

УДК 534.232

## ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МИКРОФОНЫ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОТРАНЗИСТОРОВ

*В. И. Зархин, Б. М. Коломыцев, Л. Н. Сыркин*

Рассмотрена возможность технической реализации электромеханических преобразователей, в которых в качестве чувствительных элементов применяются транзисторы. Для передачи механического сигнала на эмиттерный  $p-n$ -переход транзистора, а также для создания необходимого начального давления служит корундовая игла, закрепленная на поверхности эмиттера.

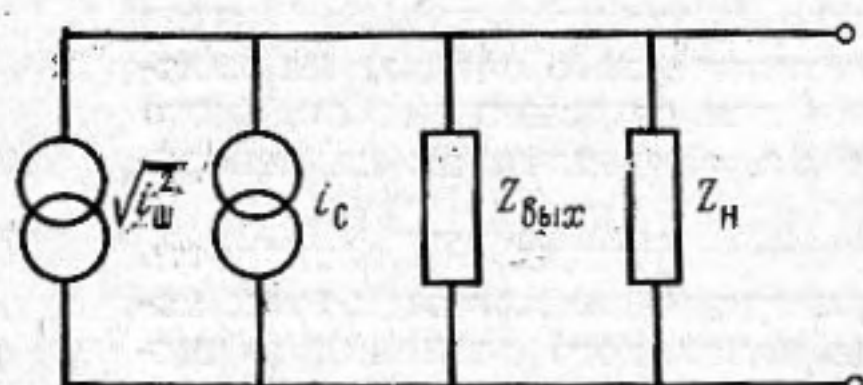
Предложена система параметров, характеризующих эффективность пьезотранзисторного преобразователя, и приведены зависимости этих параметров от электрических режимов, силы начального давления и числа параллельно включенных транзисторов в одном преобразователе. Описаны экспериментальные пьезотранзисторные микрофоны и приводятся их характеристики.

Зависимость свойств электронно-дырочных переходов от механических напряжений дает принципиальную возможность создания электроакустических преобразователей — приемников, отличающихся высокой эффективностью и малыми размерами [1—3]. Наибольший интерес, по-видимому, представляют приемники на основе пьезотранзисторов — полупроводниковых приборов, совмещающих функции электромеханического преобразователя и электронного усилителя с малым входным и большим выходным сопротивлениями. В отличие от обычных линейных преобразователей, описываемых в рамках теории четырехполюсников, пьезотранзисторный приемник представляет собой в общем случае нелинейный параметрический преобразователь-шестиполюсник с двумя входами (электрическим и механическим) и одним выходом (электрическим). Если на электрическом входе действует только постоянное напряжение, а на механическом — и постоянное (смещающее) и переменное давление, то транзистор работает в режиме электромеханического усилителя. Если на обоих входах действуют переменные сигналы различных частот (при наличии постоянных смещений), то осуществляется режим электромеханического модулятора.

