

07;08;12

## Взаимодействие света с акустическими волнами, возбуждаемыми синфазным многоэлементным преобразователем в диапазоне 1.0–2.5 GHz

© М.А. Григорьев, А.В. Толстиков, Ю.Н. Навроцкая

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,  
410012 Саратов, Россия  
e-mail: magrig@sgu.ru

(Поступило в Редакцию 20 сентября 2005 г.)

Исследовано взаимодействие слабо расходящегося пучка света и звуковой волны, возбуждаемой на частотах 1–2.5 GHz синфазным многоэлементным электроакустическим пьезопреобразователем. Пьезоэлектриком служит пластинка  $\text{LiNbO}_3$  ( $Y + 36^\circ$ )-среза, закрепленная с помощью металлических „подслоев“ (Cr, Cu, In, Cu, Cr) на поверхности звуковода из  $\text{LiNbO}_3$  X-среза. Синфазная структура преобразователя образуется „верхними“ электродами, соединенными между собой короткими проводниками. Сигнал подводится коаксиальным ступенчатым переходом. Рассчитаны частотные зависимости коэффициента электроакустического преобразования и эффективности акустооптического взаимодействия. Описаны установка, методика измерений и результаты эксперимента.

PACS: 43.35.Ud

### Введение

Пьезопреобразователь возбуждает в звукопроводе упругие волны, характеризующиеся определенным угловым спектром. В случае акустооптического (АО) дефлектора при направлении плоской световой волны на упругую волну заданной частоты лишь одна из составляющих этого спектра удовлетворяет условию Брэгга. При изменении частоты брэгговскому условию начинает удовлетворять уже другая составляющая. Именно поэтому дифрагированный свет при неподвижных звукопроводе и источнике света наблюдается в некоторой полосе частот. Ширина последней тем больше, чем шире угловой спектр. Увеличение диапазона рабочих частот дефлектора может достигаться расширением углового спектра за счет сокращения размера преобразователя. Однако „размазывание“ электромагнитной (ЭМ) мощности, подводимой к преобразователю, по составляющим углового спектра, приводит к падению эффективности АО-взаимодействия. Положение усугубляется еще и тем, что уменьшение размера преобразователя вызывает снижение предельно допустимой ЭМ-мощности, подаваемой на преобразователь.

Улучшить это положение можно, применив многоэлементные электроакустические преобразователи (МЭАП). Известно, что последние возбуждают сканирующие, в зависимости от частоты, акустические пучки. Это позволяет применять их в АО-устройствах для увеличения диапазона частот, в котором наблюдается АО-взаимодействие за счет автоподстройки „под угол Брэгга“. Заодно удастся увеличить общую площадь преобразователя и поднять допустимую ЭМ-мощность подводимого сигнала.

Принципы использования МЭАП с указанной целью проанализированы в работе [1]. В основу анализа положена идея о представлении таких преобразователей как

периодических волноведущих структур, электромагнитное поле которых описывается суммой пространственных гармоник. АО-взаимодействие при этом рассматривается как взаимодействие света со сканирующей в зависимости от частоты парциальной упругой волной, возбуждаемой какой-либо одной из пространственных гармоник. При реализации широкополосных АО-устройств стремятся создать многоэлементную структуру, в которой соседние пьезоэлементы возбуждаются со сдвигом по фазе, зависящем от частоты по закону, максимально приближенному к оптимальному [1]. Это существенно усложняет конструкцию МЭАП и затрудняет ее реализацию. К тому же использование пьезоэлектрических пленок, напыляемых в вакууме, с невысоким коэффициентом электроакустической связи, также затрудняет получение эффективных и широкополосных преобразователей.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование АО-взаимодействия в случае применения простейшего варианта МЭАП, у которого все пьезоэлементы возбуждаются синфазно (СФ). Такой преобразователь характеризуется диаграммой направленности, плоскость симметрии которой перпендикулярна продольной оси многоэлементной структуры. Центральный лепесток диаграммы остается неподвижным при изменении частоты, а боковые — сканируют. Последнее обстоятельство может быть использовано для осуществления автоподстройки „под угол Брэгга“. Тот факт, что на долю центрального, несканирующего, лепестка приходится наибольшая часть излучаемой акустической мощности, является главным недостатком СФ-преобразователя. Здесь мы намереваемся выяснить целесообразность применения в АО-дефлекторе синфазного МЭАП. Исследования выполняются для конкретного случая, когда пьезоэлектриком служит пластинка

из  $\text{LiNbO}_3$  ( $Y + 36^\circ$ )-срезы, возбуждающая продольные объемные упругие волны, а фотоупругой средой — ниобат лития  $X$ -срезы.

