АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXI 1985 Вып. 1

УДК 548.0:539.21

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО МИКРОФОНА НА НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

Виноградова Э. Л., Капустина О. А., Решетов В. Н., Свет В. Д., Яковенко Г. Н.

Экспериментально исследованы некоторые характеристики микрофона с активным элементом в виде ориентированного слоя нематического жидкого кристалла (НЖК). Описан один из возможных вариантов микрофона, в котором использовались сдвиговые деформации жидкокристаллического слоя.

Интерес к оптическим микрофонам возродился в связи с появлением лазеров и световодов для передачи оптического излучения, а также с проведением обширных исследований акустооптических эффектов в различных средах и, в частности, в жидких кристаллах [1]. На одном из таких эффектов [2] основана работа оптического микрофона, характеристики которого исследованы в настоящей работе.

Принцип акустооптического преобразования состоит в том, что под действием периодических сдвиговых колебаний слоя НЖК, вызванных звуковым полем, происходят периодические изменения его структуры. Вследствие анизотропии гидродинамических свойств НЖК сдвиговые деформации приводят к появлению осциллирующего вращающего момента, который вызывает заметную переориентацию молекул жидкого кристалла из-за их большой подвижности. Благодаря значительной анизотропии показателей преломления НЖК эти явления легко фиксируются по изменению поляризации проходящего через слой светового потока. Таким образом, используя систему поляроидов, можно получить световой поток, интенсивность которого промодулирована звуковым полем.

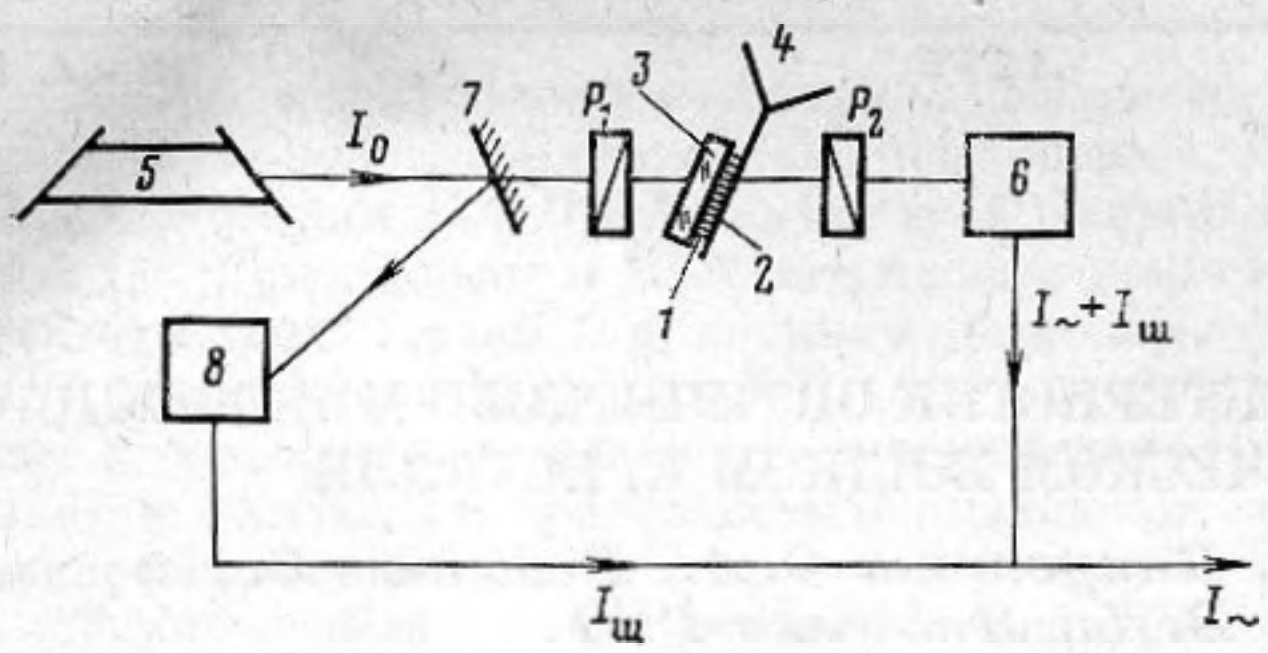
Схема оптического микрофона изображена на фиг. 1. Слой НЖК *1* (смесь МББА+ЭББА) заключен между двумя стеклянными пластинами *2* и *3*. Гомеотропная ориентация молекул осуществлялась путем введения в объем лецитина. Одна из ограничивающих слой пластин *2* жестко связана с подвижным приемным элементом *4*, выполненным на основе диффузора малогабаритного громкоговорителя. Под действием звукового поля диафрагма *4* и пластина *2* приходят в движение, передавая колебания слою НЖК и вызывая в нем поворот молекул на некоторый угол $\varphi(t)$ (фиг. 2). Луч света от лазера *5* последовательно проходит поляризатор P_1, слой жидкого кристалла, анализатор P_2 и попадает на фотодиод *6*. Для уменьшения шумов, связанных с флуктуациями интенсивности лазерного излучения, в оптическую схему с помощью полупрозрачного зеркала *7* введен фотодиод *8*, включенный по дифференциальной схеме с фотодиодом *6*. Свет проходит через жидкий кристалл под отличным от нуля углом φ_0 к оптической оси. Выбор $\varphi_0 \neq 0$ связан с оптимизацией акустооптических параметров микрофона и будет обоснован ниже.