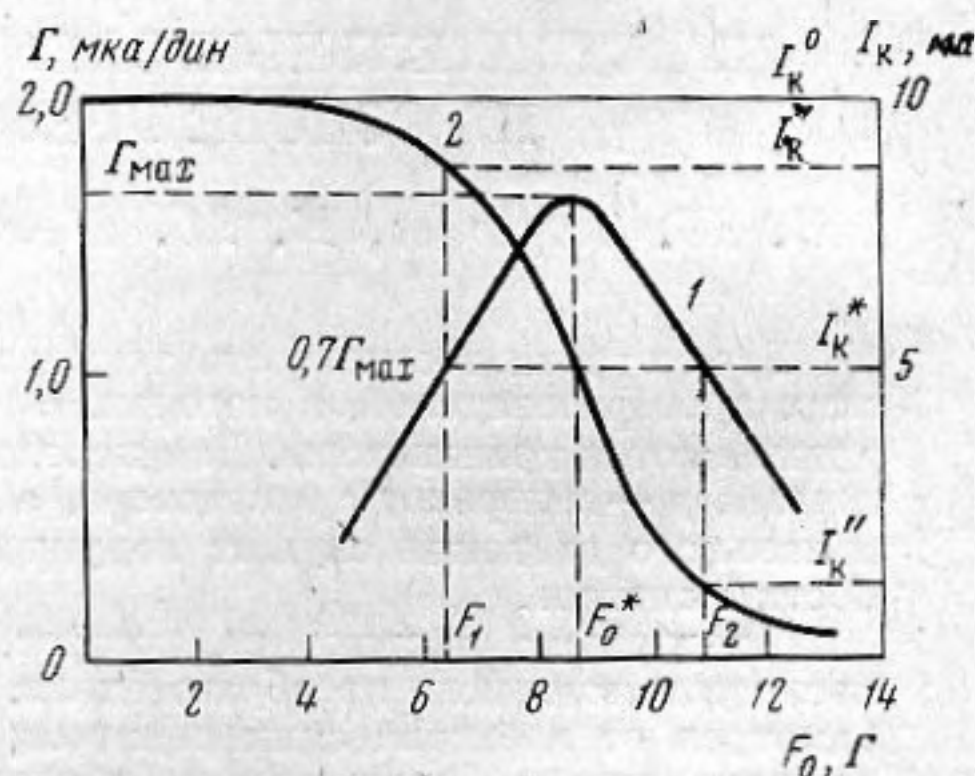
Обычно передача механического сигнала на чувствительную область транзистора осуществляется посредством корундовой иглы, действующей на эмиттерный  $p-n$ -переход. При этом имеет место трансформация внешнего давления, и в напряженной области, составляющей лишь небольшую часть объема транзистора, уровень механических напряжений может превысить предел прочности полупроводникового материала, определенный для макроскопического его объема при одноосной деформации [1]. Изменение электрических характеристик транзистора в целом, обусловленное изменением механических напряжений под иглой, оказывается весьма значительным, а эффективность пьезотранзистора как электромеханического датчика оказывается выше, чем эффективность однородных полупроводниковых тензорезисторов.

Для практических целей удобно пользоваться эквивалентной схемой выходной цепи пьезотранзистора в виде двухполюсника (фиг. 1). При этом параметры эквивалентной схемы оказываются зависящими от условий на входе. Источники полезного сигнала и шума изображены здесь в виде двух генераторов тока ( $i_c$ ;  $\sqrt{i_{ш}^2}$ ), напряжение сигнала  $u_c$  снимается с сопротивления нагрузки  $Z_H$ , включенного параллельно выходному сопротивлению транзистора (по переменному току)  $Z_{вых}$ . Предполагается, что транзистор включен по схеме с общим эмиттером.

Экспериментальное изучение основных электромеханических и шумовых параметров пьезотранзисторов проводилось в данной работе с помощью установки, содержащей калиброванный электродинамический возбудитель, совмещенный с микроскопом и координатным устройством, и измерительный тракт. Возбудитель обеспечивал передачу через



Фиг. 1



Фиг. 2

иглу на заданную точку поверхности транзистора статической силы  $F_0$  и одновременно малой переменной силы  $F \sim$  с заданной амплитудой и частотой. Измерительный тракт служил для измерения переменных и постоянных составляющих коллекторного  $I_k$  и базового  $I_b$  токов, а также выходного шумового тока  $i_{ш}$  в заданной полосе частот. Зная из эксперимента эти величины, можно рассчитать все основные параметры пьезотранзистора, определяющие его эффективность в режиме электромеханического преобразования.

