

СОЗДАНИЕ В SONNET УЗКОПОЛОСНОГО ШПИЛЕЧНОГО ФИЛЬТРА НА МИКРОПОЛОСКЕ С НАСТРОЙКОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ

Программа Sonnet от компании Sonnet Software Inc. разработана для трехмерного моделирования планарных цепей на сосредоточенных и распределенных элементах, электромагнитных (ЭМ) структур и антенн в широком диапазоне частот от нулевой до СВЧ.

Моделирование выполняется в металлическом корпусе, где устанавливается один или несколько слоев диэлектриков, на которых можно размещать металлические полигоны. Для выполнения моделирования необходимо создать проект и в нем определить все необходимые опции, диэлектрические материалы и металлы.

Программа Sonnet разработана в нескольких версиях, начиная с профессиональной (Professional) с максимальными возможностями и заканчивая легкой (Lite). Все версии после профессиональной имеют ряд ограничений по количеству портов, возможности использования памяти и других, что, однако, не уменьшает основные возможности моделирования. Большинство ограничений сделано в варианте Lite, который можно скачать бесплатно с сайта Sonnetsoftware.com для ознакомления с основными возможностями программы.

Одной из уникальных особенностей программного продукта Sonnet является возможность использования в электромагнитной структуре диэлектрических вставок. Диэлектрическая вставка (dielectric brick) — это некоторый объем диэлектрика, который может быть расположен на любом диэлектрическом или металлическом слое или между слоями. Диэлектрические вставки создаются из любого диэлектрика, включая воздух.

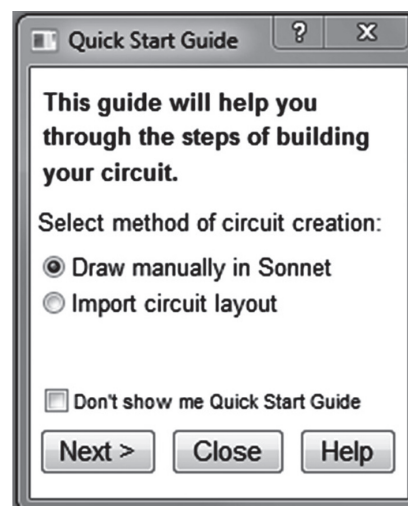
Несколько примеров использования диэлектрических вставок можно посмотреть, если в меню панели задач Sonnet выбрать **Project/Browse Examples**, в открывшемся окне в поле **Search** ввести **brick** и нажать кнопку **Search**. Заметим,

что это примеры создания чипов (резистора и разных типов конденсаторов).

Диэлектрические вставки можно использовать и для других целей. Например, многие типы микрополосковых фильтров, особенно узкополосных и на высоких частотах, могут иметь заметный разброс характеристик из-за разброса параметров подложек и точности изготовления. Такие фильтры требуют подстройку при использовании в микрополосковых приборах. Обычно полосу пропускания фильтра проще сдвигать вниз по частоте приклеиванием узких полосок диэлектрика, чем приклеивать металлические кусочки на края каждого резонатора. Чтобы использовать такой метод настройки, значение рабочей частоты фильтра рассчитывается несколько выше требуемого, а пределы настройки полосками диэлектриков можно оценить добавлением к ЭМ-структуре диэлектрических вставок.

Рассмотрим этот метод на следующем примере полосового фильтра 5-го порядка с полосой пропускания 7–7,5 ГГц.

Создайте новый проект, выбрав в меню панели задач **Project/New Geometry**. Вместе с окном редактора проекта откроется окно **Quick Start Guide** (рис. 1). Если имеется требуемая топология фильтра, полученная в других программных продуктах в виде, например, dxf-файла и ее можно импортировать в проект, отметьте **Import circuit layout** и нажмите кнопку **Next**. Будут поочередно открываться окна с подсказкой, что нужно делать. В этом примере отметьте **Draw manually in Sonnet** для создания топологии вручную. Содержание окна изменится — в нем отобразится список



▲ Рис. 1. Выбор способа создания топологии фильтра

шагов, которые необходимо выполнить для создания топологии вручную, что помогает начинающим пользователям. Опытные пользователи могут закрыть окно подсказок.

В меню редактора проекта выберите **Circuit/Units**, чтобы определить те единицы измерения, которые используются в проекте. Откроется окно **Units** (рис. 2). Определите единицы измерения, как показано на этом рисунке. Если отметить **Remember settings**, то эти единицы будут устанавливаться автоматически для всех вновь создаваемых проектов. Нажмите **OK**.

Выберите в меню редактора проекта **Circuit/Dielectric Layers**. Откроется окно для определения необходимых диэлектрических слоев (рис. 3). По умолчанию в этом окне — два слоя. При необходимости можно добавлять любое количество

диэлектрических слоев, нажимая кнопки **Above** (выше) или **Below** (ниже), указывая тем самым расположение выше или ниже отмеченного слоя. В нашем случае достаточно двух слоев. Отметьте верхний слой 0 и нажмите кнопку **Edit**.

