

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 (LiNbO_3 , TaLiO_3 , SiO_2 и т.д.) [1, 2], либо с применением пьезопленок ZnO , 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).

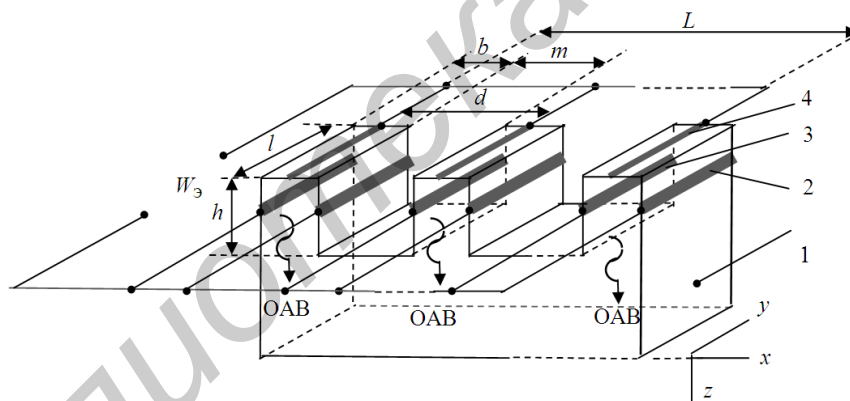


Рис. 1. Конструкция возбуждающего преобразователя на неоднородной поверхности пьезозвукопровода:
1 – пьезозвукопровод; 2, 3 – электроды ВШП

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} , ε_{33} – коэффициент электромеханической связи и диэлектрическая проницаемость пьезокристалла в направлении оси z ; ν – 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.

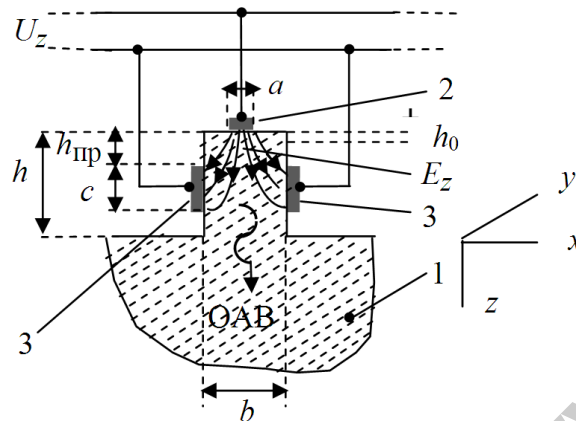


Рис. 2. Конфигурация модифицированной пары электродов ВШП: 1 – пьезоэлектрод, 2, 3 – электроды ВШП

Скорость продольной акустической волны v определяется соотношением

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

где λ – 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.

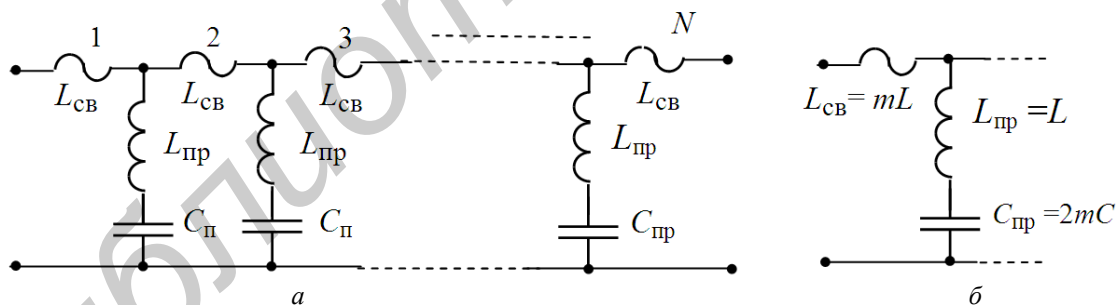


Рис. 3. Эквивалентные схемы квазистатической ЗС в виде ВШП, содержащего: N пар электродов (а); одну пару электродов (б)

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, $Z_1 = j\omega L_{св} = j\omega L$, $Z_2 = j\omega L_{пр} + \frac{1}{j\omega C_{пр}} = j\omega \frac{1-m^2}{2m} L + \frac{1}{j\omega 2mC}$, φ – 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 $0 \leq f \leq f_{гр}$ функция преобразования (11) будет иметь равномерный характер. При этом $f_{гр}$ в зависимости от величины m может быть выбрана из соотношения $f_{гр} = (0,8 \dots 0,85) f_p$.

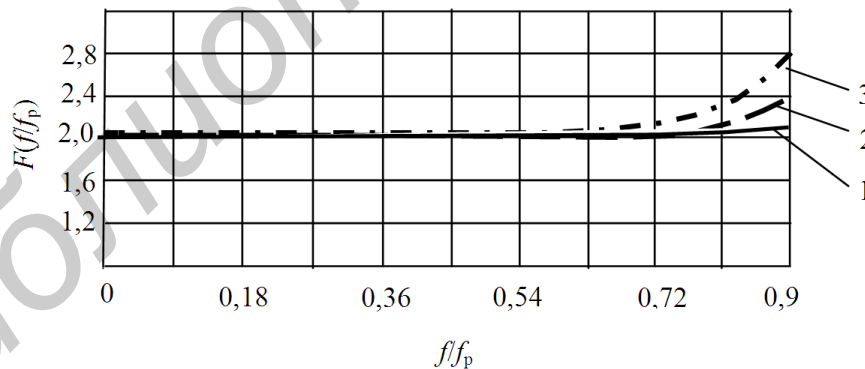


Рис. 4. Зависимость $F\left(\frac{f}{f_p}\right)$ от величины m : 1 – $m = 0,05$; 2 – $m = 0,3$; 3 – $m = 0,5$

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.