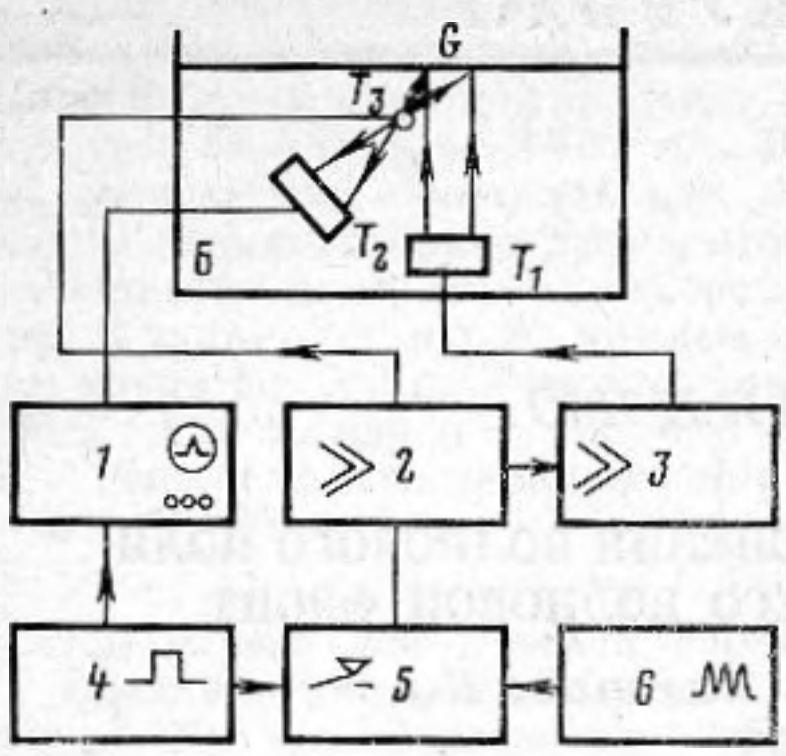


Фиг. 2

длительности импульсов 0,25 мс происходит смыкание этих сигналов (фиг. 1, *г*). На фиг. 1, *д* приведена осциллограмма взаимодействия излучения квазиточечного источника с отраженной от зеркала ОВФ волной при $\tau_и=0{,}3$ мс. В этом случае хорошо заметно начало гашения сигналов. Увеличение $\tau_и$ до 0,4 мс приводит к расширению зоны гашения звукового поля квазиточечного источника (фиг. 1, *е*). При перемещении источника T_3 вдоль акустической оси характер сигнала на T_2 не меняется. Фазу коэффициента отражения можно было варьировать, изменяя частоту повторения и длительность импульсов накачки. На фиг. 1, *ж* представлен случай, когда происходит сложение сигналов: отраженный ОВФ сигнал совпадает по фазе с излучаемым сигналом от квазиточечного источника. При больших длительностях импульсов накачки в эксперименте отчетливо наблюдался дрейф фазы волны ОВФ. В этом случае фаза коэффициента отражения R становится медленной функцией времени, а ее значение зависит от частоты повторений и длительности импульсов накачки. Характерная осциллограмма, иллюстрирующая нелинейный дрейф фазы (при $\tau_и=0{,}9$ мс) волны ОВФ, приведена на фиг. 1, *з*.

Таким образом, результаты выполненных экспериментов указывают на возможность гашения звука посредством зеркала ОВФ, что соответствует выводам теории [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Малюжинец Г. Д.* Нестационарные задачи дифракции для волнового уравнения с финитной правой частью. Тр. Акуст. ин-та АН СССР, 1971, № 15, с. 124–139.
2. *Федорюк М. В.* Об активном гашении колебаний упругих сред.– ЖВМиМФ, 1976, т. 16, № 4, с. 1065–1068.
3. *Бункин Ф. В., Власов Д. В.* Возможности гашения поля излучения заданного распределения источников посредством зеркала, обращающего волновой фронт.– Докл. АН СССР, 1983, т. 272, № 4, с. 839–842.
4. *Poole J. H. B., Leventhall H. G.* An experimental Study of swinbanks method of active attenuation of sound in ducts.– J. Sound and vibr., 1976, v. 49, № 2, p. 257–266.
5. *Мазаников А. А., Тютекин В. В.* Экспериментальное исследование активной системы гашения акустических полей.– Акуст. журн. 1974, т. 20, № 5, с. 807–808.
6. *Мазаников А. А., Тютекин В. В.* Исследование активных автономных систем гашения акустических полей в одномодовых волноводах.– Акуст. журн., 1976, т. 22, № 5, с. 729–734.
7. *Бункин Ф. В., Власов Д. В., Кравцов Ю. А.* Обращение волнового фронта и самофокусировка звука за счет нелинейного взаимодействия с поверхностью жидкости.– Письма в ЖТФ, 1981, т. 7, в. 6, с. 325–329.
8. *Андреева Н. П., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Каршиев К.* Экспериментальное наблюдение явления обращения волнового фронта звука на поверхности жидкости.– Письма в ЖТФ, 1982, т. 8, в. 2, с. 104–108.
9. *Андреева Н. П., Бункин Ф. В., Власов Д. В., Каршиев К., Кравцов Ю. А., Шурыгин Е. А.* Экспериментальное наблюдение самофокусировки звуковых пучков при взаимодействии с поверхностью жидкости.– Препринт ФИАН СССР, 1983, № 163.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
25.VI.1984

