

# HFSS-13 часть 3

## 14. Анализ рупорной антенны во временной области

В этом примере мы будем использовать метод расчета переходного процесса, чтобы получить S-параметры рупорной антенны в широкой полосе частот. Широкополосная антенна может использоваться для передачи коротких импульсов, например как часть радиолокационной системы подповерхностной локации земли.

Мы будем использовать имеющуюся в библиотеке примеров модель, содержащую антенную геометрию, создадим остальную часть модели и выберем метод расчета переходного процесса.

В этом разделе рассматриваются подготовка модели и анализ переходного процесса в рупорной антенне во временной области.

*Запуск HFSS и открытие модели.*

1. Запустите HFSS 13.

2. Командой **File>Open** загрузите файл **broadbandhorn.hfss** из папки Help в директории инсталляции HFSS 13. Это размещение отличается от расположения в папке example. Вы будете добавлять границы, возбуждение и задавать поверхности, на которые будут выводиться поля.

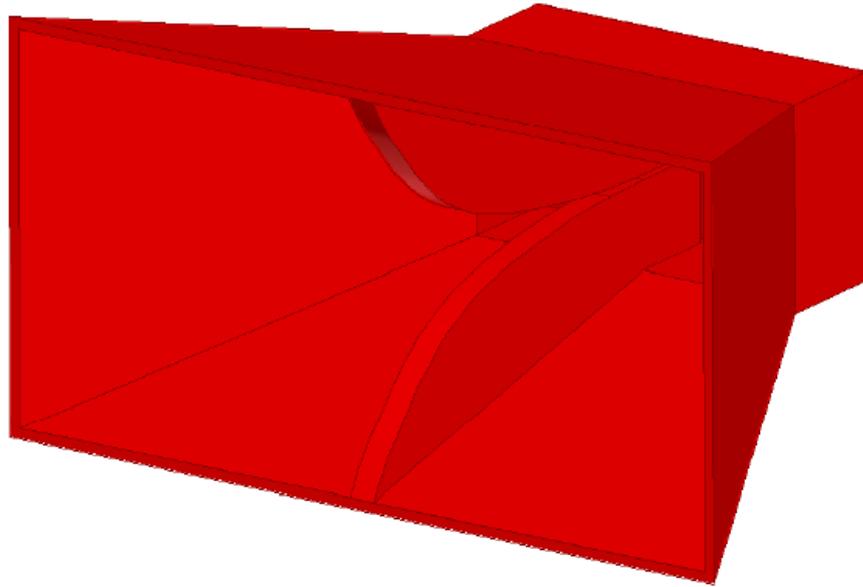


Рис. 14.1. Вид рупорной антенны

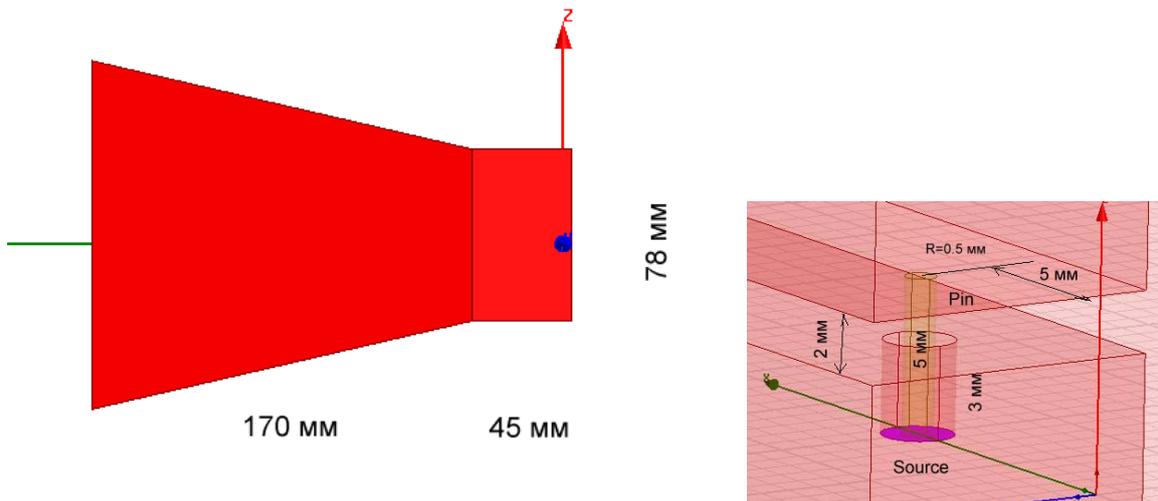


Рис. 14.2. Размеры рупорной антенны и конструкция порта

3. Задайте команду меню **HFSS>Solution Type**, чтобы выбрать тип решения **Transient Network Analysis** (рис. 14.3).

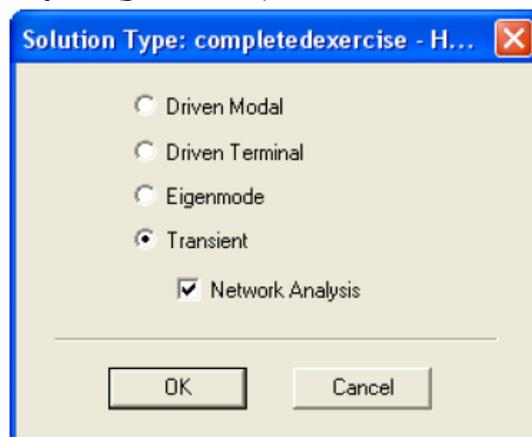


Рис. 14.3. Диалог выбора типа решения

5. Задайте свойства материала рупора как медь и объекты **pin**. Геометрия включает также воздушный бокс, стороны которого покрыты слоями PML.

6. Создайте воздушный бокс с начальной вершиной  $(X,Y,Z)=(-100, -250, -180)$  и размером  $(dX, dY, dZ)=(550, 500, 360)$ . Свойства этого бокса показаны в диалоге, показанном на рис. 14.4.

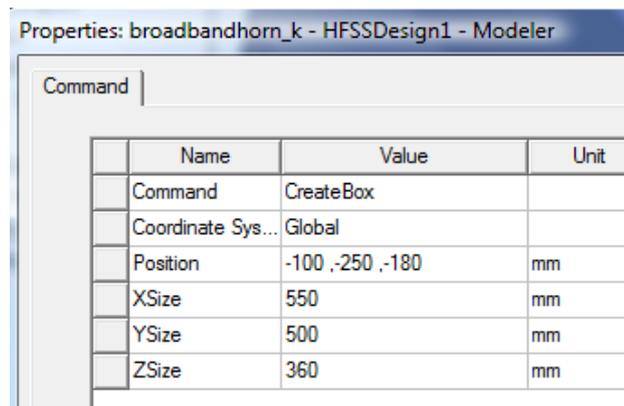


Рис. 14.4. Параметры базового бокса рупорной антенны

Фаски этого бокса расположены на расстоянии, большем, чем 100 мм, от рупора. Так как мы собираемся использовать PML, и минимальная частота будет 0.7 GHz, это даже больше, чем нужно.

Заполним воздухом этот бокс, дадим ему название, цвет и проницаемость. На сторонах этого бокса зададим граничные условия PML.

7. Выделите все фаски воздушного бокса.

8. Выберите **Boundaries>PML Setup Wizard**. Появляется мастер создания идеально поглощающих плоскостей (рис. 14.5). Мастер сам корректирует материальные параметры, чтобы получить хорошее поглощение в слое с заданной толщиной.

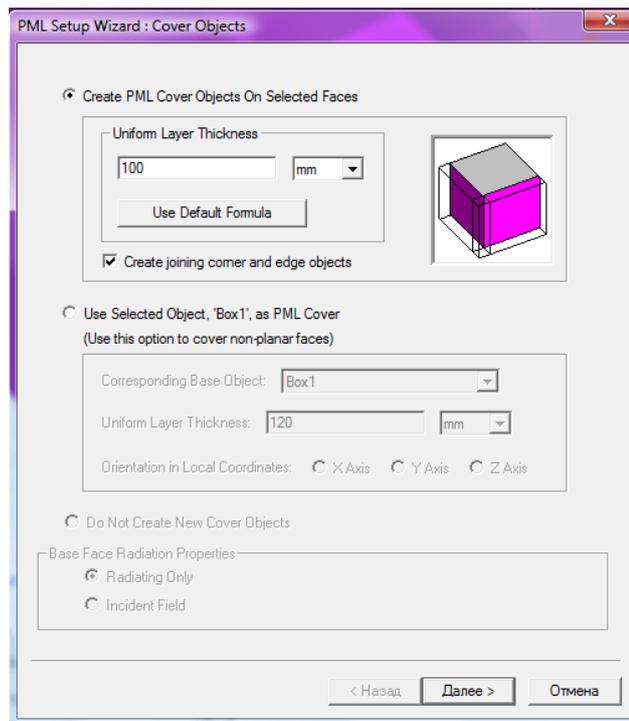


Рис. 14.5. Создание идеально согласованной слоя с толщиной Thickness = 100 mm в ассистенте PML

9. Кликните **Next**.

10. Задайте минимальную частоту и минимальную дистанцию до плоскости излучения Minimum Radiating Distance, как показано на рис. 16.6: **0.7 GHz** and **100 mm**.

Эти установки нужны, чтобы HFSS сгенерировал правильные параметры слоя PML.

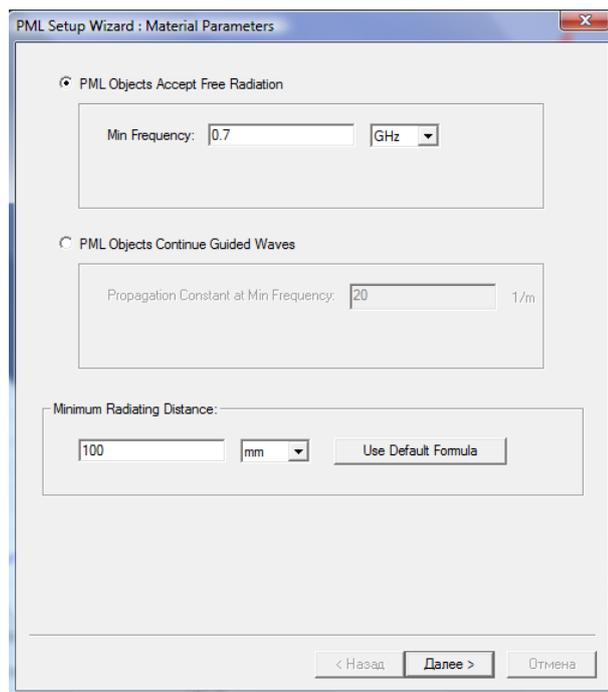
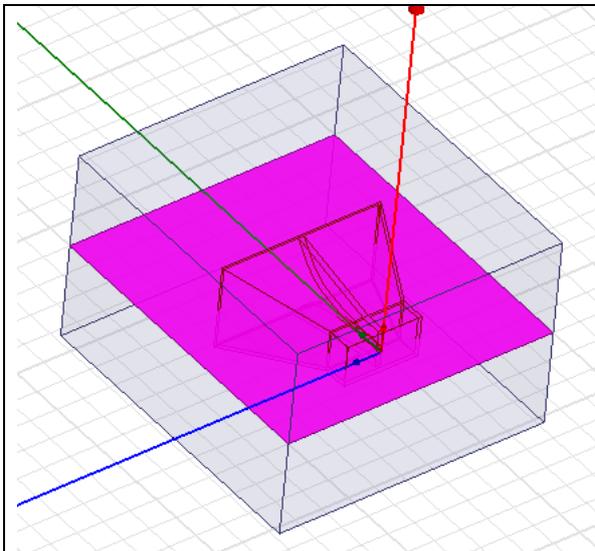


Рис. 14.6. Установка частоты и дистанции в ассистенте PML

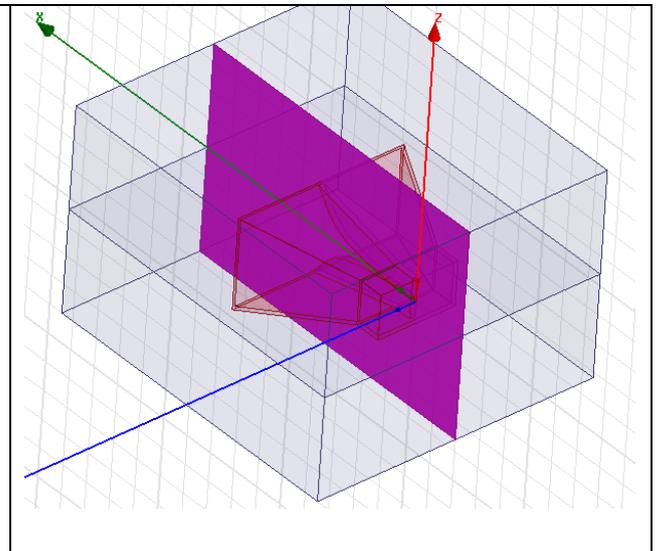
11. Кликните **Next** и затем **Finish**.

*Задание плоскостей для вывода динамически изменяемых полей.* Нужно решить заранее, где мы хотим видеть поля в полной трехмерной модели на каждом шаге изменения времени. Создадим два перпендикулярно развернутых прямоугольника, на которых мы хотим сохранить поля (рис. 16.7,16.8).

1. Создайте прямоугольник в плоскости XY с точки  $(X,Y,Z)=(-100, -250, 0)$  с размером  $(Xsize, Ysize)=(550, 500)$ .



*Рис. 14.7. Горизонтальная плоскость, пересекающая рупорную антенну*



*Рис. 14.8. Плоскость, на котором выводится поле*

2. Создайте прямоугольник в плоскости XZ с точкой  $(X,Y,Z)=(-100, 0, -180)$  и размером  $(Xsize, Zsize)=(550, 360)$ .

3. Выведите эти прямоугольники в виде рамок. Теперь нужно определить этот список как “list” для того, чтобы позже сохранять поля на них.

4. Выберите оба прямоугольника.

5. Задайте команду **Modeler>List>Create>Object List** (или нажмите **Face List** если вы выбрали их в режиме выбора фасок).

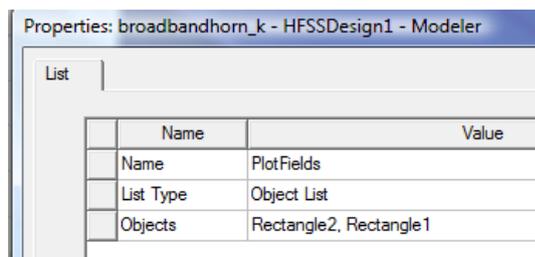


Рис. 14.9. Выбор имени “Objectlist1” на “PlotFields” в окне свойств *Properties*

6. Задайте этому списку имя, например “PlotFields”, как показано ниже, через дерево модели и окно свойств.

7. Сохраните модель командой **Save**.

*Источники возбуждения.* Плоскость “source” будет волновым портом.

1. Кликните **Tools>Options>HFSS Options**, чтобы вывести диалог **HFSS Options**. В закладке **General**, в разделе **Assignment Options**, проверьте, что опция **Auto-assign terminals on ports** не отмечена и кликните **OK**.

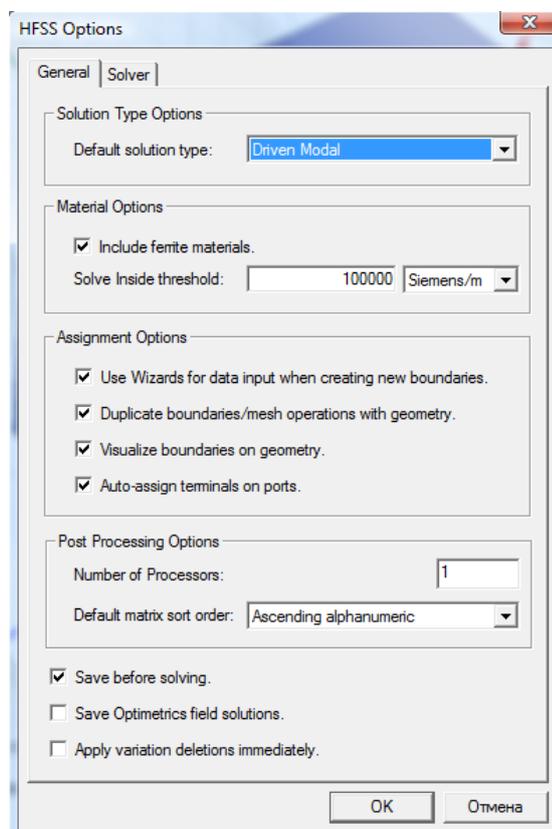


Рис. 14.10. Закладка *General* диалога *HFSS Options*

2. В дереве проекта выберите плоскость с именем “source”.

3 **View>Fit Selection.** Заметим, что этот объект является сечением коаксиального кабеля, внешний проводник которого **outer** есть часть круга.

4. Задайте **Wave Port** для этой плоскости.

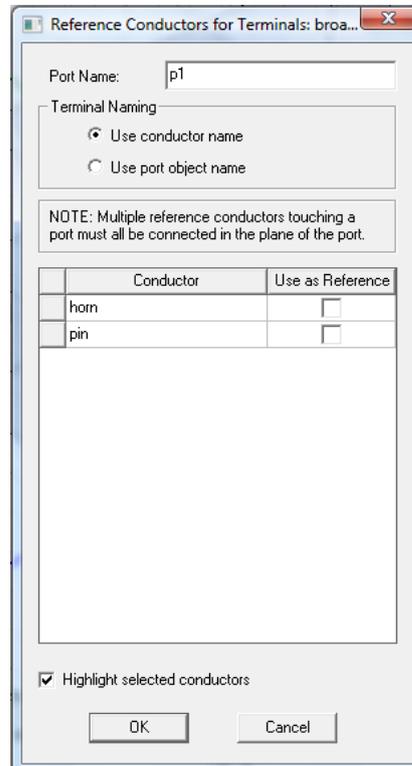


Рис. 14.11. Выбор объекта для опорной (земляной) плоскости

5. Дайте порту имя **p1** и кликните Next.

6. Задайте порту опцию **Active**. Кликните **Next**.

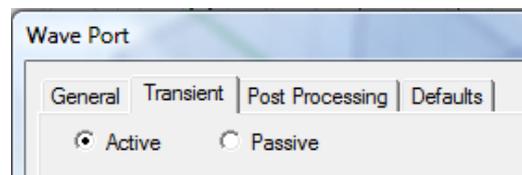


Рис. 14.12. Задание волнового порта активным

7. Выберите опцию “Do Not Renormalize” (рис. 14.13). Импеданс порта ожидается равным точно 50 Ом, и рассматривается как действительный импеданс, который будет корректно согласован с импедансом модели.

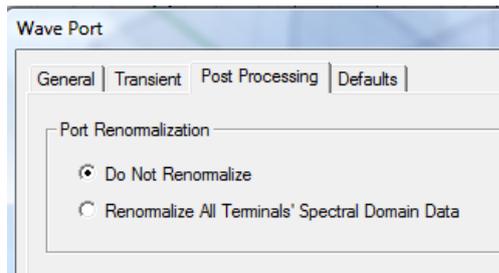


Рис. 14.13. Последний шаг в установке волноводного порта

#### 8. Кликните **Finish**.

В проекте с методом **Transient Network Analysis** с несколькими портами, чтобы получить полную S-матрицу необходимо подавать сигнал на один из портов. Такой порт назовем активным. Каждое моделирование с одним активным портом дает один столбец S-матрицы. Когда вы определяете порт как пассивный, это означает, что сигнал на него не подается, а он нагружен на согласованную нагрузку.

В проекте с расчетом переходного режима (не **network analysis**), все активные порты будут одновременно включены (**ON**), в то время как остающиеся пассивные порты будут действовать только как оконечные нагрузки (**OFF**).

*Спецификация терминала.* Поскольку программа **HFSS Transient** использует порты Terminal-Driven, нам нужно задать сопротивление портов.

1. Кликните правой кнопкой мыши **p1** в дереве проекта и выберите Auto Assign Terminals.

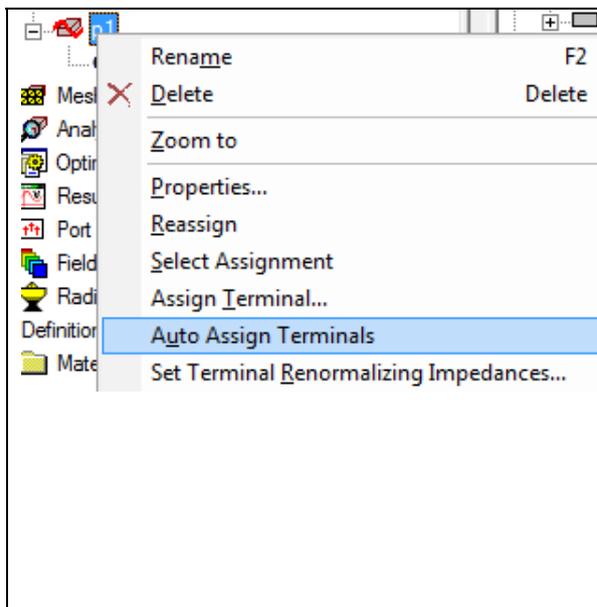


Рис. 14.14. Выбор опции автоматического определения терминала

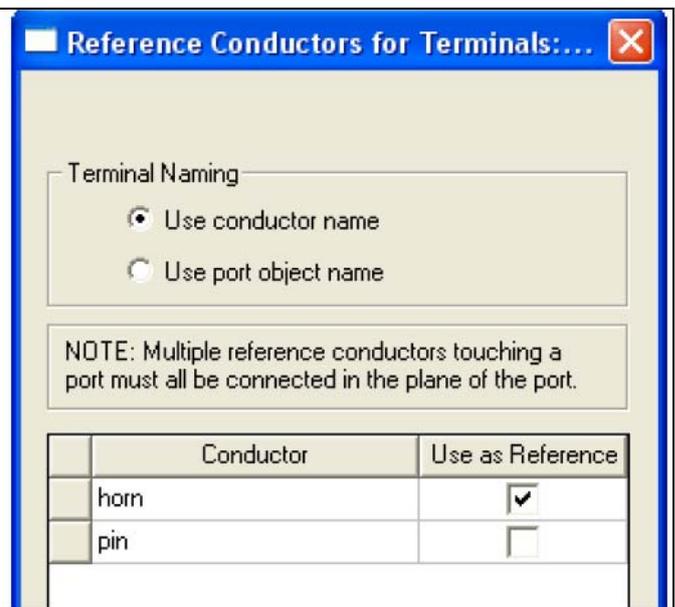


Рис. 14.15. Спецификация проводников, касающихся порта, которые будут противовесом

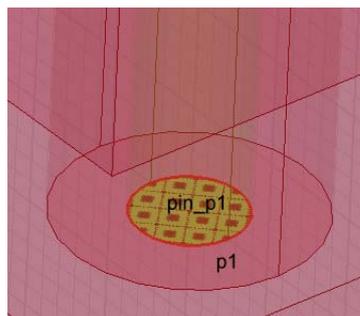


Рис. 14.16. Компоненты волнового порта

2. Выберите **horn** как опорную плоскость **Reference**, так что **pin** будет терминалом.

**Расчет и вывод результатов.** Этот раздел описывает установки на решение временного процесса и просмотр результатов.

1. В дереве проекта, выберите **Analysis>Add Solution Setup**.

2. Сетка для переходного моделирования создается на основании моделирования в частотной области. В этом моделировании программа останавливается на соответствующей частоте, чтобы выполнять адаптивный расчет. В этом случае использовать смешанные порядки элементов и итеративное решающее устройство. Примите значения по умолчанию в закладке **General** (рис. 14.17).

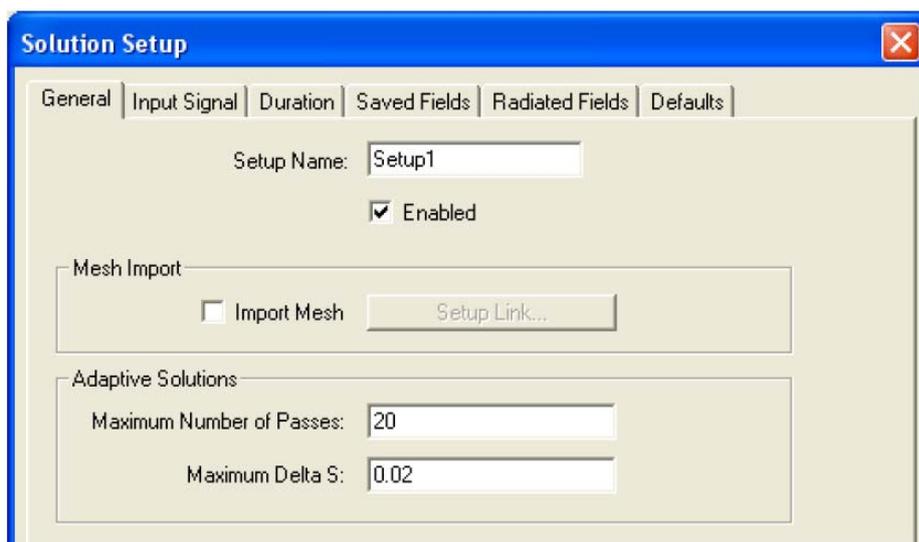


Рис. 14.17. Установки в закладке General

3. В закладке **Input Signal** (рис. 14.18), задайте полосу частот от 700 МГц до 1.6 ГГц. Это полоса соответствует модулированному импульсу Гаусса во временной области, который можно видеть в панели.

