

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ АТТЕНУАТОРОВ СВЧ КАК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ С ПОТЕРЯМИ

Константин Якубович Аубакиров

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, к.т.н., доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383) 361-07-31, e-mail: aubakirov1949@mail.ru

Александр Викторович Макеев

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, ассистент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии, тел. (383) 361-07-31, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

В настоящей работе представлены результаты моделирования аттенуаторов с ослаблением 1,2 дБ и 1,8 дБ, выполненных на основе фильтра гармоник с резистивными вставками. В низкоомные участки фильтра гармоник введены резистивные вставки, к высокоомным участкам фильтра были подключены резистивные шлейфы. Предложена реализация аттенуатора на ослабление ≤ 10 дБ на основе квазиполиномиального полосового фильтра с потерями. Рабочая полоса частот таких аттенуаторов достигает 4 ГГц.

Ключевые слова: аттенуатор, фильтры СВЧ, пленочный резистор

DESIGNING MICROWAVE BAND ATTENUATORS AS ELECTRIC FILTERS WITH LOSSES

Constantine Y. Aubakirov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph.D., Associate Professor of Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383) 361-07-31, e-mail: aubakirov1949@mail.ru

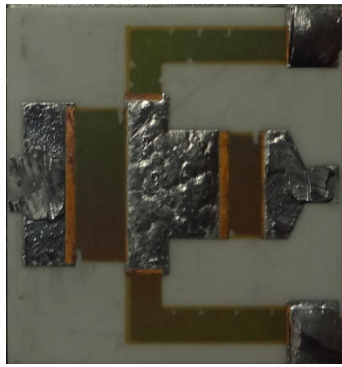
Alexander V. Makeev

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Assistant of Department of Special-purpose Devices, Innovatics and Metrology, phone: (383) 361-07-31, e-mail: makeeffsan@yandex.ru

This paper presents the results of modeling attenuators with an attenuation of 1,2 dB and 1,8 dB, based on a harmonic filter with resistive inserts. Resistive inserts were introduced into the low-resistance sections of the harmonic filter, and resistive loops were connected to the high-resistance sections of the filter. An implementation of a 10 dB attenuator based on a quasi-polynomial bandpass filter with losses is proposed. The working frequency band of such attenuators reaches 4 GHz.

Keywords: attenuator, microwave filters, film resistor

Распространенные конструкции аттенуаторов, выполненные в виде Т-образных структур, содержащих навесные или пленочные резисторы, рассмотрены в [1]. Реализации на керамике BeO представлены на рис. 1 (а, б), ослабление сигнала от 4 до 10 дБ, на керамике Al₂O₃ на рис. 1 (в, г) от 2 до 20 дБ.



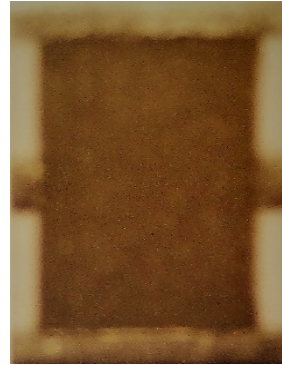
а) $S = 20 \times 20$ мм



б) $S = 15,5 \times 9,5$ мм



в) $S = 20 \times 5$ мм



г) $S = 20 \times 14$ мм

Рис. 1. Топологии Т-образных аттенюаторов:

а, б – керамика BeO (толщина $t = 4$ мм); в, г – керамика Al_2O_3 (толщина $t = 1$ мм)

Если первые две топологии с металлизированной тыльной стороной подложки, припаянной к теплоотводу, рассеивают до 2 Вт/мм^2 резистивной пленки и поглощают от 200 до 50 Вт СВЧ мощности в диапазоне $f \leq 1$ ГГц, то вторые не имеют равноценного теплоотвода, но при этом могут быть согласованы в полосе $f \geq 1,5$ ГГц [2, 3].

