

07:08:09

Взаимодействие света с акустическими СВЧ волнами, возбуждаемыми непериодическими многоэлементными преобразователями. I

© М.А. Григорьев, А.В. Толстикова, Ю.Н. Навроцкая

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410071 Саратов, Россия
e-mail: magrig@sgu.ssu.ru nnet.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2000 г. В окончательной редакции 10 февраля 2001 г.)

Анализируются возможности осуществления широкополосного и эффективного акустооптического взаимодействия в коротковолновой части СВЧ диапазона с помощью непериодических многоэлементных пьезопреобразователей. Обсуждается вопрос о выборе закона изменения шага или периодов различных секций; рассчитывается импеданс пьезоэлемента с произвольным числом трансформирующихся слоев, находится акустическая мощность, излучаемая каждым пьезоэлементом преобразователя. Приводится пример 13-секционного преобразователя для центральной частоты 9 GHz.

Введение

Настоящая работа посвящена анализу использования многоэлементных электроакустических пьезопреобразователей (МЭАП) с переменным шагом в акустооптических дефлекторах коротковолновой части СВЧ диапазона. Одной из причин данной работы явилась публикация в ЖТФ [1], в которой на основании не вполне корректных рассуждений делается заключение, что применение указанных МЭАП "позволяет значительно расширить полосу частот акустооптического взаимодействия при возможности увеличения дифракционной эффективности". Другой причиной послужила работа [2], в которой экспериментально изучалось акустооптическое (АО) взаимодействие в ниобате лития на частотах от 7.5 до 10.5 GHz. Полученные в ней результаты, а также перспективы практического использования такого взаимодействия побудили нас выяснить, действительно ли имеются возможности повышения АО эффективности на указанных частотах с помощью непериодических МЭАП.

Известно [3–5], что МЭАП при изменении частоты возбуждают сканирующие акустические волны, позволяющие осуществлять автоподстройку "под угол Брэгга" в АО устройствах. Анализу таких преобразователей, представляющих собой периодические структуры, посвящены работы [6–13]. Однако автоподстройка, реализуемая с помощью известных преобразователей, не вполне соответствует требуемому брэгговскому закону. Это приводит к необходимости ограничивать длину МЭАП, чтобы компенсировать (исправить) указанное несоответствие расходом энергии акустического пучка. Таким образом, реальная длина акустооптического взаимодействия оказывается не столь велика, чтобы добиваться высокой АО эффективности в широкой полосе частот. Попытки создать МЭАП в виде периодической структуры, обеспечивающей на СВЧ идеальную автоподстройку, насколько нам известно, пока не увенчались успехом. К тому же сами пьезоэлементы, изготовленные на основе

известных пьезопленок (CdS, ZnO, AlN), не способны одинаково эффективно работать в сколь угодно широком диапазоне частот, что в конечном итоге сужает полосу пропускания всего акустооптического устройства.

В [1] обсуждается идея создания многоэлементного преобразователя с переменным шагом. Ход рассуждений заключается в следующем. Для многоэлементного преобразователя, являющегося периодической структурой, брэгговское условие может быть записано в виде [7]

$$\alpha_m - \Theta_{0i} = (-1)^i \Theta_B(f). \quad (1)$$

Здесь $\Theta_B(f)$ — брэгговский угол, под которым следует направлять волновой вектор света к фронту акустической волны; f — частота; Θ_{0i} — угол между волновым вектором падающего света и плоскостью торца звукопровода; m — номер пространственной гармоники возбуждающего электрического поля; i — номер случая, определяемый возможными направлениями падающего света ($i = 1$ или 2); α_m — угол между фронтом m -й парциальной упругой волны и плоскостью торца звукопровода, на котором расположен МЭАП. Этот угол выражается [7] формулой

$$\alpha_m = \arcsin[v_{ac}\varphi_m(f)/2\pi fl], \quad (2)$$

где $\varphi(f) = \varphi_0(f) + 2\pi m$ — сдвиг фазы на период МЭАП для m -й пространственной гармоники, $\varphi_0(f)$ — сдвиг фазы между соседними пьезоэлементами, l — период МЭАП.

На основании этих формул в [1] делается вывод, "что точная автоподстройка в заданной полосе частот (изменение угла α_m в точном соответствии с изменением брэгговского угла Θ_B) возможна лишь при изменении с частотой либо сдвига фазы на период $\varphi_m(f)$, либо периода системы l . В последнем случае система перестает быть периодической".

Что касается первой возможности, то она не вызывает сомнений и детально изучена в упомянутых выше рабо-

тах. Вторая же в указанной трактовке вызывает возражения. Требуемое изменение периода $l(f)$ не означает, что преобразователь перестает быть периодическим. По сути дела он становится структурой с переменной длиной при сохранении числа элементов. Но и с новым периодом он по-прежнему должен оставаться периодическим. В противном случае разложение электрического поля в МЭАП на пространственные гармоники будет невозможным и формулы (1) и (2) неверны. Ясно, что для сигнала сложного спектрального состава реализовать такой преобразователь нельзя, поскольку он одновременно должен обладать различными периодами, оставаясь периодическим.