Нам представляется, что СФ-преобразователь выгодно отличается от других типов МЭАП простотой реализации. Полезно выяснить, какова будет в таком случае АО-эффективность дефлектора.

## Синфазный многоэлементный преобразователь

Простейший СФ МЭАП представляет собой пьезоэлектрическую пластину, заключенную между двумя электродами, с помощью которых в ней создается сигнальное электрическое поле. Нижний сплошной, электрод одновременно служит связкой между звукопроводом и пьезопластиной. Верхний выполнен в виде периодической последовательности металлических полос, электрически соединенных между собой короткими проводниками. Если последние имеют небольшую длину, то их вкладом в полную проводимость МЭАП (адмитанс) можно пренебречь, а разность фаз колебаний любой пары элементов считать равной нулю. Адмитанс такого преобразователя равен сумме адмитансов отдельных элементов, что оправдывается малыми размерами преобразователя в целом по сравнению с длиной электромагнитной волны.

Период  $l$  СФ-преобразователя, обеспечивающего автоподстройку „под угол Брэгга“, вычисляется [2] по формуле

$$l = 2nv_{\text{su}}^2/f_0^2\lambda_0, \quad (1)$$

где  $n$  — показатель преломления в звукопроводе,  $v_{\text{su}}$  — скорость звука в нем,  $f_0$  — центральная частота диапазона,  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме.

В случае, когда фотоупругой средой служит ниобат лития  $X$ -срезы, в котором возбуждается продольная упругая волны ( $v_{\text{su}} = 6.57 \cdot 10^3$  м/с), для необыкновенного света ( $\lambda_0 = 0.63 \mu\text{m}$ ,  $n = n_e = 2.2$ ), при  $f_0 = 1.75$  GHz, из (1) имеем  $l = 98 \mu\text{m}$ . В [2] показано, что для СФ МЭАП в приближении малых брэгговских углов необходимое число элементов, обеспечивающее заданную рабочую полосу частот дефлектора, определяется формулой

$$M \approx (5.57/\pi)(f_0/\Delta f)^2/2, \quad (2)$$

где  $\Delta f$  — полуширина рабочей полосы частот.

Если  $\Delta f = 0.3$  GHz, из (2) имеем  $M = 35$ . При этом полная длина МЭАП  $L_\Sigma = M \times l = 3.43$  mm, что почти в 50 раз меньше длины электромагнитной волны на центральной частоте. В таком случае волновым характером тока в соединительных проводниках допустимо пренебречь. Если к тому же учесть, что длины этих проводников составляют приблизительно половину периода МЭАП ( $\sim 50 \mu\text{m}$ ), то индуктивность их также можно считать пренебрежимо малой. В таком случае разность фаз колебаний любой пары элементов близка к нулю

( $\varphi = 0$ ) независимо от частоты, т.е. преобразователь можно считать синфазным.

Структура многоэлементного СФ-преобразователя, исследованного в настоящей работе, такова. На торце звукопровода ( $\text{LiNbO}_3$ ), перпендикулярном оси  $X$  кристаллографической системы координат, методом диффузионной сварки в вакууме была закреплена пластинка ниобата лития ( $Y + 36^\circ$ ) — среза с помощью следующих металлических слоев и соответствующих им толщин: хром — 0.03, медь — 0.04, индий — 0.78, медь — 0.04, хром — 0.03  $\mu\text{m}$ . Затем шлифованием и полировкой ее толщина была доведена до 1.8  $\mu\text{m}$ . С помощью пружины к ней прижимался верхний электрод, выполненный в виде гребенки прямоугольного профиля с периодом 98  $\mu\text{m}$ . Зубья последней имели размеры: высота  $\sim 10$ , длина вдоль преобразователя 40, ширина 200  $\mu\text{m}$ . Последняя величина была выбрана в результате анализа влияния поперечной расходимости акустического пучка на эффективность АО взаимодействия [3].

