

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра микро- и наноэлектроники

С. А. Волчѣк, В. А. Петрович

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

Методическое пособие
по дисциплине «Приборы на квантовых, оптических, магнитных
эффектах и сенсорные устройства»
для студентов специальности
1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»
всех форм обучения

Минск БГУИР 2010

УДК 534.232(075)
ББК 22.32я7
В68

Рецензент:
профессор кафедры электронной техники и технологии БГУИР,
доктор технических наук В. В. Баранов

Волчѣк, С. А.

В 68 Акустоэлектроника: метод. пособие по дисц. «Приборы на квантовых, оптических, магнитных эффектах и сенсорные устройства» для студ. спец. 1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы» всех форм обуч. / С. А. Волчѣк, В. А. Петрович. – Минск : БГУИР, 2010. – 52 с.: ил.
ISBN 978-985-488-418-9

Пособие содержит краткую информацию по устройству и функционированию различных элементов и устройств, в основу работы которых положено явление формирования и распространения поверхностно-акустических волн в пьезоэлектриках и различных типах акустопроводов.

Предназначено для самостоятельного изучения раздела «Акустоэлектроника» дисциплины «Приборы на квантовых, магнитных оптических эффектах и сенсорные устройства» студентами всех форм обучения. Может быть полезно аспирантам и научно-техническим работникам, изучающим акустоэлектронные явления и вопросы использования элементов акустоэлектроники при решении прикладных задач.

УДК 534.232(075)
ББК 22.32я7

ISBN 978-985-488-418-9

© Волчѣк С. А., Петрович В. А., 2010
© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ	5
1.1. Общая характеристика материалов, используемых при изготовлении акустоэлектронных элементов на ПАВ.....	5
1.2. Возбуждение ПАВ.....	7
1.2.1. Электродные преобразователи.....	7
1.2.2. Модификация преобразователей.....	11
1.2.3. Преобразование объёмных волн в поверхностные	14
2. ЭЛЕМЕНТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА	16
2.1. Переизлучатели.....	16
2.1.1. Многополосковые ответвители.....	16
2.1.2. Применение ВШП в качестве переизлучателя.....	18
2.2. Отражатели	20
2.3. Акустические волноводы	21
2.3.1. Топографические волноводы	22
2.3.2. Плоские слоистые волноводы	23
2.3.3. Волноводы с локальным изменением свойств подложки	24
2.4. Акустические линзы	24
3. ОДНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	26
3.1. Линии задержки	26
3.2. Резонаторы	29
3.3. Фильтры	32
3.3.1. Конструкция и характеристики фильтров на ПАВ.....	32
3.3.2. Методы реализации аподизованных преобразователей ПАВ	34
3.3.3. Уменьшение паразитных сигналов.....	37
3.4. Акустические трансформаторы	41
3.5. Разветвители и сумматоры сигналов	42
3.6. Акустические фазовращатели.....	43
3.7. Акустические аттенюаторы.....	44
4. СЛОЖНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ПАВ.....	47
4.1. Усилители на ПАВ.....	47
4.2. Генераторы на ПАВ.....	50
4.2.1. Генераторы с резонатором на ПАВ	50
4.2.2. Генераторы с линией задержки на ПАВ.....	51

ВВЕДЕНИЕ

Акустоэлектроника как направление функциональной микроэлектроники возникла на стыке акустики, физики твердого тела и микроэлектроники.

Из большого многообразия элементов акустоэлектроники в настоящее время наибольший интерес представляют элементы на поверхностных акустических волнах (ПАВ), разработка которых идет наиболее интенсивно. При изготовлении элементов на ПАВ широко используется прогрессивная интегральная технология.

Характерным примером широкого внедрения элементов на ПАВ служит массовая телевизионная аппаратура, где эти элементы выполняют роль фильтров ПЧ звука и изображения, линий задержки.

Все многообразие элементов на ПАВ удобно классифицировать по некоторым признакам.

В зависимости от характера взаимодействия ПАВ со средой распространения акустоэлектронные элементы можно разделить на пассивные и активные. К пассивным элементам относятся линии задержки, фильтры, резонаторы, дисперсионные устройства, акустические трансформаторы, разветвители, сумматоры, фазовращатели и т.п. К активным элементам – усилители и генераторы на ПАВ.

По сложности выполняемых задач элементы на ПАВ можно подразделить на однофункциональные (фильтры, резонаторы и т.п.) и многофункциональные (согласованные фильтры фазомодулированных и частотно-модулированных сигналов, устройства корреляционной обработки сигналов).

Затруднения с внедрением элементов на ПАВ в настоящее время обусловлены слабой подготовкой разработчиков радиоэлектронной аппаратуры в области акустоэлектроники.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

1.1. Общая характеристика материалов, используемых при изготовлении акустоэлектронных элементов на ПАВ

Любой акустоэлектронный элемент (или устройство) на ПАВ представляет собой систему металлизированных электродов на поверхности подложки из пьезоэлектрического материала. Функции, выполняемые такой подложкой, в значительной степени отличаются от функций, выполняемых подложками интегральных микросхем. Это объясняется тем, что подложка акустоэлектронного элемента является одновременно и элементом, в котором возбуждается ПАВ, и звукопроводом, по которому распространяется ПАВ. Это определяет важную роль материала подложки в формировании параметров и характеристик элементов на ПАВ. Для изготовления подложек применяются пьезоэлектрические материалы. К этим материалам предъявляются следующие требования:

- возможно более высокое значение коэффициента электромеханической связи (K);
- возможно низкая скорость распространения ПАВ;
- малое температурное изменение скорости распространения ПАВ;
- механическая и температурная стойкость подложки;
- технологичность;
- малые потери распространения ПАВ;
- дешевизна.

Материалов, полностью удовлетворяющих указанным требованиям, в настоящее время нет.

Чаще всего для подложек используются монокристаллические материалы. Однако последнее время появился ряд работ, указывающих на перспективность использования монокристаллических пленок пьезоэлектрических материалов, наносимых на материал, не обладающий пьезоэлектрическими свойствами.

В табл. 1 представлены основные характеристики материалов, используемых для изготовления подложек.

Таблица 1

Материал	Ориентация	Направление распространения волны	Скорость распространения ПАВ, v_a км/с	Коэффициент электромеханической связи, К	ТКЧ $\times 10^6$, $1/^\circ$
Кварц (SiO ₂)	y	x	3,16	$\sqrt{0.002}$	-24
	y+42,75°	x	3,156	$\sqrt{0.0012}$	0
	x	y	3,204	$\sqrt{0.00198}$	-35
Ниобат лития (LiNbO ₃)	y		3,48	$\sqrt{0.0482}$	85
		x	3,79	$\sqrt{0.0052}$	77
	x		3,48	$\sqrt{0.00504}$	93
Германат висмута (Bi ₁₂ GeO ₂₀)	001	110	1,68	$\sqrt{0.0144}$	-115
	111	110	1,7	$\sqrt{0.164}$	-137
	111	011	1,65	$\sqrt{0.017}$	128
Силикат висмута (Bi ₁₂ SiO ₂₀)	001	110	1,7	$\sqrt{0.018}$	118
Пьезокерамика ЦТС	P		2,21	$\sqrt{0.043}$	
Окись цинка (ZnO)	C ₆		2,7	$\sqrt{0.01}$	40
Танталат лития (LiTaO ₃)	z	y	3,31	$\sqrt{0.093}$	67
	x	z	3,22	$\sqrt{0.069}$	36
	y	z	3,22	$\sqrt{0.0074}$	37

В настоящее время широко применяются кварц и ниобат лития. Перспективно использование пьезокерамики ЦТС, особенностью которой является высокое значение коэффициента электромеханической связи К.

В качестве материала электродов элементов на ПАВ широкое распространение получил алюминий, что объясняется его технологичностью, малым

удельным сопротивлением, небольшой плотностью (удельным весом). Для улучшения адгезии на подложки из кварца и ниобата лития наносится подслои из тугоплавких металлов (чаще всего из ванадия).

1.2. Возбуждение ПАВ

Интерес к ПАВ обусловлен тем, что они, распространяясь в тонком приповерхностном слое, позволяют эффективно управлять их скоростью и направлением распространения.

ПАВ представляют собой одну из возможных разновидностей механических колебаний упругой среды.

Различают несколько типов ПАВ.

В изотропной среде вдоль границы раздела среды с воздухом (вакуумом) распространяются релеевские волны.

Вдоль границы раздела двух изотропных твердых тел распространяются волны Стоунли.

Вдоль поверхности, покрытой однородным слоем другого вещества, распространяются волны Лява.

Характерным для всех типов ПАВ является слабое затухание в направлении распространения и сильное – в направлении в глубь вещества (полное затухание наблюдается на глубине порядка $(1...3) \lambda_a$).

1.2.1. Электродные преобразователи

Существенный импульс развития техника возбуждения ПАВ получила в результате использования штыревых преобразователей, предложенных в 1965 г. Уайтом и Вольтмером. В качестве подложки для возбуждения и распространения ПАВ были предложены пьезоэлектрические материалы (далее пьезоэлектрики).

Работа штыревых электродных преобразователей основана на том, что с помощью системы электродов в пьезоэлектрике создаются переменные во времени электрические поля, которые благодаря обратному пьезоэффекту возбуждают в пьезоэлектрике упругие колебания.

Возникшие в пьезоэлектрике и распространяющиеся упругие колебания вызывают за счёт прямого пьезоэффекта переменное электрическое поле. Распространяющаяся в пьезоэлектрике упругая волна сопровождается переменным электрическим полем.

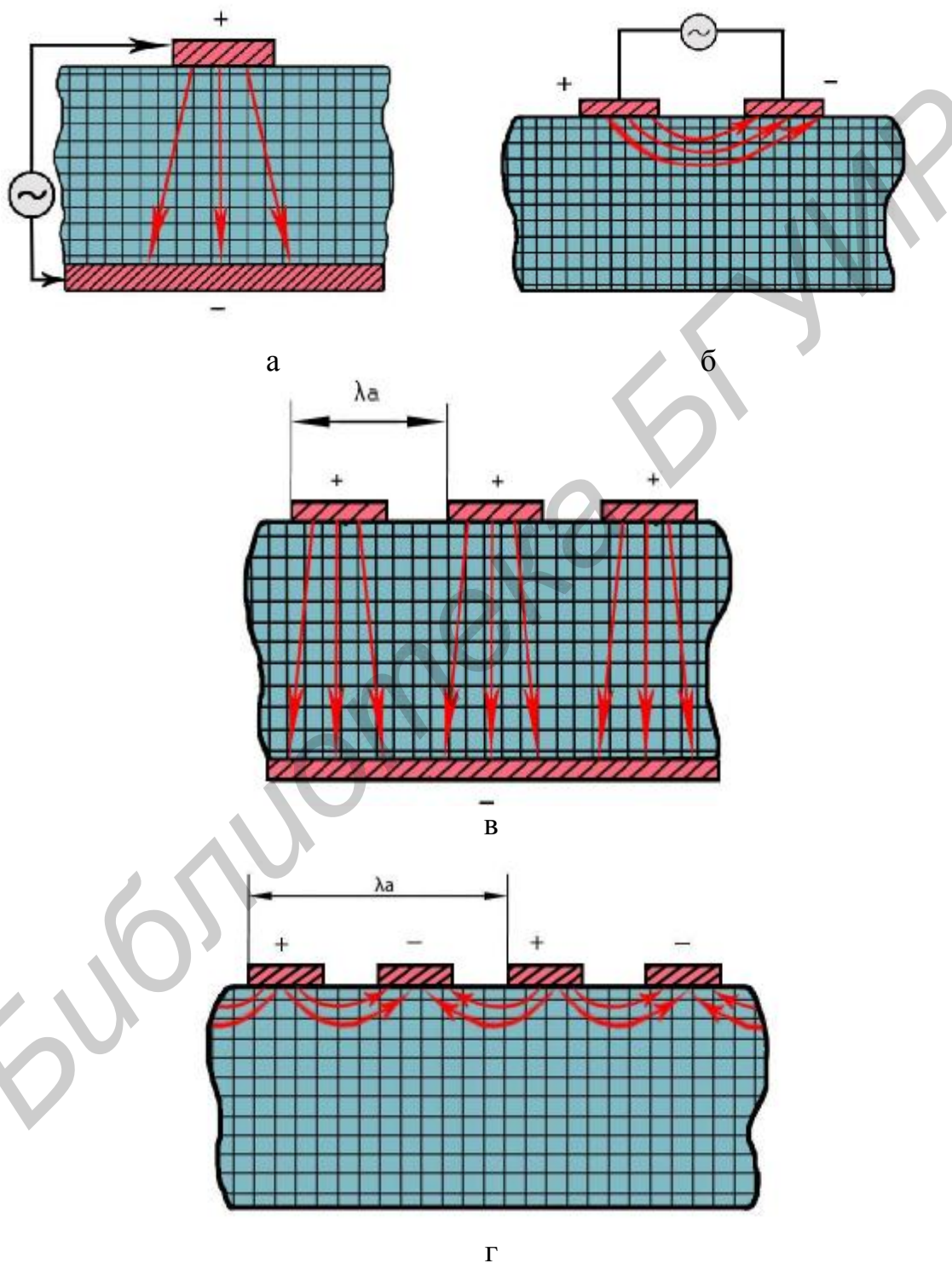


Рис. 1

Конструктивно штыревые преобразователи могут быть выполнены в виде однофазной (рис. 1, а) или двухфазной (рис. 1, б) конструкции. Для повышения эффективности преобразования преобразователь выполняется в виде решётки штырей с пространственным периодом λ_a (λ_a – длина волны ПАВ в среде). Это обеспечивает синфазное сложение всех элементарных упругих волн на поверхности (рис. 1, в, г). В результате такого акустического согласованного действия элементарных ячеек преобразователя возникают две волны, распространяющиеся во взаимно противоположных направлениях.

Однофазные преобразователи (рис. 1, а, в) получили наименование штыревых преобразователей (ШП), а двухфазные (рис. 1, б, г) – встречно-штыревых (ВШП).

Как следует из рис. 1, размеры ВШП для одной и той же основной частоты почти в два раза больше, чем размеры ШП. Это обстоятельство делает выгодным использование ШП на частотах более высоких, чем ВШП. Конструктивно ВШП выполняется в виде металлизированных электродов шириной $b = \lambda_a/4$ и толщиной $d \ll \lambda_a$.

Апертура электродов W_a должна быть гораздо больше, чем величина L/λ_a . Здесь L – расстояние между входным и выходным преобразователями.

Обычно W_a выбирается в пределах $(10 \dots 200)\lambda_a$. Это необходимо для того, чтобы свести к минимуму дифракционные потери при прохождении ПАВ от входного преобразователя к выходному.

При расчетах эквивалентной схемы преобразователя каждому электроду преобразователя ставится в соответствие отрезок длинной линии, параметры которой находятся приближенно.

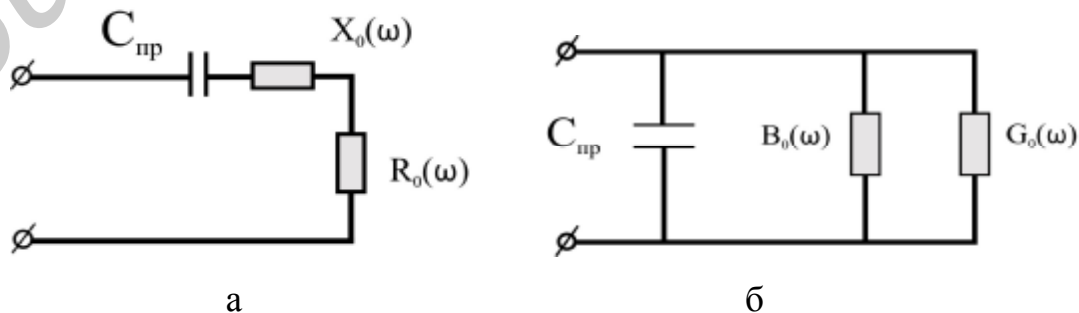


Рис. 2

Эквивалентная схема преобразователя может быть представлена параллельным или последовательным соединением эквивалентных отрезков длинной линии (рис. 2, а,б).

