

Исследование структуры и свойств

Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-31-37>

НАСТРОЙКА МОНОЛИТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ТРАВЛЕНИЯ

© Алексей Дмитриевич Черемных^{1,2*}, Андрей Алексеевич Сергиенко¹,
Дмитрий Борисович Пушкин³

¹ НИТУ «МИСИС», Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4; *e-mail: all.cheremnykh@gmail.com

² НПО «Радиозавод имени А. С. Попова», Россия, 127287, Москва, ул. 2-я Хуторская, д. 29, стр. 4.

³ НИИ НПО «ЛУЧ», Россия, 142103, Московская обл., г. Подольск, ул. Железнодорожная, д. 24.

*Статья поступила 23 ноября 2022 г. Поступила после доработки 29 ноября 2022 г.
Принята к публикации 21 марта 2023 г.*

Процесс настройки пьезоэлектрического фильтра заключается в понижении частоты частных резонаторов в результате снятия слоя электрода при помощи ионно-лучевого травления в среде инертного газа. При этом необходимо контролировать частоты первого и второго резонаторов, а также разнос частот (расстояние между частотами верхнего и нижнего резонансов пьезосистемы), динамическое сопротивление частных резонаторов и вносимое затухание. В работе представлены результаты использования ионно-лучевого травления при настройке монолитных пьезоэлектрических фильтров на объемных акустических волнах. Выявлено, что проводить настройку следует по частотам верхнего и нижнего резонансов пьезосистемы с контролем по вносимому затуханию. Необходимо также исключить операции по контролю частот первого и второго частных резонаторов. Определены оптимальные параметры ионно-лучевого травления электродов частных резонаторов: рабочее давление — $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па, расход рабочего газа — $1,75 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$, энергия ионного пучка — 1 кэВ, плотность ионного тока — 6 мА/см^2 . Кроме того, выявлены зависимости вносимого затухания и динамического сопротивления от частоты частных резонаторов. Характеристики полученного монолитного кварцевого фильтра: номинальная частота — 21400,681 МГц, ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ — 32,66 кГц, вносимое затухание — 0,5 дБ. Полученные результаты могут быть использованы при настройке секций с меньшими по площади электродами для фильтров на более высоких частотах.

Ключевые слова: ионно-лучевое травление; монолитный пьезоэлектрический фильтр; кварцевый кристаллический элемент; травление электродов; оптимизация процесса настройки; динамическое сопротивление; амплитудно-частотная характеристика.

SETTINGS OF A MONOLITHIC PIEZOELECTRIC FILTER ON BULK ACOUSTIC WAVES BY ION-BEAM ETCHING

© Alexey D. Cheremnykh^{1,2*}, Andrey A. Sergienko¹, Dmitriy B. Pushkin³

¹ NUST "MISIS", 4, Leninsky prosp., Moscow, 119049, Russia; *e-mail: all.cheremnykh@gmail.com

² NPO "Radiozavod imeni A. S. Popova," 29, str. 4, ul. 2-ya Khutorskaya, Moscow, 127287, Russia.

³ NII NPO LUCH, 24, ul. Zheleznodorozhnaya, Podolsk, Moscow obl., 142103, Russia.

Received November 23, 2022. Revised November 29, 2022. Accepted March 21, 2023.

The process of tuning of the piezoelectric filter consists in lowering the frequencies of the resonators as a result of removing the electrode layer by means of ion-beam etching (IBE) in an inert gas atmosphere. It is

necessary to control frequencies of the first and second resonators, as well as the frequency spacing (distance between frequencies of the upper and lower resonances of the piezo system), dynamic impedance of partial resonators and insertion attenuation. We present the results of using ion-beam etching in tuning monolithic piezoelectric filters on volumetric acoustic waves. It is shown that tuning should be performed using frequencies of the upper and lower resonances of the piezo system under control of the insertion attenuation. It is also necessary to exclude the control operations for the frequencies of the first and second resonators. The optimum parameters of ion-beam etching electrodes of the resonators are determined: working pressure — 1.33×10^{-5} Pa, working gas flow — $1.75 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/sec}$, ion beam energy — 1 keV, ion current density — 6 mA/cm^2 . Moreover, the dependence of the insertion damping and dynamic resistance on the frequency of the resonator was revealed. Characteristics of the obtained monolithic quartz filter are presented: nominal frequency — 21400.681 MHz, bandwidth by -3 dB — 32.66 kHz, insertion loss 0.5 dB. The obtained results can be used when tuning sections with smaller electrodes for filters at higher frequencies.