УДК 534

О СУЩЕСТВОВАНИИ УГЛА ТИПА БРЮСТЕРА ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

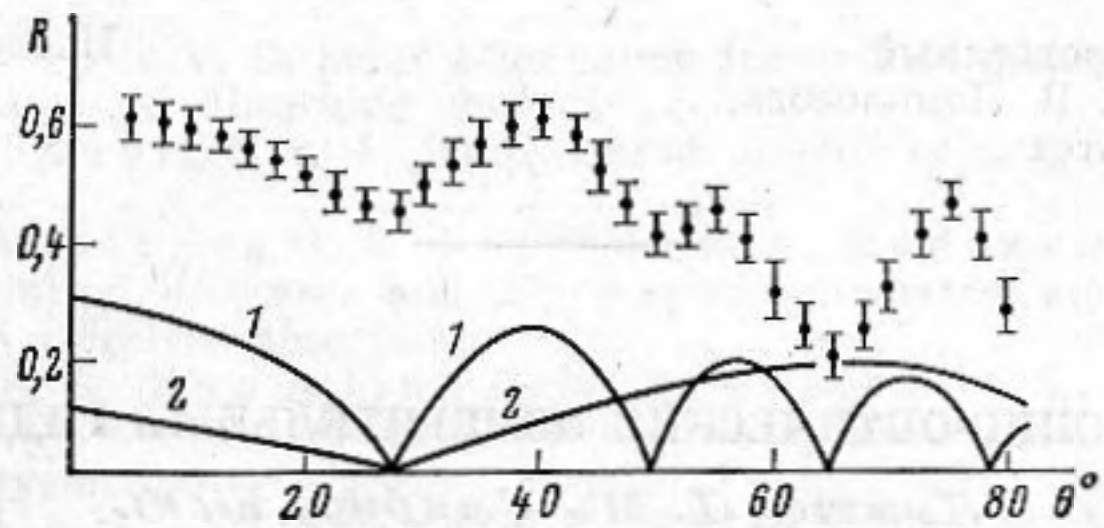
Королев С. В., Красильников В. А., Крылов В. В.

В работах [1, 2] было теоретически показано, что при наклонном падении рэлеевской волны на малые протяженные неоднородности поверхности существует такой угол падения $\theta_Б$, при котором отраженная волна отсутствует в первом приближении по h/λ_R, где h – глубина неоднородностей, а λ_R – длина волны Рэлея. При этом угол $\theta_Б$, являющийся аналогом известного угла Брюстера в оптике и акустике, не зависит от формы профиля неоднородностей и определяется выражением $\theta_Б=\arcsin(c_R/2c_t)$, где c_R и c_t – скорости рэлеевской и сдвиговой волн в рассматриваемой среде [1–3]. Нулевое отражение при $\theta=\theta_Б$ имеет место также в случае падения рэлеевской волны на периодическую решетку, составленную из указанных неоднородностей [1], в том числе при учете многократных переотражений между ними

[4, 5]. В случае падения поверхностных волн на трехмерные неоднородности роль угла $\theta_Б$ проявляется в том, что рассеянная поверхностная волна равна нулю при углах рассеяния $\Psi=\pi-2\theta_Б$ [6].

Несмотря на практическую важность описанного эффекта, особенно для акустоэлектронных устройств, использующих наклонное падение поверхностных волн на отражающие решетки [7], его прямое экспериментальное исследование до сих пор не проводилось. В настоящей заметке сообщается о таком экспериментальном определении угла $\theta_Б$.

