АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVI 1970 Вып. 4

УДК 534

ОБ АМПЛИТУДНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА

Б. И. Раткин, А. А. Фотченков

Исследована зависимость внутреннего трения монокристаллов синтетического кварца от амплитуды деформации образца при комнатной температуре на частоте 120 *кгц*. Показано, что величина критической амплитуды деформации, при которой начинается рост внутреннего трения, зависит от ориентации среза образца. Величина площади между кривыми прямого и обратного хода измерения внутреннего трения (гистерезис) зависит от максимальной амплитуды деформации. Приводится качественное объяснение наблюдаемых явлений.

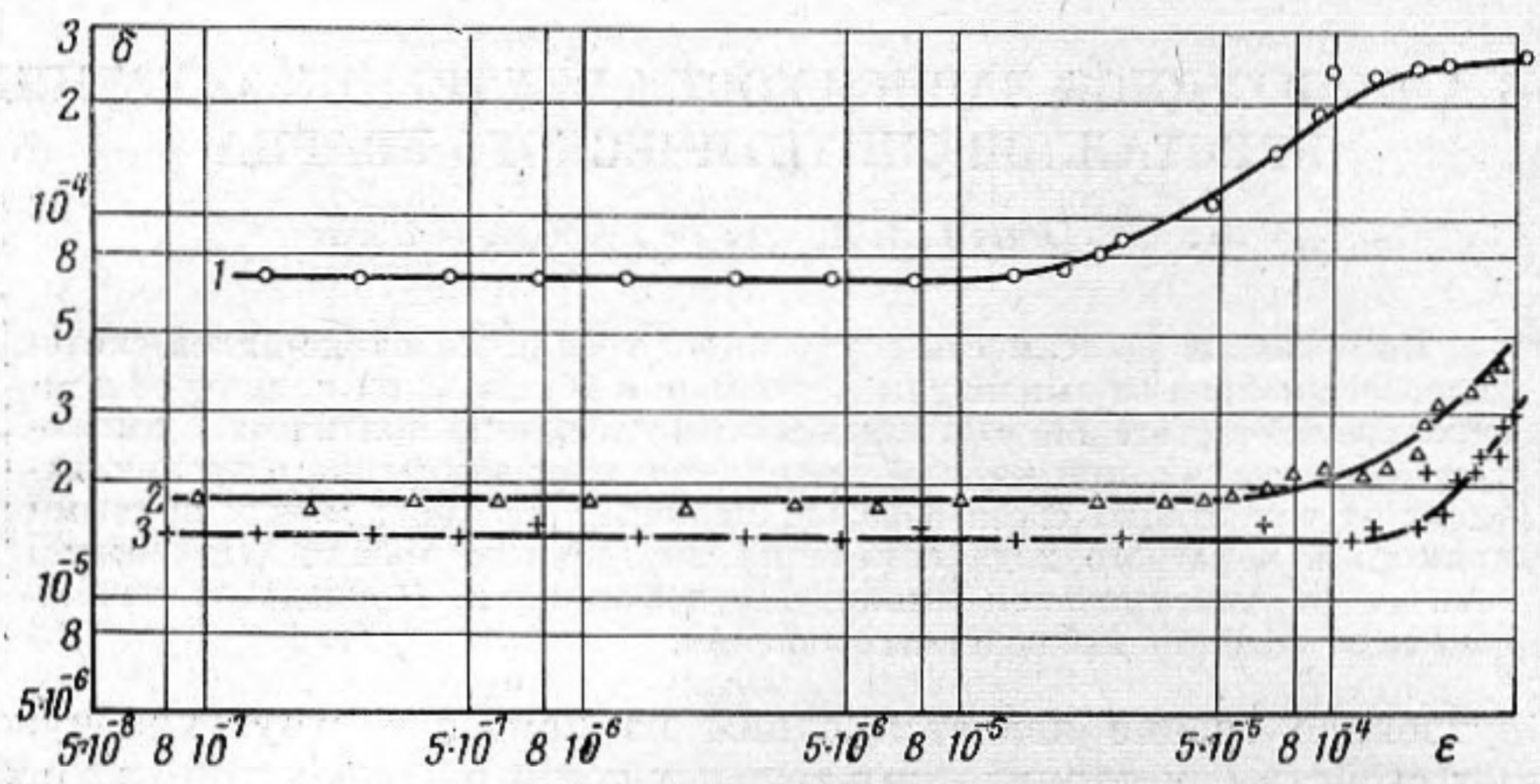
Внутреннее трение является одним из наиболее структурночувствительных свойств кристаллических твердых тел и определяется как особенностями их дислокационной структуры, так и взаимодействием дислокаций с другими дефектами или непосредственно с самой кристаллической решеткой.

