

Здесь  $\Lambda'^2 = c^2 + U - \frac{\omega^2 r^2}{2}$ ,  $b_{km}$  — метрический тензор евклидова пространства в цилиндрических координатах,  $U$  — потенциал гравитационного поля.

Рассмотрим статистическую систему гравитирующих частиц (3) в сопутствующей системе отсчета. Нетрудно показать, что в этом случае функция распределения частиц будет иметь вид (10).

Согласно [8] плотности числа частиц  $n$  и  $n'$  в инерциальной  $S$  и сопутствующей  $S'$  системах связаны формулами преобразования:

$$n \sqrt{g_{\alpha\beta} \langle v^\alpha \rangle \langle v^\beta \rangle} = n' \sqrt{g'_{\alpha\beta} \langle v'^\alpha \rangle \langle v'^\beta \rangle} = Inv. \quad (11)$$

По определению  $n = \int p^0 f(x, p) d\Omega$ . Поэтому

$$n = \frac{4\pi Am^2 c^5 \Theta}{\Lambda^4 \left(1 - \frac{\omega^2 r^2}{\Lambda^2}\right)} K_2 \left( \frac{m \Lambda^2}{\Theta} \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{\Lambda^2}} \right), \quad (12)$$

$$n' = \frac{4\pi Am^2 c^2 \Theta'}{\Lambda'^2} K_2 \left( \frac{mc \Lambda'}{\Theta'} \right). \quad (13)$$

Подстановка (12) и (13) в инвариантное равенство (11) приводит к результату

$$\Theta/\Lambda^2 \sqrt{1 - \frac{\omega^2 r^2}{\Lambda^2}} = \Theta'/\Lambda'^2. \quad (14)$$

Формула (14) дает закон преобразования температуры при переходе от системы  $S'$  к системе  $S$ .

Как следует из работы [8], величина  $\tau^0/\omega^0 = Inv$ , где  $\tau^\alpha$  — 4-вектор гидродинамической скорости. Учитывая это, легко убедиться, что  $\tau^0\Theta = Inv$ . Последнее равенство дает закон преобразования температуры в общем случае:

$$\Theta/\sqrt{g_{\alpha\beta} \langle v^\alpha \rangle \langle v^\beta \rangle} = \Theta'/\sqrt{g'_{\alpha\beta} \langle v'^\alpha \rangle \langle v'^\beta \rangle}. \quad (15)$$

Формула (14) является частным случаем соотношения (15).

В специальной теории относительности равенство (15) принимает вид

$$\Theta/\sqrt{1 - \frac{\langle v \rangle^2}{c^2}} = \Theta'/\sqrt{1 - \frac{\langle v' \rangle^2}{c^2}} = \Theta_0.$$

Этот результат совпадает с законом преобразования температуры, установленным Планком и Лауэ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Plank M. «Ann. d. Phys.», 1971, 76, 1908.
2. Laue M. Die Relativitätstheorie, 3 rd. ed. Braunschweig, 1952.
3. Ott H. «Zt. f. Phys.», 1963, 175, 70.
4. Kibble T. W. B. «Nuovo Cimento», 1966, 41B, 72.
5. Müller C. Bernardini Festschrift ed by G. Popl. Akad. Press, p. 202, 1968.
6. Loui de Broglie. «C. R. Acad. Sci. Paris», Serie B, 1967, N 10.
7. Мычелкин Э. Г. «Вестн. АН КазССР», 1971, № 4, 51—53.
8. Кузьменков Л. С. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1973, 14, № 4.
9. Кузьменков Л. С. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астроном.», 1975, 16, № 2.
10. Кузьменков Л. С. «Изв. вузов. Физика», 1975, № 5.

Поступила в редакцию  
25.6 1976 г.

Кафедра  
теоретической физики

УДК 548:534

Г. С. Грачев  
К. К. Ермилин  
В. Е. Лямов

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ  
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН

Ранее [1] электродинамический метод приема акустических волн применялся для абсолютных измерений параметров ультразвуковых полей. Отмечалось, что наряду с простотой и надежностью измерений электродинамический приемник является идеально

широкополосным и может использоваться для непосредственного измерения нелинейных искажений ультразвуковой волны большой амплитуды в твердых телах и частотных искажений широкополосного акустического сигнала. С помощью указанного метода измерены абсолютные величины амплитуд смещений поверхностной волны Рэлея и показан эллиптический характер движения частиц среды, по которой распространяется волна Рэлея [2, 3].