Keywords: ion-beam etching; monolithic piezoelectric filter; quartz crystal element; electrode etching; optimization of tuning process; dynamic impedance; amplitude-frequency response.

Введение

Монолитные пьезоэлектрические фильтры (МПФ) в отличие от традиционных пьезоэлектрических фильтров, состоящих из дискретных резонаторов, соединенных электрической схемой, где передача сигнала от одного резонатора к другому осуществляется направленным потоком электрических зарядов, представляют собой многорезонансную акустическую систему волноводного типа, в которой обработка сигнала может быть осуществлена с помощью акустических волн. В МПФ сигнал передается упругими волнами, распространяющимися в твердом теле, что позволяет упростить конструкцию и технологию изготовления фильтра, уменьшить его габариты и снизить себестоимость [1 – 3].

Принцип действия МПФ следующий. Электрический сигнал возбуждает акустические колебания во входном резонаторе вследствие обратного пьезоэффекта. При совпадении частоты сигнала с резонансной частотой резонатора происходит концентрация энергии в резонаторе, а за его пределами энергия убывает по экспоненте. Если резонаторы находятся в непосредственной близости друг от друга, то часть акустической энергии проникает в соседний резонатор и накапливается в нем. С электродов выходного резонатора снимается электрический сигнал вследствие прямого пьезоэффекта. Таким образом, принцип действия МПФ основан на обратном и прямом пьезоэффектах и на эффекте волноводного распространения нормальных волн в ограниченных средах [4, 5].

Основа МПФ — пьезоэлектрическая пластина (подложка). В большинстве случаев в качестве подложки используют кварц (SiO_2). В настоящее время для создания широкополосных фильтров применяют подложки из монокристаллов танталата лития (LiTaO_3), ниобата лития (LiNbO_3) и лангасита (LGS) [6, 7].

По конструктивным признакам МПФ подразделяют на простые, секционированные и гибридные. Недостаток простых МПФ — наличие побочных полос пропускания, образующихся в районе ангормонических резонансных частот акустической системы, и большие размеры кристаллических элементов (КЭ) в случае многорезонансных МПФ, что затрудняет технологию их изготовления. Если число резонаторов в МПФ больше трех, то для борьбы с побочными полосами пропускания и уменьшения размеров КЭ МПФ разделяют на несколько секций, каждая из которых — отдельная система акустически связанных резонаторов. Секции соединяют между собой электрическим способом с емкостной связью (рис. 1). МПФ такой конструкции называют секционированными [8, 9].

Технология изготовления секции МПФ совпадает с технологией изготовления обычных пьезоэлектрических резонаторов, однако часто требуется выдерживать более жесткие допуски на размер по толщине и плоскопараллельности [10, 11]. Это объясняется тем, что в МПФ линейные размеры резонатора и толщина электрода определяют не только резонансную частоту частного резонатора, но и коэффициент связи между двумя соседними резонаторами. Для кварцевых пластин величина этого допуска составляет 2 – 6 % [12, 13].

Электроды резонаторов МПФ наносят на секцию вакуум-термическим способом либо магнетронным распылением мишени через маски. В отечественных фильтрах применяют серебро с тонким подслоем хрома для улучшения адгезии.

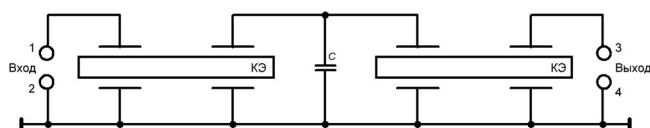


Рис. 1. Электрическая схема МПФ

Fig. 1. Electrical circuit of the MPF

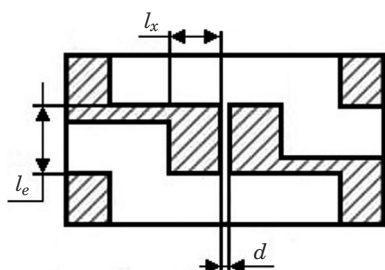


Рис. 2. Схема сечения МПФ (l_x , l_e — длина и ширина электрода (1 и 1,4 мм); d — зазор (0,702 мм))

Fig. 2. Scheme of the MPF section (l_x , l_e — electrode length and width (1 and 1.4 mm); d — spacing (0.702 mm))

Затем проводят настройку посредством удаления части металла электрода при помощи ионно-лучевого травления (ИЛТ) [14 – 17].

