

УДК 621.383.933

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНЫХ СВЕТОДИОДНЫХ МОДУЛЕЙ

А. А. Курушин

Национальный исследовательский университет МЭИ,  
111250, г Москва, Красноказарменная, 14

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2019 г.

**Аннотация.** Рассматриваются возможности создания оптических излучателей, использующих традиционные электродинамические системы, аналогичные сверхвысокочастотным стабилизированным резонаторам с низшими видами колебаний. В качестве активных элементов предлагается использовать квантовые нити и точки в виде массивов, образующих квантовые звёздочки, колечки и т.п. Приводятся результаты электродинамических исследований, выполненных с помощью программных средств HFSS ANSYS, позволяющих не только рассчитать параметры многорезонаторных систем, но и наглядно проиллюстрировать пульсирующие электромагнитные поля, излучаемые квантовыми звёздочками и колечками. Представленные варианты излучателей могут быть применены как для создания эффективных светодиодных устройств, так и в цветных дисплеях с высокой разрешающей способностью, а также в волоконно-оптических системах связи и др.

**Ключевые слова:** светодиодные модули, нанотехнология, HFSS ANSYS, гетероструктура, оптика, объемный резонатор, квантовые нити, квантовые точки, квантовые диски.

**Abstract.** The article shows optical emitters similar to Ultra-High Frequency stabilized resonators with lower modes of oscillations. It is proposed to use Quantum Points in an array, forming a Quantum Stars, a Quantum Rings, etc., as active elements. Results of the research is presented, which is performed by using ANSYS HFSS, allowing not only calculate the parameters of multiple-cavity systems, but also illustrate pulsating electromagnetic field emitted by the Quantum Stars and Rings. The presented examples of emitters can be applied both for creation of effective

LED, and in High Resolution Color Displays, and also in Fiber-Optic communication systems.

**Key Words:** LED modules, nanotechnology, HFSS ANSYS, heterostructures, optics, 3D- resonator, quantum wires, quantum dots, quantum disks.

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 данной работе рассматриваются возможности повышения эффективности светодиодных модулей на основе резонаторных систем с квантовыми источниками электромагнитного излучения [1].

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 программы электродинамического анализа распространения электромагнитного поля HFSS ANSYS 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 дискретные порты с собственными размерами, намного меньше длины волны, а также матрицы таких источников.

Рассмотрим светодиоды (СД) с объёмными резонаторами (ОР), которые считаются перспективными, поскольку имеют существенные преимущества в сравнении с обычными СД. Например, интенсивность спонтанного излучения светодиода при использовании высокодобротного 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 [1].

## **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 [2-4]. Простые модели этих квантовых участков в соответствии с [3] показаны на рис. 1.

В [1] 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. 2,а.

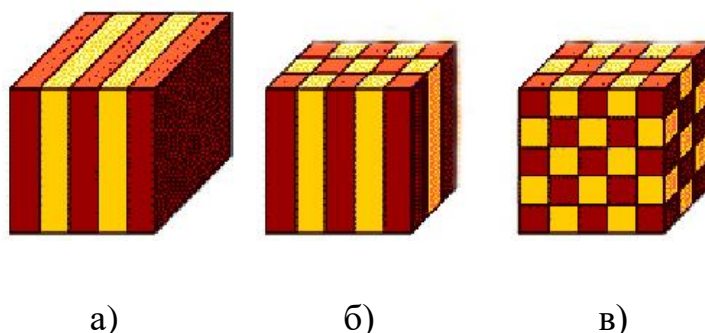
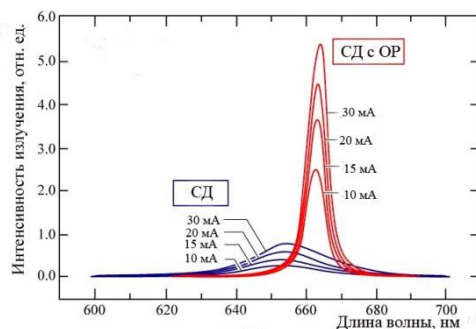
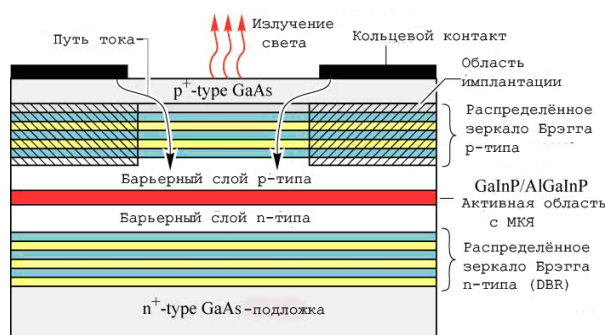


Рис. 1. Активные области гетероструктур, в которых источники света представляются в виде квантовых ям (а), нитей (б) и точек (в).



а)

б)

Рис. 2. Структура (а) и спектры (б) СД на основе GaInP/AlInGaP с МКЯ (множеством квантовых ям) 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.2,б, где для сравнения по интенсивности и ширине приведены также спектры обычного СД при разных токах.

Из рис. 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 [1] 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.

## **2. Падение оптической волны на частотно-селективную структуру**

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. 2,б, то зная коэффициент отражения частотно-селективной поверхности, можно получить спектр отраженной волны. Для того чтобы решить задачу падения электромагнитной волны на поверхность, нужно смоделировать структуру бесконечного размера и применить периодические граничные условия, которые реализованы в программе HFSS ANSYS. Использование периодических граничных условий резко уменьшает объем задачи и позволяет на современном компьютере с оперативной памятью 8 Гб решить задачу с нужной точностью.

Рассмотрим бесконечную многоштыревую структуру, состоящую из цилиндрических стержней, показанных на рис. 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 штыви (рис. 4), возбуждает синфазные поля между штывями.

Программа HFSS ANSYS 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 штывей, 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. 3, где в изометрии и на проекции изображена многорезонаторная штывевая система (МШС) с полупроводниковой гетероструктурой и люминофором.

На рис. 3,б показаны электрические силовые линии на входе МШС и КД на основе нитрида галлия синего свечения, возбуждающие жёлтый люминофор. Длина штывей  $l$  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 штыврь в синфазных электрических полях противофазного вида колебаний ( $\pi$ -вида). Этот ВК, как известно из техники СВЧ, является наиболее устойчивым.

Размеры КД (рис. 3,в) взяты из [4], где отмечалось, что структура с КТ из GaN в матрице AlN создана на сапфировой подложке методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

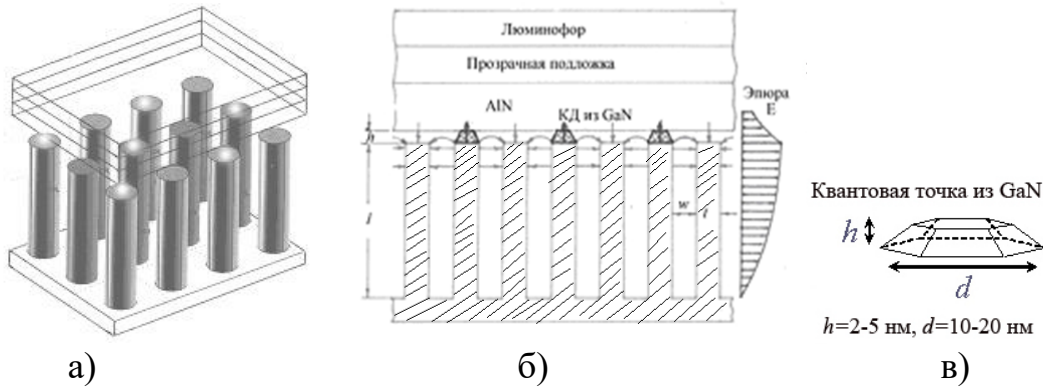


Рис. 3. Светодиодный модуль на основе многостыревой четверть-волновой РС (а,б) с квантовыми точками в виде квантовых дисков КД (в).

На рис. 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.

