

УДК 621.372.85

## ШИРОКОПОЛОСНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ГИПЕРЗВУКА В ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В.Г. БАСОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 5 мая 2014

Анализируется метод возбуждения гиперзвуковых объемных акустических волн модифицированным встречно-штыревым преобразователем. Показана возможность построения широкополосных линий задержки сверхвысоких частот.

*Ключевые слова:* возбуждение, гиперзвук, акустические колебания, пьезопреобразователь.

### Введение

При разработке гиперзвуковых линий задержки и акустооптических гиперзвуковых брэгговских ячеек основным конструктивным устройством является пьезопреобразователь, преобразующий высокочастотные электромагнитные колебания в высокочастотные (гиперзвуковые) акустические колебания, распространяющиеся в звукопроводе. Возбуждение акустических колебаний возможно либо непосредственно с поверхности звукопровода, обладающего пьезоэффектом и изготовленного из монокристаллов ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{TaLiO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  и т.д.) [1, 2], либо с применением пьезопленок  $\text{ZnO}$ ,  $\text{CdS}$  и т.д. [3]. В последнем случае на поверхности звукопровода формируется преобразователь в виде диэлектрического конденсатора, в котором в качестве диэлектрика применяются пьезопленки. В любом из указанных способов возбуждение гиперзвука с поверхности звукопровода является широкополосным, так как отсутствуют резонансные явления. Чтобы возбудить гиперзвук, необходимо подвести энергию высокочастотных колебаний к указанным выше преобразователям. Для этих целей используются различные электродинамические системы: СВЧ-резонаторы [2], волноводный резонансный зазор [4], замедляющие системы [5]. Применение последних определяют частотные свойства таких пьезоэлектрических преобразователей. СВЧ-резонатор, как и волноводный резонансный зазор, обеспечивает достаточно высокую эффективность возбуждения гиперзвука, но характеризуется узкой полосой пропускания.

Для расширения частотных свойств пьезопреобразователей предлагалось применение различных электродинамических устройств: связанных резонаторов [6], системы связанных резонансных зазоров [7], замедляющих электродинамических систем [4]. Последние обеспечивали достаточно эффективное расширение полосы возбуждения гиперзвука по сравнению с другими указанными способами, однако они характеризовались высокими вносимыми потерями на преобразование.

Поверхностное возбуждение гиперзвука можно получить также путем применения встречно-штыревых преобразователей (ВШП) [8–10], а для расширения полосы пропускания использовать структуры ВШП с переменным шагом [11]. Однако такие преобразователи возбуждают сдвиговые объемные акустические волны (ОАВ). Последние в теле звукопровода формируют два акустических пучка под углом  $\Theta_{\pm x}(f)$  относительно нормали к поверхности звукопровода, на которой расположен ВШП и протяженность которого совпадает с осью  $x$  [8]. Этот угол зависит от частоты возбуждения  $f$  и определяется соотношением

$\Theta_{\pm x}(f) = \arcsin[\varphi_m(f)v/2\pi fd]$ , где  $\varphi_m(f)$  – фазовый сдвиг между соседними электродами многоэлементного ВШП;  $v$  – скорость акустических волн;  $d$  – шаг структуры ВШП. Возбуждение двух акустических пучков приводит к дополнительным потерям на преобразование.

Устранение двунаправленного излучения и зависимости направления распространения ОАВ от частоты возбуждения  $f$  возможно осуществить, если ВШП будет возбуждать не сдвиговую, а продольную акустическую волну, нормальную к торцевой поверхности звукопровода. Такую задачу можно решить путем формирования неоднородной поверхности звукопровода с помощью канавок между электродами ВШП. В данной работе проводится анализ возбуждения гиперзвука модифицированным ВШП (рис. 1), расположенным на неоднородной поверхности пьезозвукопровода.

