



(19) RU (11) 2158475 (13) C1

(51) 7 Н 03 Н 9/00, 9/25

РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
к патенту Российской Федерации

1

(21) 99109614/09 (22) 29.04.1999
(24) 29.04.1999
(46) 27.10.2000 Бюл. № 30
(72) Швец В.Б., Орлов В.С.
(71) (73) Швец Валерий Борисович, Орлов Виктор Семенович
(56) "Proc. 1995 IEEE Ultrasonics Symposium", Seattle, USA, p.p. N 17-22. RU 2117383 C1, 10.08.1998. SU 585589 A, 15.01.1978. WO 93/08641 A1, 29.04.1993. WO 95/14332 A1, 26.05.1995. EP 0840446 A2, 06.05.1998. EP 0854571 A2, 22.07.1998.
(98) 115569, Москва, Каширское ш., д.80, корп.1, кв.135, Орлову В.С.
(54) РЕВЕРСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ЕСТЕСТВЕННОЙ НАПРАВЛЕННОСТЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН (ВАРИАНТЫ)
(57) Изобретение относится к радиоэлектронике и может быть использовано в фильтрах промежуточных и несущих радиочастот для селекции сигналов в радиотелефонах, пейджерах, мобильных системах связи и т.д. Техническим результатом является уменьшение вносимых потерь устройства. При подаче электрического сигнала на однонаправленный преобразователь, содержащий элементарные секции из противофазных возбуждающих электродов и отражающего электрода, в пьезоэлектрической подложке возбуждаются поверхностные акустические волны (ПАВ), распространяющиеся в прямом и обратном направлении. Для обеспечения "естественной" направленности излучения подложка выполнена из монокристалла, в котором

2

механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$. Для первого варианта преобразователя в каждой элементарной секции ширины b_1 и b_3 первого и второго возбуждающих электродов выбраны соответственно из соотношений $\lambda/16 < b_1 < \lambda/8$, $\lambda/6 < b_3 < \lambda/3$, а ширина отражающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_5 < \lambda/3$. При этом расстояние между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выбрано из соотношения $\lambda/16 < b_2 < \lambda/6$, а расстояние между соседними краями второго возбуждающего и отражающего электродов выбрано из соотношения $\lambda/6 < b_4 < \lambda/3$, где λ - длина ПАВ на средней частоте. Во втором варианте преобразователя ширины возбуждающих электродов выбраны в пределах $\lambda/16 < b_1 < \lambda/6$ и $\lambda/6 < b_3 < 3\lambda/8$, а ширина отражающего электрода выбрана от соотношения $\lambda/6 < b_5 < 3\lambda/8$ при зазорах $\lambda/16 < b_2 < \lambda/6$ и $\lambda/24 < b_4 < \lambda/6$. При указанных соотношениях происходит смещение центра возбуждения ПАВ относительно центра отражения ПАВ на расстояние $\pm\lambda/8$ при заданных $\Delta\varphi$ и обеспечивается повышение эффективности преобразования ПАВ на 20% при одновременном увеличении естественной направленности излучения в реверсном направлении. Это позволяет снизить вносимые потери преобразователя и фильтра, в котором преобразователь применяется. 2 с. и 8 з.п.ф.-лы, 8 ил.

RU

2158475

C1

RU

2158475

C1

Изобретение относится к радиоэлектронике и может быть использовано в фильтрах промежуточных и несущих радиочастот для селекции сигналов в радиотелефонах, пейджерах, мобильных системах связи и т.д.

Известен встречно-штыревой преобразователь (ВШП) поверхностных акустических волн (ПАВ), содержащий пьезоэлектрическую подложку, на рабочей поверхности которой размещены противофазные возбуждающие электроды.

Ширины b_i , возбуждающих электродов выполнены равными $\lambda/4$, а расстояние между краями соседних возбуждающих электродов выбрано также равным $\lambda/4$, где λ - длина ПАВ на средней частоте преобразователя (фиг.1а) [1].

Электроды преобразователя могут быть выполнены как прямыми [1], так и наклонными (в веерном преобразователе) или ступенчатыми [14].

Известный преобразователь обладает высокой эффективностью трансформации электрической энергии в акустическую и обратно. Это обусловлено тем, что в каждой элементарной секции, протяженность которой ограничена длиной волны λ , преобразователь содержит два возбуждающих электрода и четыре δ - источника ПАВ, размещенных на краях этих электродов. В результате волны, излученные этими источниками, складываются синфазно [1]. Удельную эффективность известного преобразователя [1] на длину волны λ можно оценить, преобразуя четыре δ - источника $\lambda/2$ и $-\lambda/2$ с учетом их знаков в один эквивалентный источник, размещенный в условном центре возбуждения ОО (фиг. 1 а, б).

Используемый здесь термин "центр возбуждения" T_c для передающего преобразователя относится к такой позиции в передающем преобразователе, в которой две локально возбуждаемые волны, распространяющиеся в прямом $+X$ и обратном $-X$ направлениях, находятся в фазе.

Соответственно для приемного преобразователя локальные центры преобразования T_c располагаются в таких позициях в

преобразователе, в которых две встречно распространяющиеся локально преобразуемые акустические волны находятся в фазе друг с другом [3].

Используемый ниже термин "центр отражения" R_c относится к тем позициям в преобразователе, в которых локальный коэффициент отражения имеет чисто мнимое значение [3].

Оба эти определения зависят от волновых переменных, выбранных для описания акустических волн.

В общем случае локальные центры преобразования T_c (возбуждения) в известном преобразователе с двумя электродами на длину волны совпадают с центрами электродов или промежутков между ними шириной $b = \lambda/4$. В преобразователях с расщепленными электродами шириной $b = \lambda/8$ (или с четырьмя электродами на длину волны, локальные центры преобразования T_c обычно совпадают с центрами промежутков. Сами по себе расщепленные электроды не имеют локализованных внутренних отражений.

Локальные центры возбуждения или локальные центры отражения, относящиеся к отдельным электродам, можно преобразовать в соответственно в единый условный центр возбуждения T_c или центр отражения R_c , относящийся к элементарной секции.

Считая в известном преобразователе [1] амплитуды δ - источников одинаковыми, можно найти эффективность эквивалентного источника по величине \vec{E}_1 излучаемой им волны, складывая парциальные волны, излучаемые каждым δ - источником. Для волны, излучаемой вправо (прямая волна в направлении $+X$) в соответствии с фиг. 1б, получим:

$$\vec{E}_1^+ = -\frac{A}{2}\exp(-i135^\circ) + \frac{A}{2}\exp(-i45^\circ) + \frac{A}{2}\exp(i45^\circ) - \frac{A}{2}\exp(i135^\circ) = \sqrt{2} \cdot A \approx 1.41A \quad (1)$$

Аналогично, для волны, излучаемой влево (обратная волна в направлении $-X$)

$$\vec{E}_1^- = \sqrt{2} \cdot A \approx 1.41A$$

Поскольку элементарные секции преобразователя размещены с периодом λ , то и волны от источников в соседних секциях складываются синфазно, образуя в результате известное явление акустического синхронизма. В этом случае средняя частота f_{cp} преобразователя совпадает с частотой акустического синхронизма $f_0 = V/\lambda$, где V - скорость ПАВ.

Кроме высокой эффективности возбуждения известные ВШП выгодно отличаются простотой изготовления благодаря широким электродам и зазором между ними, равным $\lambda/4$.

Основным недостатком известного встречно-штыревого преобразователя ПАВ являются высокие вносимые потери $a_{вн}$, обусловленные двунаправленностью излучения ПАВ и составляющие для фильтра на ПАВ не менее 6 дБ даже в согласованном режиме.

Другим недостатком являются большие искажения (до $\Delta a = 4$ дБ и более) амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Это обусловлено тем, что волны, падающие на преобразователь справа на вход 11 или слева на вход 22 и затем отраженные от краев a, b, c, d электродов шириной $\lambda/4$, в известном преобразователе также складываются в фазе. Совокупная отраженная волна имеет на частоте f_0 фазовый сдвиг -90° (фиг.1в).

Таким образом, в известном ВШП с электродами $b = \lambda/4$ центры возбуждения ПАВ T_c и центры отражения ПАВ R_c совпадают (фиг. 1б,в).

В результате в фильтрах на ПАВ, использующих по крайней мере два таких двунаправленных ВШП, возникает сигнал тройного прохождения (СТП), обусловленный отражением ПАВ сначала от выходного ВШП, а затем от входного ВШП. Наличие СТП приводит к росту пульсаций АЧХ до 6-12 дБ и пульсаций фазы до ± 20 и более.

Это делает невозможным использование известного преобразователя [1] в фильтрах на ПАВ с малыми вносимыми потерями для систем мобильной связи и радиотелефонов. Фильтры для подобных систем должны иметь

вносимые потери не более $a_{вн}=3-10$ дБ на промежуточных частотах 70-250 МГц и не более $a_{вн}=2-4$ дБ на радиочастотах 800-1800 МГц, а также пульсации АЧХ не более $\Delta a = 0,2-0,6$ дБ.

С целью уменьшения вносимых потерь и снижения искажений АЧХ и фазочастотной характеристики (ФЧХ) из-за влияния СТП создано большое количество разнообразных конструкций однонаправленных преобразователей с внутренними отражателями.

Такие однонаправленные преобразователи (ОНП) содержат возбуждающие и отражающие электроды.

Как показано в [2], в преобразователе, содержащем систему возбуждающих электродов и систему отражающих электродов, максимальное подавление ПАВ в обратном направлении (или максимальная направленность излучения ПАВ в прямом направлении) достигается в случае, когда фаза φ_k волны в центре отражения R_c отличается от фазы φ_0 волны в центре возбуждения T_c на угол $\pi/4$, т.е.

$$\varphi_k = \varphi_0 \pm \pi/4 \pm \pi k, \quad (2)$$

т.е. когда центры возбуждения и центры отражения смещены относительно друг друга на расстояние

$$\Delta l = \pm \lambda/8 \pm k\lambda/2 \quad (3)$$

При смещении центров возбуждения и отражения относительно друг друга на расстояние $\Delta l \neq \pm \lambda/8$ направленность излучения ухудшается.

Знак (+) или (-) в уравнениях (2) и (3) выбирается в зависимости от электрических условий, реализуемых на отражающем электроде и выбранного направления распространения ПАВ (вдоль оси X или вдоль оси -X).