Для измерения внутреннего трения Маркс [1] использовал ультразвуковой метод составного пьезоэлектрического вибратора. Энергетические потери кварцевых вибраторов, измеренные в вакууме $8 \cdot 10^{-3}$ *мм* рт. ст. с погрешностью 4%, составляли величину порядка 1×10^{-5}. Исследование зависимости внутреннего трения природного и синтетического кварца от амплитуды деформации проведено Хики [2, 3]. Им показано, что для образцов XY и $XYS/+18°30'$ срезов в области амплитуды деформаций $(0{,}5—5) \times 10^{-5}$ внутреннее трение почти не зависит от амплитуды деформации.

Нами произведено измерение внутреннего трения на неотожженных образцах синтетического кварца, выращенного во ВНИИСИМСе гидротермальным методом из содового раствора со средней скоростью роста грани пинакоида 0,2 *мм/сутки*. Опыты проведены в широкой области амплитуд относительных деформаций, начиная от амплитуд около 5×10^{-8}, практически не вызывающих искажения структуры кристалла, и до амплитуд 10^{-3}, ограничиваемых пределом прочности кварца. Кристаллы кварца, выращенные в указанных условиях, содержат «ростовые» дислокации и включения агрегатов «неструктурной» примеси в виде соединений алюмосиликата натрия [4].

Результаты измерений внутреннего трения двухсоставных вибраторов трех срезов с частотой около 120 *кгц* приведены на фиг. 1, где показано изменение логарифмического декремента затухания δ от относительной амплитуды деформации, который, как известно, связан с внутренним трением Q^{-1} выражением: $Q^{-1} = \delta / \pi$. Из фиг. 1 видно, что при амплитудах деформации больших 10^{-5} в синтетическом кварце для вибраторов $XYS/-18°30'$, XY, $XYS/+18°30'$ срезов появляется амплитудно-зависимое внутреннее трение. При этом с увеличением амплитуды деформации до $5 \cdot 10^{-4}$ и выше возникают характерные «биения», которые проявляются в скачкообразном изменении резонансной частоты и амплитуды деформации вибратора, что, очевидно, связано с интенсивным движением и раз-

множением дислокаций. Эти «биения» не позволяют проводить измерения, а при дальнейшем увеличении амплитуды деформации наступает механическое разрушение кварца. На фиг. 1 также видно, что начало роста внутреннего трения с увеличением амплитуды деформации (критическая амплитуда деформации) зависит от ориентации среза кварцевых брусков в плоскости YZ. Внутреннее трение для вибраторов среза XYS / $-18°30'$ начинает возрастать при амплитуде порядка 10^{-5}, (кривая *1*) для вибраторов XY-среза — при амплитуде 5×10^{-5} (кривая *2*) и для вибраторов среза XYS / $+18°30'$ при амплитуде 10^{-4} (кривая *3*).



Фиг. 1

По отношению к XYS / $+18°30'$ срез XYS / $-18°30'$ характеризуется минимальным значением модуля Юнга [5]. Колебания сдвига по толщине и вторая гармоника основных продольных колебаний в этом случае возбуждается очень слабо. Срез же XYS / $+18°30'$ характеризуется максимальным модулем Юнга. Взаимодействие между продольными и сдвиговыми колебаниями здесь проявляются сильнее [6].

Обращает на себя внимание и более резкое возрастание внутреннего трения с ростом амплитуды деформации для вибраторов среза XYS / / $+18°30'$.