## Коэффициент электроакустического преобразования

Расчет показывает [4,5], что в нашем случае модуль импеданса анализируемого многоэлементного преобразователя  $|Z_{\text{MEAT}}|$ , состоящего из 35 элементов, на частоте 1.75 GHz близок к 1  $\Omega$ . В простейшем случае для передачи электромагнитной мощности от генератора к МЭАП обычно используется передающая линия без дополнительных реактивных согласующих устройств. Поглощаемая нагрузкой мощность достигает максимума, когда выбирается линия с волновым сопротивлением, равным модулю импеданса преобразователя [4]. Такую линию будем называть оптимальной. Для нее  $Z_{0,\text{opt}} = |Z_{\text{MEAT}}|$ . Для согласования стандартной линии ( $Z_0 = 50 \Omega$ ) с оптимальной ( $Z_{0,\text{opt}} \approx 1 \Omega$ ) в настоящей работе использовался коаксиальный трехступенчатый чебышевский переход. Полагая, что такое согласование реализуется в достаточно широкой полосе частот, для численного анализа свойств преобразователя мы воспользовались алгоритмом и программами работы [5],

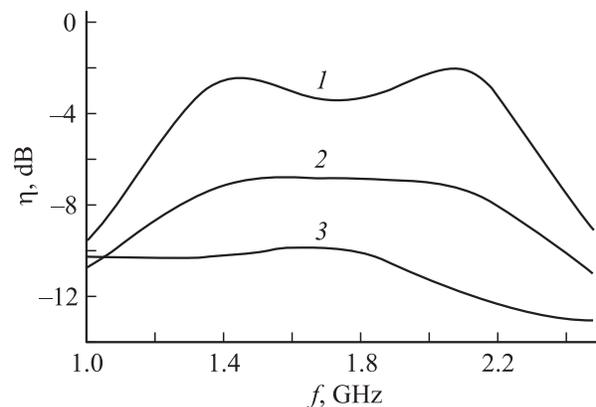


Рис. 1. Зависимости коэффициентов преобразования от частоты.

посвященной расчету коэффициента передачи многослойного пьезопреобразователя с тыльной акустической нагрузкой. На рис. 1 представлены полученные зависимости коэффициента преобразования  $\eta(f) = P_{ac}/P_{EM+}$  от частоты. Здесь  $P_{ac}$  — акустическая мощность возбужденной упругой волны,  $P_{EM+}$  — электромагнитная мощность прямой волны, подходящей по передающей линии к преобразователю. При анализе было принято:  $Z_{0,opt} = 1.0 \Omega$ , коэффициент электромеханической связи  $k = 0.49$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r = 60$ . Кривая 1 на рис. 1 соответствует случаю, когда гребенчатый электрод не состоит в акустическом контакте с пьезоэлектрической пластинкой, т.е. соответствующая граничная поверхность пьезоэлектрика считается акустически свободной. Кривые 2 и 3 представляют зависимости для электродов, находящихся в акустическом контакте с пьезопластинкой и, таким образом, являющихся одновременно тыльной акустической нагрузкой. Случай 2 — для гребенчатого электрода из алюминия, а 3 — из меди. Акустические волновые сопротивления для алюминия и меди принимались соответственно равными,  $kg/(mm^2s)$ : 17 и 42. Видно, что если электрод не является акустической нагрузкой на пьезоэлемент (кривая 1 на рис. 1), то максимальное расчетное значение величины  $\eta(f)$  составляет — 2.0 dB и не спадает больше, чем на 3 dB в диапазоне от 1.25 до 2.25 GHz. Во втором случае (кривая 2 на рис. 1), когда гребенка выполнена из Al, максимальный коэффициент преобразования  $\eta(f)$  падает до — 7 dB, а ширина полосы увеличивается на 0.3 GHz. В случае медной гребенки (кривая 3 на рис. 1) наибольшее значение  $\eta(f)$  опускается до —10 dB и смещается в сторону низких частот (0.9 GHz). Полоса „по уровню 3 dB“ заняла интервал от 0.4 до 2.2 GHz. Как и следовало ожидать, электрод из алюминия, обладая меньшим акустическим волновым сопротивлением, слабее влияет на эффективность преобразователя, чем медный.