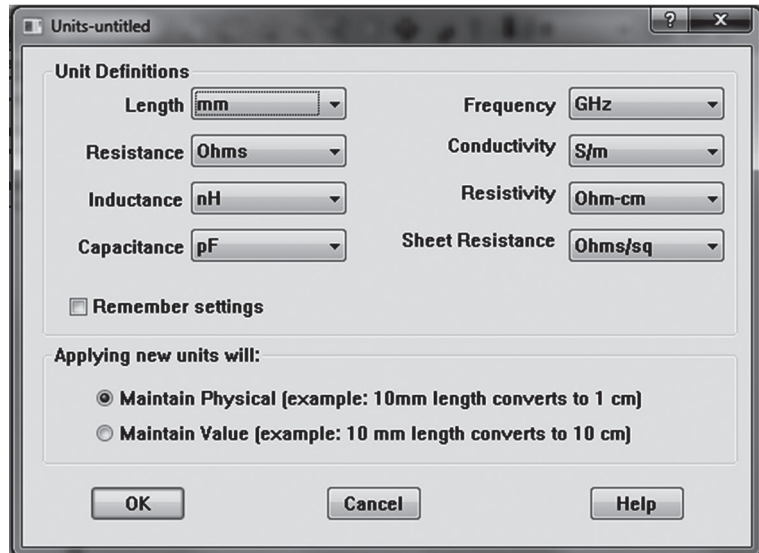
В открывшемся окне **Dielectric Editor** (рис. 4) в поле **Mat. Name** введите **Air**, а в поле **Thickness** укажите 4. Остальные поля оставьте по умолчанию и нажмите **OK**.

Во вновь открывшемся окне **Dielectric Layers** щелкните мышью нижний слой **GND** (слой подложки) и нажмите кнопку **Edit**.

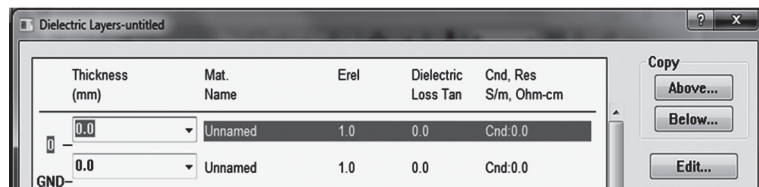
В открывшемся снова окне **Dielectric Editor** нажмите кнопку **Select dielectric from library**. В библиотеке диэлектрических слоев отметьте слой **Alumina** (99.5%) — аналог нашего поликора — и нажмите **OK**. Во вновь открывшемся окне **Dielectric Editor** для этого слоя определите толщину 0,5 мм и нажмите **OK**.

В меню редактора проекта выберите **Circuit/Box**. Откроется окно **Box Settings** (рис. 5). В поля **Cell Size** введите размер ячеек сетки 0,05 мм по осям X и Y. Размер корпуса заранее определить достаточно сложно. Можно исходить из того, что полная длина шпилечного резонатора должна быть примерно равна половине длины волны на средней частоте полосы пропускания. В нашем случае это примерно 7,4 мм. Следовательно, высота шпильки должна быть около 3,7 мм. Расстояние от краев топологии до боковых стенок желательно определить не менее двух толщин подложки. Таким образом, ширина корпуса составит примерно 5,7 мм. Ширина 50-Ом линии на подложке из поликора равна 0,5 мм. Зазоры внутри резонаторов можно сделать около 1 мм. Следовательно, пять резонаторов займут примерно 10 мм. Длину входного и выходного проводников выберем по 2 мм. Длина корпуса составляет примерно 14 мм. Поскольку мы не учли четыре зазора между резонаторами, округлим длину корпуса до 20 мм. В дальнейшем мы уточним все размеры. Введите 20 в поля **Box Size** для X и 5.7 — для Y. Окно **Box Settings** примет вид, как показано на рис. 5. Нажмите **OK**.

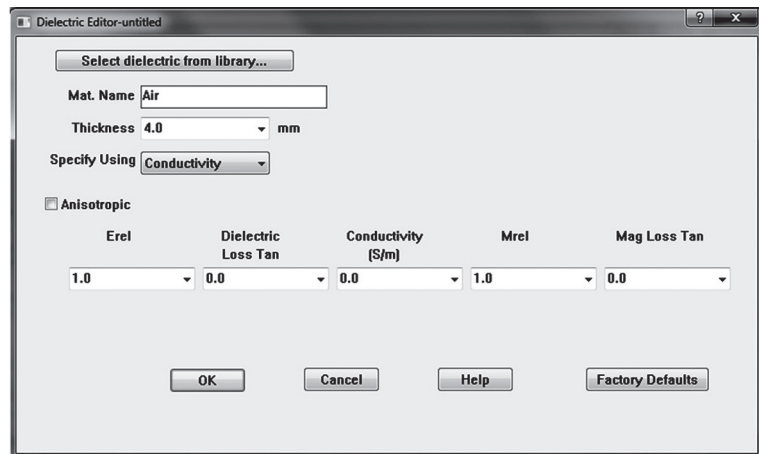
Выберите в меню редактора проекта **Circuit/Metal Types**. Откроется окно **Metal Types**, в котором по умолчанию имеется один слой металла без потерь для полигонов и перемычек. Нажмите кнопку **Add Planar**, чтобы открыть новое окно **Planar Metal Editor** (рис. 6). В поле **Name** введите **Copper**. В поле **Model** введите **Normal**. В поле **Specify Using** введите **Conductivity** или нажмите кнопку **Select from Library** и выберите **Copper**. В поле **Conductivity** введите **5.88e+7** (проводимость меди). В поле **Thickness**



