушается. Очевидно, что синфазность переотраженных волн в пленке будет обеспечена, если толщина пленки d будет составлять (с учетом сдвига фазы при отражении от границы раздела в $\pi/2$) четверть длины волны, т. е. $d = \lambda_s/4$. В свою очередь длина волны определяется скоростью звука в пленке ($\lambda_s = V_s/f$), которая зависит от упругости в направлении распространения волны и плотности. Плотность же, по определению, является объемной величиной и не зависит от направления. Следовательно, зная значение резонансных частот (для продольной и поперечно поляризации акустических волны), плотность тонкопленочного покрытия и независимо измеряя его толщину, можно определить величины упругих постоянных в направлении распространения звуковой волны, т. е. в поперечном к плоскости пленки направлении.

В случае продольной волны

$$V_{sp} = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}},$$

в случае поперечной волны

$$V_{ss} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}},$$

где V_{sp} и V_{ss} — скорости продольной и поперечной волн, K — модуль всестороннего сжатия, G — модуль сдвига, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, ρ — плотность.

Методика состоит в следующем. На свободный торец составного акустического резонатора наносится исследуемое тонкопленочное покрытие, измеряются частоты собственных колебаний „нагруженного“ резонатора f_n ($n = 1, 2, 3, \dots$). Находятся разности между соседними частотами $\Delta f_n = f_n - f_{n+1}$ и строится график зависимости δf_n от f_n . Если необходимо, то кривая экстраполируется по Гауссу и определяется частота экстремума f_n^* . Так как может оказаться, что на толщине пленки укладывается несколько четвертей длин волн, то нужно либо последовательно (пошагово) уменьшать толщину пленки в три, пять раз (для тонких пленок более вряд ли понадобится), либо, не меняя толщину покрытия, использовать набор резонаторов с рабочими частотами, различающимися в три, пять раз и т.д. Тогда в случае, когда толщина пленки станет меньше четверти длины волны, экстремум на графике Δf_n от f_n исчезнет (нарушится условие синфазности при суммировании переотраженных в пленке волн). Аналогичные измерения производятся для другой поляризации акустической волны (продольная/поперечная).

Далее, независимо определяя толщину пленки и ее плотность по приведенным выше формулам, находим значение упругих постоянных в направлении распространения акустической волны, т.е. в направлении, поперечном к плоскости пленки.

Для экспериментальной проверки описанной выше методики был изготовлен составной акустический резонатор из плавленного кварца длиной 0.5 см с электроакустическим преобразователем объемных акустических волн на рабочий диапазон 80–150 МГц, нагруженный пленкой каучука марки ДСТ-30 толщиной $d = 3.25 \mu\text{m}$. Резонатор был

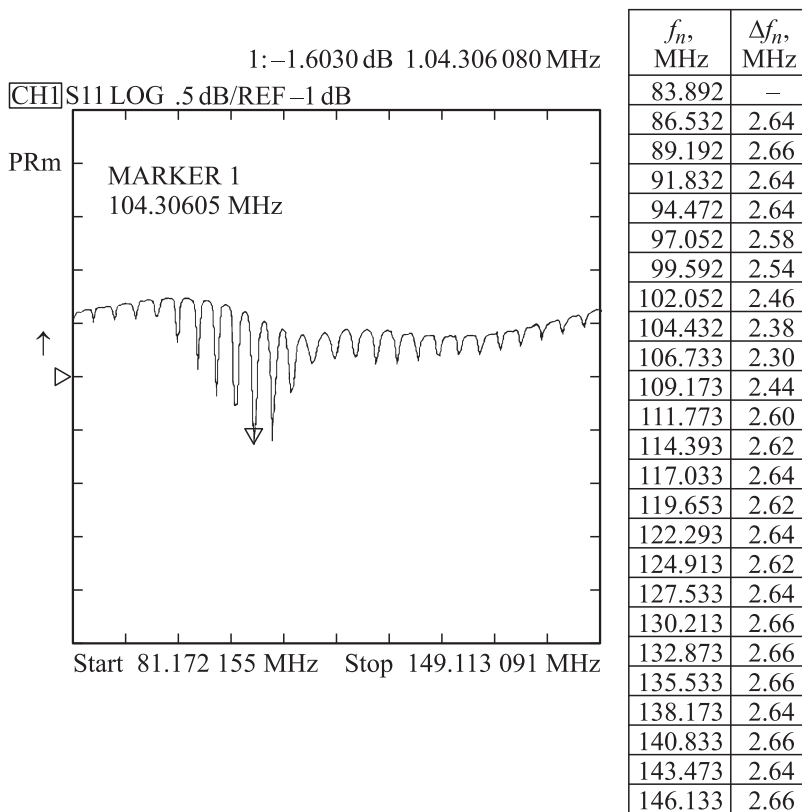


Рис. 1. Картинка с экрана S-parameter network analyzer Agilent 8753 ES и значения собственных частот нагруженного резонатора.

