

08;12

Многоэлементные гиперзвуковые пьезопреобразователи с медленно меняющимися параметрами для акустооптических устройств

© И.С. Нефедов, В.В. Петров

Саратовский государственный университет

Поступило в Редакцию 10 апреля 1997 г.

В окончательной редакции 13 ноября 1998 г.

Значительного расширения полос частот акустооптических устройств можно достичь при использовании многоэлементных пьезопреобразователей в виде многозвенных цепочек с переменными параметрами: шагом решетки, сдвигом фазы на ячейку, толщиной пьезослоя, импедансом ячейки, длиной электрода единичного элемента. Определив оптимальный закон изменения параметров вдоль длины преобразователя, можно реализовать точное совпадение закона изменения угла наклона фронта акустической волны и закона изменения брэгговского условия с частотой, что позволит увеличить полосу рабочих частот акустооптического устройства (в частности, дефлектора) при сохранении высокой дифракционной эффективности.

В настоящей работе на основе найденного ранее соотношения для определения частотной зависимости шага структуры, обеспечивающего точную автоподстройку под угол Брэгга, а также на основе решения дисперсионного уравнения одного из вариантов многоэлементной структуры, проведен анализ частотных зависимостей длины единичных электродов, определяющей индуктивность элемента, а также импеданса единичных ячеек, входящих в многоэлементную структуру.

Ранее, в работе [1] был предложен метод увеличения полосы частот брэгговских акустооптических (АО) ячеек путем использования многоэлементных преобразователей с переменными параметрами: шагом решетки l , длиной электродов H , определяющей индуктивности элементов, сдвигом фазы на ячейку φ_0 , импедансом ячейки Z , а также толщиной пьезоэлектрического слоя. Выражение для вычисления частотной зависимости шага структуры l , который обеспечивает точную автоподстройку

звукового пучка под угол Брэгга, полученное в работе [1], имеет вид

$$l = \varphi_m V / 2\pi f \sin \{ \Theta_{0i} + (-1)^i \arcsin(\lambda_0 f / 2n_0 V) \}, \quad (1)$$

здесь $\varphi_m = \varphi_0 + 2\pi m$, m — номер пространственной гармоники акустического поля, V — скорость звука в кристалле, Θ_{0i} — угол падения светового пучка относительно плоскости преобразователя, i — номер случая, соответствующий одному из двух возможных направлений падения светового пучка относительно фронта звуковой волны. Реализация зависимости (1) снимает ограничение на длину многоэлементного преобразователя, обусловленное при использовании периодических структур необходимостью создавать заданную расходимость пучка для компенсации в заданной полосе частот несоответствия законов изменения с частотой угла Брэгга и угла наклона фронта звуковой волны. Таким образом может быть достигнута высокая дифракционная эффективность при широкой полосе частот АО взаимодействия.

В настоящей работе по заданной частотной зависимости сдвига фазы на ячейку $\varphi_0(f)$, на основе полученного дисперсионного уравнения, учитывая соотношение (1), проанализировано поведение в полосе частот импеданса Z , а также длины электрода H каждой из ячеек многоэлементной структуры.

При анализе многоэлементного микрополоскового преобразователя с переменными параметрами предполагается, что шаг системы на некотором участке длины преобразователя L изменяется незначительно, так что система на этом участке еще может быть рассмотрена как периодическая. Такой подход позволяет использовать методы, разработанные и широко применяемые в теории замедляющих систем вакуумных электронных приборов с протяженным взаимодействием [2].

