

Рис. 3. Вольтфарадные характеристики конденсаторных элементов в МСЭП-структуре на кремниевой подложке: а – n-типа; б – p-типа

Выводы

Исследованы режимы формирования на кремниевых подложках тонкоплёночных сегнетоэлектриков состава $Ba_{0,2}Sr_{0,8}TiO_3$ и установлено, что диапазон температур 710–730 °С является предпочтительным для формирования эпитаксиальных плёнок $Ba_{0,2}Sr_{0,8}TiO_3$.

Созданы на основе гетероструктур металл–сегнетоэлектрик–кремний n- или p-типа электронно-управляемые конденсаторные элементы.

В конденсаторных элементах два состояния сегнетоэлектрической поляризации разной полярности позволяют использовать МСЭП-структуры для создания запоминающих устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 16.513.11.3072), РФФИ (проект № 12-07-00662-а), Программы фундаментальных исследований Президиума

РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Список литературы

1. Ковтонок Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник–диэлектрик. М. : Энергия, 1976.
2. Воротилов К. А., Мухортов В. М., Сигов А. С. Интегрированные сегнетоэлектрические устройства / под ред. чл.-корр. РАН А. С. Сигова. М. : Энергоатомиздат, 2011. 175 с.
3. Афанасьев М. С., Иванов М. С. Особенности формирования тонких сегнетоэлектрических плёнок $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ на различных подложках методом высокочастотного распыления // ФТТ. 2009. Т. 51, № 7. С. 1259–1262.
4. Гольдман Е. И., Ждан А. Г., Чучева Г. В. Определение коэффициентов ионного переноса в диэлектрических слоях на поверхности полупроводников по динамическим вольтамперным характеристикам деполяризации // ПТЭ. 1997. № 2. С.110–115.

УДК 537.9

РАСЧЁТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МПЛ СВЧ ДИАПАЗОНА

М. С. Афанасьев, С. А. Левашов, А. Ю. Митягин, Г. В. Чучева, А. Э. Набиев¹

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук
E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

¹Азербайджанский государственный педагогический университет
E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru



Проведен расчёт теплофизических параметров микрополосковой линии передачи (МПЛ) СВЧ диапазона. Расчёты показали, что высокая теплопроводность алмаза позволяет осуществлять эффективный отвод тепла от активной зоны МПЛ, увеличивая мощ-

ность входного сигнала до 50 Вт на частоте 3 ГГц без ухудшения частотных характеристик МПЛ.

Ключевые слова: микрополосковая линия передачи, СВЧ, тонкие плёнки, алмазная подложка.



Calculation of Thermal Parameters and Technology of Formation MPL Microwave Range

M. S. Afanasiev, S. A. Levashov, A. Yu. Mityagin,
G. V. Chucheva, A. E. Nabiev

The calculation of thermal parameters of super-high frequency microstrip microwave is performed. Calculations showed, that the high thermal conductivity of a diamond enables effective removal of heat from the active zone of microstrip microwave, increasing the output power up to 50 W at 3 GHz frequency without compromising the frequency characteristics of microstrip microwave

Key words: microstrip line, super-high frequencies, thin films, diamond substrate.

Введение

В настоящее время при разработке большинства СВЧ устройств широкое применение получили интегральные схемы. Основу таких схем составляют копланарные волноводы – микрополосковые линии передачи (МПЛ), выполненные в виде тонких плёнок металла, нанесенные на высокоомные с низкой диэлектрической проницаемостью подложки.

При создании интегральных устройств СВЧ диапазона, включающих MPL [1], разработчики натолкнулись на значительные трудности, связанные с нагревом MPL из-за диссипации СВЧ энергии как в металлических проводниках, так и в подложках.

Частично эту трудность удалось преодолеть [2], используя в MPL проводники большего сечения и подложки с низкой величиной диэлектрической проницаемости.

Вместе с тем повышение уровня входной мощности при сохранении или снижении массогабаритных параметров устройств является актуальной задачей СВЧ электроники. При этом следует отметить возможности интегральной технологии в сочетании с применением новых материалов, что позволяет получить выигрыш по отмеченным параметрам.

Цель работы – создание MPL СВЧ диапазона повышенной мощности и оценка её параметров.

Задачи работы: расчёт теплофизических параметров MPL СВЧ диапазона и технология формирования MPL на алмазных подложках.

Результаты расчета параметров MPL

Проведен расчёт параметров трехпроводной копланарной MPL СВЧ диапазона, выполненной на высокоомных керамических подложках MgO, BeO, Al₂O₃, SiO₂, ZrO₂, Si₃N₄, наиболее употребляемых для создания СВЧ интегральных схем, а также подложках алмаза. Разнообразие мате-

риалов подложек обусловлено функциональным назначением и эксплуатационными параметрами интегральных СВЧ устройств.

В расчетах использованы методики проектирования СВЧ полосковых устройств [3–8] и пакет программ AppCAD, Txline для оптимизации в рабочем диапазоне частот линейных размеров MPL.