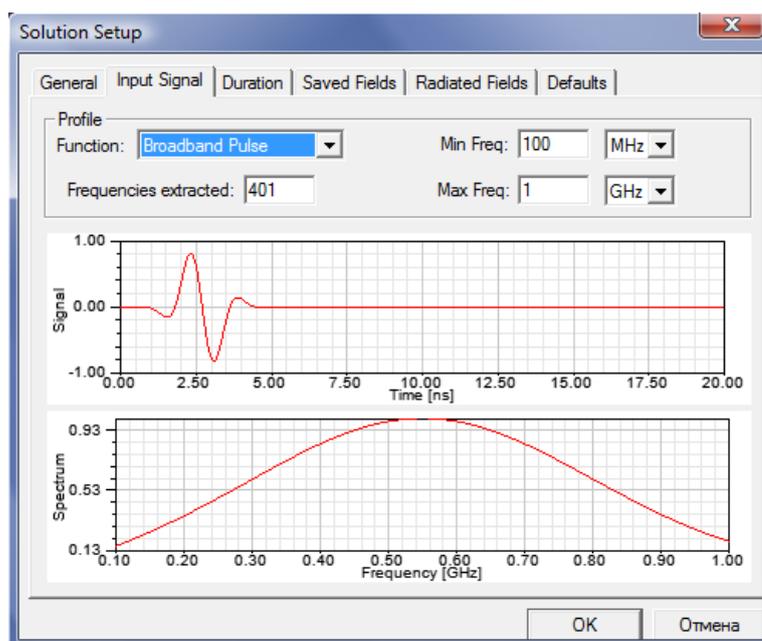


Рис. 14.18. Временной процесс на входном порту

4. В закладке **Duration**, вы должны задать границы по времени при анализе переходного процесса. Для этого примера, выберите Auto Terminate.

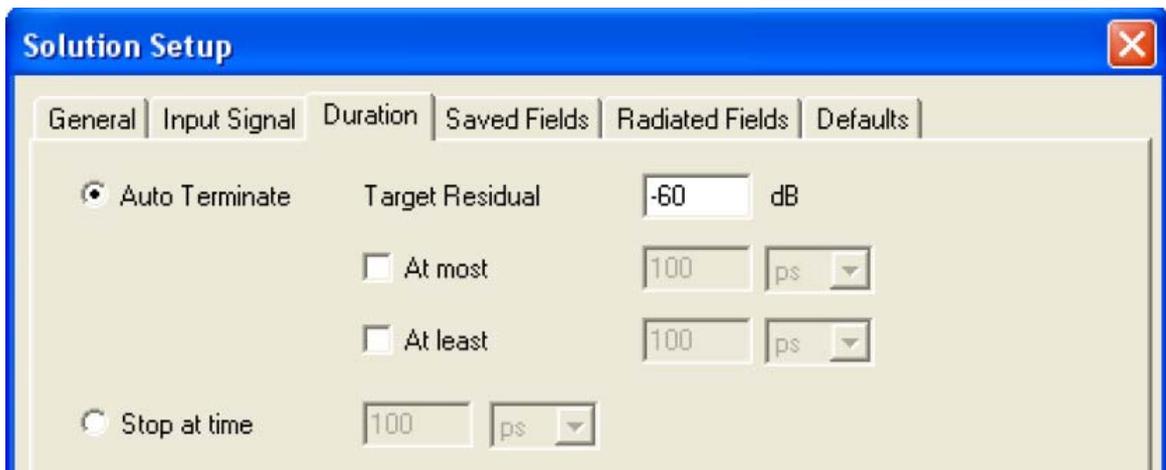


Рис. 14.19. Задание точности расчета временного процесса

Параметр **Target Residual** (Разница до сходимости) характеризует минимальное поле в модели в данное время по отношению к его самому большому значению. Как только поля падают ниже 0.001 от самого высокого значения, моделирование может быть остановлено. Дополнительно, Вы можете определить максимальный (**At most**) и минимальный (**At least**) интервалы времени, в которые нужно моделировать переходной процесс. Встроенные максимальные и минимальные интервалы времени подходят в большинстве случаев. Они учитывают размер модели и тип сигнала.

5. В закладке **Saved Fields** (рис. 14.20), отметьте опцию Object List or Face.

Установите интервал, через который будут запоминаться значения поля равным 30 ps. Это - "достаточно малая" часть длительности широкополосного импульса, чтобы получить в дальнейшем плавную анимацию поля.

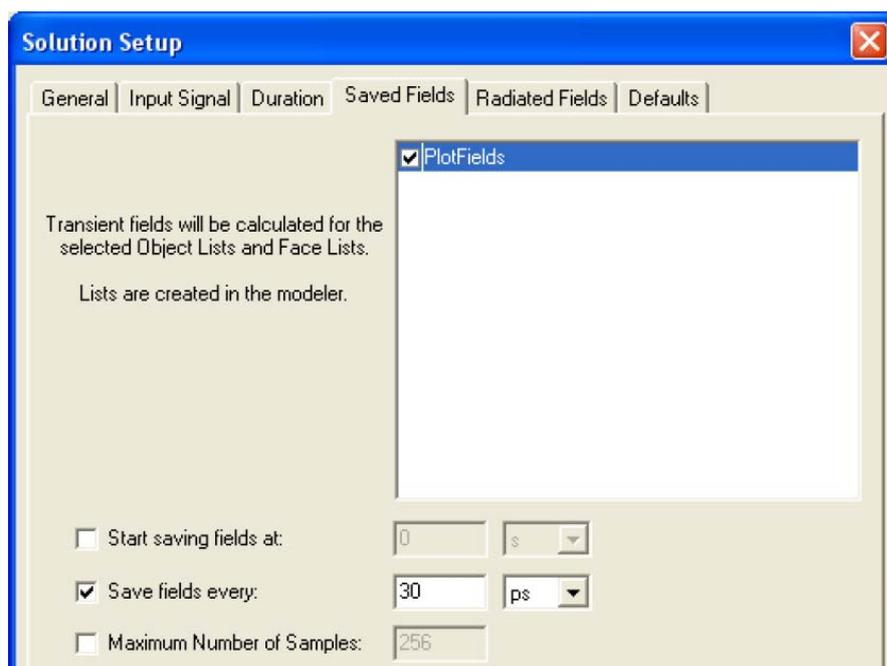


Рис. 14.20. Опции сохранения поля в закладке *Save Fields*

6. В разделе **Radiated Fields** установите опции сохранения полей и во временной и в частотной областях на частоте 1.2 GHz, как показано на рис. 14.21.

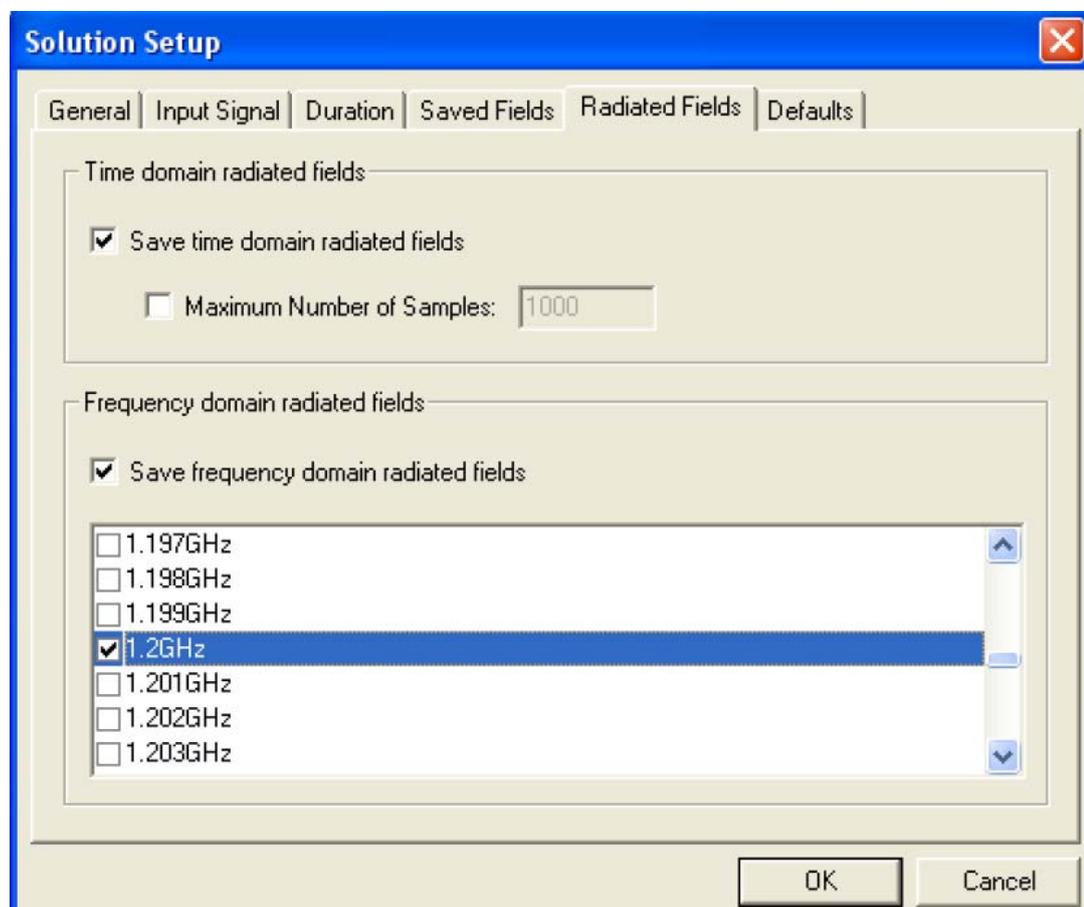


Рис. 14.21. Выбор частоты, на которой сохраняется излучающее поле

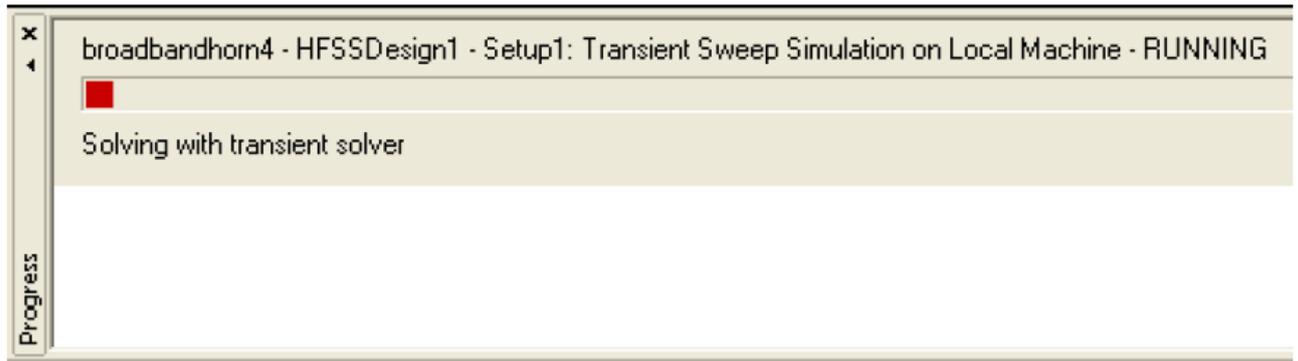
7. Шаг установки на решение *Solution Setup* выполнен. Кликните **OK**.

## Моделирование.

1. Запустите моделирование.

Вся область прогресса решения (см. рис. 14.22) соответствует максимальному времени моделирования в закладке **Duration** диалога **Solution Setup**, или, если оно не определено, то величине  $20 \cdot (\text{диагональ модели}) / (\text{скорость света})$ .

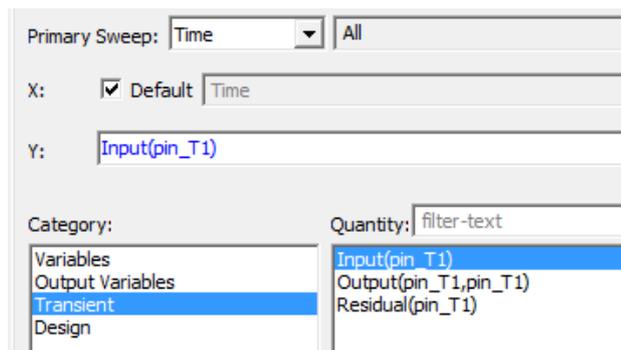
Область красной стрелки показывает время моделирования относительно максимального времени, в течение которого моделирование будет выполнено.



*Рис. 14.22. Наблюдение процесса расчета, показывающее время моделирования по отношению к общему времени расчета*

Во время моделирования, вы можете видеть прогресс расчета и другим способом.

**2. Нажмите правой кнопкой на Results в дереве проекта и выберите Create Terminal Solution Data Report>Rectangular Plot.**



*Рис. 14.23. Выбор характеристики во временной области*

Выведите **Input** и **Output** на одном графике и Residual в dB20 на другом.

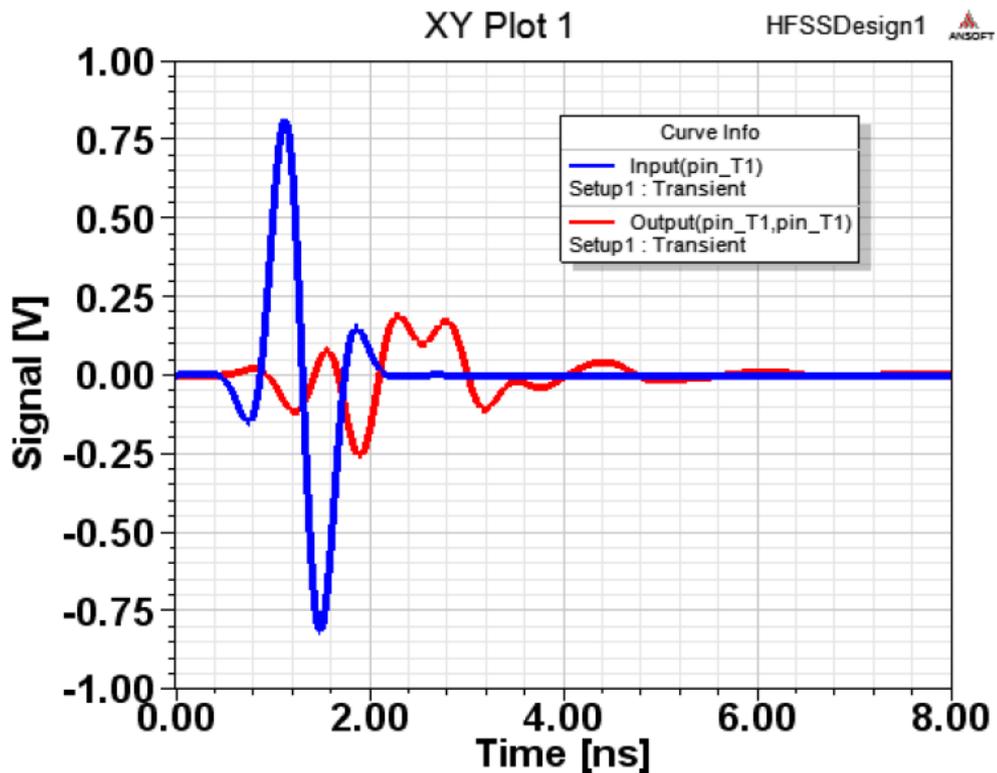


Рис 14.24. Напряжения *Input* и *Output* (возбуждение и отражение) как временные функции

**Input** и **Output** показывают возбуждение и отражение на порту как функцию времени.

Характеристика *Residual* (рис.14.25) показывает меру для уровня максимального поля в модели. Моделирование завершается, когда *Residual* спадает ниже 0.001 относительно его пика в любое время.

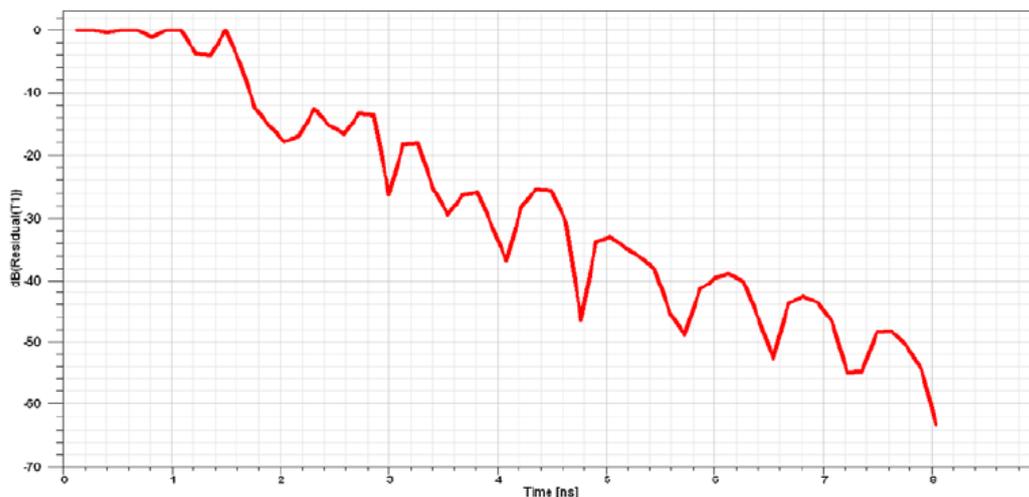
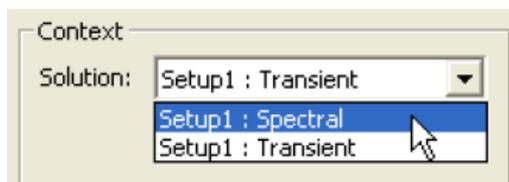


Рис. 14.25. Параметр *Residual* в логарифмическом масштабе, как функция времени

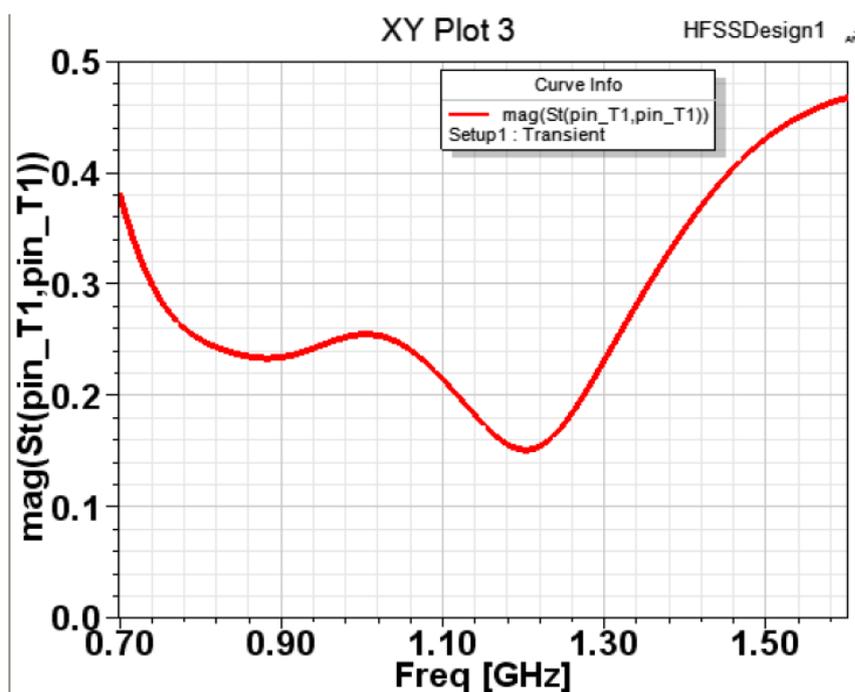
*Визуализация характеристик структуры.*

1. Чтобы вывести характеристики S-параметров как функции частоты, снова нажмите правой кнопкой на **Results** в дереве проекта и выберите **Create Terminal Solution Data Report>Rectangular Plot**.
2. Измените выбор в окне Solution на Spectral как показано на рис. 14.26.



*Рис. 14.26. Подготовка к выводу S-параметров parameters как функцию частоты, т.е. в виде спектра временного процесса*

3. Нанесите модуль  $|S_{11}|$ . Результирующий график показан на рис. 14.27. Этот график изменяется, когда расчет еще продолжается. Это позволяет вам видеть этот график на ранних шагах расчета.



*Рис. 14.27. Частотная характеристика  $|S_{11}|$  для широкополосной рупорной антенны*

*Бежущее поле рупорной антенны.*

Чтобы создать бегущее поле, выберите список, названный “**plotfields**” в дереве модели, т.е. список, содержащий два прямоугольника которые вы создали для вывода поля.

В дереве проекта, кликните правой кнопкой **Field Overlays>Plot Fields>E\_t>Mag\_E\_t** и выберите произвольное ненулевое время на следующей панели (рис. 14.28). Вы можете всегда подстроить время, изменяя его выбором **Modify**.

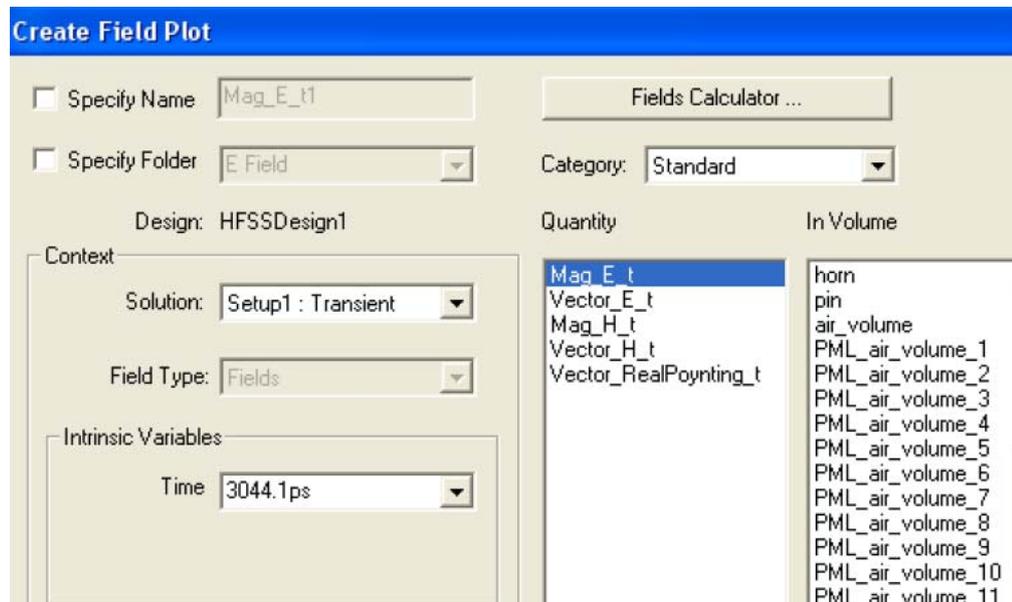


Рис. 14.28. Создание бегущего поля в заданный момент времени  $t = 3.044$  пс

Теперь имеется возможность наблюдать бегущее поле. Причем в отличие от метода FEM, здесь мы видим поле, изменяющееся во времени в соответствии с временным процессом входного сигнала (рис. 14.29).

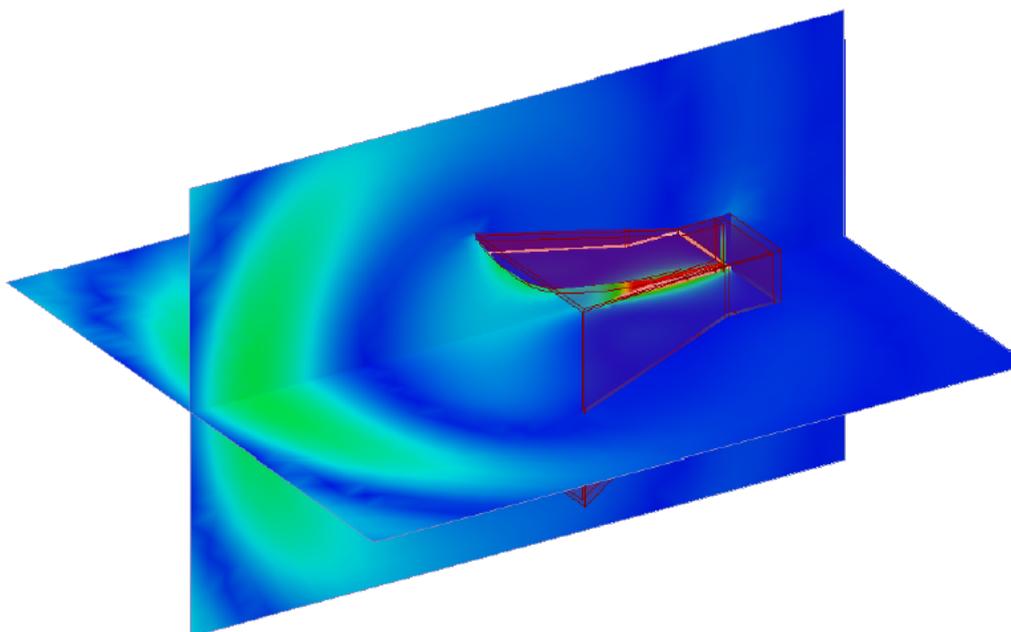


Рис. 14.29. Распространение поля в двух перпендикулярных плоскостях

3. Измените масштаб напряженности поля, чтобы сделать видимым поле в диапазоне от 0 до 10 V/m.

4. Анимация графика волны распространения можно выполнить, нажимая правой кнопкой мыши на имя графика и выбирая **Animate**. В окне **Setup Animation**, вы можете выбрать число шагов. Если нужно, HFSS выполнит интерполяцию между сохраненными решениями поля.

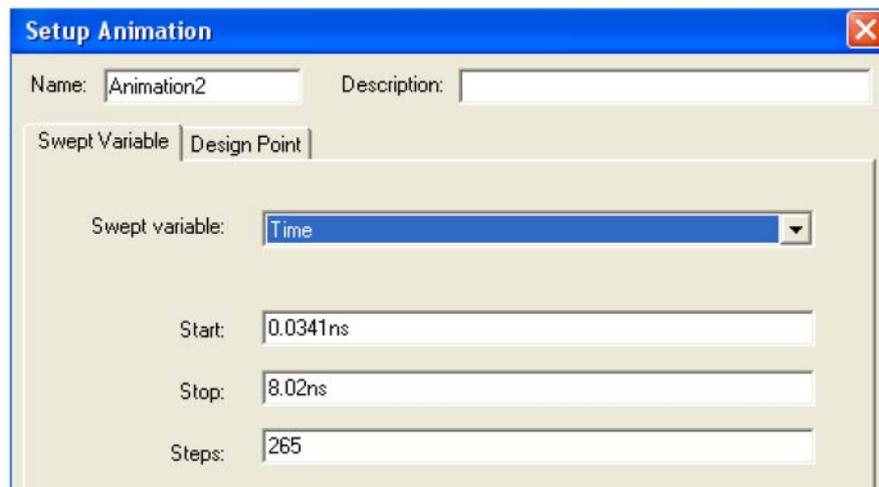


Рис. 14.30. Окно установки анимации поля

### Визуализация поля излучения.

Чтобы рассчитать поля во временной области:

1. Кликните правой кнопкой на Radiation и выберите **Insert Far Field Setup>Infinite Sphere**.