На эквивалентной схеме использованы следующие обозначения:

$C_{\text{пр}}$ – ёмкость (статическая) преобразователя;

$C_{\text{пр}} = NC_0W_a$ (N – число пар электродов, C_0 – погонная ёмкость электродов, W_a – апертура преобразователя);

$X_0(w)$ – реактивная составляющая сопротивления излучения;

$R_0(w)$ – активная составляющая сопротивления излучения;

$B_0(w)$ – реактивная составляющая проводимости излучения;

$G_0(w)$ – активная составляющая проводимости излучения.

Анализ эквивалентных схем показал, что наиболее точной является параллельная схема.

Для согласования преобразователя с внешними цепями используется индуктивность L_c . Её величина подбирается исходя из требований компенсации ёмкости преобразователя $C_{\text{пр}}$. При этом L_c и $C_{\text{пр}}$ образуют последовательный контур, добротность которого определяется выражением

$$Q_s = \pi/4K^2 N,$$

где K – коэффициент электромеханической связи.

Акустическая добротность Q_a преобразователя зависит только от временного запаздывания сигнала в решетке электродов:

$$Q_a = f_0/\Delta f = N; \quad \Delta f = 1/T_3 = f_0/N.$$

Оптимальное число электродов ВШП выбирается из условия $Q_a = Q_s$ (рис. 3). Это условие обеспечивает наиболее эффективную работу преобразователя и низкий уровень побочных излучений.

Не менее важным условием эффективной работы ВШП является требование электрического согласования входного (выходного) сопротивления преобразователя с сопротивлением источника (нагрузки).

Это требует в ряде случаев отступления от оптимального согласования электрического и акустического контуров преобразователя.

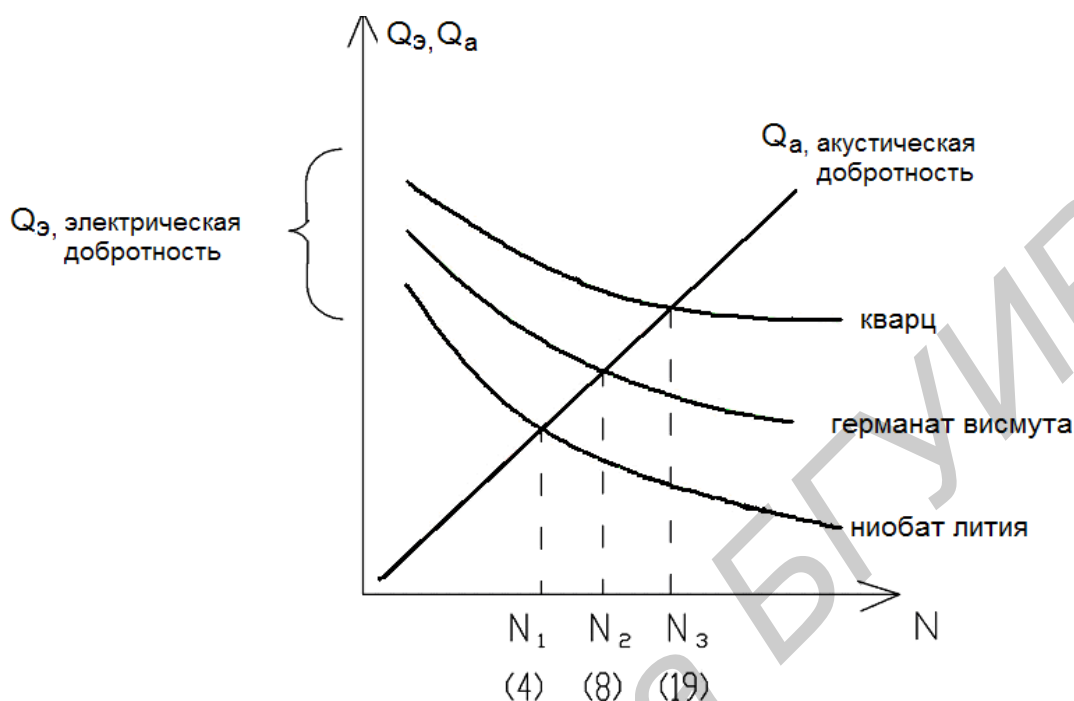


Рис. 3

Всё сказанное о преобразователях относится к преобразователям с постоянным шагом электродов (эквидистантным). Могут быть использованы и неэквидистантные преобразователи. Как правило, для их проектирования используются численные методы расчета с использованием ЭВМ.

1.2.2. Модификация преобразователей

Всё многообразие конструкций преобразователей можно разбить на две группы: преобразователи общего типа и специальные преобразователи.

Преобразователи первой группы выполняют единственную функцию: прямое или обратное акустоэлектрическое преобразование сигнала.

Вторая группа преобразователей выполняет ряд дополнительных функций: обеспечивает определённую форму амплитудно-частотной характеристики (АХЧ), заранее заданный импульсный отклик и т.п. Рассмотрение этой группы

преобразователей будет совмещено с рассмотрением соответствующих функциональных элементов на ПАВ.

Основными требованиями, предъявляемыми к преобразователям общего типа, являются следующие:

- минимум потерь;
- частотная избирательность в определённом диапазоне частот;
- удобство согласования с внешними электрическими цепями;
- минимальный уровень отраженного сигнала.

Частотная избирательность свойственна любому преобразователю на ПАВ и однозначно определяется как шагом расположения его электродов, так и их числом.

В ряде случаев возникает необходимость усиления того или иного требования к преобразователям. Это приводит к появлению различных модификаций преобразователей.

На рис. 4, а представлена конструкция широкополосного преобразователя. Широкополосность достигается размещением противофазных электродов под углом друг к другу. Это приводит к тому, что в пределах апертуры преобразователя расстояние между электродами изменяется от h_{\min} до h_{\max} . В соответствии с этим и частота возбуждаемого сигнала изменяется от $f_{\max} = v_a/2h_{\min}$ до $f_{\min} = v_a/2h_{\max}$. Следовательно, полоса пропускания преобразователя будет следующей:

$$\Delta f = v_a/2 \cdot (h_{\max} - h_{\min}) / h_{\max} \cdot h_{\min}.$$

Значение угла α лежит в пределах $3 - 10^\circ$.

На рис. 4, б представлен однонаправленный преобразователь с фазовращателем. Благодаря соответствующему согласованию фаз, подаваемых на преобразователи сигналов, и их взаимному пространственному расположению достигается суммирование энергий возбуждаемых ПАВ в одном направлении и гашение их в другом.

Использование однонаправленных преобразователей позволяет практически в два раза снизить потери преобразования по сравнению с двунаправленными преобразователями. Существенным недостатком однонаправленных пре-

образователей является их узкополосность и сложность совмещения фазовращателя с интегральной конструкцией самого преобразователя.

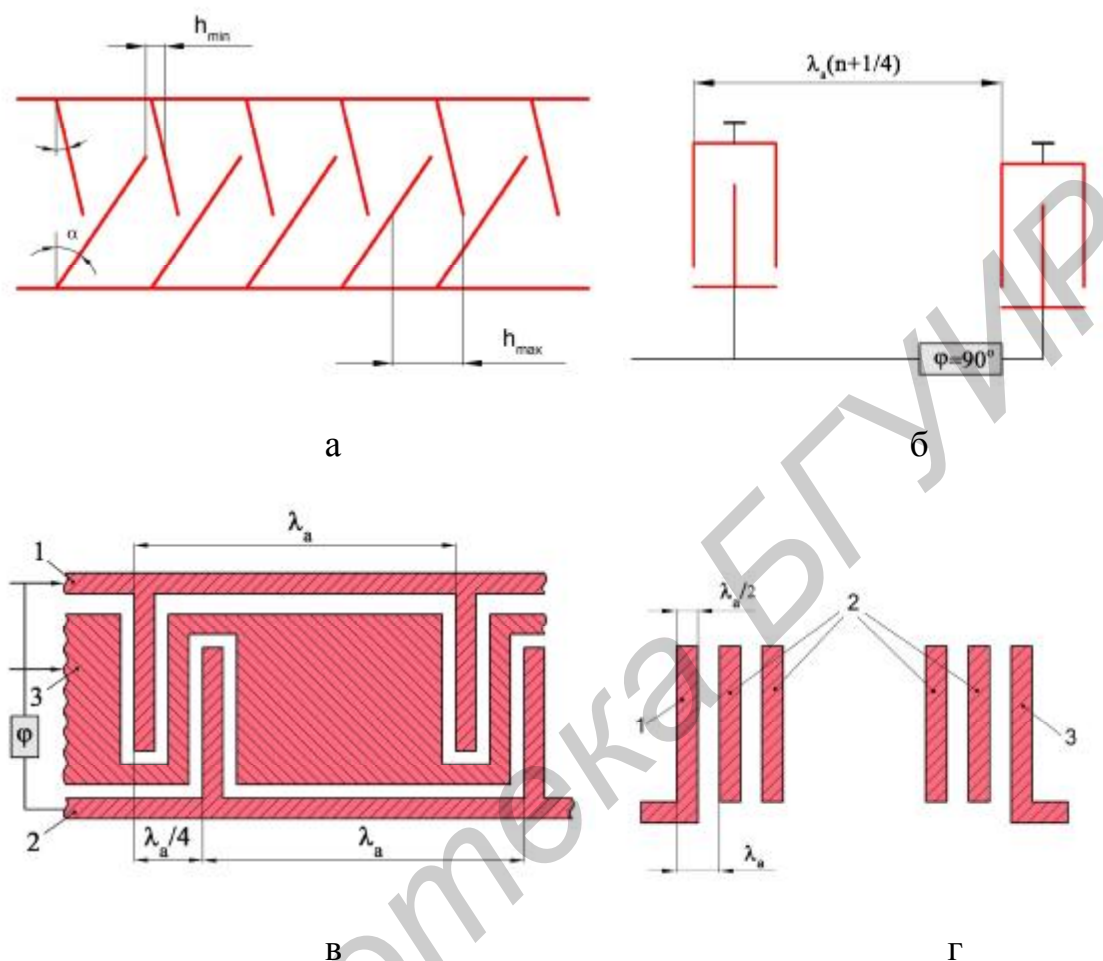


Рис. 4

На рис. 4, в представлен широкополосный однонаправленный преобразователь. Он представляет собой две «гребёнки» электродов (1 и 2) с шагом λ_a , вставленных друг в друга. «Гребёнки» сдвинуты друг относительно друга на $\lambda_a/4$. Между «гребёнками» введён общий электрод 3, ширина вертикальных участков которого периодически изменяется на $\pm \lambda_a/8$. Входные сигналы поступают на «гребёнку» электродов 1 и на общий электрод 3, а на «гребёнку» электродов 2 сигнал подаётся через фазовращатель ($\varphi = 90^\circ$). В этом случае сигнал, возбуждаемый преобразователем, можно рассматривать как сумму сигналов парциальных преобразователей, образованных «гребёнками» электродов 1–3 и 2–3. Пространственный сдвиг между этими преобразователями равен

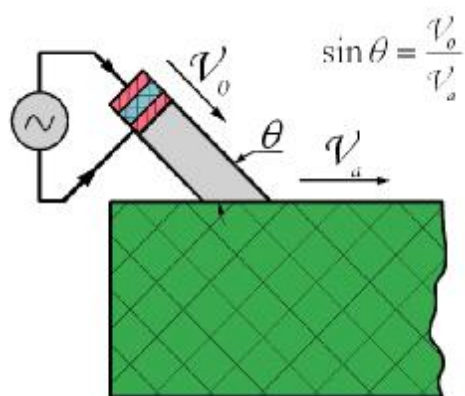
нечётному числу четвертей длины волн $(2n-1)\lambda_a/4$. Направление распространения возбуждаемой ПАВ будет определяться знаком фазового сдвига.

Для удобства согласования преобразователя с внешними электрическими цепями предложен дифракционный преобразователь (рис. 4, г). Такой преобразователь состоит из ряда металлических электродов 2 (пассивных) шириной $\lambda_a/2$ и шагом λ_a , расположенных между электродами 1 и 3. К электродам 1 и 3 подводится электрический сигнал, создающий между ними поперечное электрическое поле. Так как длина волны электрического поля много больше протяжности решётки электродов, то составляющие электрического поля в зазорах синфазны в любой момент времени. Акустическое согласование обеспечивается выбором ширины пассивных электродов, равной $\lambda_a/2$, и их шагом, равным λ_a . Полоса пропускания такого преобразователя определяется числом пассивных электродов 2. Сопротивление излучения этого преобразователя в $N^2/4$ раза больше, а ёмкость в N^2 раз меньше сопротивления и ёмкости ВШП, состоящего из того же числа электродов. Кроме того, этот преобразователь практически не чувствителен к обрыву или замыканию пассивных электродов, что снижает требования к технологии его изготовления.

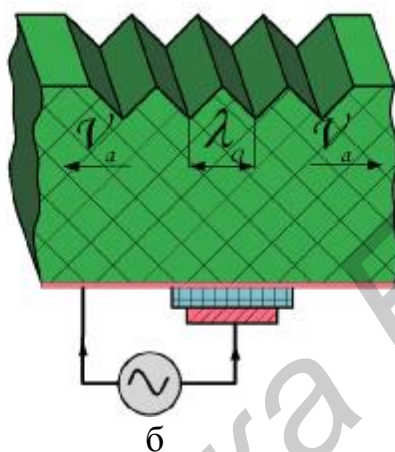
1.2.3. Преобразование объёмных волн в поверхностные

Когда по какой-либо причине возникает необходимость возбуждения ПАВ в подложках из материалов, не являющихся пьезоэлектриками, приходится использовать преобразование объёмных волн в ПАВ. Наиболее распространённые методы преобразования поясняет рис. 5.

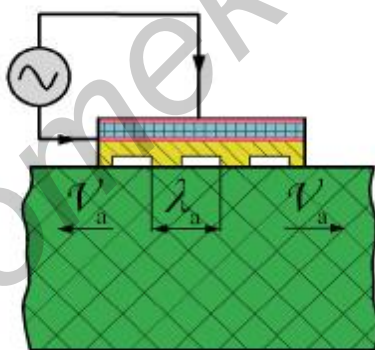
Клиновидный преобразователь (рис. 5, а) – наиболее распространённый вариант преобразователя объёмных волн в ПАВ, обеспечивает однонаправленность излучаемой ПАВ. Особенностью преобразователя (рис. 5, б) является возможность создания как однонаправленного излучения ПАВ (изменяя форму пазов треугольного сечения), так и двунаправленного с желаемым коэффициентом отношения мощностей ПАВ, излучаемым в разных направлениях.



а



б



в

Рис. 5

Гребенчатый тип преобразователя (рис. 5, в) является наиболее перспективным, поскольку процесс его изготовления совместим с технологией гибридных интегральных микросхем.

Преобразователи рассмотренного типа имеют относительно низкую эффективность и на частотах свыше 10 МГц конструктивно и технологически сложны.

2. ЭЛЕМЕНТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА

Элементы акустического тракта располагаются на траектории распространения ПАВ между входным и выходным преобразователями и служат для управления траекторией и апертурой потока ПАВ. К элементам акустического тракта относятся:

- переизлучатели;
- отражатели;
- волноводы;
- акустические линзы.

