

определенной частоте фазы этих сигналов совпадут и результирующий сигнал будет иметь вид лестницы (фиг. 2, а). Изменяя частоту, можно добиться того, чтобы сигналы, приходящие на поверхность образца *б*, были в противофазе. Тогда огибающая сигнала будет иметь вид, показанный на фиг. 2, б. Из условия синфазности сигналов  $A_1, A_3, \dots, A_{2n+1}$  мы имеем следующее выражение для скорости распространения звука:  $v = 2lf_0 / (n - \gamma/2\pi)$ , где  $f_0$  — частота, при которой наблюдалось первое совпадение фаз,  $l$  — толщина образца в направлении распространения ультразвука,  $\gamma$  — фазовый угол отражения ультразвуковых волн на границе образец — связывающий слой,  $n = f_0/\Delta f$  — целое число, которое определяется подсчетом числа совпадений фаз при изменении частоты; здесь  $\Delta f$  — разность между двумя соседними частотами.

Основным отличием разработанного нами метода от метода Мак-Скимина является то, что в нашей схеме полезный сигнал (многократно отраженные эхо-импульсы в образце) принимается непосредственно с поверхности образца, в то время как в схеме Мак-Скимина полезный сигнал проходит дополнительно через связывающий слой 5, линию задержки 4, связывающий слой 3 и кварц 2, что приводит к ухудшению формы полезного сигнала и затрудняет получение резких ступеней «лестницы». Недостатком нашего метода является то, что для измерения скорости распространения ультразвука требуется металлизирование одной из поверхностей образца.

Мы провели контрольные измерения скорости ультразвука на образцах плавного кварца, кварца X-среза и магния на частотах 10, 30, 50, 70 Мгц. Точность измерений составляла 0,01%. Полученные нами результаты измерений резонансным методом, методом Мак-Скимина и нашим методом на частоте 10 Мгц и при температуре 290° К хорошо согласуются.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. Ультразвуковые методы в физике твердого тела, М., «Мир», 1972.
2. D. J. Bolet, M. Menes. Measurement of elastic constant of RbBr, RbJ and CsJ by an ultrasonic CW Resonance technique., J. Appl. Phys., 1960, 31, 6, 1010–1017.
3. H. J. McSkimin. Ultrasonic Measurement techniques applicable to small Solid Specimens. J. acoust. Soc. Amer., 1950, 22, 4, 413–418.

Институт физики  
Академии наук АзербССР

Поступила  
18 ноября 1972 г.

УДК 534.8.081.7

### ВЛИЯНИЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ НА ВЕЛИЧИНУ ПЬЕЗОМОДУЛЯ В КВАРЦЕ

С. Н. Барановский, В. И. Панов

Кварцевые пьезоэлементы находят широкое применение в различных измерительных или технических устройствах и нередко используются при высоких (или низких) температурах, высоких давлениях и других экстремальных внешних условиях. Поэтому измерение пьезомодулей кварца при различных внешних воздействиях имеет прежде всего практическое значение. Вместе с тем изучение пьезоэлектрических свойств кварца в различных физических условиях представляет, несомненно, и научный интерес. Нами проведены измерения пьезомодуля  $d_{11}$  при различных условиях одноосного сжатия кварца вдоль электрической оси при комнатной температуре, температуре 100° С и температуре жидкого азота.

Измерения на образцах естественного и искусственного кварца в форме куба, ребра которого совпадали с направлениями  $x$  (электрическая ось),  $y$  и  $z$  (оптическая ось) и имели длину около 8 мм, были проведены статическим методом. Противоположные, перпендикулярные оси  $x$ , грани образцов доводились шлифовкой и полировкой до плоскопараллельности с точностью в пределах 1–2 мк, а затем покрывались контактным слоем серебра методом вакуумного напыления. Кристаллографическая ориентация контролировалась на рентгеновском гониометре.

Конструкция специально изготовленной камеры, в которую помещался исследуемый образец, позволяла подвергать образец одноосному сжатию и изменять его температуру в широких пределах. Сжимающее образец усилие передавалось внутрь камеры через сильфонный узел с помощью грузопоршневого манометра МП-600, величина усилия задавалась числом и весом дискообразных гирь, нагруженных на поршень манометра. Для измерения пьезомодуля при любом значении созданного напряжения сжатия в образце поршень манометра нагружался каждый раз одной и той же дополнительной гирей весом 0,5 кг.