В случае, если колебания пластины происходят вдоль оси x, а директор[1] ориентирован по оси z, характер его движения описывается следующим уравнением [3, 4]:

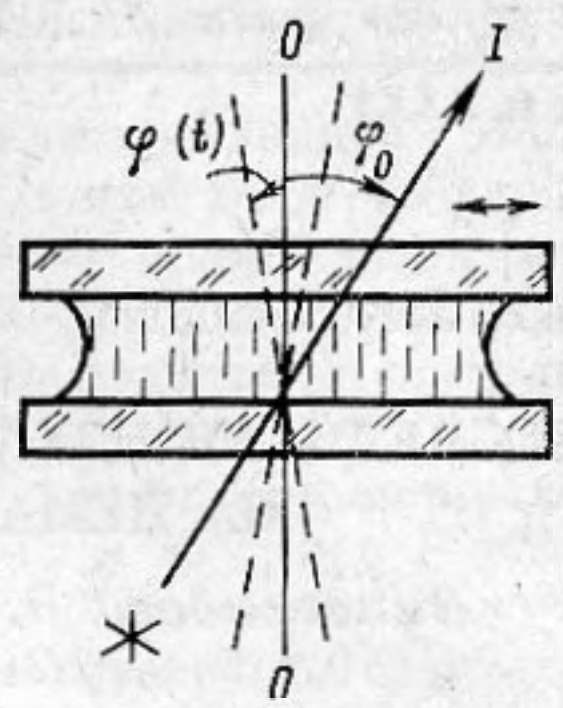
$$(\alpha_2-\alpha_3)\dot{\varphi}=\alpha_2\frac{\partial V_x}{\partial z}-K_{33}\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2},$$

где $V_x(z)$ — сдвиговая скорость, α_2, α_3 — коэффициенты вязкости Лесли,

[1] Преимущественное направление ориентации длинных осей молекул в каждой точке среды характеризуется единичным вектором — директором.



Фиг. 1. Блок-схема установки



Фиг. 2. Жидкокристаллический элемент

K_{33} — модуль упругости Франка.

В диапазоне звуковых частот длина вязкой волны в жидком кристалле $\lambda_{вяз}$ значительно превышает толщину слоя d: $\lambda_{вяз}\sim(\eta/\rho\omega)^{1/2}\gg d$, а область σ, на которую распространяется ориентирующее влияние ограничивающих поверхностей, пренебрежимо мала: $\sigma\sim(K_{33}/\eta\omega)^{1/2}\ll d$ (η — вязкость, ω — частота колебаний). При этих условиях реализуется куэттовское течение с линейным профилем скорости, и поворот директора определяется смещением пластины $\xi(t)=\xi_0\sin\omega t$:

$$\varphi(t)\simeq\xi(t)/d. \tag{1}$$

Интенсивность света I, прошедшего жидкий кристалл, заключенный между скрещенными поляроидами, когда угол между плоскостью поляризации и направлением сдвига составляет 45°, определяется выражением [5] $I=I_0\sin^2\delta/2$, где $\delta=k_0(d/\cos\varphi_0)\Delta n\sin^2[\varphi_0+\varphi(t)]=\Delta\sin^2[\varphi_0+\varphi(t)]$; I_0 — интенсивность падающего света; k_0 — волновое число света; $\Delta n=n_e-n_0$ — оптическая анизотропия. Разлагая функцию $I(t)$ в ряд по степеням $\varphi(t)$ и ограничиваясь членами третьей степени, получаем

$$I(t)=I_0[C_0(\varphi_0)+C_1(\varphi_0)\varphi(t)+\frac{1}{2!}C_2(\varphi_0)\varphi^2(t)+\frac{1}{3!}C_3(\varphi_0)\varphi^3(t)+o[\varphi^3(t)]. \tag{2}$$

На фиг. 3 приведена теоретическая зависимость прозрачности системы I/I_0 от угла φ_0 между оптической осью кристалла и направлением распространения света в отсутствие звука (при $\varphi(t)=0$). Из анализа выражения (2) с учетом зависимости, приведенной на фиг. 3, следует, что существует ряд углов $\varphi_0=\varphi_{0i}$, при которых реализуется наибольшая чувствительность микрофона. Эти значения углов соответствуют областям квазилинейного преобразования, причем крутизна характеристики преобразования закономерно увеличивается с ростом номера i.

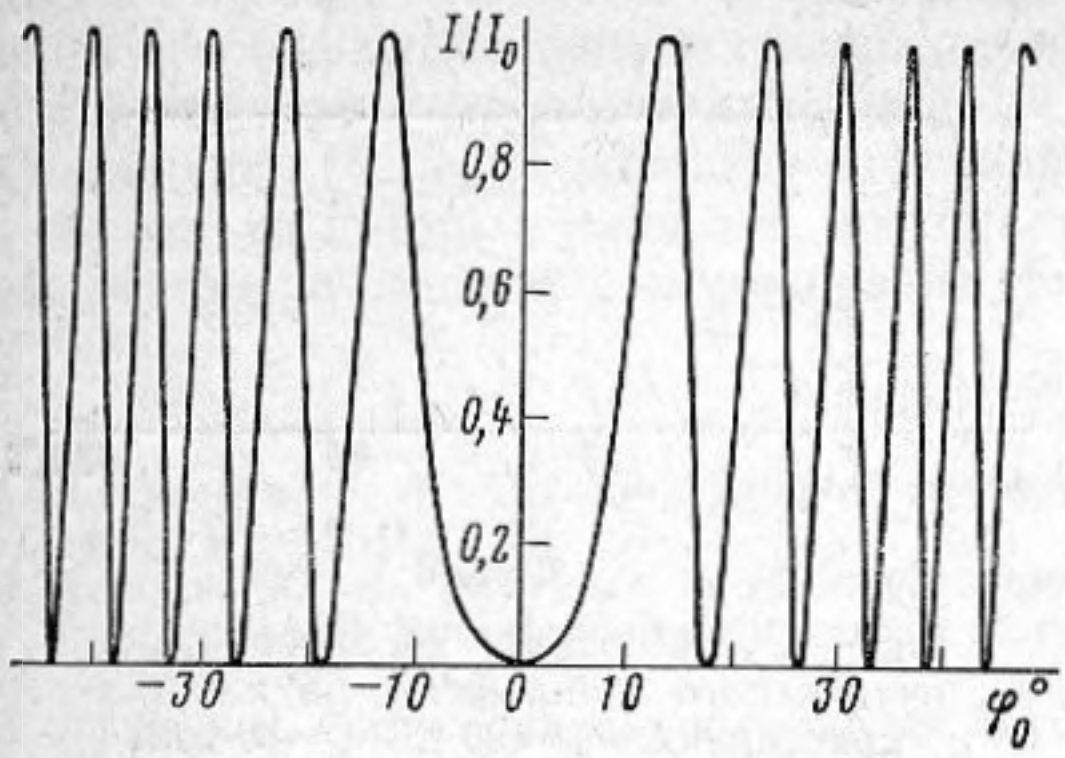
Точные значения углов φ_{0i}, обеспечивающих оптимальные условия акустооптического преобразования, находятся из условия $C_2(\varphi_0)=\frac{\Delta}{2}\times\times[\Delta\cos(\Delta\sin^2\varphi_0)\sin^2 2\varphi_0+2\sin(\Delta\sin^2\varphi_0)\cos 2\varphi_0]=0$. Учитывая, что $k_0d\Delta n\gg1$, имеем