Конечно, можно предложить непериодический МЭАП, у которого шаг изменяется вдоль преобразователя по какому-нибудь закону, в том числе и увязанному с брегговским условием (1). Такая возможность в [1] подвергается лишь качественному рассмотрению, и вопрос о выборе закона изменения шага вдоль МЭАП остается открытым.

Вытекающий из (1) и (2) вывод о переменной величине $l(f)$ следует понимать как возможность создания многосекционного преобразователя, состоящего из отрезков МЭАП (секций) с различными периодами. Каждая секция должна работать как самостоятельный МЭАП, обладающий определенной центральной частотой и полосой пропускания. Можно предположить, что совокупность секций обеспечит работу МЭАП в заданной полосе частот при требуемой АО эффективности. Физически ясно, что в таком случае увеличением длины секций можно будет добиться высокой АО эффективности, но при этом придется увеличить число секций, поскольку частотная полоса автоподстройки каждой из них (поддиапазон) будет уменьшаться. Периоды в секциях должны определяться в соответствии с формулами (1) и (2), центральными частотами поддиапазонов, а длины — шириной последних. Для получения высокой АО эффективности также необходимо, чтобы пьезоэлементы в каждой конкретной секции работали в достаточно узком поддиапазоне, который обслуживает данная секция. В противном случае "звук" будет бесполезно возбуждаться и теми секциями, которые имеют неподходящий для данной частоты период. Таким образом, минимальная полоса частот, в которой могут работать реальные пьезоэлементы, определяет ширину поддиапазонов, а следовательно, число секций и максимальную АО эффективность.

Здесь и во II части настоящей работы будем считать, что фотоупругой средой является ниобат лития X-среза, а центральная частота рабочего диапазона равна 9 GHz. Длину волны света в вакууме примем 0.63 μm . Затухание упругих волн положим равным нулю. Такая конкретизация не приведет к потере общности результатов рассмотрения роли непериодичности МЭАП в АО устройствах. Анализируемые преобразователи будем рассматривать как квазистационарные цепи, составленные из сосредоточенных пьезоэлементов с постоянным фазовым сдвигом между соседними элементами и пре-

небрежимо малым импедансом соединительных проводников. Основанием к такому квазистационарному представлению МЭАП является тот факт, что длина электромагнитной волны много больше линейных размеров цепи. Например, протяженность 13-секционного МЭАП, предназначенного для работы на частоте ~ 10 GHz, составляет ~ 4.9 mm при 1345 пьезоэлементах.

Часть II будет¹ посвящена расчету частотных зависимостей эффективности АО взаимодействия в случаях, когда для возбуждения "звука" используются различные непериодические МЭАП как с плавным изменением шага, так и секционированные. Будут сопоставлены непериодические МЭАП, являющиеся модификациями периодического противофазного (ПФ) преобразователя.

Выбор закона изменения шага

Остановимся сначала на выборе периодов в различных участках секционированного преобразователя. Из (1) и (2) следует, что при постоянном угле падения света Θ_0 требуемый период МЭАП должен зависеть от частоты по закону

$$l = \frac{v_{\text{ac}} |\varphi_m(f)|}{2\pi f \sin[\Theta_{0i} + (-1)^i \Theta_B(f)]}. \quad (3)$$

Если располагать центральными частотами поддиапазонов и углом падения Θ_0 , то по этой формуле нетрудно вычислить необходимые периоды во всех секциях. Чтобы автоподстройка хотя бы в одной из них имела место в возможно более широком диапазоне частот, целесообразно период в ней выбирать из условия [7]

$$(d\alpha_m/df)_{f=f_0} = (-1)^i (d\Theta_B/df)_{f=f_0}, \quad (4)$$

где f_0 — центральная частота.

Здесь мы ограничимся рассмотрением секционированного преобразователя, прототипом которого является периодический, противофазный преобразователь [7]. В [8] показано, что для него, а также для синфазного преобразователя из (4) следует

$$l = k_m n_0 v_{\text{ac}}^2 / f_0^2 \lambda_0, \quad (5)$$

где $k_m = |\varphi_0/\pi + 2m|$.

Такой период будем в дальнейшем называть оптимальным. Необходимо отметить, что по этой формуле нельзя выбирать периоды в различных секциях, поскольку каждый раз при изменении частоты требуется из (1) находить и новый угол падения Θ_0 . Если выбрать по формуле (5) период l , а затем угол Θ_0 из (1) для одной из секций, то для других секций придется l находить по формуле (3), считая $\Theta_0 = \text{const}$.