### Теоретический анализ

Расположенный на поверхности пьезозвукопровода ВШП создает между разнополярными электродами в приповерхностном слое глубиной  $h \cong \lambda_{ак}$ , где  $\lambda_{ак}$  длина акустической волны, тангенциальную составляющую  $E_x$ , которая возбуждает сдвиговую акустическую волну.

Для возбуждения продольной акустической волны структура ВШП должна формировать не тангенциальную  $E_x$ , а нормальную  $E_z$  составляющую электрического поля. Применение неоднородной поверхности звукопровода 1, которая создается с помощью канавок глубиной  $h \cong (3...5)\lambda_{ак}$  (рис. 1), устраняет  $E_x$ . Расположение электродов 3 ВШП противоположной полярности на боковых стенках этих канавок относительно возбуждающего электрода 2 формируют нормальную составляющую  $E_z$  электрического поля, которая участвует в возбуждении продольной объемной акустической волны (ОАВ).

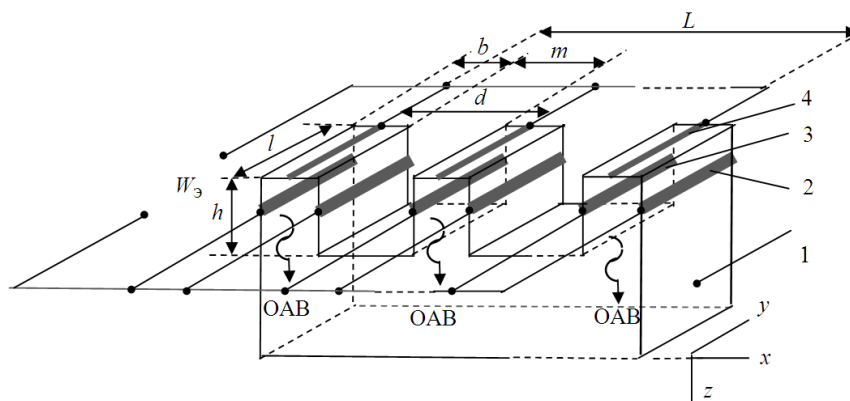


Рис. 1. Конструкция возбуждающего преобразователя на неоднородной поверхности пьезозвукопровода:  
1 – пьезозвукопровод; 2, 3 – электроды ВШП

Как известно [6], эффективность преобразования  $A$  подводимой энергии электромагнитной СВЧ колебаний  $P_{эм}$  в мощность акустических колебаний определяется отношением

$$A = \frac{P_{ак}}{P_{эм}}. \quad (1)$$

Мощность акустической волны  $P_{ак}$ , возбуждаемой в пьезокристаллах класса  $3m$  ( $LiNbO_3$ ,  $TaLiO_3$ ) вдоль оси  $z$  составляющей электрического поля  $E_z$ , равна [3]:

$$P_{ак} = 1/2 k_{33}^2 \varepsilon_{33} \nu S E_z^2, \quad (2)$$

где  $k_{33}$ ,  $\varepsilon_{33}$  – коэффициент электромеханической связи и диэлектрическая проницаемость пьезокристалла в направлении оси  $z$ ;  $\nu$  – скорость продольной акустической волны;  $S$  – площадь рабочей поверхности пьезокристалла с которой происходит возбуждение гиперзвука.

Из рис. 1 и рис. 2 следует, что площадь  $S$  возбуждающих электродов ВШП длиной  $l$  равна

$$S = al \frac{L}{d}, \quad (3)$$

где  $a$  – ширина электрода;  $d, L$  – шаг и длина структуры ВШП.