Применение ИЛТ при производстве МПФ дает возможность существенно расширить диапазон реализуемых частот при использовании КЭ с обратными мезаструктурами, увеличить количество и качество выпускаемой продукции, настраивать КЭ малых размеров при сравнительно тонком электродном покрытии [18, 19].

Цель работы — определение оптимального режима ИЛТ при настройке МПФ для обеспечения требуемых характеристик.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали монолитные кварцевые фильтры четвертого порядка (порядок фильтра определяется количеством резонаторов) (средняя частота — 21,4 МГц, полоса пропускания — 30 кГц). На рис. 2 схематично представлена кварцевая секция размером $3 \times 6 \times 0,078$ мм (фильтр состоит из двух подобных секций).

Основываясь на методиках расчета для кварцевых МПФ с частотой 21,4 МГц, оптимальная ширина W и длина L КЭ, размер электрода в направлении передачи колебаний (ширина электрода) l_e и зазор между электродами d определяли по формулам:

$$W = 28,3h_{\text{К.Э}},$$

где 28,3 — коэффициент для диапазона частот 12 – 21 МГц; $h_{\text{К.Э}} = N/f_s$ — толщина КЭ (N — частотная постоянная (в нашем случае — 1666 МГц · мм), f_s — частота точечного резонанса);

$$L = 2l_e + d + 10h_{\text{К.Э}} + 1; \quad l_e = 18h_{\text{К.Э}}; \quad d = 9h_{\text{К.Э}}.$$

Метод настройки основан на понижении частоты вследствие снятия слоя металлического покрытия электродов отдельной секции при помощи двух ионных источников, расположенных напротив передней и задней поверхностей настраи-

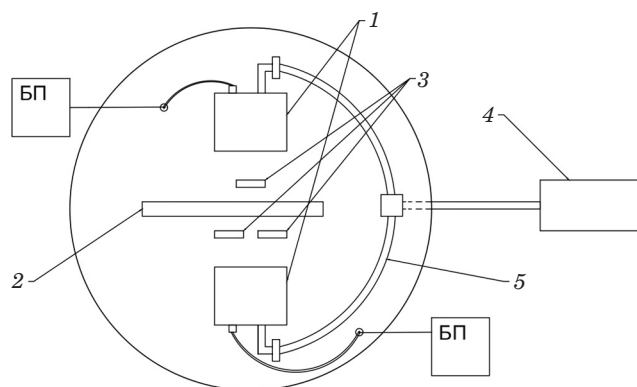


Рис. 3. Структурная схема установки «Альфа Н1» для настройки пьезоэлектрических фильтров методом ИЛТ: 1 — ионные источники; 2 — кассета с образцами; 3 — шторки; 4 — система напуска рабочего газа «СНА-2»; 5 — система распределения рабочего газа

Fig. 3. Block diagram of an installation «Alfa N1» for setting up piezoelectric filters by the IBE method: 1 — ion sources; 2 — sample cassette; 3 — shutters; 4 — SNA-2 working gas intake system; 5 — working gas distribution system

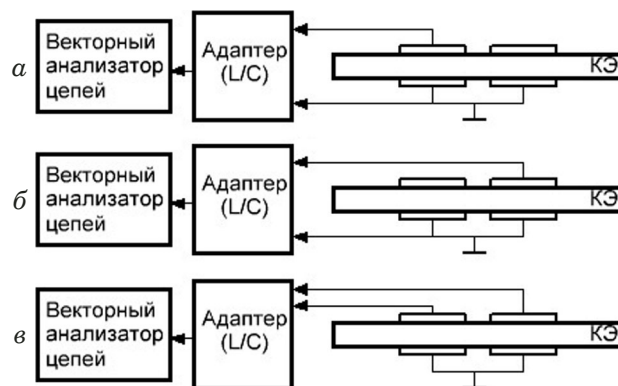


Рис. 4. Схемы измерений АЧХ первого (а) и второго (б) резонаторов, разности частот $f_{\text{в.н}} - f_{\text{н.н}}$ (в)

Fig. 4. Frequency response measurement schemes of the first (а) and second (б) resonators, frequency spacing $f_{\text{u.n}} - f_{\text{l.n}}$ (с)

ваемого образца и шторок для травления необходимых зон.

