

УДК 621.396.69 EDN DYYODD

## Особенности формирования плат из высокоомного кремния для малогабаритных СВЧ-фильтров космического назначения

**В. М. Запетляев**, *zapatlyaev.vt@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. А. Жуков**, *д. т. н., профессор, zhikov.aa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

ФГБОУ «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**А. Е. Ануров**, *к. т. н., anurov.ae@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**А. С. Корпухин**, *к. т. н., korpuhin.as@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**С. Д. Якухин**, *yakuhin.sd@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье представлен технологический процесс изготовления плат СВЧ-фильтров на основе высокоомного кремния с применением технологии интегрированного в подложку волновода (SIW — Substrate Integrated Waveguide). Показана актуальность применения высокоомного кремния как материала для создания СВЧ-устройств космического назначения. Рассмотрены особенности процессов ионно-плазменного травления кремния, двустороннего термовакуумного напыления системы металлов и получения двустороннего топологического рисунка на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями, которые в совокупности обеспечивают получение заданного результата. В соответствии с описанным в статье технологическим процессом изготовлены платы полосовых СВЧ-фильтров на частоты до 20 ГГц.

Авторами показано, что наибольшее влияние на точность изготовления элементов платы СВЧ-фильтра и, как следствие, на характеристики устройств в аппаратуре РКТ, оказывают: ионно-плазменное травление микроотверстий в кремнии, термовакуумное напыление системы металлов и фотолитографии для получения топологического рисунка в слое металлизации на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями.

**Ключевые слова:** SIW-технология, СВЧ-фильтр, высокоомный кремний, фотолитография, двусторонний топологический рисунок на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями

## Features of Boards Formation from High Resistive Silicon for Small-Size Space Microwave Filters

**V. M. Zapetlyayev**, *zapetlyayev.vm@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. A. Zhukov**, *Dr. Sci. (Engineering), Professor, zhukov.aa@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

**A. E. Anurov**, *Cand. Sci. (Engineering), anurov.ae@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**A. S. Korpukhin**, *Cand. Sci. (Engineering), korpukhin.as@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**S. D. Yakukhin**, *yakukhin.sd@spacecorp.ru*

*Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The paper presents the technological process of manufacturing microwave filter boards based on high resistive silicon using the Substrate Integrated Waveguide (SIW) technology. The urgency of application of high resistive silicon as a material for creation of space microwave devices is shown. Features of processes of ion-plasma etching of silicon, two-sided thermovacuum sputtering of metal system and obtaining of two-sided topological pattern on substrates with through metallized microholes, which together provide obtaining the specified result, are considered. In accordance with the technological process described in the paper, the boards of bandpass microwave filters for frequencies up to 20 GHz were manufactured.

The authors showed that the greatest influence on the accuracy of manufacturing of microwave filter board elements and, consequently, on the characteristics of devices in rocket and space technology equipment is exerted by: ion-plasma etching of microholes in silicon, thermovacuum sputtering of metal system, and photolithography to obtain the topological pattern in the metallization layer on substrates with through metallized microholes.

**Keywords:** SIW-technology, microwave filter, high resistivity silicon, photolithography, bilateral topological pattern on substrates with through metallized microholes

## Введение

В настоящее время основной тенденцией развития бортовой аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ) является уменьшение массогабаритных характеристик при расширении функциональных возможностей и увеличении срока активного существования. Также наблюдается рост несущих частот линий связи космического назначения, требующий уменьшения размеров элементов устройств СВЧ-техники. На сегодняшний день в бортовой аппаратуре РКТ применяются различные типы фильтрующих устройств: планарные микрорешетчатые, на основе прямоугольного волновода, SIW-структуры и др. SIW-технология имеет ряд преимуществ: возможность интегрировать многие компоненты на одной подложке, включая пассивные компоненты, активные элементы и антенны. При реализации SIW-технологий повсеместно используют керамику с низкой температурой обжига (LTCC — Low Temperature Co-Fired Ceramic). Погрешности изготовления элементов в LTCC-технологии ограничивают ее применение на частотах выше 100 ГГц [1]. В свою очередь, факторы космического пространства в значительной степени влияют на СВЧ-характеристики конструкционных материалов. Производимые по классическим технологиям устройства испытывают дрейф характеристик в условиях космического пространства и, как следствие, непригодны для использования в новой аппаратуре космических аппаратов. Применение высокоомного кремния в качестве материала для изготовления плат СВЧ-фильтров [2] позволяет уменьшить температурный дрейф характеристик устройств, поэтому разработка технологии изготовления плат СВЧ-фильтров на основе высокоомного кремния и выявление технологических ограничений весьма актуальны.

