ЛИТЕРАТУРА

- 1. Иверонова В. И., Кацнельсон А. А. Ближний порядок в твердых раствоpax. M. 1977.
- 2. Силонов В. М. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1990.
- 3. Власова Е. Н., Равдель М. П., Петрова О. Н.//ЛАН. 1977. 237. № 5. C. 1076.
- 4. Власова Е. Н., Равдель М. П.//Изв. АН, Металлы. 1983. 6. № 6. С. 107.
- 5. Гоманьков В. И., Равдель М. П., Ногин Н. И. и др.//ФММ. 1979. 47, № 4. C. 735.
- 6. Силонов В. М., Салех Хамами//ФММ. 1990, № 4. С. 124. 7. Кацнельсон А. А., Силонов В. М., Абу Аль Шамлат Салама// //Весян. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1994. № 5. С. 66 (Moscow University Phys. Bull. 1994. N 5. P. 56).
- В. Стотет Т., Liberman D.//J. Chem. Phys. 1970. 53, N 5. P. 1891.
 9. Hubbel J. N., Veigele Wm. J., Brigge E. A.//J. Phys. Chem. Ref. Data. 1975. 4, N 3. P. 471.
 10. Силонов В. М., Энхтор Л., Родин С. Ю., Абдуразаков А. А. Расчет П. Силонов В. М., Энхтор Л., Родин С. Ю., Абдуразаков А. А. Расчет
- упругих постоянных некоторых ГЦК переходных металлов и сплавов на их основе методом модельного потенциала: Деп. ВИНИТИ № 202-В96. М., 1996.
- 11. Кацнельсон А. А., Крисько О. В., Силенов В. М., Скоробогатова Т. В. Учет эффектов смещений атомов в диффузном рассеянии поликристаллическими ОЦК и ГЦК сплавами: Деп. ВИНИТИ № 4751. М., 1983.

Поступила в редакцию 01.04.96

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 5

УДК 534.2

ФОКУСИРОВКА ФОНОНОВ В КРИСТАЛЛЕ КВАРЦА

К. Н. Баранский, И. В. Шляхов

(кафедра физики полимеров и кристаллов)

Проведен расчет отклонений направлений лучей акустических волн от волновых нормалей в кварце. Графически представлено явление концентрации лучей (фокусировки фононов) в плоскостях упругой симметрии и в пространстве. Установлено поответствие главных направлений фокуспровки квазипродольных и квазипоперечных воли направлениям их минимального поглощения.

Фокусировкой фононов принято называть концентрацию около некоторых направлений в кристалле потоков энергии необыкновенных акустических волн и, соответственно, векторов лучей s=S/|S|, где S вектор групповой скорости. Явление это связано с тем обстоятельством, что лучи необыжновенных волы каждой моды отклоняются от направлений своих нормалей п всегда к направлениям, соответствующим локальным максимумам групповых скоростей волн этой моды [1]. Наглядное представление о направлениях фокусировки фононов дают сечения поверхности обратных фазовых скоростей V-1 или поверхности рефракции плоскостями упругой симметрии кристалла. Каждая точка такого сечения соответствует концу вектора рефракции $\mathbf{m} = \mathbf{n}/|\mathbf{V}|$, а нормаль к сечению в этой точке совпадает с направлением вектора луча этой же волны. Участкам сечения поверхности рефракции с нулевой гауссовой кривизной соответствуют параллельные нучки лучей, т. е. фокусировка фононов [2]. (Гауссова кривизна определяется как произведение первой главной кривизны и второй главной кривизны в точке поверхности, а средняя кривизна есть полусумма этих величин [3].)

При исследовании фокусировки фононов в кристалле кварца для заданных направлений волновой пормали рассчитывались фазовые скорости волн, определялись их поляризация, направления лучей и величины обратных групповых скоростей. При этом использовался алгоритм

94

расчетов, рекомендованный в работе [4], и экспериментальные данные о упругих и пьезоэлектрических свойствах кварца из [5].