2.1. Переизлучатели

Переизлучатели служат для передачи энергии ПАВ из одного пространственного канала в другой. В качестве переизлучателей могут быть использованы многополосковые ответвители (МПО) и ВШП.

2.1.1. Многополосковые ответвители

МПО (рис.6) представляет собой систему проводящих электродов 6, нанесённую на поверхности пьезоэлектрического звукопровода параллельно фронту распространения ПАВ.

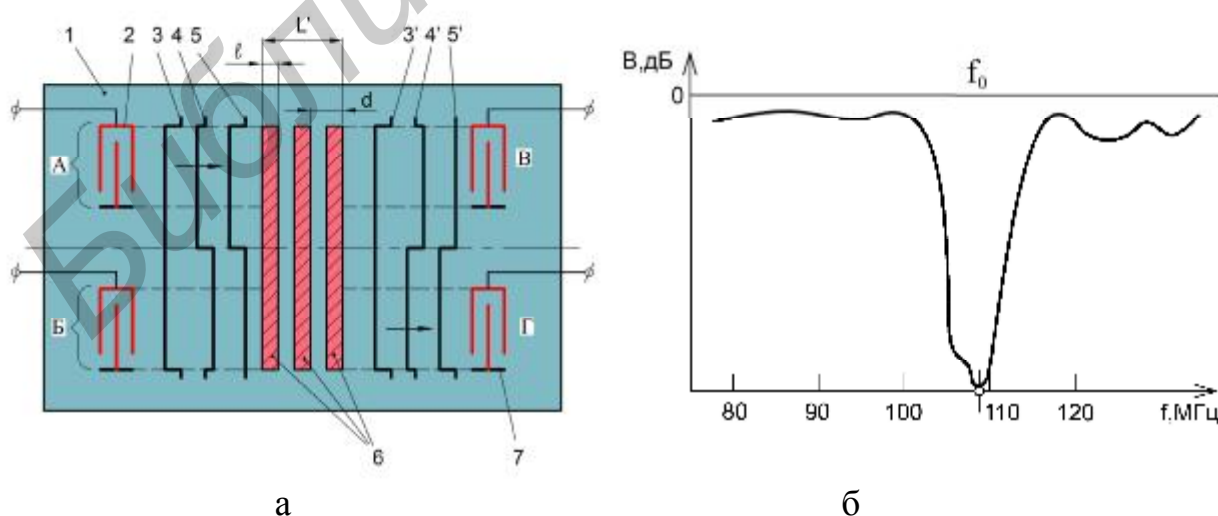


Рис. 6

На пьезоэлектрической подложке 1 существуют два пространственных канала распространения ПАВ: А и Б. Входной преобразователь 2 возбуждает ПАВ в канале А. При этом необходимо осуществить передачу энергии ПАВ из канала А в канал Г с тем, чтобы на преобразователе 7 этого канала появился выходной сигнал.

Распространяющаяся волна 5 ПАВ может быть представлена в виде суперпозиции двух волн, распространяющихся в каналах А и Б. Волна 3 имеет симметричное фазовое распределение и может быть представлена в виде двух синфазных волн в каналах А и Б. Волна 4 имеет асимметричное фазовое распределение и имеет две противофазные волны в тех же каналах. Так как ширина электродов МПО много меньше их длины, то можно принять, что электроды МПО имеют нулевую проводимость в направлении распространения ПАВ и бесконечную – вдоль фронта волны.

Для распространяющейся синфазной волны система электродов МПО эквивалентна свободной поверхности. Для противофазных волн при определённой длине системы электродов (L') МПО возникает перераспределение зарядов. В результате сложения составляющих симметричной и асимметричной волн образуется волна в канале Г, распространяющаяся в том же направлении. За МПО в канале В волна отсутствует.

Условием полной «перекачки» энергии из канала А в канал Г является условие $L = \lambda_a / K^2$. При этом число электродов МПО $N = \lambda_a / K^2 d$, где d – пространственный шаг электродов МПО.

На рис. 6, б представлена АЧХ МПО. Как следует из этого рисунка, АЧХ имеет широкий плоский участок с «провалом» на частоте f_0 . Для частоты f_0 выполняется условие $\lambda_a / d = 1$. Если же выполнить условие $d \ll \lambda_{a \max}$ ($\lambda_{a \max}$ – максимальная длина волны рабочего диапазона частот), то можно обеспечить постоянство коэффициента передачи МПО во всём диапазоне частот.

2.1.2. Применение ВШП в качестве переизлучателя

Принципиальное отличие ВШП от МПО состоит в том, что акустическая волна, переизлученная ВШП из одного канала в другой, распространяется в этом канале в обе стороны от ВШП. Поэтому МПО осуществляет однонаправленное переизлучение, а ВШП – двунаправленное (рис. 7).

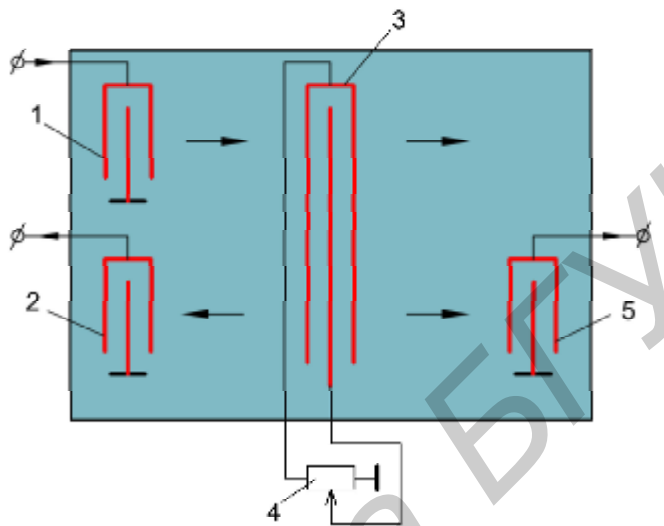


Рис. 7

Для получения однонаправленного переизлучения можно использовать однонаправленный преобразователь. Число электродов ВШП определяет величину энергии, передаваемой из одного канала в другой, т.е. степень связи между каналами. Используя регулируемый резистор 4 (см. рис. 7), включенный параллельно гребёнкам электродов ВШП, можно регулировать связь между каналами: уменьшение сопротивления эквивалентно уменьшению числа электродов и, следовательно, уменьшению связи.

Переизлучатели широко используются при разработке различного рода акустоэлектронных элементов: для передачи энергии ПАВ с одной подложки на другую (рис. 8, а), в качестве делителей мощности ПАВ (рис. 8, б), для изменения апертуры потока ПАВ (рис. 8, в) и др.

Широкое распространение получили j-образные МПО, позволяющие осуществить переизлучение ПАВ из одного канала в другой с изменением направления распространения (рис. 8, г). Значительный интерес представляют

появившиеся в последнее время МПО с переменным коэффициентом связи, образуемые воздействием электронного пучка на поверхность пьезоэлектрического звукопровода, покрытого плёнкой селенида кадмия (CdS) (рис. 8, д).

В пленке CdS 1 под воздействием электронного пучка образуются свободные носители заряда, число которых зависит от интенсивности электронного пучка.

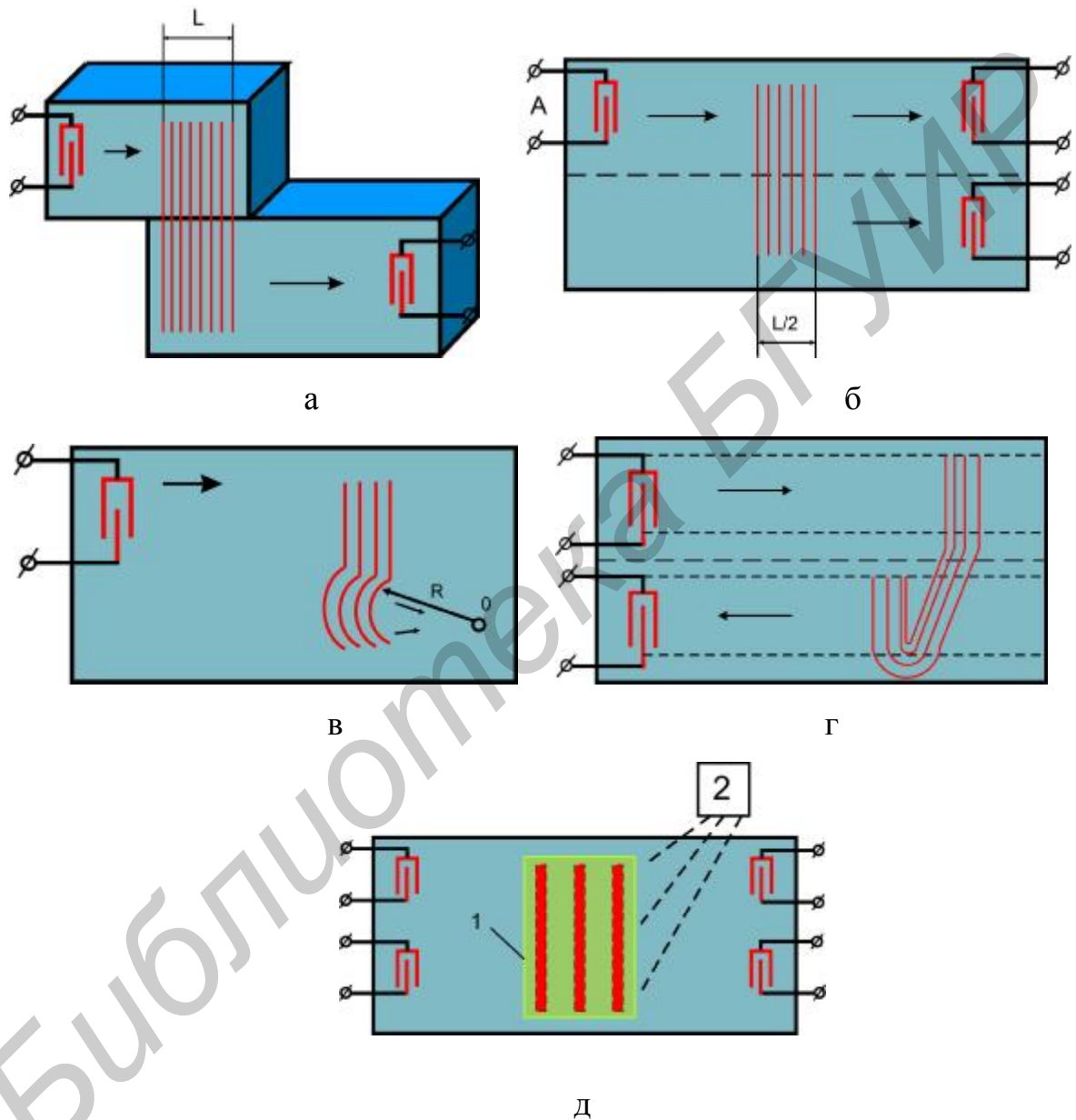


Рис. 8

При этом возрастает проводимость облучаемого участка. Требуемая конфигурация облучаемого фрагмента пленки CdS обеспечивается электронной пушкой 2. Так как степень связи каналов определяется числом элементов МПО, то в такой системе легко реализуется управляемый адаптивный ответвитель.

2.3. Акустические волноводы

Большинство акустоэлектронных функциональных элементов создается с преобразователями, имеющими апертуру $W_a \sim (20-200)\lambda_a$. Это обеспечивает малую расходимость пучка ПАВ в пределах первой зоны Френеля (её граница определяется выражением $l = W_a L / \lambda_a$) и, следовательно, малое влияние дифракционных эффектов.

При построении сложных акустоэлектронных систем возникает необходимость передачи ПАВ на существенно большие расстояния, чем размер l . При этом возникающее значительное расхождение пучка ПАВ вызовет увеличение потерь энергии и искажение электрических характеристик элементов и устройств на ПАВ. Для борьбы с этим явлением можно увеличить апертуру преобразователей.

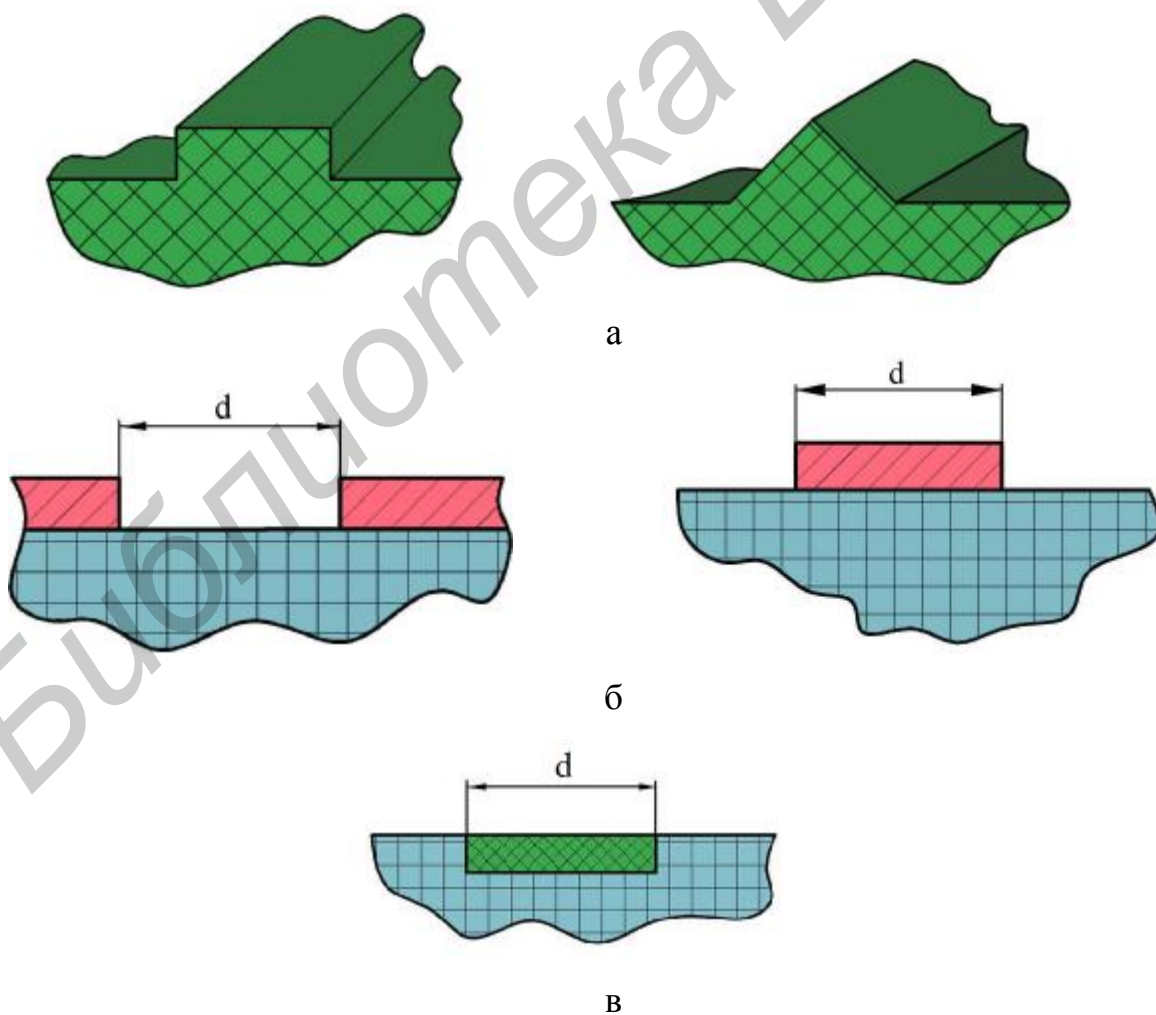


Рис. 11

Но это неудобно с точки зрения микроминиатюризации акустоэлектронных устройств. Можно также принимать специальные меры для каналирования энергии ПАВ. Локализация энергии ПАВ в узком луче с помощью средств их каналирования значительно выгоднее и экономнее. Для целей каналирования применяются элементы акустического тракта, получившие наименование акустических волноводов. Волновод представляет собой протяженную структуру, расположенную на поверхности звукопровода. Поперечные размеры волны, распространяющейся по звукопроводу, практически равны ширине волновода.

