АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXII 1976 Вып. 1

УДК 621.373.826:534.6

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В. П. Захаров, Н. Н. Евтихиев, Ю. А. Снежко, В. П. Тычинский

Рассмотрен бесконтактный интерферометрический метод измерения абсолютных амплитуд механических колебаний, имеющий высокое пространственное разрешение ~30 *мкм* и чувствительность по амплитуде 10^{-2}–10^{-3} Å, нечувствительный к внешним дестабилизирующим факторам. Возможности метода иллюстрируются результатами измерений на лазерном интерферометре пьезоэлектрических колебаний кристалла арсенида галлия.

Используемые в настоящее время в акустике неконтактные методы измерения амплитуд механических колебаний не обеспечивают необходимой чувствительности, пространственного разрешения и требуют дополнительной калибровки.

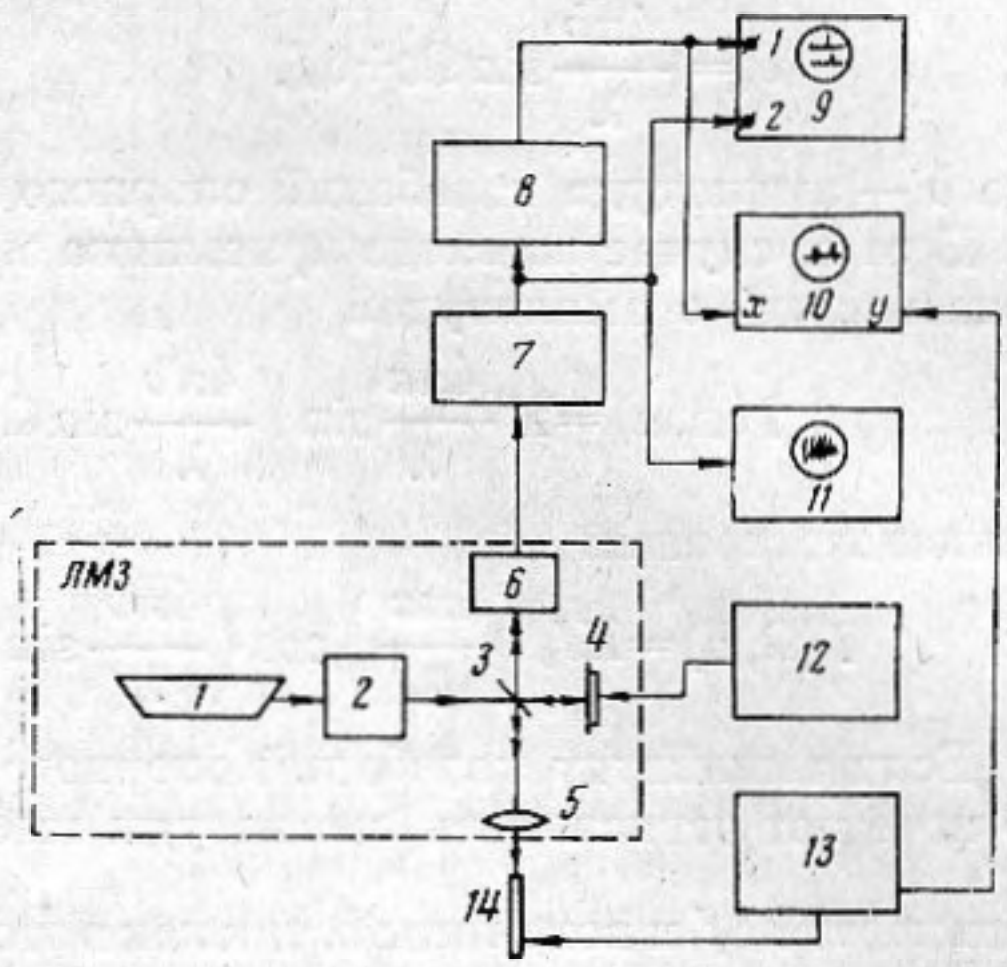
Более перспективен интерференционный оптический метод, предложенный в работе [1] и значительно улучшенный в последующие годы путем использования в качестве источников света газовых лазеров. Так, в работе [2] была показана возможность регистрации амплитуд порядка 10^{-4} Å на зеркальной поверхности, а в [3] — некритичность к состоянию поверхности, высокое пространственное разрешение и хорошая точность абсолютных измерений при сохранении чувствительности порядка 10^{-3} Å. Тем не менее указанные достоинства метода практически не удавалось реализовать из-за крайне высокой чувствительности интерферометров ко всякого рода нестабильностям (тепловым, вибрационным и т. д.).