$$\varphi_{0i}\simeq\pm\left(\frac{\pi(i+0{,}5)}{k_0d\Delta n}\right)^{1/2},\quad i=0,1,2\ldots. \tag{3}$$

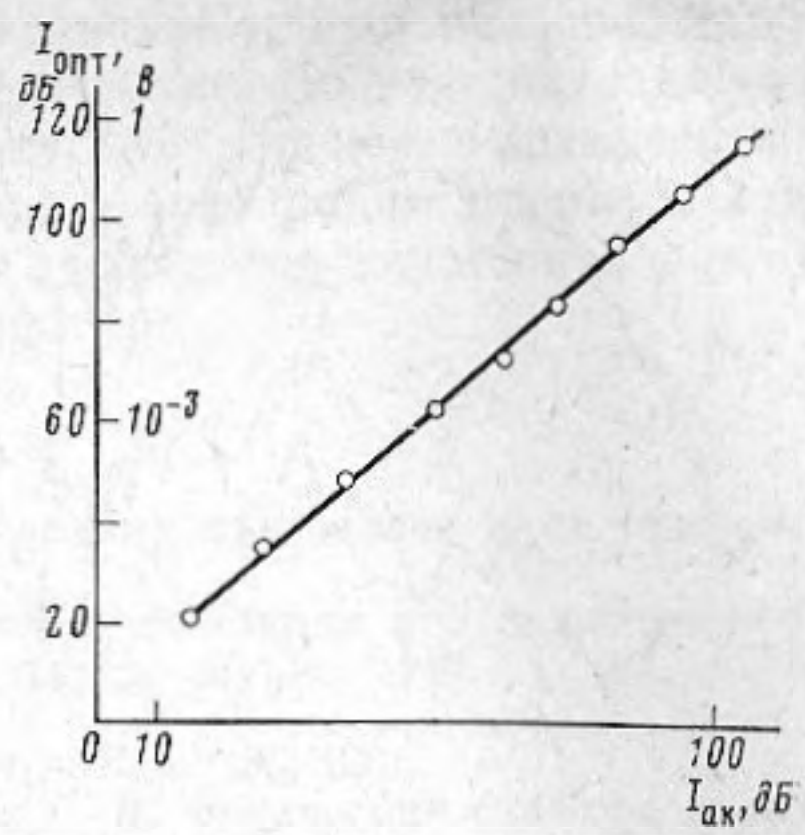
Подставляя соотношение (3) в формулу (2), получаем

$$I(t)\simeq\frac{I_0}{2}\left\{1+\Delta\sin 2\varphi_{0i}\varphi(t)-\frac{\Delta\sin 2\varphi_{0i}}{3}[\sin^2 2\varphi_{0i}-4]\varphi^3(t)\right\}.$$

При распространении света под углом $\varphi_0=\varphi_{0i}$ к оптической оси кристалла нелинейные искажения сигнала значительно уменьшаются; в выражении для $I(t)$ при этом отсутствуют члены, содержащие $\varphi^2(t)$.