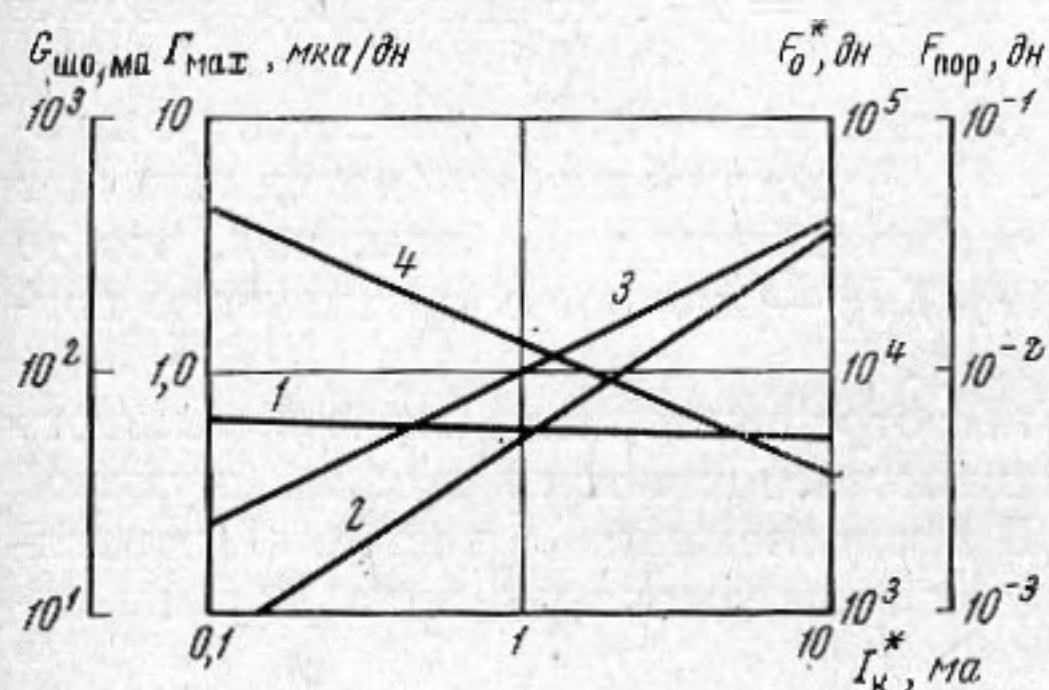
Из числа серийных отечественных транзисторов нами были выбраны для исследования планарные  $n-p-n$  транзисторы типов 1Т311 и 2Т306. По ряду конструктивных и технологических особенностей (размеры и расположение электродов, малая глубина залегания эмиттерного  $p-n$ -перехода) эти приборы оказываются наиболее подходящими для использования в качестве пьезотранзисторов.

Необходимо отметить, что при различных положениях иглы на поверхности эмиттера одного и того же прибора, а также для различных приборов одинакового типа существует довольно большой разброс электромеханических и шумовых свойств. Однако, хотя абсолютная величина параметров изменяется в сравнительно широких пределах, характер их зависимости от электрических режимов и сил  $F_0$ ,  $F \sim$  остается неизменным даже при переходе от одного типа транзистора к другому.