Ниже рассматривается простой способ устранения влияния этих факторов при полном сохранении основных преимуществ интерференционного метода, который может быть применен для абсолютной калибровки приемников и излучателей звука, измерения распределения амплитуды по поверхности излучателя, измерения импеданцов в неоднородных системах и, в частности, переходных импеданцев путем сравнения абсолютных амплитуд колебаний, определения модулей упругости третьего и более высоких порядков по отношению амплитуд колебаний основного тона и высших гармоник, отождествления типов волн в телах произвольной формы при полной или частичной иммерсии, изучения явлений в сегнетоэлектриках в точках фазового перехода и т. д.

Сущность метода может быть пояснена с помощью блок-схемы установки, показанной на фиг. 1, которая была использована для исследования пьезоэлектрических колебаний кристалла арсенида галлия.

Лазерный микрозонд (ЛМЗ), принцип работы которого подробно рассмотрен в [4], использовался для регистрации амплитуд колебаний кристалла GaAs (*14*), возникающих при возбуждении последнего с частотой ω генератором качающейся частоты (*13*), выполненным на основе генератора Г3-7А. Сигнал микрозонда с выхода фотоприемника (*6*) после усиления широкополосным усилителем (*7*) подавался на вход осциллографа

(*11*) и селективного вольтметра В6-1 (*8*). Осциллограф С1-49 (*11*) использовался для контроля и измерения амплитуды калибровочного низкочастотного сигнала. С выхода селективного вольтметра демодулированный высокочастотный сигнал поступал на вход осциллографа С1-48Б (*10*), горизонтальная развертка которого была синхронизирована с генератором (*13*), и, таким образом, регистрировалась амплитудно-частотная характеристика образца в полосе качания частоты. Тот же сигнал подавался для



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – лазер ОКГ-13, *2* – оптический вентиль, *3* – полупрозрачное зеркало, *4* – зеркало опорного плеча на пьезокерамической основе, *5* – фокусирующая система, *6* – фотоприемник, *7* – широкополосный усилитель, *8* – селективный микровольтметр, *9* – осциллограф С1-16, *10* – осциллограф С1-48Б, *11* – осциллограф С1-49, *12* – генератор Г3-7А, *13* – генератор качающейся частоты, *14* - кристалл GaAs

контроля на вход двухлучевого осциллографа С1-16 (*9*). Напряжение низкой частоты Ω подавалось от генератора (*8*) на пьезокерамику (*4*). Исследуемый образец кристалла GaAs был закреплен на двухкоординатном столике таким образом, что зондирующий луч ЛМЗ фокусировался на его торцевой поверхности.

Внешний вид лазерного микрозонда показан на фиг. 2. Основные характеристики прибора следующие: пространственное разрешение (диаметр зондирующего луча в точке фокуса) 30 *мкм*, минимальная регистрируемая амплитуда колебаний при полосе селективного приемника $\Delta f = 10^3$ *гц* составляет $3 \cdot 10^{-3}$ Å, погрешность измерения не более 5—10%, максимальная частота измеряемых колебаний 5 *Мгц*.

Введенное нами усовершенствование метода измерений имело своей целью устранение дрейфа оптической разности фаз в интерферометре, являющегося одним из основных источников погрешности при длительных измерениях.

Действительно, согласно работе [4], выражение для сигнала на выходе фотоприемника имеет вид:

$$I = K \cos\left(\frac{4\pi a}{\lambda} \sin \omega t + \delta_0\right) =$$

$$= K \left\{ \cos \delta_0 \left[J_0\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right) \cos 2n\omega t \right] - \right.$$

$$\left. - \sin \delta_0 2 \sum_{n=0} J_{2n+1}\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right) \sin (2n+1)\, \omega t \right\},$$

где a — амплитуда измеряемых колебаний частоты ω, λ — длина волны излучения ($\lambda = 6328$ Å), K — коэффициент преобразования, δ_0 — начальная разность фаз, J_n — функция Бесселя первого рода.