Измерение пьезомодуля проводилось в следующем порядке. Образец подвергался одноосному сжатию вдоль оси  $x$ , при этом на гранях с серебряными контактами возникал поляризационный заряд. После снятия поляризационного заряда коротким

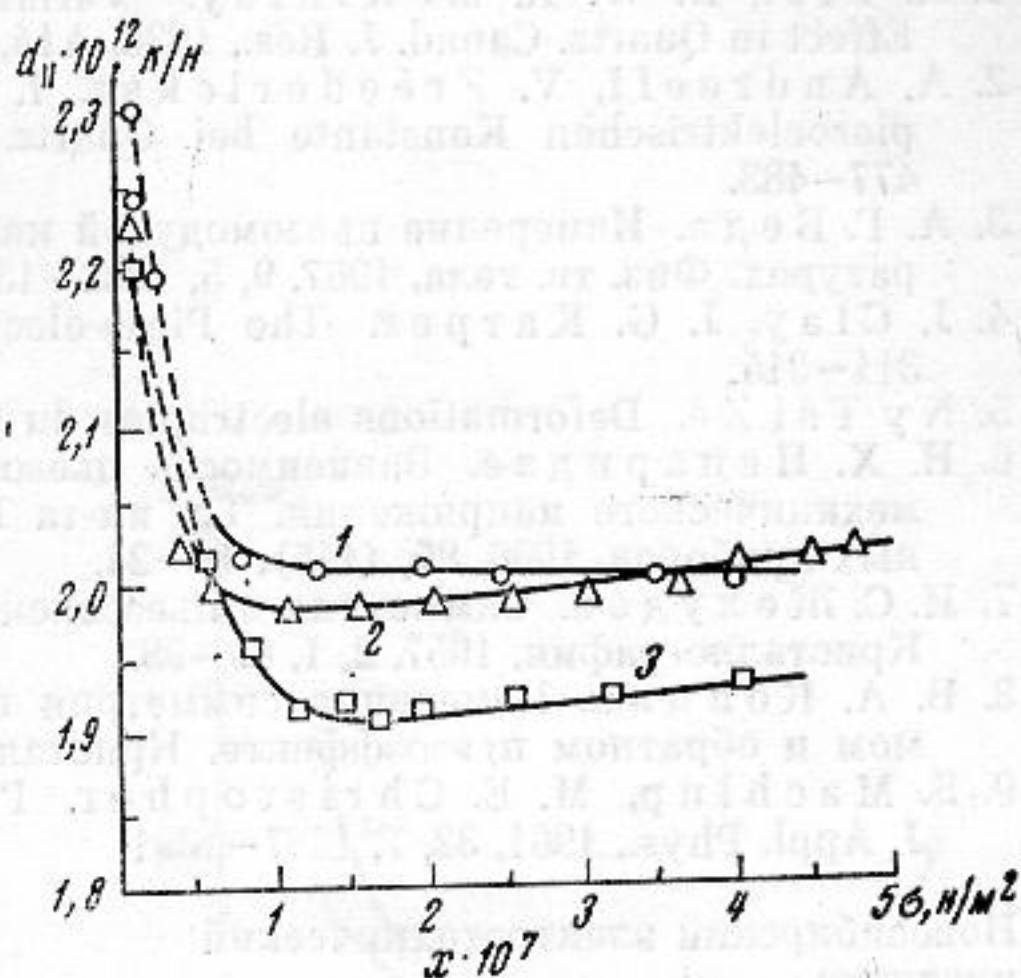


замыканием контактов на образец передавалось стандартное усилие  $F$  путем нагружения поршня манометра дополнительной гирей. Возникающая при этом разность потенциалов  $u$  между контактами измерялась электрометром ТР-150. Для повышения точности измерения  $u$  параллельно электрометру подключалась компенсационная приставка. Величина пьезомодуля  $d$  находилась из соотношения  $d = u(C_k + C_0)/F$ , где  $C_k$  — электрическая емкость кварца, монтажа и электрометра,  $C_0$  — емкость компенсационной приставки. Наличие компенсационной приставки позволило более точно измерить  $u$ , так как в момент компенсации нулевой сигнал регистрировался по шкале электрометра с наивысшей чувствительностью. Для исключения влияния на результаты измерения методической погрешности, возникающей из-за сил трения в давящей колонке экспериментальной установки, проводились контрольные измерения пьезомодуля при непосредственном наложении гирь на исследуемый образец вплоть до  $\sigma = 5 \cdot 10^6$  н/м<sup>2</sup>.