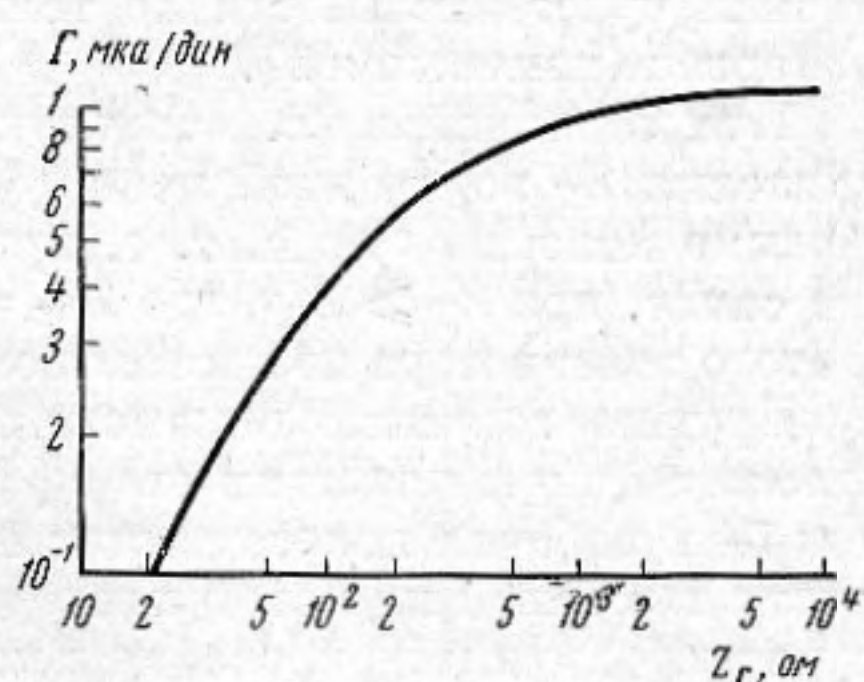
В то же время у разных типов приборов имеются некоторые особенности. Транзисторы 1Т311 отличаются наибольшей чувствительностью к давлению, но крайне неустойчивы и быстро выходят из строя вследствие необратимого роста шумов, электрического пробоя или механического разрушения эмиттера. Транзисторы типа 2Т306 более стабильны, но имеют довольно низкую чувствительность. Наконец, транзисторы 2Т-306 являются, по-видимому, наиболее подходящими для использования в чувствительных элементах электромеханических преобразователей, так как при достаточно высокой чувствительности и стабильности параметров они имеют сравнительно низкие шумы. Поэтому (за исключением особо оговорен-

ных случаев) ниже приводятся данные для группы специально отобранных транзисторов типа 2Т-306. Система параметров, которая вводится для описания свойств исследованных транзисторов, может быть использована для любых типов пьезочувствительных транзисторных структур.

Основным параметром, характеризующим электромеханические свойства пьезотранзистора, является чувствительность коллекторного тока к силе ( $\Gamma$ ), равная  $i_c / F_{\sim}$ , где  $i_c$  и  $F_{\sim}$  — соответственно эффективные зна-



Фиг. 3



Фиг. 4

чения переменной составляющей коллекторного тока и переменной силы, действующей на иглу. Из фиг. 1 видно, что чувствительность по напряжению  $\Gamma_u$  равна

$$\Gamma_u = \frac{u_c}{F_{\sim}} = \frac{\Gamma}{\frac{1}{Z_{\text{ВЫХ}}} + \frac{1}{Z_{\text{Н}}}}$$

Экспериментальные исследования показали, что  $\Gamma$  при радиусе закругления острия иглы  $R_{\text{и}} \approx 20$  мкм слабо зависит от частоты  $f$  (незначительно уменьшается с ростом  $f$ ) в диапазоне от нуля до собственного механического резонанса системы игла — кристалл (8—10 кГц).

Зависимость  $\Gamma$  от силы начального поджатия  $F_0$  характеризуется кривой с максимумом (фиг. 2). Целесообразно ограничить рабочий интервал допустимых значений  $F_0$  предельными значениями  $F_1$  и  $F_2$ , при которых чувствительность  $\Gamma$  уменьшается до  $0,7\Gamma_{\text{max}}$  (в предположении, что  $F_{\sim} \rightarrow 0$ ). Соответствующие величины постоянной составляющей коллекторного тока  $I_K$  (фиг. 2, 2) обозначены  $I_K'$  и  $I_K''$ , а начальная величина  $I_K$  для неподжатого транзистора  $I_K^0$ .