По методике [6, 7] определен допустимый уровень мощности (P_{\max}) СВЧ сигнала, обеспечивающий работоспособность MPL. При определении P_{\max} приняты следующие допущения и ограничения MPL: волновое сопротивление $Z_0 = 50$ Ом; СВЧ сигнал – непрерывный; частота (f) 10^{10} Гц; подложка имеет идеальный тепловой контакт с окружающей средой и рассеяние тепла от токового проводника из алюминия (Al) происходит посредством теплопередачи через подложку. Уровень СВЧ мощности ограничен 300°C – допускаемой температурой нагрева (T) конструкции MPL, так как при нагреве выше 300°C в конструкционных материалах появляются необратимые изменения физических свойств, приводящие к потере работоспособности как составных частей MPL, так и СВЧ устройств в целом.

Для расчета P_{\max} использованы кристаллофизические данные материалов MPL. Диэлектрическая проницаемость подложек ($\epsilon_{\text{подл}}$), перечисленных керамических материалов и алмаза составляет от 5 до 17. В керамических подложках и синтетическом алмазе диэлектрические потери ($\text{tg}\delta$), отнесенные к частоте 10 ГГц, находятся на уровне $\approx 10^{-3}$. В монокристаллических подложках с высоким структурным совершенством величина потерь снижается до 10^{-4} . Коэффициенты теплопроводности (КТ) перечисленных материалов лежат в широком интервале значений от 4 Вт/(м·К) в SiO₂ и ZrO₂ до 2000 Вт/(м·К) для алмаза.

С использованием эмпирической формулы $P_{\max} = (KT/\alpha) (W/h)$ при $T = 300^\circ\text{C}$ оценена (рис. 1) P_{\max} для MPL, выполненных на подложках из различных материалов, при толщине подложки $h = 1.0$ мм и ширине токонесущего проводника $W = 30 \pm 5$ мкм. Погонное затухание электромагнитной волны (α) в MPL определено как сумма потерь в металлическом никеле (Ni) $\alpha_{\text{Ni}} = 8.7 R_{\text{Ni}}/(Z_0 2\pi f)$ и подложке $\alpha_{\text{подл}} = 27.3(\epsilon_{\text{подл}} 0.5/\lambda)\text{tg}\delta$.

Следует отметить, что в СВЧ диапазоне потери в подложке становятся сравнимыми с потерями в металлических проводниках, поскольку потери в диэлектрике с ростом частоты возрастают по линейному закону, в то время как потери в металлах-проводниках возрастают пропорционально квадрату корню из частоты [8].



Рис. 1. Допустимый уровень мощности (P_{\max}) МПЛ, выполненных на подложках из различных материалов

Результаты расчета показали (см. рис. 1), что при всех равных условиях уровень мощности (P_{\max}) СВЧ сигнала в МПЛ возрастает при использовании подложек с высоким структурным совершенством, а материала подложек – с высокой теплопроводностью.

Максимальная эффективность теплоотвода от проводников МПЛ априорно может быть достигнута изготовлением МПЛ на диэлектрике с аномально высокой теплопроводностью. Этим требованиям в полной мере удовлетворяют высокоомные синтетические и природные алмазы с проводимостью на уровне 10^{14} – 10^{15} Ом·см, диэлектрической проницаемостью 5.7 и теплопроводностью 2000 Вт·см·К (в десятки раз превышающую теплопроводность известных используемых диэлектрических материалов). Снижение потерь СВЧ энергии в металлических

проводниках МПЛ, как правило, достигается изготовлением проводников толщиной в 2–3 раза превышающей толщину скин-слоя в металле на верхней рабочей частоте.

Технология изготовления МПЛ

Технология формирования МПЛ включает напыление пленки металла на поверхность алмаза и создание топологического рисунка МПЛ фотогравировкой слоя металла.

В качестве металлических проводников МПЛ на алмазе предпочтительно использовать никель, обладающий высокой адгезией с алмазной подложкой. Для увеличения адгезии перед металлизацией поверхность алмаза гидрируют в плазме водорода, что исключает образование углеродных фаз, кристаллизующихся в структуре графита. Далее, закрыв одну поверхность алмаза теневой маской, напыляют адгезионный слой никеля толщиной 10 ± 5 нм. Адгезионный слой никеля напыляют методом DC катодного распыления в атмосфере аргона. Затем методом электронно-лучевого испарения на поверхность адгезионного слоя в вакууме напыляют слой аморфного никеля толщиной, превосходящей толщину скин-слоя на верхней рабочей частоте МПЛ. Далее методом жидкостной фотолитографии формируют топологический рисунок копланарной МПЛ.

Алмаз, обладая высокими механическими свойствами, позволяет создавать на сверхтонких подложках толщиной менее 100 мкм прочные конструкции СВЧ интегральных схем. На рис. 2 представлена зависимость волнового сопротивления МПЛ на алмазной подложке от отношения W/h на частоте 10 ГГц.