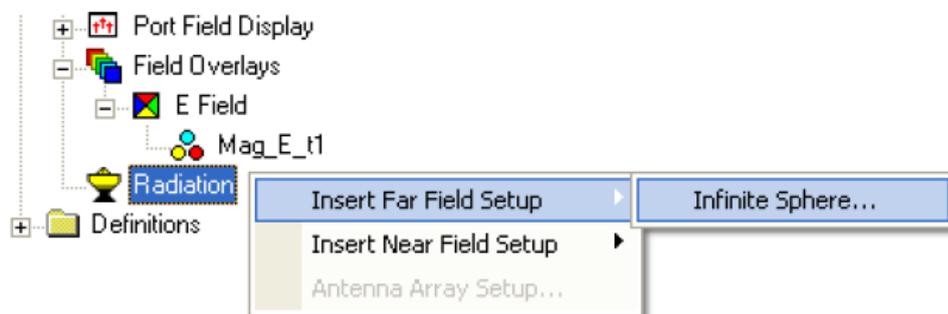


Рис. 14.31. Выполнение установок дальнего поля

2. В дереве проекта кликните правой кнопкой на **Radiation** и выберите **Insert Far-Field Setup>Infinite Sphere**. Задайте диапазон углов, как показано на рис. 14.32. Это диапазон в плоскости XZ, и диапазон от зенита до горизонта в направлении прямого излучения антенны.

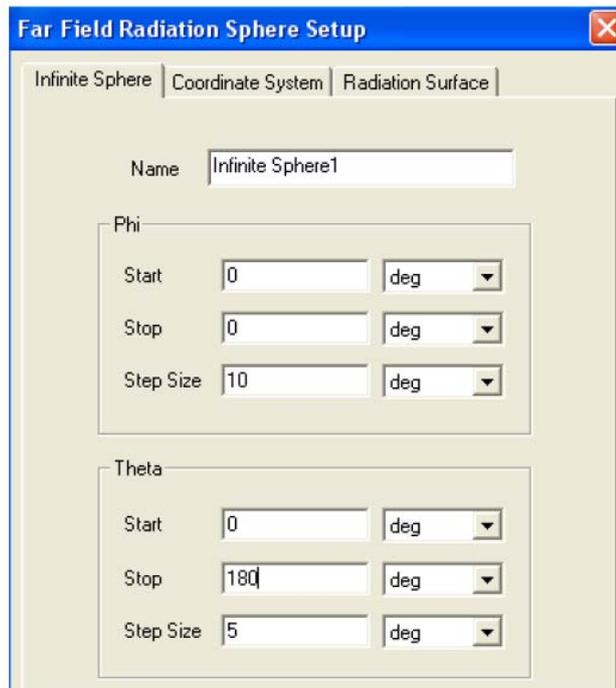


Рис. 14.32. Задание только одной точки на сфере дальнего поля

3. Теперь в дереве проекта, кликните правой кнопкой мыши на **Results>Create Far- Fields Report>Rectangular Plot**.

4. Выберите характеристику  $rEz$  как функцию времени.

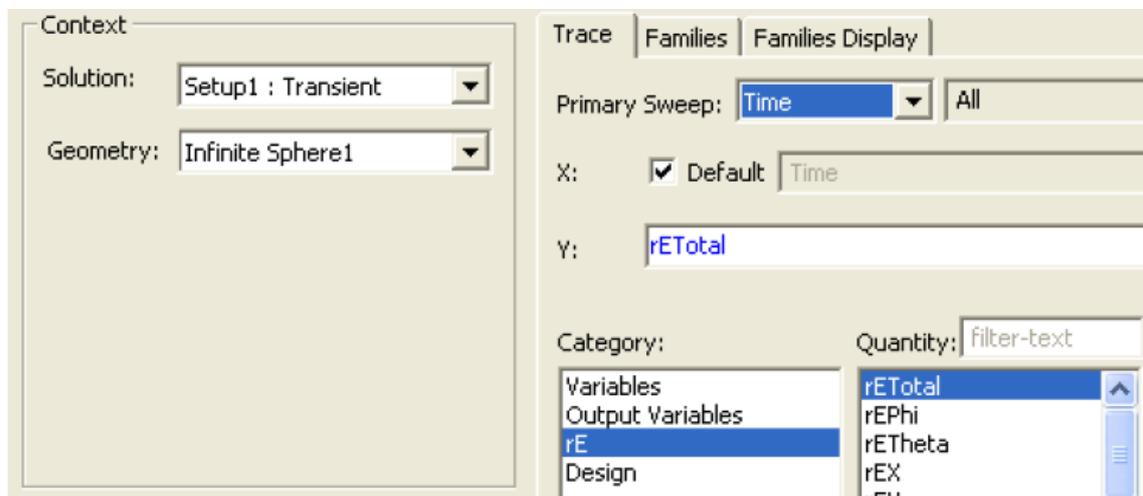


Рис. 14.33. Вывод характеристики напряженности поля в дальней зоне

5. В закладке Families, задайте  $\Theta = 90^\circ$  и  $\Phi = 0^\circ$ .

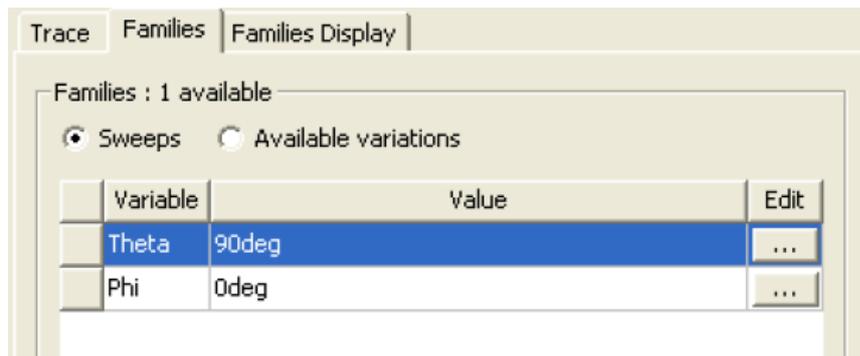


Рис. 14.34. Зкладка семейств вывода характеристик

**Пояснение:** Компонента  $E_z$  является доминирующей. Поэтому она выбрана на рис. 14.33. Произведение  $r$  на  $E_z$  полезно, потому что оно не зависит от расстояния от источника до точки наблюдения в дальней зоне. Параметр  $rE$  имеет размерность [В], так как поле  $E$  имеет размерность [В/м], а расстояние  $r$  [м].

На рис. 14.35 показывается форма временной зависимости поля в дальней зоне. Этот график показывает, как искажается сигнал, излучаемый антенной. Эта информация может использоваться, чтобы улучшить конструкцию антенны, например, разумно помещая резистивные ленты в некоторых ее точках. Это - также полезная информация на этапе постпроцессорной обработки данных расчета.

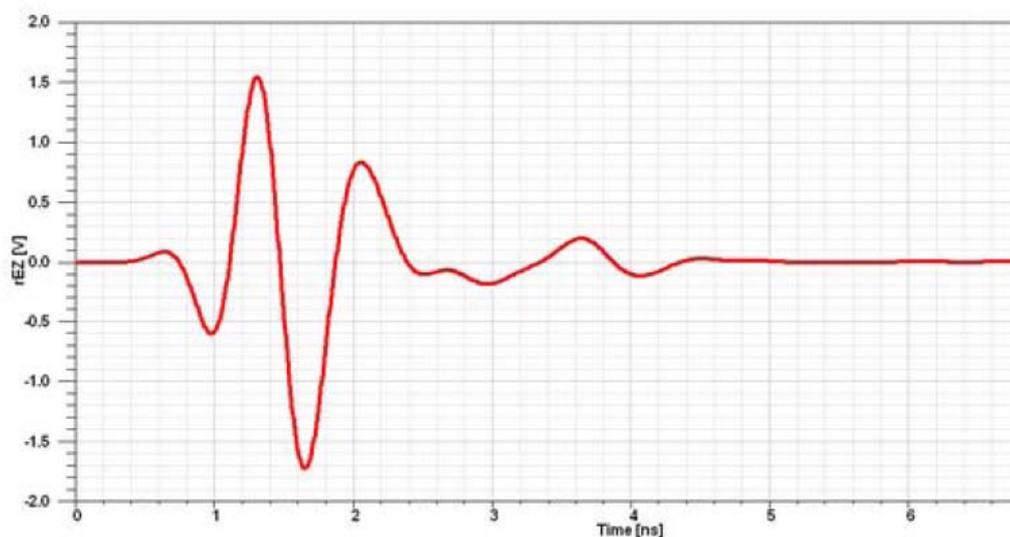
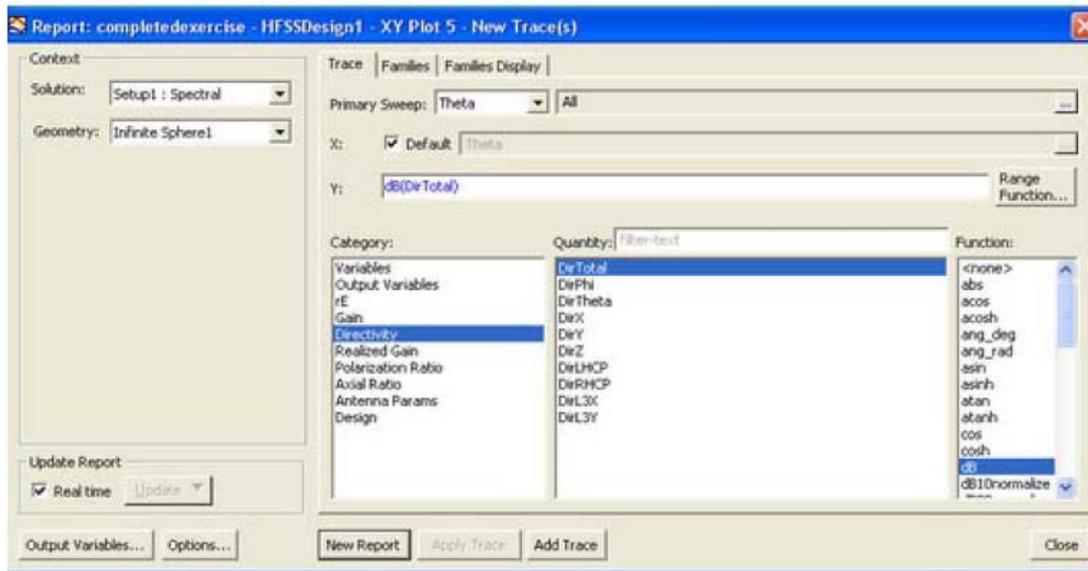


Рис. 14.35. Изменение дальнего поля излучения, co-polarized, в центре главного луча.

Если нужно, вы можете также создать частотно-зависимое дальнее поле при изменении решения к Spectral и изменения угла Theta как первичного параметра, как показано в диалоге рис. 14.36.



*Рис. 14.36. Вывод характеристики дальнего поля в спектральной области*

В закладке Families (рис. 14.36) можно видеть, что ранее установлена частота 1.2 GHz, в закладке Radiated-Fields установки решение Solution Setup, и таким образом, можно выбрать опцию **Spectral**.

## 15. Проектирование наноразмерных светодиодных модулей

Одной из актуальных задач, возникающих на стыке между оптическим и СВЧ – диапазонами, является обеспечение эффективного излучения световых электромагнитных волн в средах со сложной частотной зависимостью их свойств. К таким средам, в которых анализ распространения электромагнитных волн представляет довольно сложную задачу, можно отнести безэлектродные разряды в плазме, метаматериалы с отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью, а также полупроводниковые гетероструктуры. В данном разделе рассматриваются возможности повышения эффективности светодиодных модулей на основе резонаторных систем с квантовыми источниками электромагнитного излучения[8].

Развитие техники СВЧ по мере увеличения частоты всегда сдерживалось технологическими возможностями. Поэтому, например, в субмиллиметровом диапазоне длин волн невозможно было использовать столь же эффективные резонаторные и замедляющие системы, как в сантиметровом диапазоне.

Однако в настоящее время в связи с успехами в развитии нанотехнологии такие возможности появились, и теперь можно использовать богатый опыт разработок СВЧ систем в приборах оптического диапазона, включая лазеры и светодиоды. Кроме того, результаты моделирования потоков электронов и фотонов позволяют в едином процессе моделировать активные и пассивные элементы. При этом в качестве источников электромагнитного излучения можно задавать точечные источники в виде коротких отрезков тока.

Разработчики HFSS предусмотрели такие возможности. В библиотеку материалов можно включать наноразмерные изотропные и анизотропные материалы. Однако требуется убедиться в достоверности работы программ при расчете структур с предельно малыми размерами, на которые воздействуют электромагнитные волны светового и СВЧ диапазонов волн. Особенно важным является то, что необходимо правильно описать источники световых волн. В программах электромагнитного моделирования в качестве источников излучения можно использовать источники тока или напряжения с собственными размерами, намного меньше длины волны.

Рассмотрим светодиоды (СД) с объёмными резонаторами (ОР), которые считаются перспективными [8], поскольку имеют существенные преимущества в сравнении с обычными СД. Например, интенсивность спонтанного излучения светодиода при использовании высокооборотного резонатора увеличивается на порядок за счёт сужения спектра люминесценции. Кроме того, улучшается спектральная чистота и повышается направленность, а также температурная стабильность излучения, как отмечено в [8].

## 15.1. Моделирование структуры и источников возбуждения в оптическом диапазоне волн

Принцип действия светодиодов основан на использовании полупроводниковых гетероструктур, которые состоят из слоев с n- и p-проводимостью. Благодаря разной концентрации носителей зарядов в отдельных слоях и наличию в этой сложной структуре областей, в которых происходит интенсивное накопление зарядов, возникают условия для перехода носителей зарядов с одного энергетического уровня на другой, и имеют место излучения фотонов, обеспечивающее свечение в определённом диапазоне длин волн. Эти участки концентрации носителей зарядов называют квантовыми ямами, нитями и точками в зависимости от того, как в них локализованы фотоны [9-11]. Простые модели этих квантовых участков в соответствии с [10] показаны на рис.15.1.

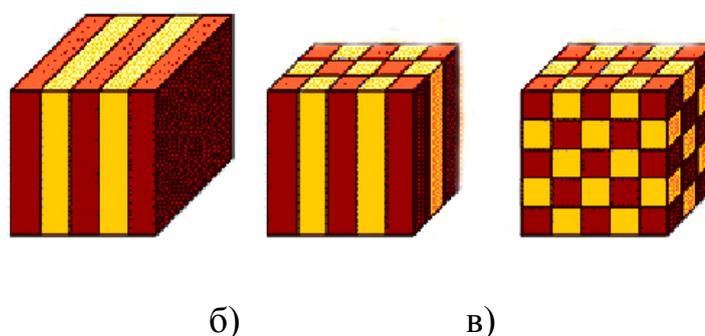


Рис.15. 1. Активные области гетероструктур, в которых источники света представляются в виде квантовых ям (а), нитей (б) и точек (в)

В [8] приводятся фотографии и структуры реальных СД с ОР, которые используются в волоконно-оптических системах связи инфракрасного диапазона длин волн. В качестве наиболее коротковолнового СД, излучающего на длине волны 650 нм, представлена структура, изображённая здесь на рис.15.2,а.

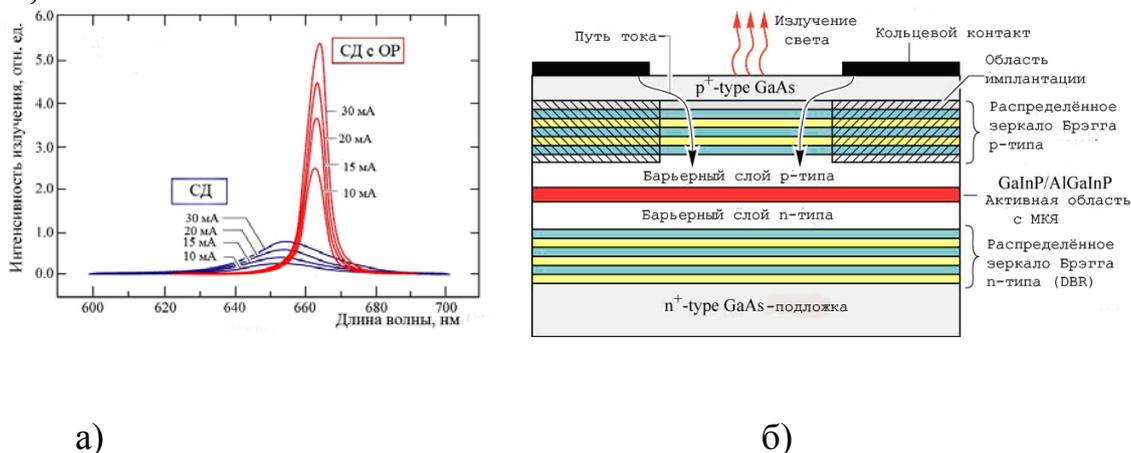


Рис.15.2. Структура (а) и спектры (б) СД на основе GaInP/AlInGaP с МКЯ и зеркалами Брэгга из слоёв AlAs/AlGaAs.

Резонатор образован многослойными зеркалами Брэгга. Активная область СД содержит множество квантовых ям (МКЯ). Спектры излучения этого СД показаны на рис.15.2,б, где для сравнения по интенсивности и ширине приведены также спектры обычного СД при разных токах.

Из рис.15.2,б следует, что введение ОР обеспечивает увеличение интенсивности свечения в заданном направлении. Светотехники при этом говорят о возможности получения высококонцентрированной кривой силы света, а в терминологии электродинамики в данном случае используется понятие узкой диаграммы направленности.

При проектировании СД с ОР в [8] рекомендуется выбирать резонаторы с наименьшей длиной, возбуждаемые на фундаментальном виде колебаний (ВК), и имеющие наиболее высокую собственную добротность, т.е. наименьшее поглощение (потери) в резонаторе. Однако реальные СД с ОР, включающие распределённые зеркала Брэгга и работающие на ВК, не вполне удовлетворяют этим рекомендациям.

Для решения задач оптического диапазона используя программы электродинамического моделирования, моделирование дискретных и точечных источников световых волн, а также распределённых источников, можно выполнить, можно использовать отрезки токов вдоль линий передач. Поглощение и потери в металле можно моделировать так, как это делается в диапазоне СВЧ, т.е. в виде скин-эффекта, модели металла с отрицательной диэлектрической проницаемостью, с помощью поверхностного импеданса (сопротивление на квадрат поперечного размера). Итак, после формализации задачи и решении вопроса о моделировании структуры, можно рассмотреть задачу проектирования и оптимизации пассивных структур светодиодных модулей.

## 15.2. Падение плоской волны на частотно-селективную поверхность

Важной практической задачей в световом диапазоне, можно считать расчет падения световой волны на поверхность со сложной структурой. Поверхность с произвольной структурой можно отнести к частному случаю частотно-селективной поверхности. Поэтому, поставим задачу рассчитать электродинамические характеристики этой поверхности для различных форм, материалов и потерь, свойственных этой поверхности.

Если считать, что спектр световой волны, излучаемой гетероструктурой, имеет вид, показанный на рис. 15.2,б, то зная коэффициент отражения частотно-селективной поверхности, можно получить спектр отра-

женной волны. Для того чтобы решить задачу падения электромагнитной волны на поверхность, нужно смоделировать структуру бесконечного размера и применить периодические граничные условия, которые реализованы в программах HFSS. Использование периодических граничных условий резко уменьшает объем задачи и позволяет на современном компьютере с оперативной памятью 4 ГБ решить задачу с нужной точностью.

Рассмотрим бесконечную многоштыревую структуру, состоящую из цилиндрических стержней, показанных на рис. 15.3,а графическими средствами HFSS . Для моделирования бесконечной структуры нужно использовать специальные граничные условия, так называемые, связанные периодические граничные условия. Расчеты показали, что волна, падающая на штыри (рис. 15.4), возбуждает синфазные поля между штырями.

Программа HFSS позволяет решить задачу падения электромагнитной волны на бесконечную структуру с произвольной формой и с учётом потерь. Сверху и снизу структуры, охваченной периодическими граничными условиями, выберем точки, в которых рассчитывается ближнее поле перед плоскостью, и за плоскостью (т.е. отраженная и проходящая волна). Представляет интерес определение частотных характеристик селективной поверхности при различных структурах, отличающихся также шероховатостью поверхности штырей, материалом, формами, размерами структуры, её периодическим или случайным характером повторения. Частотную характеристику можно определить, выполняя моделирование падения плоской волны на поверхность, а также возбуждая структуру с помощью точечных источников света.

Один из вариантов устройств с четвертьволновыми ОР и КТ в виде квантовых дисков (КД) представлен на рис. 15.3, где в изометрии и на проекции изображена многорезонаторная штыревая система (МШС) с полупроводниковой гетероструктурой и люминофором.

На рис.15.3,б показаны электрические силовые линии на входе МШС и КД на основе нитрида галлия синего свечения, возбуждающие жёлтый люминофор. Длина штырей  $l$  соответствует четверти длины волны синего цвета, т.е. около 115 нм. Пространственный период (шаг) частотно-селективной структуры в 3-4 раза меньше длины  $l$ . Точечные источники в виде КД расположены в шахматном порядке через один штырь в синфазных электрических полях противофазного вида колебаний ( $\pi$ -вида). Этот ВК, как известно из техники СВЧ, является наиболее устойчивым.

Размеры КД (рис. 15.3,в) взяты из [11], где отмечалось, что структура с КТ из GaN в матрице AlN создана на сапфировой подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

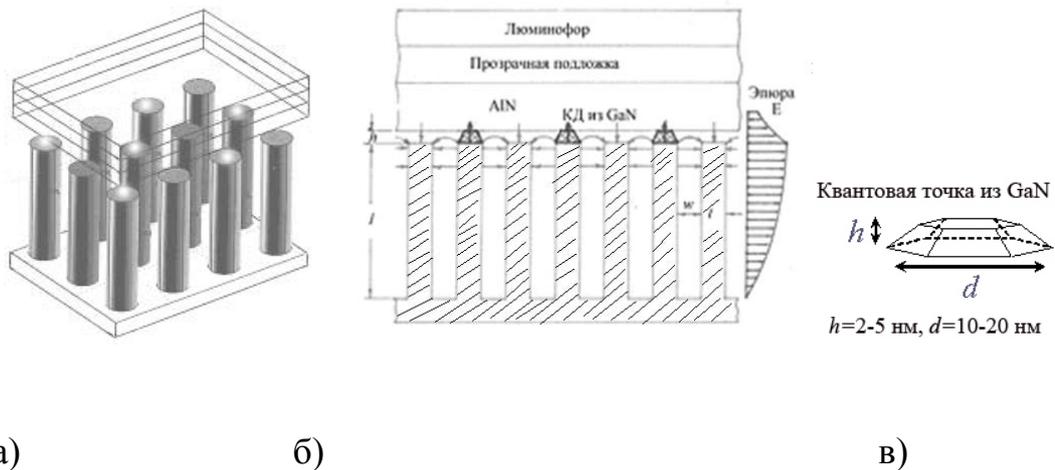


Рис. 15.3. Светодиодный модуль на основе многоштыревой четверть-волновой РС (а,б) с квантовыми точками в виде квантовых дисков КД (в).

На рис.15.3,б приведены также эпюры электрического поля в МШС и в районе квантовых дисков. Электромагнитное поле, проникающее из МШС в полупроводниковую структуру, спадает экспоненциально и важно выбрать размеры штырей с интервалами между ними таким образом, чтобы получить максимальное электрическое поле в квантовых дисках для обеспечения наиболее эффективного взаимодействия штыревой системы с гетероструктурой.

Последовательность решения поставленной задачи в системе HFSS можно представить следующим образом.

Командой **Draw->Cylinder** создадим металлический цилиндр с радиусом 50 нм и высотой 200 нм. Затем используем команду **Edit-> Duplicate Copy** для копирования и размножения штырей по координате X и по координате Y на расстояние шага (рис. 15.4).

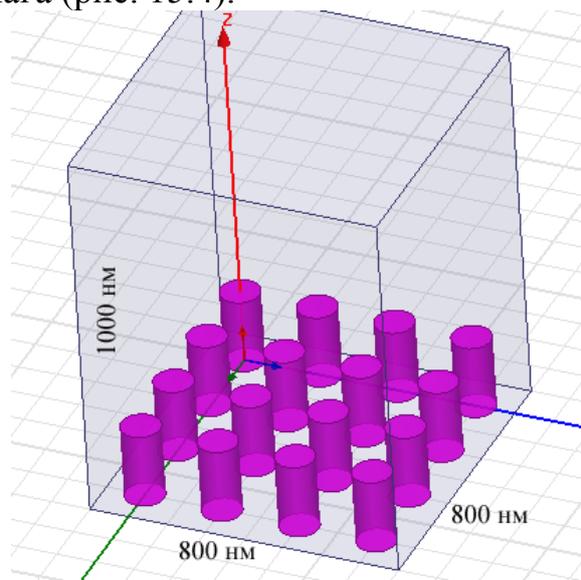
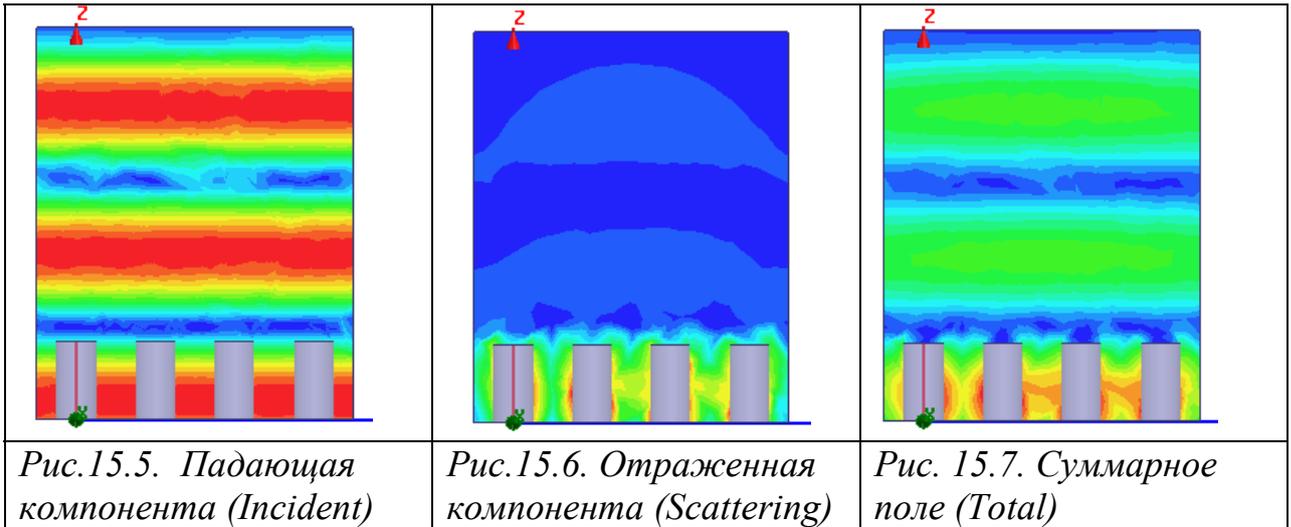


Рис. 15.4. Радиус и высота штырей – переменные параметризуемые величины с начальными значениями 50 нм и 200 нм

Зададим плоскую волну, падающую на эту структуру командой **Source** -> **Plane Wave**. На рис.15.5 – 15.7 показаны фрагменты полей падающей, отражённой и суммарной волн.