Чувствительность  $\Gamma$  в известных пределах почти не зависит от величины переменного сигнала  $F_{\sim}$ . С дальнейшим ростом  $F_{\sim}$  чувствительность падает и возникают заметные нелинейные искажения. Верхнюю границу динамического диапазона  $(F)_{\text{max}}$  можно оценивать по уменьшению  $\Gamma$  до уровня 0,7 от начального значения, соответствующего  $F_{\sim} \rightarrow 0$ . Величина  $(F_{\sim})_{\text{max}}$  зависит от силы начального поджатия  $F_0$ , которая может

быть выбрана в пределах рабочего интервала. Если  $F_0 = \frac{1}{2}(F_2 + F_1) = F_0^*$ , т. е.  $\Gamma = \Gamma_{\text{max}}$ , то в первом приближении можно считать, что  $(F_{\sim})_{\text{max}} = \frac{1}{2}(F_2 - F_1)$ , а постоянная составляющая коллекторного тока

предварительно поджатого транзистора,  $I_K$ , равна  $I_K^* = (0,5-0,6) I_K^0$  (см. фиг. 2). При любом фиксированном  $F_0$  (в частности, при  $F_0 = F_0^*$ ) ток коллектора  $I_K$  может регулироваться изменением входных режимов, т. е. тока базы  $I_B$  или напряжения база — эмиттер  $u_{б.э}$ . С ростом  $I_K$  величина оптимального начального поджатия  $F_0^*$  практически не изменяется, а максимальная чувствительность  $\Gamma_{\text{max}}$  растет (фиг. 3, кривые 1 и 2 соответ-

ственно). Зависимость  $\Gamma_{\max}$  от  $I_K$  описывается эмпирической формулой

$$\Gamma_{\max} = \Gamma'_{\max} \left( \frac{I_K^*}{I_{K_1}^*} \right)^\lambda, \quad (1)$$

где  $\Gamma'_{\max}$  — значение  $\Gamma_{\max}$  при некотором значении тока  $I_K^* = I_{K_1}^*$ ;  $\lambda$  — параметр, величина которого близка к единице и постоянна для данного типа транзистора. Формулу (1) можно применять для приближенной оценки чувствительности не только при  $F_0 = F_0^*$ , но и во всем рабочем интервале изменения  $F_0$ .

При заданной э.д.с. источника чувствительность  $\Gamma$  зависит от сопротивления  $Z_\Gamma$  во входной цепи (фиг. 4). Чувствительность максимальна в режиме холостого хода, т. е. при фиксированном токе базы, или, что то же самое, при  $Z_\Gamma \gg Z_{вх}$ , где  $Z_{вх} = u_{б.э} / I_б$  — входное сопротивление поджатого транзистора по постоянному току.

Другим важным параметром пьезотранзисторного чувствительного элемента, определяющим его эффективность, является выходной шумовой ток  $i_{ш}$  в рабочей полосе частот  $\Delta f$ . В предположении о частотной зависимости выходной шумовой проводимости транзистора  $G_{ш}$  вида  $1/f$  мы получаем после интегрирования в полосе

$$\sqrt{i_{ш}^2} = \sqrt{4kTf_0 G_{ш0} \ln(f_2/f_1)}, \quad (2)$$

где  $G_{ш0}$  — значение  $G_{ш}$  на фиксированной частоте  $f_0$ ,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура. Такая зависимость  $\sqrt{i_{ш}^2}$  подтверждается экспериментально в режиме холостого хода по постоянному току на входе для всех исследованных типов транзисторов в диапазоне частот 20 гц — 20 кгц.

Для характеристики нижней границы динамического диапазона чувствительного элемента введем понятие о пороговом сигнале  $F_{пор}$  — минимальной величине переменной силы (эффективное значение), которая может быть зарегистрирована в заданной полосе частот с помощью чувствительного элемента при коэффициенте распознавания, равном единице.