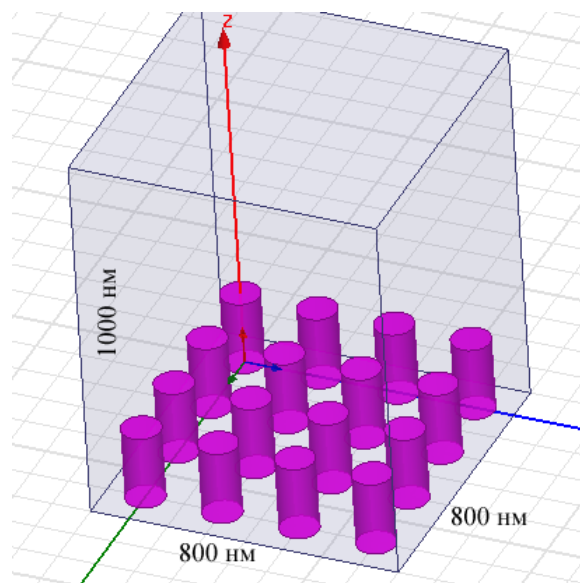
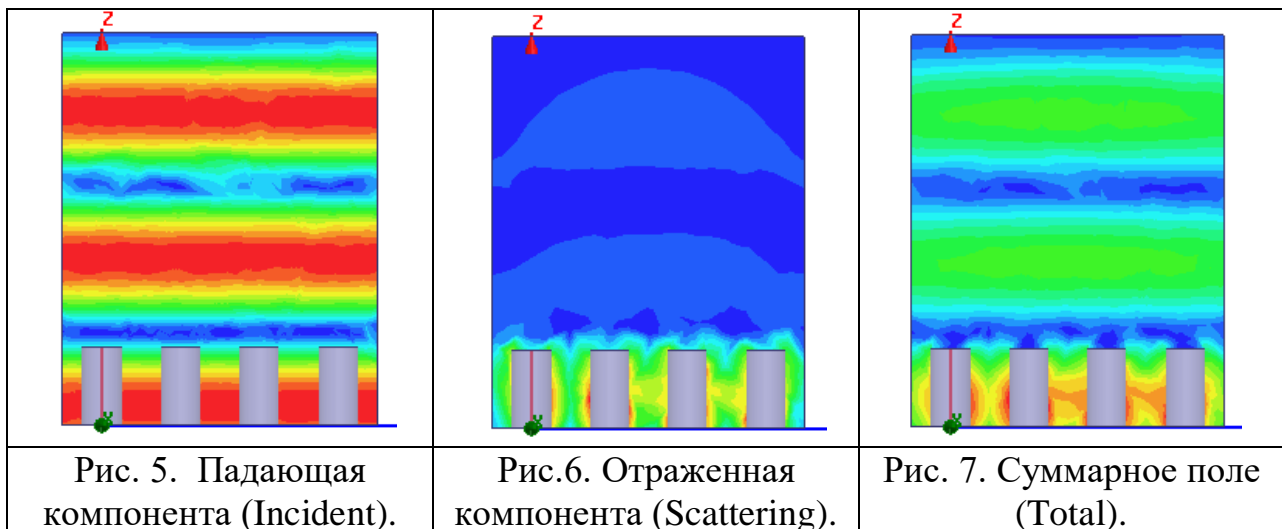


Рис. 4. Радиус и высота штырей – переменные параметризуемые величины с начальными значениями 50 нм и 200 нм

Создадим группу металлических цилиндров с радиусом 50 нм и высотой 200 нм (рис. 4).

Зададим плоскую волну, падающую на эту структуру. На рис. 5 – 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 земляную плоскость зададим граничное условие **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. 5-7).

Исследуем поведение этой структуры в оптическом диапазоне частот 100 ТГц – 1000 ТГц.

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. 8 и 9 показаны векторы рассчитанного электрического поля и источники электромагнитного излучения.

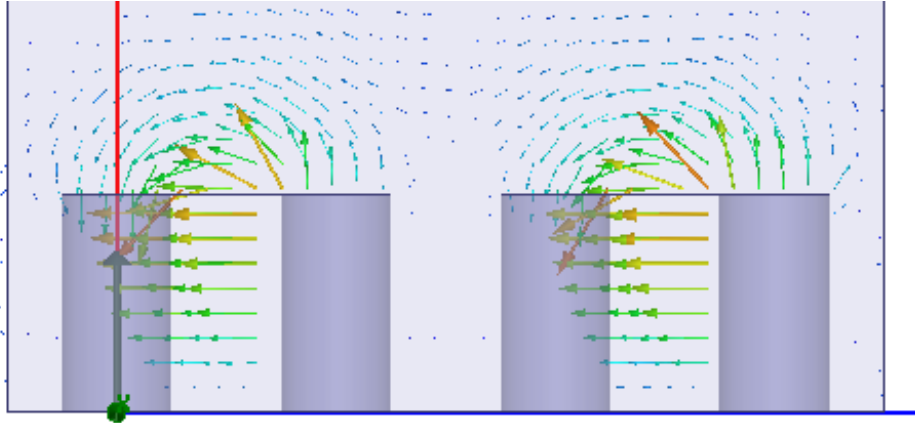


Рис. 8. Поле E в сечении штырей моделируемой поверхности.

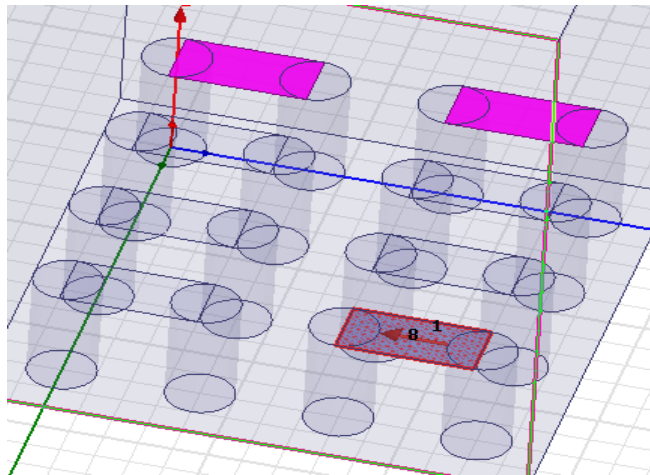


Рис. 9. Фрагмент поверхности со штырями, на которые нанесены дискретные источники (квантовые точки).

Для того чтобы управлять возбуждением квантовых точек, заданных в виде дискретных источников электромагнитного излучения (рис. 9), 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. 10).

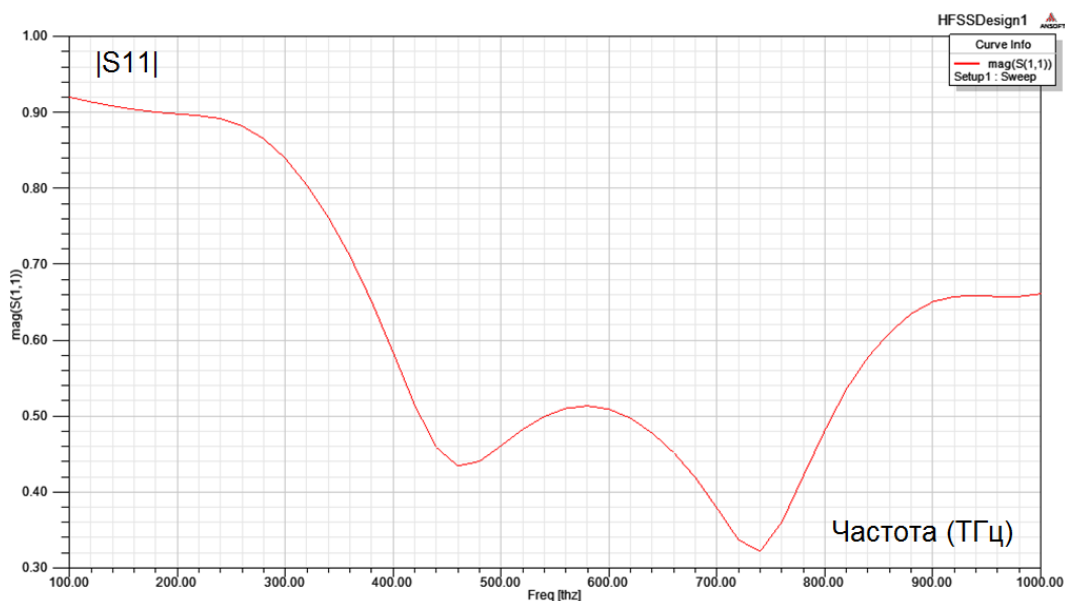


Рис. 10. Частотная характеристика отражения от частотно-селективной шероховатой поверхности в световом диапазоне

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 изменению резонансных характеристик.

### 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.11 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. 11).

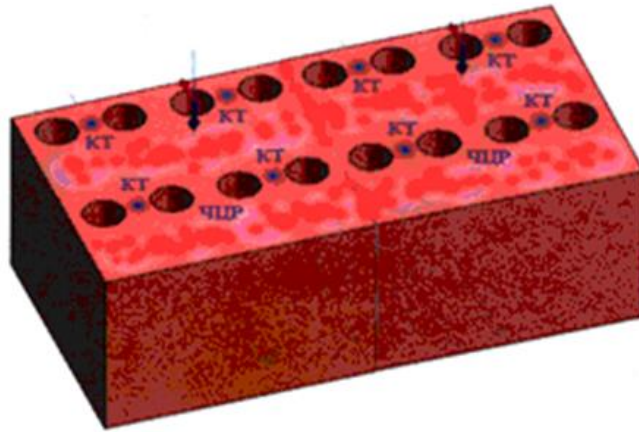


Рис. 11. Резонансная поверхность со связанными резонаторами.

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.