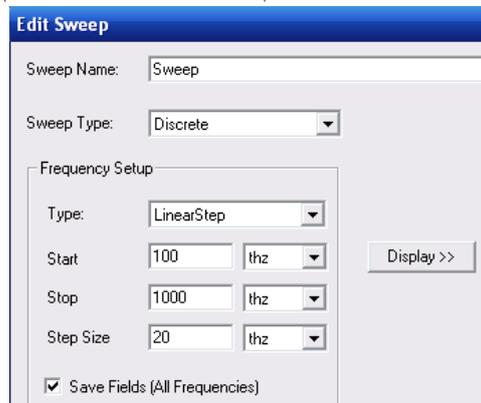
Зададим граничные условия на окружающий этот фрагмент бокс. Для того, чтобы задать этот фрагмент как бесконечно повторяющийся, нужно задать на противоположные стороны периодические граничные условия **Master-Slave**. На нижнюю плоскость **Ground** зададим **Perfect E**, а на верхнюю плоскость – условие идеального поглощения **Radiate**.

Зададим частоту расчета, например, 400 ТГц.



На этой частоте, после выполнения расчета, можно вывести падающую, отраженную компоненту и суммарное поле в сечении частотно-селективной поверхности (рис. 15.5-15.7).

Теперь добавим диапазон частот анализа командой **Add Sweep**. В появившемся по этой команде диалоге рис. 15.8 внесем оптический диапазон частот 100 ТГц – 1000 ТГц с шагом 20 ТГц.



*Рис. 15.8. Задание диапазона частот.*

Запустим расчет командой **HFSS** -> **Analyzes All**. В качестве характеристики отражения волны от частотно-селективной поверхности

можно вывести величину RCS (Radar Cross Section), которая зависит как от частоты, так и от угла падения плоской волны.

Другим способом определения частотных свойств поверхности будет установка дискретных источников излучения в шахматном порядке, что позволит моделировать квантовые точки. На рис.15.9 и 15.10 показаны векторы рассчитанного электрического поля и источники электромагнитного излучения.

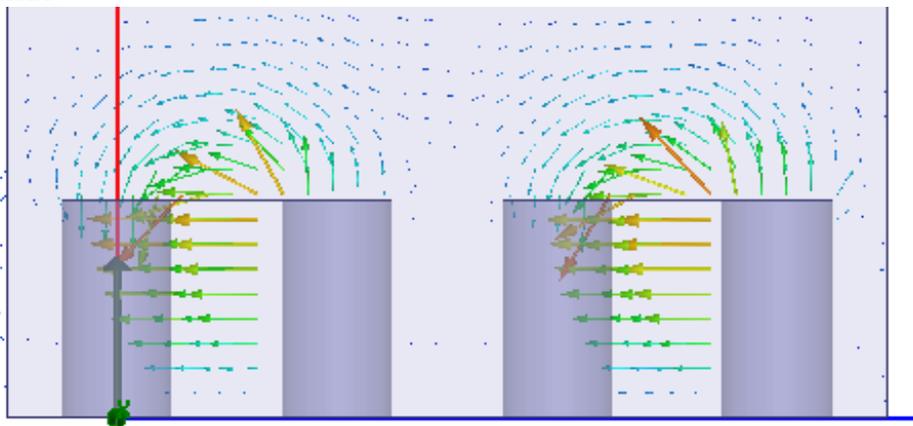


Рис. 15.9. Поле  $E$  в сечении щелей моделируемой поверхности

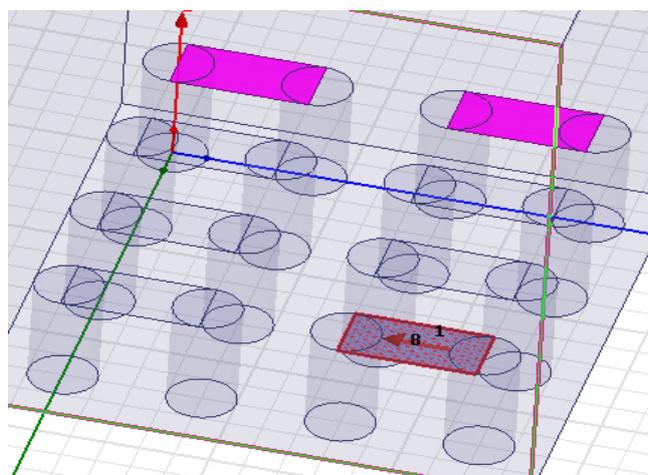


Рис. 15.10. Фрагмент поверхности со щелями, на которые нанесены дискретные источники (квантовые точки)

Для того, чтобы управлять возбуждением квантовых точек, заданных в виде дискретных источников электромагнитного излучения (рис. 15.10), зададим команду HFSS -> Fields -> Edit Source и установим модули источников возбуждения равными 1, а отсутствующие источники – равными 0. Возбуждение структуры с помощью дискретных источников позволяет вывести на график параметр  $|S_{11}|$ , который характеризует в диапазоне частот коэффициент отражения поверхности (рис. 15.11).

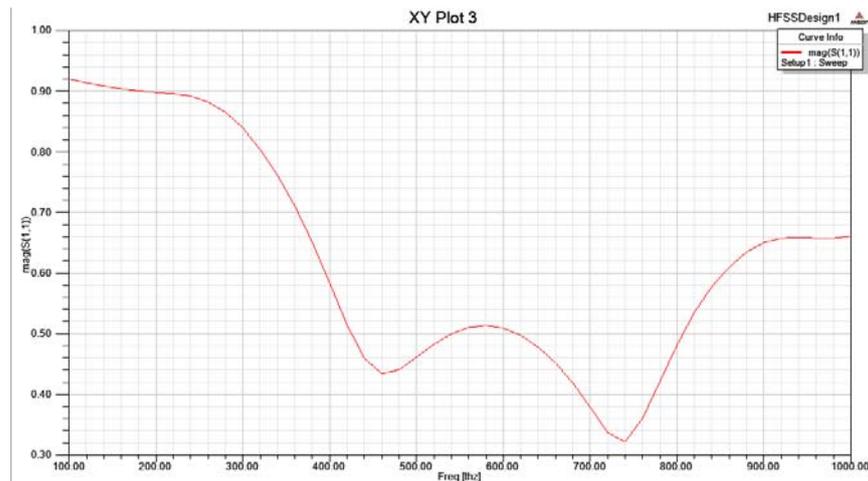


Рис. 15.11. Частотная характеристика отражения от частотно-селективной шероховатой поверхности в световом диапазоне

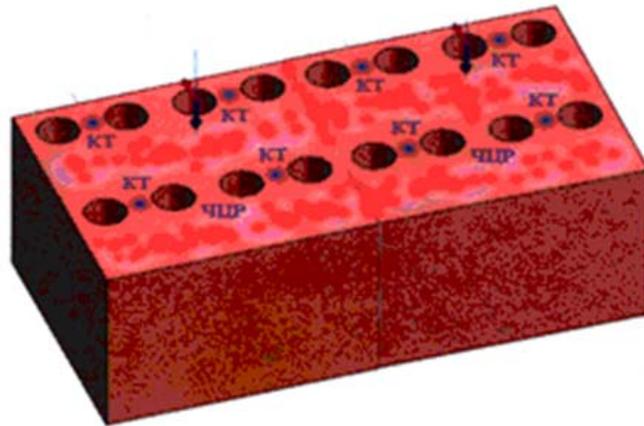
Частотные и др. характеристики зависят от формы штырей. Если штыри имеют квадратные сечения, то на ребрах концентрируется электрическое поле, что приводит к увеличению потерь и соответствующему изменению резонансных характеристик.

### 15.3. Характеристики светового излучения в многорезонаторных структурах

Кроме штыревой (открытой почти со всех сторон) наноразмерной структуры, представляют интерес резонаторные системы различной формы, открытые только с одного торца, т.е. четвертьволновые ОР. Закрытые ОР отличаются более высокой добротностью и поэтому обеспечивают более эффективное излучение.

На рис.15.12 показана многорезонаторная система с четвертьволновыми цилиндрическими резонаторами (ЧЦР), возбуждаемыми на низших видах колебаний  $H_{111}$ . Резонаторы выполнены в виде цилиндрических углублений в медной пластине.

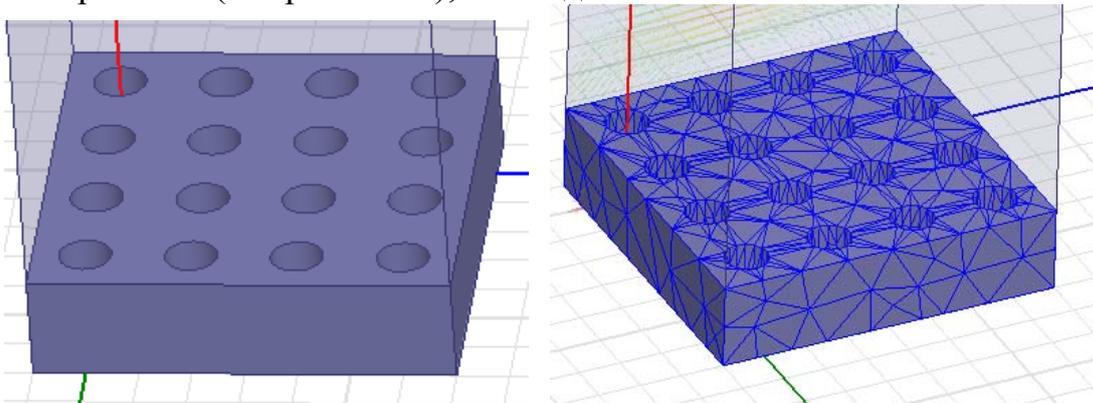
Система состоит из цепочек связанных резонаторов (ЦСР). Квантовые точки (КТ) расположены через один резонатор в синфазных электромагнитных полях.



*Рис. 15.12. Резонансная поверхность со связанными резонаторами*

Расстояния между ЦСР должны быть значительно больше расстояний между резонаторами для исключения связи между рядами и обеспечения возбуждения ВК  $H_{111}$  с ориентацией электрических силовых линии вдоль ЦСР.

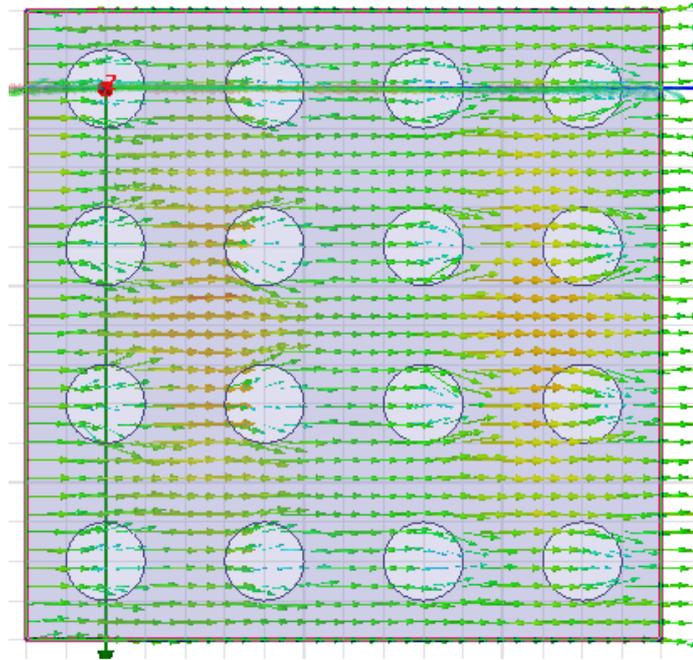
Выберем размеры в нм и частоты в ТГц. Начертим базовую часть фрагмента поверхности, на которой будем создавать шероховатую поверхность (см. рис.15.13), командой **Draw->Box**.



*Рис. 15.13. Фрагмент поверхности с цепочкой связанных резонаторов*

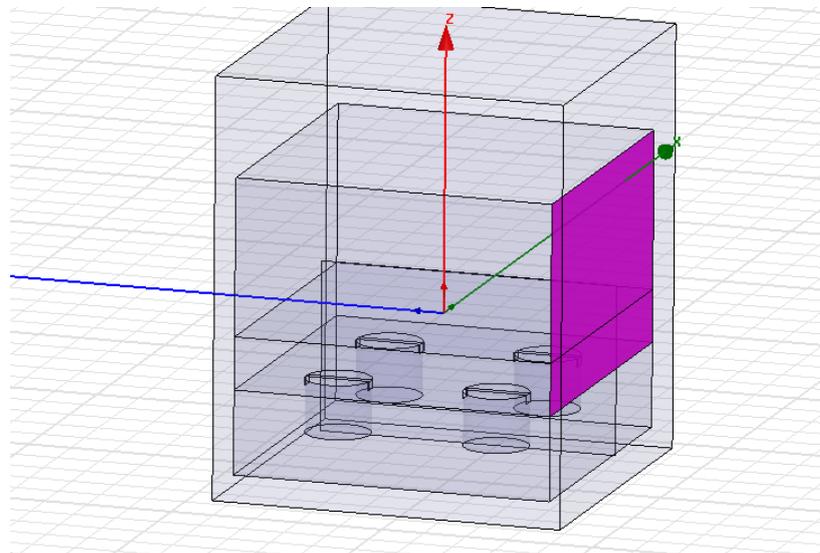
Далее начертим цилиндры высотой  $h=100\text{nm}$  и вычтем из параллелепипеда, составляющего фрагмент поверхности.

Возбудить такую поверхность можно падающей плоской волной (рис.15.14) или дискретными источниками.



*Рис. 15.14. Поле в сечении резонансных отверстий при падении на поверхность плоской волны*

Для того, чтобы решить задачу, охватим фрагмент поверхности периодическими граничными условиями (рис. 15.15), так, как было выполнено в главах 2-4.



*Рис. 15.15. Фрагмент отражающей структуры с цилиндрическими открытыми резонаторами (структура бесконечная, связывающая периодическими граничными условиями отдельный фрагмент, состоящий из четырех резонаторов)*

Заметим, что результаты, полученные в HFSS, подтвердили, что система с цилиндрическими резонаторами обладает более высокой добротностью, чем штыревая структура. Использование цилиндрической системы будет

обстоятельно рассмотрено в последующих разделах. А здесь при рассмотрении полей вблизи шероховатых поверхностей вернёмся к многоштыревой системе.

Для вывода ближнего поля вдоль линии нужно сначала начертить эту линию, которую следует добавить командой **Insert Near Field Setup** в дереве проекта в разделе **Radiation**. Эта линия показана на рис.15.16 для штыревых структур. Там же приведены векторы ближнего поля в верхних сечениях резонансных шероховатых поверхностей.

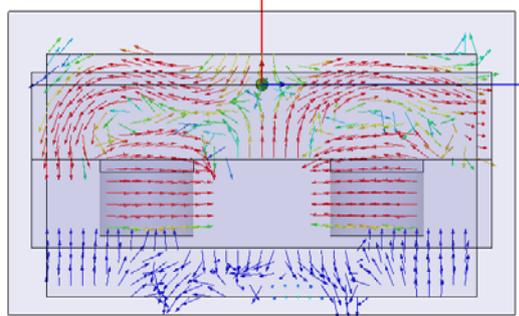


Рис. 15.16. Поля в сечении резонаторов вблизи шероховатых поверхностей

Чтобы выполнить параметрический анализ шероховатой поверхности с круглыми штырями, зададим команду **Optimetric**. В качестве параметрически изменяемых переменных выберем высоту штырей от 60 нм до 220 нм. На рис.15.17 приведены резонансные характеристики, полученные для разных высот цилиндрических штырей.

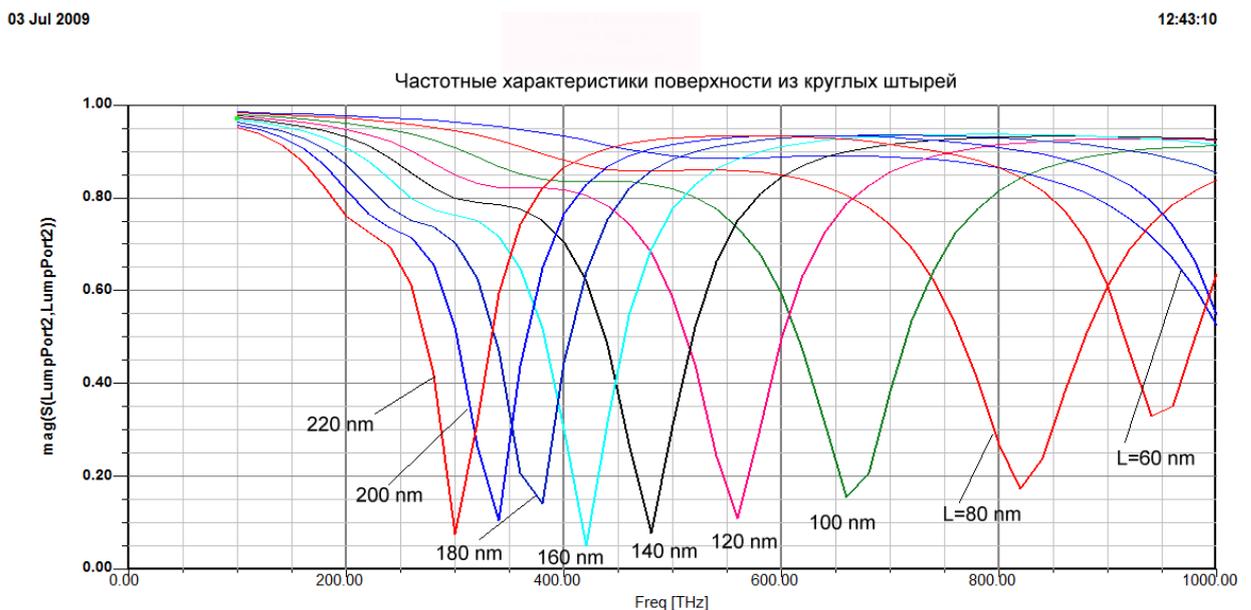


Рис. 15.17. Частотные характеристики структуры (на отражение) для разных высот цилиндрических штырей

На основании экспериментальных расчетов подтверждено, что максимум электрического поля достигается в верхнем сечении штырей

и РС. Эпюра электрического поля и электрические векторы показаны на рис.15.18.

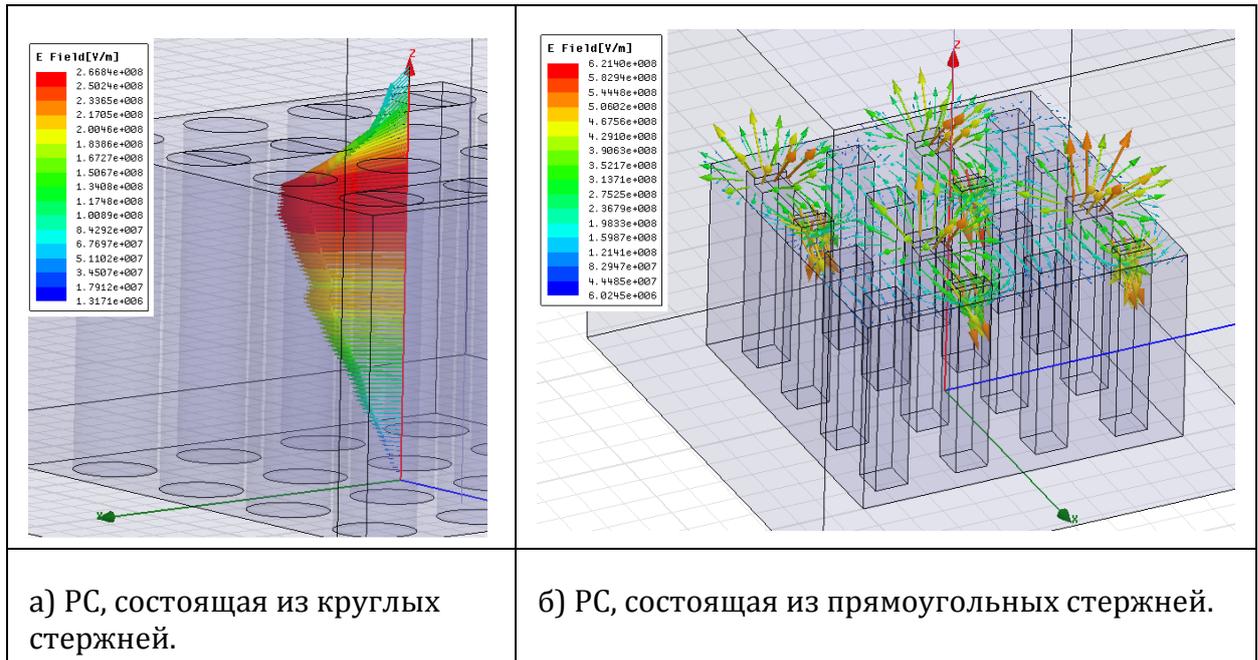


Рис. 15.18. Многоштыревые структуры с круглыми (а) и прямоугольными (б) стержнями.

Для структуры, показанной на рис. 15.18, а с круглыми штырями, приведем результаты расчета рабочей полосы частот и добротностей, которые получены в HFSS для материалов с разными проводимостями, а также шероховатостями.

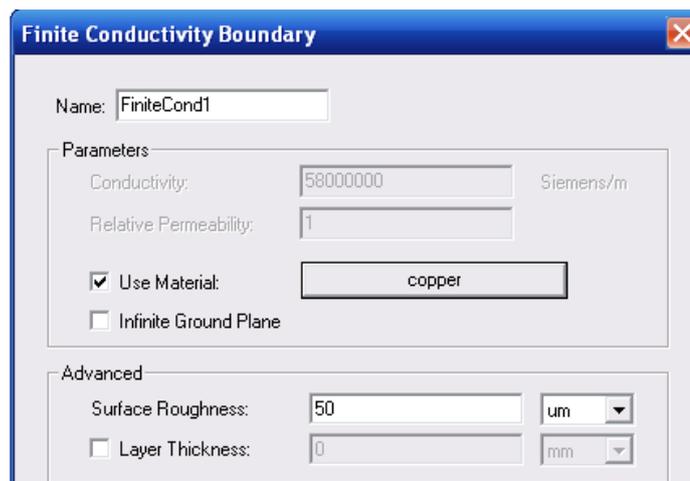


Рис. 15.19. Диалог задания граничного условия материала с конечной проводимости, в котором можно ввести в виде дополнительного параметры шероховатость (Surface Roughness) поверхности материала.

Медь	Медь	с	Молибден	Вольфрам
------	------	---	----------	----------

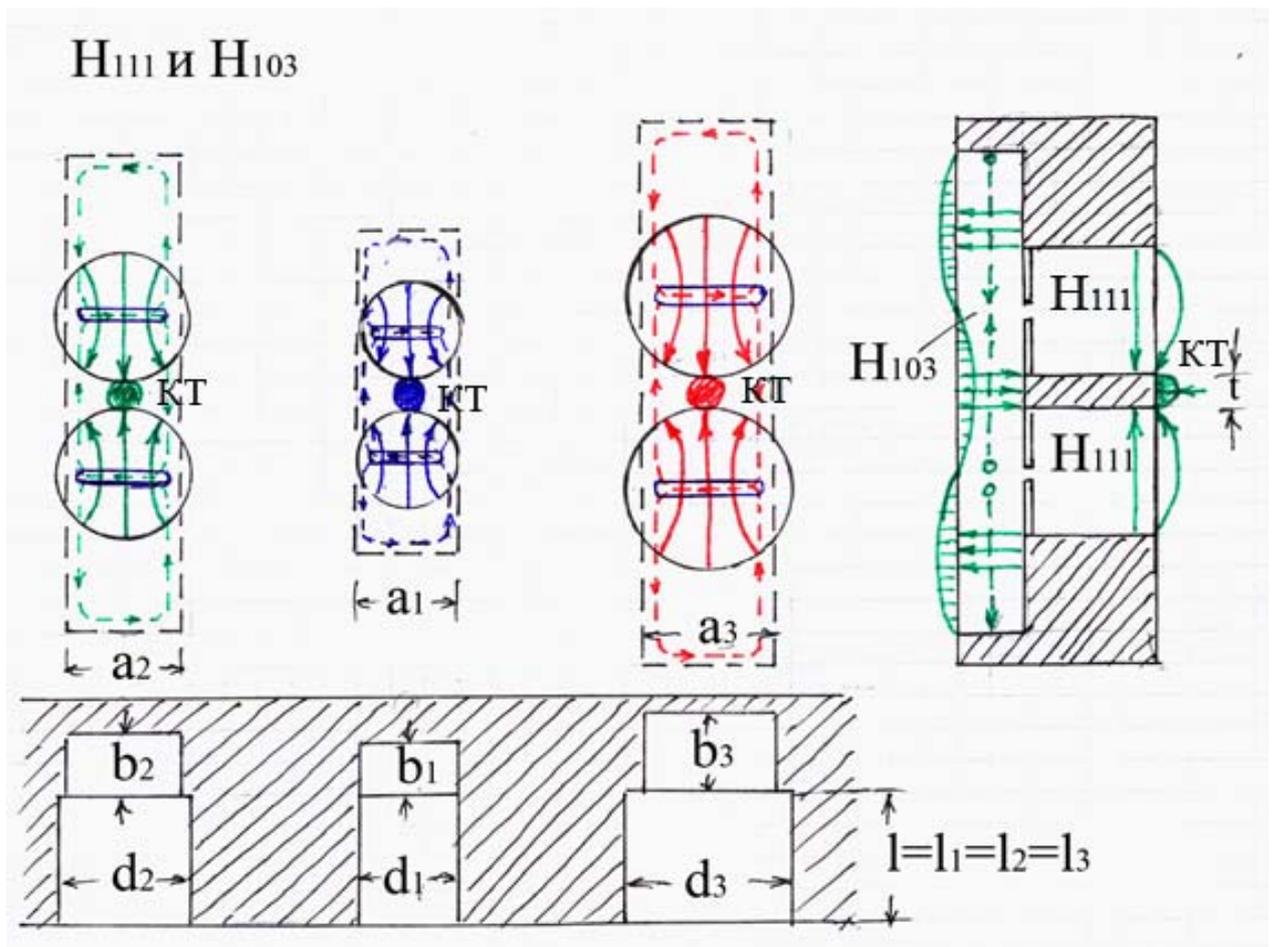
$\sigma=5.8 \cdot 10^7$ См/м	шероховатой поверхностью	$\sigma=1.76 \cdot 10^7$ См/м	$\sigma=1.85 \cdot 10^7$ См/м
100 ТГц	200	250	220
Q=10	5	4	4.5

Следует отметить, что значения добротностей, приведенные в таблице, являются слишком малыми. Поэтому далее вместо открытой многоштыревой структуры рассмотрим другие резонаторные системы с более высокими добротностями. При этом будем обращать внимание на возможности использования низших ВК и обеспечивать такие размеры резонаторов, чтобы резонанс фундаментального ВК соответствовал максимуму спектра излучений активной среды, в качестве которой в данном случае предполагается использование квантовых нитей и точек.