Измерялись зависимости модуля коэффициента отражения рэлеевской волны от угла падения $R(\theta)$ для системы из нескольких периодически расположенных канавок прямоугольного профиля, нанесенных механическим способом на центральный участок плоской поверхности алюминиевого диска. Диаметр диска составлял 300 мм, толщина – 20 мм. Параметры канавок – глубина h, ширина $2a$, расстояние между



Зависимости модуля коэффициента отражения рэлеевской волны от угла падения. *1* – расчет по (1), $N=4$, *2* – $N=1$

соседними канавками b и их количество N – выбирались из соображений достаточно надежной регистрации отраженного сигнала (обеспечение $R_{max}(\theta)\sim1$) и уверенной фиксации угла $\theta_Б$ (см. ниже). При этом частота f задавалась таким образом, чтобы в окрестности ожидаемого значения $\theta_Б$ (для алюминия $\theta_Б\sim27{,}8°$) выполнялось условие брэгговского отражения: $\cos\theta_Б=\lambda_R/2b$. В этом случае в соответствии с формулой, определяющей $R(\theta)$ [1]

$$R(\theta)=CN\frac{h}{\lambda_R}\left|\left(4\sin^2\theta-\frac{k_t^2}{k_R^2}\right)\sin(2ak_R\cos\theta)\,\frac{\sin(k_RbN\cos\theta)}{N\sin(k_Rb\cos\theta)}\right|, \qquad (1)$$

где $k_R=2\pi f/c_R$, $k_t=2\pi f/c_t$, а $C\sim1$ – константа, зависящая от коэффициента Пуассона среды, острота минимума при $\theta\sim\theta_Б$ увеличивается в N раз по сравнению со случаем одной канавки, что облегчает его регистрацию. Величину N, однако, нельзя выбирать слишком большой, так как область брэгговского отражения при этом сильно сужается. Из компромиссных соображений было выбрано $h=0{,}6$, $2a=0{,}87$, $b=1{,}74$ мм, $f=0{,}910$ МГц, $N=4$. Поверхностные волны в виде радиоимпульсов длительностью ~10 мкс возбуждались и принимались с помощью двух плексиглазовых клиновых преобразователей, которые могли перемещаться по плоской поверхности диска (вдоль его периметра) при соблюдении равенства угла отражения углу падения. Диаметр продольно колеблющихся пьезокерамических пластинок на клиновых преобразователях составлял 10 мм, а их центральная частота – 1 МГц при полосе пропускания по уровню 3 дБ$\sim$0,1 МГц. Контакт преобразователей с поверхностью диска осуществлялся с помощью эпоксидной смолы. При этом потери на двойное преобразование составляли $\sim$50 дБ. Измерения проводились многократно (по 10 серий) и обрабатывались статистически.

На фигуре точками представлены результаты измерений $R(\theta)$ для указанных выше значений параметров. Видно, что экспериментальная зависимость качественно весьма похожа на теоретическую (кривая *1*). Имеющееся превышение экспериментальных значений $R(\theta)$ над теоретическими и отличие минимумов от нуля может быть объяснено вкладом эффектов высших порядков по h/λ_R, который при использованных в эксперименте значениях $h/\lambda_R\sim0{,}2$ может оказаться довольно существенным, а также влиянием многократных переотражений и рассеяния в объем среды. Указанные механизмы не учитывались при выводе формулы (1). Что касается углов минимумов и максимумов $R(\theta)$, то они хорошо совпадают. Минимумы при $\theta\sim50$, 65 и 80° являются интерференционными. При изменении частоты f в пределах полосы пропускания преобразователей они меняли свое местоположение. Минимум же при $\theta\sim27{,}5°$, как и следовало ожидать, не смещался при изменении частоты. Уверенная регистрация этого минимума, по-видимому, может рассматриваться как экспериментальное подтверждение существования угла типа Брюстера для поверхностных волн.

Литература

1. *Бирюков С. В., Горышник Л. Л.* Отражение рэлеевской волны от локальных неоднородностей поверхности при наклонном падении.– Акуст. журн., 1977, т. 23, № 3, с. 461–462.

2. *Otto O. W.* Scattering of Rayleigh waves from topographic irregularities at oblique incidence.– J. Appl. Phys., 1977, v. 48, № 12, p. 5105–5110.
3. *Бирюков С. В.* Аналоги углов Брюстера для упругих поверхностных волн.– Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 4, с. 222–226.
4. *Лапин А. Д.* Отражение рэлеевской волны от периодических неровностей при наклонном падении.– Акуст. журн., 1979, т. 25, № 5, с. 766–770.
5. *Григорьевский В. И., Плесский В. П.* Брэгговское отражение рэлеевской волны от периодически неровного участка поверхности упругого тела при наклонном падении волны.– Письма в ЖТФ, 1979, т. 5, № 22, с. 1398–1400.
6. *Полевой В. Г.* Рассеяние акустических поверхностных волн на трехмерных неоднородностях границы.– Акуст. журн., 1983, т. 29, № 1, с. 91–95.
7. *Уильямсон Р.* Фильтры с отражающими решетками.– В кн.: Фильтры на поверхностных акустических волнах/Под ред. Мэтьюза Г. М.: Радио и связь, 1981, с. 340–398.