Известно что, для слабых пьезоэлектриков типа кварца ($k^2=0.116\%$), берлинита ($k^2=0.2-0.4\%$) или лангасита ($k^2=0.32\%$) основными механизмами отражений ПАВ от электродов являются механическая нагрузка поверхности подложки электродами и их топографическая неоднородность [1]. Поэтому фаза коэффициента отражения равна нулю (знак "+" в (2) и (3)).

При использовании в качестве материала подложки сильных пьезоэлектриков типа тетрабората лития ($k^2=0.8-1.37\%$), танталата лития ($k^2=0.7-1.5\%$) или ниобата лития ($k^2=4-17\%$), основными механизмами отражения ПАВ от металлических электродов являются закорачивание электрического поля ПАВ металлической пленкой и накопление реактивной энергии под электродами [1]. Поэтому в этом случае фаза коэффициента отражения ПАВ от закороченных электродов равна 0° (знак "+") и отличается на 180° от фазы коэффициента отражения от изолированных электродов (знак "-" в уравнении (2)) при прямом направлении распространения ПАВ вдоль оси +X.

Указанные закономерности необходимо учитывать при оптимизации конструкции ОНП.

Таким образом, для получения максимальной направленности в каждой элементарной секции ОНП условный центр отражения ПАВ должен быть смещен на расстояние $\Delta l = \pm \lambda/8 \pm k\lambda/2$ относительно условного центра возбуждения ПАВ [2]. В результате при $\Delta l = +\lambda/8 \pm k\lambda/2$ волны, возбужденные в прямом направлении +X, и отраженные волны складываются в фазе, а волны, возбужденные в обратном направлении -X, и отраженные волны складываются в противофазе. Таким образом, в преобразователе достигается преимущественная направленность излучения в прямом направлении +X. Такой преобразователь можно назвать прямым ОНП.

Обратный однонаправленный преобразователь, излучающий преимущественно в обратном направлении -X, является зеркальным отображением описанного ОНП. В обратном преобразователе $\Delta l = -\lambda/8 \pm k\lambda$. Обратный преобразователь можно назвать также реверсным по отношению к прямому преобразователю [4].

Два ОНП, прямой и обратный (или реверсный), излучающие ПАВ по направлению друг к другу, образуют простейший фильтр на ПАВ с малыми вносимыми потерями и низким уровнем сигнала тройного прохождения.

В качестве материалов подложки фильтров на основе двунаправленных и однонаправленных преобразователей обычно используют пьезоэлектрические монокристаллы или их кристаллографические срезы, в которых вследствие симметрии ориентации относительный сдвиг фаз между механическими и электромагнитными компонентами распространяющейся ПАВ составляет $\Delta\varphi = 0^\circ$ или $\Delta\varphi = 90^\circ$. Подавляющее число используемых в устройствах на ПАВ срезов монокристаллов относятся к таким "симметричным" срезам с $\Delta\varphi = 0^\circ$: $uxl/(35 \div 42)^\circ$ в кварце, $uxl/49^\circ$, $uxl/64^\circ$, $uxl/128^\circ$ в ниобате лития, $uxl/36^\circ$ в танталате лития и т.д. К "несимметричным" срезам можно отнести кристаллографические ориентации, для которых относительный сдвиг фаз между механическими и электрическими компонентами ПАВ имеет промежуточное значение $0 < \varphi < 90^\circ$ [3].

Однонаправленные преобразователи с внутренними отражателями являются технологичными, т.к. имеют однослойную конструкцию, не требуют сложных согласующих цепей.

Наиболее технологичным является ОНП с "естественной" направленностью (ОНП ЕН) излучения [3], фиг.2а. ОНП ЕН имеет такую же структуру электродов, как и двунаправленный ВШП, т.е. элементарная секция ОНП ЕН протяженностью λ содержит два противофазных возбуждающих электрода шириной $b = \lambda/4$. Но в качестве материала подложки используются "несимметричные" срезы пьезоэлектрических монокристаллов, у которых относительный сдвиг фаз между электромагнитной и механической компонентами возбуждаемых или распространяющихся ПАВ составляет $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$. Максимальная "естественная" направленность излучения ПАВ у известного ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ [3] наблюдается при $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$ или $\Delta\varphi = \pm 135^\circ$. Такие "несимметричные" кристаллографические ориентации, обеспечивающие $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$, обнаружены в кварце SiO_2 (ориентация, описанная углами Эйлера $(\lambda, \mu, \theta) = (0^\circ; 132.75^\circ; 25^\circ)$ или $uxls/42^\circ 45'/25^\circ$ [3]), танталате лития $LiTaO_3$ (ориентация

$(\lambda, \mu, \theta) = (0^\circ; 90^\circ; 141.25^\circ)$ или $yzx/51^\circ 25'$ [5]); тетраборате лития $L_2B_4O_7$ (ориентация $(\lambda, \mu, \theta) = (0^\circ; 78^\circ; 90^\circ)$ [7]), лангасите $La_3Ga_5SiO_{14}$ (ориентация $(\lambda, \mu, \theta) = (0^\circ; 140^\circ; 24^\circ)$ или $yxls/50^\circ/24^\circ$ [8,9]).

Сдвиг фаз $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$ вызывает соответствующее смещение центра возбуждения ПАВ на расстояние $\Delta l = \pm \lambda/8$ относительно центра отражения ПАВ [3]. В результате обычный ВШП с электродами $\lambda/4$ [1], размещенный на подложке из монокристалла с такими "несимметричными" кристаллофизическими свойствами, приобретает "естественную" направленность излучения. Если сдвиг фаз составляет $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$, то соответствующее смещение центра возбуждения T_c ПАВ относительно центра отражения R_c , составляет $\Delta l = +\lambda/8$ и такой преобразователь становится прямым однонаправленным преобразователем, излучающим ПАВ преимущественно вдоль направления $+X$ [3].

Чтобы получить реверсный преобразователь, излучающий вдоль направления $-X$ при использовании монокристаллов с $\Delta\varphi = +45^\circ$, необходимо сместить центр возбуждения на $\Delta l = -\lambda/8$.

Если в качестве материала подложки используется монокристалл, у которого сдвиг между электрической и механической компонентой ПАВ составляет $\Delta\varphi = -45^\circ$, картина возбуждения и отражения ПАВ становится зеркальной по отношению к описанной. При $\Delta\varphi = -45^\circ$ и смещении центра возбуждения T_c относительно центра отражения R_c на $\Delta l = -\lambda/8$ известный ОНП ЕН [3] излучает преимущественно в прямом направлении X . Если сдвиг фаз составляет $\Delta\varphi = -45^\circ$, а смещение центра возбуждения ПАВ T_c относительно центра отражения ПАВ R_c равно $\Delta l = +\lambda/8$, то обычный ВШП [1] приобретает "естественную" направленность излучения в обратном направлении, т.е. становится обратным однонаправленным преобразователем, излучающим ПАВ преимущественно вдоль направления $-X$.

При использовании других "несимметричных" кристаллографических со сдвигом фаз

$\Delta\varphi \neq \pm 45^\circ$ в интервале $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ направленность излучения ОНП ЕН ухудшается.

Известный прямой ОНП ЕН [3] в каждой элементарной секции также содержит четыре δ - источника с амплитудами $\vec{A}/2$, размещенные на расстоянии $\lambda/4$ друг относительно друга, как двунаправленный ВШП (фиг.2б). Поэтому эффективность эквивалентного источника, размещенного в центре излучения T_c , оцениваемая по величине волны, излучаемой элементарной секцией, будет такой же, как и у двунаправленного ВШП, т.е.

$$\vec{E}_1^+ = \vec{E}_1^+ \sqrt{2} A \approx 1.44A. \quad (4)$$

Но ОНП ЕН обладает хорошей направленностью излучения, т.к. при смещенном на $\Delta l = +\lambda/8$ центре возбуждения T_c (для случая $\Delta\varphi = -45^\circ$), волны, отраженные от краев a, b, c, d возбуждающих электродов, складываются в противофазе с волнами $\exp[i(\omega)t - kx]$, излученными в прямом направлении $+X$, и в фазе с волнами $\exp[j(\omega t + kx)]$, излученными в обратном направлении $-X$ (фиг.2 в,г). В результате амплитуда совокупной волны, распространяющейся от центра возбуждения T_c в прямом направлении $+X$, на выходе 22 элементарной секции будет

$$\vec{R}_2(x) = \vec{E}_2(1-4r), \quad (5)$$

а амплитуда совокупной волны, распространяющейся в обратном направлении $-X$, на выходе 11 секции будет

$$\vec{S}_2(x) = \vec{E}_2(1+4r), \quad (6)$$

где $r = c(h/\lambda)$ - коэффициент отражения от края электрода.

При сочетании обычно используемых материалов (алюминий для электродов, кварц или танталат лития для подложки) механическая компонента r имеет знак (-) при отражении волны от ступеньки вверх и знак (+) при отражении от ступеньки вниз.

Направленность излучения прямого ОНП ЕН будет (для $\Delta\varphi = -45^\circ$))

$$|\vec{D}_2(x)| = \frac{|S_{31}|^2}{|S_{32}|^2} \approx \frac{|\vec{S}_2(x)|}{|\vec{R}_2(x)|} = \frac{1+4r}{1-4r}, \quad (7)$$

где S_{31} и S_{32} - коэффициенты передачи преобразователя в обратном и прямом направлении соответственно. Для случая $\Delta\varphi = +45^\circ$ картина векторного сложения возбужденных и отраженных волн является зеркальной по отношению к описанному случаю $\Delta\varphi = -45^\circ$.

Два преобразователя: ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ и реверсный ОНП ЕН, - излучающие ПАВ навстречу друг другу, образуют фильтр на ПАВ с малыми вносимыми потерями.

Главной проблемой использования ОНП ЕН в фильтрах на ПАВ с малыми вносимыми потерями является создание реверсного преобразователя, обладающего обратной направленностью излучения по отношению к ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$. Было предложено несколько конструкций реверсных однонаправленных преобразователей с "естественной" направленностью излучения (ОНП ЕН) ПАВ: с различными материалами электродов, имеющими противоположные по знаку коэффициенты отражений ПАВ (например, при алюминиевых электродах в прямом ОНП ЕН в реверсном ОНП ЕН использовались золотые электроды на кварцевой подложке [10]); с электродами, утопленными в канавках на поверхности подложки [11]; с возбуждающими отражающими электродами разной толщины [12], формируемыми, например, путем дополнительного химического наращивания металла.

