

34. Гуляев Ю В и др. *ФТП* **5** 80 (1971)
35. Гуляев Ю В и др. *ФТТ* **12** 2595 (1970)
36. Ковалев А В, Яковкин И Б *Радиотехника и электроника* **16** 1321 (1971)
37. Tancrrell R H, Holland M G *Proc. IEEE* **59** 393 (1971)
38. Marshall F G, Newton C O, Paige E G S *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **SU-20** 124 (1973); *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-21* 206 (1973)
39. Гуляев Ю В, Кмита А М, Багдасарян А С *Письма в ЖТФ* **5** (1) 1 (1979); Патенты: СССР № 726648; США № 4162415, № 4185218; Великобритании № 2003353; Японии № 1069686; Франции № 7821723, № 8020674; Германии № 2831584, № 2831585
40. Malocha D C, Hunsinger B J *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **SU-24** 293 (1977)
41. Каринский С С *Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах* (М.: Сов. радио, 1975)
42. Речицкий В И *Акустоэлектронные радиокомпоненты* (М.: Сов. радио, 1980)
43. Викторов И А *Звуковые поверхностные волны в твердых телах* (М.: Наука, 1981)
44. Морозов А И, Проклов В В, Станковский Б А *Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств* (М.: Радио и связь, 1981)
45. *Поверхностные акустические волны* (Под ред. А А Олинера) (М.: Мир, 1981)
46. *Фильтры на поверхностных акустических волнах. Расчет, технология и применение* (Под ред. Г Мэттьюза) (М.: Радио и связь, 1981)
47. Дьелесан Э, Руайе Д *Упругие волны в твердых телах: применение для обработки сигналов* (М.: Наука, 1982)
48. Орлов В С, Бондаренко В С *Фильтры на поверхностных акустических волнах* (М.: Радио и связь, 1984)
49. Бирюков С В и др. *Поверхностные акустические волны в неоднородных средах* (М.: Наука, 1991)
50. Ash E A, in *IEEE Symp. MTT, Boston, May 1967*
51. White D L, in *Proc. IEEE Ultrason. Symp., Vancouver, Oct. 1967*
52. Bleustein J L *Appl. Phys. Lett.* **13** 412 (1968)
53. Гуляев Ю В *Письма в ЖЭТФ* **9** 63 (1969)
54. Gulyaev Y V *Trans. IEEE Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control UFFC-45* 935 (1998)
55. Koerber G, Vogel R *IEEE Trans. Sonics Ultrasonics* **19** 3 (1972)
56. Каганов М И, Шкловская С *ФТТ* **8** 2789 (1966)
57. Maerfeld C, Gires F, Tournois P *Appl. Phys. Lett.* **18** 269 (1970)
58. Морозов А И, Земляничин М А *Письма в ЖЭТФ* **12** 396 (1970)
59. Auld B A, Gagnepain J J, Tan M *Electron. Lett.* **2** 650 (1976)
60. Гуляев Ю В, Плесский В П *Письма в ЖТФ* **3** 220 (1977)
61. Ingebrigtsen K A J. *Appl. Phys.* **40** 2681 (1969)
62. Ash E A, in *IEEE Symp. MTT, Newport Beach, 1970*
63. Svaasand L O *Appl. Phys. Lett.* **15** 300 (1969)
64. Luukkala M, Kino G S *Appl. Phys. Lett.* **18** 393 (1971)
65. Ljajnov V E, Hsu T-H, White R M J. *Appl. Phys.* **43** 800 (1972)
66. Кмита А М, Медведь А В *Письма в ЖЭТФ* **14** 455 (1971); Кмита А М, Медведь А В J. *Appl. Phys.* **44** 3034 (1973)
67. Das P, Araghi M N, Wang W C *Appl. Phys. Lett.* **21** 152 (1972)
68. Boritko S V, in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 39
69. Проклов В В и др. *Радиотехника и электроника* **48** 1093 (2003)
70. Morgan D, in *IEEE Intern. Frequency Control Symp., Pasadena, May 1988*
71. Hickernell F S, Sakiotis N G *Proc. IEEE* **52** 194 (1964)
72. Wasilik J H, Hickernell F S *Appl. Phys. Lett.* **24** 153 (1974)
73. Hickernell F S *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **10** 603 (2000)
74. Hickernell F S, Hickernell T S *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control UFFC-42* 410 (1995)
75. Slobodnik A J, Delmonico R T, Conway E D *Microwave Acoustics Handbook* (Bedford, Mass.: US Air Force Cambridge Res. Lab., 1970)
76. Иванов С Н и др. *ФТТ* **19** 308 (1977); Ivanov S N *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency UFFC-39* 653 (1992); Гуляев Ю В, Иванов С Н, Козорезов А Г *Радиотехника и электроника* **23** 2396 (1978)
77. Морозов А И, Земляничин М А *ФТТ* **6** 2288 (1972); Morozov A I, Zemlyanitzyn M A, Anisimkin V I *Phys. Status Solidi A* **14** 339 (1974); **24** 381 (1974)
78. Иванов С Н, Мансфельд Г Д *ФТП* **4** 40 (1970); Mansfeld G D, Alekseev S G, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 415; Mansfeld G D et al., in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 581
79. Гринберг А А, Крамер Н И *ДАН СССР* **157** 79 (1964)
80. Эпштейн Э М, Гуляев Ю В *ФТТ* **9** 376 (1967)
81. Королук А, Рой Н *ФТТ* **14** 260 (1972)
82. Гуляев Ю В, Эпштейн Э М *Письма в ЖЭТФ* **3** 410 (1966)
83. Гуляев Ю В, Эпштейн Э М *ФТТ* **9** 864 (1967)
84. Гуляев Ю В *ФТТ* **8** 3366 (1966)
85. Гуляев Ю В, Гаспарян Р А *Микроэлектроника* **8** 326 (1979); Gulyaev Yu V, Gasparian R A *Surf. Sci.* **98** 553 (1980)
86. Гуревич В Л, Лайхтман Б Д *ЖЭТФ* **46** 598 (1964); **49** 960 (1965)
87. Abe Y *Prog. Theor. Phys.* **31** 956 (1964)
88. Beale J R A *Phys. Rev.* **135** A1761 (1964)
89. Зильберман П Е *ФТТ* **9** 309 (1967)
90. Tien P K *Phys. Rev.* **171** 970 (1968)
91. Гуляев Ю В *ФТТ* **12** 415 (1970); Gulyaev Yu V *IEEE Trans.* **415** 19 (1970)
92. Зильберман П Е *ФТП* **5** 1240 (1971)
93. Иванов С Н и др. *Письма в ЖЭТФ* **13** 283 (1971)
94. Bugaev A S, Gulyaev Yu V, Mansfeld G D *Electron. Lett.* **14** 403 (1978)
95. Гуляев Ю В, Мансфельд Г Д *Радиотехника* (8) 1529 (2003)
96. Anisimkin V I et al. *Electron. Lett.* **34** 1360 (1998)
97. Anisimkin I V, Anisimkin V I, Gulyaev Yu V, in *Proc. of the 2000 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 713
98. Anisimkin I V, in *Proc. of the 2003 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 2*, p. 1326
99. Gulyaev Yu V et al. *Electron. Lett.* **16** 114 (1980)
100. Гуляев Ю В, Патент СССР № 401271 (1971); Gulyaev Yu V, Mansfeld G D, Orlova G A *Electron. Lett.* **17** 12 (1981)
101. Гуляев Ю В, Патент СССР. Ноябрь 1971
102. Siegart A, Patent Österreich (Dezember, 1971)
103. Gaalema S D, Schwartz R J, Gunshor R L *Appl. Phys. Lett.* **29** 82 (1976)
104. Hoskins M J, Hunser B J, in *Proc. of the 1986 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic*, p. 439
105. Bert A G, Epstein B, Kantorowicz G *IEEE Trans. Microwave Theory Tech. MTT-21* 255 (1973)
106. Гуляев Ю В и др. *Письма в ЖТФ* **7** 780 (1981)
107. Phillips D F et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 783 (2001)