Рассмотрим пример, когда фотоупругой средой служит LiNbO₃ X среда ($n_0 = 2.2$, $v_{\text{ac}} = 6.57 \cdot 10^3$ m/s). При $\lambda_0 = 0.63 \mu\text{m}$ в случае МЭАП типа ПФ ($k_m = 1$) для двух

¹ "Взаимодействие света с акустическими СВЧ волнами, возбуждаемыми непериодическими многоэлементными преобразователями" будет напечатана в следующем номере.

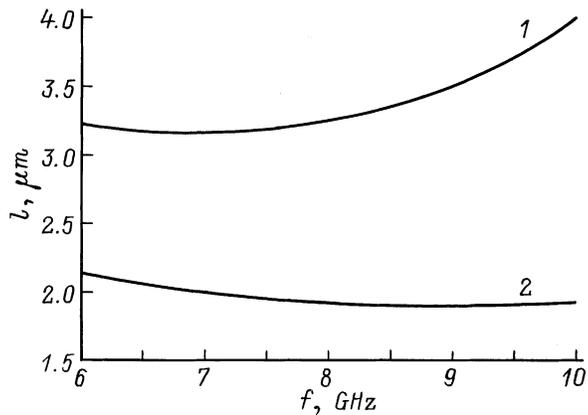


Рис. 1. Зависимость периода МЭАП от частоты. Θ_0 , rad: 1 — 0.3, 2 — 0.39.

частот $f_0 = 8.9$ и 7 GHz из (5) получим соответственно $l = 1.9$ и $3.076 \mu\text{m}$. Из (1) следует соответственно $\Theta_0 = 0.39$ и 0.302 rad. При таких постоянных углах Θ_0 требуемые частотные зависимости (3) примут вид, показанный на рис. 1. Видно, что обе кривые $l(f)$ имеют минимум: одна — при $f_0 = 8.9$ GHz ($l_{\min} \approx 1.9 \mu\text{m}$), а другая — при ~ 7 GHz ($l \approx 3.1 \mu\text{m}$). Очевидно, автоподстройка в максимально возможной полосе частот будет наблюдаться вблизи минимума кривой $l(f)$, поскольку требуемый период здесь слабо зависит от частоты. В случае секционированного МЭАП участки, предназначенные для работы на других частотах, должны иметь больший период в соответствии с кривой на рис. 1. Ширина поддиапазонов автоподстройки у других секций, очевидно, будет становиться все меньше по мере удаления от минимума. Это связано с ростом крутизны кривой $l(f)$. Восстановление ширины частотного поддиапазона путем уменьшения длины данной секции недопустимо, поскольку вызовет уменьшение эффективности АО взаимодействия. Поэтому для сохранения полосы пропускания МЭАП придется увеличивать число секций, так как те из них, которые предназначены для работы вдали от f_0 , будут при фиксированной длине обеспечивать меньшую ширину поддиапазона.

На рис. 1 видно, что верхняя кривая требует существенно больших периодов в секциях. Например, на частоте 9 GHz из нижней кривой следует, что период должен быть равен $1.9 \mu\text{m}$, а из верхней — $3.5 \mu\text{m}$. Очевидно, последний размер предпочтительнее по технологическим соображениям. Именно поэтому в дальнейшем при анализе работы секционированного преобразователя мы воспользуемся верхней кривой.

Нахождение периодов в конкретных секциях МЭАП возможно лишь тогда, когда известны ширина поддиапазонов и их центральные частоты. Определяющую роль при этом играют частотные свойства пьезоэлементов. Необходимо, чтобы в данной конкретной секции они работали преимущественно в полосе частот соответствующего диапазона. Вопрос о возможности реализации

таких пьезоэлементов является одним из важнейших при создании многосекционного МЭАП.

Остановимся теперь на МЭАП с плавным изменением шага $l(x)$ вдоль преобразователя. Для получения высокой АО эффективности такой МЭАП, очевидно, должен иметь достаточно большое число элементов. Тогда каждой спектральной составляющей сигнала будет "принадлежать" своя группа элементов с подходящим шагом, что и обеспечит требуемую эффективность АО взаимодействия. Понятно, что внутри группы шаг не должен существенно изменяться именно потому, что общее число элементов должно быть велико. Отсюда следует, что акустическое поле всех групп в целом напоминает случай секционированного преобразователя. Отличие заключается в том, что в силу плавного характера изменения шага вопрос о расстоянии между секциями теряет смысл. Ясно, что шаг в центре каждой группы должен быть выбран, как и у секционированного МЭАП, по формуле (3).