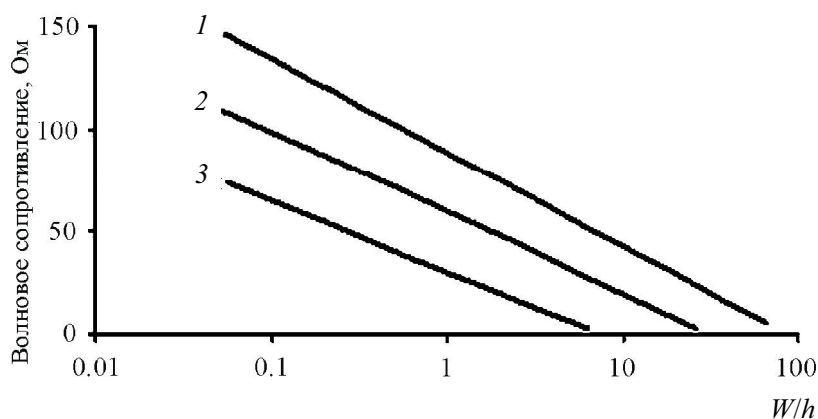


Рис. 2. Зависимость волнового сопротивления МПЛ на алмазной подложке от отношения W/h : $h = 1.0$ мкм (1); $h = 0.5$ мкм (2); $h = 0.25$ мкм (3)

На рис. 3 представлена зависимость влияния частоты СВЧ сигнала на P_{\max} для МПЛ, сформиро-

ванных на алмазной подложке толщиной 50 мкм с Z_0 , равным 30, 75 и 100 Ом.

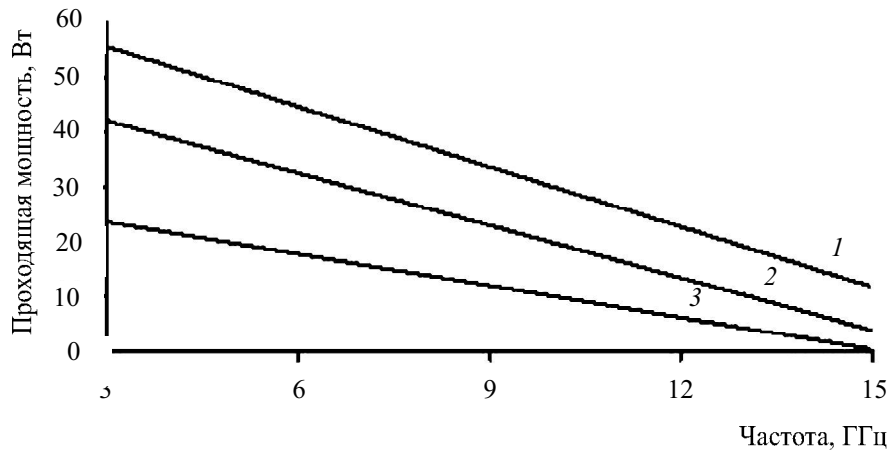


Рис. 3. Расчётная зависимость проходящей мощности от частоты для МПЛ с волновыми сопротивлениями 30 (1), 75 (2) и 100 (3) Ом

Выводы

Проведенные расчёты показали, что высокая теплопроводность алмаза позволяет осуществлять эффективный отвод тепла от активной зоны МПЛ, увеличивая мощность входного сигнала без ухудшения частотных характеристик МПЛ.

При этом совокупность электрических, механических, теплофизических свойств алмаза позволяет реализовать на его основе интегральные СВЧ устройства с повышенными функциональными параметрами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 16.513.11.3072), РФФИ (проект № 12-07-00662-а), Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов».

Список литературы

1. Нефедов Е. И., Фиалковский А. Т. Полосковые линии передачи. М. : Наука, 1980. 312 с.
2. Седаков А. Ю., Смолин В. К. Тонкопленочные элементы в микроэлектронике : основы проектирования и изготовления / под ред. А. Ю. Седакова. М. : Радиотехника, 2011. 168 с.
3. Денисов Д. С., Кондратьев Б. В., Лесик Н. И., Ляпунов Н. В., Сапрыкин И. И., Седых В. М. Полосковые линии и устройства сверхвысоких частот / под ред. В. М. Седых. Харьков : Вища шк., 1974. 276 с.
4. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / под ред. Н. Д. Девяткова. М. : Высш. шк., 1970. 439 с.
5. Веселов Г. И., Егоров Е. Н., Алехин Ю. Н., Воронина Г. Г., Романюк В. А., Разевиг В. Д., Чаплин А. Ф., Шеремет М. В. Микроэлектронные устройства СВЧ : учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов / под ред. Г. И. Веселова. М. : Высш. шк., 1988. 280 с.
6. Спектор Н. Оценка допустимой мощности в полосковой линии // Полосковые системы сверхвысоких частот / пер. с англ. ; под ред. В. И. Сушкевича. М. : Изд-во иностр. лит., 1959. С. 160–172.
7. Shiffres P. How much CW power can stripline handle // *Microwaves*. 1966. № 6. Р. 25–34.
8. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В. И. Вольмана. М. : Радио и связь, 1982. 328 с.