Аттенюаторы на ослабление $L \leq -2$ дБ были выполнены на основе семизвенного ступенчатого фильтра. Ступенчатый фильтр гармоник представляет собой цепочку каскадно соединенных отрезков однородных передающих линий, имеющих одинаковые электрические длины θ и различные волновые сопротивления ρ [4–6]. Также рассмотрены аттенюаторы, разработанные на базе квазиполномиальных полосовых фильтров с потерями [7].

На рис. 2 (а, б) представлены реализации аттенюаторов на ослабление 1,2 – 1,8 дБ на керамике BeO , рассчитанные с применением САПР [7]. Как видно из рис. 3, неравномерность коэффициента передачи такого аттенюатора в полосе рабочих частот до 4,5 ГГц не превышает 0,1 дБ, а $K_{\text{ст}U}$ не более 1,15. Данные результаты достигаются путем введения резистивных вставок в последовательные звенья фильтра, с поверхностным сопротивлением 10 Ом/квadrat. А для коррекции АЧХ в полосе рабочих частот, к участкам фильтра с высоким волновым

сопротивлением дополнительно включаются заземляющие шлейфы с поверхностным сопротивлением 800 Ом/квadrat

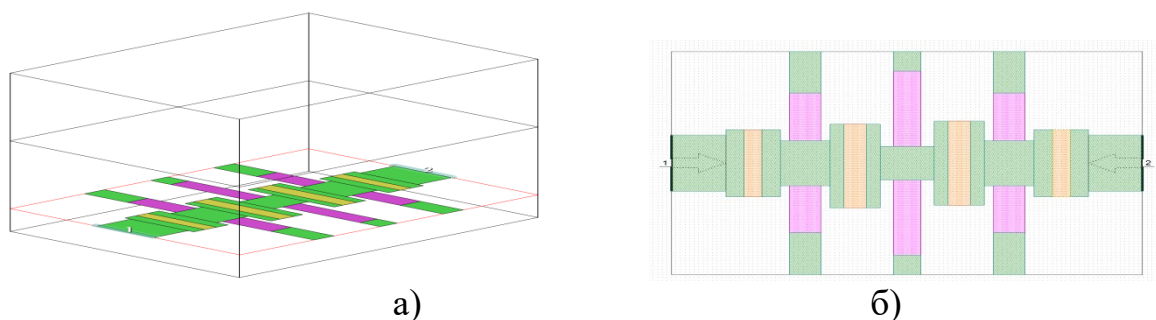
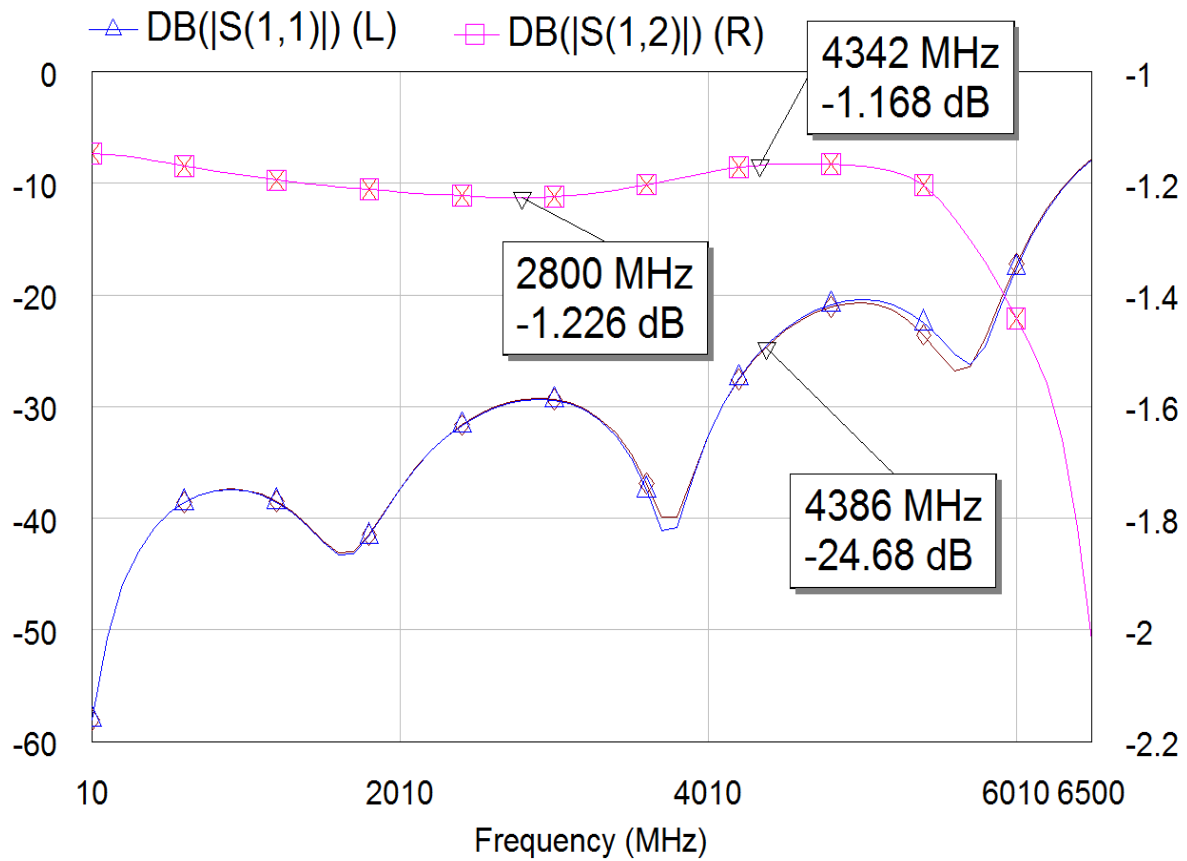