PACS numbers: 07.07.Df, **72.50.+b**, 77.65.Dq

Некоторые тенденции развития акустоэлектроники сверхвысоких частот

С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев,
И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд

1. Введение

Развитие акустоэлектроники связано с разработкой сверхминиатюрных устройств, предназначенных для формирования, фильтрации и аналоговой математической обработки сигналов. Возможность и целесообразность такого использования акустических волн обусловлены их малой скоростью по сравнению со скоростью света. Преобразование электромагнитного сигнала в акустический, длина волны которого в 10^5 раз меньше, позволяет не только значительно уменьшить размеры электронных устройств, производящих различные операции над сигналами, но и в ряде случаев осуществить эти операции более простым и рациональным способом. В докладе приведены краткий обзор проблемы и некоторые результаты исследований, полученные авторами в области создания резонаторов и фильтров сверхвысоких частот (СВЧ) на объемных акустических волнах, акустоэлектронных датчиков физических величин на основе таких СВЧ-резонаторов, описана оригинальная методика акустической резонансной спектроскопии монокристаллов и тонких пленок материалов.

© С.Г. Алексеев, Ю.В. Гуляев,
И.М. Котелянский, Г.Д. Мансфельд 2005

Актуальность исследований и создания частотно-задающих и частотно-селективных акустоэлектронных элементов для коротковолновой части СВЧ-диапазона обусловлена возрастающей потребностью в таких элементах для модернизации современных и создания принципиально новых перспективных систем глобальной и сотовой связи, радиолокации, навигационных, поисково-спасательных и глобальных космических спутниковых систем, малогабаритных атомных часов, датчиков физических величин с беспроводным мониторингом.