## Цель работы

Разработка технологии изготовления плат полосовых СВЧ-фильтров космического назначения с применением технологии интегрированного в подложку волновода на основе высокоомного кремния.

## Задачи работы

- разработка технологического процесса изготовления плат СВЧ-фильтров на основе высокоомного кремния;
- выявление технологических ограничений процесса изготовления.

## Объект исследования

Объектом исследования служит технологический процесс изготовления плат СВЧ-фильтров. СВЧ-фильтр, изготовленный по SIW-технологии (рис. 1), включает следующие компоненты: метал-

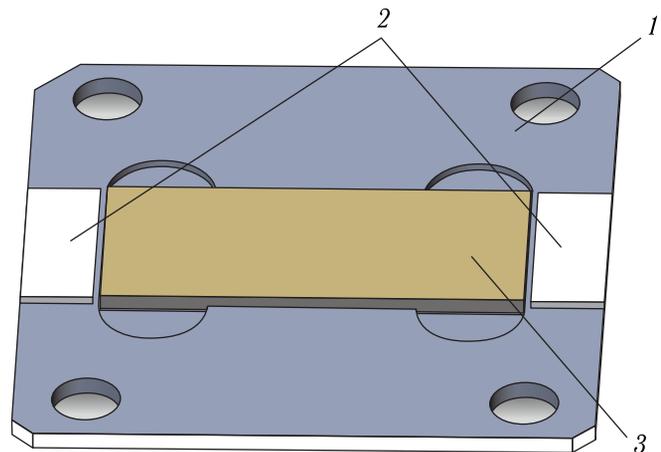


Рис. 1. Модель СВЧ-фильтра, где 1 — металлическое основание, 2 — переходные платы, 3 — плата фильтра

лическое основание (1), которое служит для обеспечения прочности и термической стабильности устройства; двух переходных плат (2), обеспечивающих подвод СВЧ-энергии от внешних контактов; платы фильтра с интегрированными в подложку волноводами (3), выполненной из высокоомного кремния, обеспечивающей требуемые СВЧ-характеристики устройства. Плата фильтра представляет собой кремниевый кристалл с выполненными в нем рядами сквозных микроотверстий диаметром до нескольких сотен микрометров, покрытый многослойной системой металлизации хром-медь-золото (включая поверхность микроотверстий), с топологическим рисунком в металлизации на планарных поверхностях.