На рис. 3 приведена структурная схема вакуумной установки «Альфа Н1», с помощью которой осуществлялась настройка секций для МПФ.

Кассета 2 с МПФ устанавливается вертикально и параллельно шторкам 3. Симметрично по отношению к ней размещаются два источника ионов 1, которые располагаются под углом 90° к поверхности образцов в фокусе пучка для максимально эффективной скорости травления.

В процессе настройки секций МПФ необходимо контролировать частоты частных резонаторов f_1, f_2 , частоту верхнего $f_{\text{в.н}}$ и нижнего $f_{\text{н.н}}$ резонансов пьезосистемы, а также величину разности частот $f_{\text{в.н}} - f_{\text{н.н}}$. Частотные параметры могут быть

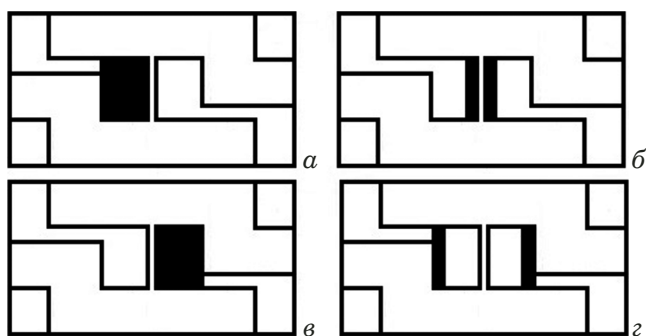


Рис. 5. Зоны травления для выравнивания частот частных резонаторов f_1 и f_2 (а, б), уменьшения и увеличения разности частот $f_{u.n} - f_{l.n}$ (в, г)

Fig. 5. Etching zones to equalize the frequencies of the resonators f_1 , f_2 (a, b), to reduce and to increase the frequency spacing $f_{u.n} - f_{l.n}$ (c, d)

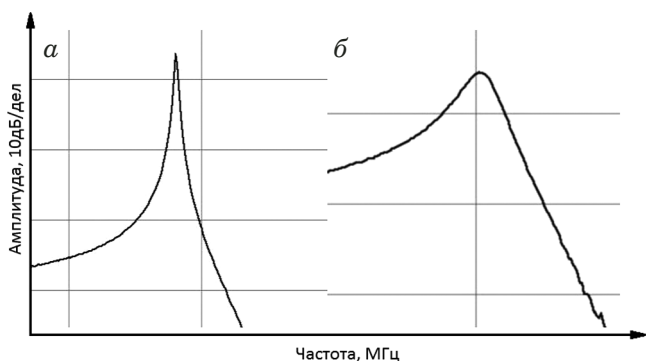


Рис. 7. АЧХ частных резонаторов с допустимым (а) и высоким (б) динамическим сопротивлением

Fig. 7. AFR of the resonators with permissible (a) and high (b) dynamic resistance

измерены в режиме вынужденных колебаний по схемам, приведенным на рис. 4. АЧХ измеряли путем подключения кассеты с секциями к векторному анализатору цепей OBZOR TR 1300/1 через блок с L/C нагрузками (адаптерами).

Использование установки «Альфа Н1» с двумя источниками дает возможность проводить травление различных областей электродов с обеих сторон подложки.

На рис. 5 представлены зоны настройки точечных резонаторов. Отметим, что при помощи

Таблица 1. Режимы процесса ИЛТ

Table 1. Modes of the IBE process

Режим	Поток газа, м ³ · Па/с	Напряжение на ионных источниках, кВ
1	1,75	2
2	2,8	3
3	1,05	1,5
4	1,75	3

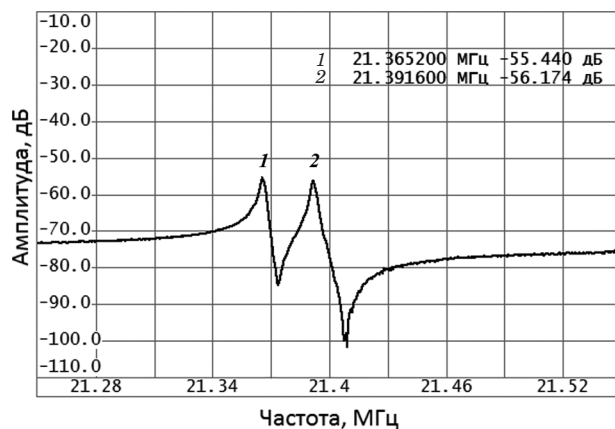


Рис. 6. АЧХ кварцевого КЭ: 1, 2 — частоты нижнего $f_{l.n}$ и верхнего $f_{u.n}$ резонансов пьезосистемы

Fig. 6. Frequency response of quartz CE: 1, 2 — frequencies of the lower and the upper resonance of the piezo system $f_{l.n}$ and $f_{u.n}$

шторок зоны перекрываются, чтобы не допустить попадания ионного пучка на электрод частного резонатора, имеющий большую частоту.