Рис. 2. Топология аттенюаторов 1,2 и 1,8 дБ

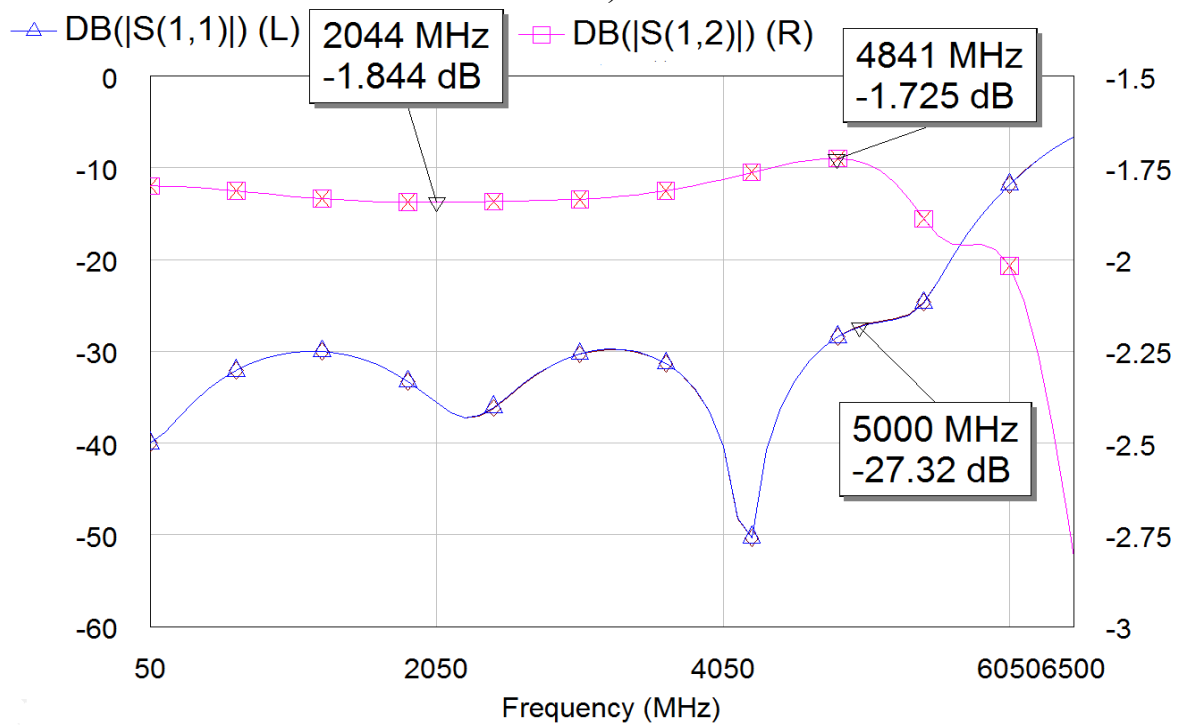
На рис. 2 представлены реализации аттенюаторов на 1,2 и 1,8 дБ ослабления, полученная при использовании САПР [10]. Как видно из рис. 3, неравномерность коэффициента передачи такого аттенюатора в полосе рабочих частот до 4,5 ГГц не превышает 0,15 дБ, а $K_{сгU}$ не более 1,1. Данные результаты достигаются путем введения резистивных вставок в последовательные звенья фильтра, с поверхностным сопротивлением 15 Ом/квadrat. А для коррекции АЧХ в полосе рабочих частот, к участкам фильтра с высоким волновым сопротивлением дополнительно включаются заземляющие шлейфы с поверхностным сопротивлением 650 Ом/квadrat [8].