В настоящее время большая часть задач по обработке и формированию сигналов на частотах ниже 2 ГГц успешно решается с помощью акустоэлектронных компонент на поверхностных акустических волнах (ПАВ) на основе пьезоэлектриков. Однако дальнейшее продвижение таких устройств в коротковолновую часть СВЧ-диапазона резко ограничивается современными технологическими возможностями изготовления на поверхности пьезоэлектрического кристалла периодической субмикронной структуры металлических электродов для возбуждения (приема) ПАВ. Оказалось, что для акустоэлектронных устройств, работающих в коротковолновой части СВЧ-диапазона длин волн, целесообразнее использовать объемные акустические волны (ОАВ) [1–3].

Современные, и в том числе наши, исследования в области создания акустоэлектронных устройств для коротковолновой части СВЧ-диапазона на ОАВ сосредоточены в основном в следующих направлениях.

1. Решение физических и технологических проблем, связанных с созданием СВЧ-резонаторов на объемных акустических волнах и составных фильтровых структур на основе электрического или акустического соединения резонаторных элементов.

Здесь основное внимание уделяется изучению новых принципов работы акустических резонаторов и фильтров СВЧ, построению теории, анализу возможных предельных значений параметров таких устройств, разработке технологии их изготовления, а также экспериментальной проверке их работоспособности. Принципиально важным является поиск для продвижения в область СВЧ новых акустических материалов с низкими значениями коэффициента поглощения и температурного коэффициента задержки акустических волн.

2. Разработка акустоэлектронных микроволновых датчиков физических величин на основе СВЧ-резонаторов.

Как показал проведенный анализ, на основе тонкопленочных СВЧ-резонаторов могут быть созданы весьма перспективные датчики физических величин. Предложены, изготовлены и экспериментально исследованы датчики температуры, давления и газового состава, в которых в качестве чувствительного элемента используются тонкопленочные СВЧ-резонаторы на ОАВ. Эти датчики обладают лучшей чувствительностью к измеряемым факторам, чем компоненты на ПАВ, и, кроме того, имеют меньшие размеры и совместимы с микроволновыми антеннами, что делает перспективным их применение в пассивных беспроводных сенсорах в системах дистанционного, в том числе экологического, мониторинга.

3. Разработка оригинальных технологических методик, необходимых для изготовления акустоэлектронных СВЧ-устройств, в первую очередь, методик выращивания пленок и многослойных тонкопленочных структур с

заданными акустическими и электрическими свойствами.

4. Разработка методов измерения акустических параметров тонких пленок.

Акустические свойства тонких пленок пьезоэлектриков и металлов, как правило, отличаются от свойств массивных образцов, и возникает необходимость в их непосредственном измерении. Широко используемый эхо-метод в случае тонких слоев материалов и пленок становится практически неприменимым. Возникла необходимость в разработке принципиально новых способов измерения скорости и поглощения акустических волн СВЧ в тонких слоях и пленках. Нами был предложен и развит оригинальный метод резонансной СВЧ-спектроскопии. Оказалось чрезвычайно плодотворным использование этого метода также для исследования акустических свойств ряда новых пьезоэлектрических материалов, которые характеризуются меньшими потерями, чем широко применяемый кварц, и способны заменить его при работе на высоких частотах.

Ниже последовательно рассматриваются некоторые пути решения перечисленных проблем.

2. Принципы работы акустических СВЧ-резонаторов и фильтров на ОАВ

Резонансным частотам резонаторов на ОАВ, работающих в коротковолновой части СВЧ-диапазона длин волн, соответствуют микронные и субмикронные значения толщины пьезоэлектрического слоя. Вследствие хрупкости тонких слоев и трудностей получения таких слоев с заданной толщиной для их создания не пригодны конструктивные и технологические решения, применяющиеся при изготовлении кварцевых резонаторов на ОАВ. Поиск новых принципов создания резонаторов и фильтров привел к разработке тонкопленочных структур и развитию технологии их получения. Некоторые типы составных СВЧ-резонаторов на ОАВ схематически показаны на рис. 1.

СВЧ-резонаторы мембранного типа. На рисунке 1а показана структура тонкопленочного резонатора мембранного типа. В англоязычной литературе для обозначения этого типа резонаторов используется аббревиатура TFR (Thin-Film Resonator). Мембрана, содержащая тонкую пьезоэлектрическую пленку оксида цинка или нитрида алюминия, расположена между металлическими пленочными электродами. Резонаторы такого типа изготавливаются на полупроводниковых подложках с использованием методов селективного травления, широко применяемых в кремниевой и арсенид-галлиевой технологиях. Достоинствами этого типа резонаторов являются: во-первых, работа на основной гармонике пьезоэлектрического преобразователя, лежащей непосредственно в СВЧ-диапазоне, а во-вторых, возможность изготовления резонаторов на полупроводниковой (например кремниевой) подложке и объединения их с другими электронными компонентами, изготовленными на этой же подложке.

