

Серов И.Н., Лукьянов Г.Н., Копыльцов А.В.

Россия, С.-Петербург,

Фонд «АЙРЭС», СПбГУИТМО, РГПУ им. А.И. Герцена

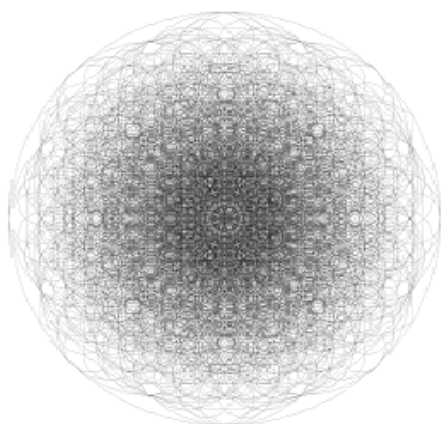
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С КРЕМНИЕВОЙ САМОАФФИННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

В последние годы в разных областях науки и техники применяются поверхностные и объемные структуры, имеющие упорядоченное, регулярное строение [1]. Особое место занимают объемы и поверхности с фрактальной структурой, которые применяются в радиотехнике, оптике, медицине, электронике и т.д. [2,3,4]. Особый интерес представляет изучение взаимодействия излучения с поверхностью из полярного, полупроводникового материала, например, кремния. Этот интерес обусловлен комплексом физических явлений, возникающих при таком взаимодействии, а именно, дифракцией, интерференцией и поляризацией полупроводникового материала под действием падающего излучения, что в итоге приводит к пространственному разделению зарядов. Особый интерес представляют объекты, поверхность которых построена на основе законов самоподобия и масштабной инвариантности и обладает фрактальными или самоаффинными свойствами.

К таким объектам можно отнести фрактально-матричные резонаторы (ФМР) «АЙРЭС» []. Авторы исследовали взаимодействие ФМР с падающим на его поверхность излучением, как для стационарного, так и для нестационарного случаев, при различных граничных условиях, задающих законы изменения падающего электромагнитного излучения на поверхности резонатора.

Поверхность резонаторов.

Поверхность резонаторов «АЙРЭС» изготовлена в виде криволинейных щелей (канавок), рисунок которых подчиняется законам самоподобия и масштабной инвариантности и выполнен на основе аффинных преобразований, т.е., эта поверхность является самоаффинной по построению [5]. Резонатор «АЙРЭС» изготавливается на кремниевой подложке (диаметр подложки 6 мм, толщина 1 мм), на поверхности которой сформирована



сложная система кольцевых канавок прямоугольного сечения с шириной 1 мкм и глубиной 1,2 мкм, образующих регулярную самоаффинную структуру (рис. 1).

Рис. 1. ФМР «АЙРЭС»

Принцип построения рисунка поверхности изображен на рис. 2.

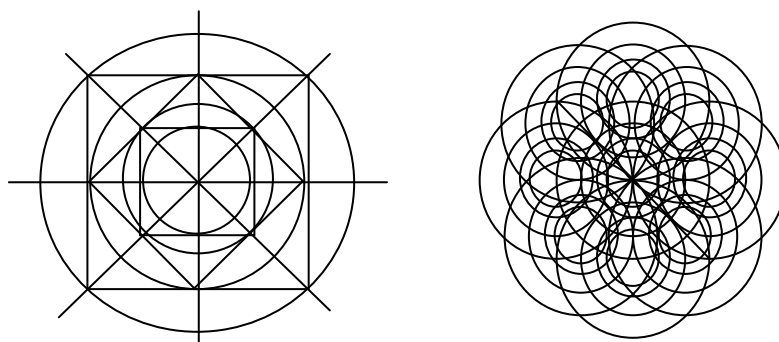


Рис.2. Построение ФМР «АЙРЭС»

Моделирование.

Моделировались как стационарный случай, с рассмотрением поглощения и отражения падающего излучения, так и нестационарный, при котором рассматривалось явление поляризации полупроводника и распределение электрических зарядов по поверхности резонатора с учетом его рельефа.

Стационарный случай.

Взаимодействие электромагнитной волны излучения с поверхностью пластины для стационарного случая, может быть записано в виде:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r^2} = \left(k^2 - \varepsilon \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \right) \mathbf{E} \quad (1)$$

где: k -волновое число, ε - диэлектрическая проницаемость пластины, ω - циклическая частота, c - скорость света; r - длина радиус-вектора, φ - полярный угол, E -электрическая составляющая вектора напряженности.

При моделировании использовалась модель вида:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} = -a^2 E - b \quad (2)$$

где: где E - функция, пропорциональная напряженности излучения; r - длина радиус-вектора, φ - полярный угол. a и b - постоянные.

При расчетах на компьютере изменялась периодичность излучения по отношению к размерам пластины, когда сравнивались длина волны падающего излучения и периодичность рисунка поверхности резонатора, с учетом его размеров.

Полученные результаты моделирования, приведенные на рис.3 и рис.4, показывают, что напряженность электрического поля, после взаимодействия с самоаффинной поверхностью, перераспределяется таким образом, что графики распределения поля по поверхности приобретают регулярный характер, который остается практически неизменным при изменении частоты падающего излучения в широком диапазоне.