Очевидно, что отношение сигнал/шум на выходе чувствительного элемента выражается как  $\psi = i_c / i_{ш} = F_{\sim} / F_{пор}$ . Динамический диапазон  $B(F_{\sim})_{\max} / F_{пор}$  может быть рассчитан на основе имеющихся экспериментальных данных. Для исследованных пьезотранзисторов он составляет не менее 100 дб (в полосе 1 гц на частоте 1 кгц). Зависимость шумовой проводимости  $G_{ш0}$  от  $I_K$  (фиг. 3, 3) описывается выражением, аналогичным (1), однако параметр  $\lambda \simeq 0,6^*$ . Поэтому увеличение коллекторного тока при прочих равных условиях выгодно, так как приводит к снижению  $F_{пор}$  (фиг. 3, 4).

Значительный практический интерес представляет тот случай, когда  $N$  пьезотранзисторов, имеющих общую механическую систему и общую нагрузку  $Z_H$ , включены параллельно по постоянному и переменному току. Экспериментально показано, что при соблюдении некоторых специальных мер, предотвращающих самовозбуждение, обеспечить устойчивую работу нескольких параллельно включенных пьезотранзисторов вполне возможно. Величины чувствительностей по току  $\Gamma(N)$ , по напряжению  $\Gamma_u(N)$  и напряжение шума на выходе  $u_{ш}(N)$  при этом выражаются через соответственные параметры одиночного пьезотранзистора  $\Gamma(1)$ ,  $\Gamma_u(1)$  и  $u_{ш}(1)$  следующим образом:

$$\Gamma(N) = \Gamma(1) \cdot N; \quad \Gamma_u(N) = \Gamma_u(1) \cdot N \cdot \frac{1 + Z_{вых}/Z_{ш}}{N + Z_{вых}/Z_H}$$

$$u_{ш}(N) = \frac{i_{ш}(1) \sqrt{N}}{1/Z_H + N/Z_{вых}} = u_{ш}(1) \sqrt{N} \cdot \frac{1 + Z_{вых}/Z_H}{N + Z_{вых}/Z_H}.$$

\* Данные по  $G_{ш0}$  приведены для  $f_0 = 1$  кгц. Измерения  $G_{ш}$  проводились Б. Н. Новогрудским и А. В. Менцером.

При  $N < (Z_{\text{вых}} / Z_{\text{н}}) \Gamma_u$  приблизительно пропорционально  $N$ ; при  $N > Z_{\text{вых}} / Z_{\text{н}} \Gamma_u$  перестает зависеть от  $N$  и стремится к предельному значению, равному  $\Gamma Z_{\text{вых}}$ . Хотя  $u_{\text{ш}}$  при  $N = Z_{\text{вых}} / Z_{\text{н}}$  достигает максимального значения, равного  $\frac{1}{2} u_{\text{ш}}(1) \cdot [(Z_{\text{вых}} / Z_{\text{н}})^{1/2} + (Z_{\text{вых}} / Z_{\text{н}})^{-1/2}]$ , но отношение  $u_c / u_{\text{ш}}$  с ростом  $N$  монотонно возрастает (пропорционально  $\sqrt{N}$ ), а пороговый сигнал падает. Таким образом, увеличивая число параллельно включенных пьезотранзисторов, можно повысить эффективность преобразователя при условии, что механическая система обеспечивает неизменность величины  $F_{\sim}$  на каждом транзисторе с увеличением их числа  $N$ .

