АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2004, том 50, № 2, с. 149–155

УДК 541.183.5+548.571

СЕНСОРНЫЕ СВОЙСТВА НОРМАЛЬНЫХ МОД КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ КВАРЦА

© 2004 г. И. В. Анисимкин

Институт радиотехники и электроники РАН
125009 Москва, ул. Моховая 11, стр. 7
E-mail: ivanis@cplire.ru

Поступила в редакцию 18.03.2003 г.

Исследованы зависимости откликов (относительных сдвигов скоростей $\Delta v/v$) нормальных мод пластин (симметричных и антисимметричных) Лэмба и сдвигово-горизонтальной поляризации, существующих в пластинах кристаллического кварца *ST*-среза, толщина которых сравнима с длиной волны. Поскольку моды двух данных семейств разных порядков n обладают различными скоростями распространения v_n, поляризациями u_i и распределениями смещений по глубине H, оказывается, что они по-разному реагируют на изменение параметров пластины (изменения плотности, упругих модулей, толщины пластины, ее температуры) и на нагружение поверхности пластины тонкими слоями материалов (то есть на поверхностную адсорбцию). Представлены результаты численных расчетов откликов мод на данные параметры, подтверждаемые экспериментами по адсорбции водяных паров на поверхность пластин и по изменению температуры пластины.

За последнее время бурное развитие получили исследования внешних воздействий, процессов и сред на границе "твердое тело–газ" или "твердое тело–жидкость". К ним примыкают задачи детектирования и распознавания газов и жидкостей. Интерес к этим работам обусловлен созданием новых средств контроля окружающей среды, биологической защиты, аналитической химии, биологии, медицины и других областей науки и техники.

По сравнению с методами, основанными на иных физических принципах, применение для данных целей поверхностных акустических волн имеет ряд преимуществ, и исследование сенсорных свойств волн различных типов, распространяющихся во всевозможных структурах, ведется вот уже более 15 лет.

Традиционно исследования ограничивались использованием рэлеевских [1, 2], приповерхностных [3], утекающих поверхностных акустических волн (ПАВ) [4], сдвиговых трансверсальных [5] волн. Однако исследование детектирующих свойств нормальных мод колебаний тонких пластин до сих ограничивалось рассмотрением мод нескольких первых порядков [6–8]. В то же время естественно было бы предположить, что поскольку моды пластин разных порядков n обладают различными скоростями распространения v_n, поляризациями u_i и характером распределения смещений по глубине H, то они должны по-разному реагировать на различные внешние воздействия.

Данная работа посвящена изучению различия откликов мод разных порядков n семейств Лэмба и сдвигово-горизонтальной поляризации (SH-мод) на одни и те же изменения параметров пластины и внешние воздействия.

СВОЙСТВА ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИНЫ

Изучение сенсорных свойств мод проводилось с использованием программы [9], решающей волновые уравнения с соответствующими граничными условиями с использованием численного метода приближения многослойных матриц.

Для пластин кварца относительной толщиной $H/\lambda = 0.6$; 1.0 и 1.2755, где H – толщина пластины, λ – длина волны, рассчитывались зависимости относительного изменения скорости пластинчатых мод $\Delta v_n/v_n$ при изменении плотности ρ, упругости c_{ij} и толщины H/λ пластины. Каждый параметр пластины последовательно изменялся в пределах $\pm 1\%$ относительно своего табличного значения (то есть значения при нормальных условиях), и при неизменных табличных значениях остальных параметров рассчитывались 3 значения скорости каждой моды n: v_n^{+1}, v_n^0 и v_n^{-1}, т.е. скорости моды n при значениях параметра соответственно на 1% больше, равном и меньше табличного значения. Величина $\Delta v_n/v_n$ (отклик моды n на действие данного параметра) определялась как $\Delta v_n/v_n = (v_n^{+1} - v_n^{-1})/v_n^0$. В результате были получены зависимости $\Delta v_n/v_n$

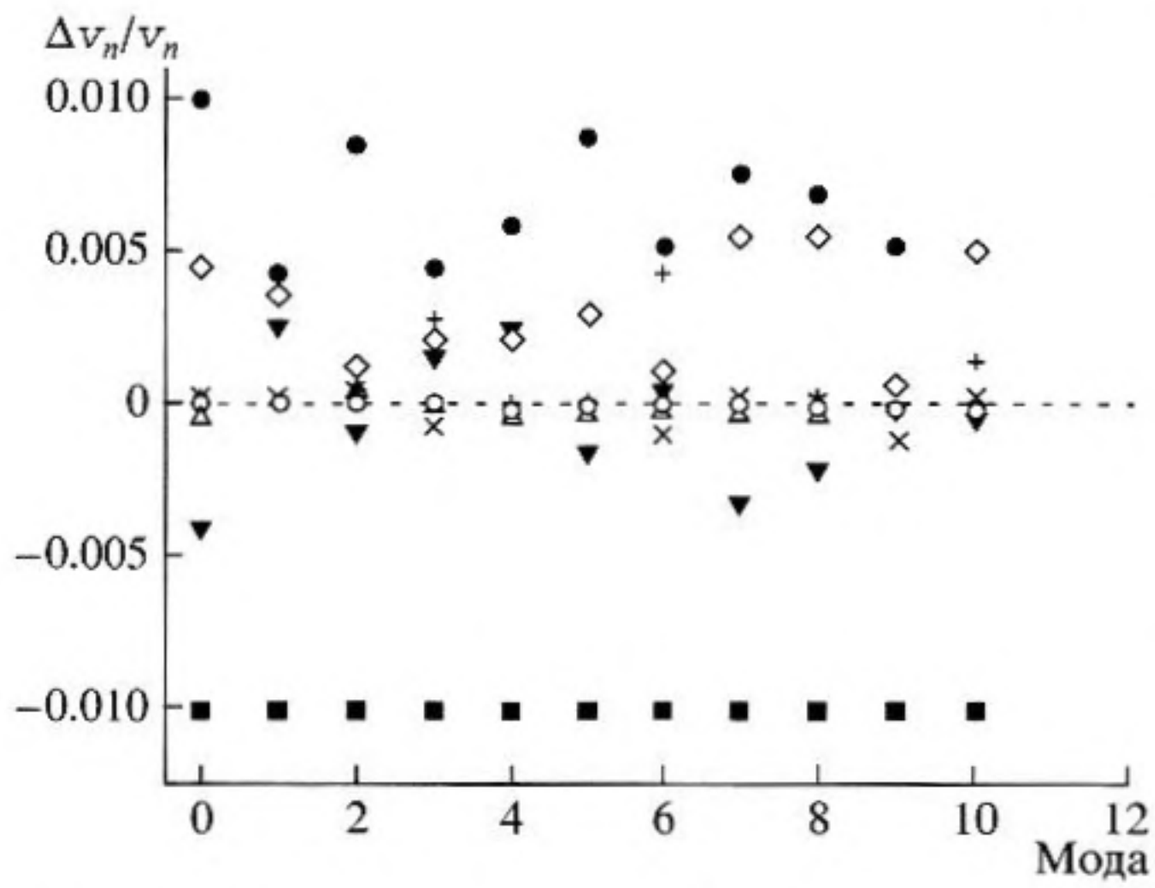

Рис. 1. Чувствительность мод Лэмба к парциальным изменениям параметров пластины. ST,X-кварц, $H/\lambda = 0.6$.
■ – $\Delta\rho$, ● – ΔC_{11}, △ – ΔC_{12}, x – ΔC_{13}, ▼ – ΔC_{14}, + – ΔC_{33}, ◇ – ΔC_{44}, ○ – $\Delta H/\lambda$.