На базовой части поверхности зададим шероховатость. Фрагмент поверхности с цепочкой связанных резонаторов показан на рис. 12.

Возбудить такую поверхность можно падающей плоской волной или дискретными источниками.

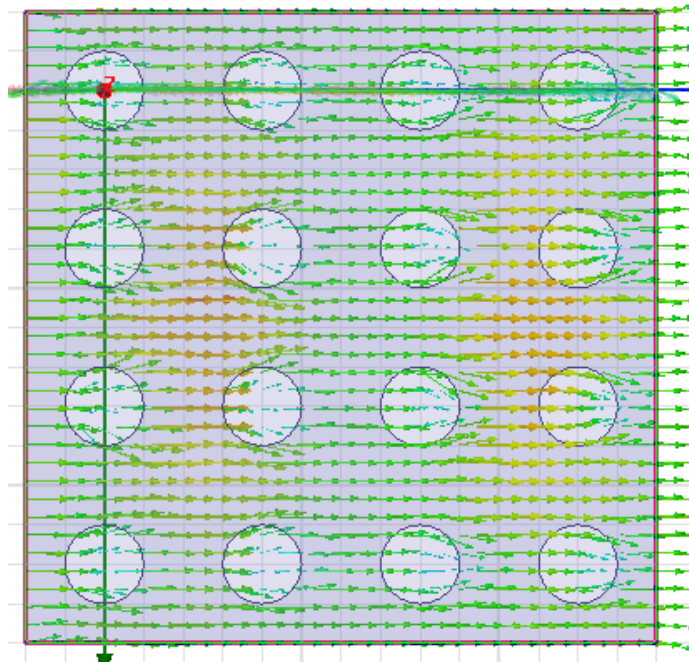


Рис. 12. Поле в сечении резонансных отверстий при падении на поверхность плоской волны.

Для того, чтобы решить задачу с бесконечным распределением структуры, охватим фрагмент поверхности периодическими граничными условиями (рис. 13).

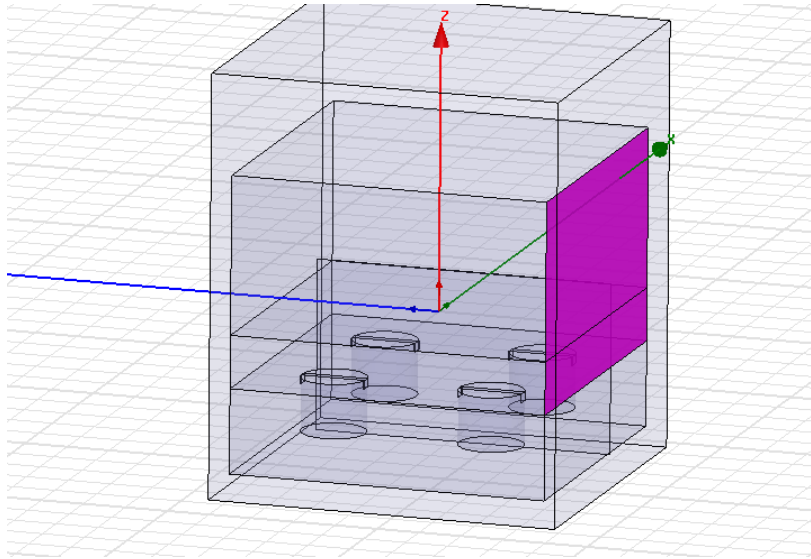


Рис. 13. Фрагмент отражающей структуры с цилиндрическими открытыми резонаторами (структура бесконечная, связывающая периодическими граничными условиями фрагмент, состоящий из четырех резонаторов).

Отметим, что результаты, полученные в HFSS, подтвердили, что система с цилиндрическими резонаторами обладает более высокой добротностью, чем штыревая структура. Использование цилиндрической системы будет обстоятельно рассмотрено далее. Здесь, при рассмотрении полей вблизи шероховатых поверхностей вернёмся к многоштыревой системе.

Для вывода ближнего поля вдоль линии нужно сначала начертить эту линию, вдоль которой HFSS позволяет вывести любую компоненту рассчитанного ближнего поля в пространстве.

Расчет ближнего поля верифицирует физический процесс резонансных явлений в резонаторах. На рис. 14 приведены векторы ближнего поля в верхних сечениях резонансных шероховатых поверхностей. Чтобы выполнить параметрический анализ шероховатой поверхности с круглыми штырями, будем изменять высоту штырей от 60 нм до 220 нм. На рис. 15 приведены резонансные характеристики, полученные для разных высот цилиндрических штырей.

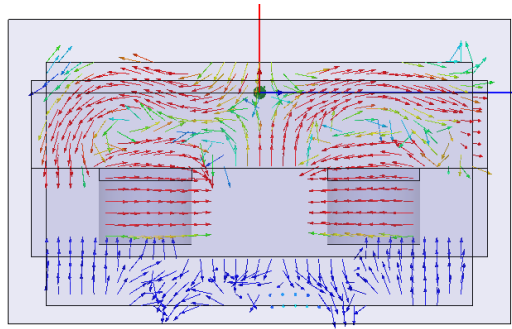


Рис. 14. Поля Н в сечении резонаторов вблизи шероховатых поверхностей.

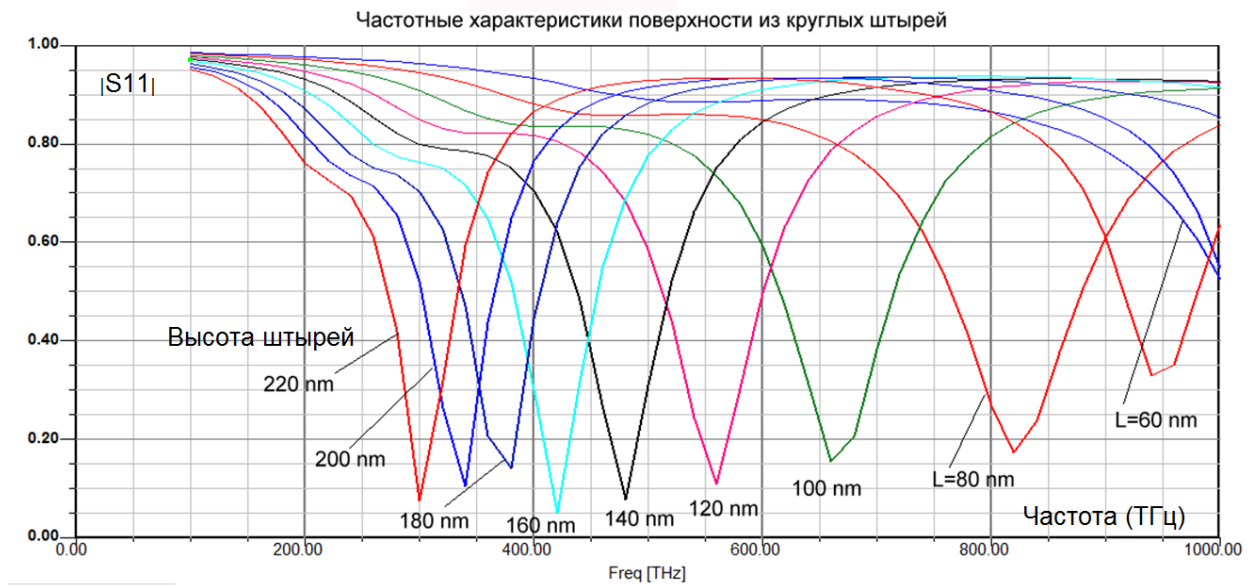


Рис. 15. Частотные характеристики структуры (на отражение) для разных высот цилиндрических штырей.

На основании экспериментальных расчетов подтверждено, что максимум электрического поля достигается в верхнем сечении штырей и РС (рис. 16 а). Эпюра электрического поля и электрические векторы показаны на рис. 16 б.

Для структуры, показанной на рис. 16, а также с круглыми штырями, приведем результаты расчета рабочей полосы частот и добротностей, которые получены в HFSS ANSYS для материалов с разными проводимостями, а также шероховатостями (Таблица 1).

Следует отметить, что значения добротностей, приведенные в таблице, являются слишком малыми. Поэтому далее вместо открытой многостыревой 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.