В настоящее время разработано несколько типов акустических волноводов: топографические (рис. 11, а), плоские слоистые (рис. 11, б) и звукопроводы с локальным изменением свойств подложки (рис. 11, в).

2.3.1. Топографические волноводы

Волноводы такого типа создаются за счёт локального изменения конфигурации поверхности подложки. Форма конфигураций может быть любой, но наибольшее распространение получили волноводы прямоугольного и треугольного сечения.

В волноводе прямоугольного сечения имеются две основные моды колебаний: изгибная и псевдорелеевская. Изгибная мода является сильно диспергирующей и поэтому непригодной для использования. Псевдорелеевская практически лишена дисперсии. Её поле напоминает поле релеевской волны и ей свойственна высокая степень локализации в волноводе.

Волноводы треугольного сечения характеризуются малой дисперсией на высокой частоте. С понижением частоты всё большая часть энергии волны распространяется вне волновода и возникает значительная дисперсия. Это приводит к тому, что характеристики такого волновода сильно зависят от состояния гребня волновода: при возникновении повреждений гребня появляются значительные отражения ПАВ, что ухудшает его характеристики.

Топографические волноводы образуются путём селективного травления материала звукопровода (подложки). Этим волноводам присуща сильная лока-

лизация поля волны вблизи волновода, что обеспечивает хорошую «развязку» между расположенными близко друг от друга волноводами.

2.3.2. Плоские слоистые волноводы

Волноводы такого типа изготавливаются путем нанесения на подложку слоя материала, отличного по своим свойствам от материала подложки. Волноводный эффект в такой структуре наблюдается в случае, когда скорость волны в центральной части волновода меньше, нежели в периферийной. Это условие выполняется тогда, когда $n_2 > n_1$, где n_2 и n_1 – коэффициенты преломления ПАВ материалом волновода и материалом окружающей среды соответственно. Поле волны в слоистом волноводе сосредоточено вблизи полосы волновода.

Для слоистых волноводов степень локализации волны зависит от соотношения скоростей волн в звукопроводе (v_3) и волноводе (v_a). Степень локализации энергии ПАВ у плоских волноводов значительно ниже, нежели у топографических.

Разновидностью плоского волновода является щелевой волновод. В этом случае вся поверхность звукопровода (кроме узкой щели) покрыта слоем материала, отличного от материала подложки.

Условием каналирования энергии ПАВ в волноводе является требование, чтобы фазовая скорость ПАВ в материале волновода была больше фазовой скорости ПАВ на свободной поверхности подложки.

В плоском волноводе при увеличении частоты наблюдается уменьшение скорости распространения ПАВ. При этом ПАВ более локализуется в самом волноводе.

В щелевом волноводе на низких частотах энергия ПАВ в основном сосредоточена вне щели. Скорость распространяющейся ПАВ близка к скорости релеевской волны в звукопроводе. С ростом частоты ПАВ всё более концентрируется в щели.

Дисперсионные свойства плоского и щелевого волноводов различны. Это объясняется различием законов изменения скоростей ПАВ с изменением частоты. В плоском волноводе она убывает от значения релеевской скорости на по-

верхности волновода до скорости в слоистой структуре. В щелевом волноводе имеет место изменение скорости, характеризующееся наличием максимума на определённой частоте.

Оба типа волноводов обладают высокой технологичностью. Следует упомянуть о своеобразной модификации плоского волновода, образуемого металлизированной полоской на поверхности пьезоэлектрического звукопровода. При этом металлическая плёнка на поверхности пьезоэлектрика закорачивает тангенциальные составляющие электрического поля ПАВ, вызывая локальное уменьшение скорости волны под плёнкой. Это и обеспечивает условие локализации волны в области расположения металлической пленки. У такого волновода металлическая плёнка не служит волноводом, а лишь создаёт условия для концентрации энергии ПАВ вблизи его закороченной поверхности.

2.3.3. Волноводы с локальным изменением свойств подложки

Этот тип волновода создаётся за счёт локальных изменений свойств подложки (плотности, эффективной жесткости, поляризации и т.п.). Локальные изменения свойств подложки достигаются ионной имплантацией, диффузионным введением примесей или же специфической поляризацией сегнетоэлектриков. Это весьма перспективный вид акустических волноводов, выгодно отличающийся от плоских волноводов низкими потерями.

В заключение отметим, что широкое применение акустических волноводов в настоящее время ограничивается значительными потерями в реальных волноводах и отсутствием эффективных способов их возбуждения.

2.4. Акустические линзы

При разработке акустоэлектронных элементов часто возникает задача изменения апертуры ПАВ (например для согласования апертуры преобразователя со входом акустического волновода). Для этих целей можно использовать преобразователь концентрической формы или же соответствующей формы переизлучатель. Однако это вызывает неоправданное усложнение функциональных элементов.

Лучшим решением этой задачи является применение акустических линз.

Линза образуется путем нанесения на поверхность звукопровода упругого покрытия. Параметры материала покрытия и звукопровода должны выбираться таким образом, чтобы фазовая скорость волны на поверхности покрытия была отлична от фазовой скорости на свободной поверхности. В зависимости от соотношения этих скоростей могут быть получены собирающие (фокусирующие) или рассеивающие (дефокусирующие) линзы. С помощью акустических линз можно управлять траекторией и шириной потока ПАВ.

Рассмотренные элементы акустического тракта создают полный набор элементов, позволяющих управлять распространением ПАВ и создавать на этой основе различные акустоэлектронные элементы.

Библиотека БГУИР

3. ОДНОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАССИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К однофункциональным пассивным элементам на ПАВ относятся:

- линии задержки;
- резонаторы;
- фильтры;
- акустические трансформаторы;
- разветвители и сумматоры сигналов;
- акустические фазовращатели;
- акустические аттенюаторы.

В этих элементах используются преобразователи ПАВ и различные элементы акустического тракта, соответствующее сочетание которых позволяет создавать всё многообразие упомянутых элементов.

3.1. Линии задержки

Линии задержки (ЛЗ) – это широко используемые устройства, предназначенные для реализации задержки во времени электрического сигнала.

Основной особенностью ЛЗ на ПАВ является то, что скорость распространения ПАВ примерно в 10^5 раз ниже скорости распространения электромагнитной волны в вакууме. Это обстоятельство благоприятствует созданию миниатюрных ЛЗ.

К любым ЛЗ предъявляются следующие требования:

- большие диапазоны времен задержки электрического сигнала;
- широкая полоса пропускания;
- низкие потери.

ЛЗ на ПАВ наиболее полно удовлетворяют этим требованиям. Современные ЛЗ на ПАВ обеспечивают задержку сигнала в пределах от 0,1 мкс до 1 мс и работают в диапазоне частот от десятков мегагерц до единиц гигагерц. Всё многообразие современных ЛЗ на ПАВ можно классифицировать по ряду признаков.

По характеру реализуемой задержки:

- с постоянной задержкой;
- с переменной задержкой;
- многоотводные ЛЗ;
- дисперсионные ЛЗ.

По характеру траектории:

- с линейной траекторией;
- со сложной траекторией.

По величине задержки:

- с задержкой до 100 мкс;
- с задержкой более 100 мкс.

Рассмотрим наиболее простую ЛЗ на ПАВ – ЛЗ с постоянной задержкой и линейной траекторией распространения ПАВ (рис. 12).

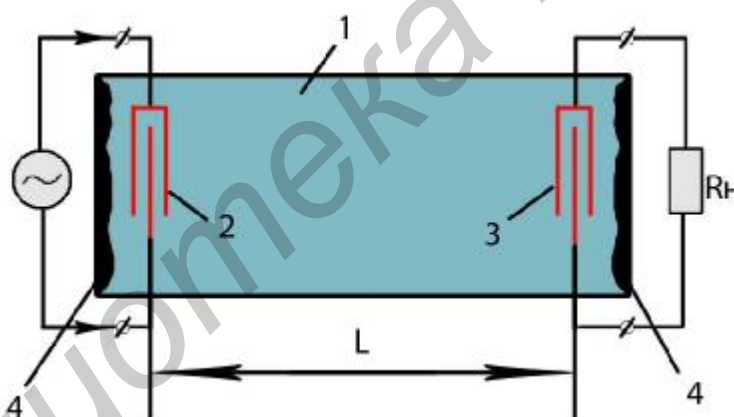


Рис. 12

Такая ЛЗ состоит из подложки звукопровода 1, входного преобразователя 2, выходного преобразователя 3 и звукопоглотителей 4. В качестве материала подложки используется пьезоэлектрик с возможно меньшей скоростью распространения ПАВ (чаще всего это германат висмута или пьезокерамика). В современных конструкциях ЛЗ в качестве преобразователей в основном применяются ВШП. С целью подавления эффекта отражения сигналов от концов подложки на неё наносится звукопоглощающее покрытие. В относительно узкополосных ЛЗ могут применяться однонаправленные преобразователи, спо-

способствующие уменьшению отражений. Время задержки ЛЗ определяется выражением $t_3 = L/v_a$.

Число электродов преобразователя выбирается согласно формуле $N = 2f_0a/\Delta f$, где f_0 – рабочая частота; $a = 0,6 - 0,8$ – коэффициент, учитывающий сужение общей полосы пропускания ЛЗ (как следствие перемножения АЧХ входного и выходного преобразователей); Δf – полоса пропускания.

Шаг электродов ВШП определяется формулой $d = v_a/2f_0$, а ширина электродов $b = d/2$. Минимальное значение апертуры определяется из условия следующим образом: $W_{a \min} \geq t_3 \cdot v_a \cdot \lambda_a$.

ЛЗ описанной конструкции целесообразно применять лишь при малых величинах времени задержки (до 100 мкс). Для реализации большего времени задержки (во избежание чрезмерного увеличения габаритов) применяются ЛЗ со сложной траекторией распространения ПАВ. Такие ЛЗ создаются для реализации времени задержки от 100 до 1000 мкс. Возможные варианты реализации таких ЛЗ показаны на рис. 13 и 14.

В зависимости от того, какая конструкция выбрана, траектория ПАВ может быть замкнутой, спиральной или же ломаной. На рис. 13, а показана ЛЗ с закруглёнными краями подложки 1. В результате этого ПАВ распространяются от входного преобразователя 2 к выходному 3 по обеим сторонам подложки, образуя замкнутую траекторию. Для устранения прямой связи между входным и выходным преобразователями между ними располагается поглощающее покрытие 4.

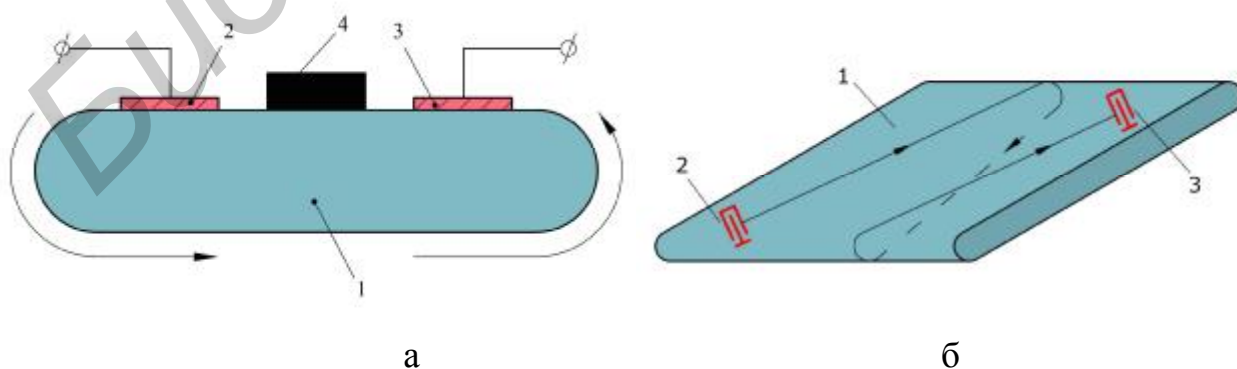


Рис. 13

Пример ЛЗ со спиральной траекторией движения ПАВ показан на рис. 13, б. Здесь входной 2 и выходной 3 преобразователи развёрнуты на некоторый угол относительно продольной оси подложки 1.

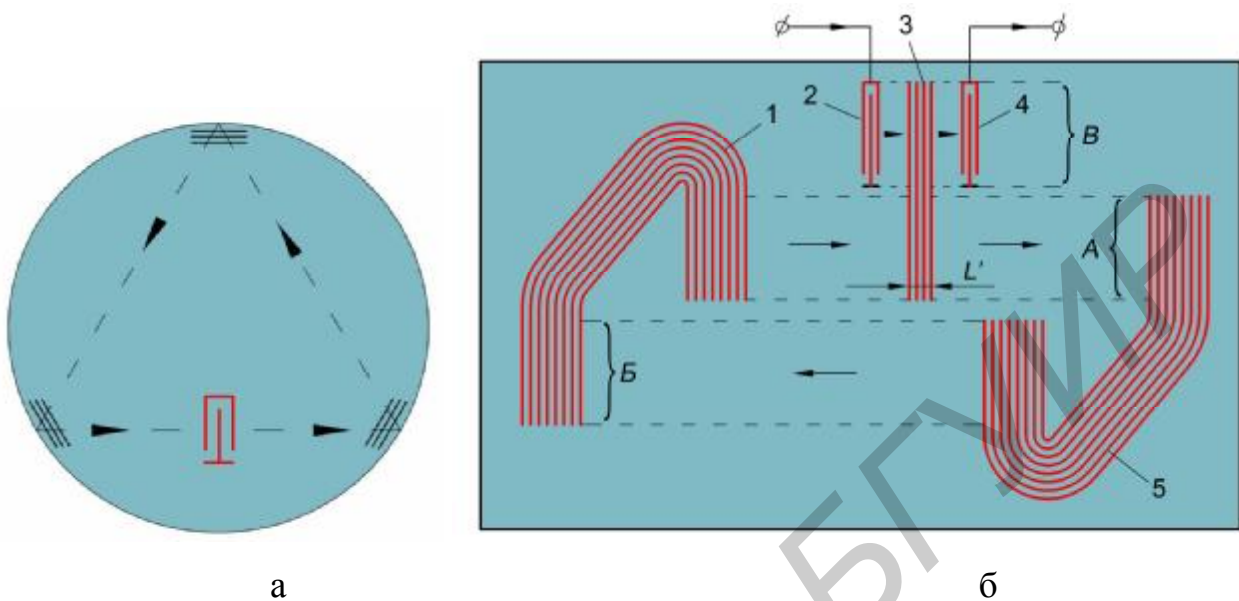


Рис. 14

При этом ПАВ распространяется по спирали, двигаясь с обеих сторон подложки.

На рис. 14, а изображена дисковая ЛЗ с треугольной траекторией (может быть многоугольной) распространения ПАВ. У неё один преобразователь, он является входным и выходным одновременно.

На рис.14, б представлен вариант ЛЗ, в которой распространение ПАВ от входного ВШП 2 к выходному 4 осуществляется с помощью МПО линейной 3 и изогнутой 1 и 5 конфигураций.

3.2. Резонаторы

По принципу действия резонаторы на ПАВ идентичны резонаторам, использующим объемные акустические волны. Резонатор на объемных волнах представляет собой в простейшем случае плоскопараллельную пластину из пьезоэлектрического материала. При толщине пластинки L резонансные частоты определяются скоростью распространения объемной акустической волны

$v_{об}: f_0 = n \frac{x_{об}}{2L}$, где n – нечетные целые числа. При этом на расстоянии L укладывается половина длины акустической волны (это условие обеспечивает существование в резонаторе стоячей волны). Таким образом, резонатор на объемных волнах является многомодовым.