от n для разных параметров и типов мод. Результаты таких расчетов для температурных коэффициентов задержки (ТКЗ) SH-мод изложены в [10]. Теперь аналогичные результаты получены автором и для мод Лэмба. На рис. 1 в качестве примера представлена данная зависимость для мод Лэмба в пластине с $H/\lambda = 0.6$ (аналогичный характер имеют зависимости для $H/\lambda = 1.0$ и 1.2755). Используется сквозная нумерация для симметричных и антисимметричных мод. По сравнению с теми же зависимостями для SH-мод, у мод Лэмба наблюдается иная картина: зависимости $\Delta v_n/v_n$ от номера моды n имеют немонотонный характер – величина $\Delta v_n/v_n$ различна практически для каждой последующей моды Лэмба; нет и тенденции к насыщению $\Delta v_n/v_n$ при больших n; чувствительность мод Лэмба к изменениям плотности пластины одинакова и слабо меняется с уменьшением H/λ от 1.2755 до 0.6. Наибольшую чувствительность моды Лэмба, так же как и моды SH, проявляют к изменениям ρ, C_{11}, C_{14} и C_{44}. Аналогично, с увеличением плотности ρ происходит уменьшение ($\Delta v_n/v_n < 0$), а с увеличением C_{11} и C_{44} – увеличение ($\Delta v_n/v_n > 0$) скорости мод Лэмба.

Таким образом, полученные результаты показывают, что моды Лэмба как и моды SH разных порядков n обладают различной чувствительностью к одинаковым изменениям параметров пластины, причем для некоторых из мод это различие может сказываться как на величине, так и на знаке отклика $\Delta v_n/v_n$. Для каждого типа мод существуют упругие модули пластины, изменение которых не приводит к изменению скорости ни одной из мод. Для обоих типов мод существуют параметры, к которым все моды этого типа проявляют хотя и разную, но большую чувствительность. При 1%-ных изменениях таких параметров отклики мод могут достигать 1%.

СВОЙСТВА ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Как известно, параметром, характеризующим температурную чувствительность акустических волн любого типа, является температурный коэффициент задержки (ТКЗ). Применительно к тонким пластинам изменения температуры T приводят, в общем случае, к изменениям всех параметров пластины – толщины H, плотности ρ и упругости C_{ij}. Каждый из этих параметров вызывает вполне определенные изменения скорости моды и ее температурного коэффициента задержки ТКЗ_n. Автором проведен расчет ТКЗ_n для различных мод Лэмба в ST,X-кварце в районе комнатной температуры. Методика расчета аналогична использованной ранее [10] и основана на представлении ТКЗ как полного дифференциала по переменным $x = \rho$, c_{ij}, H/λ:

$$\text{ТКЗ}_n = \alpha_{\text{П}} - \frac{1}{v_n}\frac{dv_n}{dT} = \\ = \alpha_{\text{П}} - \frac{1}{v_n}\frac{dv_n}{\partial(H/\lambda)}\frac{\partial(H/\lambda)}{\partial T} - \frac{1}{v_n}\frac{\partial v_n}{\partial\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T} - \frac{1}{v_n}\frac{\partial v_n}{\partial c_{ij}}\frac{\partial c_{ij}}{\partial T}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{П}}$ – коэффициент линейного расширения пластины в направлении распространения моды. Представление ТКЗ_n в виде (1) позволяет проанализировать парциальные вклады в этот коэффициент от изменения каждого параметра пластины в отдельности, а также определить значение ТКЗ_n для разных пластинчатых мод, распространяющихся в одном направлении. Ввиду малости вкладов в ТКЗ_n от изменений диэлектрических и пьезоэлектрических модулей кварца этими вкладами в величину ТКЗ_n пренебрегали.

Пример рассчитанных ТКЗ мод Лэмба в пластине $H/\lambda = 0.6$ представлен на рис. 2. Видно, что у мод Лэмба в отличие от SH-мод [10], все зависимости $(1/v_{no})(\Delta v_n/\Delta x)(dx/dt)$ от номера моды n (за исключением одной зависимости от плотности) имеют немонотонный характер – величина парциальных вкладов в ТКЗ_n различна практически для каждой последующей моды Лэмба. Нет тенденции и к насыщению вкладов с ростом n. Чувствительность мод Лэмба к изменениям плотности пластины ρ, как и для SH-мод, одинакова и слабо меняется с номером моды n и с уменьшением H/λ от 1.2755 до 0.6. Пренебрежимо малый вклад в ТКЗ_n для всех мод дает температурное изменение H/λ, а вклады от изменений всех остальных параметров – ненулевые: чисто положительные (ρ),