Исследовалось также влияние паразитной шунтирующей емкости, обусловленной промежутками между пьезоэлементами, с воздушным заполнением. Для указанных выше размеров гребенки эта емкость не превышала 0.4 pF. Расчет показал, что она практически не влияет на эффективность преобразователя.

## Чебышевский ступенчатый переход

В настоящей работе использовался коаксиальный трехступенчатый чебышевский переход, согласующий линии с  $Z_0 = 50$  и  $1.6 \Omega$ . Коэффициент электроакустического преобразования не зависит от длины подводящей линии, согласованной с генератором, поэтому в описываемой здесь АО-ячейки СФ МЭАП соединялся непосредственно с выходной ступенькой перехода. Последняя имела волновое сопротивление  $2.43 \Omega$  при диаметре внутреннего проводника 3.77 mm. На его торце легко помещались 35 периодов гребенки. При заполнении линии фторопластом внешний проводник имел



Рис. 2. Внешний вид дефлектора.

диаметр 4 mm. Другие ступеньки имели волновые сопротивления 8.33 и  $28.5 \Omega$ . Чтобы сократить общую длину чебышевского перехода, его ступеньки располагались „друг в друге“. Таким образом удалось довести длину трехступенчатого перехода до  $\sim 40$  mm при наружном диаметре 21 mm. Внутренний проводник выходной ступеньки имел телескопическую конструкцию, раздвигаемую расположенной внутри пружинкой, что обеспечивало контролируемый прижим гребенки к пьезопластинке. Подвижная часть этого проводника была изготовлена из оксидированного дюралюминия, вместе с неподвижной частью она образовывала коаксиальный четвертьволновый трансформатор, в котором окись алюминия играла роль диэлектрического заполнения. Таким образом обеспечивалось бесконтактное соединение гребенки с центральным проводником выходной ступеньки чебышевского перехода. На рис. 2 представлен внешний вид дефлектора.

## Эффективность акустооптического взаимодействия

Эффективность АО-взаимодействия  $\eta_{AO}$  выражается формулой  $\eta_{AO} = I_d/(I_0 P_{EM+})$ , где  $I_d$  и  $I_0$  — интенсивности дифрагированного и падающего света соответственно,  $P_{EM+}$  — мощность электромагнитного сигнала, подводимого к преобразователю. Расчет величины  $\eta_{AO}$  выполнялся в приближении слабо расходящегося светового пучка по соотношениям и программам, взятым из работ [6,7]. В последней было получено выражение для эффективности АО-взаимодействия при использовании многосекционного преобразователя. В случае односекционного синфазного преобразователя с заданным числом элементов  $M$ , периодом  $l$  и длиной одного элемента  $L$  это выражение сводится к следующей формуле:

$$\eta_{AO} = K \left| \sqrt{L} \frac{\sin \Gamma}{\Gamma} e^{-j\Gamma} \sum_{\nu=1}^M \sqrt{P_{\nu}} e^{-j\Phi_{\nu}} \right|^2, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности:  $K = \pi^2 M_2 / 2\lambda_0^2 H \cos^2 \theta_B$ ,

$$\Gamma = \pi L f \sin[\theta_0 - \theta_B(f)] / v_{su},$$

$$\Phi_v = 2\pi f (v - 1) l \sin[\theta_0 - \theta_B(f)] / v_{su},$$

$f$  — частота,  $v$  — номер элемента,  $v_{su}$  — скорость звука,  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме,  $H$  — ширина преобразователя,  $M_2$  — коэффициент акустооптического качества,  $\theta_0$  — угол между направлением падающего света и плоскостью преобразователя,  $\theta_B(f)$  — брэгговский угол,  $P_v$  — мощность звука, излучаемого  $v$ -м пьезоэлементом,