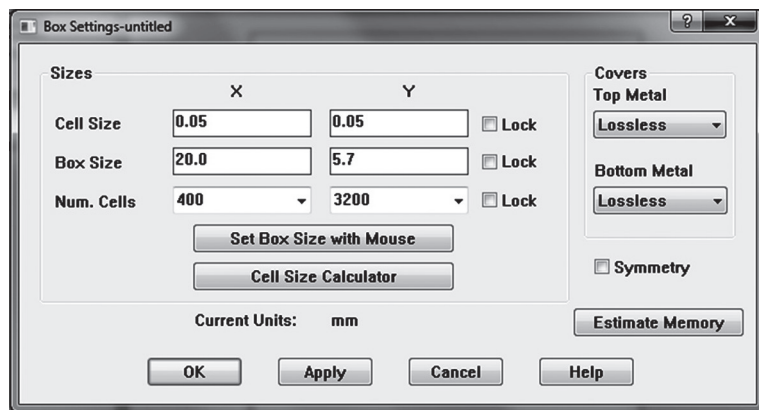
▲ Рис. 2. Выбор единиц измерения для использования в проекте



▲ Рис. 3. Определение диэлектрических слоев



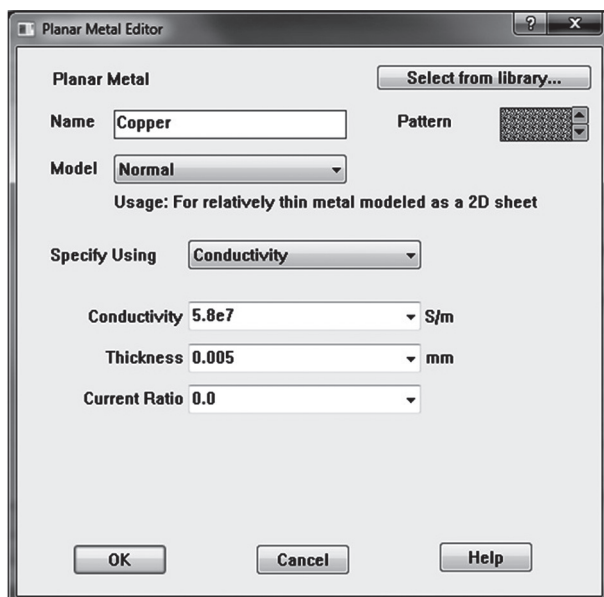
▲ Рис. 4. Определение типа диэлектрического слоя



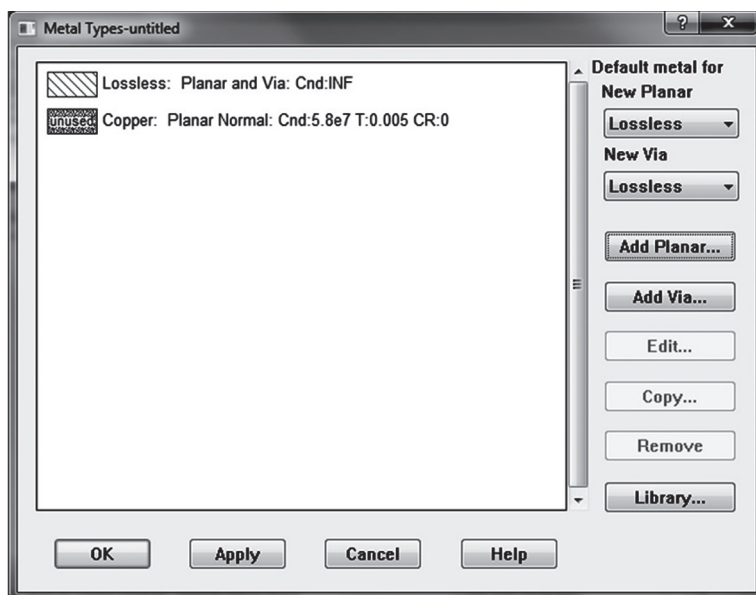
▲ Рис. 5. Определение размеров корпуса и ячеек сетки

введите толщину проводника **0.005** мм. Эти значения определяют бесконечно тонкий материал, в чем можно убедиться

просмотрев трехмерное отображение структуры. В поле **Pattern** выберите тип заполнения, с которым будут отобра-



▲ Рис. 6. Выбор металлов и их свойств для использования в проекте



▲ Рис. 7. Назначение металла полигонам или перемычкам

жаться металлические слои. Нажмите **OK**. Вид окна **Metal Types** изменится (рис. 7). Заметим, что добавленный материал отмечен **unused** (неиспользуемый). Его можно удалить и заменить другим. После того как этот металл будет назначен металлическому полигону, удалить его уже будет нельзя.

Обычно при открытии редактора проекта появляется дополнительное окно **Toolbox** (рис. 8). Если оно не открыто, выберите в меню **View** и в открывшемся списке отметьте **Tool Box**. В нижней части этого окна имеется ряд инструментов для создания полигонов, включая перемычки и диэлектрические вставки. В верхней части имеются инструменты для редактирования полигонов и для их размещения по сетке. В средней части находятся инструменты для добавления портов, компонентов и измеритель-

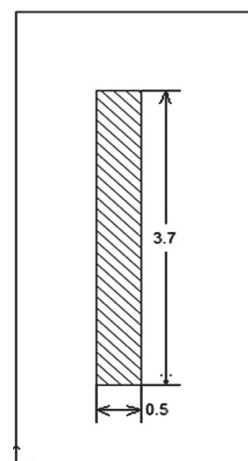
ной линии. Это необязательное окно, но с ним проще создавать и редактировать полигоны.

Теперь приступим к созданию топологии фильтра.