В [1] предлагается увязать функцию $l(x)$ с частотной зависимостью $l(f)$, даваемой указанной формулой, но вопрос о конкретном выборе этой функции остается открытым. Здесь при анализе АО свойств непериодических МЭАП с плавным изменением шага мы будем использовать линейную связь частоты и координаты вдоль преобразователя. Алгоритм получения этой связи заключается в следующем. Диапазон частот, в котором должен работать МЭАП, состоящий из M элементов, разбивается на $(M - 1)$ интервалов, каждый из которых ставится в соответствие определенной паре соседних элементов. Пусть при этом номер частотного интервала совпадает со "сквозным" номером первого элемента этой пары. По формуле (3) для нижнего края каждого интервала находится искомая величина l , которая и принимается за расстояние между центрами соответствующей пары элементов. Мы не будем здесь останавливаться на других способах задания закона $l(x)$. Отметим лишь, что приведенный способ не дает оптимального закона $l(x)$, поскольку кривая $l(f)$ имеет переменную крутизну $k = dl/df$. Поэтому МЭАП не будет одинаково эффективно работать в различных участках частотного диапазона. Там, где крутизна $k(f)$ больше, эффективность АО взаимодействия будет, по-видимому, меньше. Для исправления частотной характеристики АО устройства потребуется вносить соответствующие коррективы в закон $l(x)$.

Импеданс пьезоэлемента

Для предсказания свойств МЭАП следует найти зависимость импеданса излучения одиночного пьезоэлемента Z_{Σ} от частоты. Это позволит вычислять акустическую мощность, излучаемую каждым пьезоэлементом преобразователя, а следовательно, и эффективность АО взаимодействия при использовании того или иного варианта МЭАП.

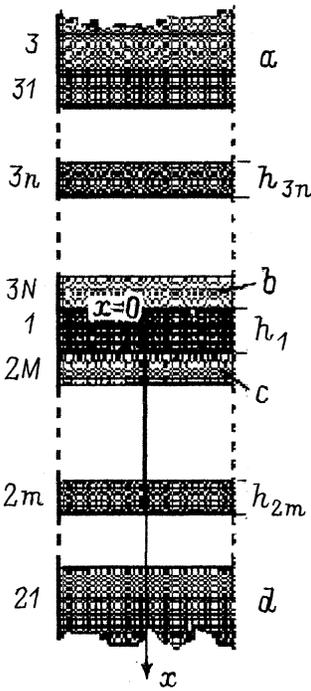


Рис. 2. Анализируемая модель пьезоэлемента: *a* — пассивная нагрузка, *b* — надслой, *c* — подслой, *d* — фотоупругая среда.

Чтобы иметь возможность формировать требуемую частотную характеристику преобразователя, рассмотрим модель многослойного пьезоэлемента, схематически показанную на рис. 2. Пьезоэлектрический слой *1* помещен между двумя бесконечно длинными средами, одна из которых — фотоупругий кристалл *2*, а вторая — пассивная нагрузка *3*. Между этими средами и пьезослоем располагаются наборы промежуточных трансформирующихся слоев. Нижним слоям присвоены номера $2m$, где $m = 1, 2, \dots, M$ — номер слоя, отсчитываемый от звукопровода, а верхним — $3n$, где $n = 1, 2, \dots, N$ отсчитывается от пассивной нагрузки. Цифры *2* и *3* в указанных номерах означают, что соответствующие слои находятся со стороны 2-й и 3-й сред. Слои с номерами $2M$ и $3N$ будем считать металлическими электродами, непосредственно примыкающими к пьезоэлектрику, и называть их "подслоем" и "надслоем".

Предположим, что кристаллический пьезоэлектрический слой ориентирован своей продольной нормалью вдоль оси *x*, перпендикулярно торцу фотоупругого звукопровода. Такая ситуация имеет место, в частности, когда возбуждается продольная волна пленкой окиси цинка, ориентированной осью 6-го порядка вдоль указанного направления. Подслой, надслой, все промежуточные слои и звукопровод с акустической нагрузкой будем считать изотропными, или ориентированными продольной нормалью параллельно оси *x*. Этому условию удовлетворяет звукопровод из LiNbO_3 , когда продольная упругая волна возбуждается в нем вдоль оси *X* кристаллографической системы координат. При таких допущениях уравнения,

описывающие электромеханические процессы в пьезоэлектрике, сводятся к скалярным.

Поступая аналогично тому, как это делалось в работах [14,15], можно получить следующее выражение для безразмерного импеданса пьезоэлемента:

$$Z_{\Sigma}(\omega)\omega C_0 = \delta_{\Sigma} + j\tau_{\Sigma} = -j + j \frac{k^2}{(\beta_1 h_1)} \times [(e^{-j\beta_1 h_1} - 1) u'_{1+} + (e^{j\beta_1 h_1} - 1) u'_{1-}], \quad (6)$$

где C_0 — статическая емкость пьезослоя; δ_{Σ} и τ_{Σ} — безразмерные активная и реактивная составляющие импеданса пьезоэлемента; k — коэффициент электромеханической связи; $(\beta_1 h_1)$ — универсальная независимая переменная, равная произведению волнового числа в пьезоэлектрике β_1 и его толщины h_1 ; u'_{1+} и u'_{1-} — безразмерные комплексные амплитуды соответственно прямой и обратной волн механического смещения в пьезоэлектрике

$$u'_1 = u_1 Z_{10} \varepsilon \omega / e D_0,$$

где u_1 — размерная комплексная амплитуда механического смещения.