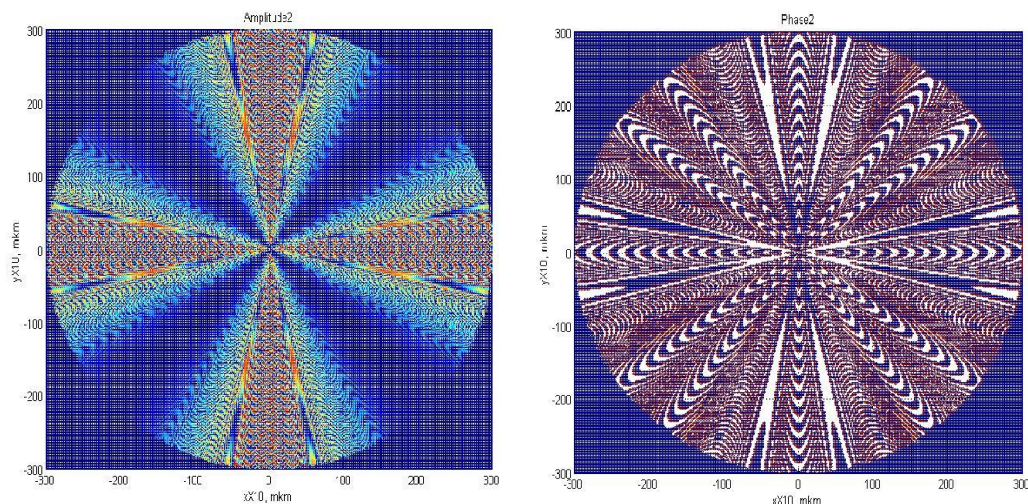


Рис. 3. Результат моделирования для периодичности падающего излучения 2 периода на 1 оборот по углу φ . Слева- амплитуда, справа- фаза.

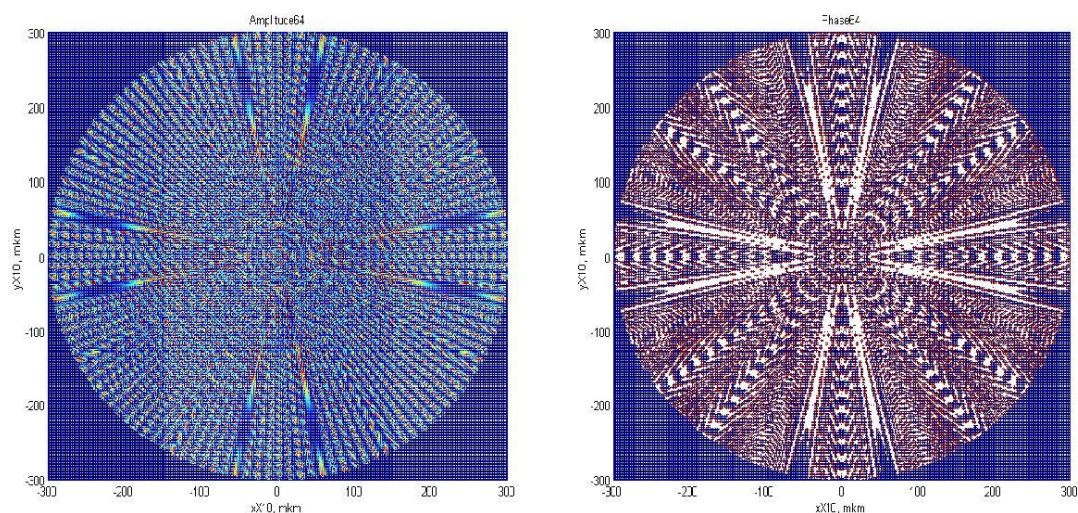


Рис. 4. Периодичность падающего излучения 64 периода на 1 оборот по углу φ . Слева- амплитуда, справа- фаза

Нестационарный случай, двумерная модель.

Рассматривалось взаимодействие электромагнитной волны с поверхностью пластины для нестационарного случая, для двумерной модели, т.е. моделировалось изменение

распределения напряженности со временем по поверхности резонатора для различных граничных условий.

Электрическое поле при взаимодействии с полупроводником вызывает явление смещения зарядов и, вследствие того, что в области «канавок» пластина имеет меньшую толщину, концентрация носителей заряда в канавках будет выше, чем в соседних областях. Поэтому при моделировании принималось, что носители заряда сосредотачиваются в канавках (рис. 5).

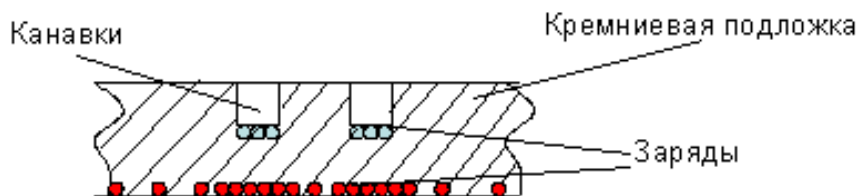


Рис. 5. Качественная картина распределения зарядов

Пусть плотность зарядов в двух соседних канавках составляет, соответственно, q_1 и q_2 , а потенциалы φ_1 и φ_2 (рис. 6).