Если рабочая полоса структуры рис.1 (а,б) ограничивается емкостной реакцией на землю первого пленочного резистора, то для расширения рабочей полосы оказалось достаточно распределить резистивные вставки внутри изначально широкополосной структуры без потерь с последующей коррекцией частотной зависимости ослабления RL – шлейфами на землю.

Для получения ослаблений, достигающих 10 дБ, при сохранении рабочей полосы аттенюатора – нагрузки, была разработана методика, позволяющая преобразовать квазиполиномиальный полосовой фильтр без потерь в аттенюатор [7,9]. Так на рис. 4 представлена электрическая схема, содержащая три каскадно соединенных звена с ослаблением 2, 3 и 5 дБ соответственно на керамике ВеО толщиной 4 мм.



a)



б)

Рис. 3. Частотные характеристики аттенюаторов: а) 1,2 дБ; б) 1,8 дБ

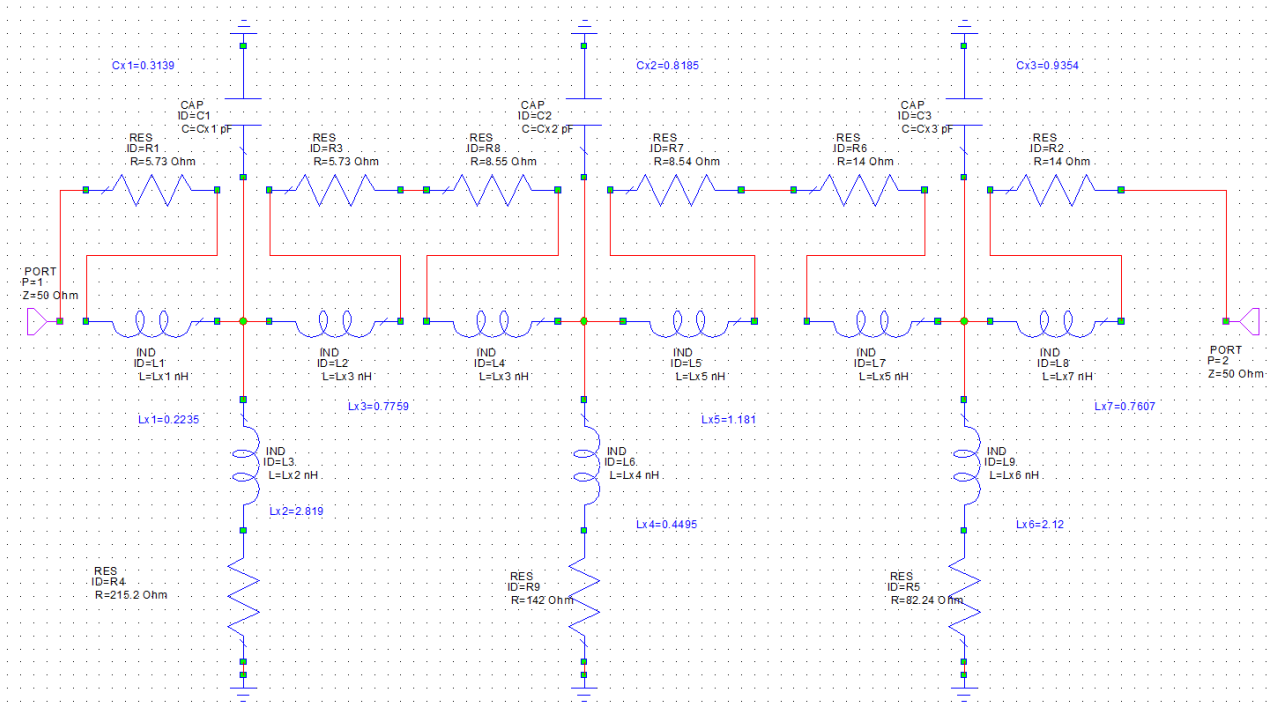


Рис.4. Квазиполиномиальный полосовой фильтр с потерями

Частотные характеристики схемы (рис.4) представлены на рис.5.

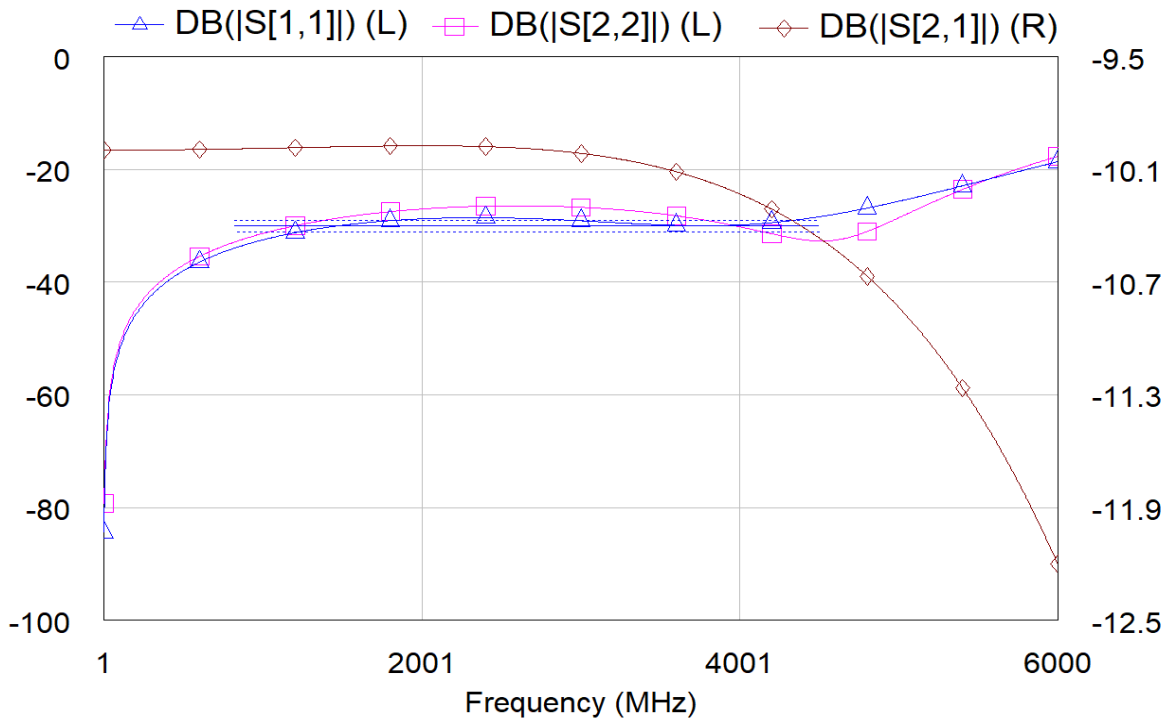


Рис. 5. Частотные свойства аттенюатора 10 дБ на основе квазиполиномиального фильтра с потерями

Топологии микрополосковых структур на керамике ВеО для звеньев с ослаблением 2, 3, 5 дБ представлены ниже.