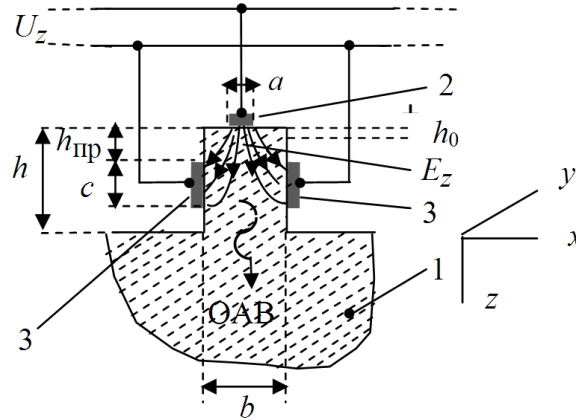


Рис. 2. Конфигурация модифицированной пары электродов ВШП: 1 – пьезоэластик; 2, 3 – электроды ВШП

Скорость продольной акустической волны  $v$  определяется соотношением

$$v = \lambda f = 2\pi\lambda\omega, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина продольной акустической волны, возбуждаемой на частоте  $f$ .

Электрическая энергия, запасенная в одной паре электродов ВШП, равна

$$W_{\text{пр}} = \frac{1}{2} U_z^2 C_{\text{пр}} = \frac{1}{2} E_z^2 h_{\text{пр}}^2 C_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где  $U_z$  – разность потенциалов между электродами ВШП;  $h_{\text{пр}}$  – эквивалентный зазор (рис. 2) между электродами, образующий емкость одной пары электродов ВШП.

Емкость  $C_{\text{пр}}$  определяется соотношением

$$C_{\text{пр}} = \frac{al}{h_{\text{пр}}} \epsilon_{33}. \quad (6)$$

Так как генерация ОАВ осуществляется в приповерхностном слое, то положим  $h_{\text{пр}} \cong \lambda/4$ .

В этом случае соотношение (2) с учетом (3)–(5) примет вид

$$P_{\text{ак}} = 8\pi k_{33}^2 \omega n_0 W_{\text{пр}}, \quad (7)$$

где  $n_0 = \frac{L}{d}$ .

Полученное соотношение (7) определяет мощность возбуждаемой плоской ОАВ электродами ВШП. Электродинамическую систему в виде ВШП, применяемую для возбуждения гиперзвука, можно рассматривать как квазистатическую замедляющую систему (ЗС), для которой справедливо соотношение [12]:

$$P_{\text{эм}} = v_{\text{гр}} \frac{W}{d}, \quad (8)$$

где  $W$  – электромагнитная энергия, запасенная на один период ЗС;  $v_{\text{гр}}$  – групповая скорость переноса энергии вдоль ЗС;  $d$  – шаг структуры ВШП.

Тогда, согласно (1) и с учетом (7) и (8), получим

$$A = 8\pi k_{33}^2 \omega n_0 d \frac{\sigma_{\text{пр}}}{v_{\text{гр}}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{\text{пр}} = \frac{W_{\text{пр}}}{W}$ .

В случае применения ЗС в виде ВШП входящий в (9) параметр  $\sigma_{\text{пр}}$  близок к единице, так как подводимая к преобразователю СВЧ-энергия полностью концентрируется электродами ВШП на возбуждающей поверхности пьезоэлектрика.

Входящее в (9)  $v_{\text{гр}}$ , согласно [12], может быть определено как

$$v_{\text{гр}} = \frac{d}{\left(\frac{d\varphi}{d\omega}\right)}. \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) после некоторых преобразований примет вид

$$A = 8\pi k_{33}^2 n_0 \delta_0 \frac{d\varphi}{d\left(\frac{f}{f_p}\right)} = 8\pi k_{33}^2 n_0 \delta_0 F\left(\frac{f}{f_p}\right), \quad (11)$$

где  $\delta_0 = \left(\frac{f}{f_p}\right) \sigma_{\text{пр}}$  – коэффициент заполнения зазора, определяющего, какая часть подвергающего воздействию электрического поля объема звукопровода участвует в генерации продольной ОАВ;  $f_p$  – резонансная частота структуры ВШП  $F\left(\frac{f}{f_p}\right) = \frac{d\varphi}{d\left(\frac{f}{f_p}\right)}$ .