#### 15.4. Моделирование резонансной структуры со стабилизирующими резонаторами

В технике СВЧ часто применяются стабилизирующие резонаторы, которые влияют на открытый резонатор так, что собственная резонансная частота становится более стабильной за счёт увеличения собственной добротности всей резонаторной системы [8]. Это явление можно применить при создании сложной поверхности, работающей в оптическом диапазоне волн.

В качестве первого примера использования стабилизирующего резонатора рассмотрим резонаторную систему, состоящую из двух четвертьволновых цилиндрических резонаторов, связанных со стабилизирующим полуволновым призматическим резонатором. Эта система в виде триады с синими, зелёными и красными КТ показана на рис.15.20. В цилиндрических резонаторах возбуждаются противофазные колебания на низших видах  $H_{111}$ , которые поддерживаются и стабилизируются видом колебаний  $H_{103}$  в стабилизирующем резонаторе, созданном на основе прямоугольного волновода с волной низшего типа  $H_{10}$ .



*Рис. 15.20. Система в виде триады, состоящей из четвертьволновых цилиндрических резонаторов с призматическими стабилизирующими резонаторами.*

В системе используются щели связи по магнитному полю, расположенные на расстоянии, составляющем половину волноводной длины волны в призматическом резонаторе.

В качестве активного элемента предполагается использование квантовой точки (КТ) в виде наноразмерного диска диаметром  $t$ , расположенного между четвертьволновыми цилиндрическими резонаторами в максимуме электрического поля (рис. 15.21).

Размеры стабилизирующего резонатора для синей, зелёной и красной длин волн ( $\lambda_1 = 460$  нм,  $\lambda_2 = 525$  нм и  $\lambda_3 = 635$  нм) определяются по формулам, где  $a$  и  $b <$  (обычно).

Например, при 250 нм получаем  $d_1=304$  нм,  $d_2=362$  нм и  $d_3=482$  нм.

Затем, исходя из выражения для  $a$  и  $b$ , находим  $a_1=302$  нм,  $a_2=341$  нм и  $a_3=396$  нм; после чего выбираем  $b_1=150$  нм,  $b_2=170$  нм и  $b_3=200$  нм.

Протяжённости стабилизирующих резонаторов с ВК  $H_{103}$  на основании выражения получаем равными  $L_1=1062$  нм,  $L_2=1235$  нм и  $L_3=1596$  нм.

Анализ излучателей в системе HFSS позволяет также получить

пульсирующую картину электромагнитного излучения в динамическом режиме. Результаты анализа излучения из одной квантовой точки рассмотренного ОР в системе HFSS иллюстрируются на рис.15.20, где показано поле в фиксированный момент времени.

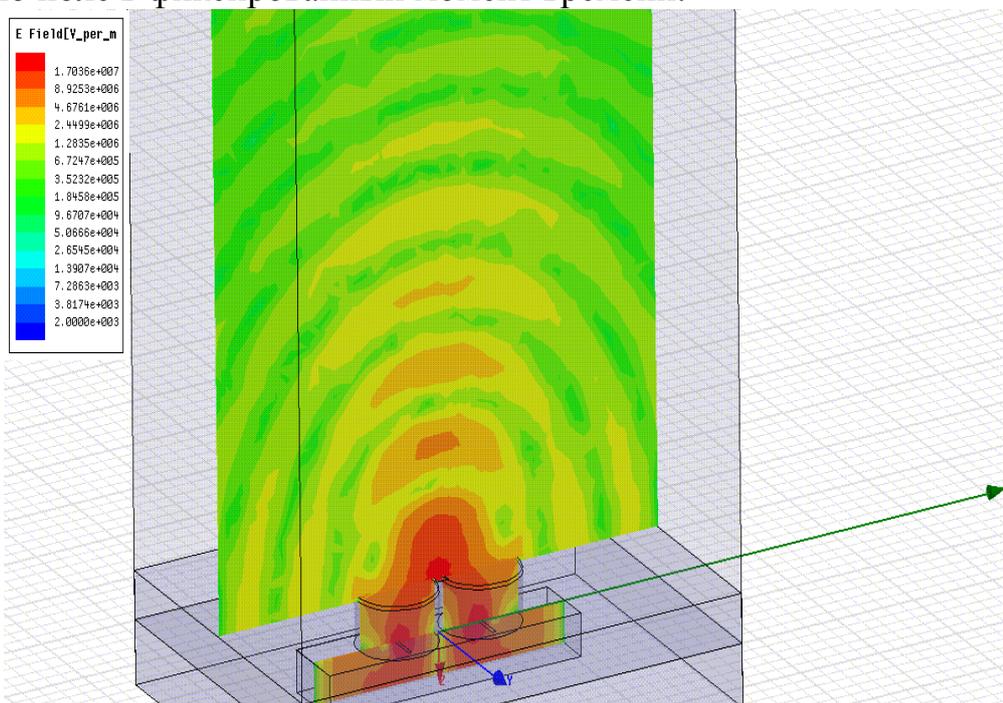


Рис.15.21. Картина излучения из КТ в фиксированный момент времени

А на рис.15.22 зафиксировано излучение в тот момент, когда в щелях связи максимальное электрическое поле, а вблизи КТ минимальное из-за расстояния в четверть длины волны.

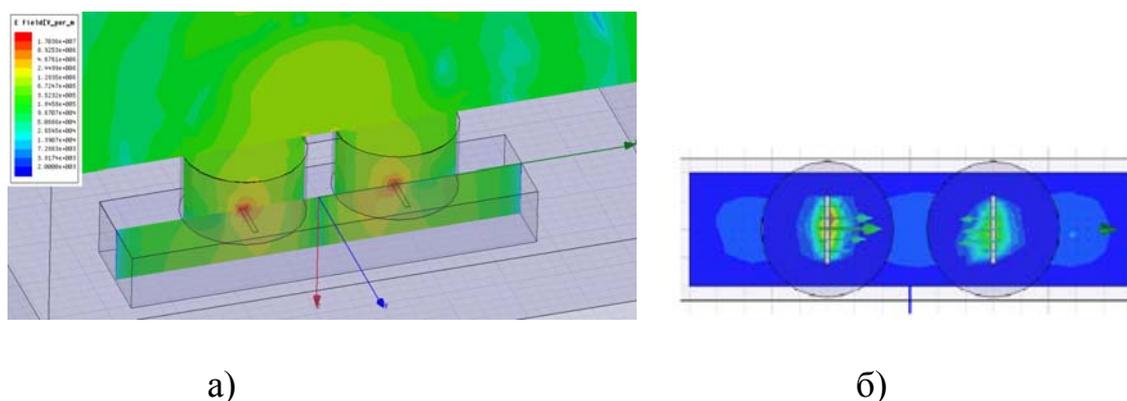


Рис.15.22. Излучение из КТ (а) в момент времени, когда в щелях связи максимальное электрическое поле (б)

Необходимо отметить, что из техники СВЧ известны более высокочастотные стабилизирующие резонаторы, чем призматические на ВК  $H_{10p}$ . К ним, например, относятся цилиндрические резонаторы на основе ВК  $H_{01p}$ , которые будут рассмотрены в следующем разделе.

### 15.5. Квантовые нити и точки над резонаторами

### 15.5.1. Резонаторные системы с квантовыми нитями на ламелях

Рассмотрим пример наиболее высокодобротного СР, основанного на уникальной особенности волны типа  $H_{01}$  в круглом волноводе, при распространении которой потери в стенках волновода чрезвычайно малы. Из техники СВЧ также известно, что используемые в коаксиальных магнетронах СР на видах колебаний  $H_{011}$  дают увеличение собственной добротности многорезонаторной системы почти на порядок [11,12]. В связи с этим предлагается использовать идеи, реализованные в обращённо-коаксиальных и торцевых стабилизированных магнетронах (ОКМ и ТСМ), для создания наноразмерных излучателей.

Один из этих вариантов относится к излучателю кругового действия, который можно представить, как аналог ОКМ. Так, на рис.15.23 приведена схема излучателя в виде обращённой системы ламельного типа, возбуждаемой на  $\pi$ -виде колебаний от азимутально-симметричного вида  $H_{011}$  во внутреннем цилиндрическом резонаторе с помощью ЩС, расположенных через один резонатор.

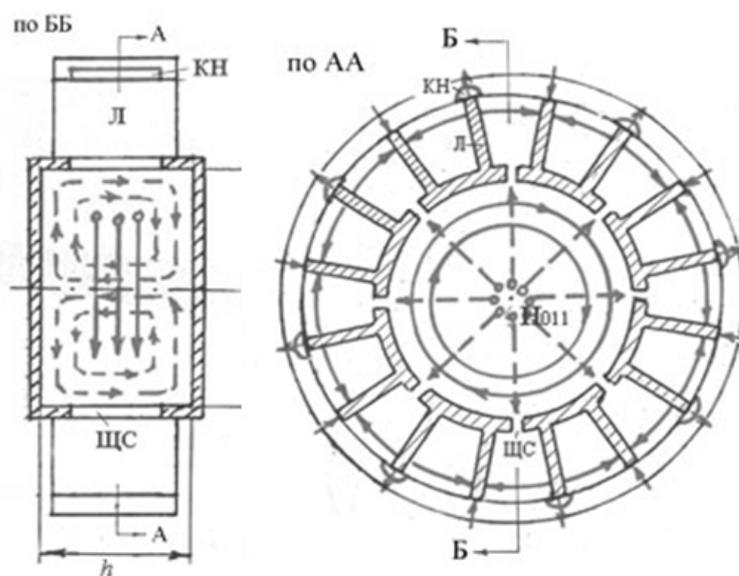


Рис. 15.23. Излучатель кругового действия (аналог ОКМ)

На концах ламелей (Л) тоже через одну Л расположены квантовые нити (КН) длиной не более ширины Л. Размеры Л по ширине и длине составляют менее четверти длины волны излучаемых колебаний, а длины СР с синими, зелёными и красными КН в данном случае могут быть взяты примерно равными 290, 370 и 620 нм при одинаковых диаметрах резонаторов по 900 нм.

Другой вариант представляет СДМ осевого излучения с СР на виде колебаний  $H_{011}$  как аналог ТСМ (рис. 15.24).

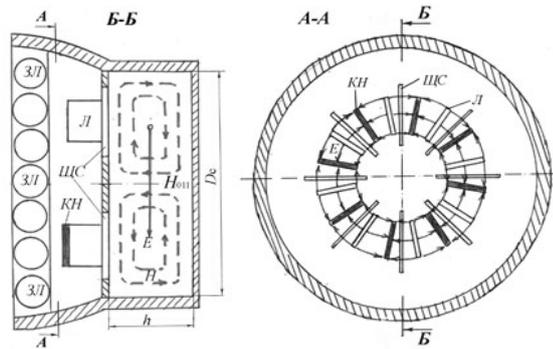
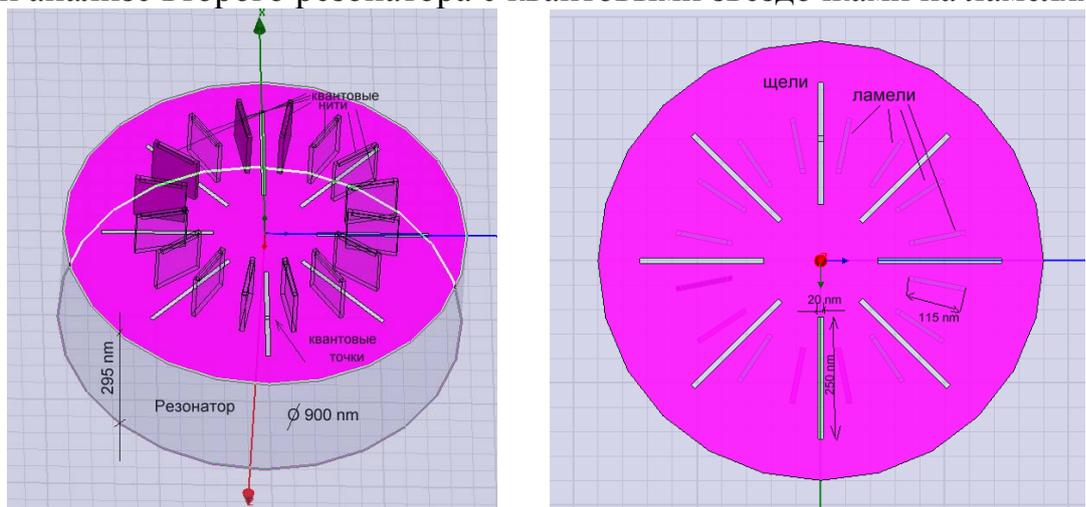


Рис.15.24. Излучатель с квантовой звёздочкой (аналог ТСМ)

В отличие от излучателя кругового действия здесь Л и ШС находятся на торцевой поверхности СР с видом колебаний  $H_{011}$ . На концах Л (чётных или нечётных) расположены КН одного цвета. И такие радиальные КН на торцевой поверхности могут восприниматься как «квантовые звёздочки». [18,19]. Рассматриваемая конструкция удобна для нанесения люминофорного покрытия, состоящего из зёрен люминофора (ЗЛ), размеры которых могут быть сравнимы с шириной Л. Жёлтые люминофоры в сочетании с синими КН обеспечивают белое свечение. При этом целесообразно использовать отражатель для получения желательного светораспределения излучателя.

Излучатели, представленные на рис.15.23 и 15.24, были проанализированы в системе HFSS. Расчётные резонансные характеристики подтверждают возможность увеличения собственной добротности при введении СР.

На рис. 15.25 и 15.26 приводятся иллюстрации, полученные в системе HFSS при анализе второго резонатора с квантовыми звёздочками на ламелях.



а)

б)

Рис. 15.25. Резонаторная система с торцевыми ламелями в изометрии (а) и в плане (б).

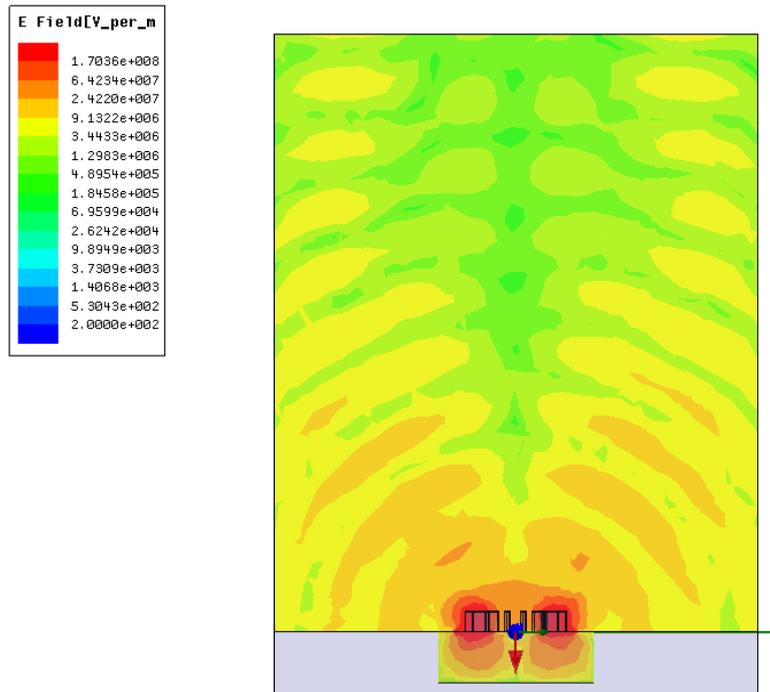


Рис.15.26. Излучение из квантовой звёздочки в фиксированный момент времени.

### 15.5.2. Резонаторные системы с квантовыми КОЛЬЦАМИ

Можно представить и более простые устройства излучателей, использующих «квантовые колечки». Один из таких излучателей показан схематически на рис. 15.27.

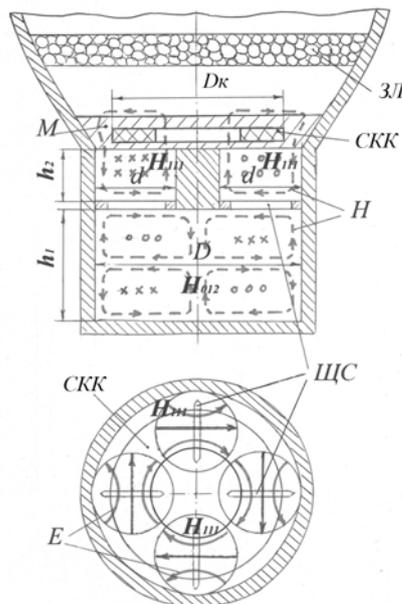


Рис.15.27. Излучатель с квантовым колечком.

Этот излучатель в некоторой степени является аналогом ячеек, приведенных на рис. 15.19. В нём используется несколько четвертьволновых цилиндрических резонаторов (например, четыре), расположенных по окружности. В данном примере в этих резонаторах возбуждаются синфазные колебания видов  $H_{111}$ , связанные через щели связи (ЩС) со стабилизирующим резонатором на основе полуволнового круглого волновода с видом  $H_{01p}$  (на рисунке показаны силовые линии вида колебаний  $H_{012}$ ). Вместо КН в представленную ячейку введено синее квантовое колечко (СКК), расположенное в своей матрице (М) вдоль электрических силовых линий. Таким образом, излучающим элементом в данном излучателе является как бы КН, свёрнутая в кольцо.

На рис.15.28 приведена картина электромагнитного поля в резонаторной системе и в ближней зоне излучателя в фиксированный момент времени, а также частотная характеристика резонаторной системы без полупроводниковой структуры, которые были получены в HFSS.

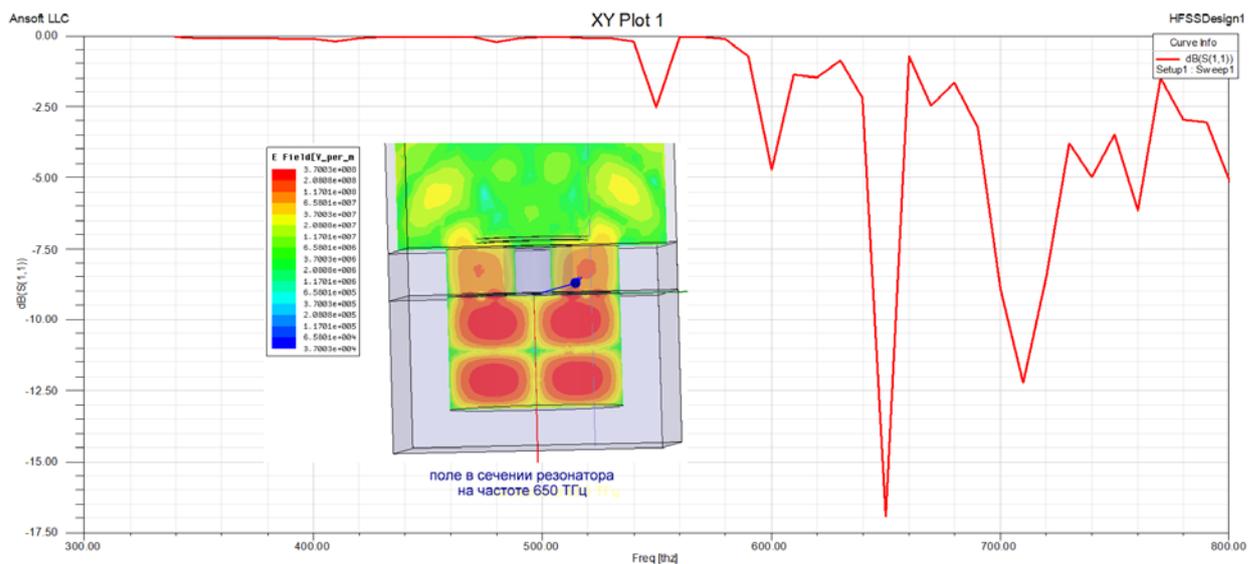


Рис. 15.28. Частотная характеристика и картина электромагнитного поля на рабочей частоте 650 ТГц

Из рис.15.28 видно, что в диапазоне частот от 500 до 1000 ТГц получено несколько резонансных характеристик, одна из которых соответствует резонансу ВК  $H_{012}$  в СР на частоте 650 ТГц. Подтверждением этому факту является картина с двумя вариациями поля вдоль оси СР.

Заметим, что ВК  $H_{012}$  не является низшим, и поэтому наблюдаются резонансы на более низких частотах. Однако разделение ВК вполне достаточное для того, чтобы не возникало «паразитных» колебаний, снижающих эффективность излучения на рабочей частоте.

Следует обратить внимание на то, что резонансная характеристика РС с СР на ВК  $H_{012}$  является наиболее узкой, что свидетельствует о высокой добротности РС на рабочей частоте.

На рис.15.29 приведена картина поля в момент времени, когда в щелях связи электрическое поле достигает максимального значения, а вблизи КК при этом нулевое поле, поскольку КК находится на расстоянии в четверть волны от ЩС.

На рис.15.29 также приведено распределение азимутальной составляющей электрического поля в радиальном направлении, т.е. вдоль линии, показанной на рисунке. Азимутальная составляющая электрического поля на ВК  $H_{01p}$  является единственной и кривая, соответствующая рабочей частоте 650 ТГц, показывает, где расположен максимум электрического поля и куда следует поместить КК.

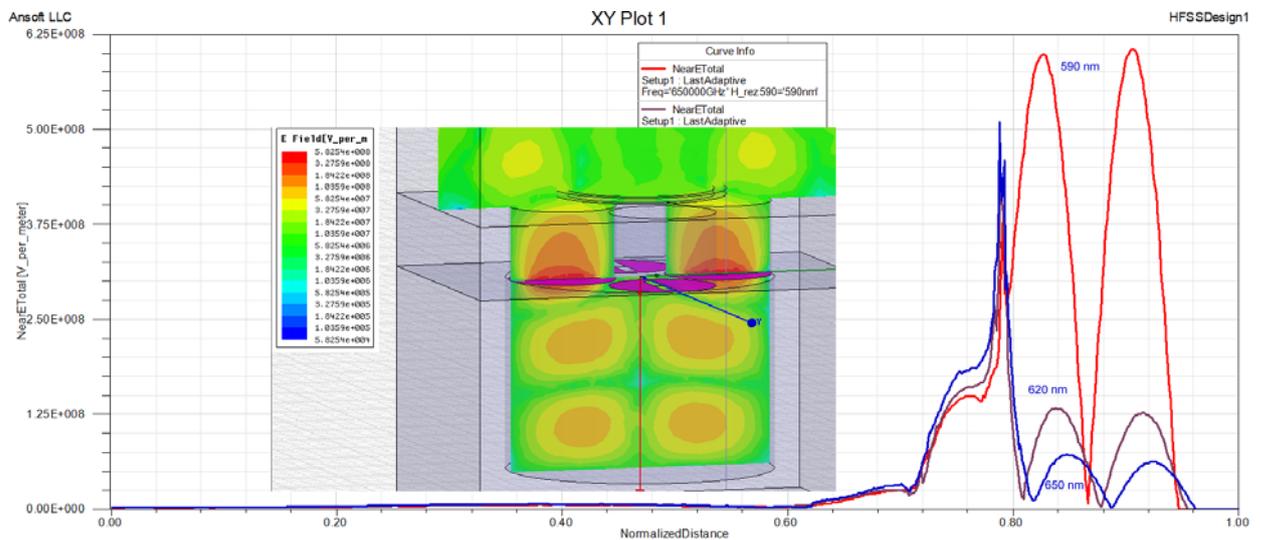


Рис.15.29. Распределение электрического поля в радиальном направлении и иллюстрация излучения в момент времени, когда в щелях связи максимальное электрическое поле.

Заметим, что поперечные размеры рассмотренного излучателя ограничены диаметрами четвертьволновых резонаторов, которые не должны превышать  $0,6 \lambda$ , чтобы они допускали возникновение только низшего ВК  $H_{111}$ , и диаметром СР, который не должен быть существенно больше  $1,2 \lambda$ , чтобы не возникало множество высших ВК.

Это обстоятельство находится в противоречии с необходимостью обеспечения достаточных технологических размеров для изготовления эффективных полупроводниковых структур на основе КТ из InGaN в матрице GaN [19]. Поэтому, желательно увеличить размеры матрицы с КТ.

Для этого предлагается устройство излучателя, схематически представленного на рис.15.30, в котором используется коаксиальный СР, возбуждаемый на виде колебаний  $H_{011}$  и расположенный внутри многорезонаторной системы, состоящей из цилиндрических четвертьволновых резонаторов (ЧР) с видами колебаний  $H_{111}$ . На рис. 15.30 показаны 8 резонаторов с противофазными колебаниями при связи с СР через один ЧР. Над этими резонаторами расположена дисковая матрица



излучатели следует собирать в массив. Каждый излучатель при этом может дополняться отражателем. Такие излучатели могут группироваться, например, в полноцветные (синие, зелёные и красные) триады. Полученное светоизлучающее устройство может быть использовано как источник света с регулируемой цветностью хроматического или белого излучений, а также применяться в дисплеях с высокой разрешающей способностью.