Добротность резонаторов мембранного типа невысока — меньше 1000 уже на частоте 1 ГГц. Это обусловлено относительно большими значениями коэффициентов поглощения акустических волн материалов, на основе которых возможно создание мембран, — кремния, арсенида галлия, пленок окиси цинка или нитрида алюминия.

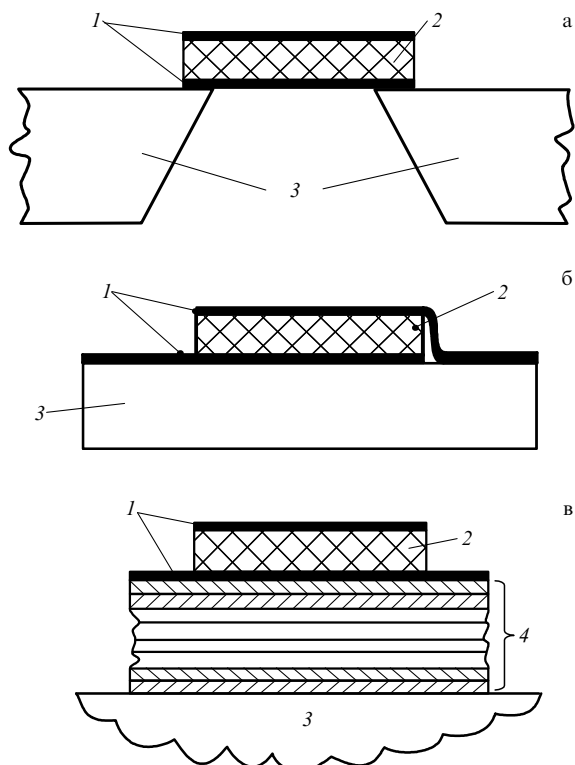


Рис. 1. Различные типы СВЧ-резонаторов на объемных акустических волнах: (а) резонаторы мембранного типа; (б) многочастотные резонаторы, работающие на высоких гармониках; (в) резонаторы с акустической изоляцией от подложки. 1 — металлические электроды, 2 — пьезоэлектрическая пленка, 3 — подложка, 4 — четвертьволновая тонкопленочная слоистая структура.

Мембранным резонаторам посвящено большое число экспериментальных работ. Основное внимание при исследованиях этих резонаторов уделялось выяснению возможности создания на их основе датчиков различных физических величин, так как из-за малой толщины мембраны даже незначительные внешние факторы сильно влияют на частоту резонатора. На основе мембранных структур возможно создание СВЧ-фильтров импедансного типа, в качестве элементов которых используются отдельные пленочные резонаторы [4].

Многочастотные составные резонаторы. Многочастотный составной резонатор на ОАВ (high overtone bulk acoustic wave resonator, НВАР) [1, 2, 5] схематически представлен на рис. 1б. Он содержит подложку — пластинку толщиной в несколько сотен микрон, на поверхности которой размещен тонкопленочный электроакустический преобразователь, состоящий из пьезоэлектрической пленки (ZnO или AlN) с микронной толщиной и металлических пленок электродов. Пластинки изготавливаются из монокристаллов с рекордно малым поглощением акустических волн — сапфира, алюмомагниевого шпинели, танталата или ниобата лития, иттрий-алюминиевого граната (ИАГ) [4]. Оптически отполированные лицевые поверхности пластинки строго плоскопараллельны (с допустимой погрешностью несколько угловых секунд). Пьезоэлектрическая пленка обеспечивает электрическую связь всей резонаторной структуры с внешней цепью. По существу такие устройства являются высокодобротными акустическими аналогами резонаторов Фабри–Перо. Этот тип резонатора является много-

Таблица

Материал	Добротность	Частота, ГГц
Сапфир	$6,5 \times 10^3$	7,6
ИАГ (110)	5×10^4	3,8
LiNbO ₃ (001)	$2,5 \times 10^3$	5,6

частотным (эффективно могут возбуждаться до нескольких сотен гармоник основной частоты структуры). Между плоскопараллельными поверхностями, ограничивающими резонатор, укладываются сотни акустических полуволн. С помощью пьезоэлектрической пленки резонатор может возбуждаться на гармониках, лежащих в широкой полосе частот. Толщина пьезоэлектрической пленки (и электродов) много меньше (в сотни раз), чем толщина пластинки-подложки. Колебательная энергия в резонаторе накапливается в основном в пластинке-подложке, и его добротность практически определяется акустическими потерями в материале подложки. Подложки изготавливаются из материалов с очень низкими коэффициентами поглощения акустических волн, поэтому данный тип СВЧ-резонатора на ОАВ обладает чрезвычайно большой добротностью. Типичные достигнутые значения добротности многочастотного резонатора представлены в таблице.

В электрической схеме резонатор может возбуждаться на одной из выбранных высших гармоник. Возможна небольшая перестройка частоты за счет изменения емкости, последовательно включенной в цепь, содержащую резонатор, что открывает пути для компенсации уходов частоты, точной подстройки и синхронизации частоты СВЧ-генератора [6]. Таким образом, перспективно использование многочастотных резонаторов в синтезаторах частоты СВЧ с электронным переключением частоты генерации и в синхронизируемых малошумящих СВЧ-генераторах, работающих непосредственно на частотах дециметрового и сантиметрового диапазонов.