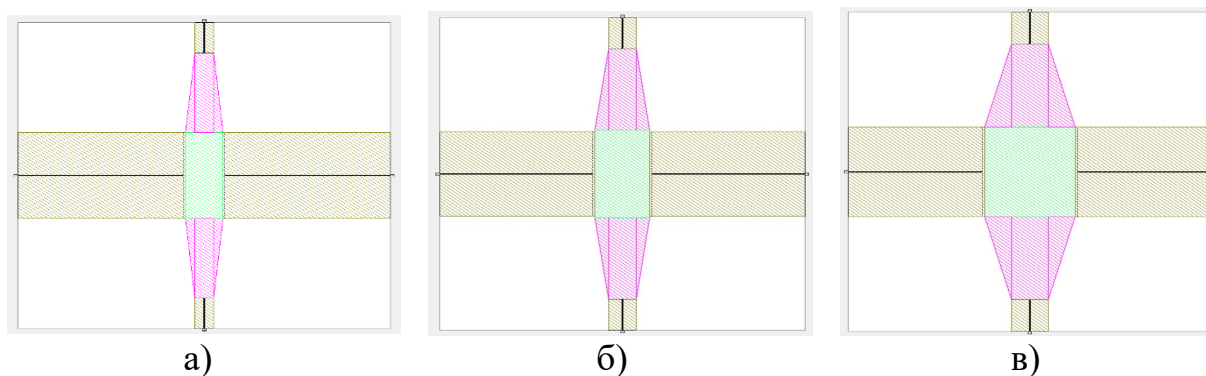


Рис.6. Топологии звеньев фильтра-аттенюатора:
a – 2 дБ; *б* – 3 дБ; *в* – 5 дБ

Каскадное соединение этих звеньев (рис.6) совместно с корректирующими индуктивностями (рис. 7)