Фиг. 3. Зависимость прозрачности жидкокристаллического элемента от угла между оптической осью кристалла и направлением распространения света в отсутствие звука. Толщина слоя жидкого кристалла $d=30$ мкм



Фиг. 4. Амплитудная характеристика оптического микрофона на жидких кристаллах. $f=1250$ Гц, $d=30$ мкм, $\varphi_0=9°$

Для коэффициента нелинейных искажений можно записать выражение

$$K_i \simeq \left\langle \frac{C_3(\varphi_{0i})\varphi^2(t)+o[\varphi^3(t)]}{C_1(\varphi_{0i})} \right\rangle$$

и, учитывая, что в случае течения с линейным профилем скорости, согласно соотношению (1), $\varphi_{\text{макс}} \simeq \xi_0/d$, получить следующую оценку:

$$K_i < 10 k_0 \Delta n (i+0{,}5) \frac{\xi_0^2}{d}. \qquad (4)$$

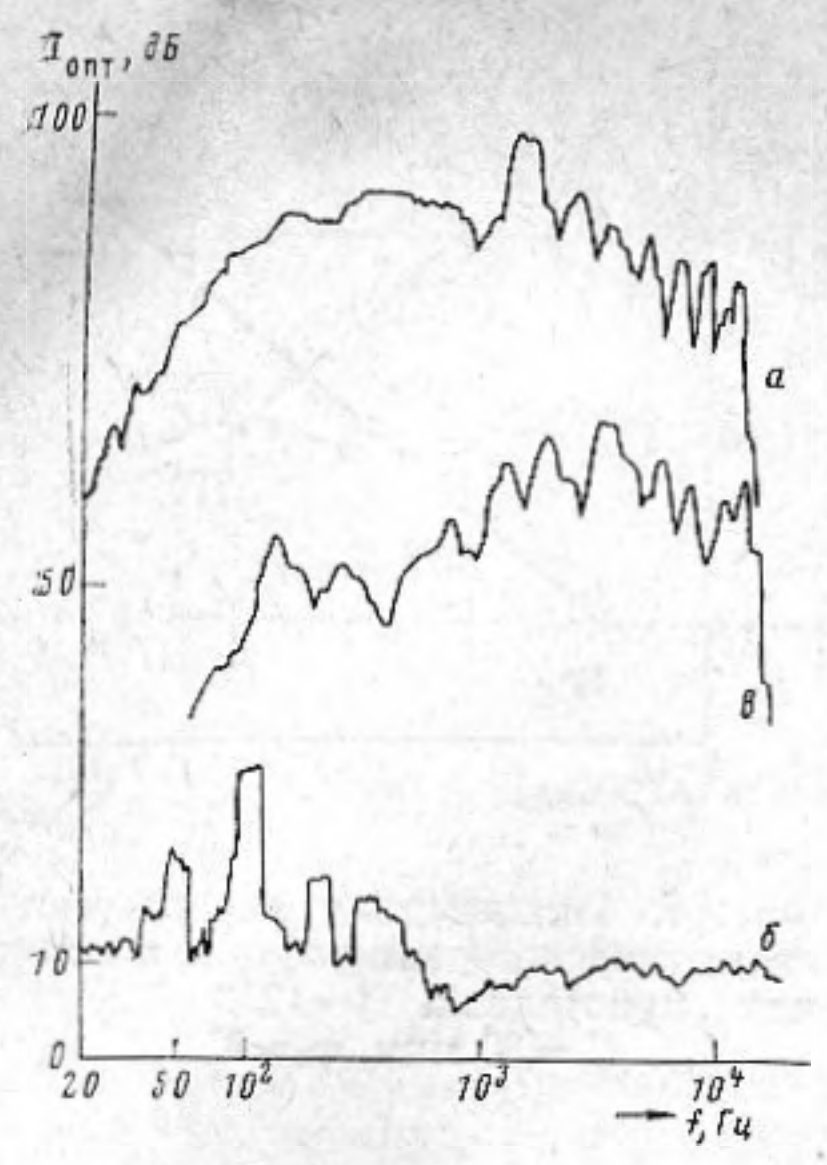
В частности, для $i=0$, $k_0=10^5$ см$^{-1}$, $d=3\cdot10^{-3}$ см, $\Delta n=0{,}2$ коэффициент нелинейных искажений не превышает 1% до тех пор, пока амплитуда смещения подвижной пластины $\xi_0<0{,}2$ мкм.