На рис. 1 сплошными линиями изображено полученное сечение по-



Рис. 1. Сечение плоскостью упругой симметрии поверхностей обратных фазовых и групповых скоростей ультразвуковых волн в кристалле SiO₂ при нормальных условиях с учетом пьезосвойств: сплощными линиями обозначены обратные фазовые скорости n/V, точками — обратные групповые скорости s/S

верхности рефракции кварца плоскостью его упругой симметрин X_2OX_3 . Ось OX_3 является осью третьего порядка кварца и его акустической осью. Ось OX_1 , перпендикулярная к плоскости графика, — ось симметрии второго порядка и продольная нормаль. Точки на точечной линии соответствуют выходам векторов обратных групповых скоростей s/|S|. Контуры этого сечения соответствуют трем изонфрмальным волнам: квазипродольным (QL) и квазипоперечным (QT), поляризованным в плоскости симметрии, и поперечным волнам (T), поляризованным перпендикулярно к плоскости симметрии.

Фокусировка фононов обнаруживается в виде сгущения точек в областях 1—5, показанных на рис. 1. Области 1 и 2 соответствуют окрестностям продольных нормалей, а область 3 — окрестности поперечной нормали обыкновенных T-волн. В этих областях контуры сечения каса-

95

ются, а сечение поверхности рефракции имеет нулевую гауссову кривизну (стрелками показаны почти параллельные пучки направлений сконцентрированных лучей).

Лучи в областях 4 и 5 на рис. 1 концентрируются к точкам заострения «ласточкиных хвостов» сечения поверхности s/|S| волн QT. Касательные в этих точках проходят через точки перегиба сечения поверхности рефракции, соответствующие нулевой гауссовой кривизне. В областях 4 и 5 стрелками показаны пучки почти параллельных лучей. Концы векторов обратных групповых скоростей и рефракции располагаются по разные стороны от точек самопересечения «ласточкиных хвостов», и лучи концентрируются около направлений, сильно отклоненных от направлений их нормалей.

Для исследования фокусировки фононов в пространстве верхняя единичная полусфера, через вершину которой проходит ось OX_3 (ось симметрии 3-го порядка кварца), разбивается на равные телесные углы. Каждому телесному углу разбиения ставится в соответствие направление волновой нормали, и для каждой моды определяется направление ее луча. Полученное таким образом пространственное распределение направлений лучей соответствует распределению плотности потоков энергии в кристалле. Это распределение лучей наглядно изображается точками на равномерной сетке углов θ , φ на рис. 2 для QL-волн и на рис. 3 для QT- и T-волн [6]. Угол φ отсчитывается против часовой

 $_{to} = 90^{\circ}$

QĹ



96

стрелки от выхода оси X_1 , внешний круг служит его шкалой. Угол θ отсчитывается от центра круга, выхода оси OX_3 , линейно по радиусу круга. Три диаметра соответствуют направлениям, лежащим в плоскостях упругой симметрии кварца.

На рис. 2 и 3 точками изображены выходы направлений векторов



Рис. 3. Сетка концентрации векторов s=S/|S| в кристалле SiO₂ для квазилоперечных и поперечных волн

лучей. Области сгущения точек — области фокусировки фононов. В этих областях концентрируются лучи, отклоненные от направлений своих нормалей из областей дефокусировки, из которых в некоторых случаях «уходят все» лучи. Плотность областей фокусировки и разреженность областей дефокусировки зависит от первоначального выбора величин телесных углов. Уменьшая величину телесных углов разбиения, можно добиться того, что для любой малой окрестности произвольной точки в верхней полусфере будет рассчитан и отображен на рисунке хотя бы один вектор луча. Однако и в этом случае будет сохраняться отношение плотностей лучей в областях фокусировки и дефокусировки.