Московский государственный
университет им. М. В. Ломоносова,
физический факультет

Поступило в редакцию
28.VI.1984

УДК 681.7.068

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ГИДРОФОН

Лямшев Л. М., Смирнов Ю. Ю.

В настоящему времени разработан ряд конструкций волоконно-оптических приемников звука (и волоконно-оптических гидрофонов в том числе), использующих различные механизмы модуляции света звуком [1]. К числу довольно распространенных конструкций относятся поляризационные приемники с приемным элементом в виде цилиндрического каркаса, на который навит одномодовый волоконный световод [2–4]. В основе рассмотренного ниже волоконно-оптического гидрофона (ВОИГ) лежит именно такая конструкция. На фиг. 1 изображена блок-схема ВОИГ, в котором в качестве цилиндрического каркаса использован отрезок толстостенной цилиндрической трубки.

Принцип действия ВОИГ состоит в следующем. Известно, что волоконный световод, навитый на цилиндрический каркас или свитый в кольцо, обладает двулучепреломлением [2], т. е. световая волна, поляризованная в плоскости кольца и перпендикулярно ей, имеет различные постоянные распространения. Поэтому звуковая волна, воздействующая на световод, по-разному меняет фазы компонент световой волны, имеющих разные поляризации. Влияние звуковой волны таким образом, приводит к изменению состояния поляризации света на выходе световода. Это изменение регистрируется поляризационно-чувствительным фотоприемником, на выходе которого появляется электрический сигнал звуковой частоты.

Функционально гидрофон разделен на 4 части (фиг. 1). Первоначально источником света служил He-Ne лазер ЛГ-52, а фотоприемником – ФЭУ-128. В последующих экспериментах они были заменены соответственно на полупроводниковый лазер и фотодиод (фиг. 2). В систему ввода и вывода оптического излучения входят четвертьволновая пластина *2*, поляроиды *3*, *6*, объективы *4*, *5*. Четвертьволновая пластина *2* на входе в световод преобразует линейно-поляризованный свет в световую волну круговой поляризации. Поляроид *3* обеспечивает ввод оптического излучения в область акустооптического взаимодействия под оптимальным углом поляризации. Поляроид *7* осуществляет преобразование поляризационно-модулированного светового сигнала на выходе световода в амплитудно-модулированный.

Аналогично тому как это сделано в работе [2], можно показать, что чувствительность ВОИГ вычисляется по формуле $M={}^1/_2P\cdot\sin 2\varphi_0\cdot\sin 2\varphi\cdot\sin(\Delta\beta\cdot l)\cdot G\cdot S_к\cdot R_н\cdot\Delta\Psi$, где P – интенсивность света на выходе световода φ_0, φ – соответственно углы ориентации поляроидов на входе и выходе световода относительно оси цилиндра, $\Delta\beta$ – величина линейного двулучепреломления в изогнутом световоде, l – длина акустооптического взаимодействия, G – усиление фотоприемника, $S_к$ – чувствительность фотокатода, $R_н$ – сопротивление нагрузки, $\Delta\Psi=\delta(\Delta\beta\cdot l)$ – наведенная акустической волной разность фаз взаимноперпендикулярных поляризаций. Из формулы для чувствительности следует, что поляроиды на входе и выходе световода должны быть ориентированы под углом 45° к главным осям напряжений в световоде. Кроме того, должно выполняться условие $\Delta\beta\cdot l=\pi/2(2m+1)$, где m – целое.

С учетом приведенных условий для каркаса в виде толстостенной трубки, используя результаты работы [2], можно приближенно записать $M={}^1/_2P\cdot G\cdot S_к\cdot R_н\cdot 4{,}9\cdot 10^6\cdot\rho\cdot l/3K\cdot b$, где K – модуль объемного сжатия материала каркаса, ρ – радиус световода, b – внешний радиус цилиндрического каркаса.

Использование резины, обладающей малым модулем объемного сжатия, в качестве материала каркаса позволяет увеличивать деформацию световода в поле звуковой волны и получать повышенную чувствительность приемника звука. Основные характеристики описанного ВОИГ такие: полоса рабочих частот 200–500 Гц, пороговая чувствительность $5\cdot10^{-4}$ Па, динамический диапазон 50 дБ, чувствительность 100 мВ/Па, неравномерность диаграммы направленности не более 1,6 дБ.