Для уменьшения или увеличения разности частот необходимо травление средних либо крайних областей электродов секции (см. рис. 5, в, г). Если при достижении необходимых параметров по разному значению нормальных частот и частоты частных резонаторов не соответствует требуемым параметрам, то осуществляется доработка — одновременное травление зон (см. рис. 5, а, б).

Технологический процесс настройки методом ИЛТ включает травление заданных участков поверхности электродов при помощи шторок на вакуумной установке «Альфа Н1» в следующей последовательности: выравнивание частот частных резонаторов; корректировка разности частот; повышение частот верхнего и нижнего резонансов пьезосистемы; термотренировка для устранения остаточных напряжений в КЭ; проверка и подстройка нормальных частот.

Заметим, что скорость и качество настройки частоты фильтра зависят от степени вакуума, количества подаваемого рабочего газа, энергии ионов.

Обсуждение результатов

При исследовании влияния параметров (режимов) процесса травления на характеристики МПФ меняли количество подаваемого рабочего газа при помощи системы напуска «СНА-2» и напряжение на ионных источниках (табл. 1).

На этапе настройки секций МПФ установили, что для кварцевых КЭ операции по настройке частот точечных резонаторов f_1 и f_2 не обязательны. С применением векторного анали-

затора цепей появилась возможность настраивать частоты верхнего и нижнего резонансов пьезосистемы за одну операцию (рис. 6). Теперь достаточно учесть вносимое затухание верхнего $Q_{в.н}$ и нижнего $Q_{н.н}$ резонансов пьезосистемы, разница между которыми должна составлять не более 2 дБ.

Во время настройки была выявлена зависимость АЧХ от динамических параметров, таких как, например, сопротивление, емкость и индуктивность. При возрастании динамического сопротивления R настраиваемых образцов увеличивается вносимое затухание Q и меняется вид АЧХ (рис. 7). АЧХ может иметь ярко выраженный пик и низкое вносимое затухание, что соответствует малому сопротивлению (см. рис. 7, а). Менее выраженный пик (см. рис. 7, б) соответствует высокому динамическому сопротивлению и большому вносимому затуханию. Данная зависимость будет справедлива для динамического сопротивления верхнего $R_{в.н}$ и нижнего $R_{н.н}$ резонансов пьезосистемы.

В табл. 2 приведены частотные характеристики секций для МПФ, настроенных при различных режимах ИЛТ.

Видно, что образец, настраиваемый в режиме 1, имеет самые низкие значения сопротивления и малое вносимое затухание. МПФ, полученный в режиме 3, также соответствует заданным требо-

ваниям и имеет малые значения основных характеристик.

Худшими характеристиками обладает образец, полученный в режиме 2. В данном режиме травление происходит при больших значениях плотности ионного тока и энергии ионов. За счет большей энергии, передаваемой ускоренными ионами при распылении, возникает эффект перенапыления электродного покрытия КЭ материала электрода и части материала самого КЭ (за счет изменения геометрии ионного пучка) на соседние КЭ.

Уменьшение величины плотности ионного тока дает возможность снизить влияние эффекта перенапыления, но достаточно высокие энергии ионов в режиме 4 (около 1,5 кэВ) не позволяют достичь требуемых характеристик МПФ.

Испытания по подтверждению воспроизводимости и повторяемости основных характеристик МПФ при осуществлении их настройки в режиме 1 ИЛТ проводили на партии из десяти образцов. Результаты эксперимента представлены в табл. 3.

Погрешность настроенных фильтров по частоте при достигнутых воспроизводимости и повторяемости не превышала 1, вносимое затухание — 5, а разнос частот — 0,5 %.