При создании СВЧ-резонаторов важно знать реальные значения коэффициента поглощения и скорости звука в кристаллических пластинках и тонких пленках из пьезоэлектриков, металлов и диэлектриков с микронной и субмикронной толщиной, образующих резонатор. Как известно, акустические свойства таких тонких пленок и монокристаллов различны. Это связано с зависимостью акустических свойств от условий осаждения и толщины пленок, а также от материала подложки. Традиционный, широко применяемый в различных материалах эхо-метод измерения коэффициента поглощения и скорости звука, к сожалению, для тонких пластин и тем более пленок неприменим, в частности, из-за радиотехнических сложностей генерации и регистрации сверхкоротких радиоимпульсов. Чрезвычайно высокая добротность многочастотных СВЧ-резонаторов, как оказалось, практически совпадает с акустической добротностью материала подложки (при толщинах более 300 мкм). Это подтолкнуло нас к разработке и развитию нового метода измерения поглощения акустических волн в тонких пластинках-подложках из различных материалов, который был назван методом акустической резонансной спектроскопии [7].

Суть метода состоит в измерении ширины резонансных пиков и вычислении из этих данных коэффициента поглощения акустических волн, а также определении их

скорости по разности частот между соседними пиками. Удобство метода заключается в возможности прямого измерения частотных зависимостей коэффициента поглощения, поскольку резонансные пики наблюдаются одновременно в широком диапазоне частот, например от 500 МГц до 4 ГГц, на одном резонаторе. Использование и дальнейшее развитие этого метода позволило разработать способы измерения поглощения и скорости звука не только в пластинках, но и пленках, наносимых на обратную сторону пластины-подложки, где данные по поглощению в пленке находятся из сравнения результатов измерений с пленкой и без нее. Информативность предложенного метода связана с использованием малых длин акустических волн СВЧ, сравнимых с толщиной пленки.

С помощью этого метода нами впервые были измерены акустические потери в СВЧ-диапазоне таких новых кварцеподобных материалов, как ортофосфат галлия, лангасит [8] и лангатат [9] (призванных заменить кварц в системах стабилизации и контроля частоты). Для лангатата был измерен полный набор компонент тензора вязкости.

Методом резонансной акустической спектроскопии были измерены потери в тонких пленках пьезоэлектриков ZnO и AlN, некоторых диэлектриков и ряда металлов — алюминия, вольфрама, титана и молибдена [10]. При этом выяснилось, что тугоплавкие металлы, в особенности вольфрам, имеют весьма низкие коэффициенты поглощения акустических волн, сравнимые с величиной коэффициента поглощения в пьезоэлектрических пленках, используемых в тонкопленочных резонаторах (ZnO, AlN), или меньшие этой величины. Поэтому вольфрам, молибден и титан могут служить основой для создания акустических брэгговских зеркал с относительно малыми потерями. Этим методом нами также впервые были измерены коэффициенты поглощения в пленках Ленгмюра–Блоджетт и модуль упругости в углеродных нанотрубках [11].

СВЧ-резонаторы с акустической изоляцией пьезоэлектрического преобразователя от подложки. Структура тонкопленочного СВЧ-резонатора на ОАВ с акустической изоляцией пьезоэлектрического преобразователя от подложки (solidly mounted resonator, SMR) [1, 3], представленная на рис. 1в, состоит из подложки (обычно кремниевой), на поверхности которой последовательно размещены многослойная брэгговская отражательная структура и пьезоэлектрический резонатор. Резонатор акустически нагружен на очень маленький акустический импеданс, что почти эквивалентно наличию у него свободной границы. В то же время толстая подложка обеспечивает механическую прочность структуры. Резонатор образует пьезоэлектрическая пленка (ZnO или AlN) с пленочными металлическими электродами. Брэгговская отражательная структура состоит из чередующихся тонкопленочных четвертьволновых слоев, выполненных из акустических материалов с большим относительным контрастом акустических импедансов. Многослойная брэгговская структура (на практике бывает достаточно 6–8 слоев, например $\text{SiO}_2\text{--AlN}$) практически полностью отражает акустические волны. Потери за счет ухода энергии в подложку при этом много меньше потерь собственно в материале резонатора.

Такие резонаторы работают на основной гармонике пьезоэлектрического преобразователя, лежащей непосредственно в СВЧ-диапазоне. Их можно изготавливать на полупроводниковой подложке и объединять с другими электронными компонентами, изготовленными на этой же подложке.