Все эти конструкции являются не технологичными, т.к. усложняют изготовление реверсных ОНП ЕН и фильтров на ПАВ на их основе.

Наиболее близким по технической сущности к заявляемому является реверсный однонаправленный преобразователь с "естественной" направленностью излучения ПАВ, изображенный на фиг.3а [4]. Известный реверсный ОНП ЕН [4] содержит подложку 1 из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг около $\Delta\varphi \approx \pm 45^\circ$. На рабочей поверхности подложки размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый 2 и второй 3 возбуждающие электроды и изолированный отражающий электрод 4. При этом протяженность элементарных секций выбрана равной длине λ ПАВ

на средней частоте реверсного ОНП ЕН. Ширина b_1 первого 2 и ширина b_3 второго 3 возбуждающих электродов выбраны равными $b_1 = b_3 = \lambda/8$, ширина b_5 изолированного отражающего электрода 4 выполнена равной $3\lambda/8$, а ширина зазора b_2 между первым и вторым возбуждающими электродами и ширина зазора b_4 между вторым возбуждающим электродом и отражающим электродом выбраны равными $\lambda/8$ [4].

В каждой элементарной секции преобразователя только изолированный электрод шириной $b_5 = 3\lambda/8$ формирует отраженные ПАВ. Волны же, отраженные от краев f и e первого 2 и краев d и c второго 3 возбуждающих электродов, взаимно компенсируются (фиг.3г). Таким образом, возбуждающие электроды 2,3 в формировании отраженных ПАВ не участвуют. Поэтому удельная (на длину волны) отражающая способность известного реверсного ОНП ЕН сравнительно невелика.

На рис.3б показано расположение центра возбуждения T_c и центра отражения R_c для случая $\Delta\varphi = -45^\circ$. Центр отражения R_c расположен в центре изолированного отражающего электрода 4, тогда как центр возбуждения T_c расположен в центре первого возбуждающего электрода 2. Расстояние между центром отражения R_c и центром возбуждения T_c составляет $\Delta l = +\lambda/8 + \lambda/2$. Таким образом, связь между позициями центров возбуждения T_c и отражения R_c удовлетворяет условию функционирования реверсного ОНП ЕН для $\Delta\varphi = -45^\circ$.

Следовательно, если описанная структура электродов будет размещена на "несимметричном" срезе пьезоэлектрического кристалла, для которого $\Delta\varphi = 45^\circ$, полученный преобразователь будет функционировать как реверсный относительно известного ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ [3]. Авторы [4] назвали такой преобразователь "реверсным преобразователем со смещенным центром преобразования".

Для случая $\Delta\varphi = +45^\circ$ известный ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ [3] будет излучать преимущественно вдоль направления $+X$, а известный реверсный ОНП ЕН [4] - вдоль направления $-X$.

Элементарная секция известного реверсного ОНП ЕН содержит шесть источников ПАВ 1-6 (фиг.3в). Два дополнительных противофазных источника 5 и 6 на краях

отражающего электрода 4 обусловлены наведенным на нем электрическим зарядом. При этом источники 2 и 3 на внутренних краях возбуждающих электродов имеют единичную амплитуду $|A_2| = |A_3| \approx 1.0$, а источники 1 и 4 на внешних краях возбуждающих электродов имеют амплитуду около $|A_1| = |A_4| \approx 0.7$ [13].

Противофазные же источники 5 и 6 на краях изолированного отражающего электрода имеют амплитуду около $|A_5| = |A_6| \approx 0.3$. Изменение амплитуд источников 1 и 4, 5 и 6 обусловлено перераспределением электрических зарядов в элементарной секции под влиянием изолированного электрода [13].

При использовании подложек из монокристаллов "несимметричных" ориентаций, у которых $\Delta\varphi = -45^\circ$, положение источников в ОНП ЕН смещается на $\Delta l = +\lambda/8$, как показано на фиг.3в, вызывая соответствующее смещение условного центра возбуждения T_c . Картина же отражений ПАВ не изменяется и условный центр отражения R_c для элементарной секции по прежнему расположен в центре отражающего электрода 4 (фиг.3г).

Эффективность возбуждения элементарной секции известного реверсного ОНП ЕН можно оценить, пересчитав комплексные амплитуды источников $\vec{A}_1 + \vec{A}_6$ к амплитуде \vec{E}_3 эквивалентного источника ПАВ, размещенного в условном центре возбуждения T_c (линия ОО на фиг.3в):

$$\vec{E}_3 = A \cdot \cos(77.5^\circ) + 0.4A \cdot \cos(22.5^\circ) = 0.586 \cdot A \quad (8)$$

т.е. эффективность возбуждения почти в 2,4 раза ниже, чем у прямого ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ [3].

Суммарный коэффициент элементарной секции отражения известного реверсного ОНП ЕН, пересчитанный к центру изолированного отражающего электрода для случая $\Delta\varphi = -45^\circ$, будет

$$\vec{R}_3 = 2r \cdot \cos(45^\circ) = \sqrt{2} \cdot r \quad (9)$$

При размещении известного реверсного ОНП ЕН [4] на подложке с "несимметричной" кристаллографической ориентацией ($\Delta\varphi = -45^\circ$) условный центр возбуждения T_c смещается вправо (вдоль оси +X) на

расстояние $\Delta l = +\lambda/8$ (фиг.3в). Поэтому в ОНП ЕН создаются условия для преимущественного излучения в направлении +X (слева направо). Таким образом, данный ОНП ЕН функционирует как реверсный ОНП ЕН по отношению к прямому ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$, излучающему волны преимущественно в направлении -X при $\Delta\varphi = -45^\circ$ (фиг.2в).

В результате векторного сложения возбужденных и отраженных волн амплитуды совокупных волн, распространяющихся в прямом направлении +X и обратном направлении -X для случая $\Delta\varphi = -45^\circ$ соответственно будут:

$$\vec{R}(x) = \vec{E}_3(1 + \sqrt{2}r), \quad (10)$$

$$\vec{S}(x) = \vec{E}_3(1 - \sqrt{2}r), \quad (11)$$

Поэтому направленность излучения известного реверсного ОНП ЕН

$$|\vec{D}_3(x)| = \frac{|S_{32}|^2}{|S_{31}|^2} \approx \frac{|\vec{R}(x)|}{|\vec{S}(x)|} = \frac{1 + \sqrt{2}r}{1 - \sqrt{2}r} \quad (12)$$

т.е. $|\vec{D}_3(x)|$ хуже, чем $|\vec{D}_2(x)|$ у ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$.

Описанная конструкция реверсного ОНП ЕН [4] обладает максимальной направленностью излучения только частного случая использования материала подложки, у которого $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$. Применение других "несимметричных" ориентаций монокристаллов с относительным сдвигом фаз в интервале $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ неизбежно приводит к ухудшению направленности излучения преобразователя и, как следствие, к увеличению вносимых потерь фильтра на ПАВ на основе подобных ОНП ЕН.

С целью повышения избирательности в фильтрах на ПАВ обычно используют различные методы "взвешивания" (весовой обработки) импульсных характеристик составляющих его преобразователей. Одними из методов взвешивания являются применение преобразователей с наклонными электродами (так называемых веерных преобразователей) или применение преобразователей со ступенчатыми электродами [14, стр.37-48]. Веерный преобразователь может быть представлен также и в виде многослойной (вдоль апертуры) структуры со ступенчатыми электродами.

При использовании наклонных электродов, например, в веерном ОНП ЕН, отражение ПАВ от таких электродов также происходит под углом. Поэтому в известном ОНП ЕН [4] соотношения (2) и (3) для оптимального сложения отраженных и возбужденных волн не выполняются. В результате происходит ухудшение направленности излучения ПАВ и увеличение вносимых потерь.

В преобразователях со ступенчатыми электродами часто необходимо варьировать шириной электродов для каждой ступени с целью коррекции фазовых характеристик фильтра на ПАВ. Отступление от частных соотношений между ширинами b_1, b_3, b_5 электродов и зазорами b_2, b_4, b_6 в известном ОНП ЕН [4] со ступенчатыми электродами также приводит к ухудшению его направленности излучения.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Описанный реверсный ОНП ЕН [4] более технологичен, чем другие [10], [11], [12], т.к. при его изготовлении используется однослойная технология.

Основным недостатком известного реверсного ОНП ЕН [4] являются сравнительно высокие вносимые потери, обусловленные низкой эффективностью возбуждения ПАВ, и низкой направленностью излучения из-за слабой отражающей способности. Вносимые потери известного ОНП ЕН увеличиваются при использовании материалов подложки с $\Delta\varphi \neq 45^\circ$ в интервале $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$. Особенно сильно эти недостатки проявляются, если его электроды выполнены ступенчатыми или наклонными, как это имеет место в веерных преобразователях [14].

Технической задачей изобретения является уменьшение вносимых потерь, в том числе преобразователей со ступенчатыми или наклонными электродами.

Решение поставленной задачи решается тем, что в первом варианте реверсного преобразователя с "естественной" направленностью излучения (ОНП ЕН) поверхностных акустических волн (ПАВ), содержащем подложку из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы около $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$, на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержа-

щие противофазные первый и второй возбуждающие электроды и отражающий электрод, при этом протяженность элементарных секций выбрана равной длине λ ПАВ на средней частоте ОНП ЕН, а ширина первого возбуждающего электрода и ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выполнены равными

$$b_1 = b_2 = \lambda/8. \quad (13)$$

В каждой элементарной секции отражающий электрод выполнен закороченным, ширина второго возбуждающего электрода выбрана из соотношения

$$\lambda/6 < b_3 < \lambda/3, \quad (14)$$

ширина отражающего электрода выбрана из соотношения

$$\lambda/6 < b_5 < \lambda/3, \quad (15)$$

а расстояние между соседними краями второго возбуждающего электрода и отражающего электрода выбрано равным из соотношения

$$\lambda/6 < b_4 < \lambda/3. \quad (16)$$

В другом варианте реверсного преобразователя с "естественной" направленностью излучения (ОНП ЕН) поверхностных акустических волн (ПАВ), также содержащем подложку из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы около $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$, на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый и второй возбуждающие электроды и отражающий электрод, при такой же протяженности элементарных секций, выбранной равной длине λ ПАВ на средней частоте ОНП ЕН. Ширина первого возбуждающего электрода и ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов, выполненных равными

$$b_1 = b_2 = \lambda/8, \quad (17)$$

отражающий электрод выполнен закороченным, но ширина второго возбуждающего электрода выбрана из соотношения

$$\lambda/6 < b_3 < 3\lambda/8, \quad (18)$$

ширина отражающего электрода выбрана из соотношения

$$\lambda/6 < b_5 < 3\lambda/8, \quad (19)$$

а расстояние между соседними краями второго возбуждающего электрода и отражающего электрода выбрано из соотношения

$$\lambda/24 < b_4 < \lambda/6. \quad (20)$$

В реверсном преобразователе с "естественной" направленностью излучения поверхностных акустических волн в соответствии с первым и вторым вариантами ширина первого возбуждающего электрода может быть выбрана из соотношения

$$\lambda/16 < b_1 < \lambda/8, \text{ или } \lambda/8 < b_1 < \lambda/6, \quad (21)$$

а ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов может быть выбрана из соотношения

$$\lambda/16 < b_2 < \lambda/8 \text{ или } \lambda/8 < b_2 < \lambda/6. \quad (22)$$

Кроме того, в предложенном реверсном преобразователе с "естественной" направленностью излучения поверхностных акустических волн первый и второй возбуждающие и отражающий электроды могут быть выполнены наклонными или ступенчатыми.