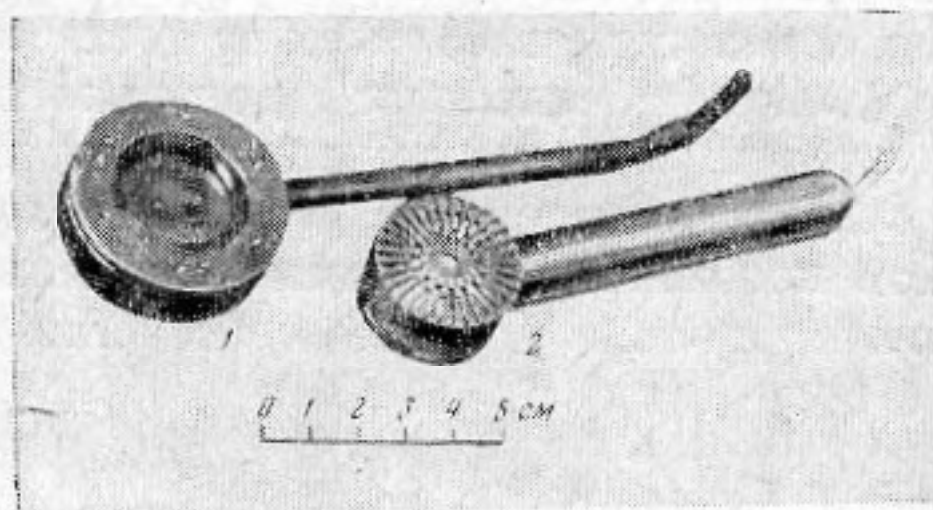
Верхний предел  $N$  определяется возможностью устойчивой работы такого многоэлементного преобразователя, а также допустимой величиной напряжения источника питания  $E_{0 \text{ max}}$  при заданном напряжении на коллекторе  $u_{\text{к.э}}$ .

$$N \leq \frac{E_{0 \text{ max}} - u_{\text{к.э}}}{I_{\text{к}} Z_{\text{н min}}}$$

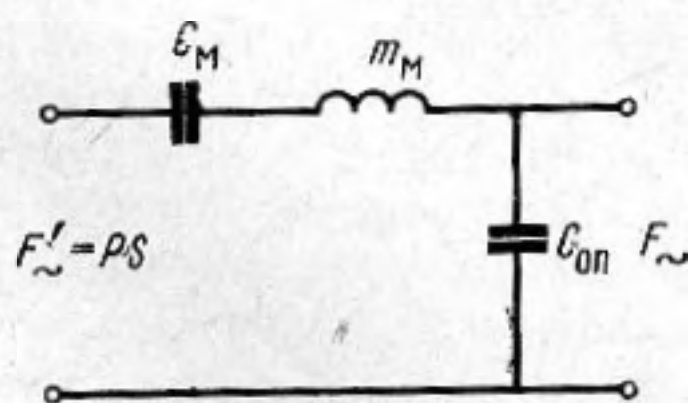
Здесь  $Z_{\text{н min}}$  — минимально допустимая величина  $Z_{\text{н}}$ , определяемая из требуемого значения чувствительности по напряжению  $\Gamma_u$ .

Зная основные характеристики чувствительного элемента и их зависимости от условий на механическом и электрическом входах, можно оценивать параметры пьезотранзисторных преобразователей.

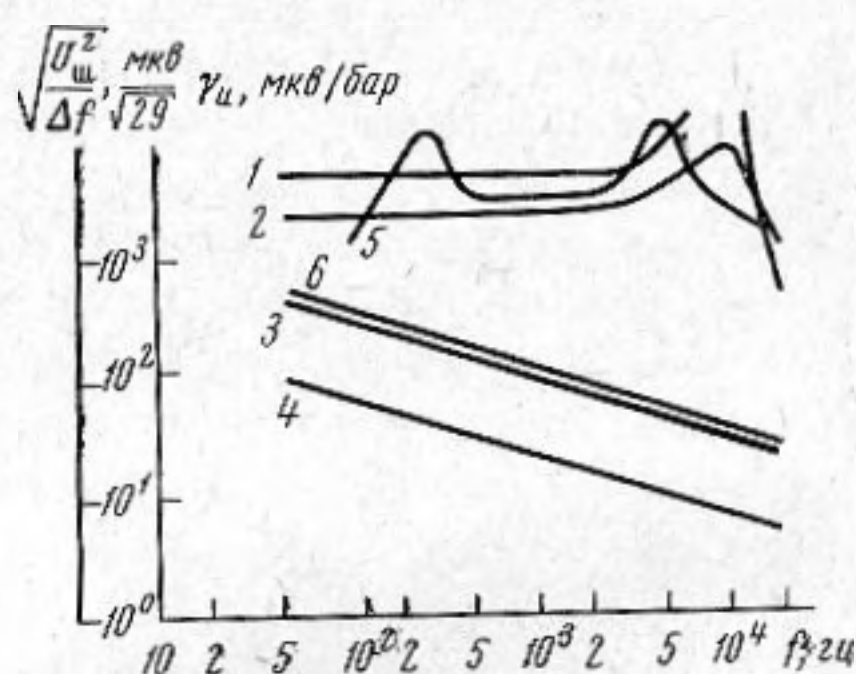
Нами были изготовлены и испытаны два типа микрофонов на пьезотранзисторных чувствительных элементах. Внешний вид микрофонов показан на фиг. 5. В обоих типах микрофонов используются транзисторы типа 2Т-306, однако в конструкциях микрофонов имеются различия по способу создания и фиксации постоянного поджатия иглы, а также по конструкции механической колебательной системы. В микрофоне 1 сила на иглу передается через круглую пластинку, защемленную по периметру, в микрофоне 2 для этого применяется