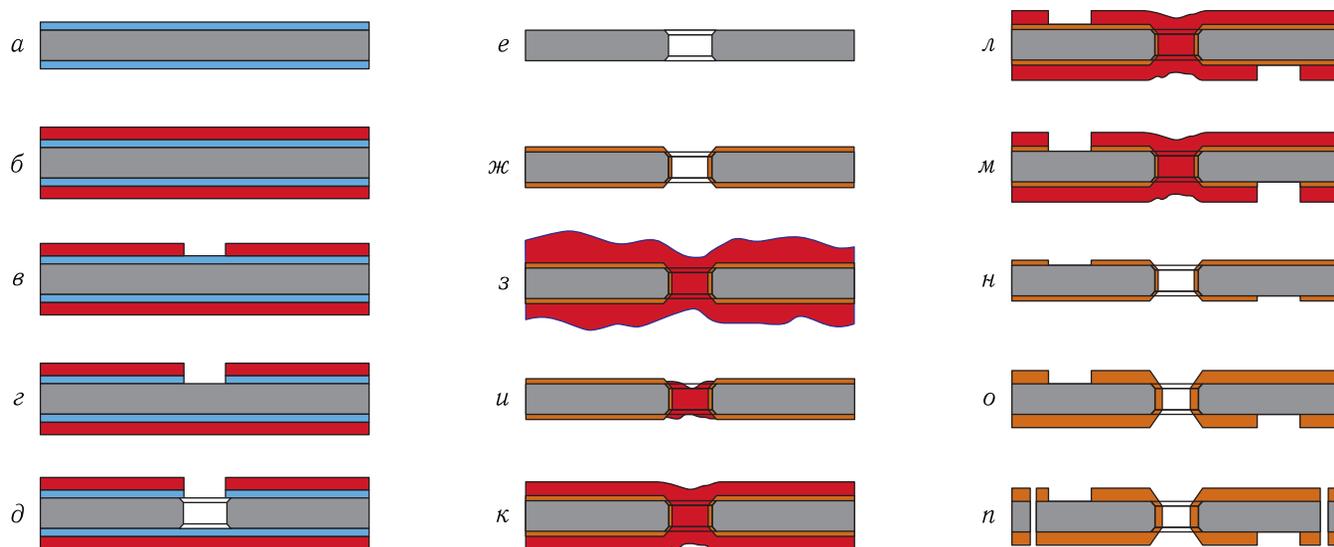


Рис. 2. Блок-схема технологического процесса изготовления платы СВЧ-фильтра, где *a* — окисление кремния; *б* — двустороннее нанесение фоторезиста (ФР); *в* — фотолитография; *г* — жидкостное химическое травление окисла кремния; *д* — ионно-плазменное травление кремния; *е* — удаление покрытий; *ж* — двустороннее термовакуумное напыление системы металлов; *з* — нанесение ФР методом окунания; *и* — химико-механическое удаление ФР с поверхности; *к* — двустороннее нанесение ФР распылением; *л* — двусторонняя фотолитография; *м* — жидкостное химическое травление системы металлов; *н* — удаление покрытий; *о* — гальваническое осаждение системы металлов; *п* — дисковая резка на отдельные платы

При изготовлении платы фильтра необходимо применение комбинации процессов ионно-плазменного травления для получения массива сквозных микроотверстий заданного диаметра, термовакуумного напыления системы металлов хром–медь, обеспечивающего гарантированное покрытие как планарных поверхностей исходной пластины, так и поверхности стенок микроотверстий, фотолитографии по специальному технологическому маршруту, жидкостного химического травления системы металлов, гальванического доращивания слоев меди–золота и дисковой резки кремниевой заготовки на кристаллы. Блок-схема технологического процесса представлена на рис. 2.

При анализе технологии изготовления было выявлено, что технологические операции ионно-плазменного травления микроотверстий, вакуумного напыления системы металлов и фотолитографии на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями оказывают влияние на точность изготовления элементов платы СВЧ-фильтра и, как следствие, на СВЧ-характеристики конечного устройства.

## Методы исследования

Измерение геометрических размеров топологических элементов и анализ формы отверстий проводили методом оптической микроскопии при увеличении 100–1000 крат и растровой электронной микроскопии при увеличении 1000–2000 крат. Контроль отсутствия травления металлизации в микроотверстиях осуществлялся путем измерения электрических параметров (омического сопротивления) между двумя металлизированными планарными поверхностями с помощью контактного устройства и миллиметра.

## Результаты исследования

Ионно-плазменное травление отверстий требуемых размеров в кремниевой пластине происходит за счет химического и физического взаимодействий между ионами травящего газа и атомами кремниевой подложки [3]. Варьируя рабочее давление процесса, можно реализовать ионно-лучевое, изотропное химическое, ионно-стимулированное и ионно-

стимулированное травление с участием пассивирующих частиц-ингибиторов [4]. Для получения вертикальных отверстий применяются Bosch-процесс, криопроецесс или смешанный процесс травления (Pseudo Bosch-процесс) [5]. Для травления глубоких (более 400 мкм) вертикальных отверстий наиболее производительным является Bosch-процесс, позволяющий достичь высокой скорости травления (не менее 3,5 мкм/мин) с приемлемым качеством боковой поверхности отверстий. В Bosch-процессе используется циклическая смена этапов травления: на первом этапе ионы фтора, полученные из элегаза, вступают в реакцию с атомами кремния, при этом образуется газообразное соединение фторида кремния и этапа пассивации, при котором на поверхности кремния высаживается защитная пленка [6]. Применение адаптивного Bosch-процесса с изменением параметров процесса (смещение, расход газов, давление в камере) от глубины травления позволило добиться анизотропии травления  $90 \pm 1$  угловой градус, средней скорости травления 4,4 мкм/мин при шероховатости боковых стенок отверстий не более 500 нм.