Амплитуда первой гармоники сигнала $I(\omega, a)$ на выходе селективного вольтметра зависит от начальной разности фаз δ_0:

$$I(\omega, a)=2K\sin\delta_0 J_1\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\simeq K\frac{4\pi a}{\lambda}\sin\delta_0.$$

Здесь, как обычно, принято $4\pi a/\lambda\ll 1$.

Для калибровки сигнала и устранения влияния нестабильности начальной разности фаз δ_0 в опорное плечо интерферометра вводится модуляция

$$\delta_0=\frac{4\pi b}{\lambda}\sin\Omega t+\delta_0',$$

где b — амплитуда колебаний опорного зеркала с низкой частотой $\Omega\ll\Delta f$.

В этом случае на входе приемника можно выделить два сигнала: высокочастотный с амплитудой

$$(1)\qquad I(\omega, a)=K\frac{4\pi a}{\lambda}\sin\left(\frac{4\pi b}{\lambda}\sin\Omega t+\delta_0'\right)$$

и низкочастотный

$$(2)\qquad I(\Omega, b)=KJ_0\left(\frac{4\pi a}{\lambda}\right)\cos\left(\frac{4\pi b}{\lambda}\sin\Omega t+\delta_0'\right)\simeq K\cos\left(\frac{4\pi b}{\lambda}\sin\Omega t+\delta_0'\right).$$

Если амплитуду колебаний опорного зеркала b выбирать большей $\lambda/4$, то исчезает зависимость амплитуды высокочастотного сигнала от нестабильностей δ_0' и величины b, так как в этом случае $\psi(b, \delta_0')=\frac{4\pi b}{\lambda}\sin\Omega t+\delta_0'$ обязательно проходит как минимум дважды через значение, кратное π, а $\sin\psi(b, \delta_0')$ и $\cos\psi(b, \delta_0')$ достигают при этом своих максимальных значений, равных ± 1. Следовательно, измерение амплитуды низкочастотного сигнала $I_0(\Omega)=\max I(\Omega, b)$ дает величину коэффициента преобразования $K=I_0(\Omega)$.

Амплитуда огибающей высокочастотного сигнала $I_0(\omega, a)$ на выходе селективного микровольтметра

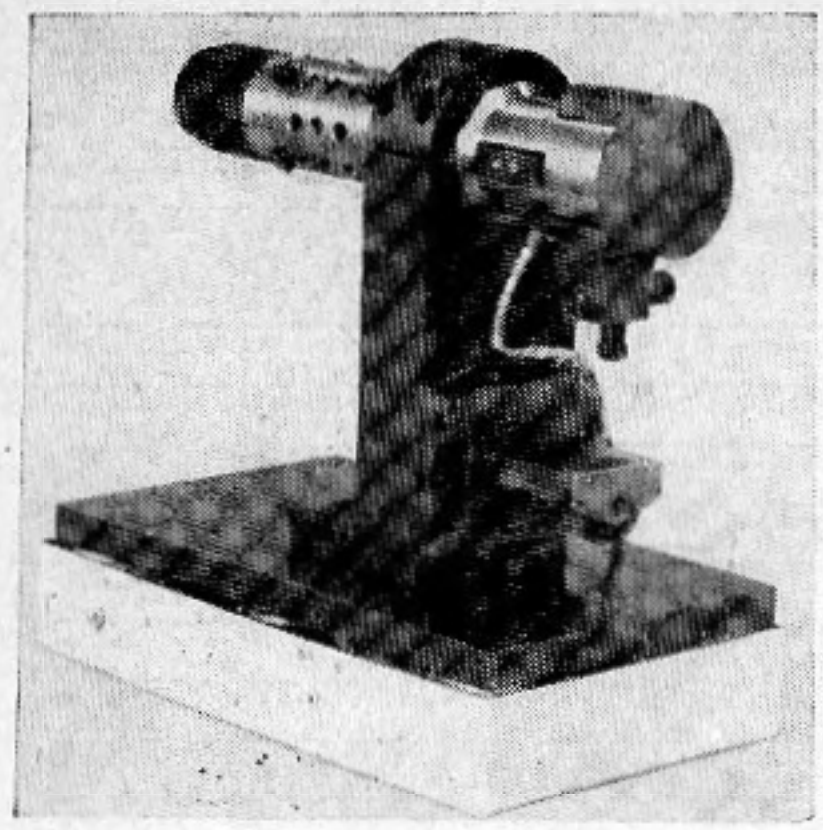
$$I_0(\omega, a)=\max\left[K\frac{4\pi a}{\lambda}\sin\psi(b, \delta_0')\right]=I_0(\Omega)\frac{4\pi a}{\lambda},$$