$$P_v = \eta(f) P_{EM+} / M.$$

Чтобы выявить преимущества применения СФ МЭАП в АО-дефлекторе, следует сопоставить его с одиночным пьезопреобразователем. Для тех же звукопровода, пьезоэлектрика, подслоев и надслоев, что и в исследуемом СФ МЭАП, формула (3) для одиночного преобразователя ( $M = 1$ ,  $\theta_0 = \theta_B(f_0 = 1.75 \text{ GHz}) = 3.81 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$ ,  $P_{EM+} = 1 \text{ W}$ ) дает типичную колоколообразную кривую  $\eta_{AO}(f)$ . Ширина последней на уровне, отстоящем на 3 dB от максимума, определяется длиной пьезоэлемента  $L$ . При  $L = 300 \mu\text{m}$  она совпадает с половиной рабочих частот АО-дефлектора, использующего СФ МЭАП с числом элементов  $M = 35$ ,  $2\Delta f = 0.6 \text{ GHz}$ . При  $H = 200 \mu\text{m}$  площадь одиночного пьезоэлемента составляет  $0.06 \text{ mm}^2$ . В случае, когда верхний электрод не состоит в акустическом контакте с пьезоэлектриком, волновое сопротивление оптимальной линии равно  $\sim 4.6 \Omega$ , а коэффициент электроакустического преобразования  $\eta(f)$  составляет  $\sim -2 \dots -3 \text{ dB}$ . Кривая АО-эффективности в максимуме достигает 6.5%, спадая на краях полосы до 3.5%. Если допустить, что верхний электрод акустически контактирует с пьезоэлектрической пластиной, то его можно рассматривать как тыльную нагрузку. Если последняя изготовлена из меди, то, как показывает расчет, модуль импеданса преобразователя, а следовательно и оптимальное волновое сопротивление передающей линии, при  $f_0 = 1.75 \text{ GHz}$  становится равным  $5.0 \Omega$ . При этом коэффициент преобразования  $\eta(f)$  спадает до  $-9 \dots -12 \text{ dB}$ . Эффективность АО-взаимодействия уменьшается в максимуме до 1.4, а на краях полосы — до 0.7%.

При анализе СФ МЭАП в каждой точке по частоте, согласно применяемому алгоритму, вычислялся электрический адмитанс всех пьезоэлементов с пятью указанными выше подслоями, с тыльной акустической нагрузкой и без нее. Затем, в предположении оптимального волнового сопротивления передающей линии, находилась акустическая мощность, излучаемая каждым в отдельности пьезоэлементом  $P_v$  и, наконец, по формуле (3) вычислялась дифракционная эффективность. Считалось, что фотоупругим звукопроводом служит кристалл  $\text{LiNbO}_3$  X-среза, в котором акустическая волна

распространяется вдоль оси  $x_1$  кристаллофизической системы координат. Считалось также, что необыкновенный световой пучок ( $\lambda_0 = 0.63 \mu\text{m}$ ) вводится в звукопровод через грань, перпендикулярную направлению, повернутому вокруг оси  $x_1$  на угол  $36^\circ$  от оси  $x_2$ . При выборе указанной ориентации использовались результаты работы [8], посвященной расчету эффективности дифракции света на чистых модах упругих волн в ряде кристаллов. Вектор электрического смещения световой волны в этом случае лежит в плоскости оптической оси (ось  $x_3$ ) и волнового вектора падающего света (главное сечение кристалла). В анализе использовалось расчетное значение коэффициента качества  $M_2 = 7.69 \cdot 10^{-15} \text{ s}^3/\text{kg}$ , вычисленное в [8]. Для автоподстройки „под угол Брэгга“ использовался первый боковой лепесток в угловом спектре излучения СФ МЭАП. По терминологии работы [1] это означает, что использовалась пространственная гармоника с номером  $m = 1$ . Направление падающего света внутри фотоупругой среды задавалось углом  $\theta_0$  относительно торца звукопровода [1].

$$(\theta_0) = \arcsin \left[ \frac{v_{su}}{fl} \right] + \arcsin \left[ \frac{\lambda_0 f}{2n_e v_{su}} \right].$$

В этой формуле первое слагаемое есть угол  $\alpha_m$  между торцом звукопровода и фронтом упругой волны, возбуждаемой пространственной гармоникой с номером  $m = +1$ , а второе — брэгговский угол  $\theta_B$ .