Первый вариант предпочтительнее для сравнительно слабых пьезоэлектриков, используемых в качестве материалов подложки, а второй вариант - для сравнительно сильных пьезоэлектриков, для которых накопление реактивной энергии под электродами является одним из главных механизмов отражения ПАВ.

На фиг.1 представлен известный двунаправленный преобразователь ПАВ [1] и векторные диаграммы для анализа взаимодействия волн, возбужденных в прямом направлении X и волн, отраженных от краев электродов при падении их справа.

На фиг.2 показан прямой ОНП ЕН с двумя электродами шириной $b = \lambda/4$ в элементарной секции и векторные диаграммы для анализа этого ОНП ЕН [3].

На фиг.3 показана конструкция реверсного ОНП ЕН с изолированным отражающим электродом [4], выбранная в качестве прототипа, и векторные диаграммы для ее анализа.

На фиг.4 показан первый вариант предлагаемого реверсного ОНП ЕН с низкими вносимыми потерями и векторные диаграммы для анализа его работы при $\Delta\varphi = -45^\circ$ и оптимальных ширинах электродов, обеспечивающих минимальные потери.

На фиг.5 показан второй вариант предлагаемого реверсного ОНП ЕН с низкими

вносимыми потерями и векторные диаграммы для анализа его работы при $\Delta\varphi = -45^\circ$ и оптимальных ширинах электродов, обеспечивающих минимальные потери.

На фиг. 2-5 направленность излучения ПАВ показана для случая использования монокристаллов с $\Delta\varphi = -45^\circ$. Для случая $\Delta\varphi = +45^\circ$ направленность излучения ПАВ поменяется на зеркальную.

На фиг.6 показаны частотные зависимости коэффициентов передачи S_{21} соответственно для предлагаемого реверсного ОНП ЕН с прямыми электродами. На фиг.7 показана частотная зависимость коэффициента передачи S_{21} для фильтра на ПАВ на основе предлагаемого веерного реверсного ОНП ЕН с веерными ступенчатыми электродами.

На фиг.8 представлена конструкция веерного реверсного ОНП ЕН со ступенчатыми электродами.

В соответствии с первым вариантом предлагаемый реверсный преобразователь с "естественной" направленностью излучения (ОНП ЕН) поверхностных акустических волн (ПАВ) содержит подложку 1 из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ (оптимальное значение около $\Delta\varphi = \pm 45^\circ$), на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый 2 и второй 3 возбуждающие электроды и отражающий электрод 4. Протяженность каждой элементарной секции, определяемая расстоянием между первой 11 и второй 22 условными границами, выбрана равной длине λ ПАВ на средней частоте ОНП ЕН.

В каждой элементарной секции отражающий электрод 4 выполнен закороченным. Ширина b_1 , первого возбуждающего электрода 2 и ширина b_1 зазора между соседними краями первого 2 и второго 3 возбуждающих электродов выполнены равными $b_1 = b_2 = \lambda/8$.

Для более общего случая ширина первого возбуждающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_1 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_1 < \lambda/6$, а ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_2 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_2 < \lambda/6$, если исключить известный частный случай $b_1 = b_2 = \lambda/8$.

Ширина b_3 второго возбуждающего электрода 2 выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_3 < \lambda/3$, ширина b_5 , отражающего электрода 4 выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_5 < \lambda/3$, а расстояние b_4 между соседними краями второго возбуждающего электрода 3 и отражающего электрода 4 выбрано равным из соотношения $\lambda/6 < b_4 < \lambda/3$.

В соответствии со вторым вариантом реверсный преобразователь с "естественной" направленностью излучения (ОНП ЕН) поверхностных акустических волн (ПАВ), содержащий подложку 1 из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы около $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$, на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый 2 и второй 3 возбуждающие электроды и отражающий электрод 4. При этом протяженность элементарных секций выбрана равной длине λ ПАВ на средней частоте ОНП ЕН.

В каждой элементарной секции отражающий электрод выполнен закороченным.

Ширина первого возбуждающего электрода и ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выполнены равными $b_1 = b_2 = \lambda/8$.

Для более общего случая ширина b_1 первого возбуждающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_1 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_1 < \lambda/6$, а ширина b_2 зазора между соседними краями первого 2 и второго 3 возбуждающих электродов выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_2 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_2 < \lambda/6$, если исключить известный частный случай $b_1 = b_2 = \lambda/8$.

Ширина b_3 второго возбуждающего электрода 3 выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_3 < 3\lambda/8$, ширина b_5 , отражающего электрода 4 выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_5 < 3\lambda/8$, а расстояние b_4 , между соседними краями второго возбуждающего электрода 3 и отражающего электрода 4 выбрано из соотношения $\lambda/24 < b_4 < \lambda/6$.

В реверсном преобразователе с "естественной" направленностью излучения поверхностных акустических волн в соответствии с первым и вторым вариантами первый 2 и второй 3 возбуждающие и отражающий 4 электроды могут быть выполнены наклонными или ступенчатыми.

Первый вариант предпочтительнее для слабых пьезоэлектриков типа кварца, лангсита и берлинита, второй - для более сильных пьезоэлектриков типа тетрабората лития, танталата лития, ниобата лития.

Для материалов подложки "несимметричных" ориентаций с $\Delta\varphi = +45^\circ$ максимальная направленность излучения предлагаемого реверсного ОНП ЕН достигается при следующих условиях:

Вариант 1:

$$b_1 = b_2 = b_6 = \lambda/8, \quad (23a)$$

$$b_3 = b_5 = 3\lambda/16, \quad (23б)$$

$$b_4 = \lambda/4; \quad (23в)$$

Вариант 2:

$$b_1 = b_2 = b_6 = \lambda/8, \quad (24a)$$

$$b_3 = b_5 = \lambda/4, \quad (24б)$$

$$b_4 = \lambda/8; \quad (24в)$$

Общим для двух вариантов является условие

$$b_3 + b_4 + b_5 = 5\lambda/8 \quad (24г)$$

Для материалов с $\Delta\varphi = -45^\circ$ указанные соотношения сохраняются, но направление излучения ПАВ меняется на зеркальное.

В общем случае ширина электродов и зазоров преобразователя может быть изменена по сравнению с оптимальными (23а-в), (24а-в). Например, в реверсном ОНП ЕН с наклонными или ступенчатыми электродами ширина последних изменяется вдоль апертуры с целью улучшения избирательности.

Поэтому в общем случае предложенный ОНП ЕН (вариант 1 и 2) будет реверсным, а отраженные и возбужденные волны в нем будут складываться синфазно при выполнении следующих соотношений

$$b_1 + b_2 = \lambda/4, \quad (25a)$$

$$b_2 + b_3 + b_4 + b_5 = 3\lambda/4, \quad (25б)$$

$$b_3 = b_5 \quad (25в)$$

Следует отметить, что если вклад накопления энергии в коэффициент отражения ПАВ от электродов не учитывается (используется тонкая пленка электродов или слабый пьезоэлектрик), то коэффициент отражения и направленность излучения ПАВ максимальны при $b_4 = \lambda/4$.

В общем случае при использовании в качестве материала подложки монокристалла с "несимметричной" ориентацией, для которой сдвиг фаз $\Delta\varphi$ между электрическими и механическими компонентами ПАВ не равен $\pm 45^\circ$, а находится в пределах $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$. В общем случае предложенный ОНП ЕН работает как реверсный и обладает максимальной направленностью благодаря синфазному сложению возбужденных и отраженных волн, если выполнены следующие условия:

$$b_1 + b_2 = \lambda/4, \quad (25a)$$

$$b_2 + b_3 + b_4 + b_5 = 3\lambda/4, \quad (25б)$$

$$b_5 - b_3 = 2\lambda(\Delta\varphi - 45^\circ)/360^\circ \quad (25г)$$

Таким образом, для любых сочетаний между ширинами b_i , электродов и зазоров, выбранных из соотношений (13-22) можно найти одно единственное, которое для любой

"несимметричной" ориентации кристалла с $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ обеспечит максимальную направленность излучения ОНП ЕН и минимальные вносимые потери.

Критерием выбора b_1 и $\Delta\varphi_1$ служат соотношения (25а-г).

На фиг.4 и фиг.5 изображен частный случай предлагаемого ОНП ЕН, для которого $\Delta\varphi = -45^\circ$ и выполняются условия (23а-в) или (24а-в) для максимальной направленности излучения.

При оптимальных соотношениях (23а-в) и (24а-в) для ширин электродов и зазоров предлагаемый ОНП ЕН работает следующим образом. При подаче электрического сигнала от внешнего генератора (на чертеже фиг.4 условно не показан) противофазными возбуждающими электродами 2, 3 (или разнофазными источниками с амплитудами $|\vec{A}_1|, |\vec{A}_2|, |\vec{A}_3|, |\vec{A}_4|$) генерируются ПАВ,

которые распространяются в пьезоэлектрической подложке 1 в прямом X и обратном -X направлениях. Для удобства анализа четыре

δ - источника $\vec{A}_1 \div \vec{A}_4$ можно объединить в один эквивалентный источник, размещенный в условном центре T_c возбуждения (линия ОО). Тогда волна, распространяющаяся в прямом направлении X, будет $\vec{E}_4 = \exp(i(\omega t - kx))$, а волна, распространяющаяся в обратном направлении -X, будет $\vec{E}_4 = \exp(i(\omega t + kx))$, где k - волновое число, x - текущая координата вдоль оси X.