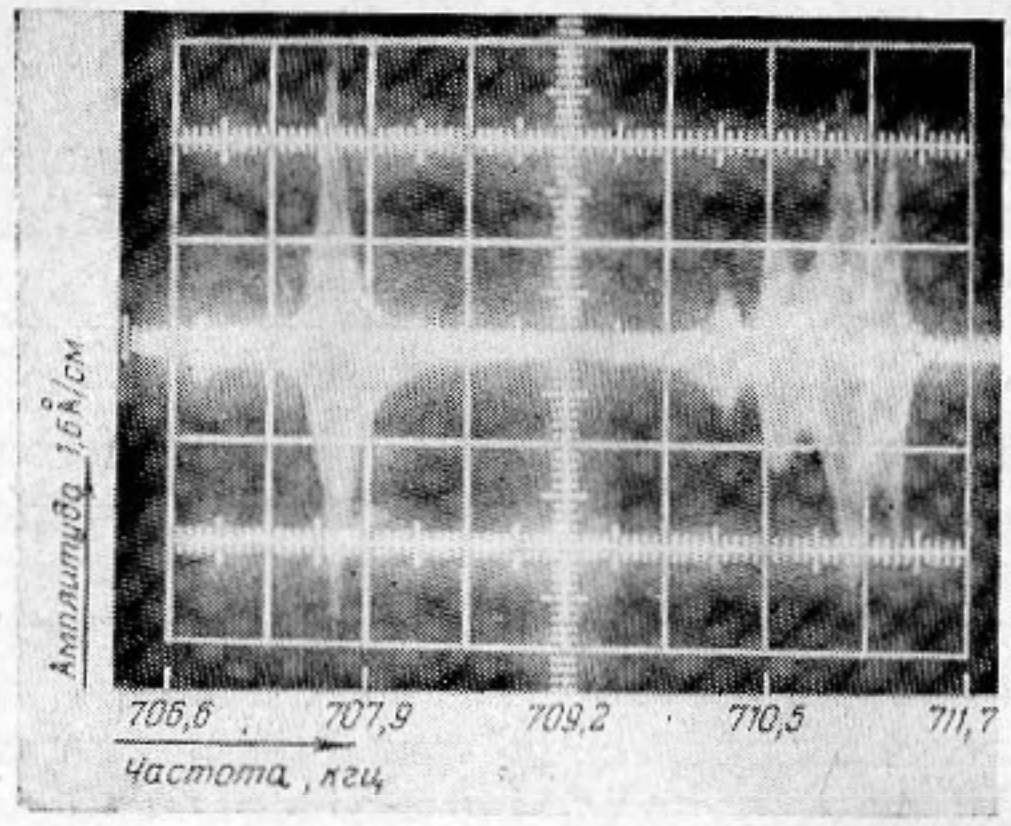
откуда легко определить амплитуду колебаний

$$a=\frac{I_0(\omega, a)}{I_0(\Omega)}\frac{\lambda}{4\pi}.$$

Из выражений (1) и (2) видно, что низкочастотный и огибающая высокочастотного сигналов сдвинуты по фазе на $\pi/2$; это было использовано для контроля достоверности измерения в случае прямого прохождения помехи с частотой ω на вход селективного вольтметра. При этом огибающая помехи будет синфазна с низкочастотным сигналом $I_{\text{пом}}=K'\cos\psi(b, \delta_0')$.