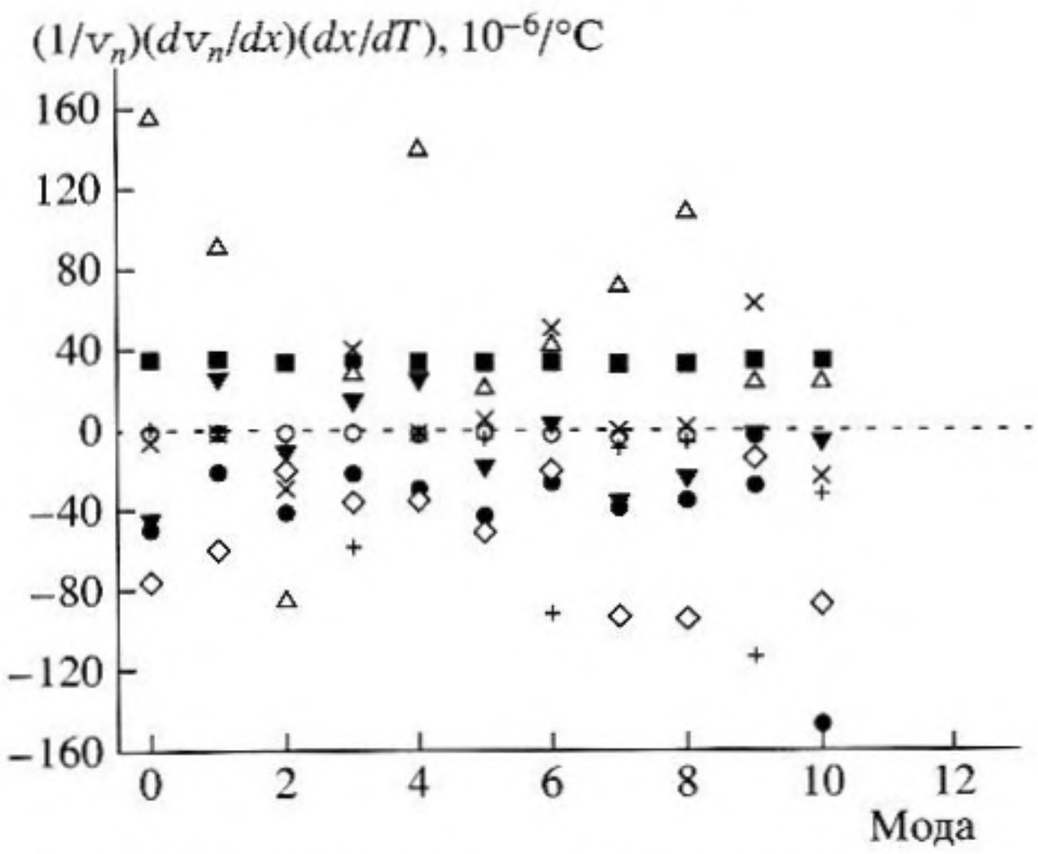

Рис. 2. Парциальные вклады в ТКЗ мод Лэмба от температурных изменений параметров пластины. ST,X-кварц, $H/\lambda = 0.6$.
■ – $\Delta\rho$, ● – ΔC_{11}, △ – ΔC_{12}, x – ΔC_{13}, ▼ – ΔC_{14}, + – ΔC_{33}, ◇ – ΔC_{44}, ○ – $\Delta H/\lambda$.

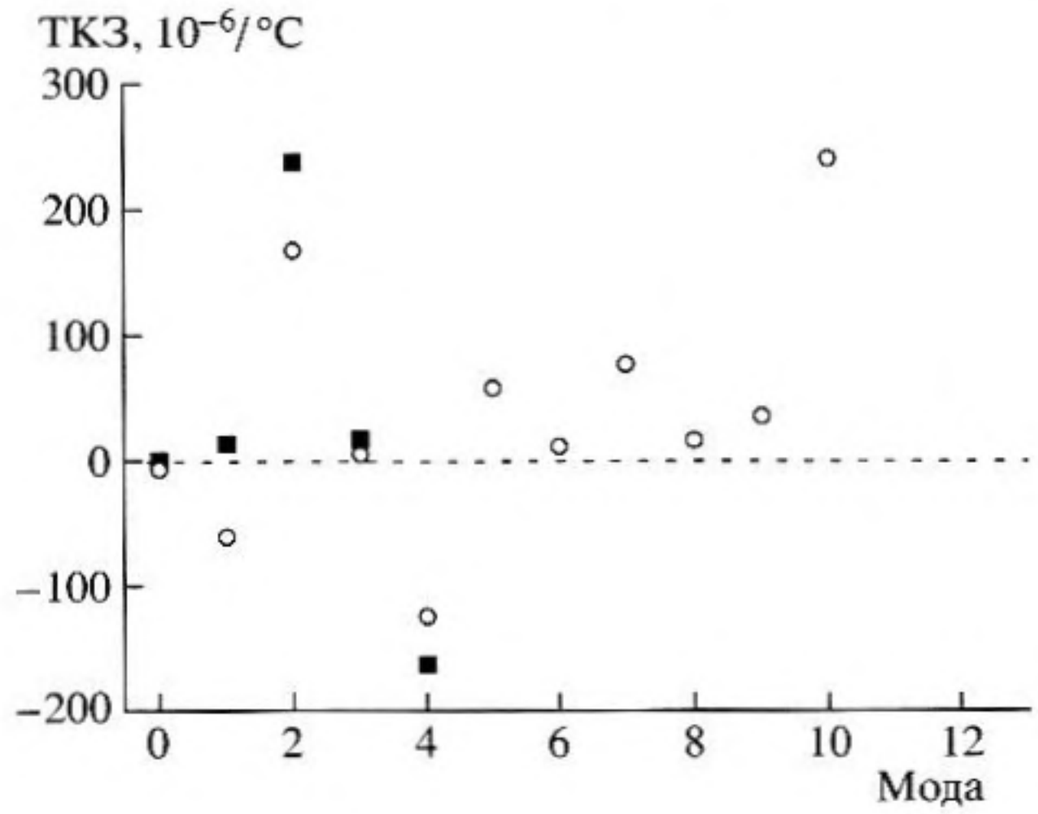

Рис. 3. ТКЗ мод Лэмба в пластине кварца ST,X-среза толщиной $H/\lambda = 0.6$ при комнатной температуре (ТКЗ = 0 – значение ТКЗ рэлеевской волны в ST,X-кварце при той же температуре).
■ – эксперимент, ○ – теория.

чисто отрицательные (C_{11}, C_{33}, C_{44}) или разных знаков для мод разных порядков (C_{12}, C_{13}, C_{14}).

Отметим, что хотя влияние упругих модулей C_{13}, C_{12} и C_{33} на скорости v_n пластинчатых мод, как было обнаружено ранее, мало, тем не менее влияние температурных изменений этих модулей на ту же скорость и ТКЗ$_n$ велико и сравнимо с таковым от остальных упругих модулей. Это связано с достаточно большой температурной зависимостью самих коэффициентов. Иными словами, чувствительность мод к упругим модулям и к их температурным изменениям, вообще говоря, может сильно различаться.

Переходя теперь к анализу значений ТКЗ$_n$, полученных суммированием парциальных вкладов по формуле (1), мы видим (рис. 3), что для мод Лэмба зависимость ТКЗ$_n$ от номера моды n имеет явно выраженный немонотонный характер. При одной и той же толщине пластины и неизменном направлении распространения существуют моды, величины ТКЗ которых обладают как положительными, так отрицательными и нулевыми значениями. При этом однозначной зависимости ТКЗ$_n$ от толщины пластины H/λ в рассмотренном нами диапазоне толщин не прослеживается.