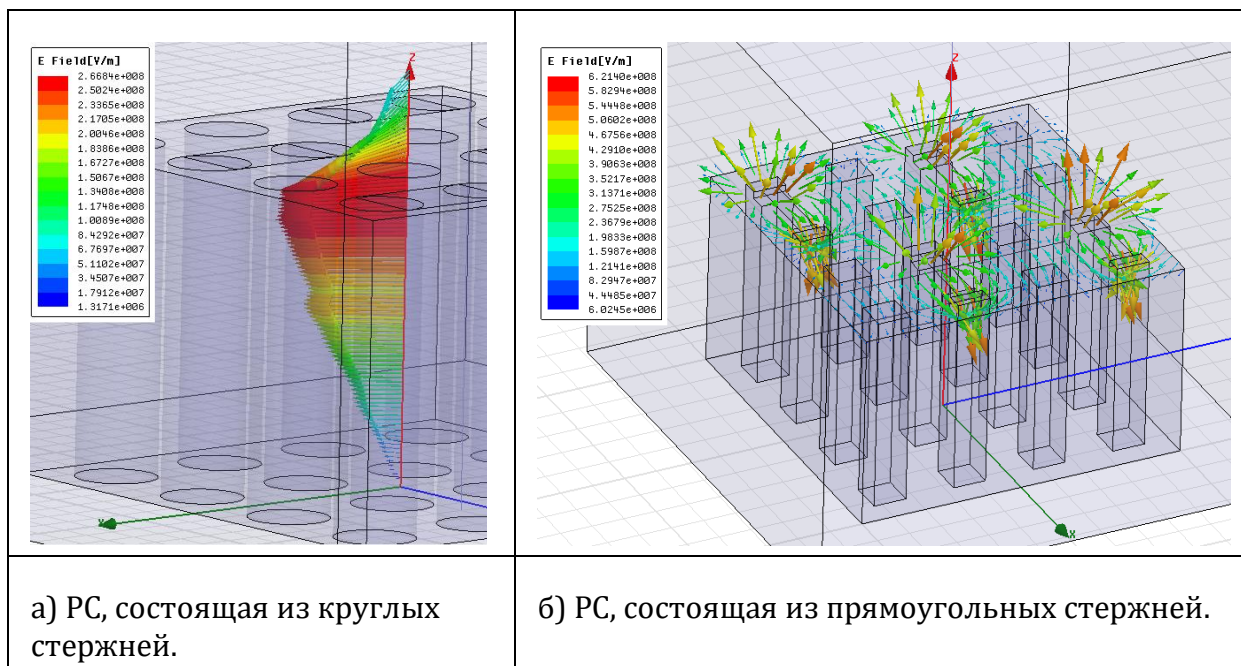


Рис. 16. Многоштыревые структуры с круглыми (а) и прямоугольными (б) стержнями.

Таблица 1. Характеристики периодической структуры при задании граничных условий материала с конечной проводимости, в также дополнительные параметры шероховатости (Surface Roughness) для поверхности материала.

Материал	Медь $\sigma=5.8 \cdot 10^7$ См/м	Медь шероховатой (50 мкм) поверхностью	Молибден $\sigma=1.76 \cdot 10^7$ См/м	Вольфрам $\sigma=1.85 \cdot 10^7$ См/м
Резонансная частота	100 ТГц	200	250	220
Q	Q=10	5	4	4.5

#### 4. Оптические 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 [1]. 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. 17. 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  $H_{10}$ .

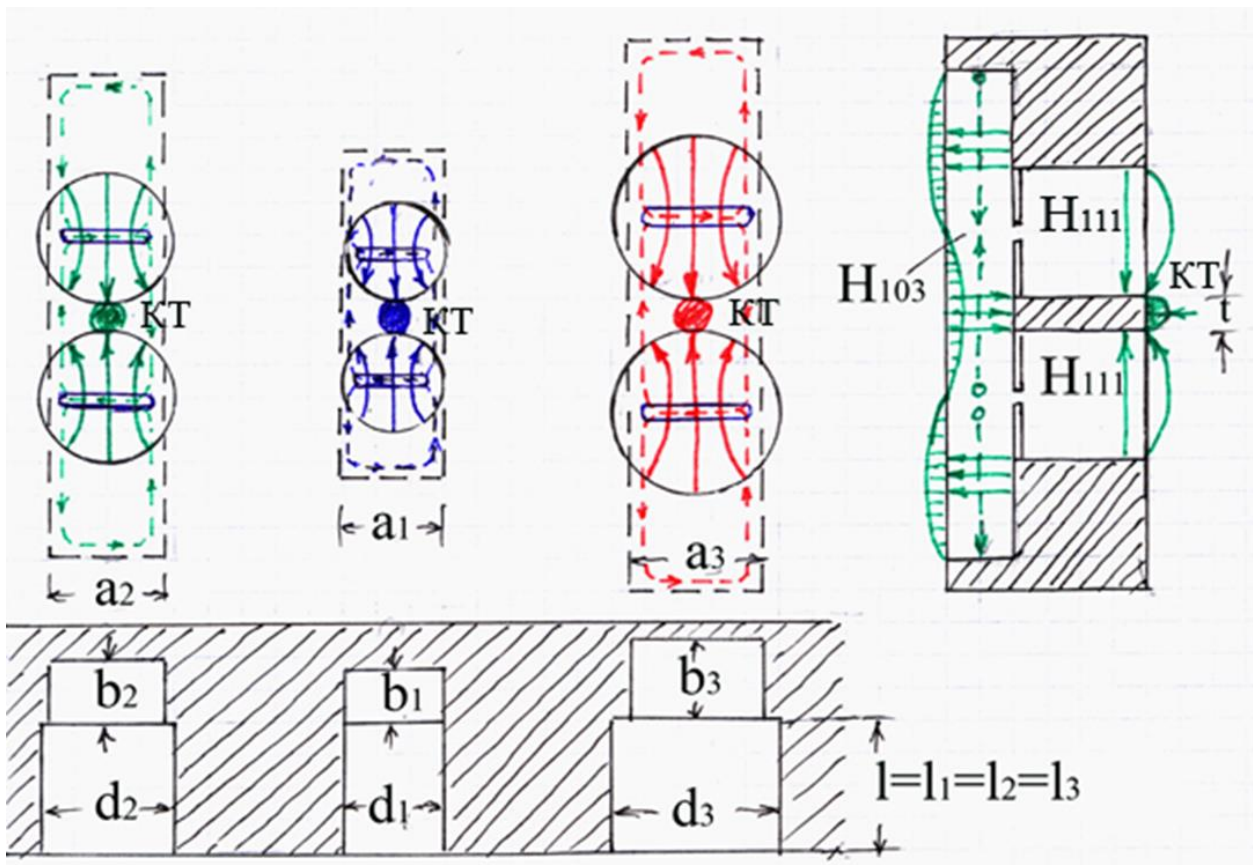


Рис. 17. Система в виде триады, состоящей из четвертьволновых цилиндрических резонаторов, в которых возбуждается волна типа  $H_{111}$  с призматическими стабилизирующими резонаторами (волна типа  $H_{103}$ ).

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. 18).

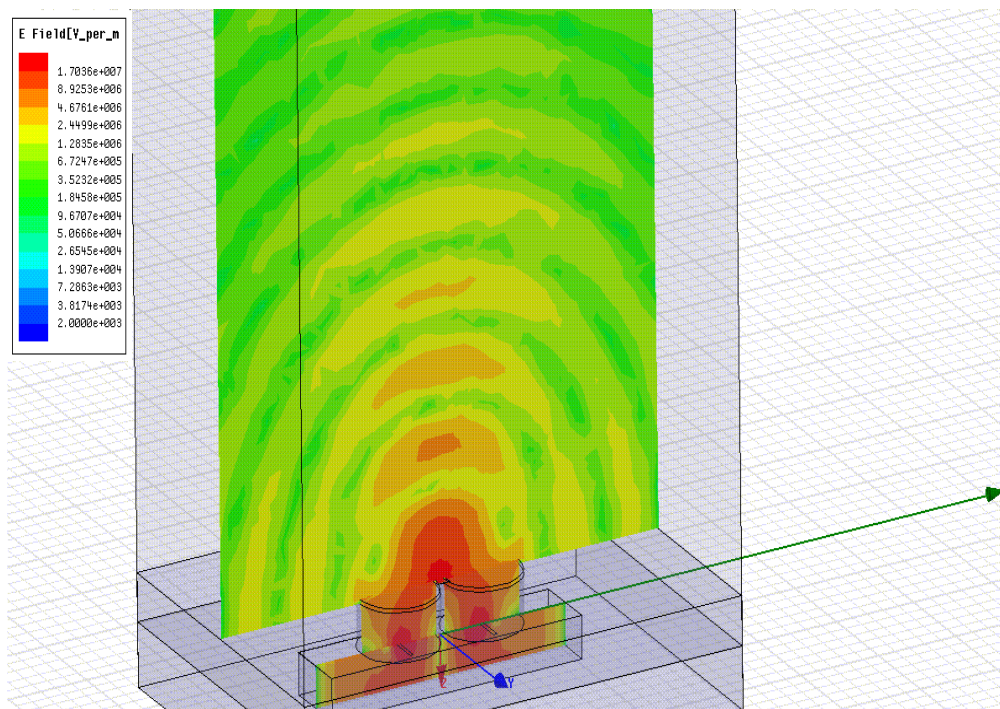


Рис. 18. Картина излучения из КТ в фиксированный момент времени.