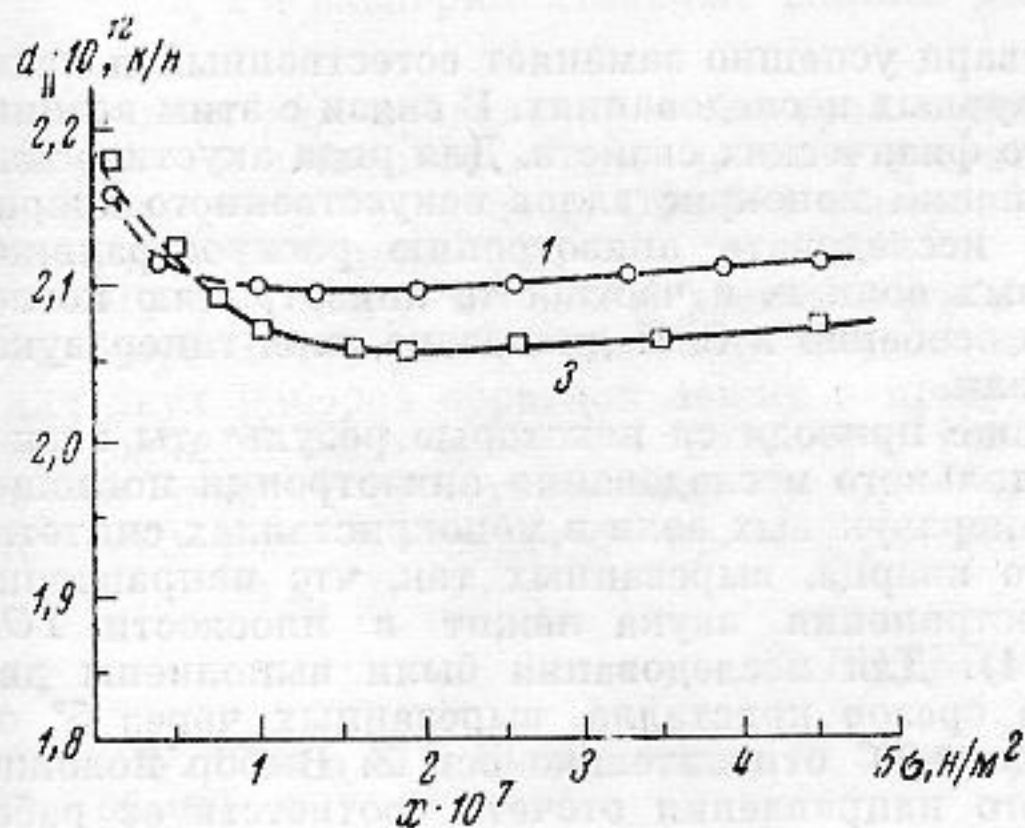
На фиг. 1–3 представлены зависимости пьезомодуля  $d_{11}$  от напряжения  $\sigma_1$  при одноосном сжатии образца при комнатной температуре, 100° С (фиг. 2) и при температуре жидкого азота (фиг. 3). Цифрами 1 и 2 на рисунках указаны кривые для образцов из естественного кварца, а цифрой 3 — кривые для образцов искусственного кварца.

Как видно из фигур, величина пьезомодуля  $d_{11}$  при отсутствии сжимающих напряжений зависит от температуры: значения  $d_{11}$  при комнатной температуре больше значений при температуре 100° С и температуре жидкого азота. Это хорошо согласуется с данными большинства известных экспериментальных работ, например [1, 2], и расходится с результатами работы [3].