Особо заметим, что в соответствии с проведенными расчетами температурная чувствительность пластинчатых мод может меняться в широких пределах без изменения направления распространения, достигая больших значений даже для такого, обычно считающегося термостабильным, материала как кварц. В связи с этим представляется неправомерным использование термина "термостабильный" для какого-либо материала, поскольку подразумеваемая термостабильность касается исключительно волны определенного типа и только в окрестности заданной температуры. В рассмотренных нами случаях температурная чувствительность мод Лэмба при комнатной температуре находится в пределах от -170 до $+250 \times 10^{-6}$/°C. Для сравнения, наибольшая чувствительность волны Рэлея (монокристалл {100},<110>-$Bi_{12}GeO_{20}$) составляет $+120 \times 10^{-6}$/°C [11].

СВОЙСТВА ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ АДСОРБЦИИ

Чувствительность мод Лэмба и сдвигово-горизонтальной поляризации SH к поверхностной нагрузке исследовалась путем расчета относительных изменений скорости этих мод $\Delta v/v_n$ при условном нанесении на одну из поверхностей пластины тонкого слоя иного материала. Для охвата возможно большего числа комбинаций материалов пленки и пластины нами был проведен анализ всех имеющихся в базе данных программы [9] материалов и по аналогии с работой [12], посвященной анализу акустических свойств слоистых структур "слой на полупространстве", выбраны пленки тех из них, скорости рэлеевских и сдвиговых SH-волн в которых меньше, примерно равны и больше таковых соответственно в ST,X - кварце и в ST,X + 90°-кварце. Как и в [12], такие пленки названы нами "замедляющими", "нейтральными" и "ускоряющими" соответственно. Для мод SH-поляризации в направлении X + 90° такими материалами оказались золото (Au), галиево-иттриевый гранат ($Y_3Ga_5O_{12}$) и кремний (Si);

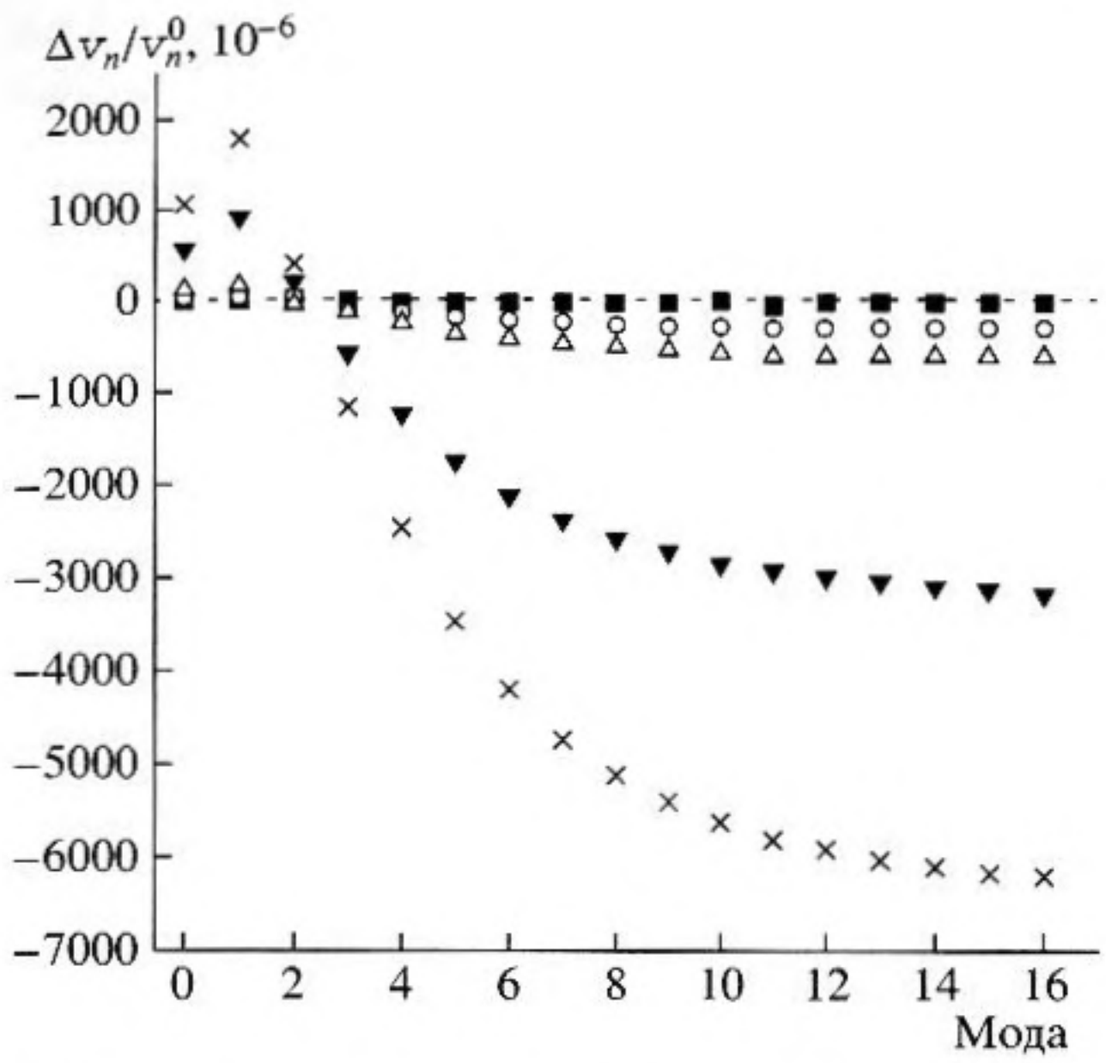

Рис. 4. SH-моды в структуре "ускоряющий" слой <001>, <100> – Si на пластине ST,X + 90°-кварца, $H/\lambda = 1.2755$.

Толщины слоев: ■ – $h = 0.0001$, ○ – $h = 0.0005$, △ – $h = 0.001$, ▼ – $h = 0.005$, × – $h = 0.01$.

для мод Лэмба вдоль оси X кварца ST-среза – золото (Au), железо-европиевый гранат ($Eu_3Fe_5O_{12}$) и алмаз (C). Закорачивающее действие металлических пленок исключалось надлежащим выбором режима работы программы [9]. Относительные толщины пленок h/λ (h – абсолютная толщина пленки) варьировались в пределах 0.000–0.01. Толщины пластин составляли $H/\lambda = 0.6$ и 1.2755. При типичных значениях длин акустических мод λ = 100–500 мкм величины h равнялись 0.01–5 мкм, что соответствует размерам типичных биохимических монослоев (0.1 мкм [13]) и, следовательно, является реальным для моделирования процесса поверхностной адсорбции.

Результаты расчетов показывают, что для мод SH-поляризации нанесение "замедляющего" покрытия, как и следовало ожидать, уменьшает скорости всех мод, делая значения откликов $\Delta v_n/v_n$ отрицательными. Зависимость $\Delta v_n/v_n$ от номера моды достигает экстремума при некотором n, зависящем от толщины слоя, и насыщается при больших n. Величины откликов мод всех порядков возрастают с увеличением относительной толщины (массы) замедляющего покрытия h/λ. При этом минимальным откликом обладает либо нулевая мода (h/λ = 0.0001–0.001), либо мода 1-го порядка (h/λ = 0.005–0.01). Подобное действие на SH-моды оказывает и выбранное "нейтральное" покрытие (иттрий-галиевый гранат).