Рис. 6. Заряды в соседних канавках.

При достижении потенциалом какого-то критического значения $\varphi_{кр}$ возникает пробой по кратчайшему расстоянию

между канавками. Математическая модель для данного случая имеет вид:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2}\right) - aE, \quad (3)$$

где D и a - коэффициенты, E -напряженность электрического поля, x и y -координаты, t - время. Условие пробоя реализовано следующим образом: если $|E| > 0,6$, то $E = 0$. Расчеты были проведены для случая, когда $D=0,01$ и $a=0,001$ и в центре пластины имеется сток для зарядов.

Сток в центре резонатора.

Моделирование на компьютере показало, что независимо от условий на границе поверхности, спустя какое-то время $t_{уст}$, устанавливается устойчивое и солитоноподобное распределение напряженности электрического поля по поверхности резонатора. Результаты моделирования приведены на рис. 7,8. Для полученных результатов было определено распределение пространственной спектральной плотности мощности амплитуды. Результаты расчетов приведены на рис. 9.

Основным результатом моделирования является то, что установившееся решение, независимо от условий на границе является устойчивым и солитоноподобным. Его форма не меняется при изменении граничных условий. Это означает, что

самоаффинная поверхность резонатора «АЙРЭС» разлагает излучение таким образом, что результат этого разложения не зависит от характеристик падающего на него излучения.

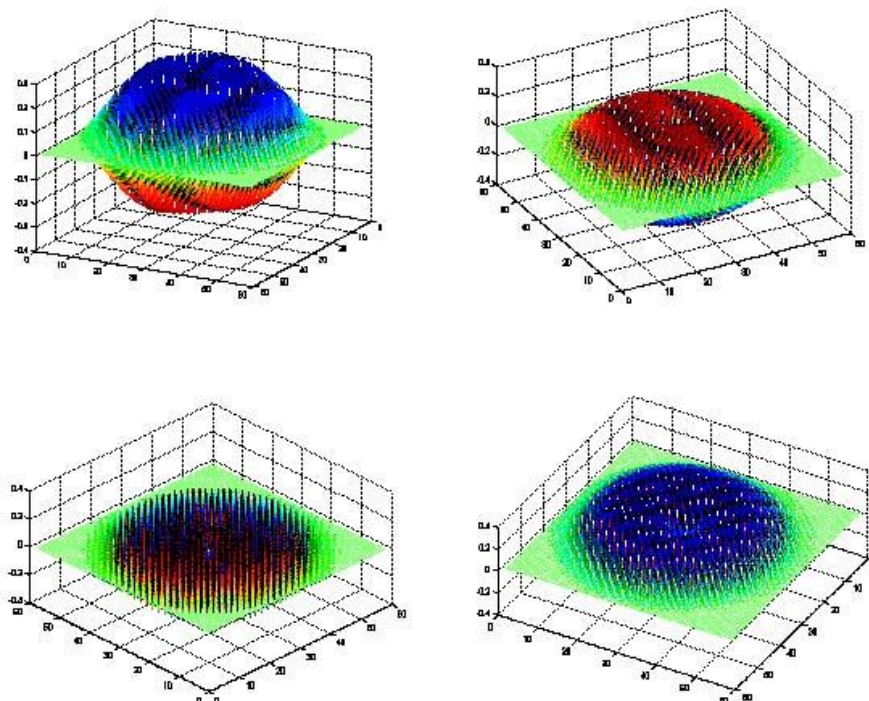


Рис. 7. Распределение напряженности E по поверхности резонатора (10 оборотов), различные проекции.