Для звуковой техники большой интерес представляют и другие участки кривой, приведенной на фиг. 3. Их использование позволяет не только в значительных пределах регулировать чувствительность микрофона, но и производить различного рода нелинейные операции с принимаемым акустическим сигналом, как, например, перемножение, возведение в квадрат и т. п. Следует отметить, что эти операции можно проводить параллельно и независимо друг от друга с одновременным приемом звукового сигнала в линейном режиме на одном единственном микрофоне. Гибкость управления параметрами микрофона может оказаться полезной при решении различных задач, связанных с обработкой звукового сигнала, измерительной техникой, многоканальной звукозаписью. Еще больше возможности открывает включение двух и более оптических микрофонов в одну систему.

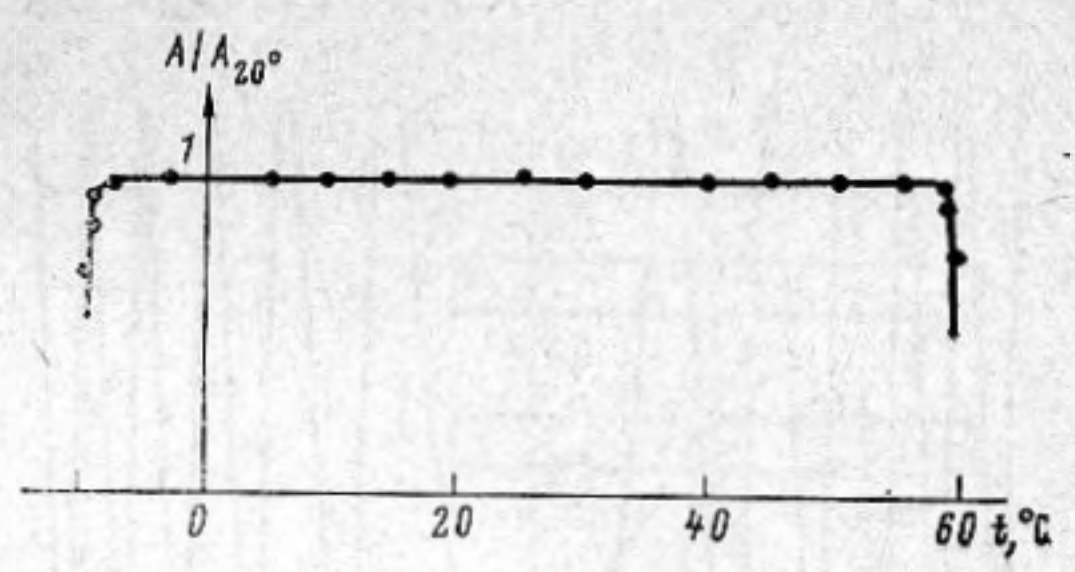
Измерения характеристик микрофона были проведены в безэховой камере с использованием измерительного стенда фирмы «Брюль и Къер».

На фиг. 4 приведена амплитудная характеристика микрофона, полученная с использованием третьоктавного фильтра в приемном тракте для увеличения отношения сигнал/акустический шум камеры. В пределах измерений характеристика оставалась линейной; линейный динамический диапазон составил 85 дБ. Абсолютное значение чувствительности оказалось равным 0,5 В/Па. Нижний предел принимаемых звуковых давлений был ограничен акустическим шумом камеры и уровнем шумов лазерного излучения, составляющим для использованного в схеме измерений лазера типа ЛГ-79 $I_{\text{шум}}/I_0 \sim 1\%$. Использование схемы дифференциального включения фотодиодов позволило снизить уровень шума в 100 раз и довести его до $10^{-4} I_0$.

Как показывают оценки, проведенные на основе работы [3], шумы, вызванные объемными и поверхностными флуктуациями ориентации



Фиг. 5



Фиг. 6

Фиг. 5. Частотная характеристика оптического микрофона на жидких кристаллах. $P_{ак}$=90 дБ, d=30 мкм

Фиг. 6. Зависимость чувствительности оптического микрофона, отнесенной к собственному значению при 20° С, от температуры. f=40 Гц, d=70 мкм, φ_0=0

жидкого кристалла, в полосе звуковых частот составляют 10^{-10} I_0 и ограничения на динамический диапазон не налагают.