При условии максимальной направленности (вариант 1, $\Delta\varphi = -45^\circ$, $b_1=b_2=b_6 = \lambda/8$, $b_3=b_5=3\lambda/16$, $b_4=\lambda/4$) эффективность излучения эквивалентного источника можно оценить как (фиг.4в)

$$\vec{E}_4 = A \cdot \cos(22.5^\circ) - A \cdot \cos(77.5^\circ) \approx 0.707A, \quad (26)$$

что всего на 50% ниже, чем у прямого ОНП ЕН с двумя возбуждающими электродами $\lambda/4$ [3], но что на 20% выше, чем у известного реверсного ОНП ЕН [4].

Таким образом, в предложенном реверсном ОНП ЕН достигается уменьшение вносимых потерь, связанных с эффективностью преобразования электрической энергии в акустическую и обратно.

Оценим теперь направленность излучения предложенного реверсного ОНП ЕН, которая при $\Delta\varphi = -45^\circ$ определяется как [2]:

$$|\vec{D}_3| = \frac{|S_{32}|^2}{|S_{31}|^2} \approx \frac{|\vec{S}_4(x)|}{|\vec{R}_4(x)|}, \quad (27)$$

где S_{31} и S_{32} коэффициенты передачи реверсного ОНП в прямом и обратном направлении соответственно. Пренебрегая дважды отраженными волнами в силу их малости (обычно $\Gamma=0,02+0,05$), получим, что

волна $\vec{R}_4(x)$ на выходе 11 элементарной секции предложенного реверсного ОНП ЕН равна векторной сумме прямой волны,

излученной эквивалентным источником \vec{E}_4

в прямом направлении, и волны, образованной отражением от электродов элементарной секции волн, падающих справа на вход 11. При этом падающие волны образованы эквивалентными источниками, размещенными в соседних секциях реверсного ОНП ЕН и работающими синфазно с рассматриваемым

источником \vec{E}_4 . Для волны $\vec{S}_4(x)$ на выходе 22 картина отражений зеркальная.

При формировании отраженной ПАВ в случае максимальной направленности (23а-в), (24а-в), волны, отраженные от краев f и e первого возбуждающего электрода 2, компенсируются волнами, отраженными от края d второго возбуждающего электрода 3 и от края a отражающего электрода 4. Но волны, отраженные от края c второго возбуждающего электрода 3 и от края b отражающего электрода 4 складываются в фазе (фиг.4г) в отличие от прототипа. Учитывая последнее обстоятельство и тот факт, что амплитуда коэффициента отражения ПАВ от края короткозамкнутого электрода выше, чем от края изолированного электрода [1], можно утверждать, что эффективный коэффициент отражения элементарной секции предложенного реверсного ОНП ЕН значительно превышает эффективный коэффициент отражения элементарной секции прототипа.

При размещении предложенного реверсного ОНП ЕН на подложке из монокристалла "несимметричного" среза с $\Delta\varphi = -45^\circ$ условный центр возбуждения T_c смещается на $\lambda/8$ вправо (фиг.4в) относительно своего исходного положения на подложке из кристалла "симметричного" среза (фиг.4б). Поэтому в предложенном ОНП ЕН реализуется преимущественная направленность излучения в направлении +X (слева направо).

Приведа амплитуды отраженных волн к центру излучения T_c на линии ОО, в приближении однократного отражения с учетом сдвига центра возбуждения на $\Delta l = \lambda/8$, получим амплитуду прямой волны (фиг.4г):

$$\vec{R}_4(x) = \vec{E}_4(1+2\Gamma) \quad (28)$$

Амплитуда обратной волны, вытекающей из элементарной секции со сдвинутым вправо центром возбуждения:

$$\vec{S}_4(x) = \vec{E}_4(1-2\Gamma) \quad (29)$$

Из соотношений между $\vec{R}_4(x)$ и $\vec{S}_4(x)$ следует, что для предложенной конструкции преобразователя, изображенного на фиг.4а, реализуется направленность излучения в направлении +X (слева направо) (фиг.4в), т.е. он является реверсным по отношению к прямому ОНП ЕН с электродами $\lambda/4$ [3].

Направленность излучения элементарной секции предлагаемого реверсного ОНП ЕН:

$$|\vec{D}_4(x)| = \frac{|S_{32}|^2}{|S_{31}|^2} \approx \frac{|\vec{R}(x)|}{|\vec{S}(x)|} = \frac{1+2\Gamma}{1-2\Gamma} \quad (30)$$

что больше, чем $\vec{D}_3(x)$ у известного реверсного ОНП ЕН [4]. В результате в предложенном реверсном ОНП ЕН реализуются более высокие эффективность возбуждения, эффективность отражения и направленность излучения в прямом направлении по сравнению с известным реверсным ОНП ЕН.

Таким образом, в предложенном устройстве обеспечивается решение поставленной задачи - уменьшение вносимых потерь.

Экспериментальные исследования показали, что предложенное техническое решение обеспечивает достижение цели изобретения - уменьшение вносимых потерь по сравнению с прототипом, не только при частных значениях ширин возбуждающих и отражающих электродов и зазоров между ними, приведенных в соотношениях (23а-в) и (24а-в), но и при изменении этих ширин в некоторых пределах, указанных в соотношениях (14-22). Значения этих пределов сначала были спрогнозированы на основе машинного эксперимента, а затем проверены на натуральных образцах.

Экспериментальные исследования позволили также выявить дополнительные преимущества предлагаемого реверсного ОНП ЕН по сравнению с прототипом.

Как уже указывалось, для увеличения избирательности и улучшения коэффициента прямоугольности АЧХ в фильтрах на ПАВ часто используют различные разновидности преобразователей: веерные преобразователи с наклонными электродами, аналоги веерных преобразователей с прямыми ступенчатыми электродами, преобразователи со ступенчатыми электродами [14, стр.37-48]. Характер-

ной особенностью перечисленных типов преобразователей является тот факт, что частота синхронизма (период электродов в элементарных секциях) а также ширина электродов и зазоров на их локальных участках вдоль апертуры является переменной.

Поэтому механический перенос соотношений между ширинами электродов и зазоров, необходимых для минимизации вносимых потерь в ОНП с прямыми электродами на ОНП с наклонными или ступенчатыми электродами, не приводит к идентичным результатам. Использование же подложек с "несимметричными" ориентациями ($0 < \Delta\varphi < 90^\circ$) для получения "естественной" направленности излучения ПАВ делают отличия ОНП с прямыми электродами и наклонными или ступенчатыми электродами еще более существенными.

Экспериментальные исследования показали, что при использовании в известном реверсном ОНП ЕН подложек с $\Delta\varphi \neq \pm 45^\circ$, т.е. при $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$, и наклонных (или ступенчатых) электродов ухудшает его направленность излучения и ведет к увеличению вносимых потерь вплоть до потери его работоспособности.

Для предлагаемого реверсного ОНП ЕН в найденных пределах для ширин электродов и зазоров (14-22) на основе полученных закономерностей (25а-г) всегда удается найти такое их сочетание, которое позволяет получить максимальную направленность излучения при любой разнице фаз $0 < \Delta\varphi < 90^\circ$ между механическими и электрическими компонентами ПАВ, в том числе для преобразователей с наклонными или ступенчатыми электродами переменной ширины.

Пример 1. На фиг.6 показана экспериментальная АЧХ (модуль коэффициента передачи S21) предлагаемого реверсного ОНП ЕН (с прямыми электродами) в прямом (кривая 1) и обратном (кривая 2) направлениях, изготовленного на подложке из лангасита $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ("несимметричный" срез $uxlt/50^\circ/25^\circ$, $\Delta\varphi = -45^\circ$). Как видно из графика, экспериментальное значение направленности излучения преобразователя на основе АЧХ предлагаемого реверсного ОНП ЕН составляет 7 дБ, что на 3 дБ лучше чем для прототипа.

На фиг.7 показана экспериментальная зависимость модуля $|S_{21}|$ или АЧХ фильтра на ПАВ для радиотелефонов стандарта W-CDMA, содержащего известный прямой ОНП ЕН [3] и предлагаемый реверсный

ОНП ЕН, изготовленного на лангасите среза $uxlt/50^\circ/25^\circ$, $\Delta\varphi = -45^\circ$.

Оба преобразователя (прямой и реверсный) выполнялись веерными со ступенчатыми электродами, которые имели ширину, изменяющуюся вдоль апертуры. На фиг.8а изображена топология веерного ОНП ЕН, на фиг.8б - его фрагмент.

Фильтр обладает высокой избирательностью (более 55 дБ), обусловленной использованием лангасита среза $uxlt/50^\circ/25^\circ$ с низким уровнем возбуждения паразитных мод в качестве материала подложки и малыми вносимыми потерями 10,2 дБ. Последнее обусловлено использованием предлагаемого ОНП ЕН. Для сравнения следует указать, что вносимые потери аналогичного фильтра на подложке из кварца $uxl/42^\circ/45^\circ$ составляли 16,8 дБ, что почти более чем на 6 дБ хуже.

Это позволяет утверждать о перспективности использования предлагаемого реверсного ОНП ЕН в фильтрах на ПАВ с малыми вносимыми потерями для радиотелефонов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фильтры на поверхностных акустических волнах. Под ред. Г.Мэтьюза. М.: Радио и связь, 1981, с.111 и 316.
2. Hartmann C.S., Wright P.V. et al "An Analysis of SAW Interdigital Transducers with Internal Reflections and the Application to the Design of Single-Phase Unidirectional Transducers". "Proc. 1982 IEEE Ultrasonics Symposium", p.p.40- 45.
3. Write P.V. "Surface Acoustic Wave Transducer". European Patent N 0184508 A2, Int. Cl⁴ H 03 H 9/145, dated December 3, 1984.
4. Takeuchi M., Odagawa H. et al "SAW Transducer Configurations for Reversing the Directivity of NSPUDT Substrates". "Proc. 1995 IEEE Ultrasonics Symposium", p.p. 17-22, Seattle, USA.