Как и в случае мембранных резонаторов, для получения высокой добротности необходимо подобрать пьезоэлектрические материалы с малыми акустическими потерями. Одним из таких материалов, как известно, является ниобат лития. Было показано, что в этом случае за счет использования материала с малыми акустическими потерями можно достичь весьма высоких значений добротности, $Q = 5,2 \times 10^4$ и $Q = 1,7 \times 10^4$ соответственно на частоте основного резонанса (2,995 ГГц) и вблизи третьей гармоники этой частоты (9 ГГц). Однако четвертьволновая структура содержит большое число гетероэпитаксиальных слоев, и изготовление такого резонатора связано со значительными технологическими трудностями.

Фильтры на основе тонкопленочных СВЧ-резонаторов. Фильтр, содержащий два резонатора, схематически показан на рис. 2а. Это так называемый фильтр этажерочного типа (stacked filter). На рисунках 2б, в показаны примеры частотных характеристик таких фильтров. Брэгговское зеркало содержит шесть четвертьволновых слоев ($\text{SiO}_2\text{--W--SiO}_2\text{--W--SiO}_2\text{--W}$). Собственно резонатор — это пленка окиси цинка толщиной, близкой к половине длины волны, с пленочными электродами из алюминия. Формирование полосы достигается заданием необходимой акустической связи между отдельными полуволновыми пленками-резонаторами с помощью системы тонких слоев, ограничивающих акустическую связь между ними, которая превращает единую колебательную систему в систему связанных резонаторов. Пример частотной характеристики для структуры, содержащей три промежуточных слоя ($\text{SiO}_2\text{--W--SiO}_2$), связывающих резонаторы, показан на рис. 2б. Проводящий слой W в этой структуре одновременно служит электродом. Видно, что резонансная кривая становится двугорбой, соответствующей системе двух связанных колебательных контуров. Уменьшить неравномерность частотной характеристики можно изменяя толщины слоев. Для случая, когда толщина слоя W уменьшена на 30%, а толщина слоев SiO_2 увеличена на 30% по отношению к четвертьволновой толщине; кривая, как видно из рисунка, имеет достаточно плоскую вершину. Еще один способ задания формы частотной характеристики — это включение дополнительных резонансных полуволновых слоев в систему промежуточных слоев. Пример частотной характеристики в случае двух дополнительных резонансных слоев ZnO (структура промежуточных слоев — $\text{SiO}_2\text{--W--SiO}_2\text{--ZnO--SiO}_2\text{--W--SiO}_2\text{--ZnO--SiO}_2\text{--W--SiO}_2$) приведен на рис. 2в.

Параметры многослойных составных структур и их характеристики поддаются достаточно строгому и точному количественному описанию, в частности, с помощью разработанного в ИРЭ РАН матричного метода, позволяющего связать входные и выходные электрические характеристики фильтров между собой с учетом акустических (упругих и вязких) и пьезоэлектрических свойств всех слоев, входящих в структуру.

По сравнению с аналогичными СВЧ-устройствами на поверхностных акустических волнах, СВЧ-резонаторы на ОАВ с акустической изоляцией пьезоэлектрического резонатора от подложки обладают рядом преимуществ:

По сравнению с аналогичными СВЧ-устройствами на поверхностных акустических волнах, СВЧ-резонаторы на ОАВ с акустической изоляцией пьезоэлектрического резонатора от подложки обладают рядом преимуществ:

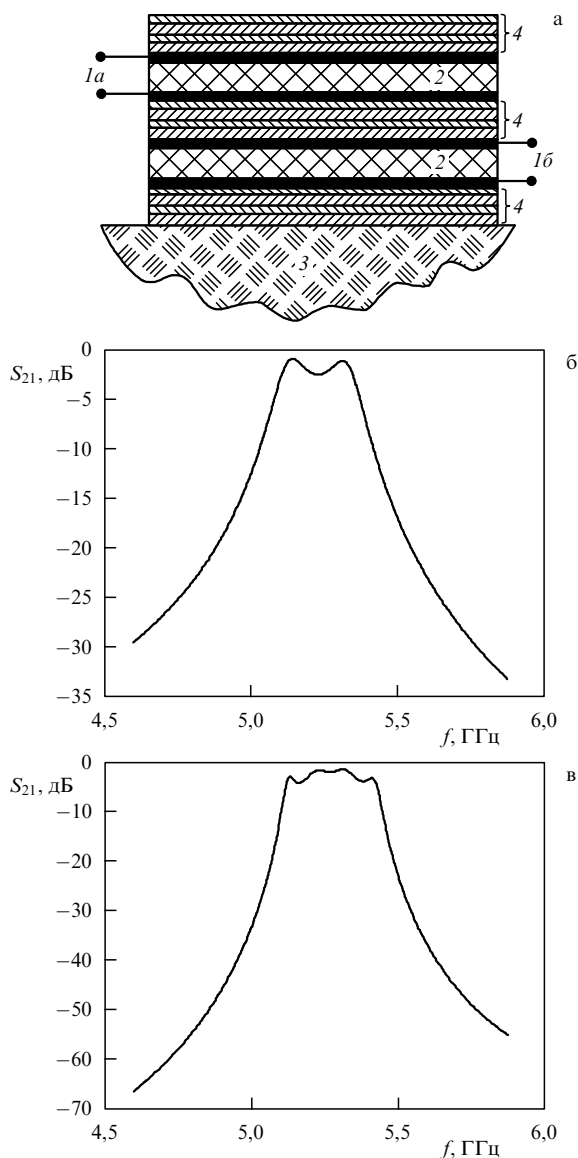


Рис. 2. (а) Структура фильтра этажерочного типа с акустической изоляцией резонирующих элементов от подложки, с промежуточными слоями и защитной четвертьволновой структурой: 1а — входные металлические электроды, 1б — выходные металлические электроды, 2 — пьезоэлектрическая пленка, 3 — подложка, 4 — четвертьволновая тонкопленочная слоистая структура. (б) Пример частотной характеристики для структуры, содержащей три связывающих промежуточных слоя ($\text{SiO}_2\text{-W-SiO}_2$); (в) то же, что и на рис. б для случая двух дополнительных резонансных слоев.

для их изготовления не требуется субмикронной электронной литографии; технология изготовления СВЧ-резонаторов на ОАВ с акустической изоляцией является планарной и достаточно хорошо адаптивной; снижаются требования к качеству поверхности подложки. Замятые слои и дефекты не влияют на работу резонансной структуры, поскольку она оказывается акустически изолированной от тонкой пьезоэлектрической пленки, образующей собственно резонатор. Более того, брэгговская структура вообще не критична к материалу подложки, и его можно выбирать из соображений технологического удобства: созданные устройства при микронной и субмикронной толщине собственно резонатора имеют размеры порядка нескольких сотен микрон. Их

вес составляет доли грамма. В то же время электрические характеристики резонаторов и фильтров на ОАВ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним рядом перспективных СВЧ-систем, — электрическая прочность таких устройств в несколько раз выше, чем у ПАВ-устройств.

Датчики на основе тонкопленочных СВЧ-резонаторов. Для СВЧ-резонаторов на ОАВ, используемых в качестве датчиков, регистрация физической величины основана на непосредственных измерениях изменения частоты резонатора, вызванного внешним воздействием. Анализ показал, что СВЧ-датчики на ОАВ могут работать на более высоких частотах, обладать лучшей чувствительностью при измерениях температуры и давления, имея при этом меньшие габариты, чем аналогичные устройства на ПАВ [12]. Колебания в резонаторах можно возбуждать и регистрировать дистанционно с помощью микроволновых антенн. Это делает датчики на основе СВЧ-резонаторов незаменимыми для применения в пассивных беспроводных сенсорах, которые могут, например, использоваться в системах дистанционного экологического мониторинга.

3. Заключение

В настоящее время прогресс в акустоэлектронике СВЧ связан с развитием пьезоэлектрической элементной базы СВЧ-диапазона на объемных акустических волнах. Это обусловлено продвижением современных систем связи, радиолокации, навигации в область более высоких рабочих частот, 3–10 ГГц. Акустоэлектронные СВЧ-устройств на ОАВ имеют отмеченный выше ряд потенциальных преимуществ перед аналогичными СВЧ-устройствами, основанными на других принципах.

Для дальнейшего развития акустоэлектронной элементной базы на ОАВ и внедрения ее в практику необходимо продолжить поиски решений следующих фундаментальных проблем:

- разработка новых принципов создания высокодобротных тонкопленочных акустических резонаторов и фильтров СВЧ, развитие теории, описывающей их работу;

- поиск новых акустических материалов и структур, которые характеризуются малыми потерями при распространении акустических волн СВЧ, для резонаторов и фильтров;

- разработка физических принципов акустоэлектронных методов генерации акустических и электромагнитных колебаний СВЧ в пленках пьезоэлектрических полупроводников, в частности, исследование акустоэлектронной нелинейности и нахождение условий генерации узких спектральных линий в резонаторах на основе тонких пленок полупроводников;

- развитие технологий выращивания пьезоэлектрических, диэлектрических и металлических пленок с заданными электрофизическими и акустическими свойствами;

- развитие и использование новых методик исследования физических свойств тонких слоев и пленок, создание методов контроля акустических параметров тонких слоев и пленок.

Данные исследования частично поддерживаются в рамках проекта РФФИ 05-02-08024.