Иной характер зависимость $\Delta v_n/v_n$ от n и от h/λ приобретает при массово-упругом воздействии "ускоряющего" покрытия (рис. 4). В этом случае отклики нулевой и 1-й мод становятся положительными (массово-упругая нагрузка увеличивает скорости этих мод), отклики 2-й и 3-й мод – близкими к нулю (чувствительность этих мод к такой нагрузке практически отсутствует), а отклики мод более высокого порядка – вновь отрицательными и практически равными друг другу. По нашему мнению, уменьшение скорости мод высокого порядка при нанесении "ускоряющего" покрытия связано с высокими значениями скоростей этих мод, для которых такое покрытие становится уже замедляющим.

Общим для массово-упругой нагрузки поверхности пластины "замедляющими", "нейтральными" и "ускоряющими" слоями является зависимость откликов SH-мод $\Delta v_n/v_n$ от их номера n, примерное равенство этих откликов для мод высокого порядка и их рост с увеличением величины нагрузки. Диапазон откликов при минимальной и максимальной толщинах нагружающего слоя представлен в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон откликов SH-мод в ST,X + 90°-кварце при минимальной и максимальной толщинах нагружающих слоев

скорости / материалы	$\Delta v_n/v_n$, 10^{-6} ($h/\lambda = 0.0001$)	$\Delta v_n/v_n$, 10^{-6} ($h/\lambda = 0.01$)
Au ("замедляющий")	–277…–569	–2281…–123319
$Y_3Ga_5O_{12}$ ("нейтральный")	–31…–164	–3776…–14292
Si ("ускоряющий")	+18…–119	+1780…–6228

Более сложная картина при массово-упругой нагрузке поверхности пластины наблюдается для мод Лэмба. Здесь величины откликов $\Delta v_n/v_n$ меняются практически для каждой последующей моды n, принимая отрицательные значения для "замедляющего" и "нейтрального" и, в основном, "положительные" значения для "ускоряющего" покрытий. Увеличение нагрузки (толщины слоя h/λ) не обязательно приводит к увеличению откликов соответствующих мод (2-я, 3-я и 6-я моды, рис. 5). Это увеличение может вызвать даже изменение знака акустического отклика (3-я и 9-я моды, рис. 5). Вследствие немонотонной зависимости $\Delta v_n/v_n$ от n число мод, нечувствительных к массово-упругой нагрузке, возрастает. Действие "ускоряющего" слоя увеличивает скорости большинства мод, даже высоких номеров, хотя их собственная скорость выше, чем у рэлеевской волны в материале слоя. Диапазон откликов различных мод Лэмба для минимальной и максимальной толщин нагружающего слоя представлен в табл. 2.

Отмеченные выше особенности мод Лэмба и SH-поляризации при массово-упругой нагрузке

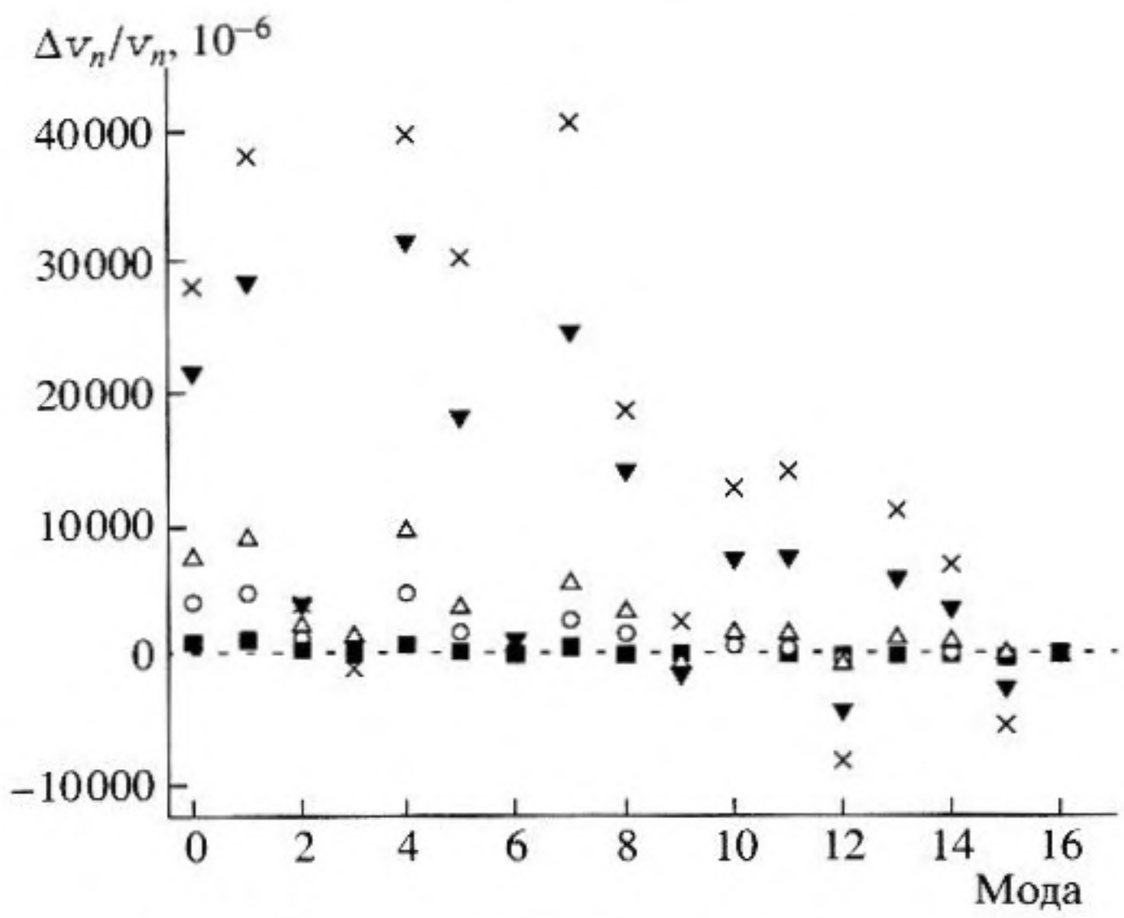

Рис. 5. Моды Лэмба в структуре "ускоряющий" слой из <001>, <100>-алмаза на пластине ST,X-кварца толщиной $H/\lambda = 1.2755$.

Толщины слоев: ■ – $h = 0.0001$, ○ – $h = 0.0005$, △ – $h = 0.001$, ▼ – $h = 0.005$, × – $h = 0.01$.