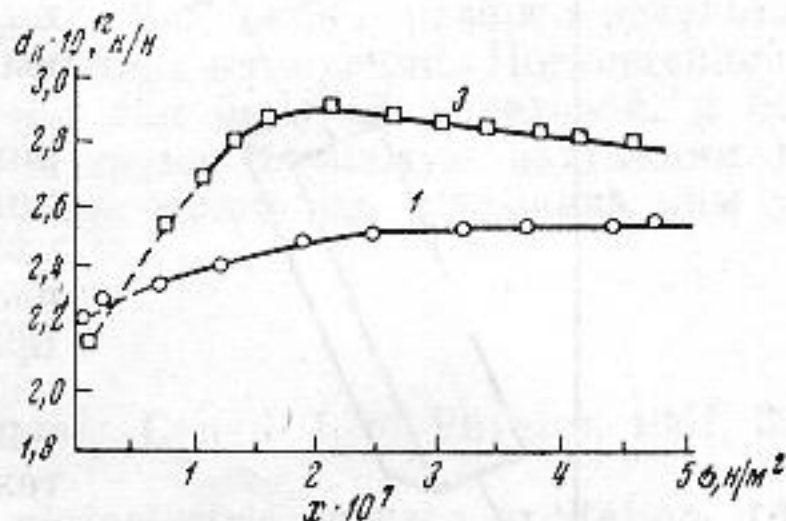
Анализ результатов измерений показывает, что как для естественного, так и для искусственного кварца действующий пьезомодуль при одноосном сжатии образца вдоль оси  $x$  уменьшается при 100° С и комнатной температуре и увеличивается при температуре жидкого азота, причем у искусственного кварца зависимость пьезомо-



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

дуля от сжимающего напряжения более резкая. Основные изменения значений пьезомодуля происходят при сравнительно небольших напряжениях ( $\sigma_1 < 1,5 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup>); при напряжениях  $\sigma_1 > 1,5 \cdot 10^7$  н/м<sup>2</sup> изменения пьезомодуля незначительны.

Влиянию механических воздействий на пьезоэлектрические свойства кварца посвящены работы [4–8]. С точки зрения теории пьезоэлектричества изменение пьезомодулей кварца при механических воздействиях на него не является неожиданным. Авторы работ [7, 8] показали, что при больших механических нагрузках происходит изменение симметрии пьезокварца. Изменение симметрии влечет в свою очередь к появлению новых пьезомодулей и изменению величины «старых» пьезомодулей. Рассчитанная в работе [9] исходя из жестко-ионной модели зависимость поляризации пьезокварца от напряжения (или деформации) также предсказывает влияние



давления на величину пьезомодулей. Наши экспериментальные результаты, полученные при комнатной температуре, качественно согласуются с данными работ [4-6]. В заключение отметим, что установленные нами изменения пьезомодуля  $d_{11}$  при одноосном сжатии трудно согласовать количественно с теоретическими представлениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A. Pitt, D. W. R. McKinley. Variation with temperature of the piezoelectric Effect in Quartz. *Canad. J. Res.*, 1936, A14, 57-65.
2. A. Andreeff, V. Fréedericksz, I. Kazarnowsky. Die Abhängigkeit der piezoelektrischen Konstante bei Quartz von der Temperatur. *Z. Phys.*, 1929, 54, 477-483.
3. А. Г. Беда. Измерение пьезомодулей кварца и керамики ЦТС при низких температурах. *Физ. тв. тела*, 1967, 9, 5, 1332-1335.
4. J. Clay, J. G. Karger. The Pieso-electric Constant of Quartz. *Physica*, 1937, 4, 311-315.
5. Ny Tsi Ze. Deformations electriques du Quartz. *Compt. rend.*, 1927, 184, 1645-1647.
6. Н. Х. Непаридзе. Зависимость пьезоэлектрического коэффициента кварца от механического напряжения. *Тр. ин-та Комитета стандартов, мер и измерительных приборов*. 1966, 85, (145), 19-24.
7. И. С. Желудев. Симметрия и пьезоэлектрические свойства кристаллов и текстур. *Кристаллография*, 1957, 2, 1, 89-98.
8. В. А. Копчик. Измерение симметрии пьезоэлектрических кристаллов при прямом и обратном пьезоэффекте. *Кристаллография*, 1962, 7, 1, 144-147.
9. S. Machlup, M. E. Christopher. Piezoelectricity of Quartz for Finite Strain. *J. Appl. Phys.*, 1961, 32, 7, 1387-1391.