Напыление системы металлов хром–медь на две стороны кремниевых пластин проводилось двумя методами — термовакуумным и магнетронным. После получения готовых изделий было выявлено, что оба метода обеспечивают конформное покрытие хромом и медью планарной поверхности кремниевых пластин и в отверстиях, однако магнетронный метод формирования в некоторых случаях вызывал отслаивание металлизации от поверхности пластин вместе с кремнием, что говорит о высоких напряжениях в металлическом покрытии, формируемых магнетронным методом. Поэтому для последующего изготовления продукции был выбран именно термовакуумный метод напыления системы металлов хром–медь. При исследовании запыляемости системой металлов микроотверстий термовакуумным методом выявлено, что конформное покрытие внутренней поверхности микроотверстия достигается при диаметре отверстия более 100 мкм и толщине напыляемых слоев не менее 3,5 мкм.

При получении двустороннего топологического рисунка методами фотолитографии и химического травления на подложках с микроотверстиями возникают следующие технические проблемы:

– возникновение «комет» при нанесении ФР на металлизированные кремниевые подложки со сквозными микроотверстиями методом центрифугирования из-за невозможности затекания ФР в отверстия, что приводит при последующем травлении планарного топологического рисунка металлизации к стравливанию медного слоя в сквозных отверстиях;

– неравномерное маскирование в сквозных отверстиях металлизации при применении аэрозольного метода нанесения ФР или нанесения ФР вальцами, что приводит к возможности травления металлизации;

– образование клина в покрытии по толщине при нанесении ФР методом окунания из-за стекания последнего под действием силы тяжести, что приводит к невозможности получения топологического рисунка требуемых геометрических размеров.

На основании проведенных экспериментов предложен комбинированный метод — последовательность технологических операций [7], представленная ниже:

– нанесение ФР на подложку со сквозными металлизированными микроотверстиями методом окунания;

– проведение термообработки ФР последовательно в два этапа: первый этап при температуре меньше температуры сушки ФР. Второй этап при требуемой температуре сушки ФР. Например, после нанесения ФР проводят термообработку при температуре равной половине температуры сушки ФР в течение не менее четырех часов, а после при температуре сушки ФР в течение не менее двух часов;

– удаление ФР с металлизированных поверхностей подложки химико-механической обработкой с растворителем ФР с двух сторон;

– нанесение ФР спреевым методом на лицевую сторону подложки при размере капель ФР  $d_k \ll d_{отв}$ , где  $d_k$  — диаметр капли ФР,  $d_{отв}$  — диаметр сквозного микроотверстия;

– проведение завершающей сушки ФР после нанесения на лицевую сторону подложки при температуре 100 °С;

– нанесение ФР спреевым методом на обратную сторону подложки при размере капель ФР

$d_k \ll d_{отв}$ , где  $d_k$  — диаметр капли ФР,  $d_{отв}$  — диаметр сквозного микроотверстия;

– завершающая сушка ФР после нанесения на обратную сторону подложки при температуре 100 °С;

– двусторонняя фотолитография, включающая экспонирование, проявление, задубливание и последующее травление металлизации и удаление ФР, в том числе и из отверстий.

Отсутствие травления металлизации в микроотверстиях подтверждается измерением омического сопротивления между двумя поверхностями до и после формирования двустороннего топологического рисунка в металлизации на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями. Как до, так и после двусторонней фотолитографии омическое сопротивление составляло менее 0,01 Ом, что свидетельствует об отсутствии травления металлизации.

Готовые пластины со сформированным топологическим рисунком подвергались дисковой резке вдоль цепочки отверстий с последующим визуальным контролем целостности металлизации. Полученное изображение представлено на рис. 3.