5. Thorvaldsson T., Abbot B.P. "Low-Loss SAW Filters Utilizing the Natural Single Phase Unidirectional Transducer (NSPUDT)". "Proc. 1990 IEEE Ultrasonics Symposium", p.p.43-48.

6. Write P.V. "Singly Rotated Orientation of Quartz Crystals for Novel Surface Acoustic Wave Devices" United States Patent N 4670681, Int.Cl⁴ H 01 L 41/08, dated Juny 2,1987.

7. Takeuchi M., Odagawa H. and Yamanouchi "Crystal Orientations of Natural Single Phase Unidirectional Transducers (NSPUDT) on Li₂B₄O₇". Electronic Letters, 1994, vol.30, N 24, p.p.2081-2082.

8. Науменко Н.Ф., Орлов В.С. Высоко-частотное устройство на поверхностных акустических волнах (на лангасите). Патент России N 2099857, МКИ Н 03 Н 9/00. Приоритет 10 января 1996 г.

9. Takeuchi M., Tanaka M., Imanishi Y. "SAW Reflection Characteristics and NSPUDT Orientations on Langasite". "Proc. 1998 Ultrasonics Sumposium", p.p.67-72, Senday, Japan.

10. Write P.V. "The Natural Single-Phase Unidirectional Transducer: A New Low-Loss SAW Transducer". "Proc. 1985 IEEE Ultrasonics Sumposium", p.p.58-63.

11. Lam C.S., Gunes D. "A Low-Loss SAW Filter Using Two-Finger per Wavelength Electrodes on the NSPUDT Orientation on Quartz". "Proc. 1993 IEEE Ultrasonics Symposium", p.p. 185-188.

12. Yamanouchi K., Takeuchi M., Odagawa H. and Tanaka H. "Low- Loss SAW Filters Using Thickness Difference Type of IDT on the NSPUDT Orientation Substrate". "Proc. 1995 IEEE International Frequency Control Symposium", p.p.537-541, San-Francisco. USA.

13. Морган Д. Устройства обработки сигналов на ПАВ. М.: Радио и связь, 1990, с.96.

14. Орлов В.С., Бондаренко В.С. Фильтры на ПАВ. М.: Радио и связь, 1984, 273 с.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Реверсный преобразователь с естественной направленностью излучения (РПЕНИ) поверхностных акустических волн (ПАВ), содержащий подложку из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$, на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый и второй возбуждающие электроды и отражающий электрод, при этом протя-

женность элементарных секций выбрана равной длине λ ПАВ на средней частоте РПЕНИ, отличающийся тем, что в каждой элементарной секции отражающий электрод выполнен закороченным, ширина первого возбуждающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_1 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_1 < \lambda/6$, ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_2 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_2 < \lambda/6$, ширина второго возбуждающего электрода выбрана из соот-

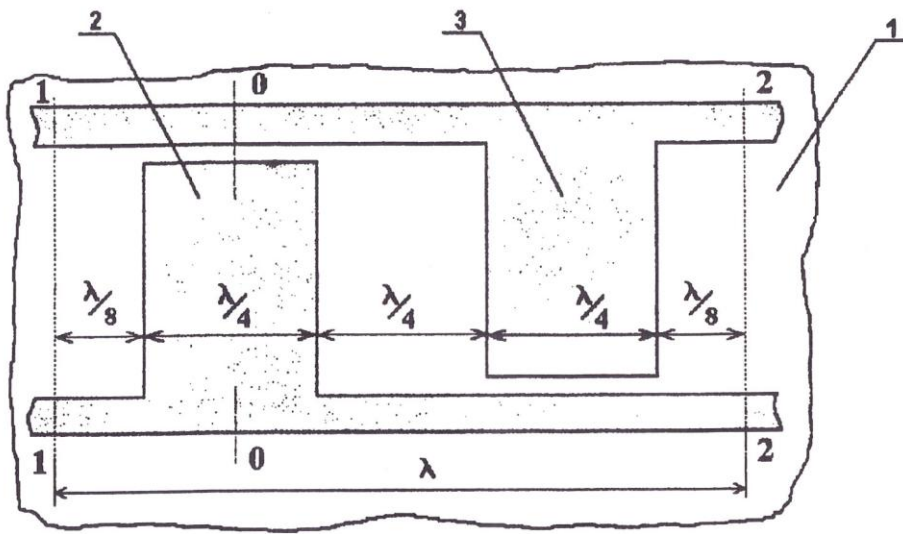
ношения $\lambda/6 < b_3 < \lambda/3$, ширина отражающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_5 < \lambda/3$, а расстояние между соседними краями второго возбуждающего электрода и отражающего электрода выбрано равным из соотношения $\lambda/6 < b_4 < \lambda/3$.

2. Реверсный преобразователь с естественной направленностью излучения (РПЕНИ) поверхностных акустических волн (ПАВ) в соответствии с п.1 формулы изобретения, *отличающийся* тем, что первый и второй возбуждающие и отражающий электроды выполнены наклонными или ступенчатыми.

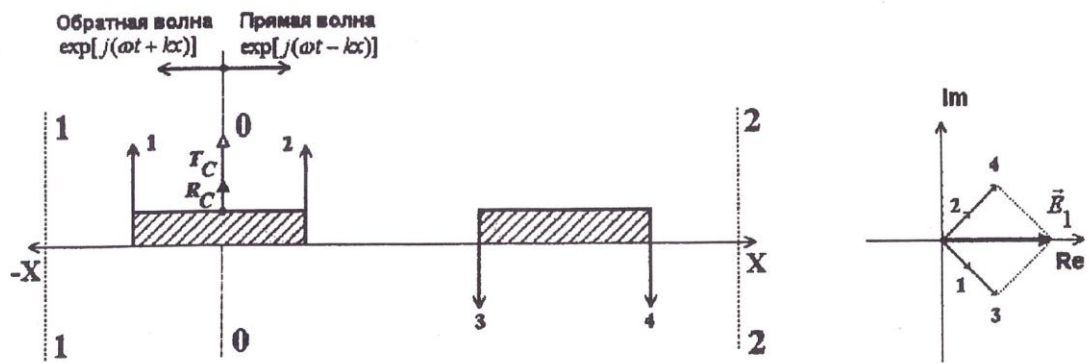
3. Реверсный преобразователь с естественной направленностью излучения (РПЕНИ) поверхностных акустических волн (ПАВ), содержащий подложку из пьезоэлектрического монокристалла, в котором механические и электромагнитные компоненты распространяющейся ПАВ имеют относительный сдвиг фазы около $0 < \Delta\varphi < \pm 90^\circ$, на рабочей поверхности которой размещены элементарные секции, содержащие противофазные первый и второй возбуждающие электроды и отражающий электрод, при этом протяженность элементарных секций выбра-

на равной длине λ ПАВ на средней частоте РПЕНИ, *отличающийся* тем, что в каждой элементарной секции отражающий электрод выполнен закороченным, ширина первого возбуждающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_1 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_1 < \lambda/6$, ширина зазора между соседними краями первого и второго возбуждающих электродов выбрана из соотношения $\lambda/16 < b_2 < \lambda/8$ или $\lambda/8 < b_2 < \lambda/6$, ширина второго возбуждающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_3 < 3\lambda/8$, ширина отражающего электрода выбрана из соотношения $\lambda/6 < b_5 < 3\lambda/8$, а расстояние между соседними краями второго возбуждающего электрода и отражающего электрода выбрано из соотношения $\lambda/24 < b_4 < \lambda/6$.

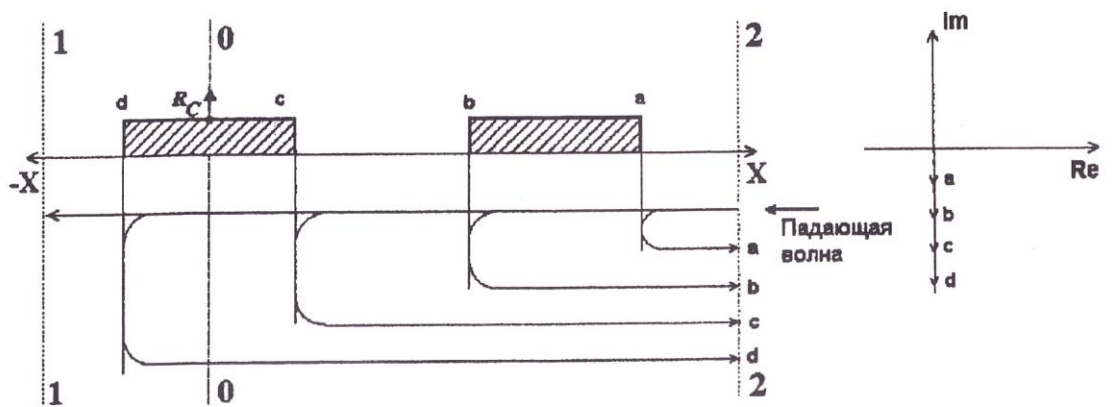
4. Реверсный преобразователь с естественной направленностью излучения (РПЕНИ) поверхностных акустических волн (ПАВ) в соответствии с п.3 формулы изобретения, *отличающийся* тем, что первый и второй возбуждающие и отражающий электроды выполнены наклонными или ступенчатыми.