После монтажа секций, настроенных с помощью ИЛТ в режиме 1, получили МПФ со следую-

Таблица 2. Характеристики секций для МПФ

Table 2. Characteristics of the sections for MPF

Режим	$f_{н.н}$, кГц	$R_{н.н}$, Ом	$Q_{н.н}$, дБ	$f_{в.н}$, кГц	$R_{в.н}$, Ом	$Q_{в.н}$, дБ	$f_{в.н} - f_{н.н}$, кГц
1	21380,688	56,1	-39,498	21403,375	58,6	-39,989	22,6875
2	21380,313	198	-58,9	21403,188	230	-59,4	22,875
3	21380,8755	88,2	-46,8	21403,563	83,5	-45,8	22,6875
4	21380,875	116	-52,7	21403,375	99	-52,2	22,5

Таблица 3. Результаты эксперимента по подтверждению воспроизводимости и повторяемости характеристик МПФ

Table 3. The results of the experiment confirming the reproducibility and repeatability of the MPF characteristics

Образец	Частотные характеристики				
	$f_{в.н}$, кГц	$Q_{в.н}$, дБ	$f_{н.н}$, кГц	$Q_{н.н}$, дБ	$f_{в.н} - f_{н.н}$, кГц
1	21403,563	-40,257	21380,688	-43,734	22,875
2	21403,375	-39,989	21380,688	-39,498	22,6875
3	21403,375	-42,432	21380,5	-41,01	22,875
4	21403,188	-38,423	21380,556	-42,356	22,6319
5	21403,188	-40,556	21380,313	-38,333	22,875
6	21403,188	-39,618	21380,5	-40,601	22,6875
7	21403,188	-38,205	21380,5	-40,017	22,6875
8	21403,188	-38,854	21380,5	-42,163	22,6875
9	21403,188	-40,064	21380,688	-42,127	22,5
10	21403,375	-40,286	21380,688	-40,908	22,6875

щими параметрами: номинальная частота — 21400,681 кГц; нижняя и верхняя частоты среза по уровню –3 дБ — 21384,350 и 21417,012 кГц; ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ/–40 — 32,66/84,32 кГц; вносимое затухание в полосе пропускания — 0,5 дБ; коэффициент прямоугольности — 2,58.

Заключение

Технология настройки МПФ на объемных акустических волнах включает ИЛТ его электродов, в результате чего понижается частота частных резонаторов. Проведенные исследования процесса ИТЛ показали, что вносимое затухание и динамическое сопротивление зависят от частоты частных резонаторов. Кроме того, можно осуществлять настройку только верхней и нижней нормальных частот фильтра с контролем по вносимому затуханию и исключить операции по контролю частот первого и второго частных резонаторов. Такой способ позволяет проводить настройку секций с меньшими по площади электродами для фильтров на более высоких частотах, сократить количество операций и время настройки, а также получить секции с одинаковыми частотными характеристиками.

Результаты ИЛТ в значительной степени зависят от потока рабочего газа и напряжения на ионных источниках. Были определены оптимальные параметры ИЛТ электродов частных резонаторов: рабочее давление — $1,33 \cdot 10^{-5}$ Па; расход рабочего газа — $1,75 \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$; энергия ионов в ионном пучке — 1 кэВ; плотность ионного тока — 6 мА/см². В процессе настройки получили высокие воспроизводимость и повторяемость параметров. Погрешность настроенных секций по частоте не превышала 1, вносимое затухание — 5, разнос частот — 0,5 %. Параметры полученного в данном режиме монолитного кварцевого фильтра составили: номинальная частота — 21400,681 МГц; ширина полосы пропускания по уровню –3 дБ — 32,66 кГц; вносимое затухание — 0,5 дБ.

Полученные результаты могут быть использованы при настройке пьезоэлектрических фильтров, работающих на более высоких (до 350 МГц) частотах. Применение выбранного режима травления дает возможность настраивать секции с меньшим электродным покрытием и малыми геометрическими размерами, что является перспективным направлением в разработке МПФ на объемных акустических волнах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Койгеров А. С. Лестничные фильтры на вытекающих поверхностных акустических волнах на подложке ниобата лития / Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23. № 3. С. 139 – 147. DOI: 10.17587/nmst.23.139-147