Ограничение динамического диапазона сверху обусловлено нелинейностью зависимости $I(\varphi_0)$. Используя соотношение (4), получаем, что верхний предел принимаемых звуковых давлений соответствует смещениям диффузора $\xi_{0i\,макс}=(K_i/10k_0d\Delta n(i+0{,}5)^{1/2}$. Для достигнутого при испытаниях максимального значения $P_{ак}$=105 дБ измеренный коэффициент нелинейных искажений составлял ≈2%, что согласуется с оценкой K_i.

На фиг. 5 представлены частотная характеристика оптического микрофона *а*, зависимость спектральной плотности шумов от частоты *б* и частотная характеристика электродинамического преобразователя с подвижной системой, аналогичной использованной в оптическом микрофоне *в*. Сопоставление приведенных данных позволяет сделать вывод о том, что вид частотной характеристики оптического микрофона определяется в основном резонансными свойствами используемого диффузора. Это связано с тем, что в силу облегченности конструкции и малой вязкости кристалла (α=0,8 Пз [6]) жидкокристаллический элемент не оказывает существенного влияния на акустомеханические параметры микрофона. Расхождение характеристик *а* и *в* в низкочастотной области объясняется как различием использованных акустических оформлений, так и тем обстоятельством, что подвижная система электродинамического преобразователя демпфируется при движении звуковой катушки в магнитном поле и, следовательно, его чувствительность в области собственного резонанса существенно изменяется. В конструкции же оптического микрофона магнитная система отсутствует.

Проводилось исследование влияния температуры на акустооптические характеристики микрофона во всем температурном диапазоне существования нематической фазы жидкого кристалла. Для использованной смеси МББА+ЭББА Н8 этот диапазон составляет −10° С—+59° С.

На фиг. 6 приведена температурная зависимость чувствительности микрофона, отнесенной к значению чувствительности при 20° С. Из анализа экспериментальных данных следует, что влияние температурных изменений сказывается лишь в узкой приграничной области вблизи фазовых переходов. В широком температурном интервале нематической фазы, задаваемом выбором жидкого кристалла, акустооптические характеристики микрофона практически не изменяются. Отметим, что в настоящее время синтезированы жидкокристаллические соединения с диапазоном существования нематической фазы от −30° С до +120° С [7].

Проведенные исследования показали, что НЖК являются перспектив-

ными акустооптическими материалами, обеспечивающими непосредственное преобразование речевых сигналов в оптические. По чувствительности исследованный вариант микрофона не уступает волоконно-оптическому микрофону [8, 9] и обладает по сравнению с ним рядом преимуществ, главным из которых является постоянство параметров акустооптического преобразования в широком интервале температур.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Капустина О. А.* Акустооптические свойства жидких кристаллов и их применение. М.: АКИН, 1979.
2. *Королев Ю. Н., Яковенко Г. Н.* Акустооптическая модуляция при периодической деформации жидкокристаллического слоя.— Акуст. журн., 1977, т. 23, № 5, с. 783—787.
3. *Де Жен П.* Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977, с. 190, 120.
4. *Капустина О. А., Кожевников Е. Н., Яковенко Г. Н.* Оптические свойства гомеотропно ориентированного нематического кристалла при низкочастотных сдвиговых колебаниях.— Тез. докл. IV Междунар. конф. соц. стран по жидким кристаллам. Тбилиси: Наука, 1981, т. 2, с. 62.
5. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1970, с. 761.
6. *Блинов Л. М.* Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978, с. 5.
7. *Blinov L. M., Kovalev E. J., Titov V. V.* Liquid Crystalline Materials for Electro-Optical Devices.— Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1981, v. 70, p. 267—278.
8. *Miller D. A. B.* Bistable Optical Devices: Physics and Operating Caracteristics.— Laser Focus, 1982, v. 18, № 4, p. 79—84.
9. *Maurer G. S., Schuetz L., Cole J. H., Bucaro J. A.* Application of Fiber-Optic Sensors to the Detection of Air-Acoustic Signals.— Optics Letters, 1982, v. 7, № 10, p. 503—505.

Акустический институт
им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР

Научно-исследовательский
кинофотоинститут

Поступила в редакцию
16.VI.1983