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  $b < \lambda/2$  (обычно). Например, для волны 250 нм получаем  $d_1=304$  нм,  $d_2=362$  нм,  $d_3=482$  нм. Затем, исходя из выражений [5] находим  $a_1=302$  нм,  $a_2=341$  нм,  $a_3=396$  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 выражений [5] 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. 20, где показано световое поле в фиксированный момент времени.

А на рис. 19 зафиксировано излучение в тот момент, когда в щелях связи максимальное электрическое поле, а вблизи КТ минимальное из-за расстояния в четверть длины волны.

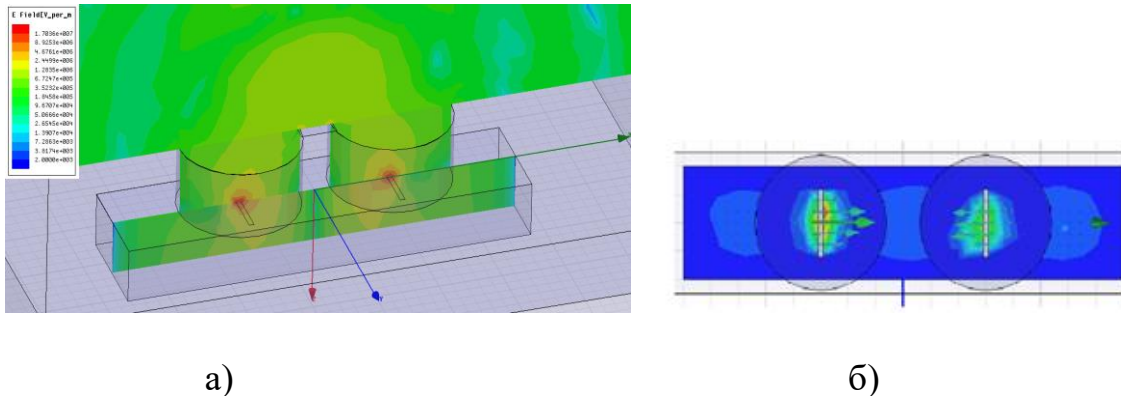


Рис. 19. Излучение из КТ (а) в момент времени, когда в щелях связи максимальное электрическое поле (б).

Необходимо отметить, что из техники СВЧ известны более высокодобротные 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.

## 5. Квантовые нити и точки над резонаторами

### 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 [4,5]. 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. 20 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.

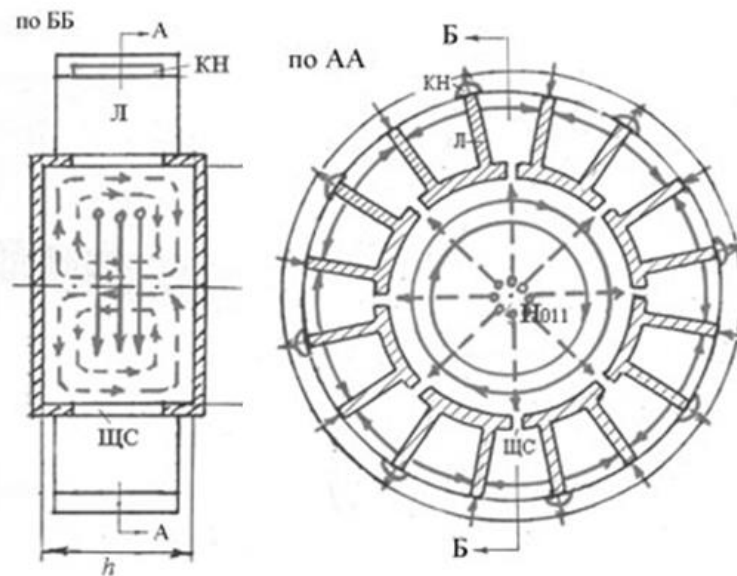


Рис. 20. Излучатель кругового действия (аналог ОКМ).

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. 21).

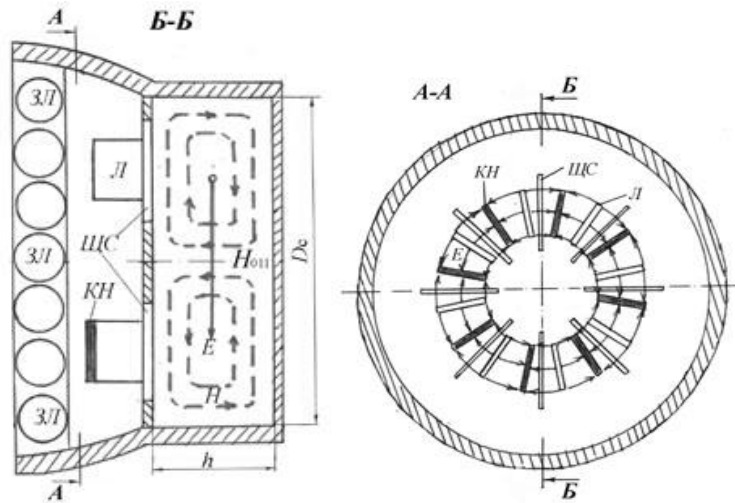


Рис. 21. Излучатель с квантовой звёздочкой (аналог ТСМ).

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». [6,7]. 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.

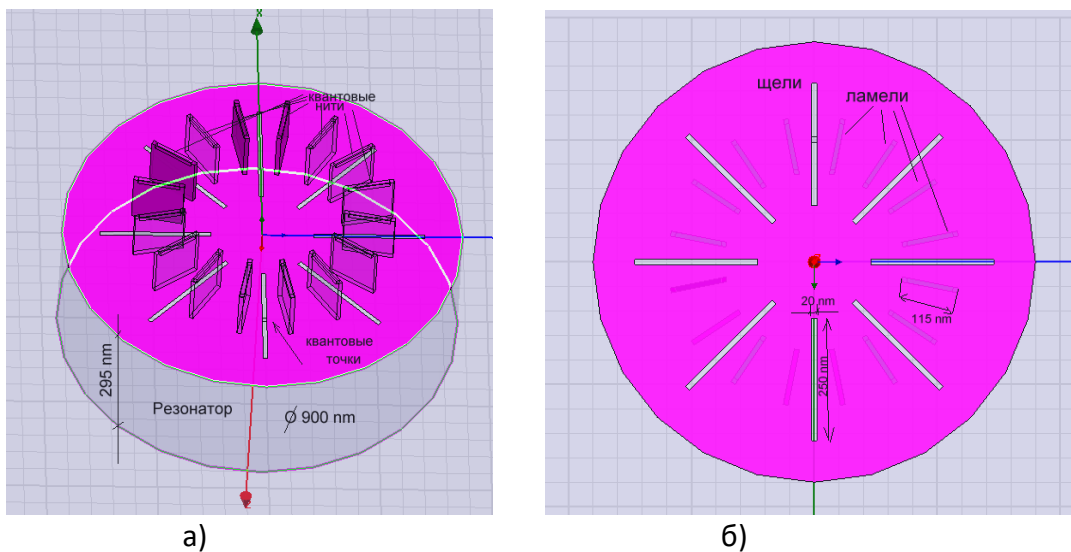


Рис. 22. Резонаторная система с торцевыми ламелями в изометрии (а) и в плане (б).

Излучатели, представленные на рис. 22 и 23, были проанализированы в системе HFSS. Расчётные резонансные характеристики подтверждают возможность увеличения собственной добротности при введении СР.

На рис. 22 и 23 приводятся иллюстрации, полученные в системе HFSS при анализе второго резонатора с квантовыми звёздочками на ламелях.

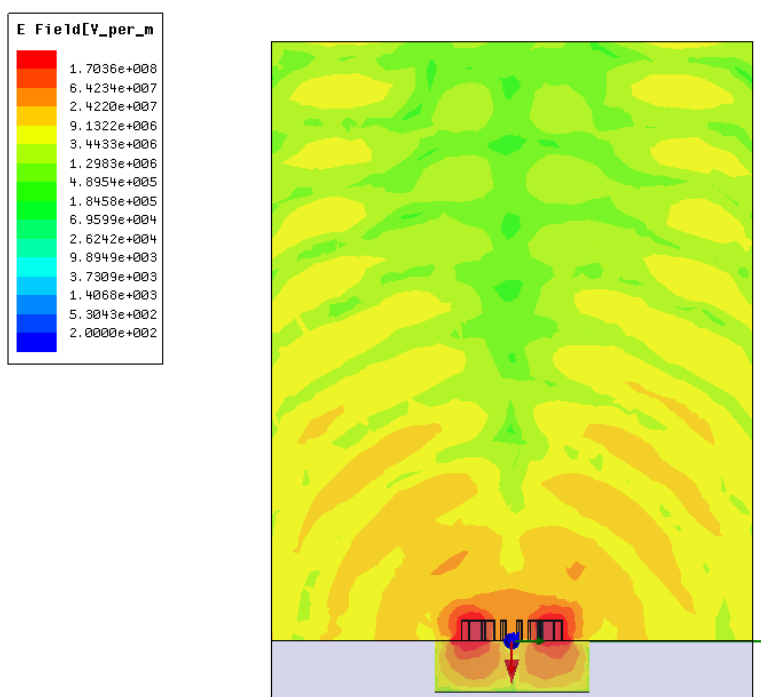


Рис.23. Излучение из квантовой звёздочки в фиксированный момент времени.