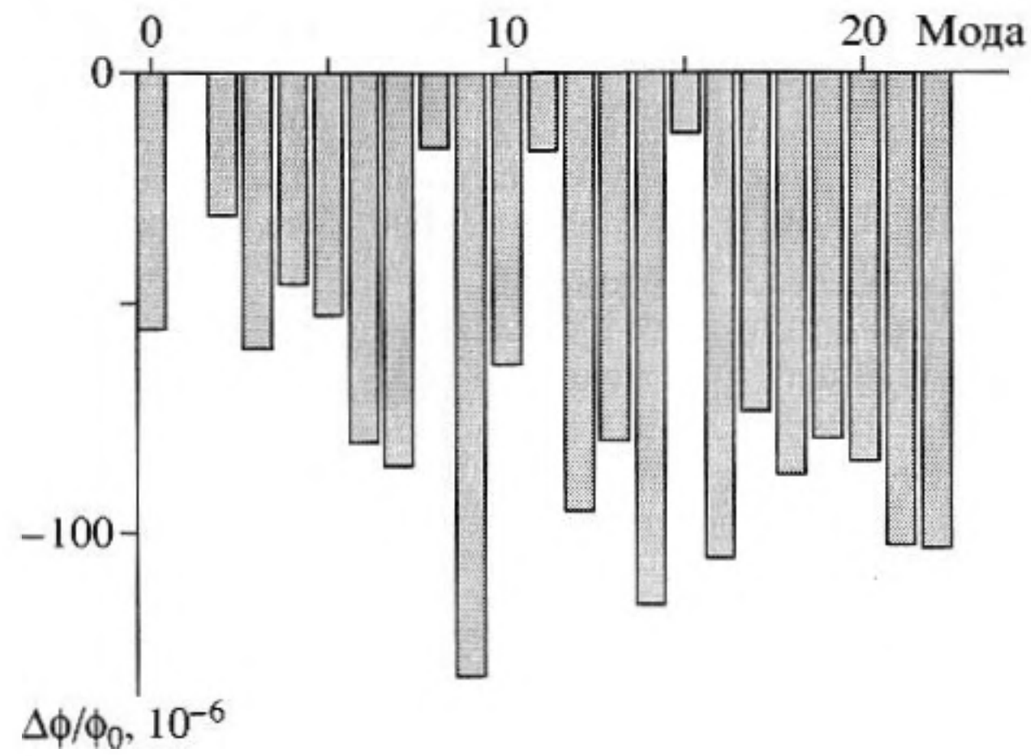

Рис. 6. Относительные изменения фазы (отклик) SH-мод при адсорбции водяных паров чистой поверхностью кварцевой пластины ST,X + 90°-среза при комнатной температуре.

Относительная толщина пластины – $H/\lambda = 1.4855$, относительная влажность воздуха – 80%.

поверхности кварцевой пластины относительной толщины $H/\lambda = 1.2755$ сохраняются и при уменьшении толщины пластины. Таким образом, воздействие массово-упругой нагрузки по-разному действует на изменения скоростей разных нормальных пластинчатых мод колебаний кварца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ МОД

Экспериментальные исследования чувствительности пластинчатых мод к адсорбции газа и тепловому воздействию проводились в пластинах кварца ST-среза с параметрами, указанными в табл. 3. Образцы 2 и 3 содержали одну шлифованную и одну полированную поверхности, на которой располагались излучающий и приемный преобразователи из Al/Cr или Au/Cr толщиной 100 нм. Обе поверхности образцов 1 и 4 были оптически полированы. Моды Лэмба возбуждались в направлении кристаллографической оси X, моды SH – перпендикулярно этой оси, для чего пары встречно-штыревых преобразователей на одних и тех же образцах располагались под углом 90° друг к другу. Методика проведения эксперимента, пространственное разрешение мод и их и идентификация по скорости и коэффициенту электромеханической связи аналогична [10].

Значения ТКЗ мод Лэмба, полученные экспериментально, хорошо согласуются со значениями, расчитанными численно: величина и знак ТКЗ меняются практически с каждой последующей модой n, и для моды 2-го порядка при температуре $T = 20$°C и относительной толщине пластины $H/\lambda = 0.6$ значение ТКЗ достигает большой величины 180×10^{-6}/°C (рис. 3). Таким образом, пластинчатые моды обладают большим разнообразием температурных свойств, которые в температурном диапазоне $T = 2$–92°C охватывают как отрицательные и нулевые, так и рекордно высокие положительные и отрицательные значения ТКЗ. Дальнейшее повышение температурной чувствительности акустических колебаний и поиск волн со стабильным значением ТКЗ в широком диапазоне температур можно ожидать именно в области пластинчатых мод колебаний путем оптимизации материала, кристаллографического среза и толщины звукопроводящей пластины.

Чувствительность пластинчатых мод на адсорбцию газа исследовалась нами на примере водяных паров. Поскольку процесс адсорбции чистой поверхностью пластины в общем случае сопровождается изменениями массы, упругости, проводимости и температуры приграничной области, то возникающие при этом изменения ско-

Таблица 2. Диапазон откликов мод Лэмба для минимальной и максимальной толщин нагружающих слоев

скорости / материалы	$\Delta v_n/v_n$, 10^{-6} ($h/\lambda = 0.0001$)	$\Delta v_n/v_n$, 10^{-6} ($h/\lambda = 0.01$)
Au ("замедляющий")	–203…–788	–21744…–98695
$Eu_3Fe_5O_{12}$ ("нейтральный")	+17…–169	–1469…–15891
C (алмаз) ("ускоряющий")	+1000…–84	+40733…–8211