На рис. 15, а показано общее устройство резонатора на ПАВ. Резонаторная область 2 такого резонатора ограничена распределенными отражательными структурами 1. Такими структурами могут служить металлические электроды (рис. 15, б), пазы (рис. 15, в) или диффузионные неоднородности (рис. 15, г).

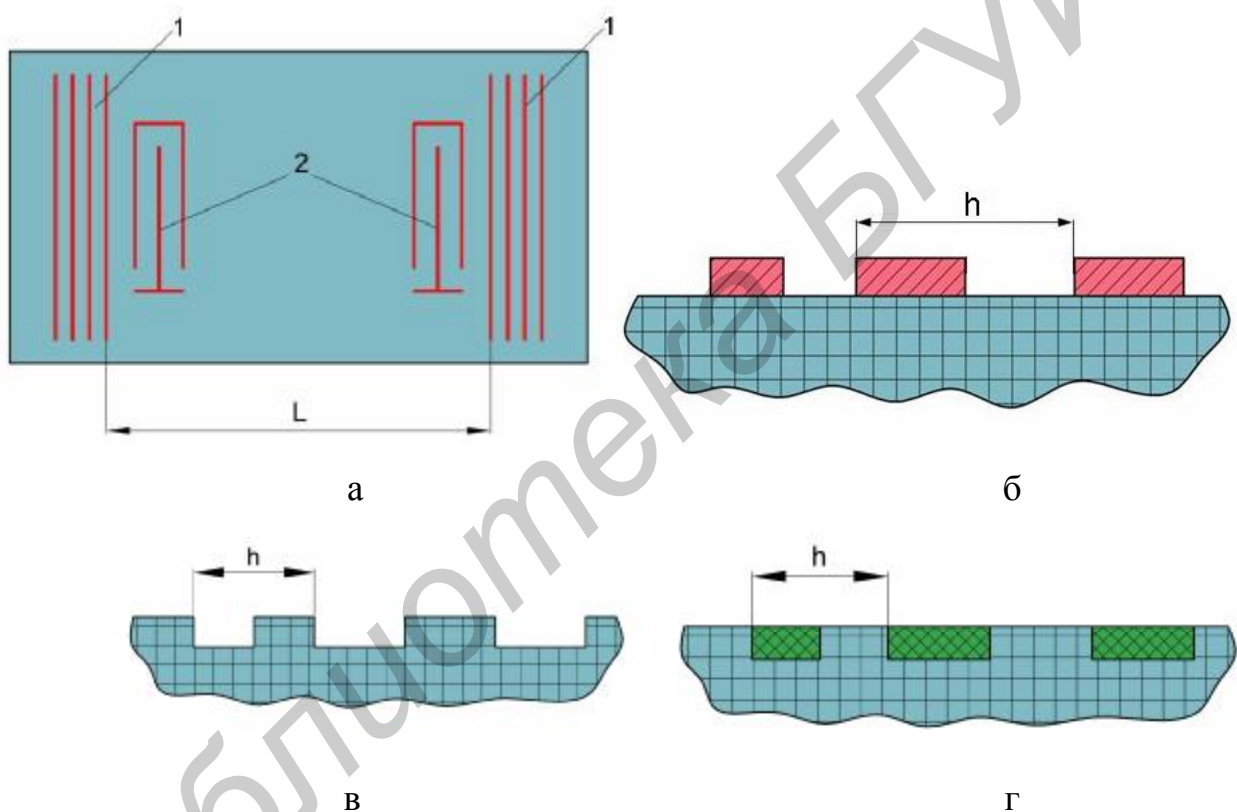


Рис. 15

Максимумы коэффициента отражения для таких отражательных структур находятся по формуле $f_0 = n \cdot x_a / 2h$, где h – шаг расположения неоднородностей. Частоты, при которых наблюдаются резонансные явления, отвечают нечетным значениям n (как и для случая использования объемных акустических волн). Следовательно, резонатор на ПАВ также является многомодовым устройством.

Для сведения числа мод к минимуму (вплоть до одной) выбирают соот-

ветствующим образом размер резонаторной области, число элементов решётки отражателей и коэффициент отражения каждого элемента (рис. 16).

Ненагруженная добротность резонатора равна $1/Q = 1/Q_i$, где Q_i – парциальные составляющие добротности, обусловленные:

- потерями распространения ПАВ в звукопроводе;
- дифракцией пучка ПАВ;
- потерями на генерацию объёмных волн;
- потерями, связанными с неидеальными характеристиками отражателей (утечка энергии через отражатели).

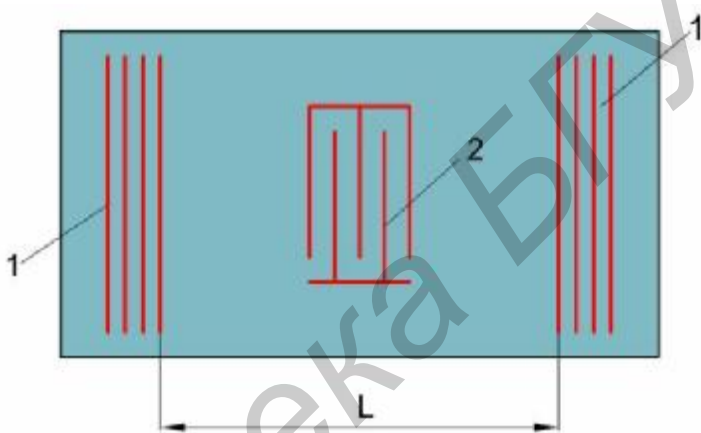


Рис. 16

Добротность реальных резонаторов порядка $10^3 - 10^4$.

Резонаторы на ПАВ можно в небольших пределах перестраивать с помощью изменения нагрузочного импеданса преобразователя. При этом изменяется скорость распространения ПАВ и, следовательно, время распространения волны между отражателями (рис. 17).

Указанным методом можно изменять частоту резонатора в пределах $(1-5) \cdot 10^{-3}$ от резонансной. При серийном производстве резонаторов и при обеспечении технологического разброса толщины металлизации в пределах $\pm 15\%$ обеспечивается воспроизводство резонансной частоты резонаторов с точностью до $0,02\%$.

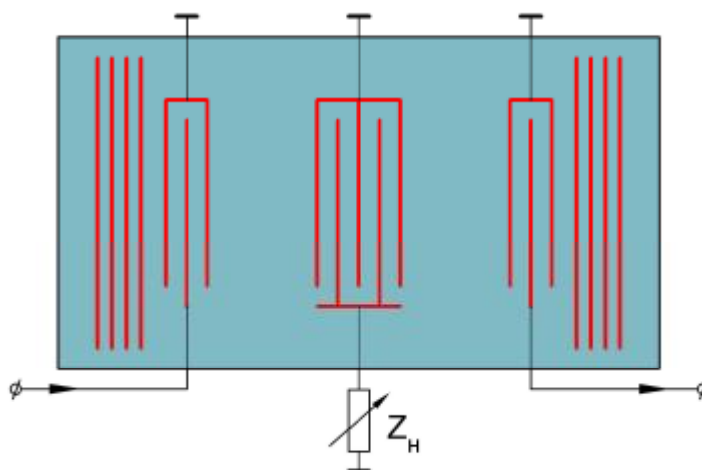


Рис. 17

Временная нестабильность частоты резонаторов для лучших образцов достигает $10^{-6} \Delta f/f_0$ за год. Вносимые потери для двухвходового резонатора составляют 5–8 дБ.

Температурная стабильность таких резонаторов в основном определяется температурной стабильностью материала подложки. С целью улучшения стабильности резонаторов на ПАВ и снижения влияния на неё внешних факторов их помещают в вакуумированные корпуса.

3.3. Фильтры

Фильтры – это наиболее часто используемый в серийной РЭА акусто-электронный элемент. Широкое использование фильтров обусловлено большим диапазоном их рабочих частот, технологичностью, хорошим воспроизводством характеристик и полной интегральностью конструкции.

3.3.1. Конструкция и характеристики фильтров на ПАВ

Простейший фильтр на ПАВ (рис. 18,а) имеет пьезоэлектрическую подложку 1, на которой расположены входной 2 и выходной 3 преобразователи. Создание фильтра на ПАВ с заданной частотной характеристикой $H(f)$ требует реализации четырёхполюсника с импульсным откликом $h(t)$, связанным с характеристикой $H(f)$ обратным преобразованием Фурье:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \exp(j2\pi ft) df.$$

Импульсный отклик всего фильтра есть свёртка импульсных характеристик входного и выходного ВШП. Поэтому удобно один из преобразователей (например входной) делать широкополосным. Тогда второй преобразователь (выходной) должен определять импульсную характеристику всего фильтра, т.е. иметь требуемую АЧХ. Однако такие простейшие фильтры малоэффективны.

Наибольшее распространение получили фильтры симметричной конструкции (рис. 18, б). Выходные преобразователи 3 изготовлены широкополосными и располагаются симметрично относительно входного (узкополосного) преобразователя 2.

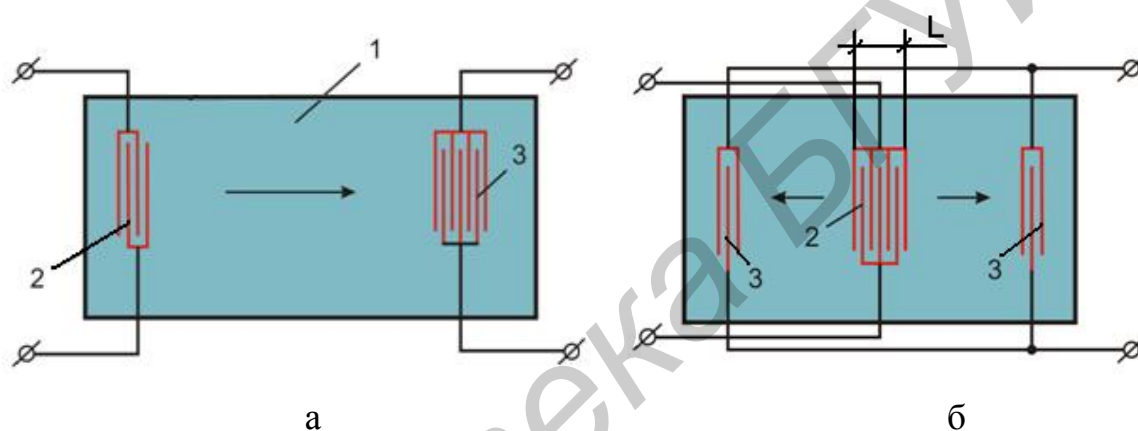


Рис. 18

Такой фильтр даёт выигрыш в коэффициенте передачи за счёт использования обеих акустических волн от входного преобразователя. При этом входной преобразователь должен обеспечить получение нужного импульсного отклика всего фильтра, а также обеспечить согласование фильтра с внешними электрическими цепями. Эти требования существенно усложняют процесс конструирования фильтра, так как входной преобразователь должен выполняться на полную длительность требуемого импульсного отклика фильтра. При этом геометрическая протяжённость входного преобразователя должна быть равна $L = t_1 \cdot v_a$, где t_1 – полная длительность требуемого отклика фильтра. На этой протяжённости обычно требуется разместить большое количество электродов (до нескольких тысяч). Это очень усложняет технологию изготовления фильтра, снижает воспроизводимость его параметров и надёжность всей конструкции. Эти проблемы возрастают с уменьшением полосы пропускания фильтра.

В большинстве случаев от фильтров требуется прямоугольная АХЧ (или близкая к ней с коэффициентом прямоугольности от 1,1 до 1,5). Как следует из формулы для преобразования Фурье, фильтр с прямоугольной характеристикой не реализуем, так как $h(t)$ для этого случая должна иметь бесконечную протяжённость. Уменьшение же протяжённости $h(t)$ приводит к отклонению формы АХЧ от прямоугольной, росту амплитуды боковых лепестков АЧХ и нежелательным пульсациям частотой характеристики фильтра (эффект Гиббса). Существенное уменьшение боковых лепестков и пульсаций при этом можно получить при использовании усечённой $h(t)$, используя метод взвешивания. Этот метод заключается в умножении импульсного отклика на некоторую симметричную, плавно уменьшающуюся к краям интервала ± 1 , так называемую оконную функцию. Хорошие результаты дают функции Хемминга и Кайзера. Значение этих функций вне интервала ± 1 равно нулю. Применение оконных функций позволяет уменьшить уровень боковых лепестков АЧХ, обеспечить высокую концентрацию энергии в полосе пропускания и значительно снизить действие эффекта Гиббса.

Применение метода преобразования Фурье с использованием функций взвешивания носит наименование аподизации импульсной характеристики и позволяет найти удобное аналитическое выражение для формирования топологии преобразователей фильтров на ПАВ.

Фильтры на ПАВ реализуются в широком интервале частот: от десятков мегагерц до единиц гигагерц. Ещё шире диапазон относительной полосы пропускания: от 0,01 до 100 % и более. Средняя величина вносимых фильтром потерь составляет 10 – 20 дБ. Уровень отражённых сигналов не превышает минус 40 дБ. Подавление сигналов за полосой пропускания составляет более 60 дБ. Добротность фильтров достигает 10^4 и более.

3.3.2. Методы реализации аподизованных преобразователей ПАВ

Под аподизованными будем понимать все преобразователи ПАВ, при синтезе частотной характеристики которых используется амплитудная модуляция импульсного отклика. Такие преобразователи широко применяются в большинстве акустоэлектронных элементов: полосовых фильтрах, согласован-

ных фильтрах ЧМ и ФМ сигналов, многофункциональных устройствах.

Практически аподизация осуществляется путём амплитудной модуляции сигналов в каждой паре электродов ВШП. Это позволяет управлять её вкладом в формирование общей АЧХ фильтра.

Аподизация позволяет существенно уменьшить потребное количество электродов ВШП, сократить размер L частото задающего ВШП (рис. 18, б), повысить надёжность фильтра и упростить технологию его изготовления.

Существующие методы реализации аподизации можно разбить на следующие типы:

- аподизация с внутренним (непосредственным) взвешиванием;
- аподизация с внешним взвешиванием;
- аподизация с помощью элементов акустического тракта;
- аподизация со спектральным взвешиванием.

Варианты реализации различных методов аподизации показаны на рис. 19.

На рис. 19, а и 19, б показан метод аподизации путём изменения степени перекрытия штырей. Изменение перекрытия может быть симметричным и несимметричным. Закон изменения перекрытия определяется конфигурацией импульсного отклика. Так как вклад каждой пары электродов в формирование общей АЧХ фильтра определяется степенью их перекрытия, то, изменяя его, можно формировать требуемый импульсный отклик и, следовательно, требуемую АЧХ. Основным недостатком этого метода аподизации является увеличение дифракции ПАВ от участков с малым перекрытием штырей и фазовые искажения фронта ПАВ из-за неравномерной металлизации звукопровода.

В других вариантах преобразователей аподизация осуществляется путём взвешивания сигналов, питающих электроды. Для этой цели в преобразователе, показанном на рис. 19, в, использованы ёмкостные делители в основании штырей. При этом сборная шина 1 ВШП покрывается плёнкой диэлектрика 2, на которую наносятся металлизации основания штырей 3.

Таким образом, металлизации 3 со сборной шиной 1 образуют конденсаторы, ёмкость которых определяется размерами металлизаций 3. Следовательно, изменяя размеры металлизаций по определённому закону, можно изменять ёмкость конденсаторов и величину сигналов, поступающих через соответст-

вуюющую емкость на электрод. На рис. 19, г показан вариант реализации внешнего взвешивания путём включения в каждый ВШП резистивной плёнки 1.