### 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. 24.

Этот излучатель в некоторой степени является аналогом ячеек, приведенных на рис. 21. 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 КН, свёрнутая в кольцо.

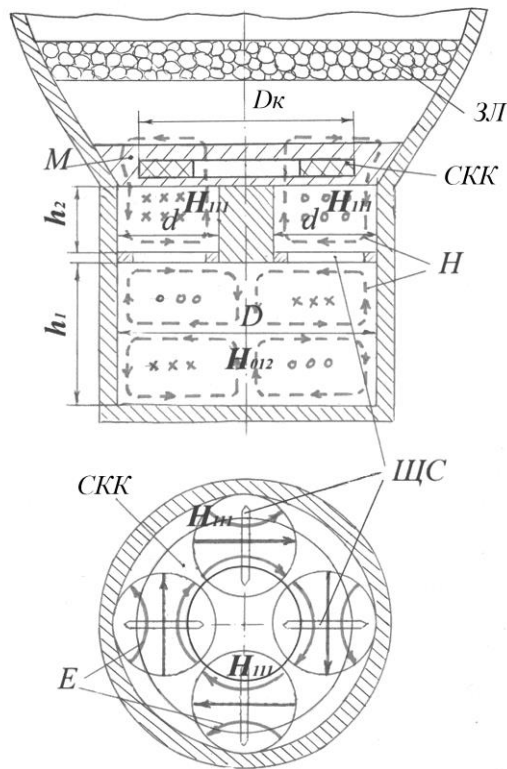


Рис.24. Излучатель с квантовым колечком.

На рис. 25 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.

Из рис. 25 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.

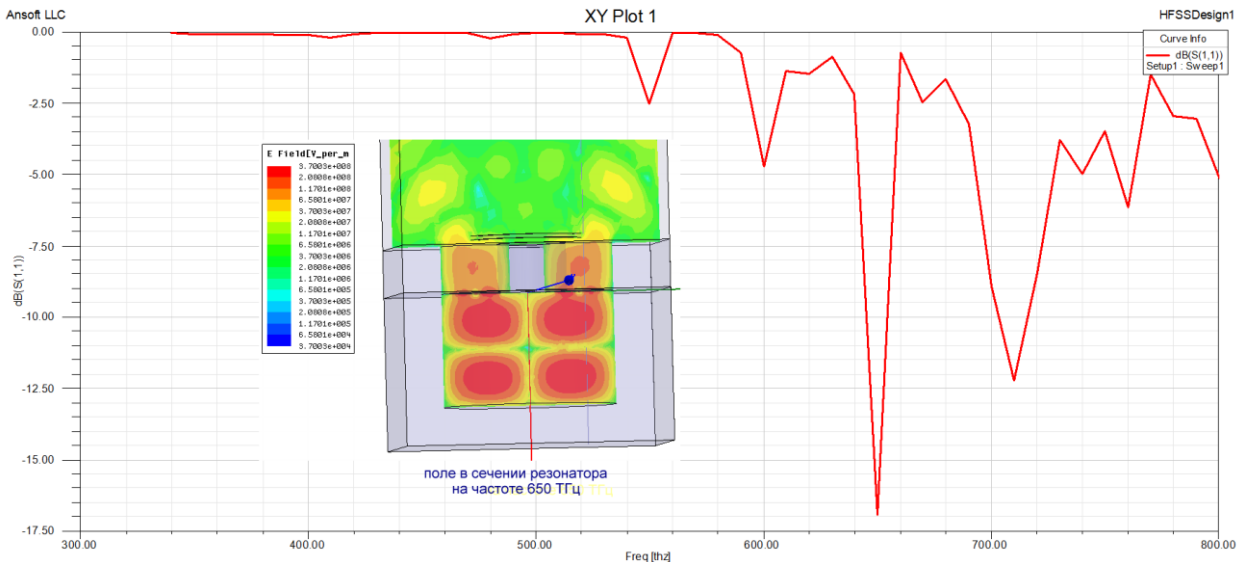


Рис. 25. Частотная характеристика и картина электромагнитного поля на рабочей частоте 650 ТГц.

На рис.26 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. 26 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.

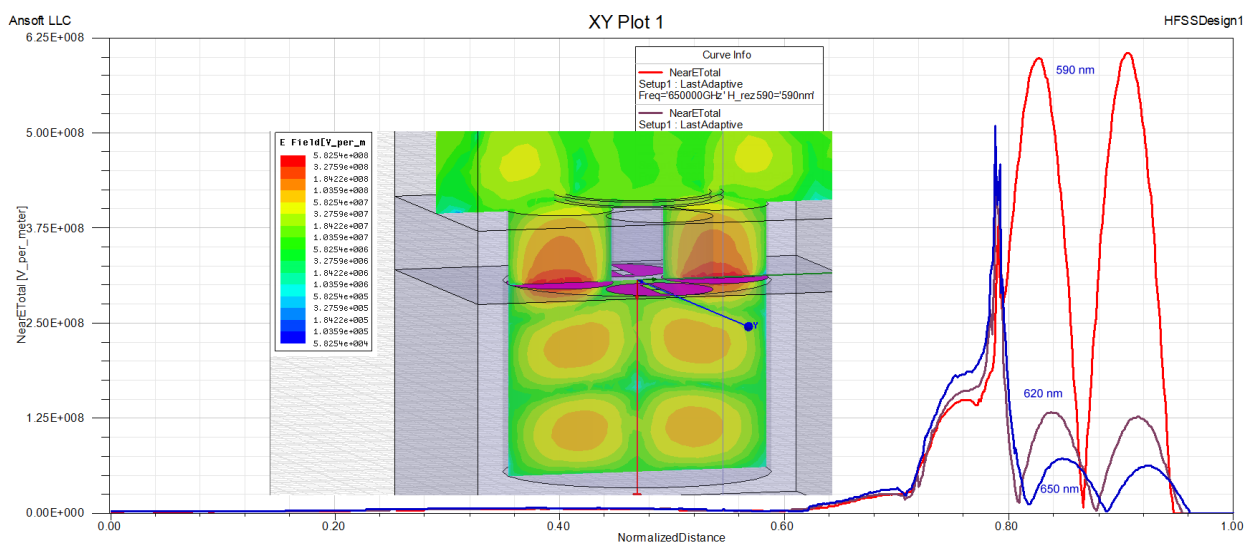


Рис. 26. Распределение электрического поля в радиальном направлении и иллюстрация излучения в момент времени, когда в щелях связи максимальное электрическое поле.

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 [7]. Поэтому, желательно увеличить размеры матрицы с КТ.

Для этого предлагается устройство излучателя, схематически представленного на рис. 27, 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. 27 показаны 8 резонаторов с противофазными колебаниями при связи с СР через один ЧР. Над этими резонаторами расположена дисковая матрица (ДМ) с КТ. Расчётные размеры резонаторов для синих и красных КТ в соответствии с обозначениями на рис. 27 приведены в таблице.

Таблица 2. Размеры (в нм) излучателя, представленного на рис. 30.

Цвет	Длина волны	$D_{\text{чр}}$	$D_{\text{ср}}$	$d$	$h_1$	$h_2$	$D_M$
Синий	460	340	680	100	555	370	1360
Красный	640	480	960	140	750	755	1920

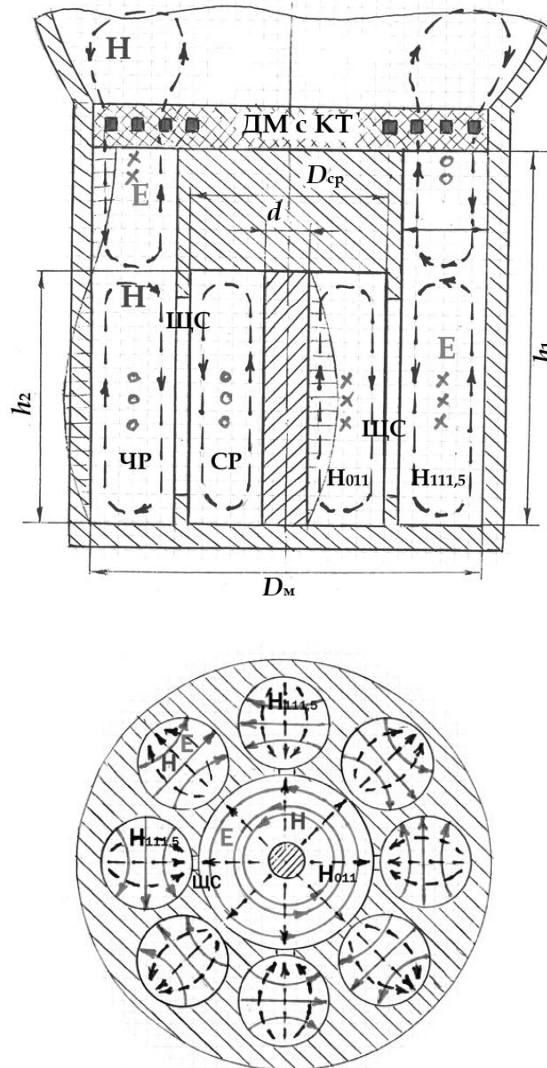


Рис. 27. Излучатель с коаксиальным стабилизирующим резонатором.