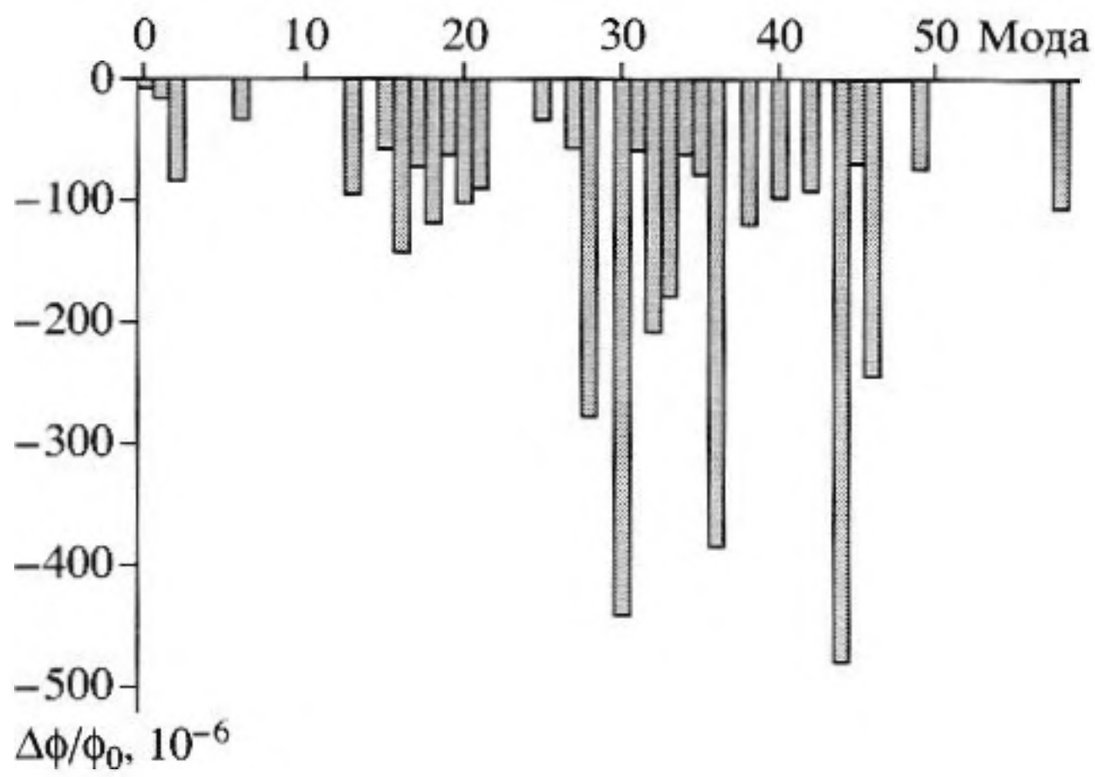

Рис. 7. Относительные изменения фазы (отклик) мод Лэмба при адсорбции водяных паров чистой поверхностью кварцевой пластины ST,X-среза при комнатной температуре.

Относительная толщина пластины – $H/\lambda = 1.4855$, относительная влажность воздуха – 80%.

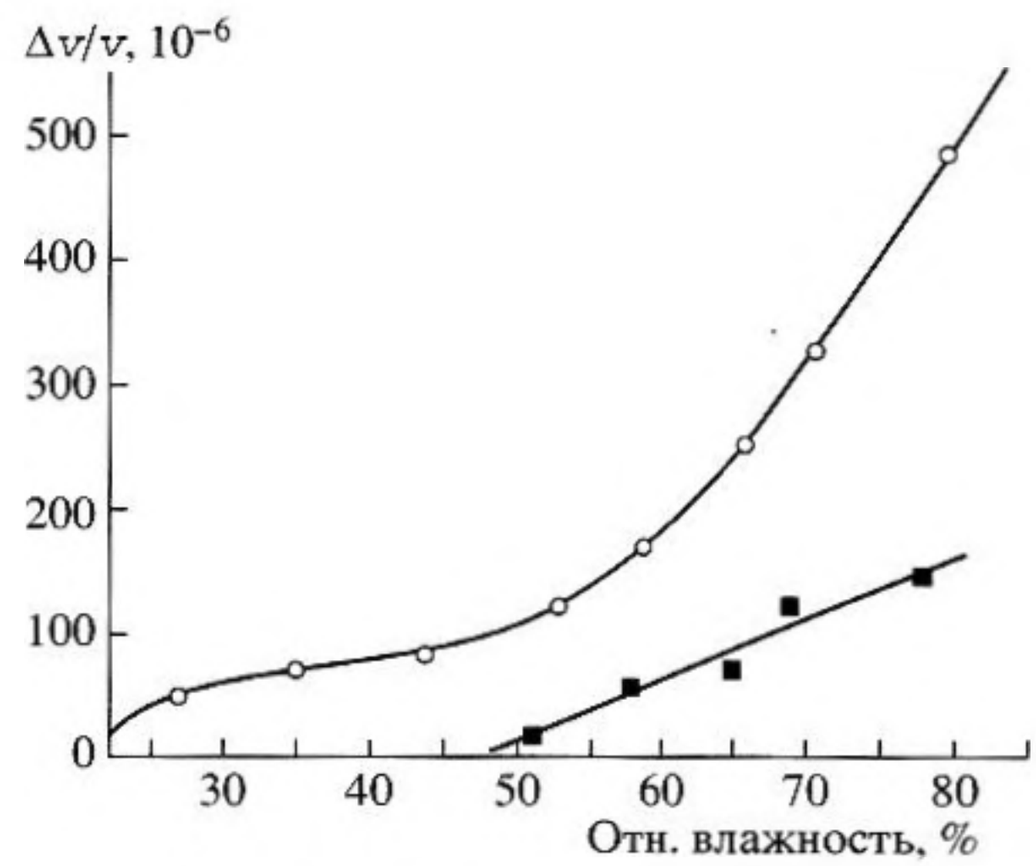

Рис. 8. Концентрационные зависимости откликов мод Лэмба 16-го и 44-го порядков при адсорбции водяных паров чистой поверхностью кварцевой пластины ST,X-среза при комнатной температуре (относительная толщина пластины – $H/\lambda = 1.4855$). Точки – эксперимент, линии – аппроксимационные кривые.

■ –16-я мода, ○ – 44-я мода.

рости распространения мод должны быть вызваны суммарным действием массовой, упругой, электрической и тепловой нагрузки поверхности. Образцы продувались влажным воздухом (отн. влажн. от 10 до 85%) в камере объемом 250 мл. За первоначальный отклик принимался отклик при продувании азотом. Отклики измерялись с помощью анализатора четырехполюсников HP 8753A в фазовом режиме. Температура и влажность в камере независимо измерялись промышленно выпускаемым пробником ИВТМ-7 с точностью ±0.1°C и ±0.1% отн. влажн. соответственно. Прочие детали эксперимента подробно описаны в [10]. Результаты измерений представлены на рис. 6–7.

Из рис. 6 видно, что отклики SH-мод $\Delta\varphi/\varphi_0$ на адсорбцию газа постоянной концентрации отн. влажн. = 80% меняются с номером моды n. Для пластин толщиной $H/\lambda = 1.4855$ наибольшей чувствительностью обладают 9-я, 14-я, 16-я, 21-я и 22-я моды; наименьшая чувствительность наблюдается для 8-й, 11-й и 15-й мод. В отличие от случаев действия одного типа поверхностной нагрузки, исследованных нами численно, одновременное воздействие массовой, упругой, электрической и тепловой нагрузок поверхности приводит, как это видно из рис. 6, к более сложной, немонотонной, зависимости $\Delta\varphi/\varphi_0$ от номера n.