Изменяя длину этой плёнки по требуемому закону, можно формировать необходимое значение сигнала для питания каждого электрода.

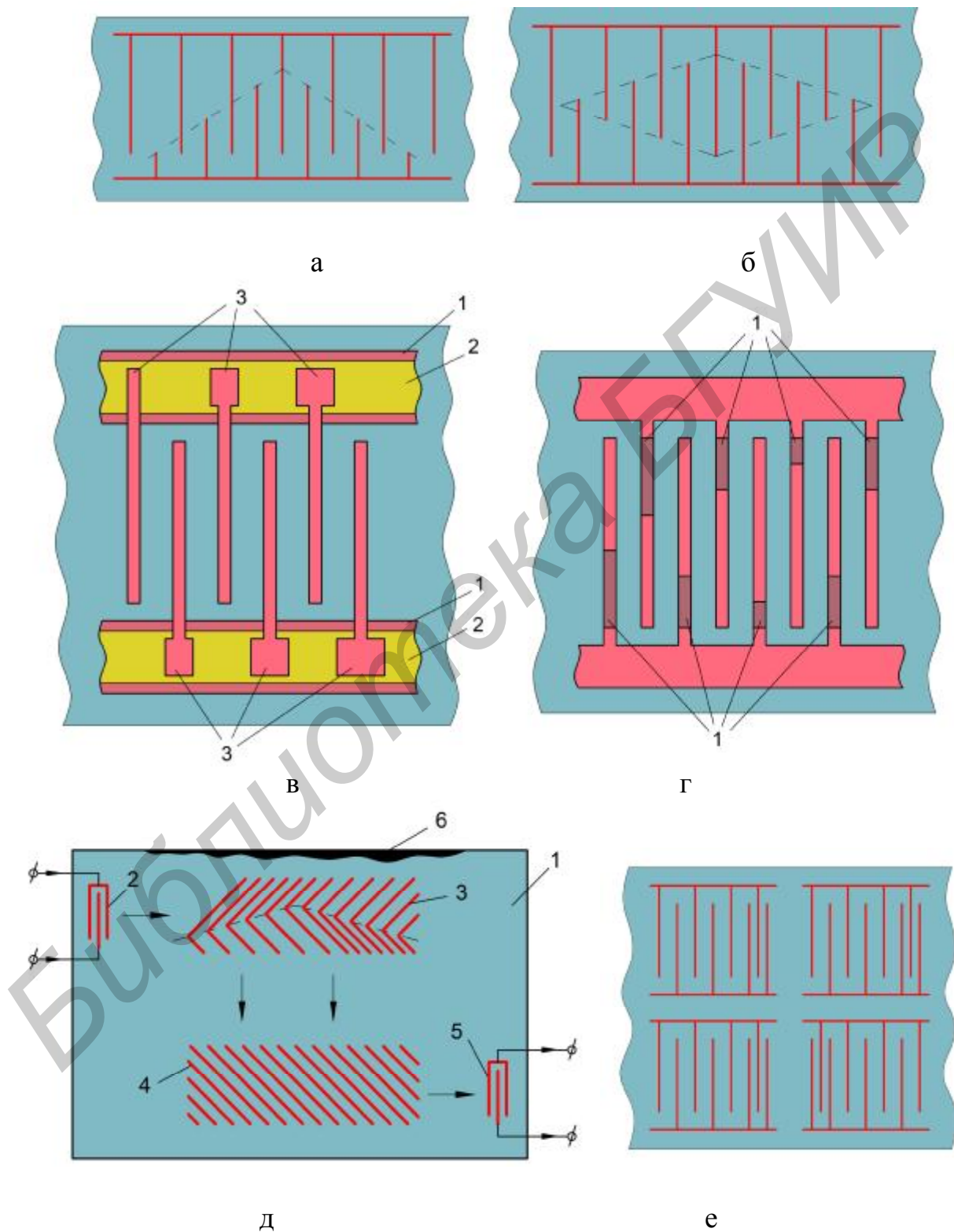


Рис. 19

Возможны и другие варианты метода внешнего взвешивания. Конструкция преобразователей с внешним взвешиванием остаётся интегральной, однако усложняется технология их изготовления.

Значительно расширить частотный диапазон при внешнем взвешивании позволяет разбиение электродов аподизованного преобразователя на группы с равным весом и их взвешивание с помощью ёмкостного делителя. Однако в этом случае огибающая импульсного отклика имеет ступенчатую форму, поэтому надо учитывать влияние модуляции огибающей на форму частотных и фазовых характеристик.

На рис. 19, д показан вариант аподизации с использованием элементов волноводного тракта (в данном случае – с использованием отражателей). Входной сигнал ПАВ от преобразователя 2 попадает на отражающую структуру 3, отражается от неё на отражающую структуру 4 и поступает в выходной преобразователь 5. Так как отражающей структуре 3 придана форма в соответствии с требуемым импульсным откликом, то вклад каждого элемента структуры 3 будет пропорционален его длине. Следовательно, отражённый сигнал будет аподизован. Часть сигнала отражается структурой 3 вверх и уничтожается в поглотителе 6. Выходной преобразователь 5 освобождается от функции формирования требуемой АЧХ и сохраняет только функцию согласования с внешними цепями.

Для реализации метода спектрального взвешивания используются неэквидистантные преобразователи с последовательным или встречным расположением преобразователей (рис. 19, е).

3.3.3. Уменьшение паразитных сигналов

Существуют следующие причины возникновения паразитных сигналов:

- прямая связь между входным и выходным преобразователями;
- отражение сигналов и объёмные волны;
- температурная нестабильность;
- технологический разброс размеров элементов, возникающий при изготовлении фильтров.

Прямое прохождение сигнала от входного преобразователя к выходному обусловлено наличием электромагнитной и электростатической связи между ними. Возможны два механизма такой связи:

- излучение электромагнитной энергии входным ВШП;
- передача энергии входного сигнала через проходную ёмкость и взаимную индуктивность элементов фильтра.

Если длина электромагнитной волны значительно больше геометрических размеров элементов на ПАВ, то излучаемая входным преобразователем электромагнитная энергия может не учитываться, а от влияния внешних наводок фильтр обычно экранирован его металлическим корпусом.

Исследования показали, что проникновение прямого сигнала через паразитную взаимную ёмкость значительно больше, чем через взаимную индуктивность. Это явление вызывает пульсации АХЧ фильтров с частотой $f = 1/t_{\text{зад}}$ ($t_{\text{зад}}$ – время задержки сигнала фильтром).

Для уменьшения проникновения прямого сигнала сразу в выходную цепь применяют:

- экраны, представляющие собой металлизированные плёнки, нанесённые на подложку между входным и выходным преобразователями;
- заземлённые металлизированные канавки, расположенные с обратной стороны подложки;
- ортогонально расположенные входной и выходной преобразователи.

Отражение сигналов ПАВ возникает от любой неоднородности, встречающейся на их пути (края подложки, структурные неоднородности, металлизация и т.п.). Так, в конструкциях с двумя преобразователями уровень отражённого сигнала составляет около минус 6 дБ от основного.

Разработано большое число конструктивных решений, снижающих влияние отражённых сигналов. Однако в большинстве случаев такие решения связаны с дополнительными потерями полезного сигнала.

Положительный эффект для снижения уровня отражённого сигнала дают следующие меры:

- поворот входных и выходных преобразователей относительно падающей волны на угол в несколько градусов;
- применение подложек с закруглёнными торцами 1, позволяющими ПАВ распространяться, огибая торцы, на обратную сторону подложки, где размещается поглощающее покрытие 3 (рис. 20, а);

– применение дополнительного преобразователя 1 для компенсации отражённых сигналов в выходном преобразователе (рис. 20, б).

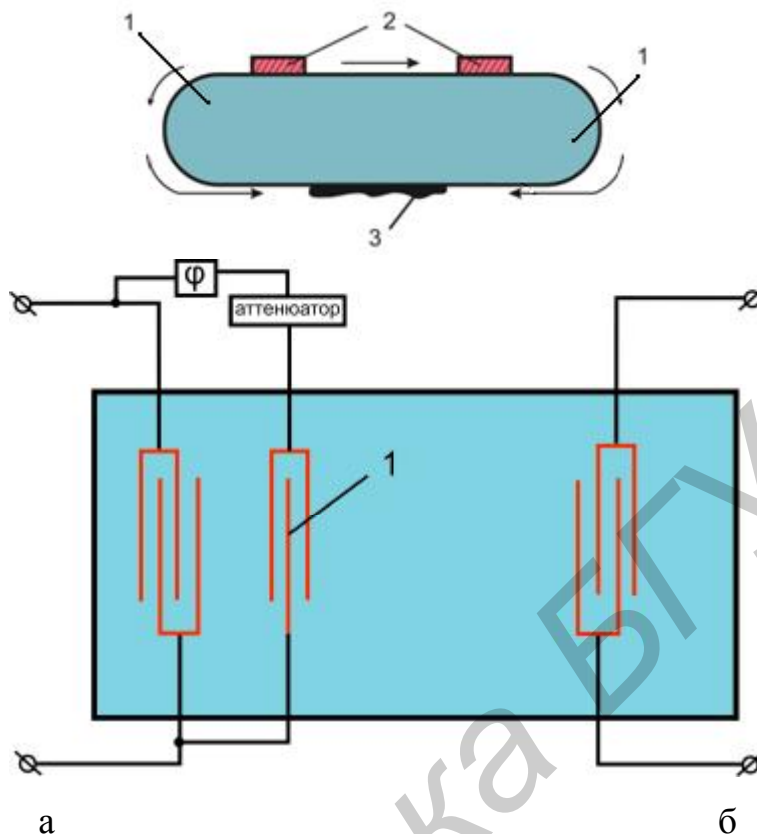


Рис. 20

Искажения выходного сигнала могут вызвать объёмные волны, возбуждающиеся совместно с ПАВ. В настоящее время разработан ряд решений, позволяющих существенно уменьшить влияние объёмных волн. На рис. 21, а показана конструкция элемента, имеющего подложку 1 полуэллиптической формы. В одном фокусе подложки расположен входной преобразователь 2, а во втором – поглощающее покрытие 3.

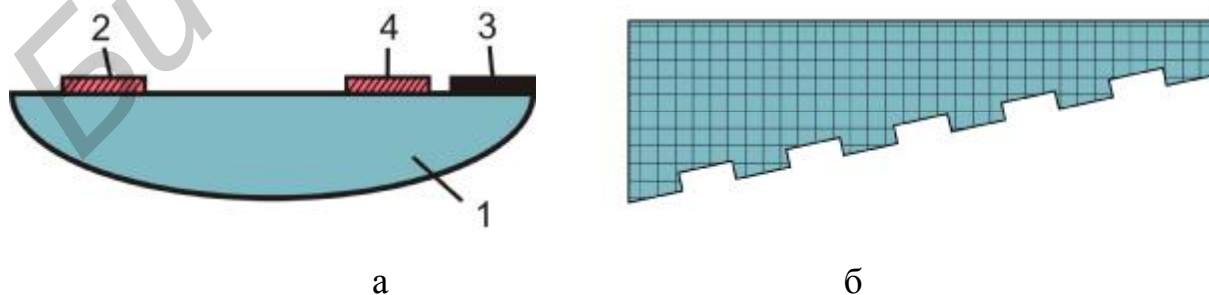


Рис. 21

Выходной преобразователь 4 смещён относительно второго фокуса. В результате этого возбуждаемые объёмные волны, отражаясь от нижней части подложки, попадают на поглотитель. Часть непоглощённых волн, отражаясь, опять попадает на входной преобразователь. Такая циркуляция объёмных волн не сказывается на сигнале, возникающем в выходном преобразователе.

В варианте конструкции (рис. 21, б) объёмные волны из-за среза нижней части подложки и нанесённому на неё растру рассеиваются и поглощаются в материале подложки. Угол среза подложки составляет $7 - 10^\circ$. Растр на обратной стороне подложки наносится под углом 45° к продольной оси. Такая структура обеспечивает подавление объёмных волн до 45 дБ.

Всё более широкое использование узкополосных акустоэлектронных элементов требует принятия мер, обеспечивающих их высокую термостабильность. Это требует подбора специальных материалов и выбора соответствующих кристаллографических срезов, имеющих минимальные температурные нестабильности. Наиболее многообещающие результаты получены на слоистых структурах «окись кремния – танталат лития». Для таких структур получен температурный коэффициент $(3-4) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Так как основная энергия ПАВ сосредоточена в поверхностном слое толщиной порядка λ_a , то это ограничивает максимальный уровень передаваемой энергии ПАВ величиной $10^{-1} - 10^{-2}$ Вт/мм во избежание дополнительных потерь и искажений характеристик элементов из-за проявления нелинейных свойств материала.

Характеристики акустоэлектронных элементов весьма чувствительны к таким погрешностям технологии, как нарушение структуры материала подложки, флуктуация размеров электродов и их толщины, обрыв и закорачивание электродов и др. Так как конфигурация электродов ВШП однозначно определяет его АЧХ, то отклонения в геометрии электродов, их обрыв или закорачивание влияют на воспроизводимость параметров и частотные свойства ВШП, приводят к росту уровня отражённых сигналов и локальное изменение скорости ПАВ. Точный учёт паразитных сигналов и взаимовлияний представляет очень сложную задачу и не имеет точного аналитического решения.

3.4. Акустические трансформаторы

Как уже ранее отмечалось, согласование акустоэлектронного элемента с внешней электрической цепью обеспечивается входным и выходным преобразователями. Такое согласование возможно в определённой области изменений согласуемых сопротивлений. Однако возможности изменения апертуры преобразователей ограничены, что ограничивает и возможности для изменения активного сопротивления входного или выходного преобразователей. Для изменения активного входного и выходного сопротивления акустоэлектронного элемента в более широких пределах применяют акустические трансформаторы.

Такие трансформаторы представляют собой акустоэлектронные устройства, содержащие на входе и выходе цепочки последовательно, параллельно и комбинированно включённых преобразователей (рис.22, а).

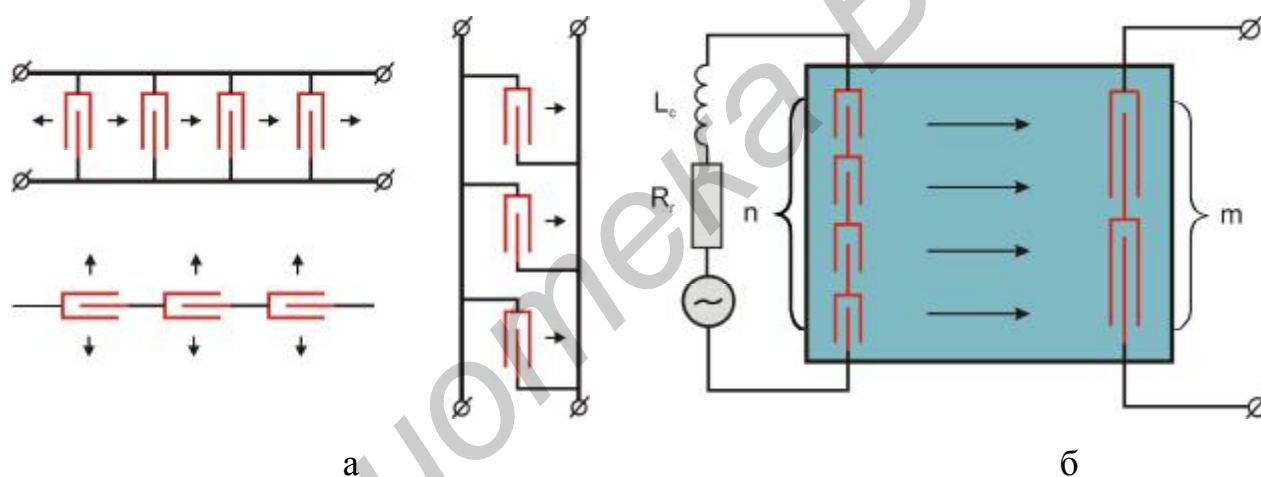


Рис. 22

Благодаря такому соединению парциальных преобразователей можно в значительных пределах изменять активную составляющую сопротивления излучения таких цепочек на резонансной частоте преобразователей. Коэффициент трансформации сопротивления устройством, показанным на рис. 22, б, равен $K_R = (n/m)^2$.