Для обеспечения наиболее эффективной электромагнитной связи между СР и ЧР их размеры следует подобрать таким образом, чтобы отрезки волноводов, из которых получены резонаторы, имели одинаковые критические и соответственно волноводные длины волн, т.е.  $h_1 = 3/4\lambda_B$  и  $h_2 = \lambda_B/2$ .



Устройство рассматриваемого излучателя удобно тем, что диаметр матрицы  $D_m$  можно увеличивать за счёт увеличения количества ЧР. При этом с увеличением диаметра  $D_{cp}$  необходимо будет соответственно увеличивать диаметр стержня  $d$  для сохранения резонансной частоты.

Подводя итоги рассмотрения предлагаемых излучателей, отметим, что световой поток одного такого наноразмерного устройства очень мал, и эти 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.

## **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. 28. На первом этапе осуществляется создание конструкции резонатора. Размеры резонаторов равны:

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,  $l_q = 675$  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. 28 в изометрии и в плоскости.

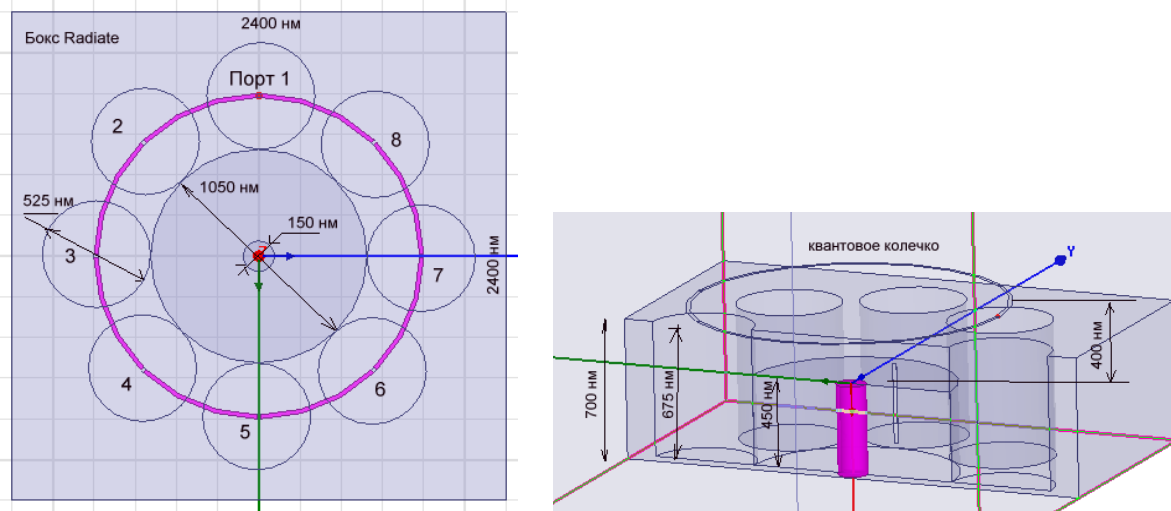


Рис. 28. Структура, в которой щели расположены через один внешний резонатор, т.е. связаны с центральным коаксиальным резонатором 1,3, 5, и 7 внешние цилиндрические резонаторы.

Базовая структура резонатора создается как бокс, в котором вырежем один центральный цилиндр радиусом 525 нм и 8 цилиндров радиусом 262.5 нм. Восемь резонаторов размещены так, что между центральными боковыми располагается щель связи (рис. 28).

Над резонаторами чертится планарное квантовое кольцо шириной 20 нм, на котором установим граничные условия **Perfect E**. Чтобы вставить в это кольцо 8 портов, которые будут возбуждать последовательный ток в кольце, прорежем в планарном кольце 8 прямоугольников, на которые задаются дискретные порты, задавая импедансную линию в середине этого прямоугольника.

Созданную структуру охватим боксом, на боковые стенки которого поставим периодические граничные условия **Master-Slave** (рис. 29).

Далее выполним расчет ближнего и дальнего поля на частоте 467 ТГц, которая соответствует длине волны 640 нм.

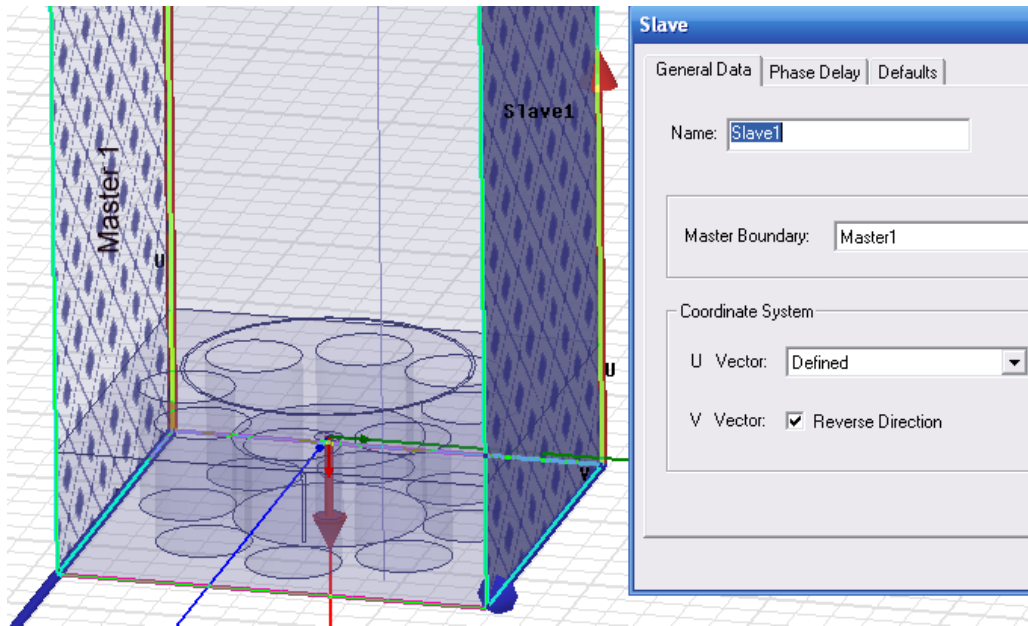


Рис. 29. Постановка периодических граничных условий Master-Slave на противоположные стороны бокса, охватывающего одну ячейку резонатора.

Из анализа рассчитанного ближнего поля (рис. 30) можно видеть, 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. 30 и 31.

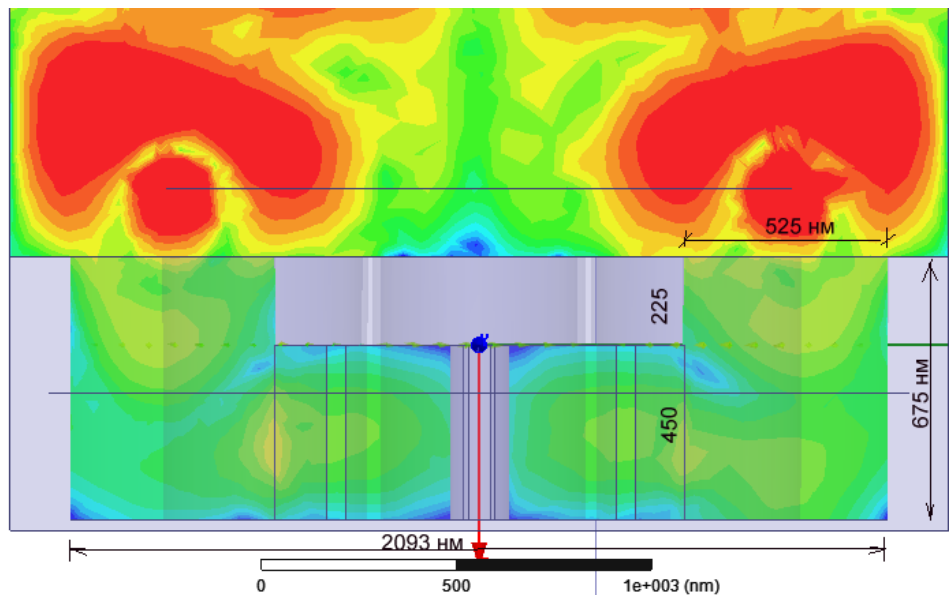


Рис.30. Излучение электромагнитной волны оптического диапазона из квантового колечка в системе с внутренним коаксиальным стабилизирующим резонатором.