Из условий на границах пьезоэлектрика будем иметь

$$\left[\frac{Z_{2M}}{Z_{10}} - 1 \right] e^{-j\beta_1 h_1} u'_{1+} + \left[\frac{Z_{2M}}{Z_{10}} + 1 \right] e^{j\beta_1 h_1} u'_{1-} = -j, \quad (7)$$

$$\left[\frac{Z_{3N}}{Z_{10}} + 1 \right] u'_{1+} + \left[\frac{Z_{3N}}{Z_{10}} - 1 \right] u'_{1-} = j. \quad (8)$$

Здесь Z_{2M} — акустическое сопротивление, получающееся в результате трансформации волнового сопротивления звукопровода Z_{20} последовательностью M штук слоев, расположенных ниже пьезоэлектрика (рис. 2); Z_{3N} — аналогичный результат трансформации акустического волнового сопротивления Z_{30} N слоями, расположенными выше пьезоэлектрика. Каждый из нижних слоев в отсутствие затухания трансформирует сопротивление по закону

$$Z_{2m} = Z_{2,m0} \frac{Z_{2,m-1} \cos(a_{2m} \beta_1 h_1) + j Z_{2,m0} \sin(a_{2m} \beta_1 h_1)}{Z_{2,m0} \cos(a_{2m} \beta_1 h_1) + j Z_{2,m-1} \sin(a_{2m} \beta_1 h_1)}, \quad (9)$$

где $Z_{2,m0}$ — акустическое волновое сопротивление слоя с номером $2m$; Z_{2m} — акустическое сопротивление в слое с таким же номером на его границе, обращенной к пьезоэлектрику; $Z_{2,m-1}$ — сопротивление в предыдущем слое на аналогичной границе; a_{2m} — нормированная толщина слоя

$$a_{2m} = \frac{v_1}{v_{2m}} \frac{h_{2m}}{h_1},$$

v_1, v_{2m} — скорости звука в соответствующих слоях.

Для верхних слоев закон трансформации получается из (9) заменой индекса $2m$ на $3n$. В отсутствие пассивной акустической нагрузки следует положить $Z_{30} = 0$.

Таким образом, алгоритм вычисления нормированного импеданса пьезоэлемента $\delta_{\Sigma} + j\tau_{\Sigma}$ состоит в следующем: сначала итерациями формулы (9) вычисляются Z_{2M}

и Z_{3N} , затем решается система линейных алгебраических уравнений (7) и (8) и найденные безразмерные амплитуды u'_{1+} и u'_{1-} подставляются в (6). В результате получаются активная и реактивная составляющие

$$\delta_{\Sigma} = R_{\Sigma}\omega C_0, \quad \tau_{\Sigma} = x_{\Sigma}\omega C_0. \quad (10), (11)$$

Активное сопротивление δ_{Σ} представляет собой сумму $\delta_{\Sigma} = \delta_{ac} + \delta_{load}$, где δ_{ac} — сопротивление, отвечающее за возбуждение акустической волны в звукопроводе, а δ_{load} — в пассивной нагрузке. В пренебрежении акустическим затуханием в слоях пьезоэлемента указанную величину можно найти на основе следующих соображений.

К пьезоэлементу сверху и снизу (рис. 2) присоединены два комплексных акустических сопротивления Z_{3N} и Z_{2M} . Первое из них представляет собой результат трансформации промежуточными слоями акустического волнового сопротивления пассивной нагрузки, а второе — трансформации волнового сопротивления звукопровода. Мощности, поглощаемые этими сопротивлениями, соответственно равны

$$P_{load} = (\text{Real } Z_{3N})\omega^2 |u_1(x=0)|^2/2,$$

$$P_{ac} = (\text{Real } Z_{2M})\omega^2 |u_1(x=h_1)|^2/2.$$

Откуда, переходя к безразмерному смещению, нетрудно прийти к следующему выражению:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{ac}}{\delta_{\Sigma}} &= \frac{P_{ac}}{P_{ac} + P_{load}} \\ &= \frac{(\text{Real } Z_{2M})|u'_1(x=h_1)|^2}{[(\text{Real } Z_{2M})|u'_1(x=h_1)|^2 + (\text{Real } Z_{3N})|u'_1(x=0)|^2]}. \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $u'_1(x=h_1) = u'_{1+}e^{-j\beta_1 h_1} + u'_{1-}e^{j\beta_1 h_1}$, $u'_1(x=0) = u'_{1+} + u'_{1-}$. В случае, когда пассивная нагрузка отсутствует, т.е. $Z_{30} = 0$, будем иметь $\text{Real } Z_{3N} = 0$, и тогда $\delta_{ac} = \delta_{\Sigma}$. Аналогично можно записать

$$\frac{\delta_{load}}{\delta_{\Sigma}} = \frac{(\text{Real } Z_{3N})|u'_1(x=0)|^2}{[(\text{Real } Z_{2M})|u'_1(x=h_1)|^2 + (\text{Real } Z_{3N})|u'_1(x=0)|^2]}.$$