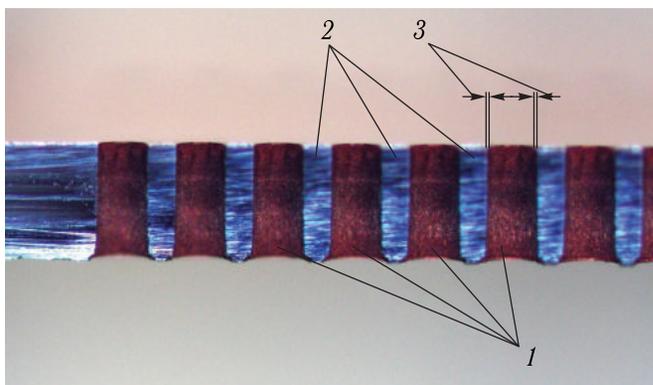


Рис. 3. Металлизация внутри микроотверстий после формирования двустороннего топологического рисунка, где 1 — микроотверстия, 2 — кремний, 3 — толщина металлизации

При использовании последовательности технологических операций, показанной на рис. 2, получены годные платы СВЧ-фильтра с коэффициентом выхода годной продукции примерно 30%, что позволяет использовать данную технологию для мелкосерийного производства СВЧ-приборов для аппа-

ратуры РКТ. Данные по выходу годной продукции носят оценочный характер в связи с малым объемом изготовленных изделий.

## Выводы

Таким образом, авторами разработан технологический процесс изготовления плат СВЧ-фильтров на основе высокоомного кремния, позволяющий изготавливать платы полосовых СВЧ-фильтров на частотах до 20 ГГц в условиях мелкосерийного производства. Выявлены технологические операции, наиболее сильно влияющие на процесс изготовления. К ним относятся ионно-плазменное травление микроотверстий в кремнии, термовакуумное напыление системы металлов и фотолитографии для получения топологического рисунка в медном слое на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями. Эти операции оказывают наибольшее влияние на точность изготовления элементов платы СВЧ-фильтра и, как следствие, на СВЧ-характеристики устройств в аппаратуре РКТ. Выявлены технологические ограничения процесса изготовления плат СВЧ-фильтра: применение BOSCH-травления микроотверстий с диаметром не более 100 мкм, двустороннее термовакуумное напыление системы металлов хром–медь толщиной не менее 3,5 мкм, применение комбинированного метода проведения фотолитографии на подложках со сквозными металлизированными микроотверстиями.

## Список литературы

1. Гадзиева А. А., Заргано Г. Ф., Земляков В. В., Крутиев С. В. SIW-технологии, история создания, современное состояние и перспективы развития // Физические основы приборостроения, 2012, т. 1, № 4. С. 4–13.
2. Жуков А. А., Алимов М. В., Якухин С. Д., Крылов Г. С. Патент № 2686486 Российской Федерации, МПК H01P 1/20 (2006.01). СВЧ-фильтр на основе интегрированного в подложку волновода и способ его изготовления, № 2018115536; заявл. 25.04.2018; опубликовано 29.04.2019; заявитель АО «Российские космические системы», 23 с.
3. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение: М.: Техносфера, 2004. 528 с.

4. *Григорьев Ф.И.* Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники: Учеб. пособ. М.: Московский государственный институт электроники и математики, 2003. 48 с.
5. ICP-RIE установки плазменного травления SI 500 C: [сайт]. 2023. <http://eav.su/catalog/mikroelektronika-oborudovanie-pribory-ustanovka/tehnologicheskoe-oborudovanie/plazmennoe-travlenie/icp-rie-ustanovki-plazmennogo-travleniya-si-500-c> (Дата обращения 15.05.2023).
6. *Ануров А.Е.* Методы формирования объемных микроструктур устройств микроэлектроники и микросистемной техники космического назначения: дисс.... канд. техн. наук: 05.27.01. М., 2018. 149 с.
7. *Жуков А.А., Запетляев В.М.* Патент № 2671543 Российской Федерации, МПК H01L 21/308 (2006.01). Способ создания двустороннего топологического рисунка в металлизации на подложках со сквозными металлизированными отверстиями, № 2017122422; заявл. 26.06.2017; опубликовано 01.11.2018; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство обороны Российской Федерации. 11 с.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 27.07.2023  
Дата принятия рукописи  
в печать 27.10.2023