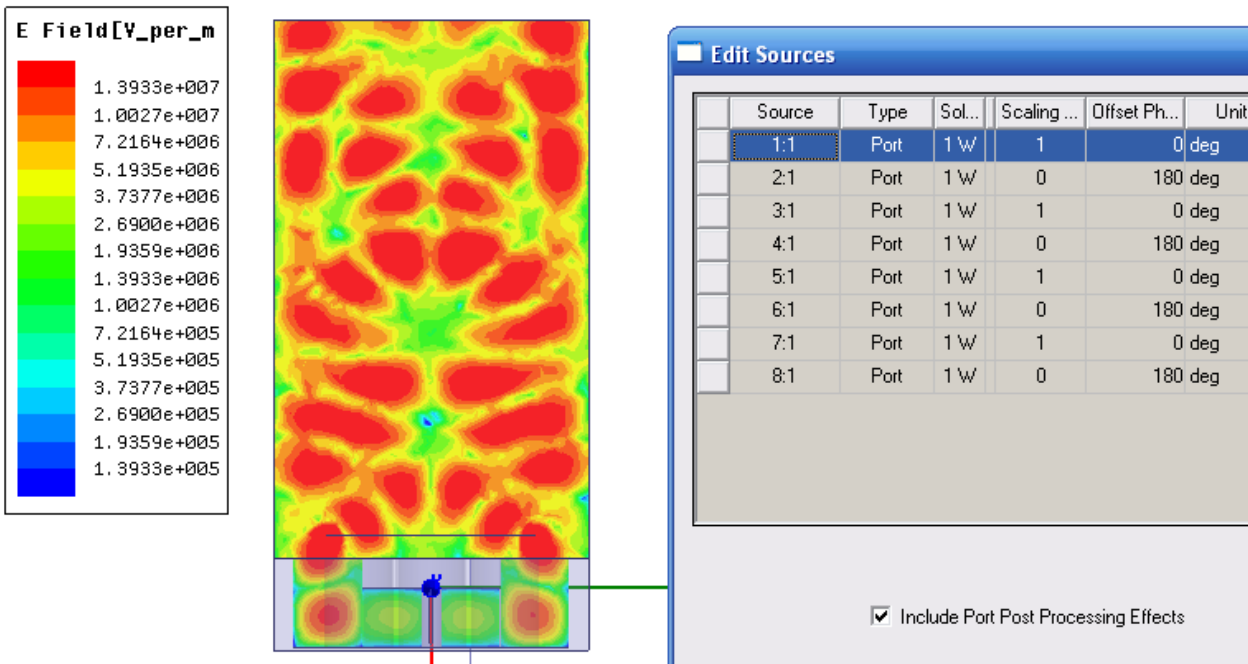


Рис. 31. Ближнее поле в сечении резонатора при установке противофазного возбуждения квантовых точек.

На рис. 32 приведена частотная характеристика, а на рис.33 - картина электромагнитного поля при возбуждении КТ, расположенных в КК через один резонатор.

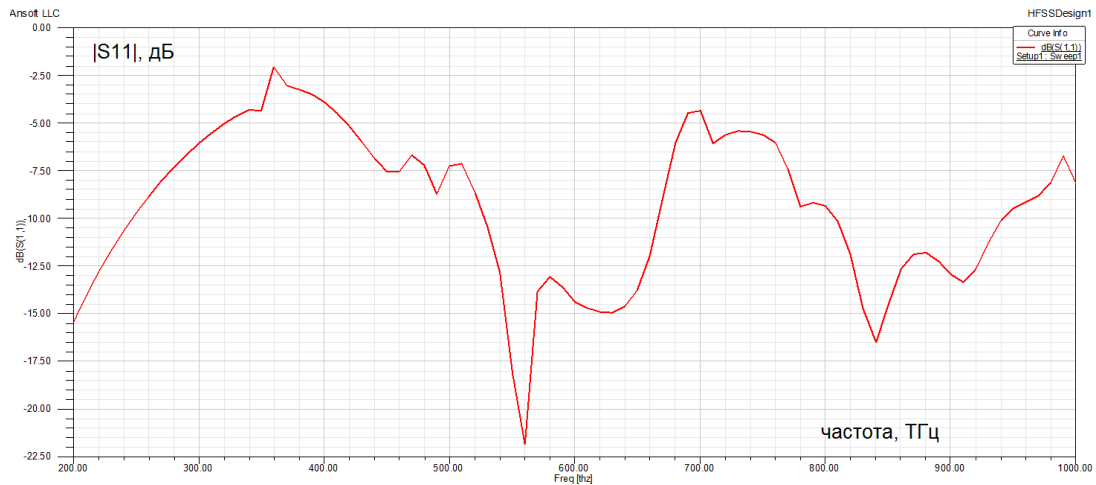


Рис. 32. Частотная характеристика  $S_{11}$  по каждому порту, внедренному в КК (8 портов).

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. Важно, что в таких расчетах учитывается дифракция световых волн и взаимное влияние волн, возбуждаемых в отдельных резонаторах.

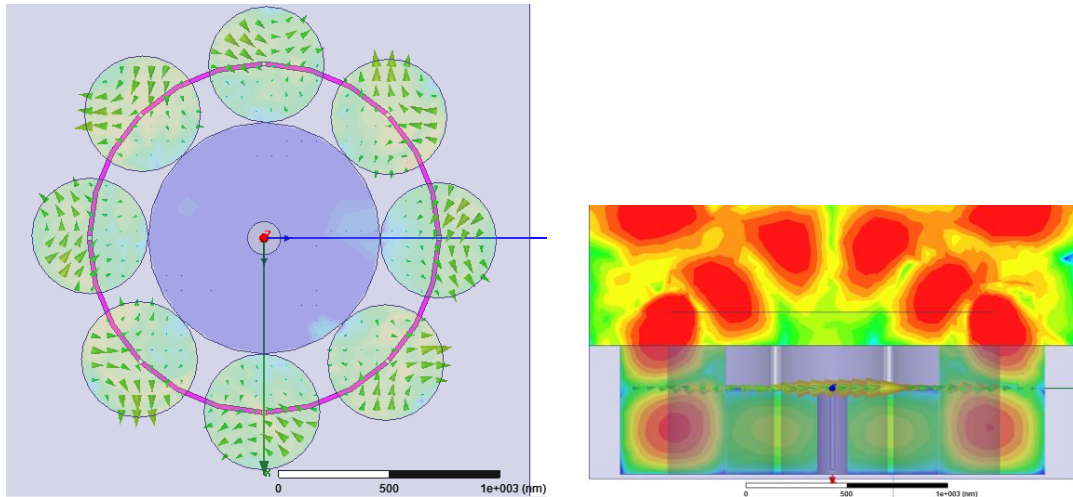


Рис.33. Картина электромагнитного поля при возбуждении КТ, расположенных в КК через один резонатор.

## 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 высокодобротными 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 [8,9].

Разнообразные примеры и исследования, в которых используются HFSS ANSYS и другие программы, показывают, что эти программы электродинамического моделирования поля 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.

В настоящее время квантовые звёздочки и колечки могут показаться нереально фантастическими излучателями. Насколько они реализуемы в процессе самосборки и самоорганизации наноматериалов, по-видимому, покажет недалёкое будущее.

**Благодарность.** Автор искренне благодарит д.т.н. проф. Гутцайта Эдуарда Михайловича (25.06.1930 – 01.11.2013) за привлечение к рассматриваемому предмету, обсуждение предмета исследований и расчетов.

### Литература

1. 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.
2. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. *ФТП*, 1998, т. 32, №1, С. 3-18.
3. Звездин А.К. Оптические микрорезонаторы, волноводы, фотонные кристаллы. // *Природа*. 2004. №10.
4. 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.

5. Гутцайт Э. М. Техника и приборы сверхвысоких частот. Радио и связь, 1994. 224 с.
6. 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.
7. Сизов В.С., Гуткин А.А., Сахаров А.В., Лундин В.В., Брунков П.Н., Цацульников 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.
8. Гутцайт Э.М. Квантовые звёздочки на светотехническом небосклоне // *Светотехника*. – 2010. – №1. – С. 25-27.
9. Гутцайт Э.М., Курушин А.А. Светодиодные модули с электродинамическими системами (перспективы развития на основе нанотехнологических возможностей) // *Радиотехника и электроника*, 2010, Т.55, № 8, стр. 999-1016.

**Для цитирования:**

Курушин А.А. Проектирование наноразмерных светодиодных модулей. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec19/12/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.12.12