Акустическая мощность, излучаемая каждым пьезоэлементом

Рассмотрим моноэлементный преобразователь типа ПФ, содержащий M элементов и представляющий собой в электрическом отношении последовательное соединение двух групп элементов, в каждой из которых они соединены параллельно. Устройство такого МЭАП схематически показано на рис. 3. На поверхности звукопровода имеются тонкопленочные металлические встречные штыри. Сверху на них последовательно нанесены пьезоэлектрическая и металлическая полоски. Переменное напряжение подводится к встречным штырям. Тангенциальные электрические поля в пьезоэлектрике между штырями шунтируются металлической полоской.

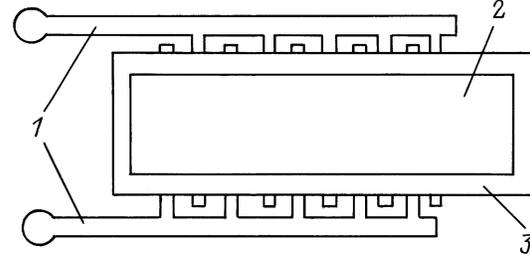


Рис. 3. Схематическое устройство многоэлементного преобразователя: 1 — встречные штыри, 2 — металл, 3 — пьезоэлектрик.

Нормальные поля между этой полоской и штырями приводят к образованию последовательности пьезоэлементов с противофазным возбуждением. Все нечетные элементы входят в одну группу, а все четные — в другую. Пусть импеданс χ -го элемента есть Z_{χ} . Тогда импеданс всех нечетных элементов будет равен

$$Z_{od} = \left[\sum_{\chi=1}^M \frac{(1 - (-1)^{\chi})}{2Z_{\chi}} \right]^{-1}, \quad (13)$$

импеданс всех четных

$$Z_{ev} = \left[\sum_{\chi=1}^M \frac{(1 + (-1)^{\chi})}{2Z_{\chi}} \right]^{-1}, \quad (14)$$

а суммарный импеданс

$$Z_{\Sigma} = Z_{od} + Z_{ev} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}. \quad (15)$$

Рассмотрим простейший случай, когда МЭАП представляет собой нагрузку передающей линии с волновым сопротивлением Z_0 . Будем считать, что генератор согласован с этой линией, т.е. его внутреннее сопротивление также равно Z_0 . В таком случае можно показать, что акустическая мощность, излучаемая χ -м пьезоэлементом, будет выражаться формулой

$$\begin{aligned} P_{\chi} &= \frac{4Z_0 P_{al} \{ [(1 + (-1)^{\chi})/2]|Z_{ev}|^2 + [(1 - (-1)^{\chi})/2]|Z_{od}|^2 \}}{|Z_0 + Z_{\Sigma} + Z_k|^2 |Z_{\chi}|^2} \\ &\times \text{Real } (Z_{\chi}), \end{aligned} \quad (16)$$

где P_{al} — мощность, отдаваемая генератором в согласованную нагрузку; Z_k — импеданс контактных проводников, соединяющих МЭАП с передающей линией.

Из этой формулы следует, что зависимость P_{χ} от Z_0 имеет максимум при некотором значении волнового сопротивления, которое будем называть оптимальным,

$$Z_{0,opt} = |Z_{\Sigma} + Z_k|. \quad (17)$$

Таким образом, оптимальное волновое сопротивление подводящей линии должно быть равно модулю импеданса МЭАП с учетом потерь. Линию с таким волновым

Номер секции, ν	Центральная частота поддиапазона f_0 , GHz	Число элементов в секции M_ν	Период l , μm	Толщина надслоя P , $10^{-1} \mu\text{m}$	Ширина поддиапазона MHz
1	8.16	112	3.278	6.153	275
2	8.41	110	3.329	5.932	230
3	8.612	108	3.379	5.766	200
4	8.804	107	3.435	5.616	180
5	8.97	106	3.489	5.484	165
6	9.13	105	3.546	5.379	155
7	9.272	103	3.605	5.275	140
8	9.404	102	3.663	5.187	135
9	9.53	101	3.724	5.101	125
10	9.65	100	3.786	5.024	120
11	9.77	98	3.854	4.949	120
12	9.88	97	3.921	4.881	100
13	9.98	96	3.986	4.821	100

сопротивлением также будем называть оптимальной. Последнюю можно в широкой полосе частот согласовать со стандартной линией, у которой $Z_0 = 50 \Omega$. Это можно сделать, например, с помощью чебышевского ступенчатого перехода. При таком способе подведения ЭМ мощности к МЭАП отсутствуют реактивные согласующие элементы и обеспечивается достаточно широкополосная работа преобразователя.