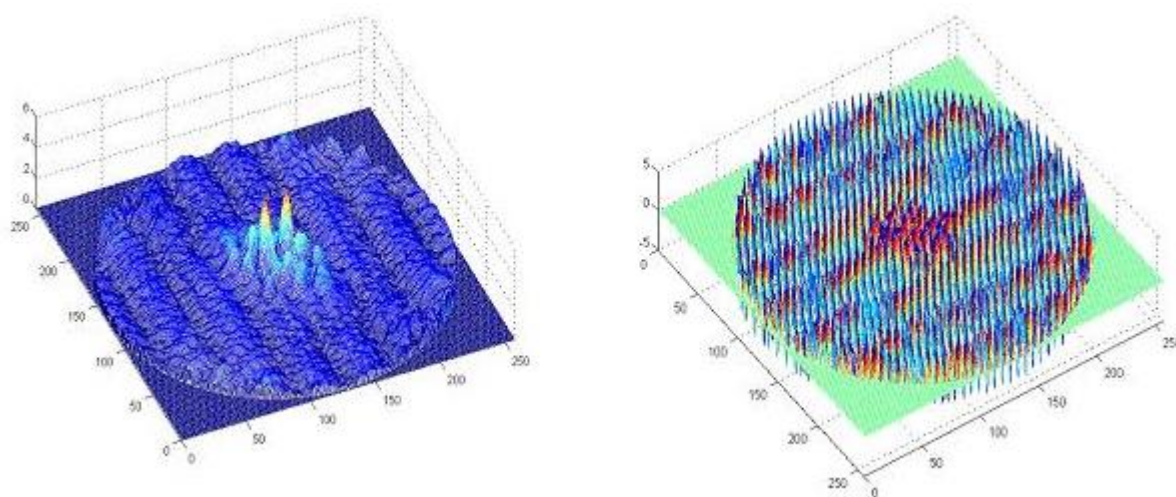


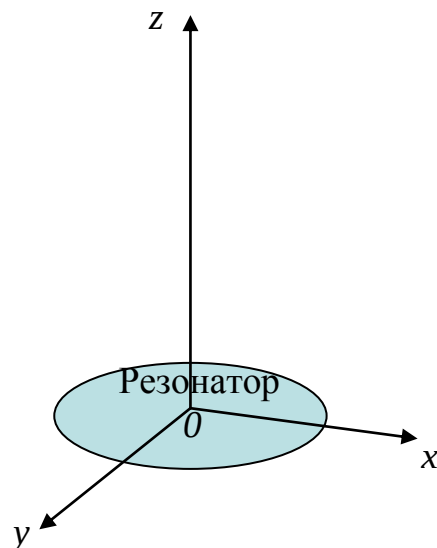
Рис. 8. Распределение спектральной плотности мощности амплитуды Ψ по поверхности пластины через время $t > t_{уст}$. Слева - модуль, справа - фаза.

Нестационарный случай, трехмерная модель.

Рассматривалась трехмерная модель:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2}\right) - aE. \quad (4)$$

От двумерной эта модель формально отличается только наличием третьей пространственной координаты z . Однако, это позволяет составить более полное представление о взаимодействии резонатора с излучением, получить пространственное распределение напряженности E .



Поверхность резонатора лежит на плоскости xOy , начало координат в центре резонатора, ось z перпендикулярна началу координат (рис 9.).

Рис. 9. Ориентация резонатора относительно системы координат

Импульсное воздействие на три противоположные точки при незаземленном центре резонатора

Результат моделирования при импульсном воздействии на три точки, лежащие под углом 120° друг от друга. (рис. 10).

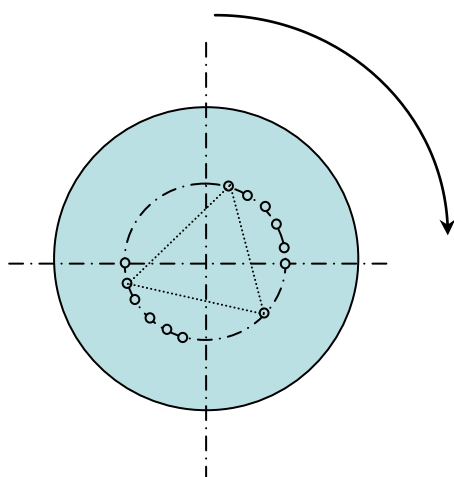


Рис. 10. Воздействие на 3 точки с незаземленным центром.

Центр матрицы не заземлен. Графики распределения напряженности электрического поля на рисунке сделаны для высот z над поверхностью резонатора от $z=0$, нижний график, до значения $z=0,02$ мм для последнего, верхнего графика. Волна затухает после высоты 0,02 мм (рис. 11).

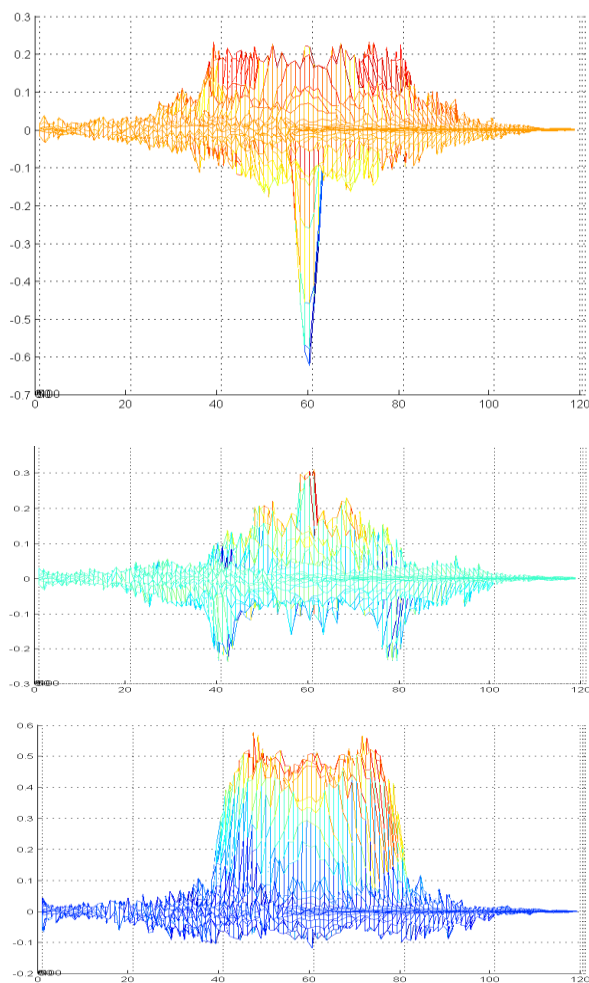


Рис.11. Напряженность электрического поля над резонатором. Развитие пространственной волны от поверхности резонатора (нижний график), вид сбоку.