Отклики мод Лэмба $\Delta\varphi/\varphi_0$ газа на адсорбцию газа постоянной концентрации отн. влажн. 80% также меняются с номером моды n (рис. 7). Для пластин толщиной $H/\lambda = 1.4855$ наибольшей чувствительностью обладают 28-я, 30-я, 36-я, 44-я и 46-я моды; наименьшая чувствительность наблюдается для нулевой, 1-й и 29-й мод. При суммарном действии массовой, упругой, электрической и тепловой нагрузок поверхности зависимость $\Delta\varphi/\varphi_0$ от n имеет сложный и немонотонный характер – такой же, как и при действии каждой из этих нагрузок в отдельности.

Как для мод SH, так и для мод Лэмба зависимости откликов $\Delta\varphi/\varphi_0$ от относительной влажности (концентрационные зависимости) различны для мод разных порядков n. В качестве примера на

Таблица 3. Параметры экспериментальных образцов

Образец	H, мм	λ, мкм	H/λ	N	$2a$, мм	L, мм	φ_0, град
1	0.3	500	0.6	20	20	30	21600
2	0.5	500	1.0	20	20	30	21600
3	0.5	392	1.2755	20	16	24.1	22130
4	0.3	202	1.4855	16	12	26.2	46693

H – толщина пластины, λ, N, $2a$ – период, число пар штырей и апертура преобразователей; L, φ_0 – расстояние и полный набег фазы пластинчатой моды (начальная фаза моды) между преобразователями.

рис. 8 сказанное демонстрируется на модах Лэмба 16-го и 44-го порядков. Видно, что при осаждении на поверхность пластины одинакового количества молекул воды (при одинаковой относительной влажности) характер концентрационных кривых существенно различен как по величине, так и по форме. Отметим, что отклик ПАВ Рэлея на адсорбцию водяных паров в кварце того же среза на порядок меньше: $\Delta\varphi/\varphi_0 \sim 10 \times 10^{-6}$ при относительной влажности 80% [14].

ВЫВОДЫ

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выводы численных расчетов о различии откликов пластинчатых мод разных порядков и типов на одинаковые внешние воздействия. В рамках каждого из семейств существуют как моды, максимально чувствительные, так и нечувствительные к данному воздействию. При однородном температурном воздействии обнаружены моды с рекордно высокой чувствительностью к температуре и моды, нечувствительные к ней в широком диапазоне температур. При осаждении молекул воды на чистую поверхность кварцевой пластины найдены моды Лэмба с чувствительностью на порядок выше, чем у волн Рэлея, и моды, практически нечувствительные к адсорбции этих молекул. Нам представляется, что подобная картина характерна для пластинчатых мод вообще и будет наблюдаться при любых других внешних воздействиях. Высокая скорость распространения пластинчатых мод, на порядок превышающая скорость рэлеевских волн в том же направлении, позволяет при том же периоде встречно-штыревых преобразователей получать на порядок более высокие рабочие частоты без применения ультрафиолетовой и электронной литографии.

Данная работа выполнена при поддержке гранта ИНТАС 2001-0257.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wohltjen H., Dessy R.* Surface Acoustic Wave Probe for Chemical Analisis: part 1 – Introduction and Instrument Description, part 2 – Gas Chromatography Detector // Anal. Chem. 1979. № 51. P. 1458–1476.
2. *Bryant A., Poirier M., Riley G., Lee D.L., Vetelino J.F.* Gas Detection Using Surface Acoustic Wave Delay Lines // Sensors and Actuators. 1983. № 4. P. 105–110.
3. *Martin S.J., Ricco A.J., Hughes R.C.* Acoustic Wave Devices for Sensing in Liquids // Proceedings 4th Internat. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. 1987. P. 478–481.
4. *Moriizumi T., Unno Y., Shiokawa S.* New Sensor in Liquid Using Leaky SAW // Proceedings IEEE Ultrason. Symp. 1987. P. 579–582.
5. *Shana Z., Josse F.* Analysis of Liquid-Phase_based Sensors Utilizing SH Surface Waves on Rotated Y-Quartz // Proceedings IEEE Ultrason. Symp. 1990. P. 123–126.
6. *Caliendo C., D`Amico A., Verardi P., Verona E.* K^+ Detection Using Shear Horizontal Acoustic Modes // Proceedings IEEE Ultrason. Symp. 1990. P. 383–386.
7. *Rebiere D., Pistre J., Hoummady M., Hauden D., Cunin P., Planade R.* Sensitivity Comparison Between Gas Sensors Using SAW and Shear Horizontal Plate-mode Oscillators // Sensors and Actuators B. 1992. № 6. P. 274–278.
8. *McHale G., Martin F., Newton M.I.* Mass Sensitivity of Acoustic Wave Devices from Group and Phase Velocity Measurements // J. Appl. Phys. 2002. V. 92. № 6. P. 3368–3373.
9. *Adler E.L., Slaboszewicz J.K., Farnell G.W., Jen C.K.* PC Software for SAW Propagation in Anyzotropic Multilayers // IEEE Trans. UFFC. 1990. V. 37. P. 215–223.
10. *Анисимкин И.В., Анисимкин В.И., Гуляев Ю.В., Верона Э. (Verona E.)* Температурные свойства пластинчатых мод колебаний кварца // Акуст. журн. 2001. Т. 46. № 6. С. 791–794.
11. *Slobodnik Jr., A.J.* Materials and Their Influence on Characteristics of Devices // Acoustic Surface Waves / Ed. A.A. Oliner. Springer-Verlag. 1978. P. 270–286.
12. *Farnell G.W., Adler E.L.* Elastic Wave Propagation in Thin Layers // Physical Acoustics / Ed. by Mason W.P., Thurston R.N. N.Y.–London. 1972. V. 9. P. 35–57.
13. *Kovacs G., Lubking G.W., Vellekoop M.J., Venema A.* Love Waves for (Bio)chemical Sensing in Liquids // Proceedings IEEE Ultrason. Symp. 1992. P. 281–284.
14. *Анисимкин В.И., Максимов С.А., Калиендо Ч. (Caliendo C.), Верона Э. (Verona E.)* Адсорбция водяных паров на кварце, палладии и сплаве палладия с никелем // Поверхность. 1998. № 3. С. 73–78.

Sensing Properties of Normal Oscillatory Modes of Quartz Plates

I. V. Anisimkin

The responses (relative velocity variations $\Delta v/v$) of normal (symmetric or asymmetric) Lamb and shear-horizontal modes of ST-cut quartz plates, whose thickness is comparable with the wavelength, is studied. Since modes of different orders belonging to these two families have different propagation velocities, polarizations, and displacement distributions in depth, they exhibit different responses to variations in the parameters of the plate (density, elastic moduli, thickness, and temperature) and to loading of its surface by thin films (i.e., to surface adsorption). Results of numerical calculation of the responses to these parameters are corroborated by experiments on the effect of the plate temperature variation and the effect of adsorption of water vapor onto the plate surface.