Световая отдача излучателя с синими КН в сочетании с жёлтым люминофором во многом зависит от собственной добротности многорезонаторной системы, настроенной на частоту синего цвета. При использовании цветных триад без люминофоров световая отдача каждого цветового элемента также существенно зависит от добротности и настройки многорезонаторной системы со стабилизирующим резонатором на длину волны, излучаемую квантовой звёздочкой или квантовым колечком.

## 15.6. Анализ структуры, составленной из восьми резонаторов в оптическом диапазоне длин волн

Рассмотрим этапы анализа резонаторной структуры оптического диапазона длин волн в системе HFSS на примере излучателя, представленного на рис.15.30.

На первом этапе осуществляется черчение и создание конструкции резонатора. Выберем единицы черчения «нм» и частот «ТГц».

Для синего света  $\lambda_c = 460$  нм

$D = 1.5$  мкм,  $D_c = 750$  нм,  $d = 100$  нм,  $D_q = 380$  нм,  $l_q = 490$  нм и  $l_c = 325$  нм;

для красного  $\lambda_k = 640$  нм

$D = 2.1$  мкм,  $D_c = 1050$ ,  $d = 150$  нм  $D_q = 525$  нм, Длины<sub>q</sub> = 675 нм,  $l_c = 450$  нм.

Длина щели связи: 400 нм.

Резонаторная структура с указанными размерами и квантовым колечком, выполненная графическими средствами HFSS, показана на рис.15.31 в изометрии и в плане.

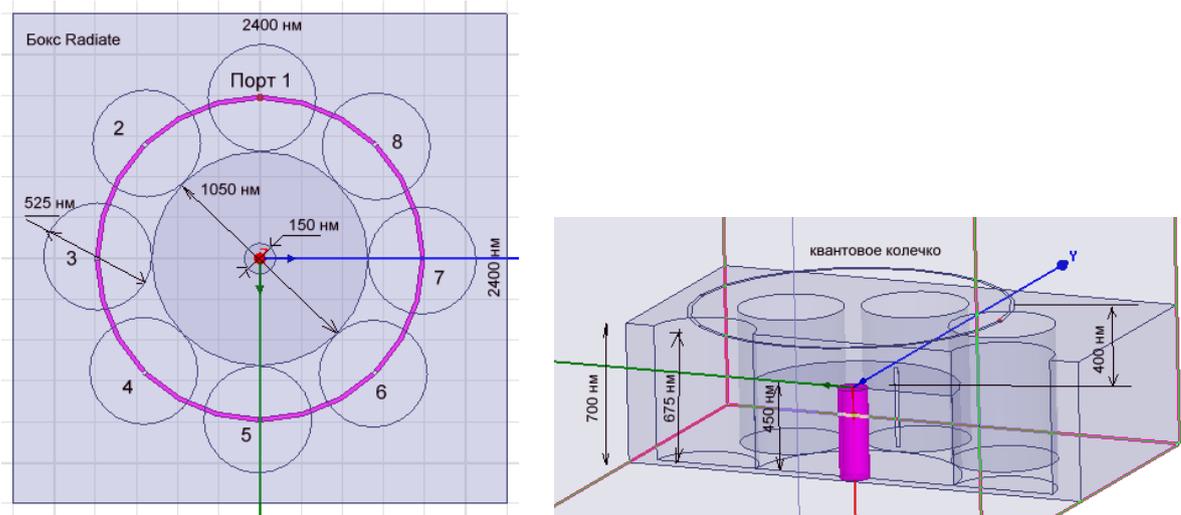


Рис.15.31. Структура, в которой щели расположены через один внешний резонатор, т.е. связаны с центральным коаксиальным резонатором 1,3, 5, и 7 внешние цилиндрические резонаторы

Создание этих рисунков выполнено при использовании следующих команд. Начертим базовую структуру резонатора командой **Draw-> Box** (рис.15.32).

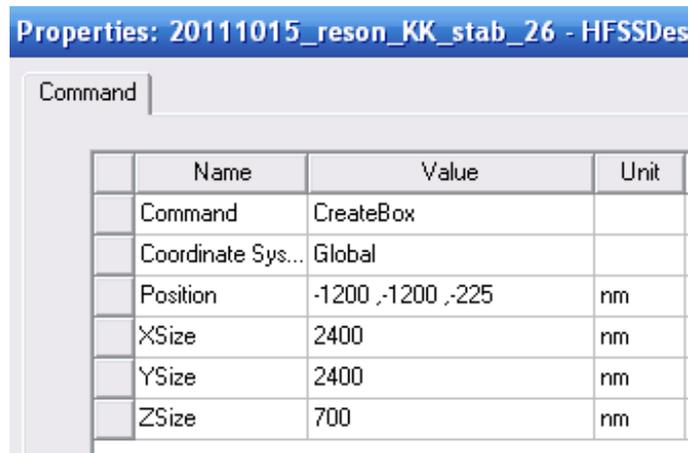


Рис.15.32. Размеры базового металлического бокса

Далее в этом боксе нужно вырезать один центральный цилиндр радиусом 525 нм и 8 цилиндров радиусом 262.5 нм. 8 резонаторов размещены так, что между центральными боковыми располагается щель связи (рис.15.33 и 15.34).

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate Sys...	Global		
Center Position	0,0,0	nm	0nm, 0nm, 0nm
Axis	Z		
Radius	Dc1050/2		525nm
Height	H_rez590		450nm
Number of Seg...	0		0

Рис. 15.33.Центральный цилиндр

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate Sys...	Global		
Center Position	10,788,-225	nm	10nm, 788nm ...
Axis	Z		
Radius	Rr525/2		262.5nm
Height	675	nm	675nm
Number of Seg...	0		0

Рис.15.34. Малые цилиндры

Командой **Edit->Duplicate->Around Axis** дублируем цилиндры вокруг оси и умножаем на 8.

Далее начертим внутренний стержень, расположенный вдоль оси Z (рис.15.35)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate Sys...	Global		
Center Position	0,0,0	nm	0nm, 0nm, 0nm
Axis	Z		
Radius	75	nm	75nm
Height	450	nm	450nm
Number of Seg...	0		0

Рис.15.35. Размеры внутреннего металлического стержня.

Далее на высоте 400 нм начертим колечко, вычитая один цилиндр из другого (рис.15.36 и 15.37).

Name	Value	Unit
Command	CreateCircle	
Coordinate Sys...	Global	
Center Position	0,0,-400	nm
Axis	Z	
Radius	800	nm
Number of Seg...	0	

Рис.15.36. Размеры внешнего цилиндра.

Name	Value	Unit
Command	CreateCircle	
Coordinate Sys...	Global	
Center Position	0,0,-400	nm
Axis	Z	
Radius	780	nm
Number of Seg...	0	

Рис.15.37. Размеры внутреннего цилиндра.

В результате вычитания получаем планарное кольцо шириной 20 нм. Установим граничные условия **Perfect E** на квантовое колечко. Чтобы вставить в это кольцо 8 портов, которые будут возбуждать

последовательный ток в кольце, прорежем в планарном кольце 8 прямоугольников, размер первого из которых соответствует рис. 15.38.

Command			
	Name	Value	Unit
	Command	CreateRectangle	
	Coordinate Sys...	Global	
	Position	-800 , -10 , -400	nm
	Axis	Z	
	XSize	600	nm
	YSize	20	nm

Рис. 15.38. Координаты прямоугольника в разрыве квантового колечка, на который устанавливается дискретный порт.

Создав этот прямоугольник, зададим на него дискретный порт командой **HFSS->Excitation-> Assign Lumped Port** и задавая импедансную линию посередине этого прямоугольника. Далее выполним дублирование этого прямоугольника с сохранением граничных условий относительно оси Z.

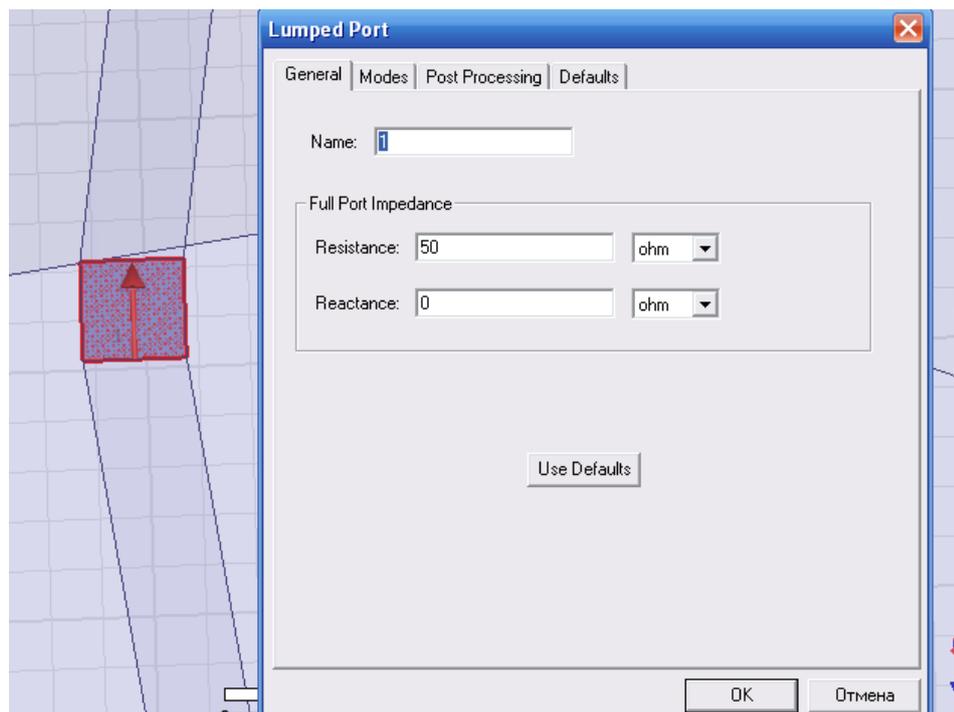


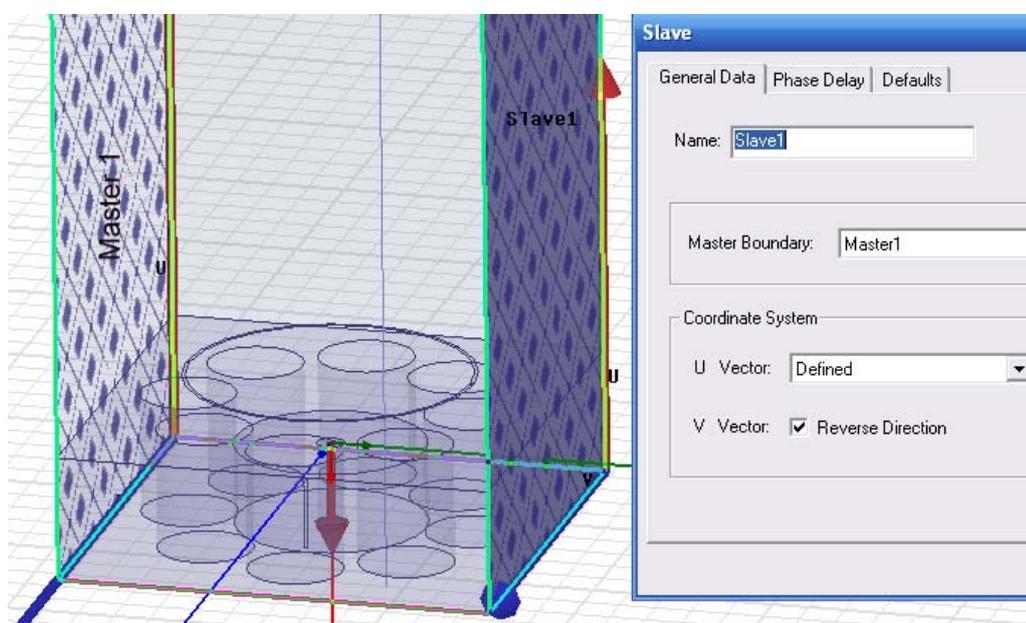
Рис.15.39. Диалог дискретного порта, поставленного в разрыв квантового колечка.

Созданную структуру, показанную на рис. 15. 31 охватим боксом, созданным по команду **Draw->Box**, размеры которого в нанометрах указаны на рис. 15.40.

	Name	Value	Unit
	Command	CreateBox	
	Coordinate Sys...	Global	
	Position	1200 , -1200 , 475	nm
	XSize	-2400	nm
	YSize	2400	nm
	ZSize	-4800	nm

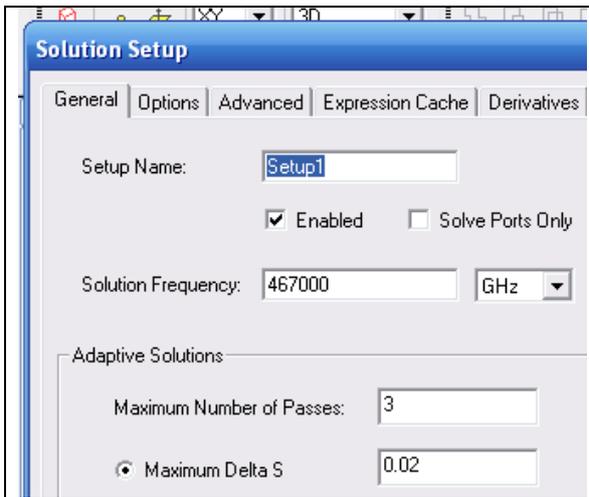
*Рис.15.40. Размеры бокса Radiate.*

На этот параллелепипед установим граничные условия излучения, а на боковые стенки – периодические граничные условия Master-Slave на противоположные стенки бокса излучения (рис. 15.41).

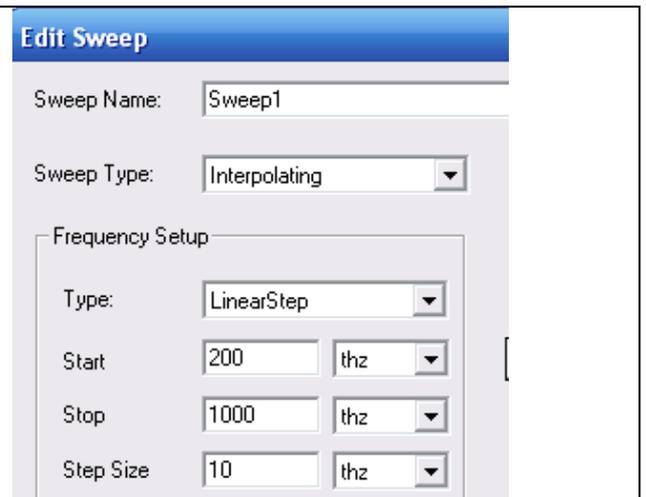


*Рис.15.41. Постановка периодических граничных условий Master-Slave на противоположные стороны бокса, охватывающего одну ячейку резонатора.*

Выполним установку на расчет командой HFSS-> Analysis setup->Add Solution Setup. Центральная частота 467 ТГц соотв. длине волны 640 нм (рис. 15.42).

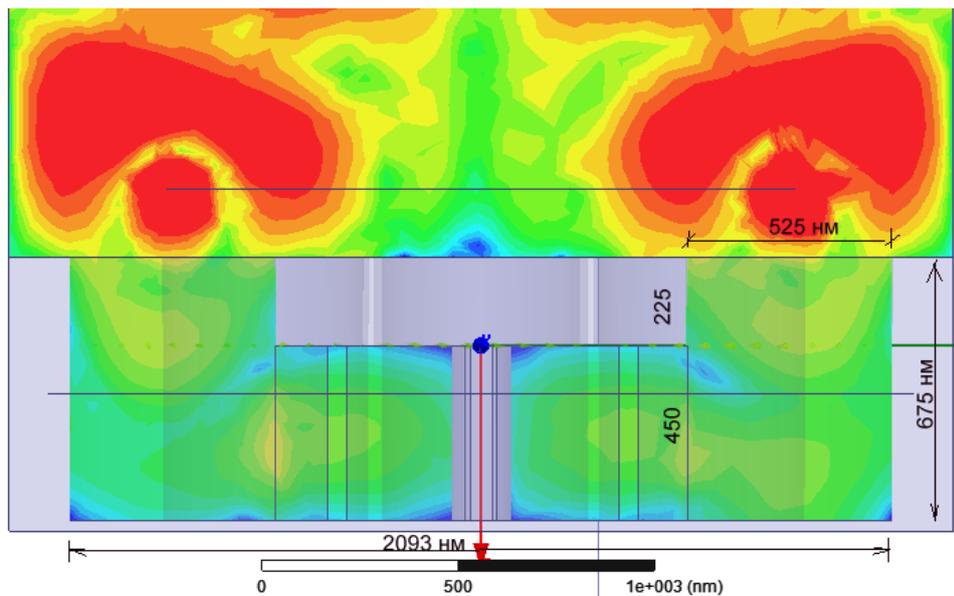


*Рис.15.42. Задание центральной частоты анализа*



*Рис.15.43. Задание полосы частот (режим интерполяции)*

Заметим, что если квантовые точки будут расположены равномерно в квантовом колечке, то они будут возбуждаться противофазно в соответствии с полями в цилиндрических резонаторах. Картина излучения в этом случае представлена на рис.15.44 и 15.45.



*Рис.15.44. Излучение электромагнитной волны оптического диапазона из квантового колечка в системе с внутренним коаксиальным стабилизирующим резонатором*

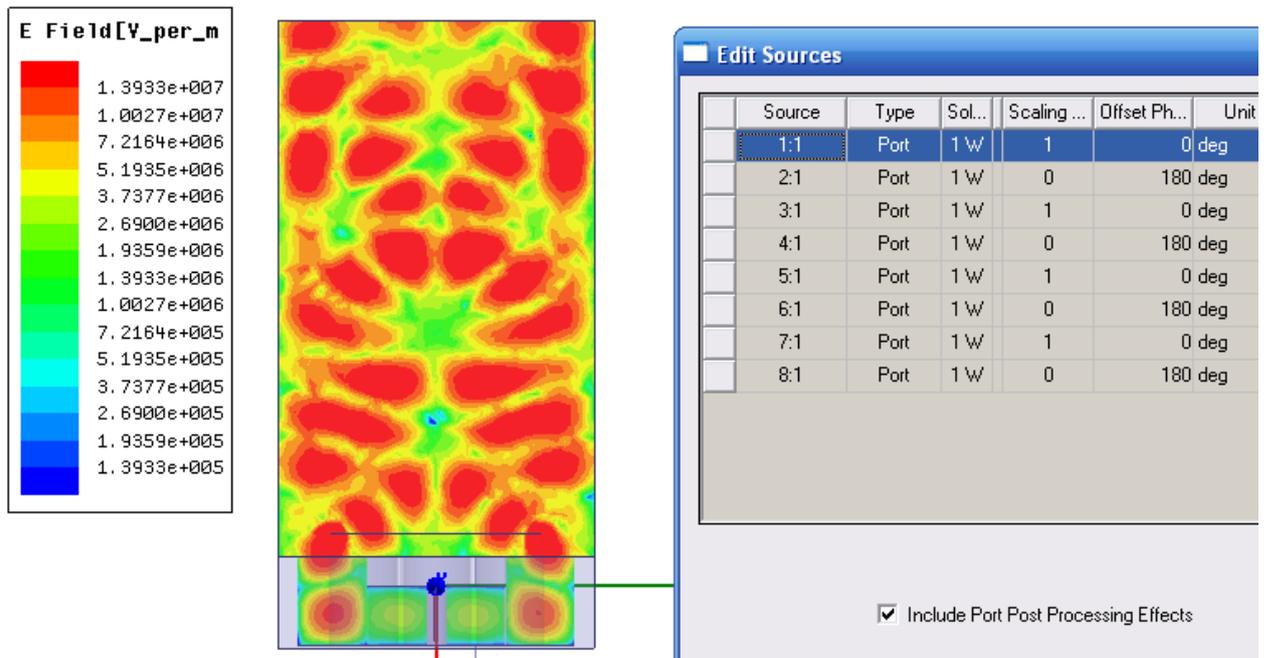
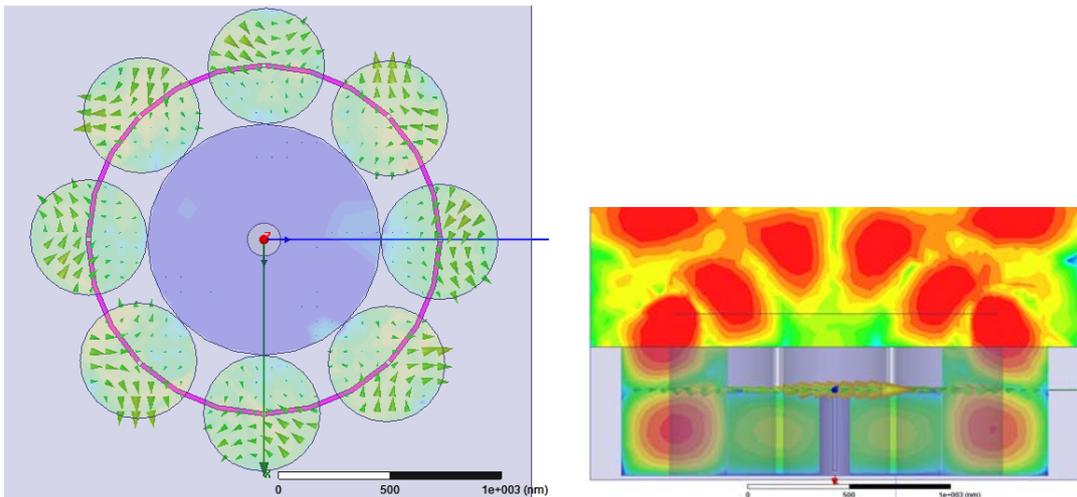


Рис.15.45. Ближнее поле в сечении резонатора при установке противофазного возбуждения квантовых точек.

На рис.15.46 приведена частотная характеристика, а на рис.15.47 - картина электромагнитного поля при возбуждении КТ, расположенных в КК через один резонатор.



Рис. 15.46. Частотная характеристика  $S_{11}$  по каждому порту, внедренному в КК (8 портов)



*Рис.15.47. Картина электромагнитного поля при возбуждении КТ, расположенных в КК через один резонатор*

Анализируя динамическое движение картины электромагнитного поля, которое рассчитывается, изменяя фазу источника возбуждения, можно видеть, как взаимодействуют электромагнитные поля, излучаемые от отдельных резонаторов, общую картину поля и типы волн, которые резонируют в отдельных полостях цилиндрических резонаторов.

**Выводы.** Рассмотренные варианты СДМ на основе ОР с квантовыми точками, звёздочками и колечками ни в коей мере не ограничивают разнообразия этих устройств. Не трудно представить и другие конструктивные варианты СДМ на основе четвертьволновых многорезонаторных систем с другими видами колебаний, в том числе и с разнообразными высокочастотными стабилизирующими резонаторами.

В настоящее время представление излучателей в виде квантовых звёздочек и колечек могут показаться нереально фантастическим, и моделирование таких источников еще требует многостороннего экспериментального подтверждения. Однако прогресс теоретического анализа перспективных наноматериалов и успехи нанотехнологии показывает, что это будет реализовано в недалёком будущем.

Многочисленные публикации, в которых показано использование HFSS показывают, что ее можно успешно применять для оптимизации структуры светодиодного модуля. Можно с уверенностью утверждать, что поиски оптимальных решений при создании СДМ на основе электродинамических систем с квантовыми точками позволят существенно улучшить параметры световых приборов с наноразмерными источниками излучений.

## 16. Установка конфигурации для распределенного расчета на нескольких компьютерах

HFSS -13 имеет возможность решать задачи огромного размера, когда число тетраэдров разбиения может достигать многих сотен тысяч.

В последние 10 лет наблюдался огромный прогресс в усилении компьютерных средств для решения больших задач - от создания больших вычислительных серверов, до распределенных кластеров и многопроцессорных настольных рабочих станций. Параллельно шло улучшение математических алгоритмов и программ их реализации. На рис. 16.1 показываються вехи прогресса в расчете физических задач, в механическом анализе, и в решение электродинамических задач поля Ansoft. В настоящее время считается, что применение HFSS в процессе проектирования на 15% ускоряет процесс разработки новых изделий от идеи до воплощения в железе.



Рис. 16.1. История роста характеристик производительности системы HFSS

Один из способов увеличить производительность состоит в параллельном моделировании. Из рис. 16.1. видно, что в 1998-1999 можно было решить систему уравнений в 10М ячеек. В 2004 HFSS Ansoft решал структуру с 100М ячейками. Сегодня ANSYS может анализировать структуру с 1 миллиардом ячеек, и уровень точности моделирования очень высокий.

В настоящее время ключевым является новый метод, для реализации которого необходимо иметь специальную лицензию **High Performance Computing (HPC)**.

Этот метод позволяет реализовать 2 подхода к расчету:

- 1) Domain Decomposition,
- 2) Multi-processing.

Решение методом HPC сводится к мультипроцессному расчету, используя опции распределенного расчета, которые могут объединить до 100 ядер мультипроцессора. Заметим, что далее в этом разделе термин «вычислительная машина» может относиться к персональному, а также супер-компьютеру. Ядра и процессоры могут характеризовать любую из этих машин.

Начиная с HFSS v.12, компания Ansoft развивает метод HPC используя метод декомпозиции задачи. Метод MP (multi-processing) был реализован в HFSS-7. Опция распределенного решения DSO реализована начиная с HFSS-10. Эти опции используются уже сегодня, чтобы уменьшить время моделирования от дней до часов, позволяя инженеру выполнить многократные моделирования в течение одного рабочего дня. Для этого были разработаны и предложены специальные методы мультипроцессорного и мультикомпьютерного расчета HPC и реализованы дополнительные улучшения в HFSS v.12 (улучшенное разбиение на сетку и смешанные порядки элементов разбиения) для существенного увеличения производительности.

Поясним термины, которые пришли в проектирование вместе с усилением мощности численного моделирования.