Нами исследовалась возможность применения электродинамического метода приема акустических волн для изучения поляризационных эффектов, возникающих при распространении поперечных излучений волн в анизотропных средах [4].

Электродинамический метод приема акустической волны основан на эффекте возникновения э. д. с. на концах проводника, движущегося в магнитном поле. Эта э. д. с. определяется следующим соотношением:

$$E = \int [B \times U] dl,$$

где  $l$  — длина проводника,  $U$  — скорость его движения и  $B$  — величина магнитной индукции. Если движение проводника вызвано действием акустической волны, то, зная величину магнитной индукции и длину проводника, по измеренной величине э. д. с. можно легко определять такие характеристики акустической волны, как амплитуда колебательной скорости и амплитуда смещения на границе образца. Таким же образом, измеряя эти характеристики электродинамическими преобразователями по различным направлениям, можно определить состояние поляризации упругой волны.

Для оценки пригодности метода экспериментально определялась чувствительность электродинамического приемника к повороту плоскости поляризации линейно-поляризованной акустической волны. Для этого на торцовую поверхность образца плавленного кварца диаметром 60 мм и длиной 30 мм напылялись серебряные электроды, форма которых показана на рис. 1. Длина каждой полоски 1 см и ширина менее 0,5 мм, омическое сопротивление такой полоски обычно имело величину несколько ом. На второй торец образца плавленного кварца приклеивался ультразвуковой преобразователь, излучающий сдвиговую волну, плоскость поляризации которой изменялась поворотом преобразователя. В качестве преобразователя использовались кварцевые пластины УХ-среза, на которые подавался высокочастотный импульс амплитудой до 200 В с частотой заполнения 20 МГц от генератора ГЗ-41. Импульсный режим работы использовался для того, чтобы слабый выходной сигнал от электродинамического преобразователя не подавлялся сигналом наводки от СВЧ-генератора, возбуждающего кварцевый преобразователь. Для усиления сигналов, снимаемых с электродов электродинамического преобразователя, служил приемник ПБ-1, чувствительность которого составляла около 3 мкВ при полосе в 1 МГц. Напряженность магнитного поля измерялась прибором ИМИ-1.

Результаты измерений э. д. с. на всех трех электродах в зависимости от угла поворота  $\varphi$ , плоскости поляризации излучателя относительно оси  $OY$  приведены на графике рис. 1. Из рисунка видно, что уровень выходного сигнала при вращении плоскости поляризации сдвиговой волны меняется более чем в 10 раз. Таким образом, можно считать, что электродинамический прием акустической волны чувствителен к изменению поляризации поперечной линейно-поляризованной упругой волны.

Электродинамический метод применялся при исследовании поляризации сдвиговой волны, распространяющейся вдоль оси  $\alpha$ -кварца. Образец  $\alpha$ -кварца размерами  $15 \times 15 \times 10$  мм<sup>3</sup> имел угол ошибки ориентации оси  $Z$  относительно нормали к грани кристалла  $1^\circ 40'$ . На  $XU$ -грани кристалла напылялся электродинамический преобразователь с формой электродов, изображенной на рис. 1. Направление электрода  $OY$  совпадает с одним из собственных векторов смещения сдвиговой волны при данном угле разориентации. Кварцевый преобразователь УХ-среза приклеивался к противоположной грани таким образом, чтобы возбуждались две линейно-поляризованные волны с равными начальными смещениями. Вследствие двулучепреломления фазовый сдвиг между этими волнами изменялся и на выходной грани кристалла был равен [4]

$$G = \frac{d \Delta v f}{v^2},$$

здесь  $f$  — частота акустической волны,  $d$  — длина кристалла вдоль оси  $Z$ ,  $v$  — скорость волны вдоль оси  $Z$ ,  $\Delta v$  — разность скоростей волн. Состояние поляризации при этом описывается эллипсом, характеристики которого определяются фазовым сдвигом. Для

данного кристалла  $\alpha$ -кварца ( $d=10$  мм)  $G \cong \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$  для частот ультразвуковой волны 10, 20 и 30 МГц соответственно. Результаты измерений э. д. с. с кристаллом  $\alpha$ -кварца приведены на рис. 2.