Для рассматриваемого здесь случая и центральной частоты  $1.75 \text{ GHz}$   $\alpha_{m=+1} = 3.83 \cdot 10^{-2}$ ,  $\theta_B = 3.81 \cdot 10^{-2}$ ,  $\theta_0 = 7.65 \cdot 10^{-2} \text{ rad}$  ( $4.48^\circ$ ). Легко видеть, что дифрагированный свет в этом случае должен выходить из фотоупругого звукопровода под углом  $\sim 90^\circ$  к его боковой поверхности. Мощность, отдаваемая генератором в согласованную нагрузку  $P_{EM+1}$ , принималась равной  $1 \text{ W}$ . Для увеличения частотной полосы дефлектора выбирались углы падения  $\theta_{01}$ , при которых кривая  $\eta_{AO}(f)$  приобретала двугорбый вид с провалом на 3 dB ниже максимального значения. Результаты вычисления зависимостей  $\eta_{AO}(f)$  представлены на рис. 3. Кривая 1 соответствует случаю, когда гребенчатый

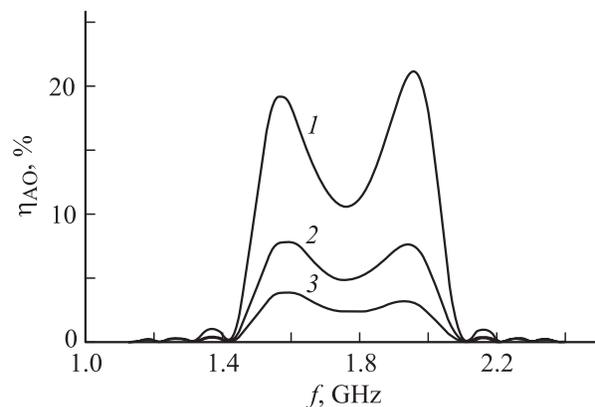


Рис. 3. Зависимости эффективности АО-взаимодействия от частоты.

электрод акустически не связан с пьезопластиной, а две другие — когда электрод контактирует с ней и изготовлен из Al (кривая 2) или Cu (кривая 3). Видно, что при отсутствии связи электрода с пьезоэлектриком расчетная АО-эффективность достигает 21%, спадая до 10.5% в середине диапазона (1.75 GHz) и на краях (1.49 и 2.04 GHz). Асимметрия кривой объясняется тем, что длина АО-взаимодействия, выраженная в длинах акустических волн, растет с увеличением частоты, и поэтому эффективность также растет с частотой. В случаях гребенок, состоящих в акустическом контакте с пьезоэлектриком, величина  $\eta_{АО}$  существенно уменьшилась. Для алюминиевого электрода максимальное значение  $\eta_{АО}$  опустилось до 7.5, а минимальное — до 4.0%; для медного соответственно до 3.5 и 2.5%. Что касается ширины полосы частот „до уровня 3 dB“, то она практически не изменилась.

В итоге следует отметить, что в случае, когда верхний электрод не состоит в акустическом контакте с пьезоэлектриком, одиночный преобразователь обеспечивает в  $\sim 3$  раза меньшую АО-эффективность, чем СФ МЭАП при равных частотных полосах ( $\sim 0.6$  GHz). Если же верхний электрод изготовлен из меди и является тыльной акустической нагрузкой, то АО-эффективность для одиночного преобразователя в 2.4 раза меньше, чем в случае СФ МЭАП.

Заметим также, что синфазный многоэлементный преобразователь по сравнению с одиночным обладает увеличенной в 4.4 раза площадью пьезоэлектрика. Это позволяет подводить к нему значительно большую мощность электромагнитного сигнала.