На рис. 2 показано угловое распределение лучей QL- и L-волн. Три главных направления фокусировки для QL-волн в плоскостях симметрии при θ =50° соответствуют области 2 на рис. 1. Однако в области 1 на рис. 2 не происходит заметной пространственной фокусировки лучей. Гауссова кривизна поверхности рефракции и в том и в другом случае равна нулю. Как показывают расчеты, вторая главная кривизна и, сле-

довательно, средняя кривизна в области 2 на рис. 2 равны нулю, а в области 1 отличны от нуля. Можно предноложить, что критерием для определения направлений пространственной фокусировки фононов (как на рис. 2 для QL-волн в кварце) является нулевое значение средней кривизны поверхности рефракции. Нулевая гауссова кривизна этой поверхности служит достаточным критерием для фокусировки фононов только в плоскостях упругой симметрии кристалла.

На рис. З наблюдаются три узкие области сгушения точек в плоскостях упругой симметрии около направлений, отстоящих от оси ОХ₃ на угол θ=6° — направлений на точки заострения в сечении поверхности обратных групповых скоростей плоскостью упругой симметрии (см. рис. 1, область 5). Направления их нормалей совпадают с участками нулевой средней кривизны сечения поверхности рефракции. В областях 3 и 4 на рис. З пространственной концентрации лучей не обнаруживается и в соответствующих направлениях нормалей средняя кривизна сечения рефракции не равна нулю. Таким образом, становится очевидной связь направлений пространственной фокусировки фононов с направлениями в кристалле, для которых средняя кривизна поверхности рефракции оказывается нулевой.

Знание направлений фокусировки существенно в ультраакустике, так как в этих направлениях реально уменьшается дифракционная расходимость акустического излучения от преобразователей конечных размеров. За счет концентрации электрической энергии пьезоактивных волн повышается также и эффективность пьезоэлектрической регистрации. Эти направления в кварце широко используются. Так, в области фокусировки 1 при углах $\theta \approx 50^\circ$ на рис. 1 лежат нормали к известным срезам ВС, ВТ, GŤ, вблизи области 3 при θ≈-35° - АТ-срез.

С направлениями фокусировки фононов в кварце связано также поглощение акустических волн, определенное экспериментально на частоте 450 МГп. Этим направлениям соответствуют экстремумы динамической вязкости, рассчитанные из этих данных на основе феноменологической теории поглощения [7]. Так, областям 2 и 5 (см. рис. 2 и 3) соответствуют минимальные значения вязкости и поглощения QL и QT-волн. Это удовлетворительно согласуется с фононной теорией поглошения звука А. И. Ахиезера [8] и механизмом взаимодействия фононов Мэзона [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров Ф. И. Теория упругих волн. М., 1965.

- 2. Maris H. J.//J. Acoust, Soc. Am. 1971. 50. P. 812.

- 3. Погорелов А. В. Дифференилальная геометрия. М., 1974. 4. Every A. G.//Phys. Rev. 1980. 22. Р. 1746. 5. Landolt-Börnstein. Numerical Data and Functional Relationship in Science.
- анд Тесплоlоду. Вегіл. 1971. 6. Баранский К. Н., Мамяна Л. Н., Шляхов И. В.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995. № 1. С. 84 (Moscow University Phys. Bull. 1995. N I. P. 77). 7. Lamb J., Richter J.//Proc. Roy. Soc. 1966. А 293. Р. 479. 8. Ахиезер А. И.//Письма в ЖЭТФ, 1938. 8. С. 1318. 9. Мэзон У. Динамика решетки//Физическая акустика: М., 1968. Т. 3, ч. Б.

Поступила в редакцию. 15.04.96

ПОПРАВКА

В статье Н. П. Клепикова «Свойства системы уравнений типа Беге-Солпитера для двух частиц со спином 1/2» (Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1995: № 4) допущена олечатка. На с. 15 четвертую строку матрицы (11) следует читать так: - en P.*+ iP.µ. −P.z = 0 – &V¢ +Mc. Se production contractioners 1.0% cossuje cosse γ