### **1. HFSS HPC – новая опция, появившаяся в HFSS 12**

**HPC = High Performance Computing**

### **2. Enables Domain Decomposition, метод декомпозиции - новый метод решения в HFSS 12. DDM = Domain Decomposition Method. Новый метод DMP в HFSS. DDM - это метод высокого запараллеливания, причем:**

- это метод объединения памяти и ядер ряда компьютеров с помощью сети;

- DDM реализует значительное увеличение памяти для больших и очень больших задач;
- DDM обеспечивает быстрое решение, используя большое количество процессоров.

**3. Multi-Processing - многопроцессорный** метод параллелизации разделяемой памяти, введенный в HFSS 7. **MP = Multi-Processing**

- “Традиционный” многопроцессорный SMP.

4. Необходимое количество лицензий “**HPC licenses**” для моделирования зависит от числа ядер, которые требуются для расчета.

5. Работа в режиме пакета (**Packs**) или “плавающим (pool)” режиме.

- **Packs** позволяет использовать заданное число ядер для программы;
- “**Pool**” лицензии позволяют использовать любое число ядер, управляемых мульти-серверами.

- **SMP = Shared Memory Parallel.**
- **DMP = Distributed Memory Parallel.**
- **DSO = Distributed Solve Option** - много-параметрическое (геометрия, частота) параллельное моделирование.
- **RSM = Remote Simulation Manager** - новая управляющая программа распределенного анализа, появившаяся в HFSS v12, предназначенная для работы компьютера в сети

## Примеры расчетов, которые выполнены, используя лицензию HPC

*Пример 1.* Антенна расположена на военном автомобиле Хаммер. Задача электромагнитной совместимости решается на частоте 1.8GHz и имеет размер  $> 7500\lambda^3$  (где  $\lambda$  - длина волны на рабочей частоте, м) и использует:

- Базисные функции второго порядка (2<sup>nd</sup> order);
- 730,000 тетраэдров;
- 14М неизвестных в матрице (это даже мало, для использования метода DDM);
- Выполнение расчета с помощью трех связанных группы компьютеров;
- Общая память=115 GB.

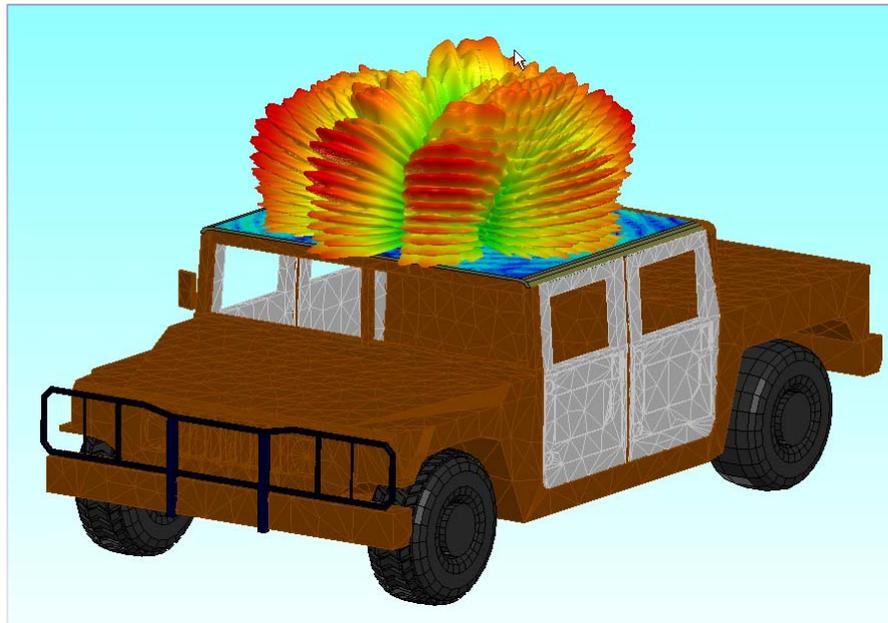


Рис. 16.2. Пример расчета структуры антенны на движущемся объекте

Результаты расчета пространственной диаграммы направленности показаны на рис. 16.2.

**Пример 2.** Антенна, смонтированная на корпусе истребителя F-35. Анализируемая щелевая антенна (рис. 16.3) находится в крыле внизу фюзеляжа самолета

- F-35 Joint Strike Fighter: UHF blade antenna @ 350 MHz
- Размер задачи =  $1400\lambda^3$

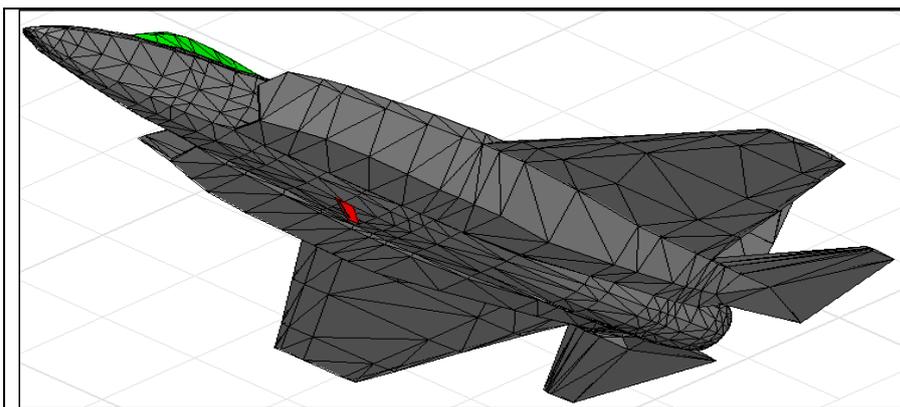


Рис. 16.3. Военный истребитель F-16 с антенной внизу фюзеляжа

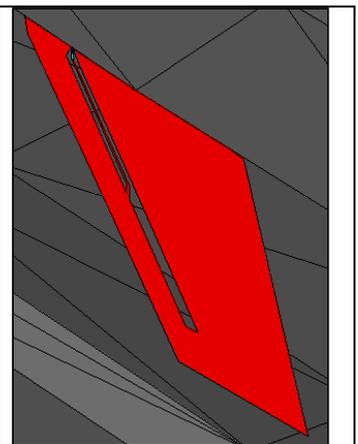


Рис.16.4. Щелевая антенна

При решении этой задачи используется метод DDM.

- DDM подобласти разбиваются на сетку разбиения в маленьких подобластях “*sub-domains*” так, что поле в них рассчитывается параллельно на нескольких компьютерах. Для этого выполняется:
  - Выбор узла “*master*” итерационного солвера для общего решения

- Автоматическое разбиение области решения на подобласти
- Пользователь определяет набор  $N$  доступных компьютеров для использовании методом DDM:
  - $n=1$  это узел “master”, одно ядро;
  - $n=2$  до  $N$  это узлы подобластей решения по сравнению с прямым решением.

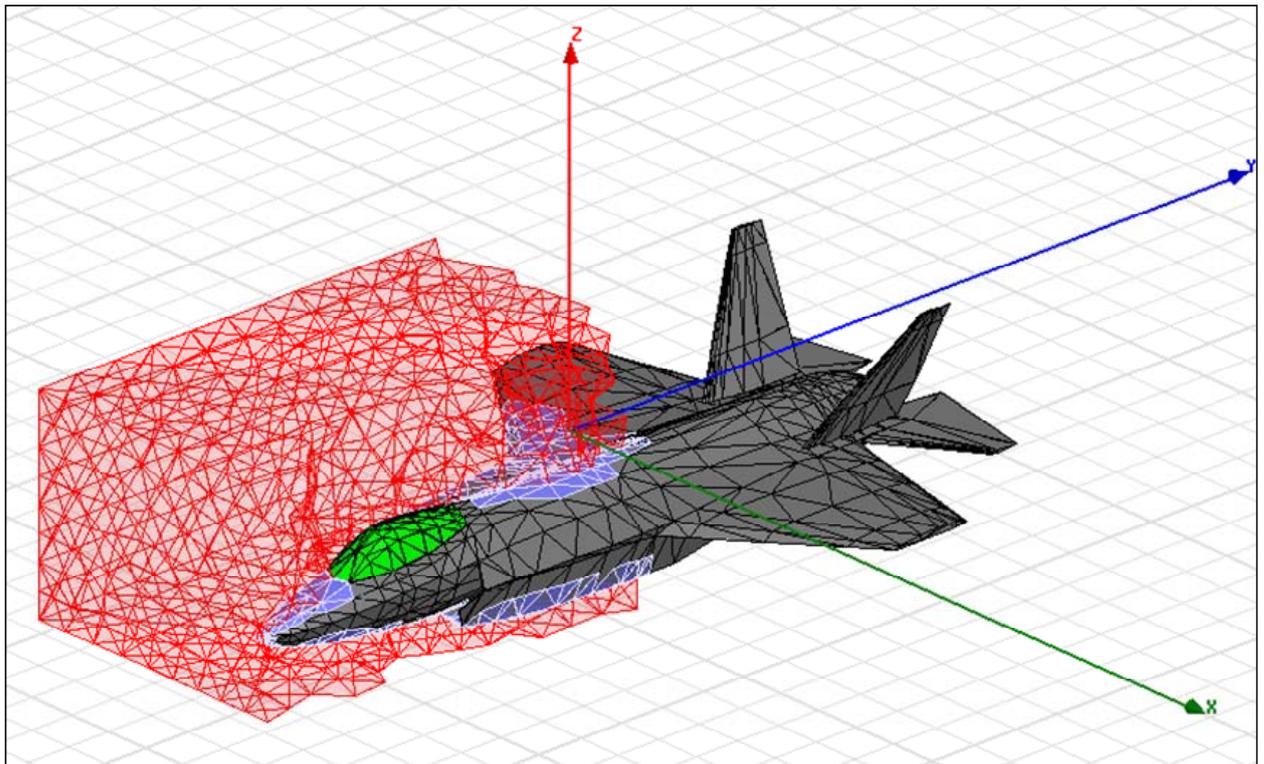


Рис. 16.5. Разбиение пространства расчета на тетраэдры, области и подобласти

Результаты расчета совпадают, при решении непосредственно программой HFSS, и при использовании метода DDM. Однако время расчета значительно отличаются.

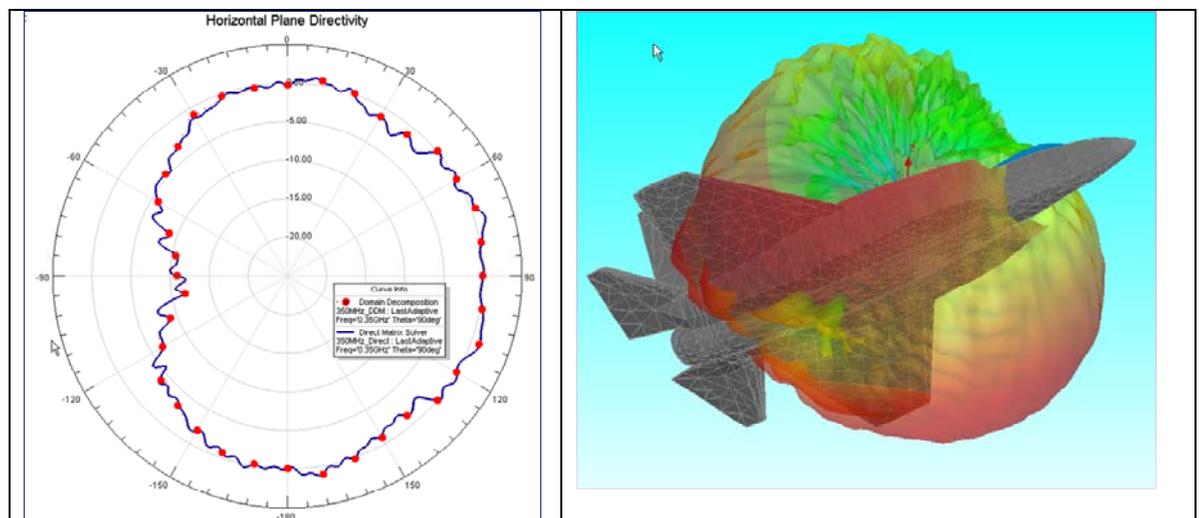
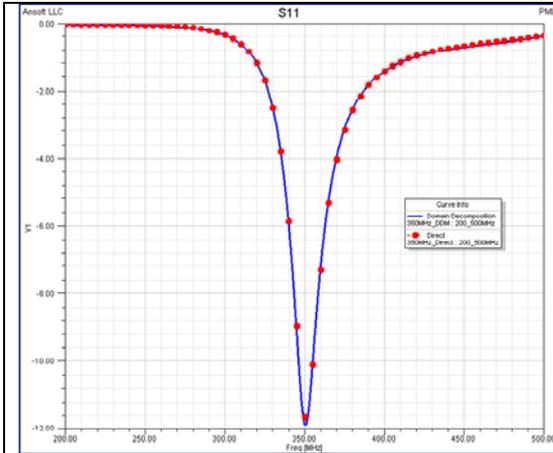


Рис. 16.6. Сечение диаграммы направленности антенны на корпусе самолета

Рис. 16.7. Пространственная диаграмма направленности



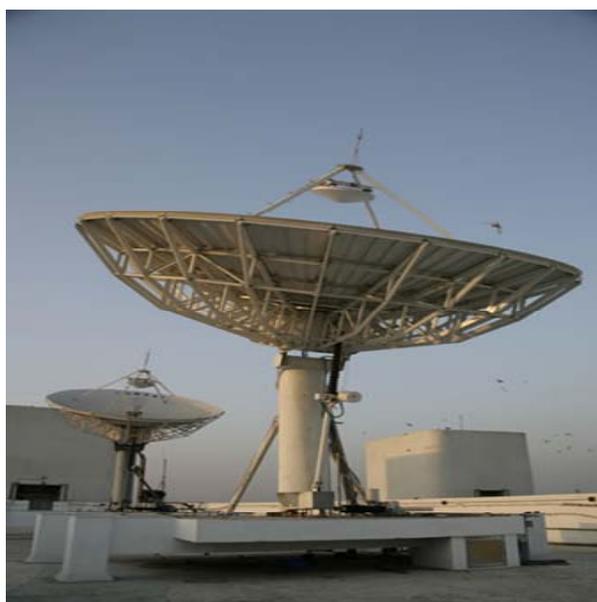
Number of Domains	Time (secs)	Speed-up
1	23252	1.00
2	8928	2.60
3	6056	3.84
4	4479	5.19
5	3476	6.69
6	2784	8.35
7	2649	8.78
8	2180	10.67
9	2032	11.44
10	1760	13.21
11	1659	12.51
12	1804	12.89
13	1527	15.23
14	1649	14.10
15	1313	17.71
iterative 1	4615	4.63

Рис. 16.8. Частотная характеристика

Рис. 16.9. Время расчета в зависимости от количества областей разбиения

**Пример 3:** Двухзеркальная параболическая антенна (рис. 16.10) создана по схеме Коссегрена. Размер задачи  $\sim 17,500 \lambda^3$ .

Время решения на 8-ядерном компьютере 22049 сек. Решение ускоряется в 17-24 раз при использовании лицензии НРС.



*Рис. 16.10. Двухзеркальная параболическая антенна*

В таблице рис. 16.11. приведены машинные ресурсы, затрачиваемые при моделировании двухзеркальной параболической антенны, которые зависят от числа ядер. И ускорение процесса решения задачи при включении дополнительных ядер. Видим, что ускорение доходит до шести по сравнению с базовой конфигурацией с 8 ядрами. Отметим, что ускорение расчета по сравнению с работой на одном процессоре выполнить невозможно.

Total cores	Elapsed Time (S)	Memory (GB)	Speed-up	Linear
8	22049	153.7	1.00	1.00
12	12948	133.5	1.70	1.50
16	9540	123.6	2.31	2.00
20	7345	114.6	3.00	2.50
24	5649	110	3.90	3.00
28	4829	107.7	4.57	3.50
32	4560	103.7	4.84	4.00
36	4102	101.2	5.38	4.50
40	3912	96.4	5.64	5.00

*Рис. 16.11. Компьютерные ресурсы, требуемые при решении двухзеркальной антенны. Ускорение Speed-up по сравнению с базовым компьютером с 8 ядрами*

Для решения подобных задач необходимо установить менеджер удаленного моделирования RSM (Remote Simulation Manager). Эта

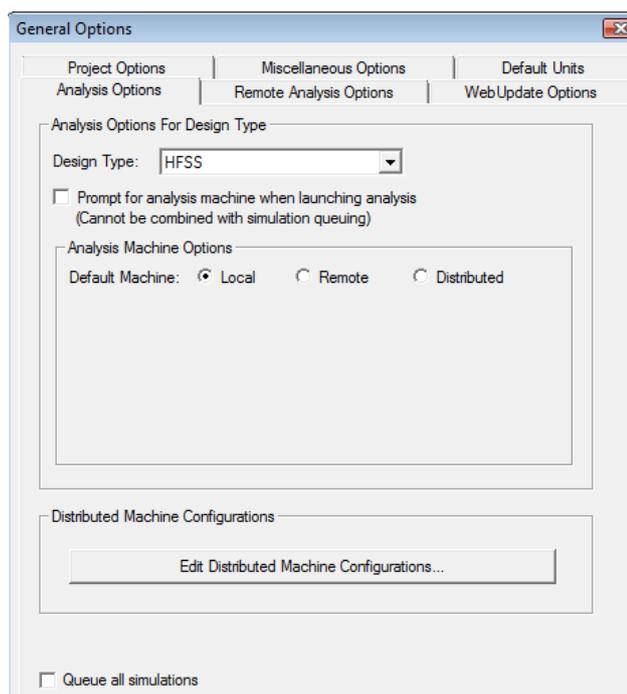
программа устанавливается как отдельная программа и автоматически создает удаленные или связанные в сети моделирования в режиме связи “links”.

- Метод нового распределенного анализа для работы с удаленными компьютерами
- Активизирует возможности решающего устройства в режиме DDM, DSO и в режиме решения на удаленных компьютерах.

## *Установка конфигурации распределенного расчета.*

Чтобы создать новую конфигурацию распределенного расчета на нескольких компьютерах:

1. Кликните **HFSS** или **HFSS-IE>Tools>General Options** чтобы вывести диалог **General Options** и выбрать закладку **Analysis Options**.



*Рис. 16.12. Диалог опций HFSS*

2. Выберите закладку **Analysis Options**, и в разделе **Analysis Machine Options**, выберите опцию **Distributed**. Эти изменения будут показаны в закладке **Analysis Machine Options** и покажут панель для просмотра и редактирования конфигурации компьютеров (рис. 16.13).

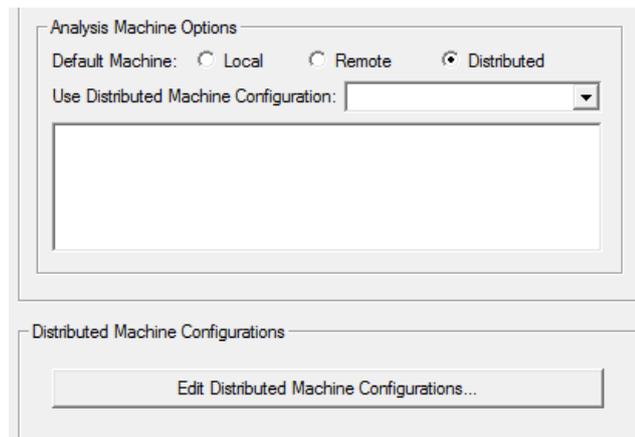


Рис. 16.13. Опции анализа компьютеров в сети

3. Кликните кнопку **Edit Distributed Machine Configurations**.

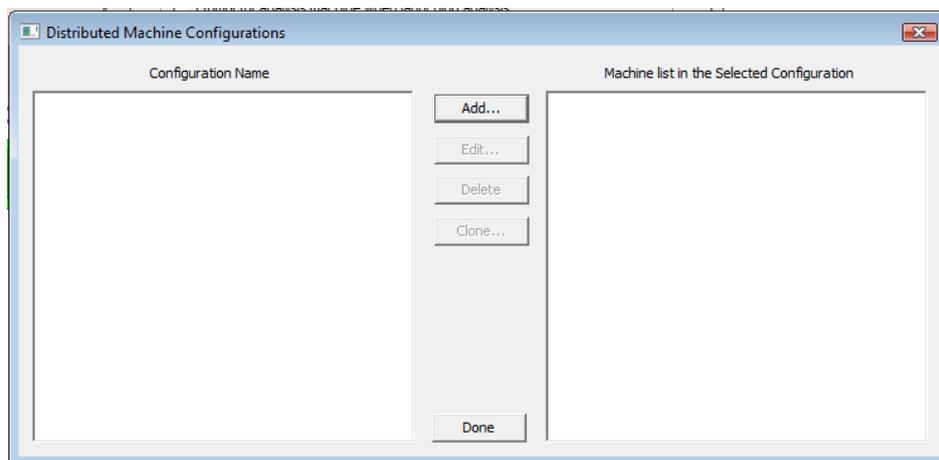


Рис. 16.14. Диалог конфигураций распределенного расчета

Это выведет диалог **Distributed Machines Configurations** (рис. 16.14). Этот список существующих конфигураций показывает все машины и выбранные конфигурации, а также информацию, заблокированы они или нет. Здесь вы можете добавить новую конфигурацию нажимая **Add**, отредактировать конфигурацию командой **Edit**, удалить выбранную конфигурацию командой **Delete**, или дублировать существующую конфигурацию командой **Clone**, обычно редактируя имя и содержание конфигурации.

4. Чтобы создать новую конфигурацию, кликните в диалоге рис. 16.14 кнопку **Add**.

Это открывает диалог **Distributed Analysis Machines** (рис. 16.15). Нажатие **Edit** или **Delete** также открывает диалог **Distributed Analysis Machines**, но включает имеющиеся выбранные конфигурации.

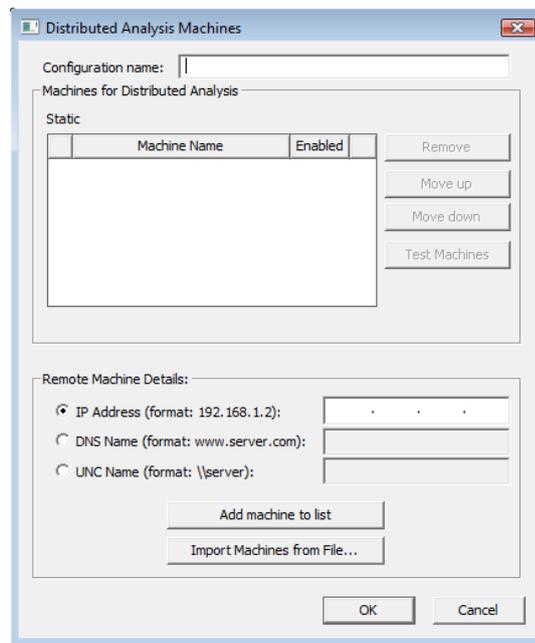


Рис. 16.15. Диалог списка машин, используемых в распределенном расчете

Здесь вы можете отредактировать имя конфигурации, вид, добавление, тестирование и блокирование машин в списке.

5. Задайте имя конфигурации. Он не может быть пустым и не может иметь ранее заданное или зарезервированное слово.

6. Для каждой машины чтобы вручную добавить список, under Remote Machine details, задайте адрес IP , имя DNS или имя UNC. Вы можете также использовать **Import Machines from File...** для использования текстового файла для упрощения процесса.

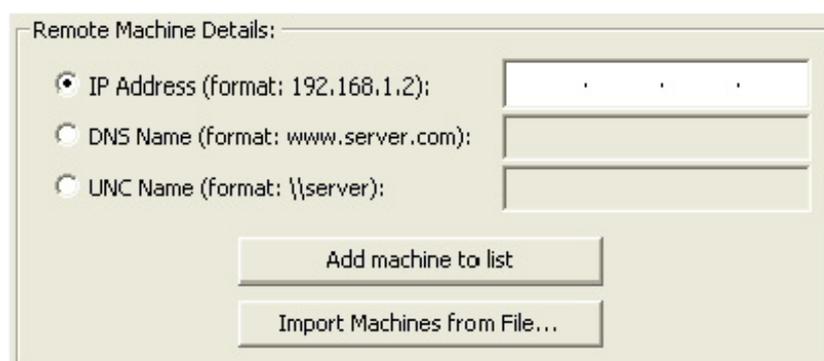


Рис. 16.16. Раздел, в котором включаются машины в список

Кнопки управления позволяют добавить машину в список командой **Add machine to list** (рис. выше) или удалить командой **Remove** (рис. ниже) машины из списка.

Каждая машина в текущем списке имеет окно **Enabled**. Вы можете заблокировать или подключить любые машины в списке по вашему желанию. Сверху таблицы, диалог позволяет учитывать общее количество машин, и это число может быть включено или заблокировано.

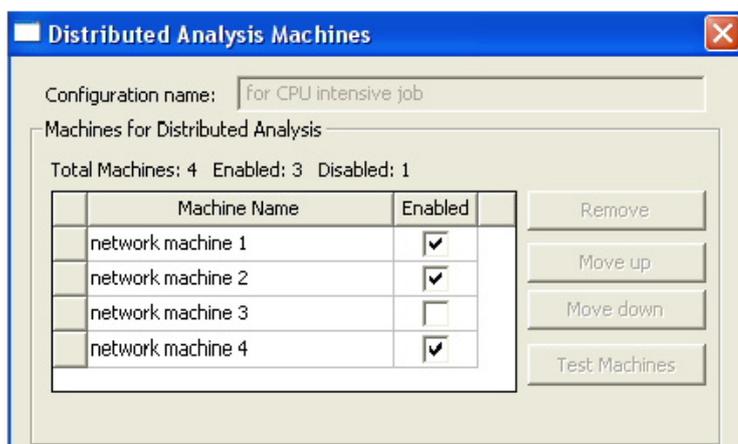


Рис. 16.17. Блокирование и включение машин в распределенный расчет

В общем случае, HFSS и HFSS-IE используют машин в распределенном списке машин анализа в порядке, в котором они появляются. Если выбран Распределенный метод расчета, и Вы запускаете несколько расчетов от того же самого интерфейса, то HFSS и HFSS-IE выбирают машины, которые выполняют наименьшее количество компьютеров в порядке, в котором компьютер находятся в списке. Например, если список содержит 4 машины, и Вы запускаете моделирование, которое требует одну машину, HFSS выбирает первую машину в списке. Если другое моделирование запущено, в то время как выполняется предыдущее, и это моделирование требует две машины, HFSS выбирает машины 2 и 3 из списка. Если первое моделирование тогда завершается, и мы запускаем другое моделирование, требующее три машины, HFSS выбирает машины в порядке 1, 4, и 2.