Выберите в меню редактора проекта **Tools/Add Metallization/Draw Rectangle** или щелкните мышью значок **Add a rectangle** в нижней части окна **Toolbox**. Начертите прямоугольник (рис. 9) внутри созданного корпуса с координатами dx , dy , равными 0,5 и 3,7 мм, соответственно. Эти координаты при черчении отображаются в нижней строке статуса. Щелкните мышью созданный полигон, чтобы выделить его. В нижней строке статуса отобразятся его размеры. Убедитесь, что полигон имеет правильные размеры. Или используйте измерительную линию в средней части окна **Toolbox**. При необходимости



▲ Рис. 8. Дополнительное окно, облегчающее создание топологии



▲ Рис. 9. Первый шаг создания резонатора фильтра

отредактируйте полигон, используя значок **Pointer** в верхней части окна **Toolbox**.

Щелкните созданный полигон левой кнопкой мыши и выберите в меню **Modify/Metal Properties** или щелкните правой кнопкой мыши и выберите **Metal Properties**. Назначьте полигону металл **Copper**. Скопируйте созданный прямоугольник и расположите его рядом с первым на расстоянии 1 мм.

Щелкнув значок **Add a rectangle** в нижней части окна **Toolbox**, начертите прямоугольник шириной 0,5 мм между созданными полигонами в их верхней части (рис. 10) и назначьте ему металл **Copper**. Выделите все полигоны и выберите в меню редактора проекта **Edit/Boolean Operations/Union**, чтобы объединить отдельные полигоны резонатора в один полигон.

О шпилечных фильтрах известно, что ширина первой и последней шпилек должна быть уже средних примерно в 1,2 раза. Поскольку ширина внутреннего зазора средних шпилек выбрана равной 1 мм, для крайних шпилек сделаем внутренний зазор 0,85 мм. Заметим, что все размеры должны быть кратными размеру ячейки сетки, который установлен 0,05 мм.

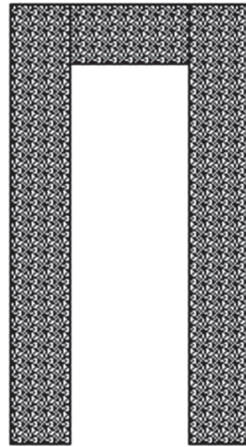
Выделите созданный резонатор и скопируйте его, чтобы не потерять. Установите курсор мыши на среднюю точку правой стороны левого полигона резонатора и сдвиньте его вправо на 0,15 мм. Затем аналогично сдвиньте вправо левую сторону левого полигона резонатора на 0,15 мм. Внутренний зазор должен быть равен 0,85 мм. Расположите созданный резонатор симметрично относительно боковых стенок.

Вставьте ранее скопированный резонатор. Щелкните его правой кнопкой мыши и выберите **Rotate 90 CW**, чтобы развернуть резонатор на 90°. Затем разверните резонатор на 90° еще раз.

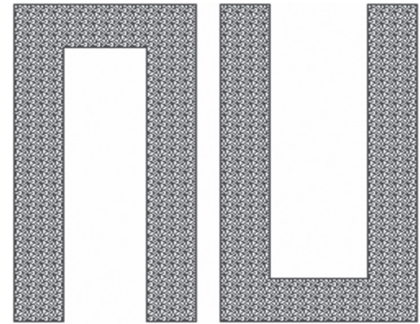
Поскольку фильтр узкополосный, зазоры между резонаторами должны быть довольно широкие. Коэффициенты связи для заданной ширины полосы пропускания и примерную величину зазоров можно рассчитать по формулам или определить ее экспериментально. Поскольку фильтр узкополосный, величина зазоров должна быть довольно большой. Определим зазор между средними резонаторами равным 0,5 мм. Зазоры между первым и вторым резонаторами и между предпоследним и последним должны быть существенно меньше. Сделаем их равными 0,25 мм.

Установите курсор мыши на скопированный и развернутый резонатор и поместите его на расстоянии 0,25 мм от первого резонатора (рис. 11). Снова вставьте скопированный резонатор и поместите его на расстоянии 0,5 мм от второго резонатора. Снова вставьте скопированный резонатор, разверните его и поместите на расстоянии 0,5 мм от третьего резонатора. Скопируйте первый резонатор, затем вставьте его и поместите на расстоянии 0,25 мм от четвертого резонатора.

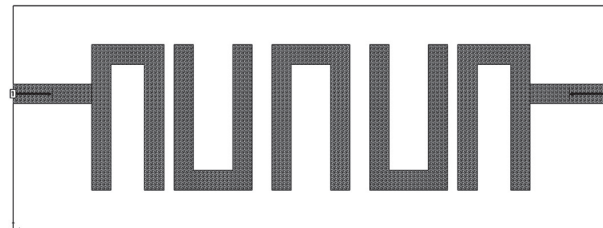
Щелкнув значок **Add a rectangle** в нижней части окна **Toolbox**, начертите прямоугольник шириной 0,5 мм и длиной 2 мм на входе фильтра. Назначьте ему металл **Copper** и подключите начерченный прямоугольник к первому резонатору чуть выше середины резонатора. Скопируйте этот проводник и подключите его к последнему резонатору фильтра на таком же расстоянии от вершины резонатора, как и в первом резонаторе. Выделите всю топологию фильтра и сдвиньте ее к левому краю корпуса так, чтобы входной проводник касался ле-