На рис. 1 схематично показан вид сверху многоэлементного пьезопреобразователя с переменными параметрами, анализирувавшийся в настоящей работе. На торце кристалла ниобата лития последовательно нанесены: металлический подслои 1, пьезопленка 2 и металлический надслой, выполненный в виде гребенчатой структуры 3 с переменными параметрами. Толщина пьезоэлектрической пленки изменяется (увеличивается) от высокочастотного края структуры (вход, на который подается СВЧ-сигнал), к ее низкочастотному краю, таким образом, что существует некоторая область длины L преобразователя (движущееся окно), в которой эффективность электроакустического преобразования максимальна и которая перемещается по длине L преобразователя при

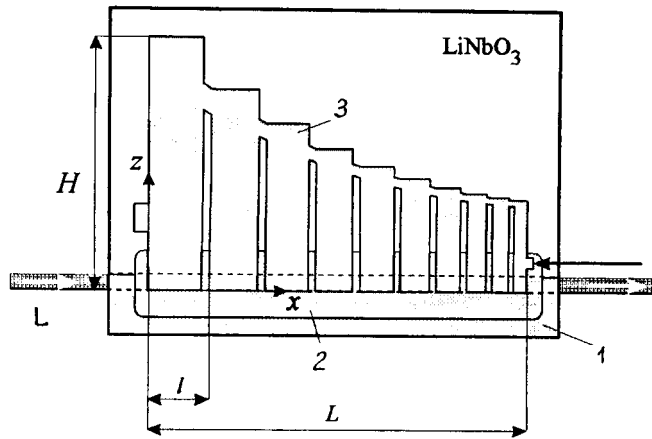


Рис. 1. Многоэлементная электродинамическая структура с переменными оптимизированными параметрами; X — срез, L — свет, HF — СВЧ-сигнал.

изменении рабочей частоты внутри полосы пропускания. Это окно на каждой частоте соответствует области многоэлементной структуры, которая обеспечивает точную подстройку фронта звуковой волны под угол Брэгга. Участки перекрытия подслоя и электродов гребенки представляют собой плоские конденсаторы с пьезоэлектрическим заполнением и образуют единичные элементы преобразователя, возбуждающие акустические колебания, а электроды гребенки, имеющие длину H , образуют индуктивности. Таким образом, такая электродинамическая структура может быть представлена как многозвенная фильтровая цепочка или замедляющая система (ЗС).

Задача расчета характеристик подобной системы решается в два этапа. На первом этапе в строгой электродинамической постановке методом Фурье–Галеркина [3] рассчитываются параметры периодической полосковой линии (ППЛ), представляющей собой решетку из идеально проводящих лент, регулярную вдоль оси z и периодическую вдоль оси x , расположенную на границе раздела магнитодиэлектриков.

На втором этапе, используя рассчитанные параметры ППЛ (постоянную распространения квази-Т волны $\gamma(\omega, \varphi_0)$, импеданс $Z(\omega, \varphi_0)$)

и условия на концах штырей, методом многопроводных линий [2] рассчитываются характеристики ЗС.

Связь между потенциалами и токами в плоскостях $z = 0$ и $z = H$ на концах штырей, прикрепленных к шине ($z = H$), можно записать с помощью матрицы передачи отрезка полосковой линии (шлейфа) и входной проводимости Y штыря ППЛ в плоскости $z = H$:

$$\begin{bmatrix} U_1(H) \\ I_1(H) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_s H & (jZ_s) \sin \gamma_s H \\ (j/Z_s) \sin \gamma_s H & \cos \gamma_s H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2(H) \\ I_2(H) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где γ_s и Z_s — волновое число и волновое сопротивление шлейфа.

Используя условие Флоке, получаем из (2) систему линейных алгебраических уравнений. Условие равенства нулю ее определителя является уравнением дисперсии волн в рассматриваемой периодической структуре:

$$\text{Det} \left(\begin{bmatrix} \cos \gamma_s H & (jZ_s) \sin \gamma_s H \\ (j/Z_s) \sin \gamma_s H & \cos \gamma_s H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix} e^{-j\varphi_0} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = 0. \quad (3)$$

Входное сопротивление $Z(H) = Y^{-1}$ в плоскости $z = H$ отрезка ППЛ с волновым сопротивлением Z_0 и волновым числом γ_0 , нагруженного на сопротивление $Z_{(0)}$ выражается формулой:

$$Z(H) = Z_0 \frac{Z_{(0)} + jZ_0 \operatorname{tg} \gamma_0 H}{Z_0 + jZ_{(0)} \operatorname{tg} \gamma_0 H}, \quad (4)$$

где $Z_{(0)} = -j \frac{1}{\omega C}$, C — емкость пьезоэлемента.