Из сказанного ясно, что погрешность измерения амплитуды колебаний определяется лишь точностью используемых стандартных приборов, так как введение модуляции в опорное плечо интерферометра устраняет погрешности, связанные с оптическим каналом. Минимальная измеряемая амплитуда ограничивается только уровнем шумов фотоприемника и эффективным коэффициентом отражения исследуемого объекта. В наших условиях уровень шума на выходе усилительного устройства составлял 30—50 *мкв* при полосе пропускания $\Delta f=1$ *кгц*, что соответствовало сигналу, получаемому при амплитуде колебания $3\cdot 10^{-3}$ Å на зеркальной поверхности. Вследствие инерционности применяемого фотоприемника максимальная частота сигнала составляла 5 *Мгц*.



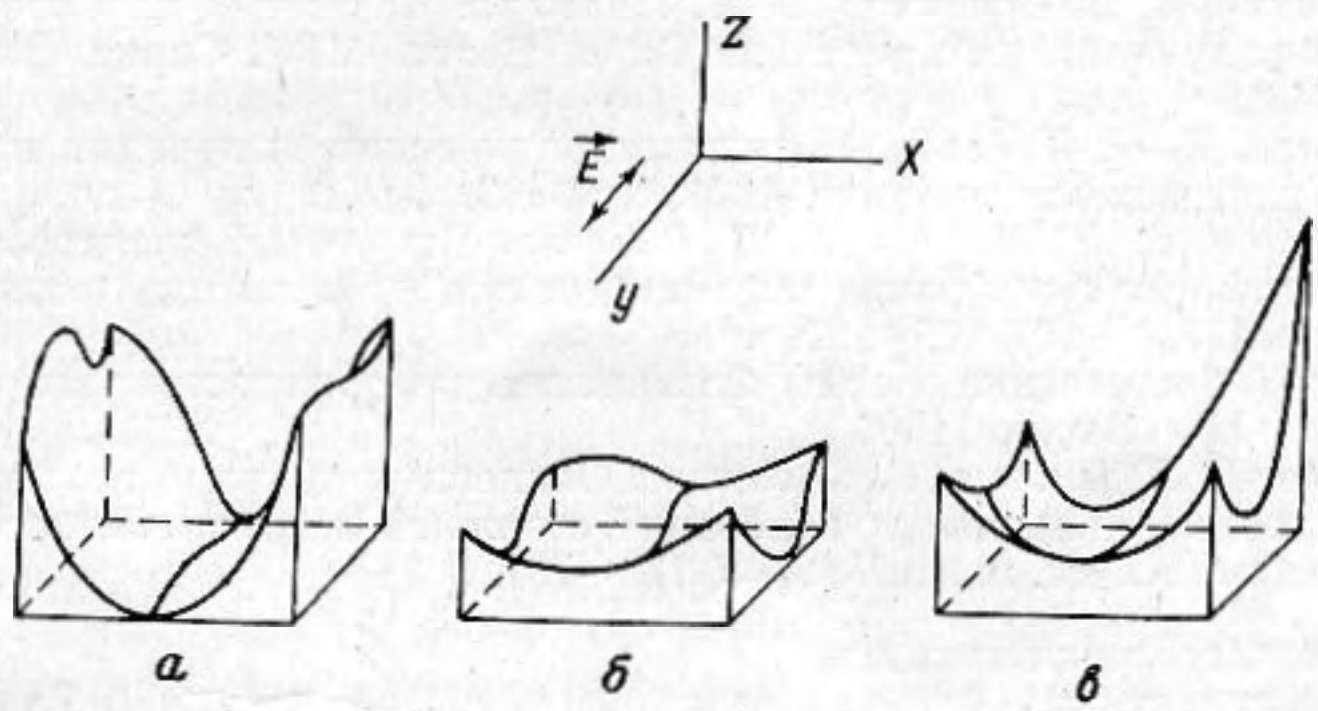


Фиг. 2 Фиг. 3

Фиг. 2. Экспериментальная установка

Фиг. 3. Амплитудно-частотная характеристика кристалла GaAs (масштаб по оси ординат – 1,6 Å/*см*, напряжение на кристалле 20 *в*)

Рассмотренный метод был использован нами для измерения амплитуд пьезоэлектрических колебаний кристалла GaAs, используемого в качестве электрооптического модулятора инфракрасного излучения [5]. Как известно, к электрооптическим системам модуляции и сканирования лазерного луча предъявляются высокие требования по равномерности амплитудно-частотной характеристики в максимально возможном диапазоне частот [6].