Ниже приводится рисунок, также иллюстрирующий распределение напряженности по высоте, до значения высоты 0,03 мм (рис. 12).

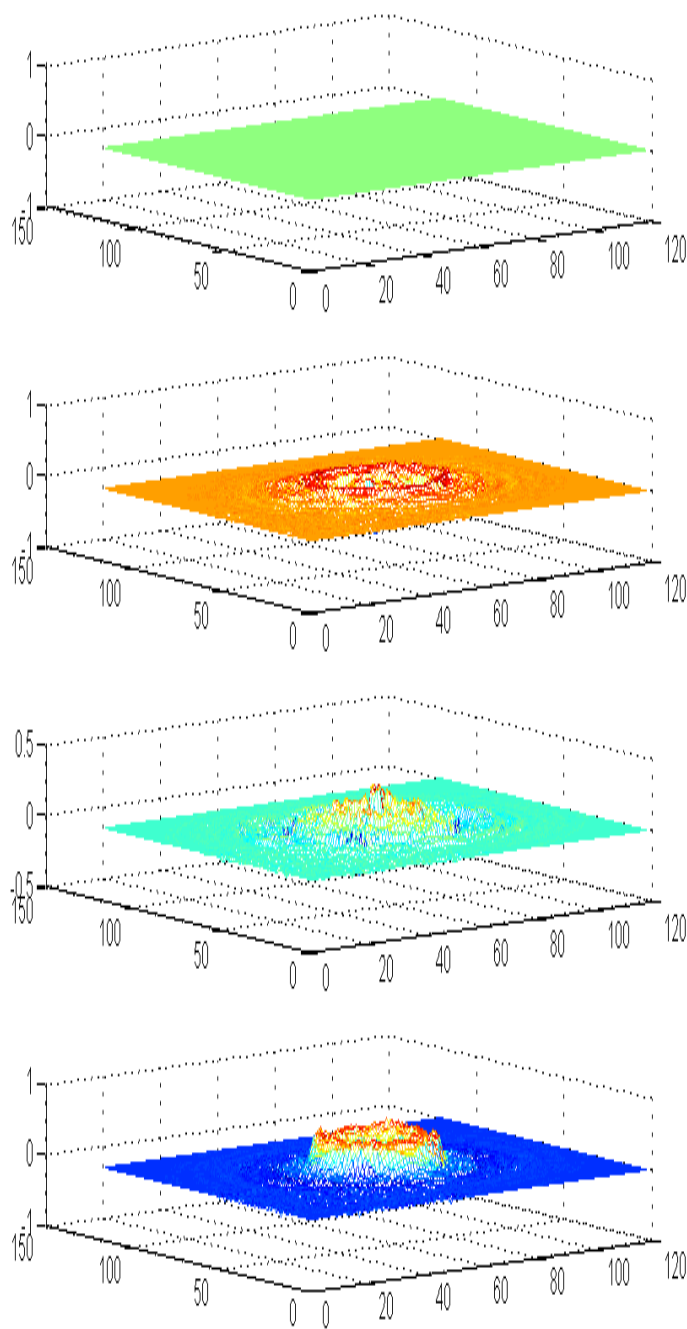


Рис. 12. Распределение напряженности по высоте, до значения высоты 0,03 мм при воздействии на 3 точки с незаземленным центром.

Импульсное воздействие на две противоположные точки при незаземленном центре резонатора

Поле действует на диаметрально противоположные точки на поверхности резонатора, лежащие на серединах радиусов, центр матрицы не заземлен, двухсторонняя схема. (рис. 13).

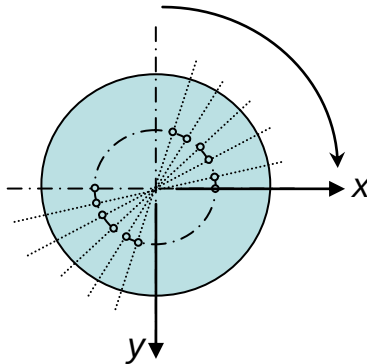


Рис. 13. Импульсное воздействие на две противоположные точки при незаземленном центре резонатора

Уравнение (4) решается численно для данного воздействия.

Один из результатов моделирования представлен на рис. 14. На рисунке видно развитие пространственной волны от поверхности резонатора.