Используя описанные выше алгоритмы, был проведен расчет электродинамических характеристик квазипериодической структуры с медленно меняющимися параметрами. В диапазоне частот от 7.5 до 11 GHz задавался закон изменения фазового сдвига с частотой ($0.5 \geq \varphi_0/\pi \geq 0.1$), далее по формуле (1) рассчитывался шаг структуры, при котором на данной частоте и при заданном фазовом сдвиге выполнялось условие Брэгга. Для каждого шага численным методом находилось значение длины штыря H такое, чтобы выполнялось дисперсионное соотношение (3).

На рис. 2 представлены частотные зависимости заданного сдвига фазы на ячейку φ_0/π , а также рассчитанные для частотного диапазона 7.5–10.5 GHz зависимости шага структуры l , длины электрода H ,

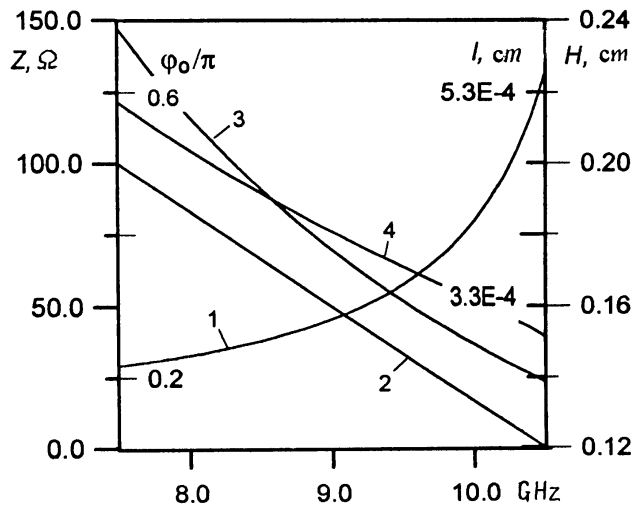


Рис. 2. Частотные зависимости импеданса (1), сдвига фазы на ячейку (2), шага структуры (3) и длины электрода (4).

импеданса Z решетки. Расчеты проводились для пьезопреобразователя из окиси цинка, размещенного на X -срезе кристалла ниобата лития. Угол падения светового пучка был выбран равным 0 относительно плоскости преобразователя (для $i = 2$, см. [1]). Вариации сдвига фазы на ячейку, слабо влияющие на форму кривых $l(f)$ и $H(f)$, могут быть, однако, использованы для подстройки входного импеданса многоэлементной структуры, с целью электрического согласования преобразователя с волноведущей линией. Приведенный пример расчета демонстрирует возможность реализации широкополосной ($\Delta f = 3 \text{ GHz}$) акустооптической брэгговской ячейки в 3-сантиметровом диапазоне длин радиоволн использованием многоэлементного преобразователя с переменными параметрами. Для более полного анализа предложенного метода весьма интересно также оценить реализуемую дифракционную эффективность и возможность создания максимально плоской частотной характеристики посредством коррекции частотной зависимости шага структуры.

Список литературы

- [1] *Петров В.В.* // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 22. С. 11–15.
- [2] *Силин Р.А., Сазонов В.П.* Замедляющие системы. М.: Радио и связь. 1966.
- [3] *Гуляев Ю.В., Жбанов А.И., Захарченко Ю.Ф.* и др. // Радиотехника и электроника. 1994. № 12. С. 2049–2058.