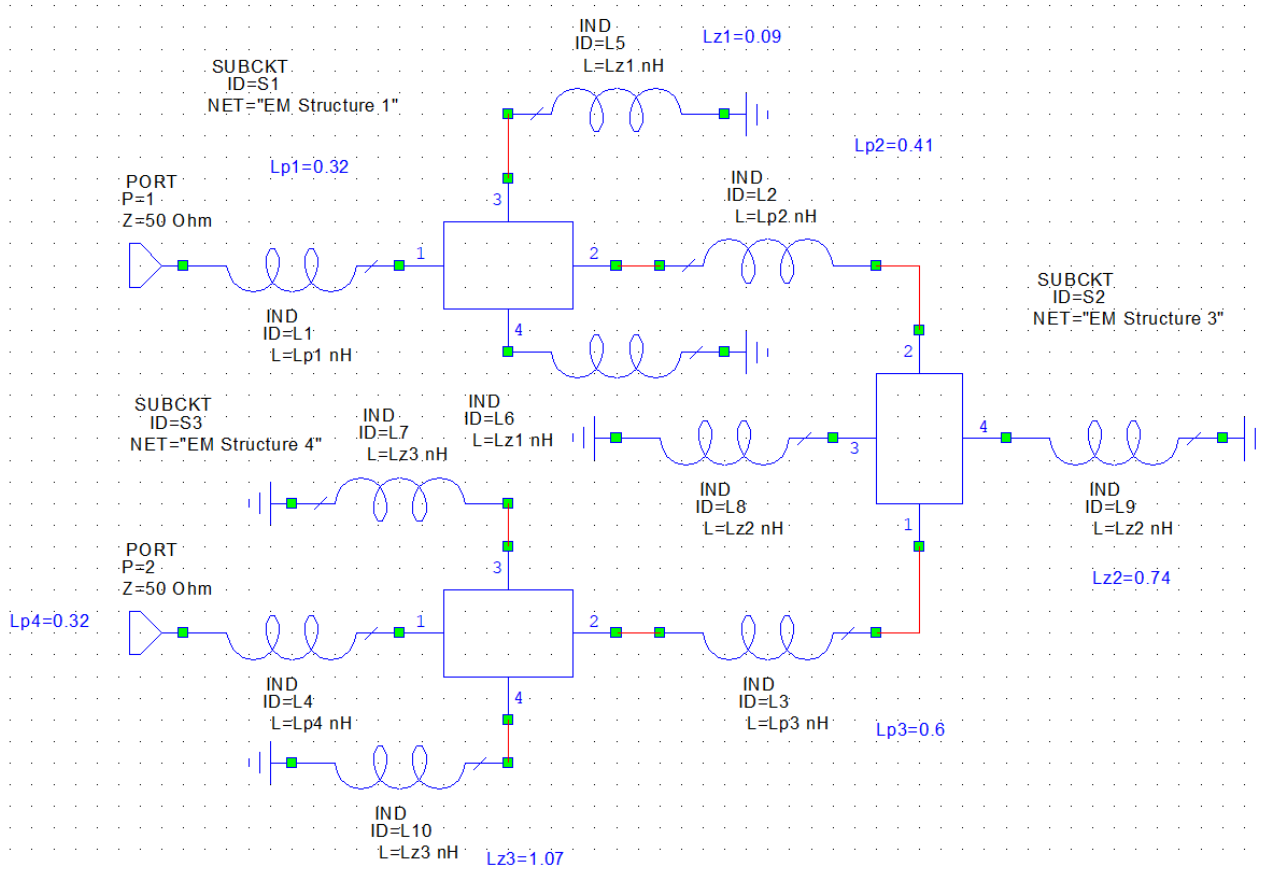


Рис. 7. Микрополосковый СВЧ аттенюатор на 10 дБ
 с корректирующими индуктивностями

Частотные характеристики и топология на подложке размером $20 \times 20 \times 4$ мм представлены на рис.8, 9.

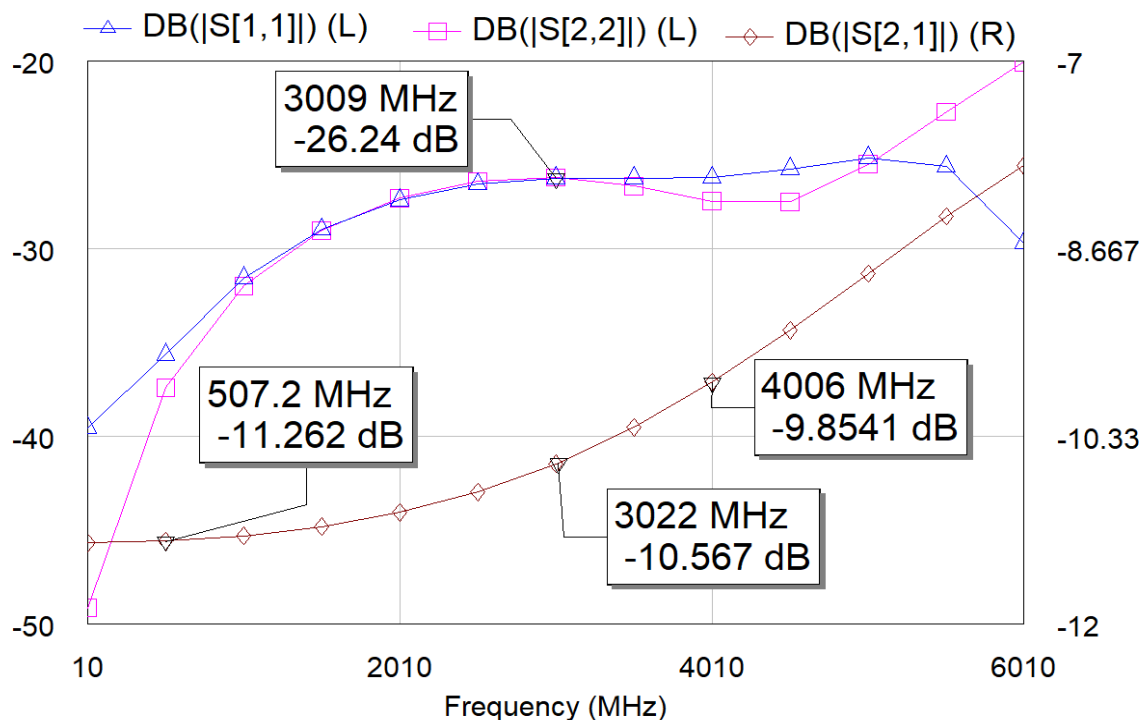


Рис. 8. Частотные характеристики трехкаскадного аттенюатора 10 дБ с корректирующими индуктивностями

Далее было выполнено моделирование топологии аттенюатора 10 дБ на одной подложке ВеО габаритами 20×20 мм.