Как видно из (11), частотная зависимость коэффициента преобразования  $A$  полностью определяется функцией  $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$ , зависящей от структуры электродинамического преобразователя.

Для анализа частотных свойств возбуждения ОАВ квазистатической ЗС в виде ВШП его можно заменить эквивалентной электрической схемой фильтра низких частот (ФНЧ) типа  $m$  (рис. 3, а) [13], для которого частотная характеристика передачи не ограничена со стороны низких частот.

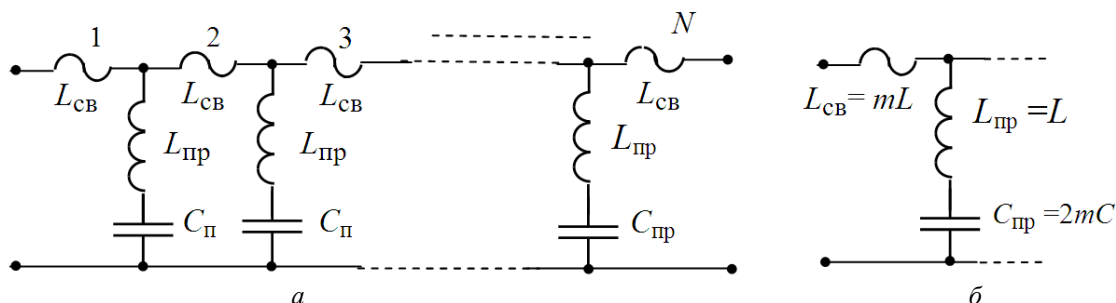


Рис. 3. Эквивалентные схемы квазистатической ЗС в виде ВШП, содержащего:  $N$  пар электродов (а); одну пару электродов (б)

Для такой схемы резонансная частота определится соотношением

$$f_p = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{C_{\text{пр}} \frac{L_{\text{пр}}}{(1-k_{\text{св}})}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{CL(1-m^2)}}, \quad (12)$$

где  $k_{\text{св}} = \frac{L_{\text{пр}}}{L_{\text{св}} + L_{\text{пр}}}$  – коэффициент связи;  $m = \sqrt{\frac{1-k_{\text{св}}}{1+k_{\text{св}}}}$ ,  $L_{\text{пр}}$  – индуктивность электродов ВШП длиной  $l$  (рис. 1);  $L_{\text{св}}$  – индуктивность электродов соединения между штырями ВШП.

Рассматривая ВШП в качестве квазистатической ЗС, частотную зависимость коэффициента  $A$  можно определить из следующего дисперсионного уравнения [12–13]:

$$-\frac{Z_1}{4Z_2} = \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (13)$$

где, согласно рис. 3, б,  $Z_1 = j\omega L_{\text{св}} = j\omega L$ ,  $Z_2 = j\omega L_{\text{пр}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{пр}}} = j\omega \frac{1-m^2}{2m} L + \frac{1}{j\omega 2mC}$ ,  $\varphi$  – фазовый сдвиг на периоде  $d$  структуры ВШП.

Решение уравнения (13) с учетом значений  $Z_1$  и  $Z_2$  позволяет определить функцию  $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$ , которая равна

$$F\left(\frac{f}{f_p}\right) = \frac{2}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_p}\right)^2}} \sqrt{1-\left(\frac{f}{f_p}\right)^2} (1-m^2). \quad (14)$$

### Результаты расчетов

На рис. 4 представлены рассчитанные графики функции  $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$ , в зависимости от относительной частоты  $\frac{f}{f_p}$  при различных значениях параметра  $m$ . Из этих графиков следует,

что при изменении  $m = 0,05 \dots 0,3$  в диапазоне изменения относительной частоты  $\frac{f}{f_p} = 0,1 \dots 0,75$

функция  $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$  изменяется равномерно. Следовательно, в частотном диапазоне  $0 \leq f \leq f_{\text{гр}}$

функция преобразования (11) будет иметь равномерный характер. При этом  $f_{\text{гр}}$  в зависимости от величины  $m$  может быть выбрана из соотношения  $f_{\text{гр}} = (0,8 \dots 0,85) f_p$ .