Отображенный список всегда показывает порядок, в который Вы ввели их независимо от загрузки на машинах. Чтобы управлять порядком в списке, выберите один или большее количество машин, и используйте кнопки **Move up** или **Move down**. Передвижение вверх и вниз допускаются, когда Вы выбираете один или большее количество смежных имеет машин. Также, когда Вы выбираете один или большее количество имен машин, Вы будете видеть поле текста ниже управления сети, показывая сначала имя машины, сколько раз она появляется, допускается, и заблокирована.

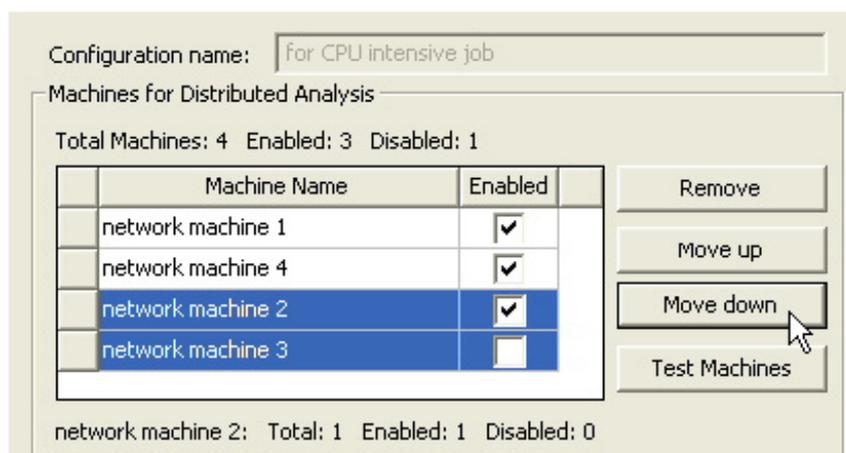


Рис. 16.18. Передвижение машин в списке для изменения последовательности их включения

**7. Test Machines-** Когда несколько пользователей в сети используют распределенное дистанционное решение, нужно проверить состояние этих машин перед запуском моделирования, чтобы убедиться, что никакие другие процессы Ansoft не запущены. Чтобы сделать это, вы можете выбрать одну или большее количество машин в диалоге (рис. 16.18) и нажать кнопку **Test Machine**. Открывается диалог **Test Machines**. После тестирования дается отчет относительно состояния каждой машины.

Тестирование можно выполнить и над группой машин, включенных в распределенных расчет. Включить или выключить машины можно в списке диалога рис. 16.18.

8. Кликните **OK**, чтобы сохранить изменения и закрыть диалог **Distributed Analysis Machines**. Только машины, отмеченные как **Enabled** появляются в списке распределенных машин в закладке **Analysis**.

Независимо от машины, на которой фактически выполняется анализ, числа процессоров и установки **Desired RAM Limit**, и заданных по умолчанию параметров настройки приоритета процесса теперь читается из машины, из которой Вы запускаете анализ.

Если конфигурация установлена, то ее можно выбрать на инструментальной панели, выбирая значки:



Рис. 16.19. Кнопки на панели HFSS, позволяющие оперативно переключать режим локальной, удаленной и распределенной работы

Заметим, что эта опция активна только в том случае, если имеются несколько машин для распределенного анализа. Режим распределенного анализа рекомендуется использовать в том случае, если не достаточно ресурсов одного компьютера.

На одном компьютере HFSS работает следующим образом. Сетка - по существу большая матрица, которая должна быть инвертирована и решена. HFSS пытается сделать всё это в RAM. Как только доступная RAM исчерпана, HFSS начинает разделять матрицу на части, в которых некоторые матричные элементы записываются на жесткий диск, и другие части сохранены в RAM. Однако имеется минимальный размер матрицы, которая должна быть сохранена в RAM, и должно остаться пространство в памяти, чтобы была возможность инвертировать и решить матрицу. Если матрица является настолько большой (т.е. сетка разбиения очень плотной), что этот минимальный размер больше не помещается в RAM, HFSS остановится.

Пользователь имеет два несколько вариантов действий.

Он может 1)увеличить RAM компьютера, или 2)может использовать итерационное решающее устройство, или 3) использовать лицензию, и соответственно метод HPC, чтобы решить проблему. Рекомендуется использовать итерационное решающее устройство. Использование опции **Iterative Solver** может резко уменьшить требования RAM.

### *Правила использования итеративного солвера*

1. Итерационное решающее устройство работает более эффективно, когда структура не содержит много источников возбуждений. (Например, число возбуждений – меньше, чем удвоенное число процессоров.)

2. Если вы хотите использовать преимущество итерационного решающего устройства, и ваш анализ включает расчет на многих дискретных частотах, адаптивное решение должно лучше сходиться на самой высокой частоте в полосе частот.

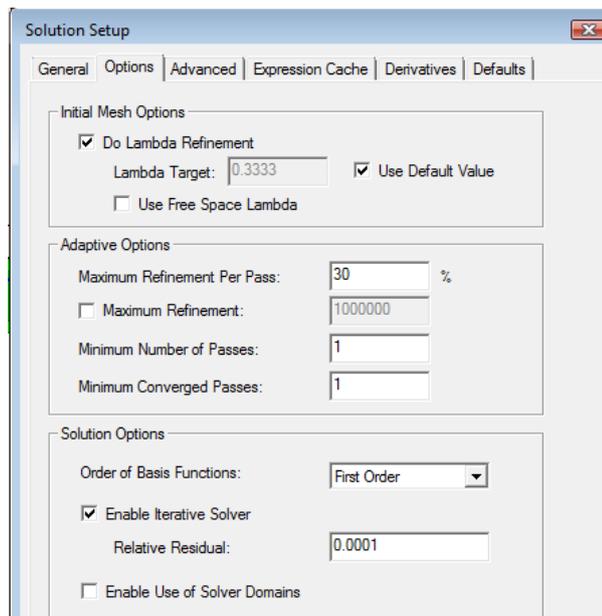


Рис. 16.20. Раздел *Solution Options*, включающий выбор порядка базисной функции и параметров итеративного солвера

3. **Relative Residual** обеспечивает критерий останова. Разность оценивает итерационного решателя при решении матричного уравнения. Значение действует на характеристики итерационного решателя следующим образом:

- По умолчанию она равна  $1E-4$ . Это дает точные S-параметры и поля, неотличимые от полученных обычным расчетом. Ansoft рекомендует устанавливать эту величину Residual.
- При большей величине Residual, например,  $1E-3$  или  $1E-2$ , итеративный процесс остановится с меньшим количеством итераций, и решение будет меньше сходиться. S-параметры не будут отличаться много от результатов, полученных прямым решением, например, разница в третьей или второй цифре. Поля и диаграммы направленности антенны - визуально те же самые.
- Величина Residual = 0.1 может использоваться для быстрого адаптивного измельчения сетки рано в адаптивном процессе, но S-параметры будут заметно отличаться.
- Величина Residual = 1 не должна никогда использоваться. В окне не имеется возможность ввести величину Residual больше 0.1.

*Выбор порядка базисных функций.* В HFSS-13 можно выбрать базисные функции HFSS используя интерполяцию величин поля между узлами тетраэдров. Для этого в разделе **Options** диалога **Solution Setup**

выбирается опция **Order of Basis**. Это может быть **Zero Order**, **First Order** (по умолчанию), **Second Order**, или **Mixed order**. Опции **Order of Basis** влияют на уплотнение сетки по критерию *Lambda Refinement* и выбираются следующим образом.

Опция с нулевым порядком (**Zero Order**) полезна, когда модель разбивается на сетку с более чем 100 000 тетраэдров, но размер модели является маленьким по сравнению с длиной волны. Более высокие порядки увеличивают количество неизвестных для каждого тетраэдра и используются, когда требуется большая точность расчета поля. Если вы выбираете **Zero Order Solution Basis**, все тетраэдры в модели должны иметь длину ребер меньше, чем  $1/20$  длины волны.

## Опции установки при работе на одном компьютере

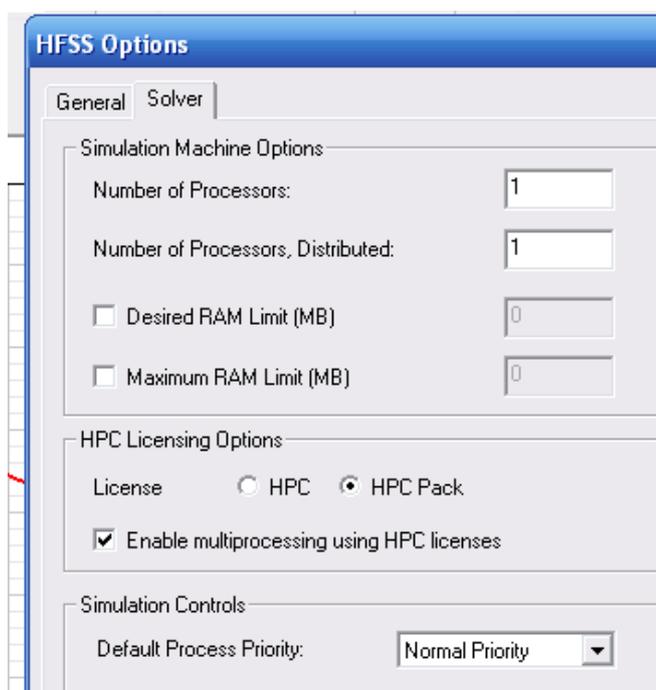


Рис. 16.21. Опции расчета компьютера, работающего самостоятельно

Для многопроцессорной обработки, выберите опцию **Enable multiprocessing using HPC licenses**. Эта опция позволяет использовать лицензии **HPC**, включающие многопроцессорную обработку.

Требования к RAM растут линейно с увеличением размера модели. При использовании итерационного решающего устройства также имеет место линейное увеличение требований к RAM. Если вы используете базовый солвер, требования к RAM увеличиваются нелинейно.

Установки решения с доменами всегда используют лицензирование **HPC**. Даже при том, что домены распределяются и могут использовать

многопроцессорную обработку, они не используют распределенное решение или многопроцессорные лицензии - все это включается в лицензирование HPC, включающая домены.

Лицензия HPC основана на подсчете общего количества ядер при моделировании. Например, выполняя распределенное решение, используя 10 узлов, с многопроцессорной обработкой, включающей 2 ядра на узел, общее количество ядер 2x10, или двадцать ядер.

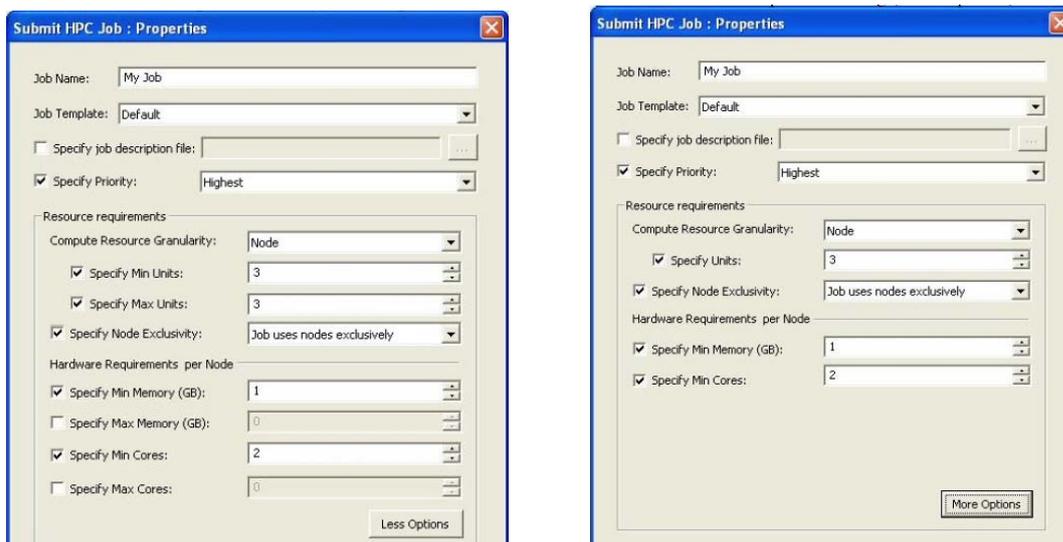
Лицензия HPC ограничивает тип и число лицензий, которые будут проверены для данного числа ядер. Для типа HPC одна лицензия будет проверена для каждого используемого ядра. Таким образом, моделирование с двадцатью ядрами потребовало бы двадцати лицензий HPC. Для лицензии типа HPC Pack, один пакет включает работу с восемью ядрами, и каждый дополнительный пакет включает в четыре раза больше ядер. Таким образом, моделирование с двадцатью ядрами потребует двух лицензий HPC Pack, охватывающих работу с 8x4, или 32 ядрами.

5. Для многопроцессорной обработки, отметьте опцию **Enable multiprocessing using HPC licenses**. Эта опция позволяет использовать лицензии HPC, включая многопроцессорную обработку, даже при решении задач, которые не включают области-домены. В этом случае лицензии HPC выполняют роль лицензии MP.

6. Выберите один из следующих приоритетов из списка **Default Process Priority**:

- Critical (highest) Priority (Не рекомендуется)
- Above Normal Priority (не рекомендуется)
- Normal Priority (нормальный приоритет)
- Below Normal Priority (ниже нормального)
- Idle (lowest) Priority (медленный приоритет)

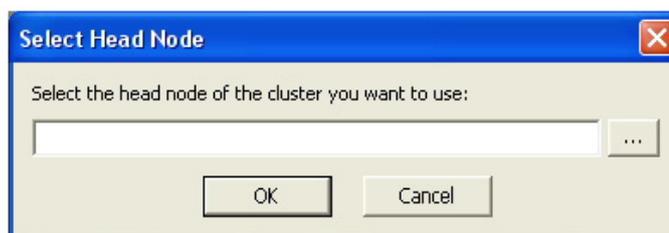
Можно установить эти значения, используя дополнительное программирование на Visual Basic.



*Рис. 16.22. Диалоги свойств рабочего диалога Ansoft*

Для передачи данных и управления решением задачи используем диалог **Submit HPC Job** (рис. 16.22).

Чтобы представить задания, используя диалоговое окно **Submit HPC Job**, должно быть установлено кластерное главное имя узла. Выбирая команду **Tools>Windows HPC>Select Head Node...** появляется запрос (рис. 16.23) на выбор имя узла кластера, который вы хотите использовать.



*Рис. 16.23. Выбор имени узла*

Можно ввести главное имя узла кластера в диалоговое окно, а можно щелкнуть по кнопке [...], чтобы просмотреть сеть для кластера, который вы хотите использовать.

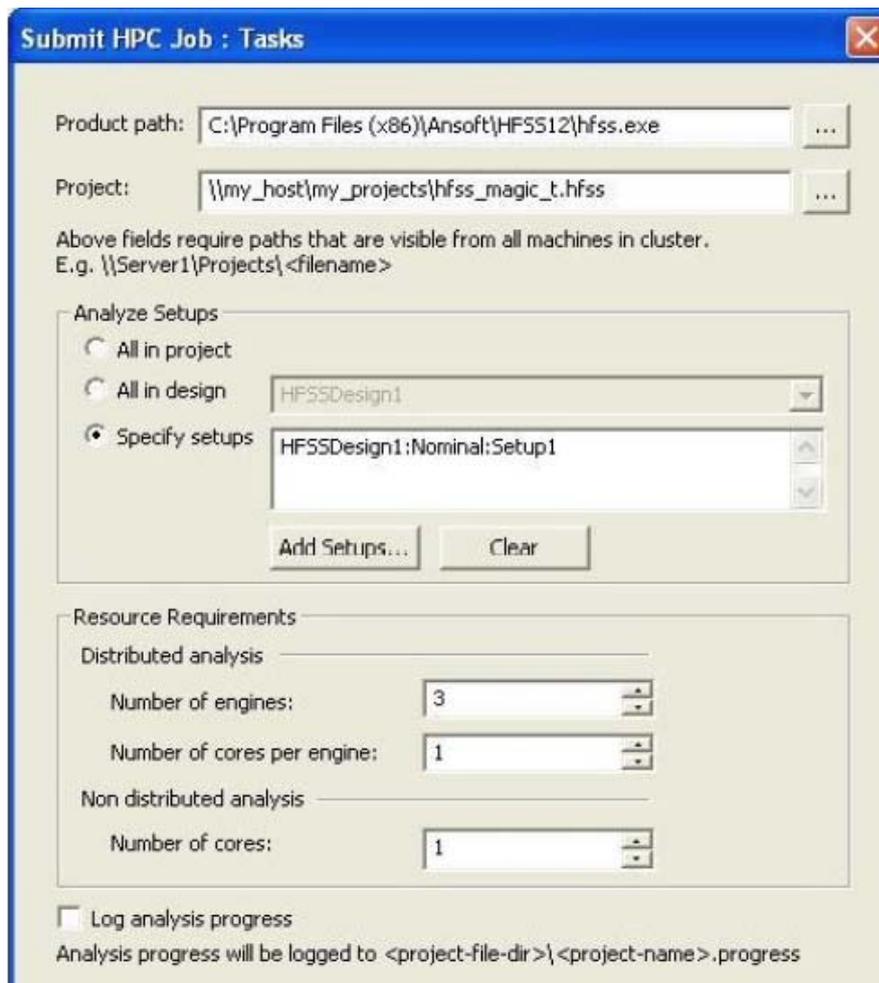


Рис. 16.24. Задание нескольких установок расчета в диалоге

После установки заголовка узла имени хоста, выберите **Tools>Windows HPC>Submit HPC Job ...**

Вы можете выбрать установки в разделе **Analyze Setups** (рис. 16.24). Здесь можно выбрать следующие опции:

- *All setups in the project;*
- *All setups in a specified design:* вы выбираете проекта из открывающееся гося списка;
- *Specify setups:* Вы можете добавить одну или больше установок используя диалог **Add Setups...**

Если вы задаете несколько установок, задачи вызываются последовательно в порядке, показываемом в боксе edit.

Блок **Resource Requirements** управляет используемыми вычислительными ресурсами. Настройки **Distributed Analysis** управляют использованием ресурсов для части анализа, который может быть распределен по различным

ядрам. Настройки **Non-Distributed Analysis** управляют начальной частью анализа, который работает перед запуском любого распределенного анализа - эта начальная часть не может быть распределена, чтобы разделить узлы, и должна быть выполнена на единственном ядре.

Есть две настройки **Distributed Analysis**. Число «машин» - это число групп компьютеров, которые запускаются параллельно; компьютеры могут работать на отдельных узлах. Установленное число ядер на один компьютер управляет степенью параллельной обработки в пределах каждого компьютера; эти параллельные потоки данных выполнения должны быть на том же самом узле. В случае HFSS каждый распределенный механизм представляет один домен большой модели, часть анализа развертки частоты или часть анализа установки **Optimetrics**.

Есть только одна установка для не распределенного анализа, потому что эта часть анализа должна произойти на единственном узле. **Number of cores** управляет степенью параллелизма, используемого для этой части анализа.

Отметьте **Log Analysis Progress**, чтобы записать процесс анализа в файле *<projname.progress>*. Этот файл содержит сообщения об ошибках, предупреждения и др. информация.

Нажатие кнопки **Next** принимает текущие настройки, и совершенствуется к диалоговому окну **Submit HPC Job: Properties**. Нажатие кнопки **Cancel** закрывает диалоговое окно.

## Заключение

Программа HFSS версии 13, разработанная американской фирмой Ansoft, освоению которой в учебном процессе посвящена данная книга – не единственная, которая нашла широкое применение в России в научно-исследовательских учреждениях и учебных заведениях. Самое большое распространение получила так называемая «тройка»: HFSS, CST, FEKO.

Часто выбор программного обеспечения диктуется традицией, или скоростью обучения на программном продукте. HFSS, начиная с версий, разработанных компаниями Hewlett Packard и Agilent, оказался наиболее популярным в России среди программ электромагнитного моделирования трехмерных конструкций, и вносит свой вклад в учебном процессе во многих ВУЗах России.

Структура радиосистем в настоящее время решительно поделена на цифровую часть и радиочасть – радиоприемники и радиопередатчики, причем чаще всего радиотехническая часть - это антенны и самые первые каскады, следующие за ними. Цифровая обработка наступает и отвоевывает все большую часть радиосистемы. Больше того, в управлении антенной решетки большую роль выполняет цифровая часть. Поэтому можно сказать, что для радиоинженера освоение HFSS – только часть пути подготовки.

Выбор программного обеспечения фактически сводится к нахождению компромисса между скоростью расчета, имеющимися вычислительными ресурсами и объемом задачи (размером в единицах длин волны). Все это сводится к решению задачи оптимизации процесса проектирования современных СВЧ устройств, выработке соотношения между аналитическими и численными методами, решению актуальных задач, стоящих как перед организаторами научной работы, так и перед исполнителями от научных сотрудников до инженеров.

Процесс освоения современного программного обеспечения на студенческой скамье, доведенный до понимания тонкостей процесса проектирования, это новый и спасительный шаг обучения и подготовки радиоспециалистов высокой квалификации.

Надеемся, что метод анализа задач, использованный в учебнике – пошаговое построение и анализ результатов – поможет разработчикам СВЧ устройств освоить программу HFSS и широко использовать её в своей работе.

## Литература

1. HFSS – High Frequency Structure Simulation. Manuals, Ansoft, 2010.  
[www.ansoft.com](http://www.ansoft.com) – сайт компании Ansoft-ANSYS – разработчика программы HFSS.
2. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ. Под ред. **В.В. Никольского**/ М., Радио и Связь, 1982. - 272 с.
3. Roger Harrington, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill, New York, NY 1961.
4. **К. А. Balanis**. Antenna Theory: Analysis and Design, Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> edition, 1997, 942 pp.
5. **Баскаков С.И.** Основы электродинамики, М., Москва, Сов. Радио, 247 стр.
6. Andrew Peterson, Scott Ray, Raj Mittra, *Computational Methods for Electromagnetics*, IEEE Press, New York, NY 1998.
7. L.E.R. Peterson et al. “Analysis of Periodic Structures via a Time-Domain Finite-Element Formulation with a Floquet ABC” IEEE Trans, AP, March 2006, pp 933- 944.
8. Schubert F. Light Emitting Diodes. Second edition. – Cambridge University Press, 2006. Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 496 с.
9. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. ФТП, 1998, т. 32, №1, С. 3-18.
10. Звездин А.К. Оптические микрорезонаторы, волноводы, фотонные кристаллы. Природа. 2004. №10.
11. Александров И.А., Журавлёв К.С., Мансуров В.Г., Никитин А.Ю. Безизлучательная рекомбинация в квантовых точках GaN/AlN // Тезисы докладов 6-й ВК «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». 18-20 июня 2008. Санкт-Петербург. Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН.- С.210,211.
12. Гутцайт Э. М. Техника и приборы сверхвысоких частот. Радио и связь, 1994. 224 с.

13. Банков С.Е., Курушин А.А. Расчет антенн и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft – М, ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009, 256 с.
14. [www.microwavestudio.com](http://www.microwavestudio.com) – сайт компании -разработчика программы Microwave Studio CST.
15. [www.edem3d.ru](http://www.edem3d.ru) (программа EDEM).
16. Сайт официального дистрибьютера современного программного обеспечения компании ОАО «Родник» [www.rodnik.ru](http://www.rodnik.ru).
17. Сайт дистанционного обучения проектирования и применения методов СВЧ <http://ipso.ioso.ru/distance> .
18. Шлифер Э.Д. Электровакуумные приборы СВЧ М-типа, коаксиальные и обращенно-коаксиальные магнетроны // Итоги науки и техники. Сер. Электроника. Т.17.– М.: ВИНТИ, 1985. – с.169-209.
19. Сизов В.С., Гуткин А.А., Сахаров А.В., Лундин В.В., Брунков П.Н., Цацунчиков А.Ф. Фазовый распад и безызлучательная рекомбинация носителей в активных областях светоизлучающих приборов на основе квантовых точек InGaN в матрице GaN или AlGaN // ФТПП. 2009, т.43, вып.6, с.836-840.
20. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высш. шк. 1988. 432 с.

# Содержание

Введение .....	3
1. Моделирование наноструктуры в оптическом диапазоне частот.....	7
2. Волноводная антенная решетка.....	18
3. Антенная решетка из антенн Вивальди.....	33
4. Антенная решетка на вибраторных антеннах.....	43
5. Моделирование частотно-селективной поверхности.....	60
6. Падение плоской волны на объект и расчет RCS.....	74
7. Расчет ЭПР объекта большого электрического размера.....	90
8. Полосовой волноводный фильтр.....	100
9. Учет температуры нагрева объектов в HFSS-13.....	116
10. Реализация режима подстройки в HFSS-13.....	126
11. Моделирование коннектора.....	132
12. Антенна, смонтированная на мачте.....	141
13. Расчет временного процесса в интегральной схеме СВЧ.....	148
14. Анализ рупорной антенны во временной области.....	171
15. Проектирование наноразмерных светодиодных модулей с помощью программ электродинамического моделирования .....	191
16. Установка конфигурации для распределенного расчета на нескольких компьютерах.....	220
Заключение.....	239
Литература.....	240

## Об авторах:

**Банков Сергей Евгеньевич** – д.т.н., гл. научн. сотр. ИРЭ РАН. Окончил РТФ Московского энергетического института в 1981 г, аспирантуру в 1986 г. Специалист в области СВЧ техники и антенн, эксперт в области САПР СВЧ. Автор нескольких монографий, учебных пособий, 150 научных статей и 20 патентов.

**Гутцайт Эдуард Михайлович** – д.т.н., профессор каф. «Светотехника» МЭИ, Окончил РТФ Московского энергетического института. Автор книг и монографий в области СВЧ электроники и светотехники. Инициатор внедрения достижений СВЧ техники в нанотехнологию.

**Курушин Александр Александрович** – к.т.н., доцент каф. АУиРРВ МЭИ. Окончил РТФ МЭИ в 1979 г, аспирантуру в 1985 г. К.т.н. (1991 г.), диссертация «Проектирование транзисторных СВЧ усилителей с расширенным динамическим диапазоном». С 1996 г. преподавал различные аспекты СВЧ в МИЭМ, МИРЭА и МЭИ. Автор 12 учебных пособий и 70 научных статей.