Список литературы

1. Гуляев Ю В, Мансфельд Г Д *Успехи современной радиоэлектроники* (5–6) 13 (2004)
2. Мансфельд Г Д, Алексеев С Г *Радиотехника* (1) 75 (1998)
3. Lakin K M, in *Proc. of the 2002 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 901
4. Мансфельд Г Д *Письма в ЖТФ* **23** (19) 35 (1997)
5. Bailey D S et al. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Frequency Control* **39** 780 (1992)
6. Кучерявая Е С и др. *Акуст. журн.* **41** 346 (1995)
7. Крутов Б Н, Мансфельд Г Д, Фрейк А Д *Акуст. журн.* **40** 633 (1994)
8. Мансфельд Г Д и др. *ФТТ* **37** 1097 (1995)
9. Mansfeld G, Alekseev S, Kotelyansky I, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Frequency Control and PDA Exhibition*, p. 268
10. Mansfeld G D, Alekseev S G, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2001 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 415
11. Мансфельд Г Д и др. *ФТТ* **44** 649 (2002)
12. Mansfeld G D, Kotelyansky I M, in *Proc. of the 2002 IEEE Intern. Symp. Ultrasonic Vol. 1*, p. 909

PACS numbers: 07.07.Df, **72.50.+b**, 77.65.Dq

Многомодовые акустические датчики и системы

И.В. Анисимкин¹, В.И. Анисимкин

1. Введение

Усиление террористической опасности, загрязнение окружающей среды и распространение новых заболеваний поставили перед разработчиками электронных датчиков новые неотложные задачи. Одна из них — создание миниатюрных устройств для обнаружения малых концентраций вредных веществ, находящихся в смесях газов и жидкостей. Решение этой сложной и многодисциплинарной задачи проводится во многих научных лаборатории мира по нескольким альтернативным направлениям.

Среди датчиков акустического типа наибольшее распространение получили устройства на поверхностных акустических волнах Рэлея (ПАВ) (рис. 1). Малая глубина локализации (~ 10 мкм) делает эти волны особенно чувствительными к массовой нагрузке поверхности. Поэтому изменение свойств пленки, находящейся на пути распространения волны, вызывает изменение ее скорости v , фазы φ и амплитуды A , которые фиксируются на выходе устройства как вариации частоты или

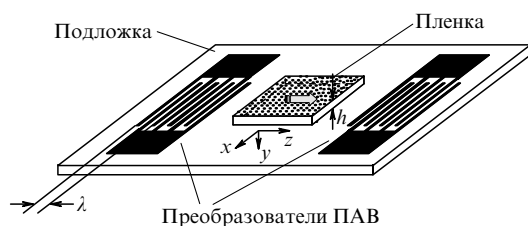


Рис. 1. Принципиальная схема одноканального газового датчика на поверхностных акустических волнах.

напряжения. Частотный вид отклика выгодно отличает акустические датчики от устройств иного типа, поскольку обеспечивает высокую точность измерений и простое совмещение с цифровыми системами обработки информации. Однако ни один из современных датчиков, в том числе и акустический, не способен в одиночку обеспечить селективное детектирование одного заданного газа, поскольку химических покрытий, реагирующих на одну газовую компоненту и не реагирующих на все остальные, создать не удается.

Решение проблемы было найдено путем создания приборов "электронный нос" и "электронный язык", подобных органам обоняния и вкусового восприятия животных и человека [1–3].

Главной составной частью этих приборов является так называемая решетка датчиков — набор из нескольких элементов с различной чувствительностью к одинаковым газовым компонентам. Различие между датчиками обеспечивается объединением в решетку устройств разного типа (например электросопротивлений, емкостей, полевых транзисторов, кварцевых микробалансов, устройств на ПАВ) и использованием в каждом датчике своего особого химического покрытия. Совокупность откликов, снимаемых с датчиков, подвергается специальной математической обработке, которая позволяет определить полный состав тестируемой смеси или ее принадлежность к одной из находящихся в базе данных. При таком подходе сенсорная решетка становится ключевым элементом всего прибора, от которого зависят его точность, разрешающая способность и стабильность. При этом возникает принципиальное противоречие: с одной стороны, чем больше сенсоров содержится в решетке и чем они разнообразнее, тем более совершенна работа электронного носа в целом; с другой стороны, чем больше датчиков и, следовательно, больше газочувствительных покрытий, тем менее стабильна работа всего прибора из-за старения пленок. Возникает вопрос: возможно ли создание решеток, содержащих одновременно большое число различных датчиков и малое число используемых в них химических покрытий?

Работая в этом направлении, сотрудники ИРЭ РАН предложили и разработали новый, чисто акустический подход. Ключевой идеей подхода является использование вместо одного сенсорного свойства и одного типа волн (как это было ранее, см. рис. 1) *всех свойств и всех акустических колебаний*, которые могут существовать в твердых телах. Действительно, поскольку в пьезокристаллах может распространяться до 10 волн разного типа, каждая из которых обладает своей реакцией на внешние воздействия, то, выбирая тип, количество и свойства волн, зондирующих среду, примыкающую к звукопроводу, можно сформировать требуемую совокупность откликов, даже не используя газочувствительные покрытия.

Аналогично можно решить другую прикладную задачу — измерить сразу несколько характеристик внешней среды или химико-биологического процесса. В этом случае используют несколько зондирующих волн, измеряют их характеристики и составляют систему уравнений, связывающую характеристики волн с параметрами среды. При числе уравнений, равном числу неизвестных, решение системы однозначно.

Продемонстрируем работоспособность нового подхода на конкретных примерах.

¹ Трагически погиб в результате террористического акта 9 декабря 2003 г. в центре Москвы.