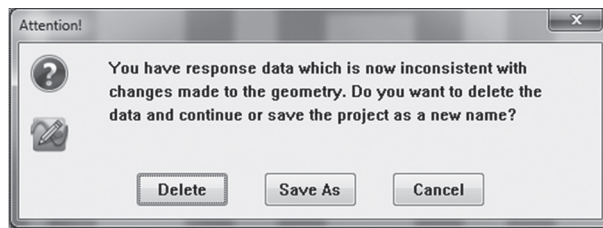
▲ Рис. 10. Второй шаг создания резонатора фильтра



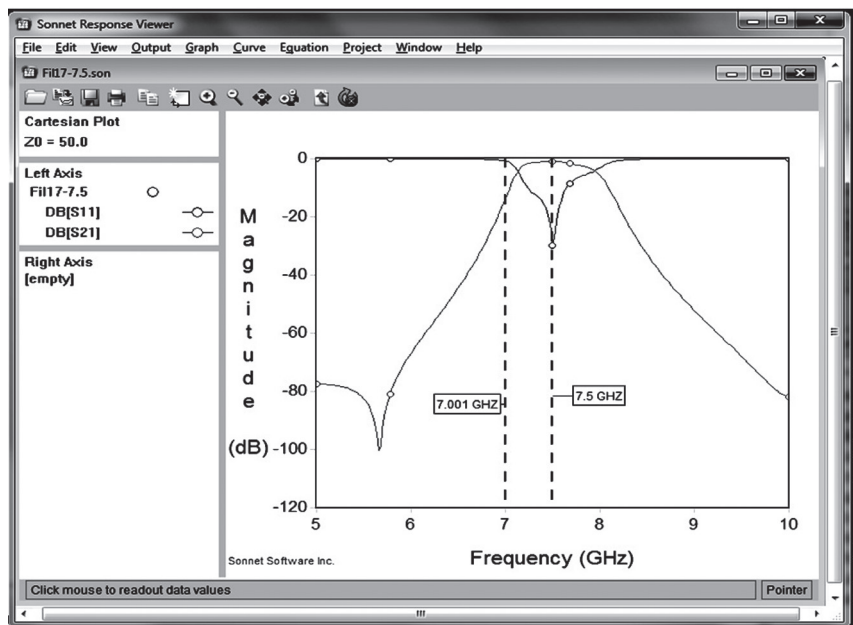
▲ Рис. 11. Добавление резонаторов в топологию фильтра



▲ Рис. 12. Окончательная топология фильтра



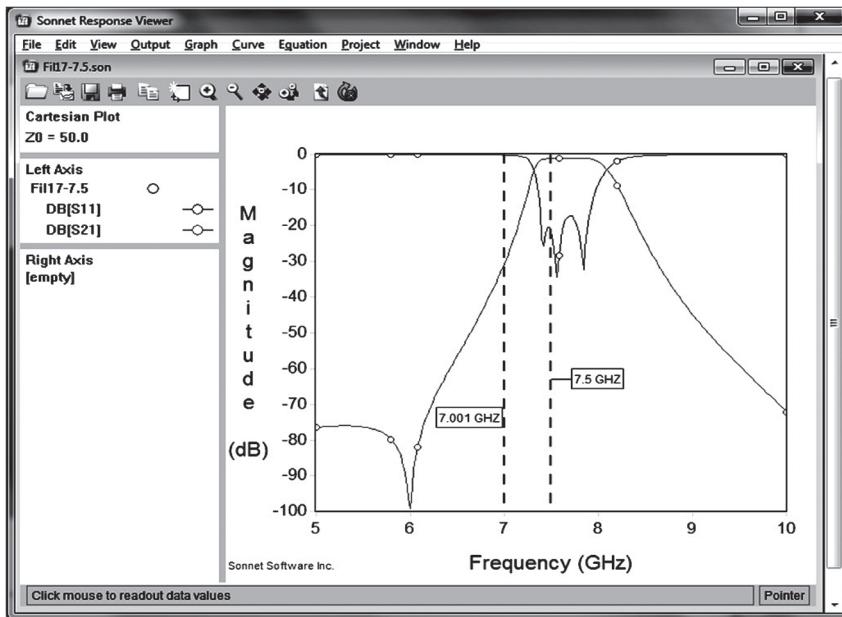
▲ Рис. 13. Предупреждающее окно при запуске анализа фильтра



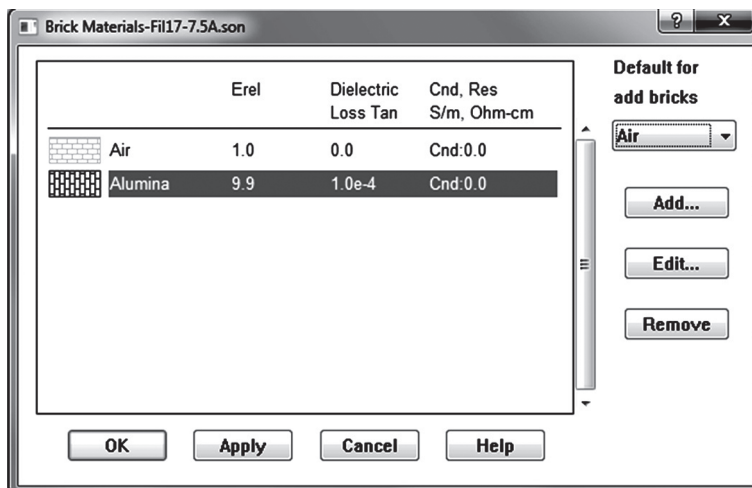
▲ Рис. 14. График результатов выполненного анализа

вой стенки корпуса. Используя линейку **Measure**, измерьте длину фильтра, затем выберите в меню **Circuit/Box** и измените длину корпуса на измеренную длину фильтра.