Фиг. 4. Эпюры распределения амплитуд колебаний по торцу стержня кристалла GaAs: *а* – 711,31 *кгц*, *б* – 710,36, *в* – 707,46 *кгц*

С другой стороны, сложный спектр колебаний кристалла конечных размеров приводит к заметным искажениям характеристик и требуется применение специальных мер для их сглаживания [7]. Аналогичные задачи исследования колебаний кристаллов возникают в других областях акустики твердого тела [8, 9].

Известно, что расчет собственных колебаний в анизотропных кристаллах практически невозможен из-за сложного характера взаимодействия волн деформации и отсутствия необходимых экспериментальных данных, а идентификация типов колебаний неконтактными методами в настоящее время не производится из-за невысокого пространственного разрешения существующих датчиков или их недостаточной чувствительности. Действительно, при плотностях акустического потока порядка 10^{-1} *вт/см*^{2} на

ультразвуковых частотах 0,5—10 *Мгц* амплитуды смещений имеют величину 0,1—1 Å.

Измерения проводились по торцевой поверхности кристалла в точках с координатами X_iY_j ($i, j=1, 2, \ldots, 5$) с осью $X[100]$, $Y[011]$. Размеры кристалла составляли 0,3×0,3×11 *см*.

Типичная осциллограмма амплитудно-частотной характеристики, снятая в точке X_5Y_1, приведена на фиг. 3. Распределение амплитуд колебаний по поверхности для трех резонансных частот показано на фиг. 4.

Ориентация узловой линии определяет направление волнового вектора в плоскости XY на частотах нормальных и смешанных колебаний. Согласно работе [8], резонансы на частотах ~700 *кгц* для указанного кристалла соответствуют возбуждению поперечных объемных колебаний с волновым вектором, лежащим в плоскости поперечного сечения, что находится в соответствии с результатами наших измерений. В отличие от работы [8], на фиг. 3, 4 видна тонкая структура резонансного пика и характер распределения амплитуд.

Авторы благодарят Л. Н. Магдича за предоставленные образцы кристаллов и обсуждение результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *И. Л. Берштейн.* Об измерении весьма малых изменений разности хода двух световых колебаний. Докл. АН СССР, 1952, *94*, 4, 655–658.
2. *S. Sizgoric, A. Gundjan.* An optical Homodyne Technique for Measurement of Amplitude and Phase of Subangstrem Ultrasonic Vibrations. Proc. Lett., 1969, *57*, 7, 1313—1314.
3. *В. П. Захаров, Ю. А. Снежко, В. П. Тычинский.* Лазерный микроинтерферометр. Квантовая электроника, 1975, 6, 1142–1146.
4. *Р. А. Ванциан, М. П. Тычинская, В. П. Захаров, О. А. Николаева, В. А. Тищенко.* Лазерная установка для измерения амплитуд и резонансных частот колебаний элементов механических конструкций. Квантовая электроника, 1971, 4, 27—32.
5. *В. И. Борисенко, В. Б. Багликов, В. Н. Парыгин.* Частотная характеристика модулятора ИК-излучения на кристалле GaAs. Вестн. МГУ. Серия физ., астр., 1971, *12*, 4, 479—481.
6. *И. В. Николаев, М. М. Коблова.* Модуляция оптического излучения на длине волны 10,6 *мкм*. Квантовая электроника, 1971, 4, 57–62.
7. *А. М. Богомолов, Л. Н. Магдич, В. Н. Шмягля.* Вторичный электрооптический эффект в модуляторах инфракрасного излучения на арсениде галлия. Квантовая электроника, 1973, 1(13), 125–127.
8. *И. А. Викторов.* Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М., «Наука», 1966.
9. *Л. К. Зарембо, В. Б. Пиотух, С. С. Секоян.* Экспериментальное исследование структуры собственных продольных колебаний стержней и акустического резонансного детектирования. Акуст. ж., 1973, *19*, 5, 778—781.

Московский институт радиотехники,
электроники и автоматики

Поступила
7 февраля 1975 г.