Новосибирский электротехнический институт

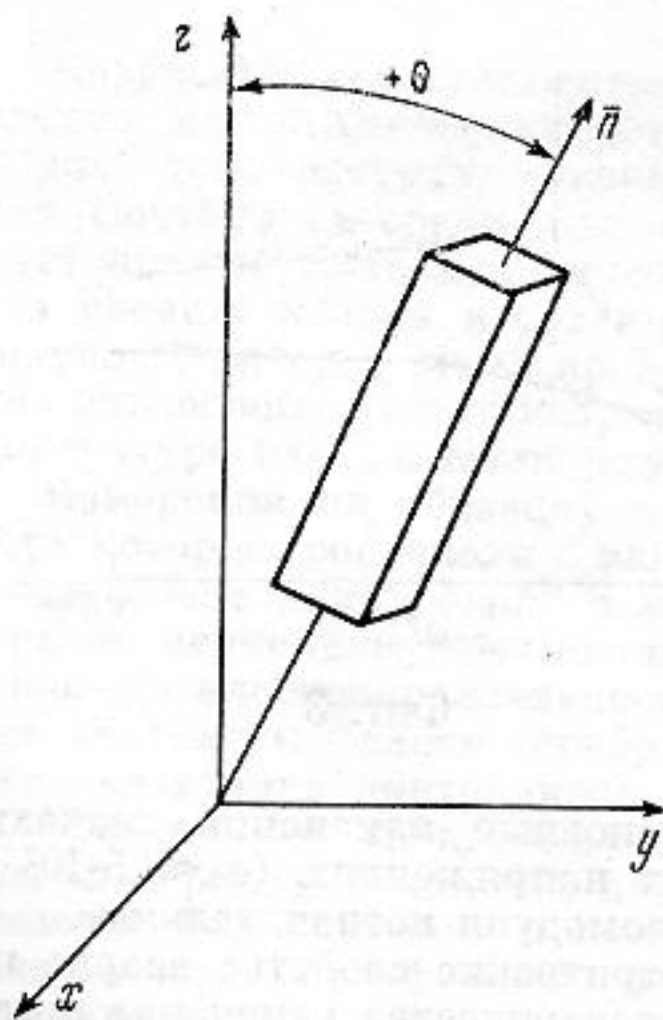
Поступила  
14 апреля 1969 г.

УДК 534.28

### АНИЗОТРОПИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ГИПЕРЗВУКОВЫХ ВОЛН В МОНОКРИСТАЛЛАХ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА

*Л. Ф. Барышникова, В. Е. Лямов, В. В. Макаров*

В последнее время синтетический кварц успешно заменяет естественный и находит широкое применение в технике и научных исследованиях. В связи с этим возникла необходимость широкого изучения его физических свойств. Для ряда акустических применений монокристаллов искусственного кварца важно исследовать анизотропию распространения звуковых волн и, в частности, анизотропию поглощения особенно в СВЧ диапазоне, т. е. гиперзвуковых волн.



Фиг. 1

Ниже приводятся некоторые результаты экспериментального исследования анизотропии поглощения гиперзвуковых волн в монокристаллах синтетического кварца, вырезанных так, что направление распространения звука лежит в плоскости YOZ (фиг. 1). Для исследования были выполнены два набора срезов кристалла, вырезанных через  $5^\circ$  от  $-90^\circ$  до  $+90^\circ$  относительно оси Z. Выбор положительного направления отсчета соответствует работе [1]. Оба набора кристаллов были вырезаны из одной заготовки, выращенной гидротермальным методом. Точность обработки торцов была оптической. Измерения проводились стандартным импульсным методом на частоте 530 Мгц. Продольные и сдвиговые гиперзвуковые волны возбуждались с поверхности кристаллов, которые для этого помещались в зазор СВЧ резонатора. Чтобы можно было управлять направлением вектора электрического поля относительно плоскости торца кристалла, применялись резонаторы Лэмба [2]. Такая система позволяла добиваться оптимального направления электрического поля и тем самым увеличить чувствительность установки. К сожалению, анизотропия пьезоэлектрических свойств кварца не позволяла проводить достаточно надежные измерения вблизи осей OY и OZ.