По измеренной величине э. д. с. на каждом электроде, которая пропорциональна максимальной проекции вектора поляризации на нормаль к электроду, можно определить характеристики эллипса. Эти характеристики для указанных частот совпадают с рассчитанными по известным величинам фазового сдвига. Следует заметить, что выбором системы двух взаимно ортогональных электродов можно определить не только

компоненты вектора поляризации на разные направления, но и разность фаз акустических волн и тем самым получить исчерпывающую информацию о характеристиках эллипсов поляризации.

Обычно при величине магнитного поля 5 кГс потери на преобразование составляли около 100 дБ. Такая большая величина потерь на преобразование обусловлена малой величиной колебательного смещения проводящих элементов поверхности под действием акустической волны и является одним из главных недостатков электро-

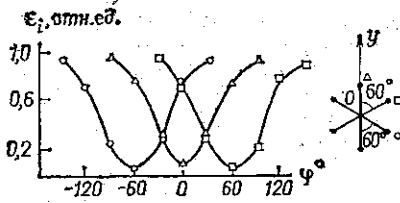


Рис. 1. График зависимости э. д. с. на электродах, напыленных на торец плавленого кварца, от угла поворота плоскости поляризации линейно-поляризованной сдвиговой волны

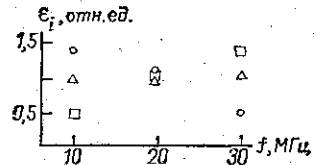


Рис. 2. Э. д. с. на электродах электродинамического преобразователя, напыленных на α-кварц, при разных частотах акустической волны

динамического метода, препятствующих его широкому использованию в практических устройствах. Но для лабораторных исследований этот метод является вполне приемлемым и обладает по сравнению с другими целым рядом преимуществ, к которым можно добавить и возможность определения состояния поляризации сдвиговой волны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов И. Г., Шутилов В. А. «Акустический журнал», 1964, 10, 98.
2. Качалов Н. П., Лямов В. Е., Солодов И. Ю. «Вестн. Моск. ун-та. Физ., астрон.», 1971, 12, № 6, 729.
3. Kajimiga K., Inaba R., Mikoshiba N., «Appl. Phys. Lett.», 1971, 19, 182.
4. Грачев Г. С., Ермилин К. К., Лямов В. Е. «Физика твердого тела», 1976, 18, 304.

Поступила в редакцию  
9.7 1976 г.  
Кафедра  
акустики

УДК 621.372.413;  
666.232.27

Х. С. Багдасаров  
В. Б. Брагинский  
В. П. Митрофанов  
В. С. Шиян

ВЫСОКОДОБОТНЫЙ МЕХАНИЧЕСКИЙ  
РЕЗОНАТОР ИЗ МОНОКРИСТАЛЛА  
САПФИРА

Один из методов повышения чувствительности детекторов гравитационного излучения состоит в использовании механических резонаторов с высокой добротностью  $Q$  [1, 2]. Увеличение  $Q$  (увеличение времени релаксации  $\tau_{\text{мех}}^* = 2Q/\omega_{\text{мех}}$ ) позволяет в принципе достоверно обнаруживать слабые кратковременные силовые воздействия ( $\tau \ll \tau_{\text{мех}}^*$ ) на резонатор по изменению амплитуды колебаний  $\Delta x$ , если оно превышает вариации тепловых колебаний  $\sqrt{kT/m\omega_{\text{мех}}^2} \sqrt{2\tau/\tau_{\text{мех}}^*}$ . Таким образом, увеличение  $Q$  (увеличение  $\tau_{\text{мех}}^*$ ) повышает чувствительность гравитационного детектора (см. подробнее [1]).

Ниже кратко изложены результаты измерений  $Q$  механического резонатора, изготовленного из синтетического сапфира, а также обсуждены возможные применения таких резонаторов.

Схема установки приведена на рисунке. Резонатор, имеющий длину 15 см и диаметр 4,5 см ( $m \sim 10^3$  г), подвешивался на тонкой нити в вакуумной камере ( $p = 10^{-7}$  мм рт. ст.), стенки которой могли быть охлаждены жидким азотом и жидким гелием. Непосредственное охлаждение резонатора осуществлялось с помощью обмен-