2. Рошупкин Д. В. Исследование работы акустоэлектронных устройств на поверхностных акустических волнах / Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2021. № 1. С. 5 – 11.
3. Торгаш Т. Н., Козлов А. Г. Лестничный фильтр на основе микроэлектронных ОАВ-резонаторов с брэгговским отражателем / Динамика систем, механизмов и машин. 2017. Т. 5. № 4. С. 272 – 276. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.359.364
4. Медведев А., Грузиненко В., Миленин П. Пьезоэлектрические монокристаллы, используемые в резонаторах, генераторах, фильтрах и датчиках, на объемных акустических волнах / Компоненты и технологии. 2009. № 90. С. 114 – 115.
5. Дубинин Р. А., Козлов А. Г. Анализ характеристик L-звеньев для СВЧ фильтров на ОАВ резонаторах / Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 2. С. 190 – 196. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-190-196
6. Naumenko N. F. High-velocity non-attenuated acoustic waves in LiTaO₃/quartz layered substrates for high frequency resonators / Ultrasonics. 2019. Vol. 95. P. 1 – 5. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.03.001
7. Кугаенко О. М., Торшина Е. С., Петраков В. С. и др. Влияние высокотемпературного отжига на анизотропию микротвердости кристаллов семейства лангасита / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 7. С. 34 – 41.
8. Ложников А. О. Применение результатов измерений s-параметров для автоматизации производства изделий электроники / Техника радиосвязи. 2012. № 18. С. 79 – 82.
9. Торгаш Т. Н., Козлов А. Г. Влияние конструктивных параметров ОАВ-резонатора на частотную характеристику фильтра с акустически связанными резонаторами / Динамика систем, механизмов и машин. 2020. Т. 8. № 4. С. 67 – 72. DOI: 10.25206/2310-9793-8-4-67-72
10. Двоешерстов М. Ю., Дудин А. Л., Казимирский С. В. и др. Разработка СВЧ-фильтров на основе объемных акустических волн / Наноиндустрия. 2020. № S96-1. С. 359 – 364. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.359.364
11. Зайцев Б. Д., Семёнов А. П., Теплых А. А. и др. Определение параметров элементов эквивалентной схемы пьезоэлектрического резонатора / Радиотехника. 2019. Т. 83. № 7. С. 20 – 25. DOI: 10.18127/j00338486-201907(10)-04
12. Кондратенко В. С., Батрамейев Н. В. Влияние геометрии электродного покрытия на параметры кварцевых резонаторов с частотами выше 125 МГц / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 155 – 159.
13. Зинченко В. Н., Лушин С. П. Контроль качества обработки поверхности пьезоэлектрических образцов с помощью пьезоэффекта / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. Т. 72. № 5. С. 31 – 33.
14. Tyunkov A. V., Zolotukhin D. B., Yushkov Y. G., et al. Local ion-plasma etching of dielectrics initiated and controlled by the electron beam in fore-vacuum pressure range / Vacuum. 2020. Vol. 180. P. 109573. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109573
15. Burdovitsin V. A., Golosov D. A., Oks E. M., et al. Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum / Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 358. P. 726 – 731. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.11.081
16. Shchukin V. G., Konstantinov V. O., Morozov V. S. High-efficiency electron source with a hollow cathode in technologies of thin film deposition and surface treatment under forevacuum pressures / Technical physics. 2018. Vol. 63. N 6. P. 888 – 893. DOI: 10.1134/S1063784218060191
17. Власов А. И., Пустовалов В. А. Универсальный комплекс настройки частоты кварцевых генераторов и пьезоэлектрических фильтров / Датчики и системы. 2014. № 12. С. 46 – 51.
18. Лебедева Н. М., Самсонова Т. П., Ильинская Н. Д. и др. Формирование SiC меза-структур с пологими боковыми стенками сухим селективным травлением через маску из фоторезиста / Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 6. С. 997 – 1000. DOI: 10.21883/jtf.2020.06.49289.12-20

19. **Гошля Р. Ю.** Настройка монолитных кварцевых фильтров методом ионно-плазменного травления электродов пьезосистемы фильтра / Компоненты и технологии. 2009. № 96. С. 136 – 139.