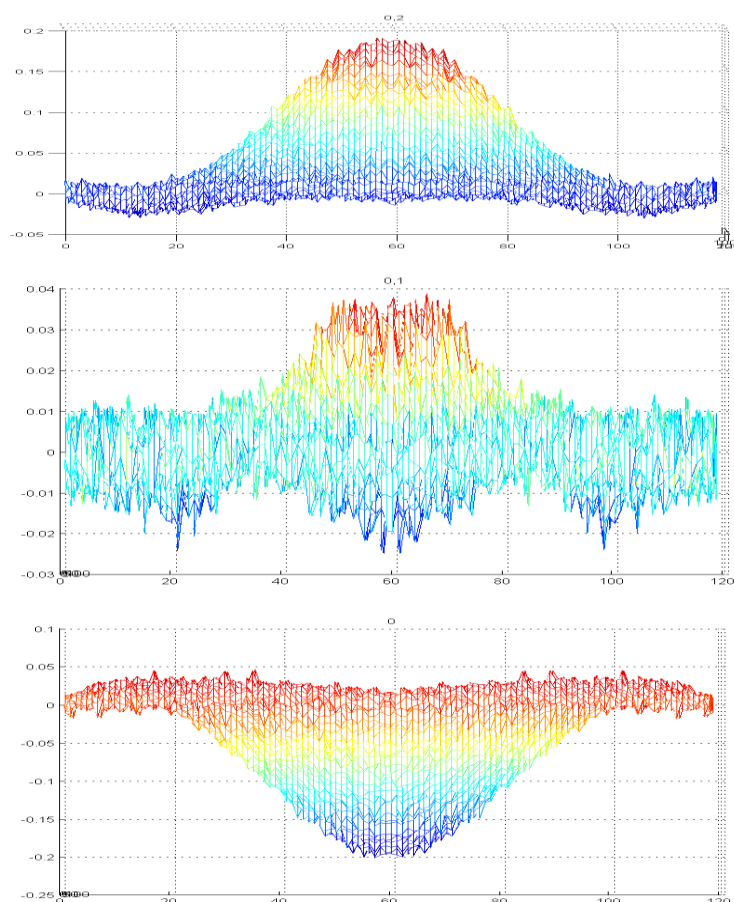


Рис. 14. Напряженность электрического поля над резонатором. Развитие пространственной волны от поверхности резонатора (нижний график), вид сбоку.

Графики распределения напряженности электрического поля на рисунке сделаны для высот z над поверхностью резонатора от $z=0$, нижний график, до значения $z=0,2$ мм для последнего, верхнего графика. Волна затухает после высоты $0,2$ мм. Ниже приводятся рисунки, иллюстрирующие напряженность в те же сечения по высоте с разных позиций (рис. 15).

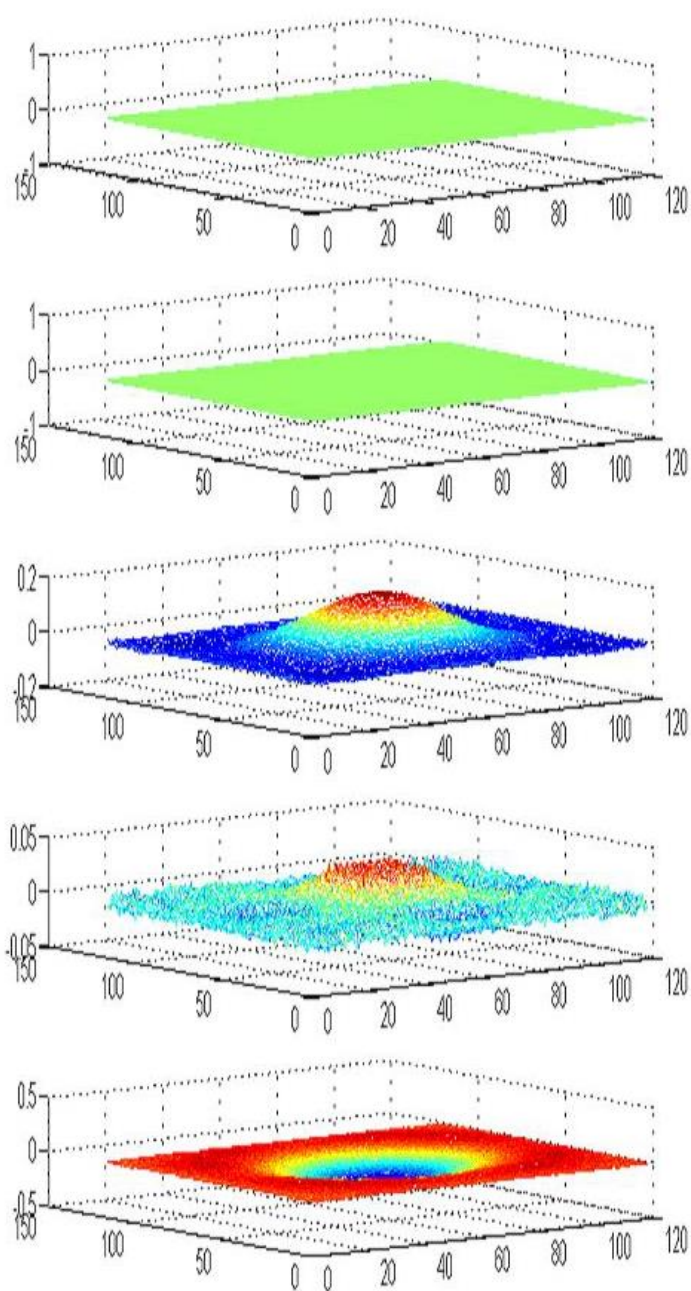


Рис. 15. Напряженность электрического поля на поверхности резонатора (нижний график $z=0$) и, далее, послойно над поверхностью: 0,1мм; 0,2мм; 0,3мм; 0,4мм; 0,5мм. То же, что и на рис. 1, другая проекция. При $z>0,2$ мм, волна затухла.