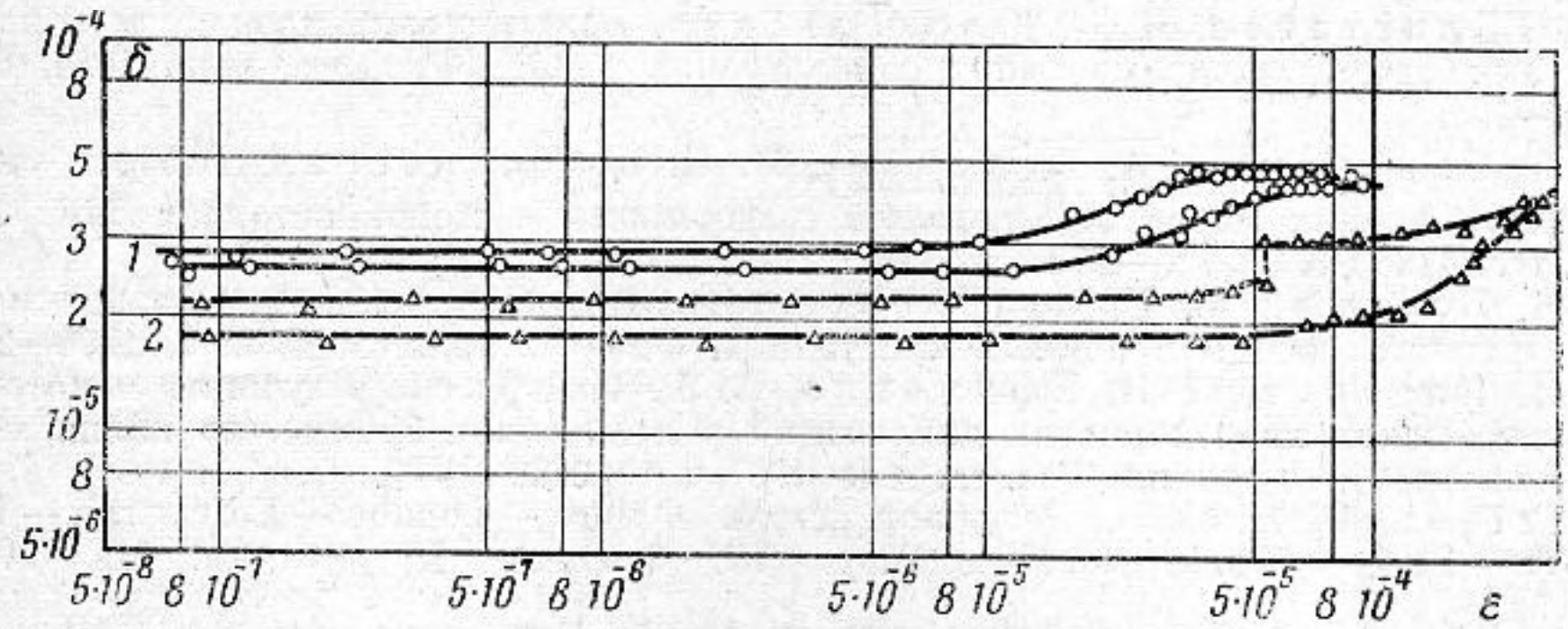
По-видимому, при колебаниях в этом направлении в кварце происходит резкий срыв дислокаций с мест закрепления. В то время как более раннее проявление амплитудной зависимости внутреннего трения и более монотонный ход кривой для среза XYS / $-18°30'$, очевидно, указывает на большую подвижность дислокаций при колебаниях в этом направлении. Возможно причиной этого является близость плоскости скольжения дислокаций $\{01\bar{1}1\}$ к направлению колебаний [7].

Обнаруженная амплитудная зависимость внутреннего трения для XYS / $-18°30'$, XY и XYS / $+18°30'$ направлений синтетического кварца носит гистерезисный характер (фиг. 2), где кривая *1* — гистерезисная зависимость внутреннего трения от амплитуды деформации для среза XYS / $-18°30'$ и кривая *2* — гистерезисная зависимость внутреннего трения от амплитуды деформации для XY среза. Величина площади между кривыми прямого и обратного хода измерений внутреннего трения, как видно на фигуре, зависит от величины достигнутой максимальной амплитуды деформации.

Последующие повторные измерения вызывают увеличение декремента затухания вибратора и смещают критическую амплитуду деформации в сторону меньших значений последней.

Полученная зависимость внутреннего трения в синтетическом кварце от амплитуды деформации аналогична зависимостям, полученным на щелочно-галоидных соединениях [8—11] и металлах [12].

Данные о пластической деформации кварца вдоль плоскостей ромбоэдров и пинакоида [13], непосредственные наблюдения зарождения дислокационных петель в напряженном кварце при релаксации упругих напряжений на фронтальной части трещин [14], интерпретация результатов амплитудно-зависимого внутреннего трения природного [2] и синтетического [3] кварца Хики, дают основание предположить, что мы имеем дело с дислокационным внутренним трением. Дислокационное внутреннее трение наиболее полно исследовано в работе Гранато и Люкке [15]. Большие механические напряжения в образце ведут к созданию и расширению



Фиг. 2

дислокационных петель и их пересечению. Дислокационная деформация при этом становится необратимой. С уменьшением напряжения происходит закрепление дислокаций на дефектах кристаллической решетки. Такое движение дислокаций приводит к независимому от частоты и изменяющемуся с амплитудой деформации поглощению энергии акустических колебаний. Однако, теория Гранато и Люкке справедлива только при температуре 0° К. При комнатных же температурах повышается вклад в поглощение энергии из-за тепловых колебаний атомов, главным образом атомов примеси [16].