непосредственно вставлен в разъем, подключенный к входу S-parameter network analyzer Agilent 8753 ES. На рис. 1 приведена картинка с экрана прибора, а рядом в таблице значения собственных частот нагруженного резонатора f_n и их последовательные попарные разницы Δf_n . По данным из таблицы построен график (рис. 2), из которого видно, что искомая резонансная частота f_n^* равна 106.733 MHz; и, следовательно, для скорости акустических волн ($d = \lambda_s/4$, $\lambda_s = V_s/f_n^*$)

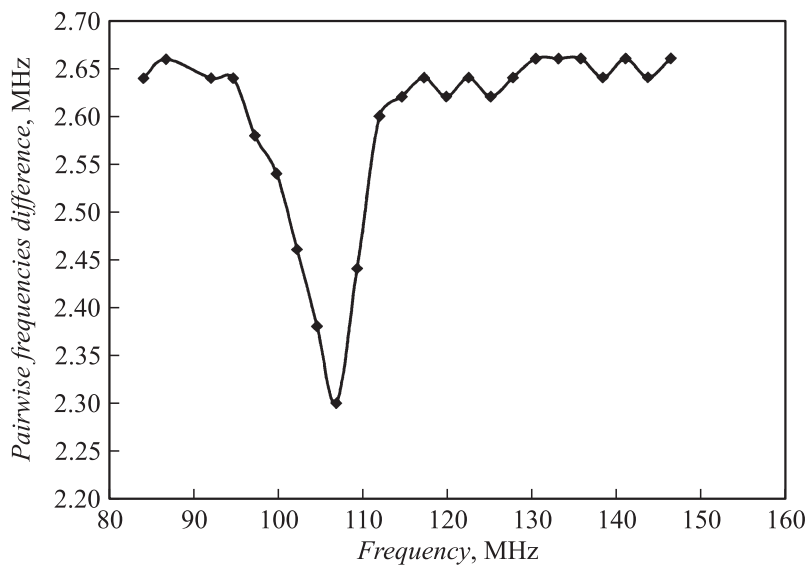


Рис. 2. График зависимости последовательной попарной разницы собственных частот нагруженного резонатора Δf_n от величины этих частот f_n .

получаем $V_s = 1.39 \cdot 10^5$ cm/s. С другой стороны, из справочной литературы известно [4], что скорость акустических волн в натуральном каучуке составляет $1.6\text{--}2.2 \cdot 10^5$ cm/s, а в бутадиион-стирольном каучуке $1.48 \cdot 10^5$ cm/s. Таким образом, полученная в эксперименте величина скорости довольно хорошо согласуется со справочными данными (различие для синтетического каучука не превышает 6%).

Следует отметить, что при описании свойств каучуков (резины) набор упругих постоянных (модуль Юнга, модуль сдвига, коэффициент всестороннего сжатия, коэффициент Пуассона) подменяется одним понятием „эластичность“ (размерность N/mm^2). Таким образом, для дивинилстирольного каучука можно считать, что скорость акустических волн $V_s = \sqrt{C/\rho}$, где ρ — плотность, C — эластичность.

Далее, так как для каучука марки ДСТ-30 плотность составляет $\rho = 0.9\text{--}0.99$ g/cm³, то для эластичности в поперечном к плоскости пленки направлении получаем значение $C = 1739\text{--}1913$ N/mm², что

существенно превышает ее значение вдоль плоскости пленки. По справочным данным [4,5] эластичность для дивинил-стирольного каучука в зависимости от концентрации стирольной группы составляет $C = 0.40-0.60 \text{ N/mm}^2$. Полученный результат говорит о том, что физические свойства тонких пленок вдоль и поперек их плоскости могут существенно различаться (как в рассмотренном выше случае почти на четыре порядка величины).

В заключение автор выражает глубокую благодарность И.А. Розанову и Г.Д. Мансфельду за полезные консультации, Л.М. Дорожкину и Л.Я. Медведевой за помощь в изготовлении образцов, С.Г. Алексею за содействие в проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] Малов В.В. Пьезорезонаторные датчики. М.: Энергоиздат, 1989. 183 с.
- [2] Grate J.W., Marin S.J., White R.M. // Anal. Chem. 1993. V. 65. P. 940A.
- [3] Janata J., Josowicz M., De Vanney M. // Anal. Chem. 1994. V. 66. P. 270R.
- [4] Синтетический каучук / Под ред. И.В. Гармонова. 2 изд. Л.: Химия, 1983. 300 с.
- [5] Крючков А.П. Общая технология синтетических каучуков. М.: Химия, 1969. 567 с.