## Экспериментальная установка

На рис. 4 изображена схема экспериментальной установки для исследования АО-взаимодействия. Акустооптическая ячейка 1 располагалась на вращающемся столике 2 оптической скамьи, что позволяло изменять ее угловое положение по отношению к падающему пучку света 3. Последний от гелий-неонового лазера 4 направлялся на АО-ячейку под углом  $\sim 85.5^\circ$  к боковой поверхности кристалла  $\text{LiNbO}_3$ . Дифрагированный световой пучок 5 сквозь тубус 6, со щелевой диафрагмой

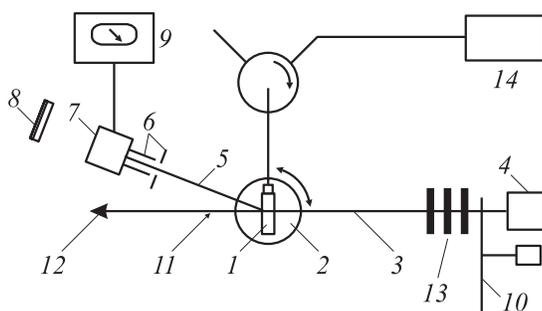


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования АО-взаимодействия.

на входе, попадал на фотодиод 7 или на экран 8. Напряжение на нагрузочном сопротивлении фотодиода измерялось селективным вольтметром 9, настроенным на частоту модуляции оптического пучка ( $\sim 1$  kHz). Последняя осуществлялась с помощью механического модулятора 10. Неотклоненный свет 11 направлялся на поглотитель 12. Падающий световой пучок мог ослабляться с помощью набора нейтральных светофильтров 13 (марки НС ГОСТ 9411–81). Ослабление света в указанных оптических стеклах измерялось с помощью спектрофотометра CARY 2415 „Varian“. СВЧ-сигнал подводился к преобразователю от генератора 14 с выходной мощностью  $\sim 1$  W.

## Методика измерения дифракционной эффективности

Как указано выше, дифракционная эффективность определяется тремя величинами:  $I_d$ ,  $I_0$  и  $P_{EM+}$ . Вместо непосредственного измерения интенсивностей дифрагированного и падающего света  $I_d$  и  $I_0$  измерялись фототоки  $i_d$  и  $i_0$ , текущие в цепи фотодиода, при направлении на него соответствующих световых пучков. Зависимость фототока от мощности падающего на диод света исследовалась с помощью калиброванных нейтральных светофильтров, было установлено, что при небольшом уровне световой мощности эта зависимость имеет почти линейный характер. Когда интенсивность сравниваемых световых пучков отличалась более, чем на 3 dB, для уменьшения ошибки уровни фототоков, получаемых от сопоставляемых пучков, выравнивались за счет введения дополнительных калиброванных светофильтров 13 (см. рис. 4).

Следует отметить, что поперечный размер падающего светового пучка заметно превышал ширину МЭАП, поэтому с упругой волной взаимодействовала лишь часть исходного света. Чтобы правильно измерить фототок, обусловленный падающим светом, на фотодиод направлялся лазерный пучок, прошедший последовательно через звукопровод и щелевую диафрагму. Последняя размещалась в непосредственной близости от звукопровода. Ширина щели в диафрагме выбиралась равной ширине преобразователя, т.е.  $200 \mu\text{m}$ . При измерении фототока, вызванного дифрагированным светом, диафрагма удалялась. Эффективность дифракции  $\eta_{АО}$  рассчитывалась по формуле

$$\eta_{АО} = (1/P_{EM+})(i_d/i_0) \cdot 10^{(-A/10)},$$

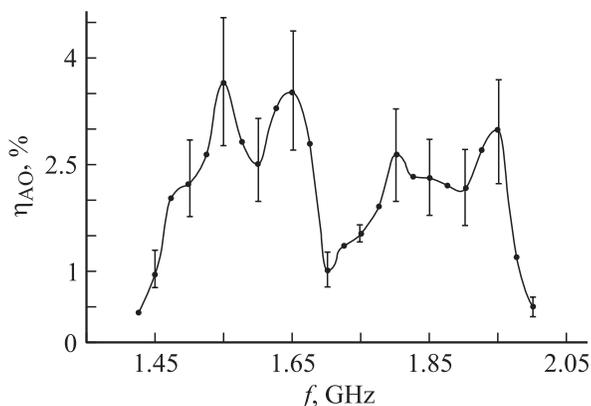
где  $A$  — ослабление нейтральных светофильтров в децибелах,  $i_d/i_0$  — отношения фототоков при регистрации дифрагированного и падающего света,  $P_{EM+}$  — ЭМ-мощность сигнала, подводимого к АО-ячейке. Последняя при перестройке частоты измерялась термисторным измерителем с калиброванным аттенуатором на входе.