На кривых амплитудной зависимости внутреннего трения отдельных образцов кварца Хики [2] наблюдал характерные срывы. Подобные скачки внутреннего трения отмечались и нами (фиг. 2).

Измерения внутреннего трения синтетического кварца методом трехсоставного вибратора показали, что минимальный декремент затухания исследуемого образца наблюдается при параллельности осей X образца и резонатора. Разница между максимумом и минимумом декремента затухания для образца и резонатора XY-среза доходит до 60%. Причина этого явления пока не ясна.

Выводы

1. Для двухсоставных вибраторов XYS / $-18°30'$, XY, XYS / $+18°30'$ срезов, изготовленных из синтетического кварца, обнаружена амплитудная зависимость внутреннего трения, носящая гистерезисный характер.

2. Показано, что начало роста внутреннего трения с увеличением амплитуды деформации зависит от ориентации кварцевых брусков в плоскости YZ.

3. Обнаружена зависимость величины декремента затухания исследуемого образца от ориентации электрических осей образца и резонатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Marx. Use of the piezoelectric cauge for internal friction measurements. Rev. Sci. Inst., 1951, 22, 7, 503—508.
2. Y. Hiki. Internal friction quartz. J. Phys. Soc. Japan, 1960, 15, 4, 586—592.

3. Y. Hiki. Internal friction of synthetic quartz. J. Phys. Soc. Japan, 1961, **16**, 4, 664—670.
4. Л. И. Цинобер, В. Е. Хаджи, Л. А. Гордиенко, М. И. Самойлович. Природа дефектов в синтетическом α-кварце. Рост кристаллов, 1965, **6**, 22—36.
5. W. P. Mason. Piezoelectric crystals and their Applications to ultrasonics. New York, 1950. (Пер. У. Мэзон. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультраакустике. М., ИЛ., 1952).
6. P. A. Syces. Types of oscillations in quart plates, effect of coupling and methods of calculations. Bell. Syst. Techn. J., 1944, **23**, 1—4.
7. М. С. Йоши, А. С. Вар. Применение метода избирательного травления для изучения дефектов строения искусственного кварца. Кристаллография, 1967, **12**, 4, 656—666.
8. А. А. Блистанов, М. П. Шаскольская. Влияние закрепления дислокаций на амплитудно зависимое внутреннее трение в LiF. Физ. тв. тела, 1964, **6**, 3, 728—734.
9. А. А. Блистанов, А. В. Панов, М. П. Шаскольская. Возврат внутреннего трения после пластической деформации в монокристаллах LiF. Физ. тв. тела, 1963, **5**, 9, 2726—2728.
10. В. Я. Платков, В. И. Старцев. Амплитудные и временные зависимости внутреннего трения в ионных кристаллах. Физ. тв. тела, 1966, **8**, 7, 1994—2000.
11. В. Я. Платков, В. П. Ефименко, В. И. Старцев. Изучение некоторых динамических характеристик дислокаций в кристаллах бромистого калия методом внутреннего трения. Физ. тв. тела, 1967, **9**, 10, 2799—2803.
12. J. Fridel. Dislocations. Pergamon Press. Oxford — London — Edinburgh — New York — Paris — Frankfurt, 1964. (Пер.: Ж. Фридель. Дислокации. М., «Мир», 1967).
13. N. L. Carter, J. M. Cristie and D. T. Griggs. Experimental deformation and recrystallization of Quartz. The J. of Geology, 1964, **72**, 112, 687—733.
14. H. H. Schlössin. Plastic relaxation of crack tip stresses in α-quartz. The Phil. Mag., 1965, **12**, 117, 467—477.
15. А. Гранато, К. Люкке. Дислокационная теория поглощения в сб. «Ультразвуковые методы исследования дислокаций». М., ИЛ, 1963.
16. Дж. Лоте. Аспекты теорий подвижности дислокаций и внутреннего трения в сб. «Ультразвук. методы исслед. дислокаций». М., ИЛ, 1963.

Всесоюзный н.-и. институт
синтеза минерального сырья
Александров

Поступила в редакцию
25 ноября 1969 г.