Выберите в меню редактора проекта **Tools/Add Port** или щелкните значок **Add Port** в средней части окна **Toolbox** и добавьте порт на входе фильтра. Дважды щелкните мышью порт. В открывшем-



▲ Рис. 15. График результатов выполненного анализа после редактирования резонаторов



▲ Рис. 16. Выбор диэлектрической вставки

ся окне отметьте **Fixed** и в поле **Specify Length** введите 1 мм (это расстояние до референсной плоскости). Нажмите **OK**. Аналогично добавьте порт на выходе фильтра и расположите топологию примерно по центру корпуса (рис. 12). Сохраните проект в рабочем каталоге, например, с именем Fil7-7.5.

Выберите в меню редактора проекта **Analysis/Setup**. В открывшемся окне в поле **Analysis/Control** введите **Adaptive Sweep [ABS]**, а в поля **Start** и **Stop** введите диапазон частот для выполнения анализа от 5 до 10 ГГц и нажмите **OK**.

Выберите в меню **Project/Analyze** или щелкните кнопку **Analyze** на панели инструментов. Если откроется окно с запросом о сохранении проекта перед выполнением анализа, нажмите **Save**. Если появится новое окно с запросом об удалении данных, продолжении или сохранении проекта под новым именем (рис. 13), нажмите **Delete**. Начнет выполняться анализ, и откроется окно,

в котором отобразится ход выполнения анализа.

После окончания анализа закройте окно, в котором отображался процесс анализа, и выберите в меню **Project/View Response/New Graph**. В левой части открывшегося окна графика дважды щелкните мышью **DB [S11]**. В следующем открывшемся окне в области **Unselected** дважды щелкните мышью **DB [S21]**, чтобы перенести эту измеряемую величину в область **Selected** и отобразить ее на графике. Щелкните в окне графика правой кнопкой мыши и выберите **Add Marker/Vertical Line Marker**. На графике появится вертикальная линия маркера. Дважды щелкните левой кнопкой мыши маркер или щелкните его правой кнопкой и выберите **Search** или **Properties**. В открывшемся окне в поле **X value** введите 7 ГГц. Нажмите **OK**. Аналогично, добавьте маркер на частоте 7.5 ГГц. Полученный график показан на рис. 14.

Из графика видно, что характеристика сдвинута на небольшую величину вверх по частоте и в полосе пропускания имеет не очень хорошее согласование. Сдвинем характеристику еще немного вверх по частоте, чтобы увеличить запас для настройки. Для этого укоротим резонаторы.

Закройте окно графика и откройте окно редактора проекта. Выделите первый резонатор. Нажмите кнопку **Zoom In** на панели инструментов и выделите нижнюю часть первого резонатора для удобства редактирования. Установив курсор на среднюю точку нижней стороны левого полигона резонатора, сдвиньте эту сторону вверх на 0,1 мм. Затем аналогично укоротите второй полигон первого резонатора. Щелкните мышью значок **Full View**, чтобы отобразить всю топологию фильтра.

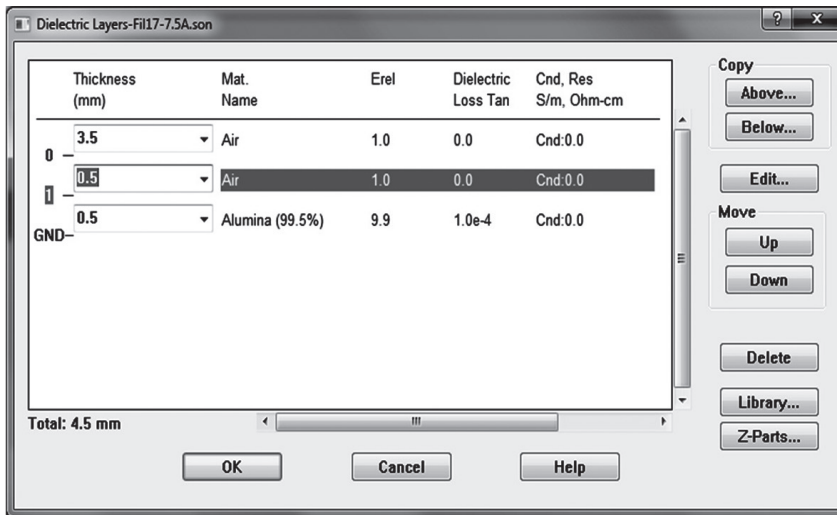
Аналогично отредактируйте третий и последний резонаторы. Напомним, что величина смещения по оси Y отображается в правом конце нижней строки статуса.

Выделите второй резонатор. Установите курсор мыши на среднюю точку верхней стороны нижнего полигона резонатора и сдвиньте эту сторону вверх на 0,1 мм. Затем сдвиньте вверх на 0,1 мм нижнюю сторону. Аналогично отредактируйте четвертый резонатор. Согласование в полосе пропускания зависит от соотношений между внутренними зазорами резонаторов и величинами зазоров между резонаторами.