Выше координаты $z=0,2$ мм электрическое поле практически на сечениях $12\text{мм} \times 12\text{мм}$ отсутствует. Рисунок ниже показывает, что оно распространяется вширь и величина напряженности резко падает при удалении от начала координат.

Импульсное воздействие на две противоположные точки при заземленном центре резонатора, двухсторонняя схема

Исследовалось развитие электрического поля при вращении и воздействии на две противоположные точки с двух сторон резонатора. Ниже приводятся результаты расчета для установившегося режима, для вида сбоку (рис. 16).

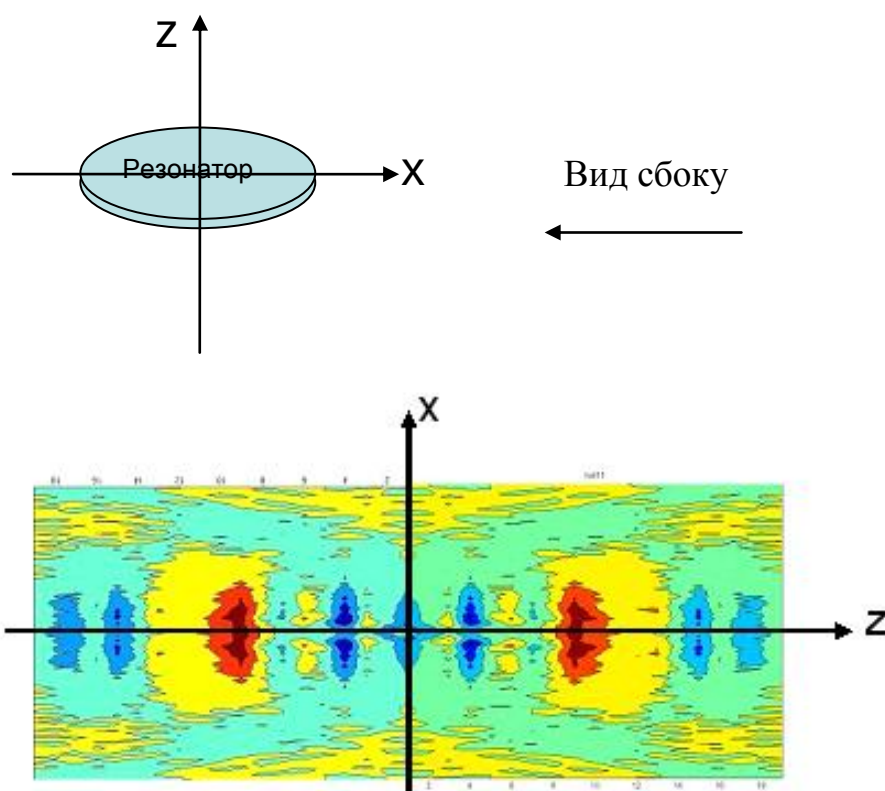


Рис. 20. Напряженность электрического поля для установившегося режима, при использовании резонатора с двухсторонним рисунком, вид сбоку.

На следующих рисунках (рис. 17 - рис. 34) тот же результат послойно, для высоты от 0 мм до 1,7 мм над поверхностью резонатора.