Проведенный на основании полученных формул анализ показал, что узкополосные пьезоэлементы, пригодные для использования в секциях МЭАП, могут быть реализованы простыми средствами. Оказывается, можно подобрать общую для всех секций толщину пьезоэлектрика, род металла и толщину подслоя, а центральную частоту поддиапазонов обеспечивать изменением только толщины надслоя. Пьезоэлемент на звукопроводе из ниобата лития X-среза с пленкой окиси цинка ($0.32 \mu\text{m}$), с подслоем из алюминия ($0.16 \mu\text{m}$) и надслоем из золота ($0.61 \dots 0.48 \mu\text{m}$) способен работать в полосе частот $\sim 3\%$ и перестраиваться за счет изменения толщины надслоя в диапазоне 8–10 GHz. В таблице представлены основные параметры секционированного МЭАП с такими пьезоэлементами, состоящего из 13 секций с общим числом элементов $M = 1345$. Приводятся центральные частоты поддиапазонов, числа элементов в секциях, толщины надслоя и периоды l , вычисленные по формуле (3) для заданного угла $\Theta = 0.3019 \text{ rad}$. Ширина пьезоэлементов была принята равной $50 \mu\text{m}$. Общая длина секций составила $\sim 4.9 \text{ mm}$. В последнем столбце таблицы даны значения ширины частотной зависимости эффективности АО взаимодействия (η_{AO}) "по уровню 3 dB" для каждой секции (см. часть II).

На рис. 4 показана вычисленная по формуле (17) с привлечением формул (13)–(15) частотная зависимость модуля импеданса такого МЭАП. Полученная кривая определяется главным образом реактивным сопротивлением суммарной емкости МЭАП $1/\omega C_\Sigma$. Активная

составляющая вызывает слабую осцилляцию представленной на рис. 4 кривой. Из нее следует, что оптимальным волновым сопротивлением будет $Z_{0,opt} \approx 1.6 - 1.7 \Omega$.

Частотные зависимости акустической мощности, излучаемой отдельными пьезоэлементами в секциях преобразователя, показаны на рис. 5. Вычисления выполнены по формуле (16) с использованием соотношений (12)–(14). Мощность, отдаваемая генератором в согласованную нагрузку, принималась равной $P_{al} = 1 \text{ W}$, а сопротивление потерь $R_{los} = 0.1 \Omega$. Параметром у каждой кривой указан номер элемента, для которого выполнен расчет. Видно, что акустическая мощность, соответствующая максимумам кривых, равна $\sim 500 \mu\text{W}$. Таким образом, одна секция при ~ 100 элементах на центральной частоте поддиапазона будет излучать $\sim 50 \text{ mW}$ акустической мощности.

Следует отметить, что представленные кривые для всех секций имеют примерно одинаковую ширину на уровне половинной мощности. Тот факт, что по мере увеличения частоты кривые сближаются, объясняется уменьшением полосы автоподстройки в секциях в связи с увеличением периода, как того требует кривая, показанная на рис. 1, и увеличением кривизны этой кривой.

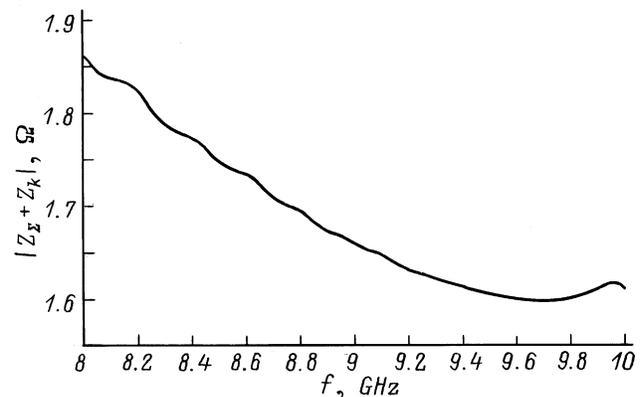


Рис. 4. Зависимость модуля импеданса МЭАП от частоты.

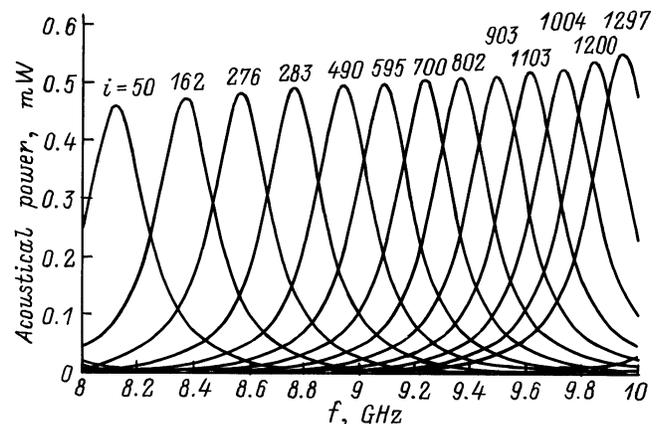


Рис. 5. Зависимость мощности акустической волны, излучаемой одиночными пьезоэлементами, от частоты.