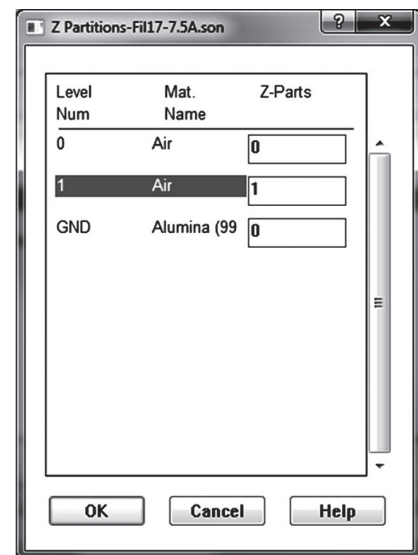
Уменьшите внутренние зазоры крайних резонаторов. Для этого щелкните мышью первый резонатор, чтобы выделить его. Установите курсор на среднюю точку правой стороны левого полигона резонатора и сдвиньте ее вправо на 0,05 мм. Затем сдвиньте на 0,05 мм вправо левую сторону этого полигона. Аналогично, сдвиньте влево правый полигон последнего резонатора на 0,05 мм.

Теперь увеличьте зазор между первым и вторым резонатором. Для этого выделите первый резонатор с входным проводником и сдвиньте их влево на 0,05 мм. Аналогично, сдвиньте вправо последний резонатор с выходным проводником на 0,05 мм. Сохраните проект, выполните анализ. Полученная характеристика показана на рис. 15.

Для улучшения согласования можно попробовать изменить точки подключения входного и выходного проводников. Заметим, что редактирование ЭМ-структуры обычно требует времени и терпения, но это относится к любой программе ЭМ-моделирования. Можно попробовать выполнить оптимизацию, но в рассматриваемом примере потребуются большое количество переменных без гарантии на успешный результат.



▲ Рис. 17. Добавление слоя, на котором будет расположена диэлектрическая вставка



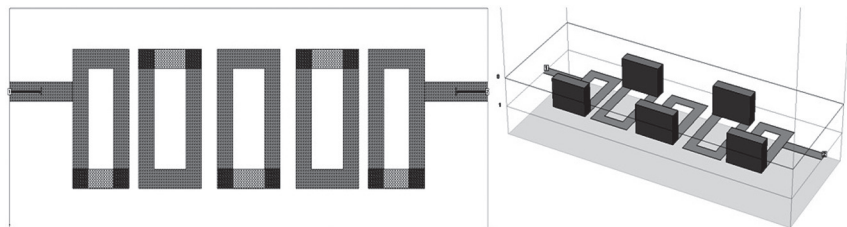
▲ Рис. 18. Определение количества подслоев диэлектрической вставки

Теперь добавим диэлектрические вставки.

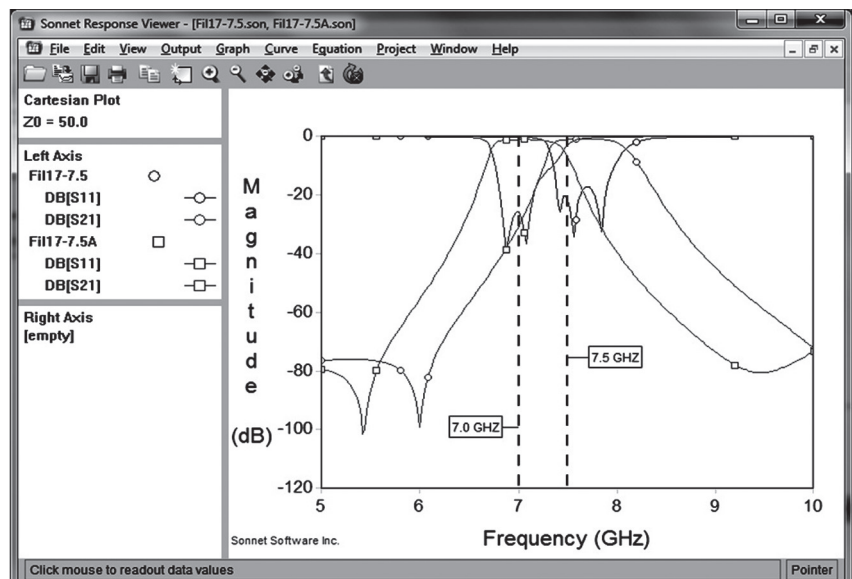
Сохраните проект с новым именем, например **F7-7.5A**, чтобы можно было просмотреть результаты анализа обоих проектов на одном графике. Выберите в меню **Circuit/Brick Materials**. В открывшемся окне определите тот же материал, что и для подложки (рис. 16). Выберите в меню **Circuit/Dielectric Layers**. Для первого слоя **Air** измените толщину с 4 на 3.5, отметив этот слой и нажав кнопку **Edit**. Нажмите кнопку **Below** и добавьте такой же слой **Air** толщиной 0.5 мм (рис. 17). При выделенном добавленном слое нажмите кнопку **Z-Parts** и в новом открывшемся окне введите 1 для среднего слоя 1 (рис. 18), на котором расположатся диэлектрические вставки. Закройте окна.

Откройте трехмерное отображение ЭМ-структуры. Топология фильтра расположена на верхнем слое 0. Чтобы поместить топологию на средний слой 1, выделите в двумерном отображении всю топологию и скопируйте ее. Удалите топологию. Откройте средний слой и вставьте в него скопированную топологию.