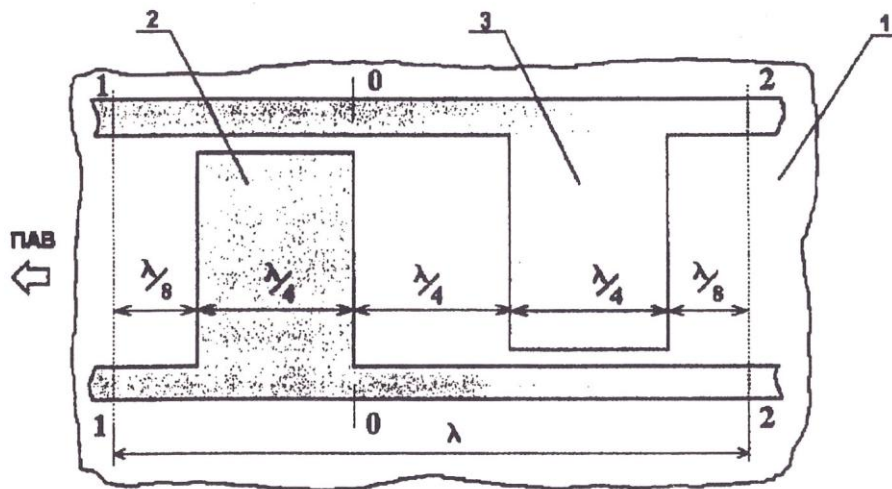
а. Конструкция элементарной секции



б. Возбуждение ПАВ в "симметричных" срезах, $\Delta\varphi = 0^\circ$

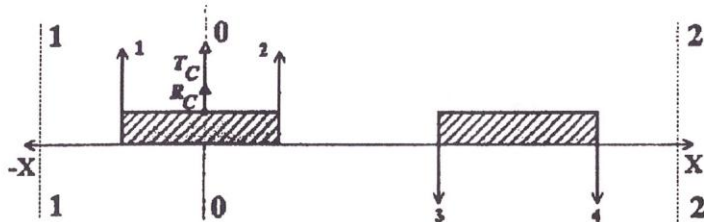


в. Отражение ПАВ Фиг.1

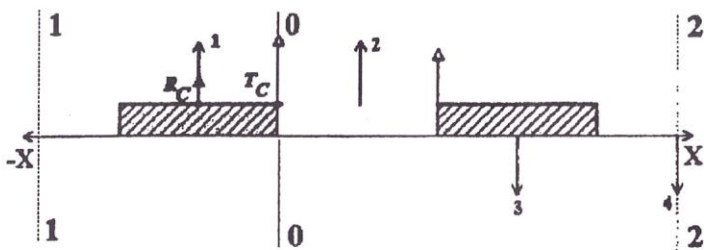


а. Конструкция элементарной секции

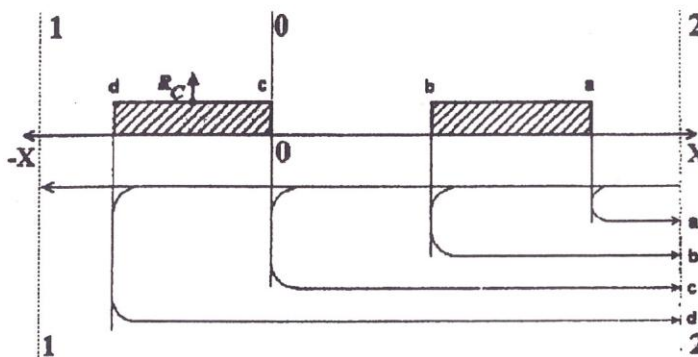
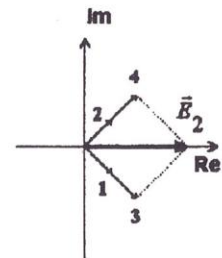
Обратная волна $\exp[j(\omega t + kc)]$, Прямая волна $\exp[j(\omega t - kc)]$



б. Возбуждение ПАВ в "симметричных" срезах, $\Delta\varphi = 0^\circ$

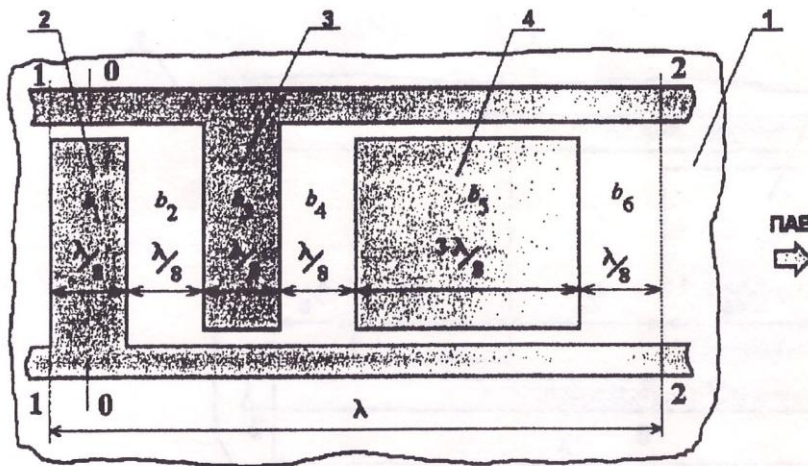


в. Возбуждение ПАВ в "несимметричных" срезах, $\Delta\varphi = -45^\circ$



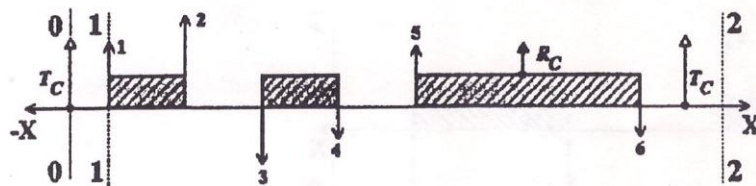
г. Отражение ПАВ

Фиг.2

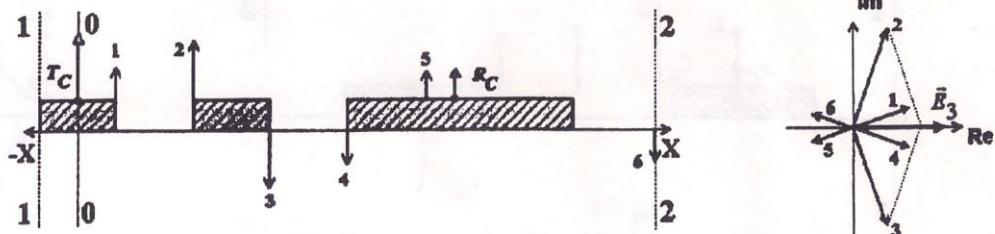


а. Конструкция элементарной секции

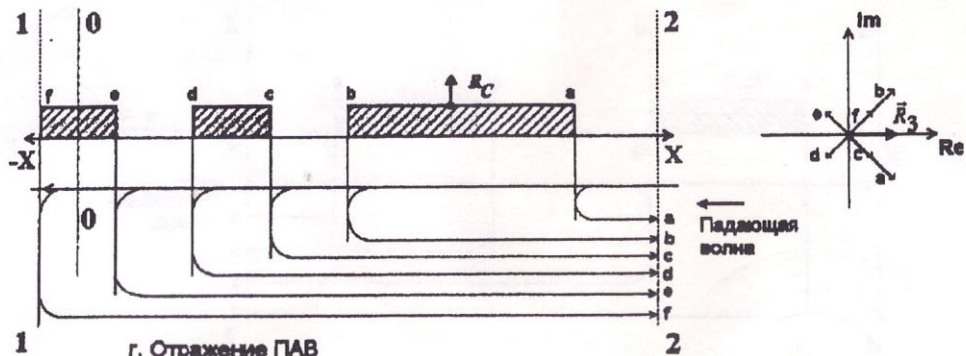
Обратная волна $\exp[j(\omega t + kx)]$ Прямая волна $\exp[j(\omega t - kx)]$



б. Возбуждение ПАВ в "симметричных" срезах, $\Delta\varphi = 0^\circ$

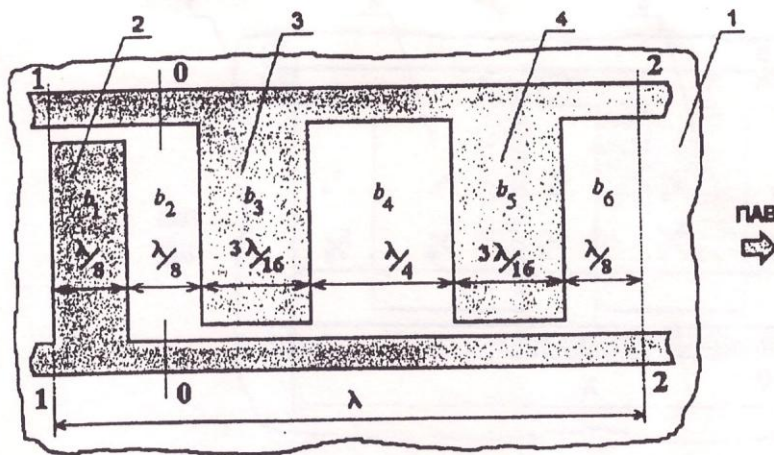


в. Возбуждение ПАВ в "несимметричных" срезах, $\Delta\varphi = -45^\circ$



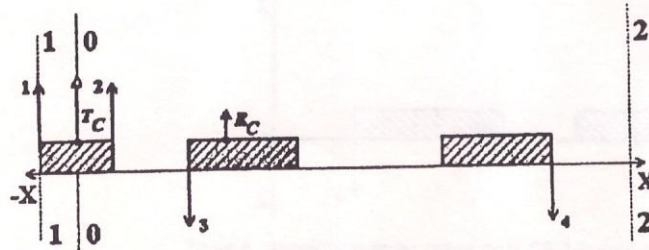
г. Отражение ПАВ

Фиг.3

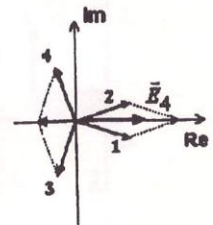
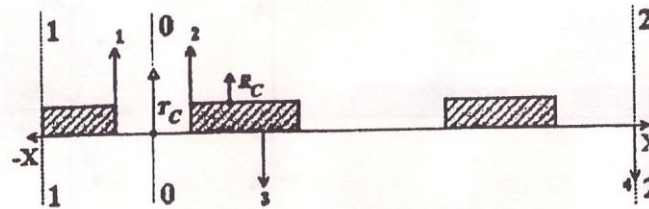


а. Конструкция элементарной секции

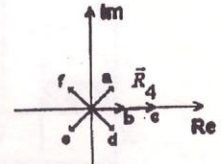
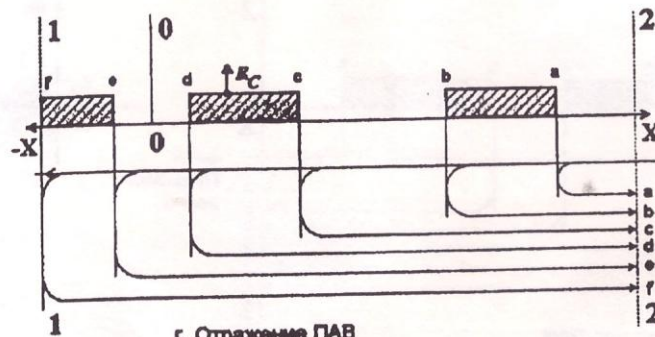
Обратная волна $\exp[j(\omega t + kx)]$ Прямая волна $\exp[j(\omega t - kx)]$