REFERENCES

1. **Koigerov A. S.** Staircase filters on flowing surface acoustic waves on a lithium niobate substrate / Nano- Mikrosist. Tekhn. 2021. Vol. 23. N 3. P. 139 – 147 [in Russian]. DOI: 10.17587/nmst.23.139-147
2. **Roshchupkin D. V.** Investigation of the operation of acousto-electronic devices on surface acoustic waves / Elektron. Tekhn. Ser. 3. Mikroelektron. 2021. N 1. P. 5 – 11 [in Russian].
3. **Torgash T. N., Kozlov A. G.** Ladder filter based on microelectronic OAV resonators with a Bragg reflector / Dinam. Sist. Mekhanizmov Mashin. 2017. Vol. 5. N 4. P. 272 – 276. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.359.364
4. **Medvedev A., Gruzinenko V., Milenin P.** Piezoelectric single crystals used in resonators, generators, filters and sensors on volumetric acoustic waves / Kompon. Tekhnol. 2009. N 90. P. 114 – 115 [in Russian].
5. **Dubinin R. A., Kozlov A. G.** Analysis of the characteristics of L-links for microwave filters on AAV resonators / Dinam. Sist. Mekhanizmov Mashin. 2019. Vol. 7. N 2. P. 190 – 196 [in Russian]. DOI: 10.25206/2310-9793-7-2-190-196
6. **Naumenko N. F.** High-velocity non-attenuated acoustic waves in LiTaO₃/quartz layered substrates for high frequency resonators / Ultrasonics. 2019. Vol. 95. P. 1 – 5. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.03.001
7. **Kugaenko O. M., Torshina E. S., Petrakov V. S., et al.** The effect of high-temperature annealing on the microhardness anisotropy of crystals of the langasite family / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 7. P. 34 – 41 [in Russian].
8. **Lozhnikov A. O.** Application of measurement results of s-parameters for automation of electronics production / Tekhn. Radiosvyazi. 2012. N 18. P. 79 – 82 [in Russian].
9. **Torgash T. N., Kozlov A. G.** Influence of design parameters of the OAV resonator on the frequency response of a filter with acoustically coupled resonators / Dinam. Sist. Mekhanizmov Mashin. 2020. Vol. 8. N 4. P. 67 – 72 [in Russian]. DOI: 10.25206/2310-9793-8-4-67-72
10. **Dvoesherstov M. Yu., Dudin A. L., Kazimirsky S. V., et al.** Development of microwave filters based on volumetric acoustic waves / Nanoindustriya. 2020. N S96 – 1. P. 359 – 364 [in Russian]. DOI: 10.22184/1993-8578.2020.13.3s.359.364
11. **Zaitsev B. D., Semenov A. P., Teplykh A. A., et al.** Determination of parameters of elements of an equivalent piezoelectric resonator circuit / Radiotekhnika. 2019. Vol. 83. N 7. P. 20 – 25 [in Russian]. DOI: 10.18127/j00338486-201907(10)-04
12. **Kondratenko V. S., Batrameev N. V.** Influence of the geometry of the electrode coating on the parameters of quartz resonators with frequencies above 125 MHz / Usp. Prikl. Fiz. 2020. Vol. 8. N 2. P. 155 – 159 [in Russian].
13. **Zinchenko V. N., Lyushin S. P.** Quality control of surface treatment of piezoelectric samples using piezoelectric effect / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2006. Vol. 72. N 5. P. 31 – 33 [in Russian].
14. **Tyunkov A. V., Zolotukhin D. B., Yushkov Y. G., et al.** Local ion-plasma etching of dielectrics initiated and controlled by the electron beam in fore-vacuum pressure range / Vacuum. 2020. Vol. 180. P. 109573. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109573
15. **Burdovitsin V. A., Golosov D. A., Oks E. M., et al.** Electron beam nitriding of titanium in medium vacuum / Surface and Coatings Technology. 2019. Vol. 358. P. 726 – 731. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.11.081
16. **Shchukin V. G., Konstantinov V. O., Morozov V. S.** High-efficiency electron source with a hollow cathode in technologies of thin film deposition and surface treatment under forevacuum pressures / Technical physics. 2018. Vol. 63. N 6. P. 888 – 893. DOI: 10.1134/S1063784218060191
17. **Vlasov A. I., Pustovalov V. A.** Universal frequency tuning complex of quartz generators and piezoelectric filters / Datchiki Sist. 2014. N 12. P. 46 – 51 [in Russian].
18. **Lebedeva N. M., Samsonova T. P., Ilyinskaya N. D., et al.** Formation of SiC mesastructures with flat side walls by dry selective etching through a photoresist mask / Zh. Tekhn. Fiz. 2020. Vol. 90. N 6. P. 997 – 1000 [in Russian]. DOI: 10.21883/jtf.2020.06.49289.12-20
19. **Goshlya R. Yu.** Adjustment of monolithic quartz filters by ion-plasma etching of the electrodes of the piezo filter system / Kompon. Tekhnol. 2009. N 96. P. 136 – 139 [in Russian].