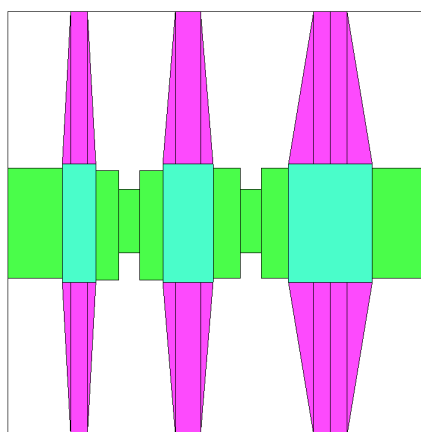


Рис. 9. Топология аттенюатора 10 дБ

По результатам моделирования можно сделать вывод, что возможна практическая реализация аттенюаторов с ослаблением 1,2, 1,8 и 10 дБ в полосе рабо-

чих частот до 4,5 ГГц и с неравномерностью от 1,15 до 2 дБ, что позволяет на их основе создавать устройства с полосой рабочих частот до 4 ГГц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ и др.; под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
2. Стародубровский Р.К., Шварцман А.М., Голованова Т.М., Ларина Ф.М. Улучшение согласования в микрополосковых линиях. – Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника, М., 1983. – Вып. 6. – С. 16–21.
3. Кожевникова Е.Д., Полянский А.М. Методика расчета тонкопленочных СВЧ аттенюаторов на малые затухания // Широкополосные усилительные и генераторные устройства ВЧ и СВЧ: Межвуз. сб. науч. трудов / Новосиб. электротехн. институт. – 1985. – 161 с.
4. Справочник по элементам полосковой техники / Мазепова О.И., Мещанов В.П., Прохорова Н.И., Фельдштейн А. Л., Явич Л.Р. / Под ред. А.Л. Фельдштейна. – М.: Связь, 1979, с. 271.
5. Film attenuators new generation / M. Rubanovich, V. Khrustalev, K. Aubakirov, V. Razinkin, A. Stolyarenko, P. Bogomolov // American Journal of Scientific and Educational Research. – 2014. – № 1 (4). - P. 634–647.
6. Широкополосные пленочные аттенюаторы / Аубакиров К.Я., Макеев А.В., Столяренко А.А., Рубанович М.Г. Хрусталеv В.А // Междунар. науч. конф. «Специальные вопросы фотоники: Наука. Оборона. Безопасность»: сб. материалов. – Новосибирск: СГУГиТ, 2016. – С. 38–41.
7. Столяренко А.А. Широкополосный СВЧ аттенюатор 10 дБ большой мощности / А.А. Столяренко // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Рос. науч. – техн. конф., Новосибирск, 25–26 апр. 2019 г. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2019. – С. 627–630.
8. Свидетельство о регистрации топологии интегральной микросхемы №2017630073 «Широкополосный аттенюатор с входным сопротивлением 50 Ом и затуханием 1,8 дБ в полосе частот 5 ГГц. К.Я. Аубакиров, П.Г. Богомолов, А.С. Митьков, М.Г. Рубанович, А.А. Столяренко, В.А. Хрусталеv. Правообладатель: НГТУ; заяв. 29.06.16; опуб. 14.02.17.
9. Алексеев Л.В., Знаменский А.Е., Лоткова Е.Д. Электрические фильтры метрового и дециметрового диапазонов. – М.: Связь, 1976. – 280 с.
10. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М.: СОЛОН–Пресс, 2003. – 496 с.

© К. Я. Аубакиров, А. В. Макеев, 2021