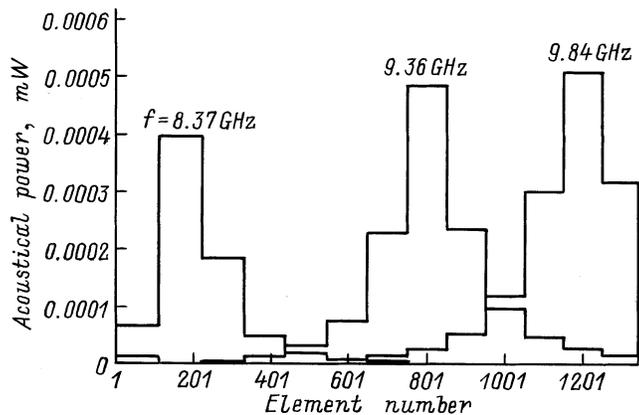


Рис. 6. Зависимость акустической мощности, излучаемой одним элементом, от номера элемента.

Распределение излучаемой акустической мощности по элементам иллюстрируется на рис. 6 расчетными зависимостями для трех центральных частот поддиапазонов (8.37, 9.36 и 9.84 GHz). На рисунке видно, что акустический сигнал какой-либо из этих частот излучается в основном элементами одной секции. Другие секции, непосредственно прилегающие к ней, излучают существенно меньшие мощности. С ростом частоты область МЭАП, которая возбуждает упругие волны, перемещается в направлении увеличения номера элемента.

Заключение

В работе были обсуждены принципы построения непериодических МЭАП, обеспечивающих автоподстройку "под угол Брэгга" в акустических устройствах. Подготовлены необходимые теоретические соотношения для анализа эффективности АО взаимодействия в зависимости от частоты при использовании различных непериодических многоэлементных преобразователей с противофазными соседними элементами. Получены расчетные соотношения для вычисления импеданса пьезоэлемента с произвольным числом пассивных слоев, включая тыльную, акустическую, поглощающую нагрузку. Эти легко программируемые на ЭВМ соотношения имеют самостоятельную ценность, поскольку могут быть использованы при разработке СВЧ пьезопреобразователей с желаемыми свойствами, в том числе пластинчатых преобразователей, у которых между пьезоэлектриком и звукопроводом располагается несколько связующих слоев. Подготовлены формулы для расчета акустической мощности, излучаемой каждым пьезоэлементом МЭАП, когда все они или несколько их групп различаются между собой частотными свойствами. Продемонстрирован выбор геометрии широкополосного 13-секционного МЭАП коротковолновой области СВЧ диапазона с узкополосными пьезоэлементами. Показано, как изменяет-

ся излучаемая пьезоэлементами акустическая мощность в зависимости от номера элемента и частоты.

Список литературы

- [1] Петров В.В. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 11. С. 53–57.
- [2] Петров В.В., Григорьев М.А., Толстиков А.В. // Опт. и спектр. 2000. Т. 89. № 3. С. 505–511.
- [3] Korpel A., Adler R., Desmares P., Smith T.M. // IEEE J. 1965. Vol. QE-1. N 1. P. 60–61.
- [4] Gordon E.I. // Proc. IEEE. 1966. Vol. 54. N 10. P. 1391–1401.
- [5] Alphonse G.A. // RCA Rev. 1972. Vol. 33. N 3. P. 543–594.
- [6] Вьюхин В.Н. // Автометрия. 1977. № 1. С. 100–102.
- [7] Григорьев М.А., Зюрюкин Ю.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1982. Т. 25. № 8. С. 948–957.
- [8] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 7. С. 908–921.
- [9] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. № 8. С. 1053–1064.
- [10] Дерюгин И.А., Погубельский А.П., Талалаев М.А., Тетерин Г.Э. // РИЭ. 1982. Т. 27. № 1. С. 182–184.
- [11] Zyuryukin Y.A. // Proc. Ultrasonics World Congress. Pt 1. Duisburg (Germany), 1995. P. 297–300.
- [12] Guriev B., Zyuryukin Y., Colosov V., Shechtman L. // Proc. Intern. Conf. on Optical Information Processing. Bellingham (Washington, USA), 1996. Vol. 2969. P. 467–470.
- [13] Zyuryukin Y.A., Colosov V.V., Zavarin S.V., Shechtman L.A. // Proc. IV Intern. Symp. on Surface Waves in Solid and Layered Structures. Intern. Conf. for Young Researchers on Acoustoelectronic and Acoustooptic Information. St. Petersburg: State University of Aerospace Instrumentation, 1998. P. 357–360.
- [14] Григорьев М.А., Петров В.В., Толстиков А.В. // РЭ. 1990. Т. 35. № 9. 1977–1987.
- [15] Григорьев М.А., Курьшов С.С., Толстиков А.В. // Акуст. журн. 1990. Т. 36. Вып. 2. С. 255–261.