Выберите в меню **Tools/Add Dielectric Brick/Draw Rectangle** или щелкните мышью значок **Brick** в нижней части окна **Toolbox**. Начертите прямоугольник шириной 0,5 мм и длиной, равной ширине первого резонатора. Расположите этот прямоугольник в нижней части резонатора. Скопируйте созданный прямоугольник и расположите его в нижней части последнего резонатора. Аналогично, создайте и расположите прямоугольники на краях средних резонаторов. Выделите все созданные прямоугольники и выберите в меню **Modify/Brick Properties**. В открывшемся окне в поле **Brick** введите



▲ Рис. 19. Топология фильтра с диэлектрическими вставками

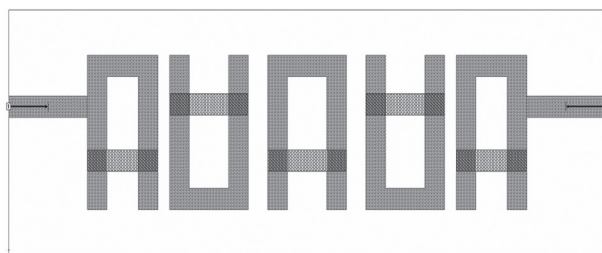


▲ Рис. 20. Графики результатов анализа фильтра с диэлектрическими вставками и без них

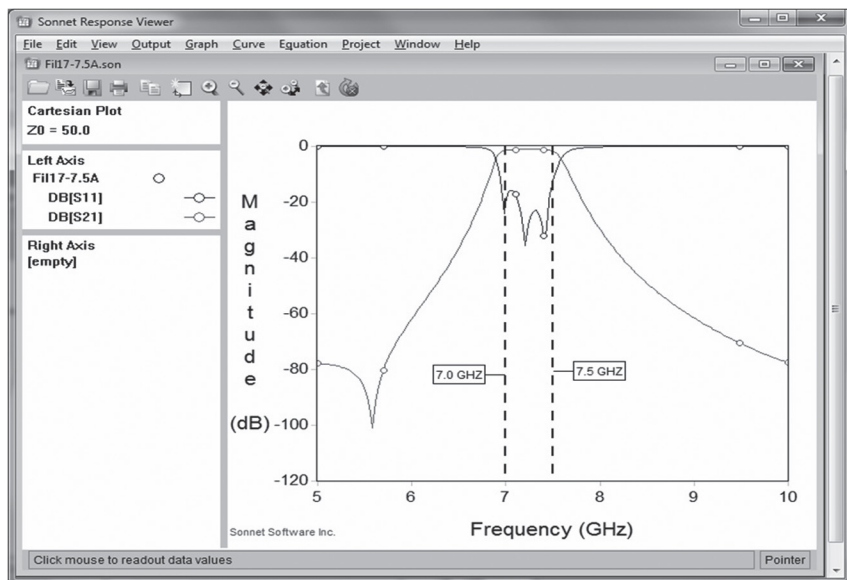
Alumina и нажмите **OK**. На рис. 19 показаны дву- и трехмерное отображения созданной ЭМ-структуры.

Выберите в меню **Analysis/Setup** и установите диапазон анализа от 5 до 10 ГГц. Сохраните проект и выполните анализ, выбрав в меню **Project/Analyze** или щелкнув мышью значок **Analyze** на панели инструментов. Откроется окно хода выполнения анализа. Если в этом окне появится значок **Error** и анализ выполняться не будет, нажмите кнопку **Errors/Warnings**,

чтобы прочитать о причинах невыполнения анализа. Если ЭМ-структура создана без ошибок, то причиной невыполнения анализа может быть нехватка памяти. В этом случае закройте это окно и выберите в меню **Analysis/Estimate Memory**, чтобы узнать объем имеющейся памяти и требуемый объем. Если памяти не хватает, откройте окно корпуса (**Circuit/Box**) и увеличьте размер ячеек сетки. Затем щелкните мышью значок **Snap To** в окне инструментов **Toolbar**, чтобы привязать



▲ Рис. 21. Топология фильтра после настройки диэлектрическими вставками



▲ Рис. 22. График результатов анализа после настройки топологии фильтра

топологию к сетке. Это может несколько изменить размеры резонаторов на небольшую величину, но погрешность анализа будет незначительной.

Выберите в меню **File/Open** и откройте проект **F7-7.5**. Выберите в меню

Window/Tile, чтобы было легче переключаться между двумя проектами.

Сделайте активным окно проекта **F7-7.5**. Выберите в меню **Properties/View Response/New Graph**. Затем сделайте активным окно проекта **F7-7.5A** и выберите

те в меню **Properties/View Response/Add to Graph**. На графике отобразятся характеристики обеих ЭМ-структур (рис. 20). Возможно, один из графиков будет отображаться плохо видимым зеленым цветом. В этом случае щелкните правой кнопкой мыши название этого графика в левой части окна, выберите во всплывающем меню **Properties** и измените цвет кривой графика на другой.

Графики в проекте **Fil7-7.5** сдвинуты вниз по частоте выше требуемой полосы пропускания. Значит, теперь их нужно (и можно) сдвинуть вверх по частоте, используя диэлектрические вставки.

Выделите все нижние диэлектрические вставки и сдвиньте их на меньшую величину вверх. Аналогично, сдвиньте все верхние диэлектрические вставки на ту же величину вниз (рис. 21). Сохраните проект, выполните анализ и откройте окно графика, выбрав в меню **Properties/View Response/New Graph**. График сдвинется вверх по частоте. Продолжайте эту процедуру, пока не получится требуемая полоса пропускания (рис. 22). Полученная характеристика фильтра после выполненной настройки удовлетворяет поставленным требованиям.

Приведенный в этом примере процесс моделирования фильтра в **Sonnet** позволяет оценить возможности и предел настройки по частоте, что позволяет выбрать оптимальный диапазон полосы пропускания для проектирования фильтра на конкретном материале подложки и выполнить его настройку с минимальными затратами усилий и времени. ■