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

натянутая тонкая мембрана с жестким центром. Эквивалентная механическая схема для микрофона 2 в пренебрежении активными потерями показана на фиг. 6.

Чувствительность  $\gamma_u$  и частотная характеристика микрофона зависят от отношения гибкости мембраны с жестким центром ( $C_M$ ) к гибкости опоры (т. е. системы игла — кристалл)  $C_{\text{оп}}$ . Это отношение определяет коэффициент передачи  $K$  внешней силы ( $F_{\sim}' = pS$ ) на  $p-n$ -переход. (Здесь  $p$  — внешнее акустическое давление,  $S$  — площадь мембраны.) Выражения для  $\gamma_u$ ,  $K$ , а также резонансной частоты микрофона  $f_p$  в соответствии со

схемой фиг. 6 имеют вид

$$\gamma_u = \Gamma K S Z_H; \quad K = \frac{F_{\sim}}{F_{\sim}'} = [1 + C_{оп}/C_M - 4\pi^2 f^2 m_M C_{оп}]^{-1};$$

$$f_p = f_M (1 + C_M / C_{оп})^{1/2},$$

где  $m_M$  — масса мембраны (ее жесткого центра), а  $f_M$  — ее собственная частота.

На фиг. 7 приведены частотные характеристики  $\gamma_u(f)$  (кривые 1 и 2 для микрофонов 1 и 2 соответственно) и собственных шумов (кривые 3 и 4 для микрофонов 1 и 2 соответственно) и для сравнения — соответствующие характеристики (кривые 5 и 6) микрофона, описанного в работе [3]. Из рассмотрения приведенных характеристик видно, что пьезотранзисторные микрофоны отличаются высокой чувствительностью при сравнительно небольших габаритах и достаточно хорошей частотной характеристикой. Однако они имеют довольно высокий уровень собственных электрических шумов, а стабильность их параметров пока еще недостаточна.

Для дальнейшего усовершенствования пьезотранзисторных микрофонов необходимо создание специальных транзисторных структур, обладающих низким уровнем собственных шумов в низкочастотном диапазоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. Rindner, I. Brown. Resistance of elastically deformed shallow  $p-n$ -junctions. *J. Appl. Phys.*, 1963, 34, 7, 1958—1970.
2. М. Сикорски. Применение полупроводниковых преобразователей на  $p-n$ -переходах для измерения давлений и деформаций. В сб. под ред. У. Мэзона «Физическая акустика», т. 4, ч. Б, пер. с англ. под ред. Л. Д. Розенберга. М., «Мир», 1967, стр. 210—302.
3. M. E. Sikorski. Transistors microphones. *J. Audio Eng. Soc.*, 1965, 13, 3, 207—217.

Ленинград

Поступила в редакцию  
11 сентября 1967 г.