Обычно конструкция акустических трансформаторов позволяет разместить на подложке до тридцати параллельно включённых парциальных преобразователей и ещё большее количество последовательно соединённых. При этом достижимы коэффициенты трансформации сопротивления до 100 и более.

3.5. Разветвители и сумматоры сигналов

Разветвители и сумматоры сигналов – это многоканальные акустоэлектронные устройства, позволяющие осуществить разветвление или объединение мощности сигнала ПАВ. Их конструкция подобна конструкции акустического трансформатора: на входе и выходе имеются цепочки парциальных преобразователей в соответствии с числом каналов объединения или разветвления.

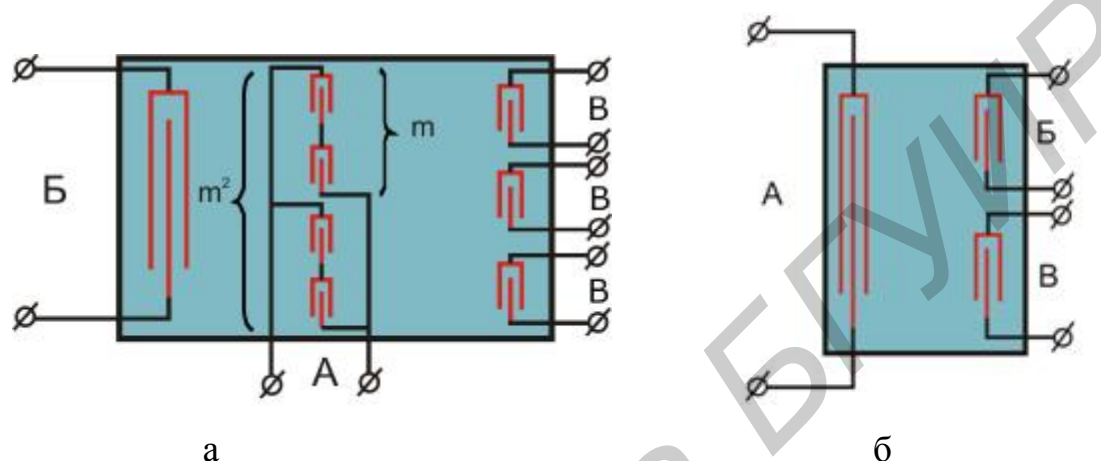


Рис. 23

Рассмотрим конструкцию, изображенную на рис. 23, а. Входной преобразователь А содержит m^2 парциальных секций ВШП. Секционирование входного преобразователя необходимо для того, чтобы согласовать сопротивление электрического тракта сигнала с сопротивлением акустического тракта. Для этого общее входное сопротивление преобразователя должно равняться сопротивлению любого из m^2 парциальных выходных преобразователей. Равенство этих сопротивлений обеспечивается смешанным электрическим соединением секций парциальных преобразователей. При равенстве апертур секций входного преобразователя апертуре каждого из выходных соблюдается условие согласования электрических сопротивлений. Симметричное расположение выходных преобразователей (Б и В) относительно входного снижает потери энергии ПАВ приблизительно на 3дБ. Такие устройства обратимы, т.е. могут работать как разветвители, так и сумматоры. Так, если А – входной преобразователь, а Б и В – выходные преобразователи, то рис. 23, б соответствует разветвлению сигнала. Если же входными преобразователями являются преобразователи Б и В, а выходным преобразователем А, то это уже сумматор.

3.6. Акустические фазовращатели

К настоящему времени разработаны фазовращатели с плавным и дискретным изменением фазы выходного сигнала (рис. 24).

На рис. 24, а представлено устройство, а на рис. 24, б – эквивалентная схема («векторного») фазовращателя с плавным изменением фазы. Входной преобразователь 1 двухсекционный. По отношению к входному сигналу $U(t)$ секции этого преобразователя включены параллельно, но с некоторым пространственным сдвигом, равным части λ_a .

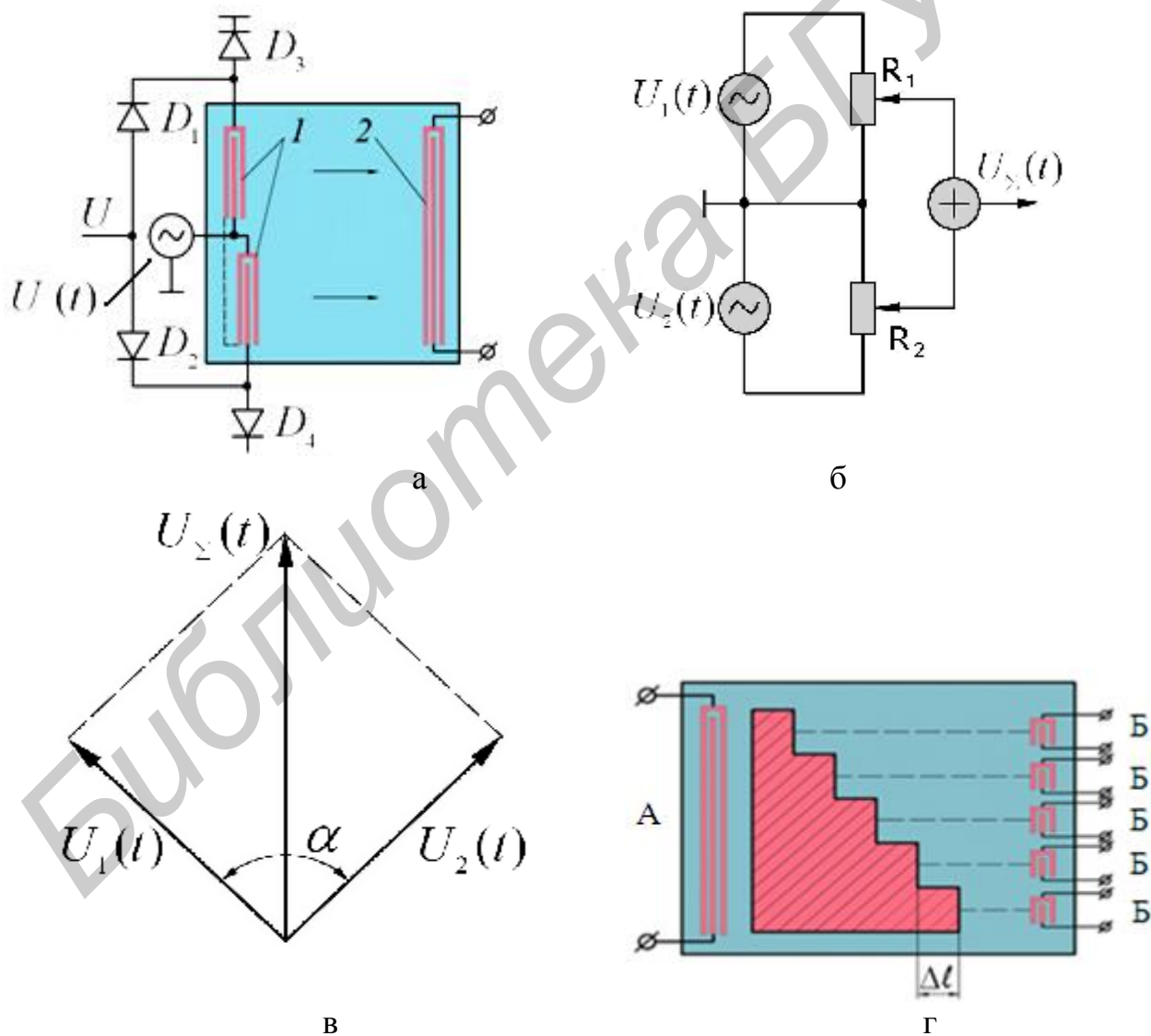


Рис. 24

Выходной преобразователь 2 расположен в общем акустическом потоке обеих секций. Излучаемый входным преобразователем сигнал состоит из двух потоков ПАВ, сдвинутых по фазе между собой на угол α , как показано на рис. 24, в. Включённые последовательно в цепь каждой секции входного преобразователя диоды $D_1 - D_4$ совместно с сопротивлением излучения секций входного ВШП образуют резистивные делители (R_1 и R_2 на рис. 24, б).

Величина сопротивлений R_1 и R_2 варьируется путём изменения смещения на диодах. В результате этого происходит перераспределение энергии входного сигнала между секциями (рис. 24, б), что приводит к изменению положения вектора суммарного сигнала на выходе (рис. 24, в). Оптимальное значение угла α , не приводящее к существенному изменению амплитуды выходного сигнала, составляет обычно от 90 до 120°.

На рис. 24, г показан фазовращатель с дискретным изменением фазы выходного сигнала. Его основу составляет многоступенчатая (с шагом $\Delta\ell$) металлизация, расположенная между входными А и выходными Б преобразователями. Число ступеней металлизации и их ширина соответствуют числу и апертуре выходных преобразователей. В основу работы такого фазовращателя положено изменение скорости распространения ПАВ под металлизированной поверхностью (её уменьшение) по сравнению со свободной поверхностью. Длина парциального участка $\Delta\ell$ определяет дискрет изменения фазы: $\Delta Y = (2\pi\Delta\ell/\lambda_a)(\Delta v/v_a)$. Выбирая размеры шагов $\Delta\ell$, можно получить требуемое изменение фазы выходного сигнала.

3.7. Акустические аттенюаторы

Акустические аттенюаторы служат для того, чтобы наряду с операцией разветвления или суммирования изменять определённым образом амплитуду парциальных канальных сигналов. Конструкция одного из аттенюаторов показана на рис. 25.

Входной преобразователь 1 имеет апертуру, равную суммарной апертуре парциальных выходных преобразователей 3. Между входным и выходными

преобразователями в парциальных акустических потоках ПАВ располагаются фрагменты металлизаций 2.

Протяжённости металлизаций в направлении фронта ПАВ одинаковы, а в направлении распространения ПАВ – различны. Для пояснения работы этого аттенюатора обратимся к рис. 26.

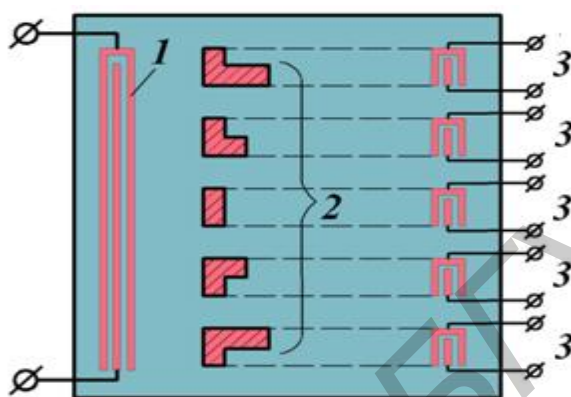


Рис. 25

Очевидно, что в каждом парциальном канале имеется два полупотока ПАВ с фазами, определяемыми длиной металлизации в данном полупотоке. Представим эти полупотоки ПАВ в виде разных по величине векторов U_1 и U_2 с определённым фазовым сдвигом между ними.

При суммировании этих полупотоков в выходном преобразователе амплитуда суммарного сигнала будет определяться относительным фазовым сдвигом полупотоков ПАВ. Уменьшая разность протяженности металлизаций в полупотоках (при $\Delta Y < \pi$), получим увеличение амплитуды выходного сигнала (рис. 26, а и 26, б). При равной протяжённости металлизаций (рис. 26, в) суммарный сигнал максимален и равен $2U_1$. Дальнейшее изменение длин металлизаций в полупотоках приводит к изменению фазового сдвига между ПАВ в верхних и нижних полупотоках и уменьшению суммарного выходного сигнала (рис. 26, г и 26, д).

Недостатком такого аттенюатора является то, что его коэффициент передачи зависит от частоты сигнала.

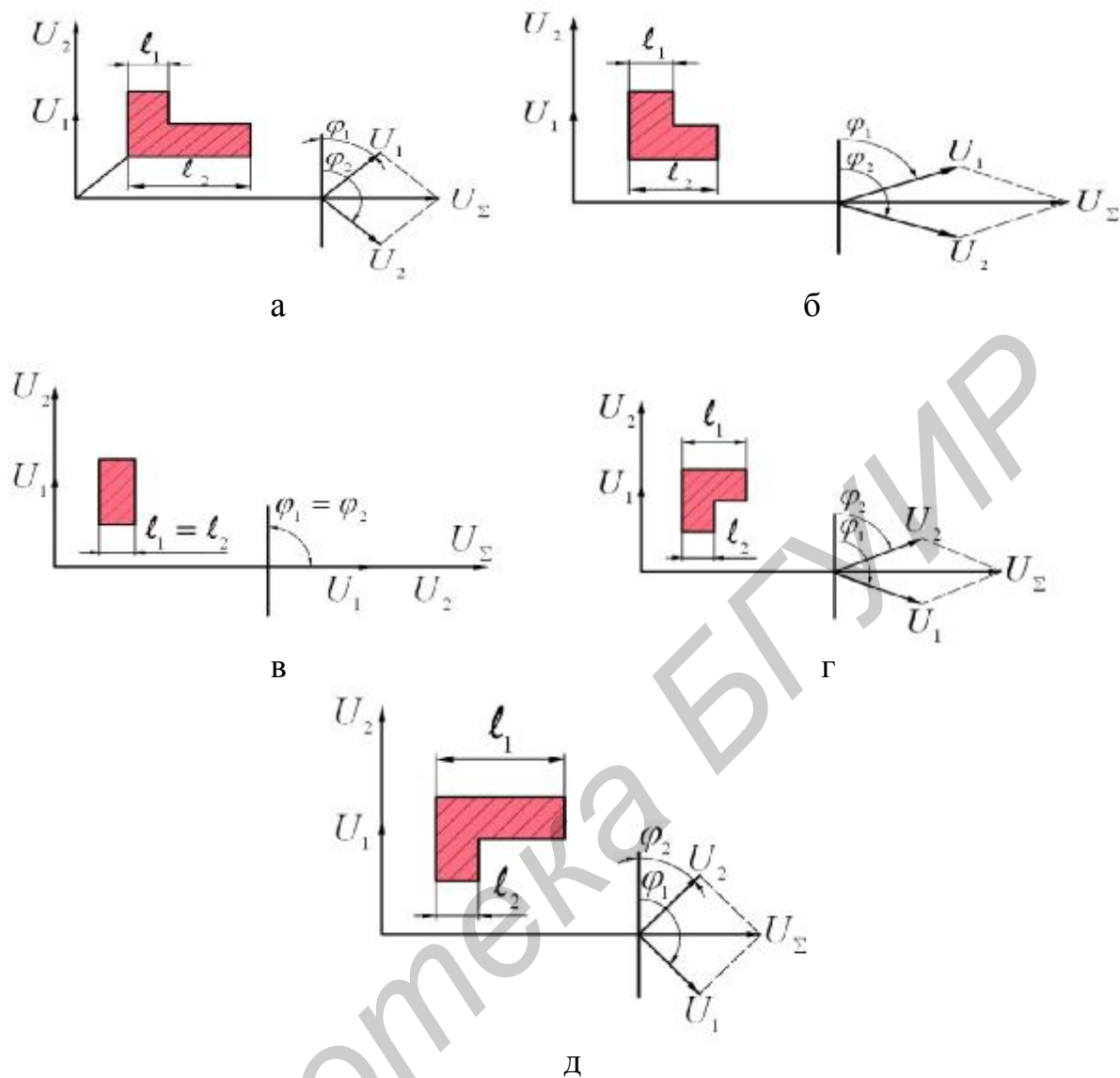


Рис. 26

В заключение следует отметить, что представленное на рис. 25 устройство является универсальным акустоэлектронным элементом. Это устройство позволяет осуществить очень важную для обработки сигналов операцию: разветвление или суммирование сигналов с одновременным их амплитудным взвешиванием и фазированием. Такое устройство является основой построения сложных многофункциональных акустоэлектронных элементов.

4. СЛОЖНЫЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ПАВ

К сложным акустоэлектронным элементам на ПАВ относятся усилители и генераторы, различного рода согласованные и адаптивные фильтры, устройства свёртки сигнала, устройства памяти и многие другие.

Рассмотрим наиболее распространённые активные элементы на ПАВ.

4.1. Усилители на ПАВ

Для правильного понимания устройства и функционирования усилителей на ПАВ необходимо напомнить основные акустоэлектрические эффекты в пьезокристаллах.

Акустическая волна, распространяющаяся в пьезоэлектрическом звукопроводе, обусловлена деформацией материала. Деформация в свою очередь порождает электрическое поле, сопровождающее ПАВ. Следовательно, распространяющаяся ПАВ жёстко связана с сопровождающим её электрическим полем. Наиболее существенным механизмом связи этих эффектов (на частотах до 10^8 – 10^{11} Гц) является пьезоэффект. Электрическое поле ПАВ существует не только в объёме пьезоэлектрика, но и вне его. Опираясь на эти основные положения, нетрудно представить решение задачи усиления ПАВ: надо обеспечить обмен энергией между свободными носителями заряда и электрической волной ПАВ.

Пусть создаётся внешнее электрическое поле напряжённостью E_0 такого направления, что свободные носители заряда движутся в направлении распространения ПАВ. Так как скорость дрейфа носителей $v_{др} = \mu E_0$, то при взаимодействии с электрической волной ПАВ возможны три случая:

– $v_{др} < v_a$, то есть носители заряда «отстают» от распространяющейся ПАВ и происходит передача энергии от ПАВ к носителям заряда: энергия ПАВ уменьшается;

– $v_{др} = v_a$, то есть носители заряда двигаются с той же скоростью, что и ПАВ, ПАВ и носители заряда относительно неподвижны: энергия ПАВ не изменяется;

– $v_{др} > v_a$, то есть носители заряда «опережают» ПАВ: энергия ПАВ возрастает.

На рис. 27 показана зависимость энергообмена от величины электрического поля E_0 (поглощение или усиление энергии потока ПАВ).

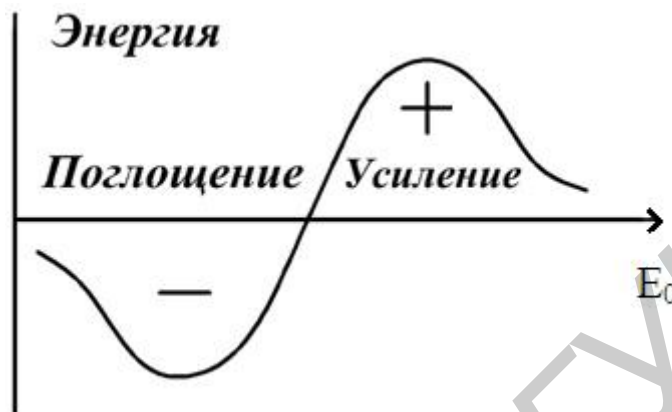


Рис. 27

Величина поглощения и усиления зависит от частоты, что обусловлено инерционностью создания и рассасывания объёмного заряда. Для изменения объёмного заряда в e раз необходимо время $\sigma_m = E_0/\sigma_0$, где σ_0 — удельная электропроводность материала со свободными носителями зарядами. Для того, чтобы объёмный заряд не экранировал электрическое поле ПАВ, необходимо, чтобы $\omega > \omega_0 = \sigma_0/E_0$. Для уменьшения влияния диффузионных потоков на распределение носителей заряда необходимо, чтобы $\omega < \omega_d = v_a^2/D$, где D — коэффициент диффузии свободных носителей. Поэтому рабочие частоты, используемые для усиления, должны удовлетворять условиям $\omega < \omega_d$ и $\omega_0 < \omega_d$.

Для создания усилителей на ПАВ часто используют слоистую структуру, состоящую из полупроводника и пьезоэлектрика. В пьезоэлектрике распространяется ПАВ, а в полупроводнике под действием поля E_0 движутся свободные носители заряда. При выполнении условия $v_{др} > v_a$ в такой системе будет иметь место увеличение энергии ПАВ. Эффект усиления будет иметь место как при наличии воздушного зазора между полупроводником и пьезоэлектриком, так и без него. На рис. 28 показаны различные варианты исполнения усилителей ПАВ.

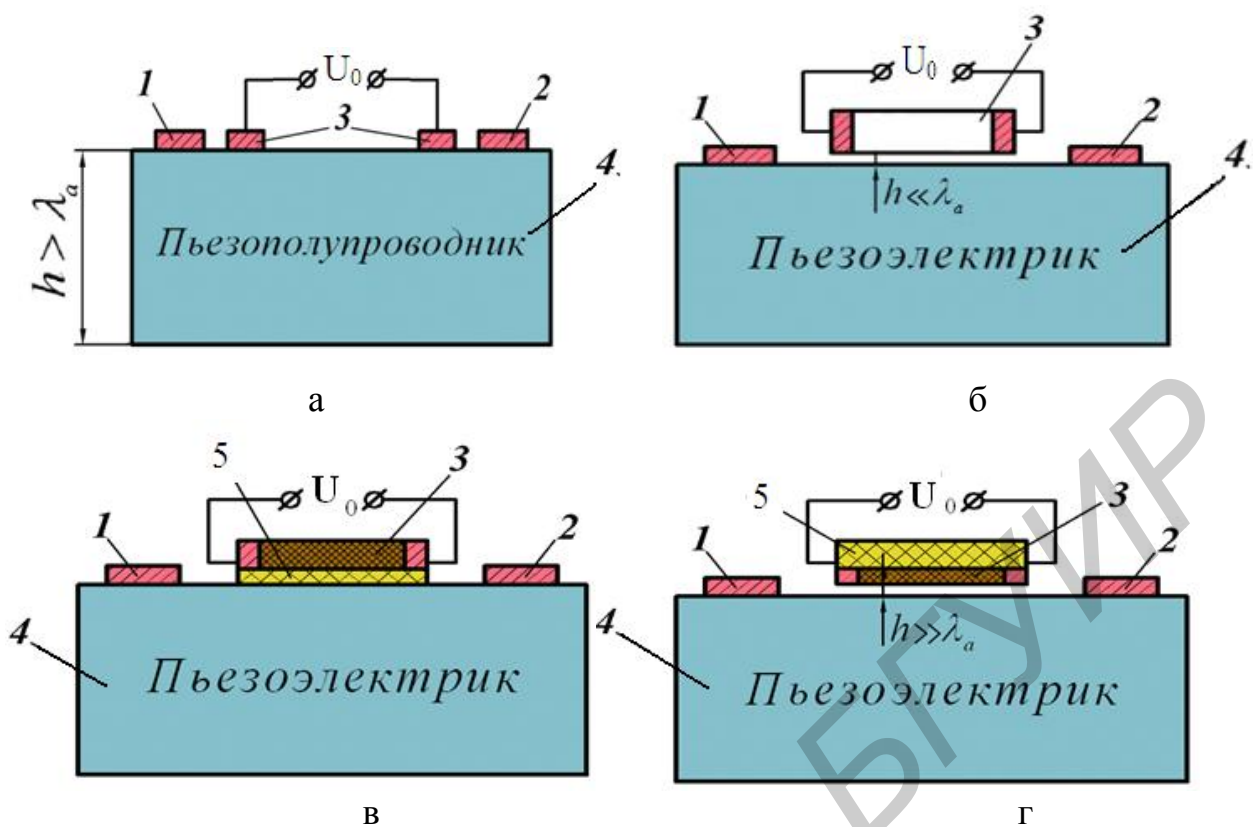


Рис. 28

На рис. 28, а изображена монолитная конструкция усилителя. В качестве звукопровода и подложки одновременно использован пьезополупроводник 4. В нём распространяются и свободные носители заряда, и ПАВ. Усилитель имеет входной преобразователь 1, выходной преобразователь 2 и электроды 3 для формирования поля E_0 .

На рис. 28, б между полупроводником 3 и подложкой 4 имеется воздушный зазор величиной $h \ll \lambda_a$. Поле E_0 создается только в полупроводнике. Обмен энергией осуществляется через воздушный зазор.

Усилитель, изображенный на рис. 28, в, отличается от предыдущего тем, что полупроводник 3 нанесён в виде плёнки на самостоятельную подложку 5. В усилителе, изображенном на рис. 28, г, на поверхность пьезоэлектрика 4 нанесена тонкая плёнка 5, выполняющая роль зазора, а на ней расположен полупроводник 3, в котором и создается поле E_0 .

Усилители на ПАВ широко используются в многофункциональных устройствах обработки сигналов, а также для компенсации затухания в ЛЗ с длинной траекторией распространения ПАВ.

4.2. Генераторы на ПАВ

В зависимости от вида используемого частотнозадающего элемента различают генераторы с резонаторами на ПАВ и генераторы с линиями задержки на ПАВ.

4.2.1. Генераторы с резонатором на ПАВ

На рис. 29 показано устройство генератора на ПАВ с использованием резонатора. Такой генератор состоит из усилительного элемента 1, фазосдвигающей цепи 2, согласующей цепи 3 и резонатора, состоящего из ВШП 4 и двух отражательных структур 5.

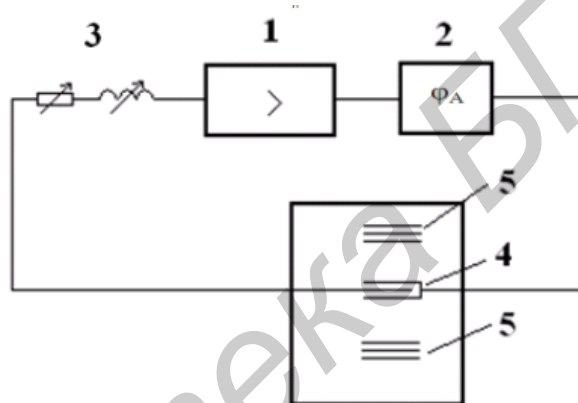


Рис. 29

Для удобства согласования с нагрузкой и для развязки генератора на выходе генератора ставят развязывающий усилитель. Согласующая цепь 3 обеспечивает компенсацию статической ёмкости ВШП на частоте резонанса, что приводит к снижению потерь в резонаторе. Чаще всего это индуктивности, образующие с емкостью преобразователя последовательный резонансный контур. Фазосдвигающая цепь 2 осуществляет необходимый фазовый сдвиг и управление частотой генерации. Для возбуждения генератора необходимо выполнить уравнение баланса фаз

$$\varphi_{ПАВ} + \varphi_A = 2\pi n$$

и уравнение баланса амплитуд

$$K_0 \cdot K_{УС}(j\omega) \cdot K_{ПАВ}(\omega) = 1,$$

где K_0 – коэффициент усиления, равный произведению коэффициентов переда-

чи усилителя и резонатора на ПАВ; $\varphi_{ПАВ}$ – фазовый сдвиг в резонаторе на ПАВ; φ_A – фазовый сдвиг в усилителе и фазосдвигающей цепи; n – целое число.

Диапазон генерируемых частот таких генераторов приблизительно равен ширине полосы пропускания резонатора на ПАВ. Максимальная перестройка составляет 10^{-3} от f_0 . Температурная стабильность не хуже $10^{-6} \Delta f/f_0$ в интервале температур от минус 60 до плюс 60°C.

Генераторы на ПАВ значительно меньше по габаритам, чем генераторы на кварцевых резонаторах. Они потребляют мощность примерно в пять раз меньшую, чем генераторы на кварцевых резонаторах.

4.2.2. Генераторы с линией задержки на ПАВ

Устройство генератора с ЛЗ на ПАВ в качестве частото задающего элемента показано на рис. 30. Такой генератор состоит из усилительного устройства 1 и ЛЗ 2, согласующих цепей 3 и 4 и фазосдвигающей цепи 5. При выполнении амплитудного условия возбуждения фазовые условия самовозбуждения имеют вид $2\pi n = \omega L/U_a + Y_A$, где ω – частота генерации, L – расстояние между центрами ВШП ЛЗ; Y_A – суммарный фазовый сдвиг в усилителе и фазосдвигающей цепи.

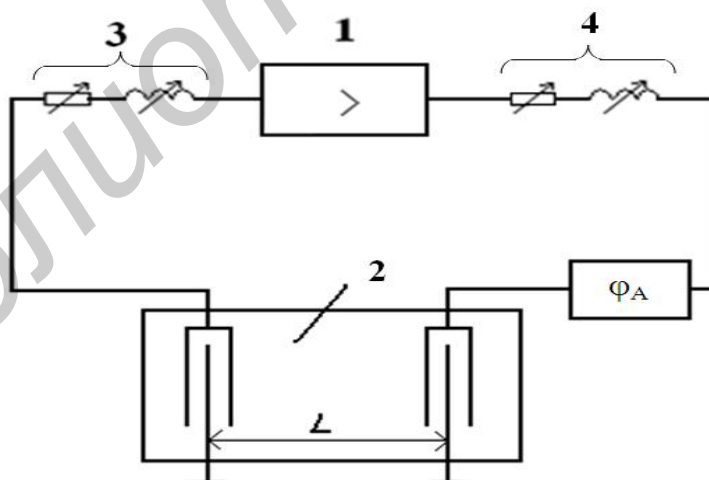


Рис. 30

При достаточно большой величине L значением Y_A можно пренебречь, тогда $\omega = (2\pi v_a/L) \cdot n = \delta \cdot n$. Следовательно, возможные частоты возбуждения образуют гребенчатый спектр с интервалом между частотами $\delta = 2\pi v_a/L$.

Частотная характеристика неаподизованного эквидистантного встречно-штыревого преобразователя ЛЗ имеет вид $\sin X/X$, где $X = N(\omega - \omega_0)/\omega_0$. Нули частотной характеристики соответствуют значениям $X = N\pi(\omega - \omega_0)/\omega_0$. Частотный интервал $\Delta\omega$ между нулями $\Delta\omega = \omega_0/N$. При этом для одночастотного возбуждения необходимо совместить центральную частоту АЧХ преобразователя ω_0 с одной из частот гребенчатого спектра, остальные частоты гребенчатого спектра должны совпадать с нулями АЧХ преобразователя.

Температурная и временная стабильности генераторов на ПАВ не уступают генераторам с кварцевой стабилизацией. На ПАВ могут быть построены генераторы со скачкообразной перестройкой частоты и импульсные генераторы. Влияние внешних факторов на стабильность частоты генераторов на ПАВ может быть использовано для создания разнообразнейших датчиков: давления, температуры, массы и др.

Учебное издание

**Волчѣк Светлана Анатольевна
Петрович Владимир Алексеевич**

АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА

Методическое пособие
по дисциплине «Приборы на квантовых, оптических, магнитных
эффектах и сенсорные устройства»
для студентов специальности
1-41 01 02 «Микро- и наноэлектронные технологии и системы»
всех форм обучения

В авторской редакции
Корректор Е. Н. Батурчик

Подписано в печать.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 3,0.

Формат 60×84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 100 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 124.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6