б. Возбуждение ПАВ в "симметричных" срезах, $\Delta\phi = 0^\circ$

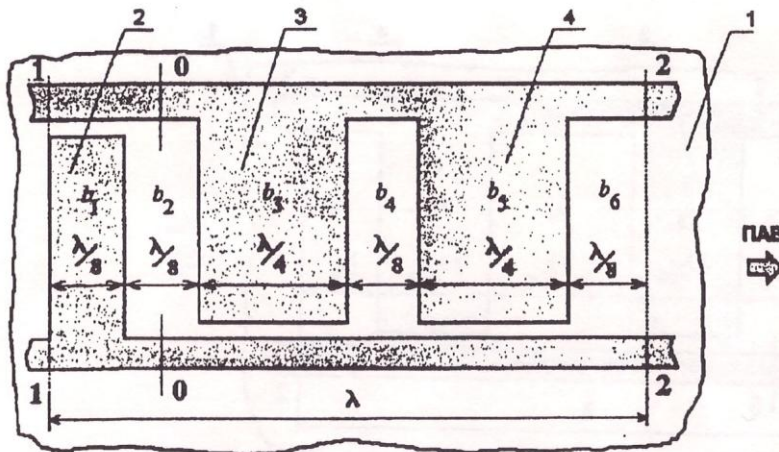


в. Возбуждение ПАВ в "несимметричных" срезах, $\Delta\phi = -45^\circ$



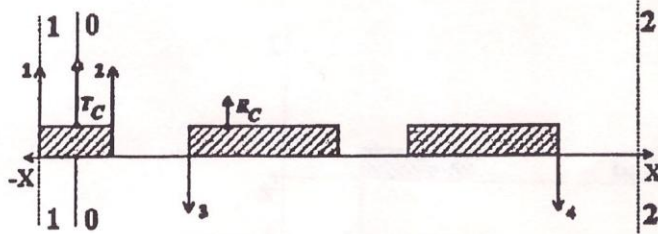
г. Отражение ПАВ

Фиг.4

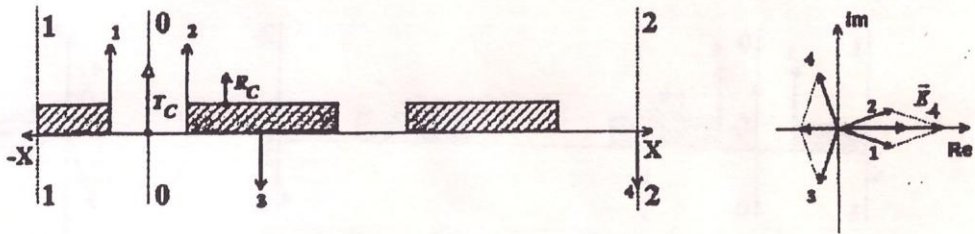


а. Конструкция элементарной секции

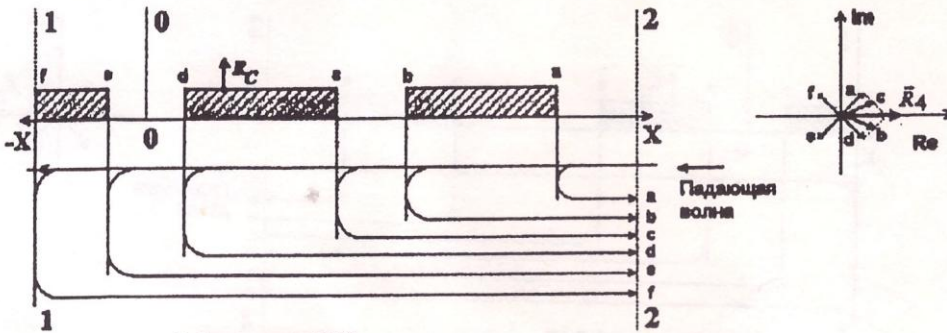
Обратная волна $\exp[j(\omega t + kx)]$
 Прямая волна $\exp[j(\omega t - kx)]$



б. Возбуждение ПАВ в "симметричных" срезах, $\Delta\varphi = 0^\circ$

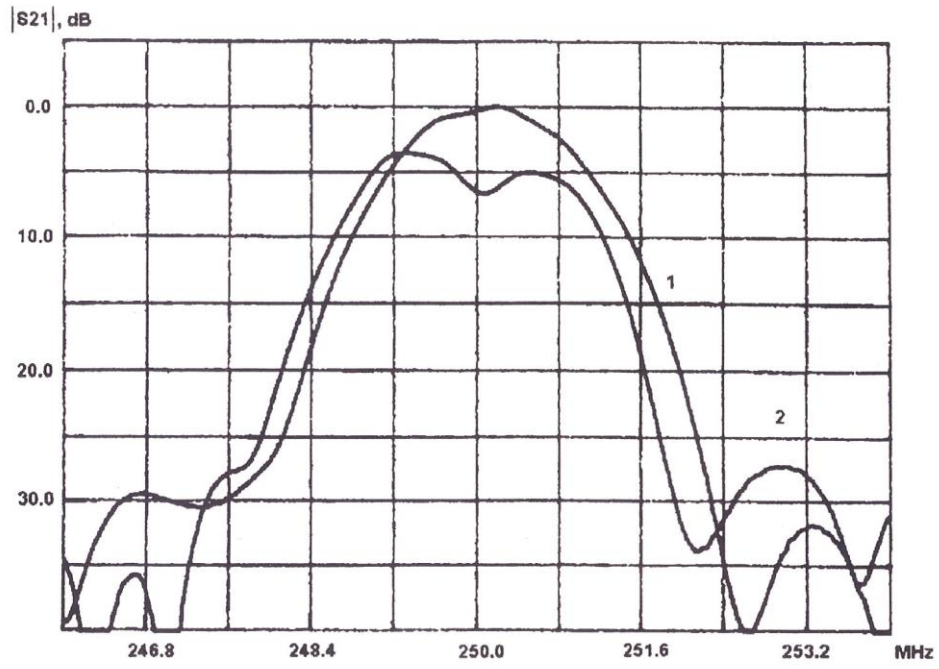


в. Возбуждение ПАВ в "несимметричных" срезах, $\Delta\varphi = -45^\circ$

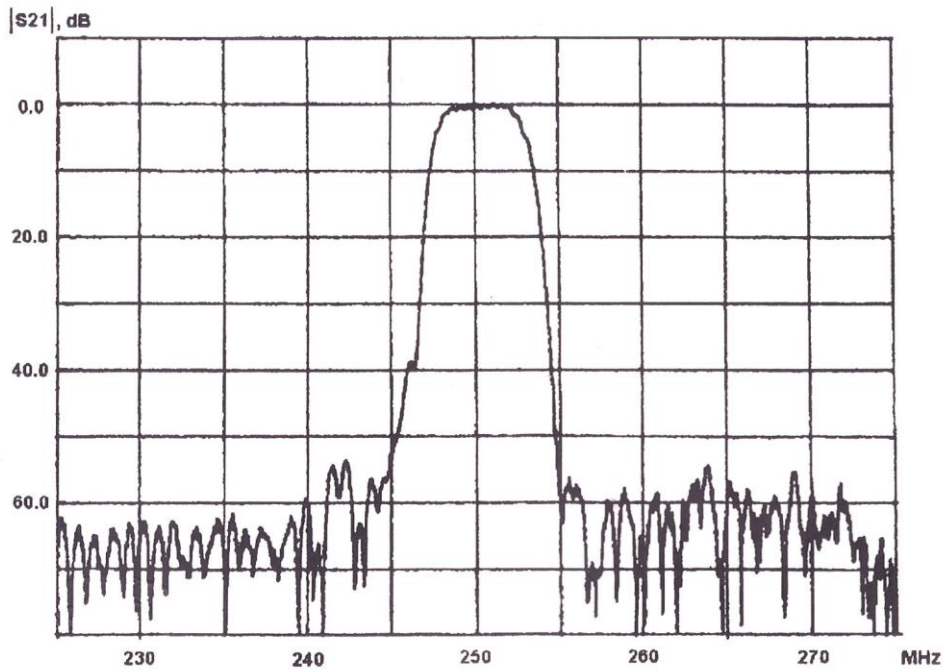


г. Отражение ПАВ

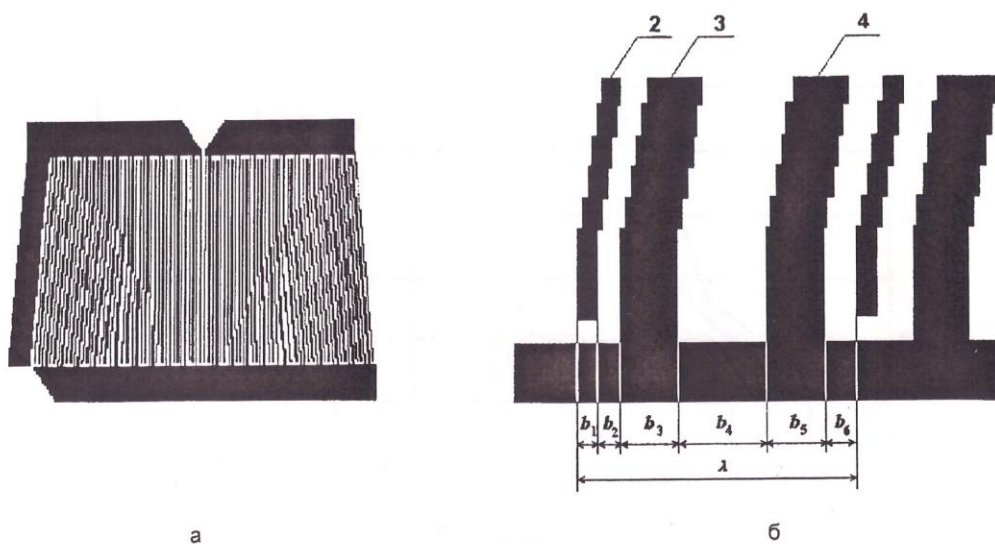
Фиг.5



Фиг.6



Фиг.7



Фиг.8

Заказ 304 Подписное
 ФИПС, Рег. ЛР № 040921
 121858, Москва, Бережковская наб., д.30, корп.1,
 Научно-исследовательское отделение по
 подготовке официальных изданий

Отпечатано на полиграфической базе ФИПС
 121873, Москва, Бережковская наб., 24, стр.2
 Отделение выпуска официальных изданий