Для получения максимально возможной ширины полосы частот АО-взаимодействия акустооптическая ячейка предварительно настраивалась по углу на максимум

интенсивности дифрагированного света на центральной частоте рабочего диапазона, затем поворотом ячейки угол падения света плавно увеличивался так, чтобы интенсивность дифрагированного света уменьшилась на 3 дБ по сравнению с максимальным значением. После этого положение ячейки фиксировалось. Такая процедура преследовала цель экспериментально найти „геометрию“ АО-взаимодействия, при которой частотная характеристика приобретает „двугорбый“ вид с провалом на 3 дБ в центре, что расширяет рабочую полосу частот дефлектора.

## Экспериментальные результаты

В исследуемом дефлекторе гребенка была изготовлена из меди с помощью электроискровой обработки. Торцы зубьев, которыми гребенка касалась пьезопластины, формовались прижиманием к плоской, тщательно отполированной поверхности кристалла рубина. При этом подбиралось прижимное усилие, обеспечивающее сглаживание всех микровыступов и образование единой плоской поверхности торцов зубьев гребенки. Размеры гребенки и обоснование их выбора даны выше в разделе „Синфазный преобразователь“. На рис. 5 представлена экспериментальная зависимость эффективности АО-взаимодействия от частоты. Изрезанный характер полученной кривой объясняется погрешностями измерений. Их многократное повторение при частоте 1.75 GHz дало возможность найти относительную среднеквадратичную ошибку отдельного измерения, она оказалась равной  $\pm 24\%$ . На рис. 5 показаны доверительные интервалы, соответствующие этой ошибке, распространённой на все экспериментальные точки кривой. Ошибка среднего арифметического для частоты 1.75 GHz составила  $\sim 7\%$ . С учетом указанных погрешностей полученные результаты подтверждают правильность теоретических оценок, сделанных выше (см. кривую 3 на рис. 3).



**Рис. 5.** Экспериментальная зависимость эффективности АО-взаимодействия от частоты.

## Выводы

В работе исследовался случай, когда пьезоэлектриком служила пластинка из  $\text{LiNbO}_3$  ( $Y + 36^\circ$ )-срезы, а фотоупругой средой — ниобат лития X-срезы. Теоретически и экспериментально продемонстрирована работа синфазного МЭАП в АО-дефлекторе диапазона 1.5–2.0 GHz. Рассмотренный многоэлементный пьезопреобразователь, выгодно отличаясь от МЭАП других типов простотой реализации, способен обеспечить  $\sim$  в 3 раза более высокую АО-эффективность, чем одноэлементный. Площадь синфазного МЭАП в 4.4 раза больше одноэлементного, что позволяет существенно повысить предельно допустимую мощность подводимого к преобразователю сигнала. Полученные экспериментальные характеристики дефлектора удовлетворительно согласуются с теоретическими. Результаты работы могут быть использованы при разработке акустооптических дефлекторов дециметрового диапазона радиоволн.

Авторы благодарят Д.С. Локтева за выполнение измерений акустооптической эффективности.

## Список литературы

- [1] Григорьев М.А., Зюрюкин Ю.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 23. № 8. С. 948–957.
- [2] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 7. С. 908–921.
- [3] Григорьев М.А., Навроцкая Ю.Н., Прохоров В.В., Петров В.В., Толстиков А.В. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 2. С. 307–311.
- [4] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35. № 9. С. 1977–1987.
- [5] Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.Н. // Акустич. журнал. 2002. Т. 48. № 2. С. 187–194.
- [6] Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.Н. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 10. С. 70–76.
- [7] Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.Н. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 11. С. 59–68.
- [8] Браже Р.А., Григорьев М.А., Наянов В.И. // ФТТ. 1975. Т. 17. Вып. 3. С. 886–895.