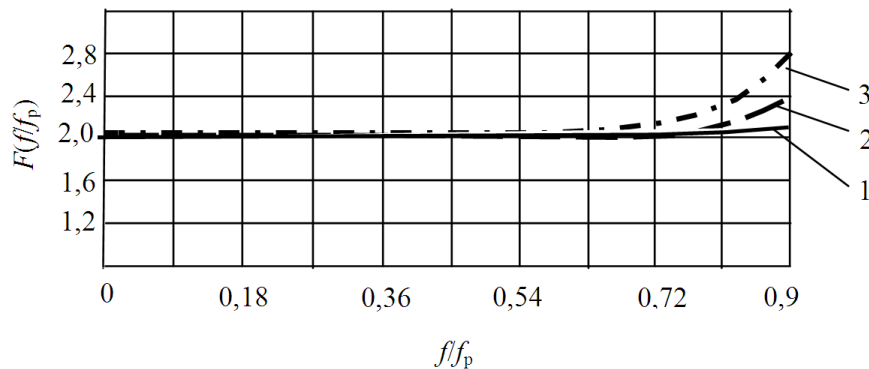


Рис. 4. Зависимость  $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$  от величины  $m$ : 1 –  $m = 0,05$ ; 2 –  $m = 0,3$ ; 3 –  $m = 0,5$

### Заключение

Проведенный анализ и численные расчеты условий возбуждения модифицированным ВШП гиперзвуковых акустических волн показывает на возможность разработки на его основе широкополосных линий задержки СВЧ-диапазона, а также для построения широкополосных акустооптических гиперзвуковых брэгговских ячеек.

## BROADBAND EXCITATION OF HYPERSOUND IN DELAY LINES OF MICROWAVE RANGE

V.G. BASOV

### Abstract

The method of hypersonic bulk acoustic wave excitation by modified interdigital transducer is analyzed. The possibility of broadband delay lines at microwave frequencies construction is shown.

*Keywords:* excitation, hypersonic, acoustic oscillations, piezoelectric transducer.

### Список литературы

1. Чиркин Н.М., Власов А.Б., Басов В.Г. // Изв. вузов СССР – Радиоэлектроника. 1970. Т. 13, № 7. С. 879–882.
2. Басов В.Г., Чиркин Н.М. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-тех. наук. 1972. № 2. С. 105–109.
3. Зюрюкин Ю.А., Наянов В.И., Полотнягин В.А. // Радиотехника и электроника. 1970. Т. 15, № 5. С. 1059–1067.
4. Басов В.Г., Сеница В.Н., Чиркин Н.М. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-тех. наук. 1973. № 4. С. 94–99.
5. Власов А.Б., Королев Н.М., Спиринов В.А. и др. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-тех. наук. 1970. № 4. С. 81–85.
6. Чиркин Н.М., Басов В.Г., Спиринов В.А. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-тех. наук. 1970. № 4. С. 74–80.
7. Басов В.Г., Сеница В.Н., Чиркин Н.М. // Изв. вузов СССР Радиоэлектроника. 1975. Т. 17, № 2. С. 109–112.
8. Роздобудько В.В., Перевоицков В.И. Ультразвуковая линия задержки на объемных акустических волнах / Патент РФ 2169429.
9. Волошиков В.Б., Никитин П.А., Трушин А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 16., № 10. С. 22–24.
10. Гулак Г.В., Анисимова А.Е., Матвеева А.Г. и др. // Изв. АН. Беларуси. Сер. физ.тех. наук. 2010, № 4. С. 98–102.
11. Петров В.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67, № 11. С. 53–57.
12. Тараненко З.И., Трохименко Я.К. Замедляющие системы. Киев, 1965.
13. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М., 1960.