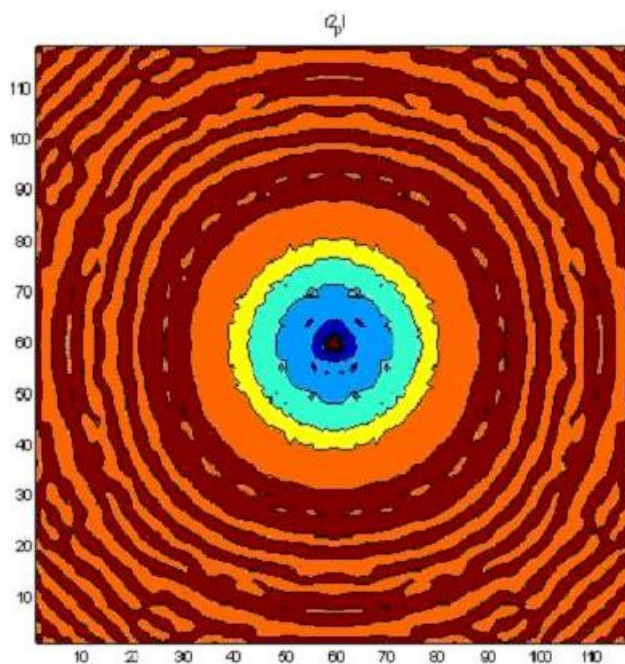


Рис. 17. Напряженность на поверхности резонатора

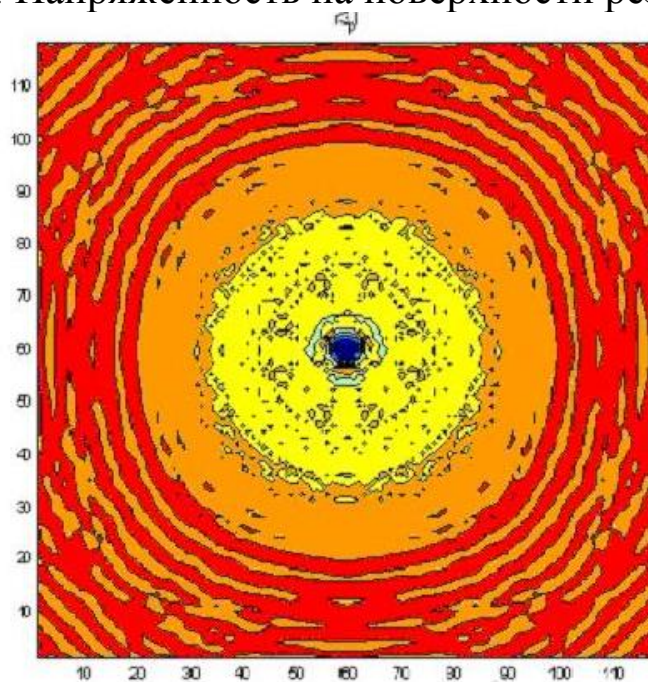


Рис. 18. Напряженность на расстоянии 0,1 мм над поверхностью резонатора

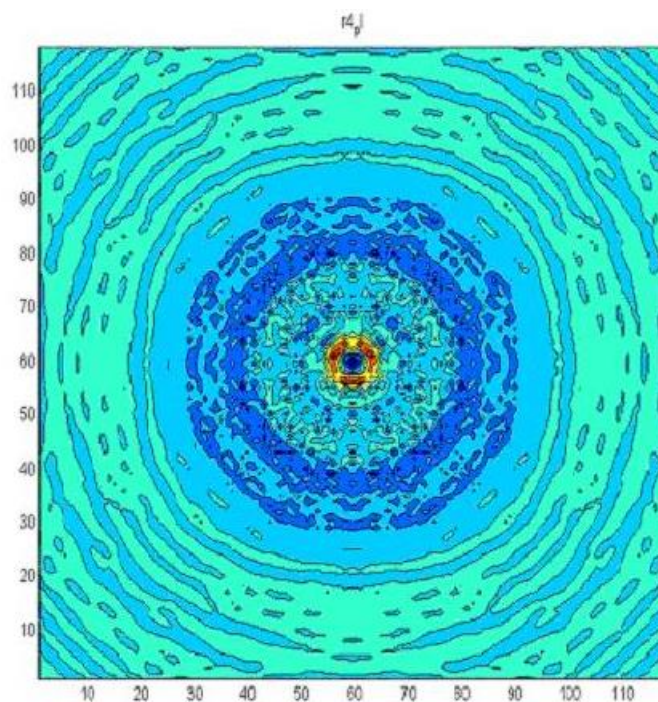


Рис. 19. Напряженность на расстоянии 0,2 мм над поверхностью резонатора

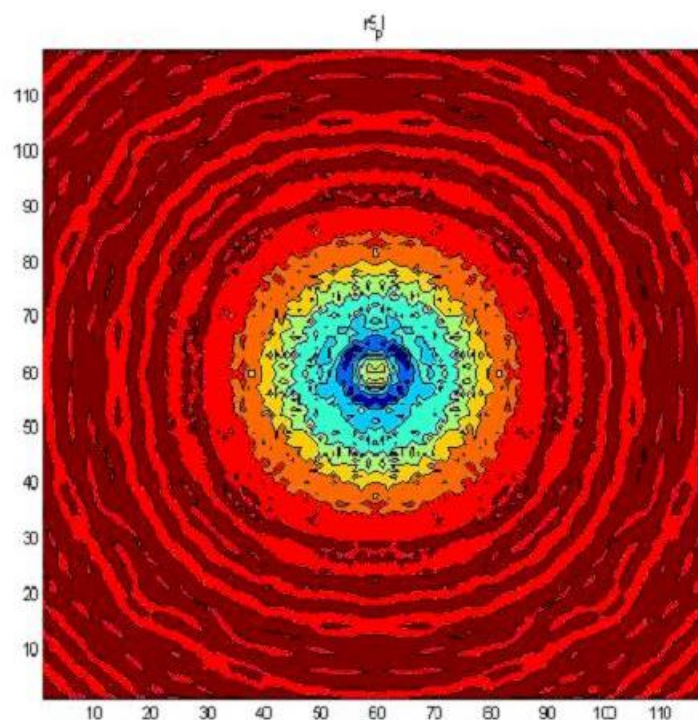


Рис. 20. Напряженность на расстоянии 0,3 мм над поверхностью резонатора

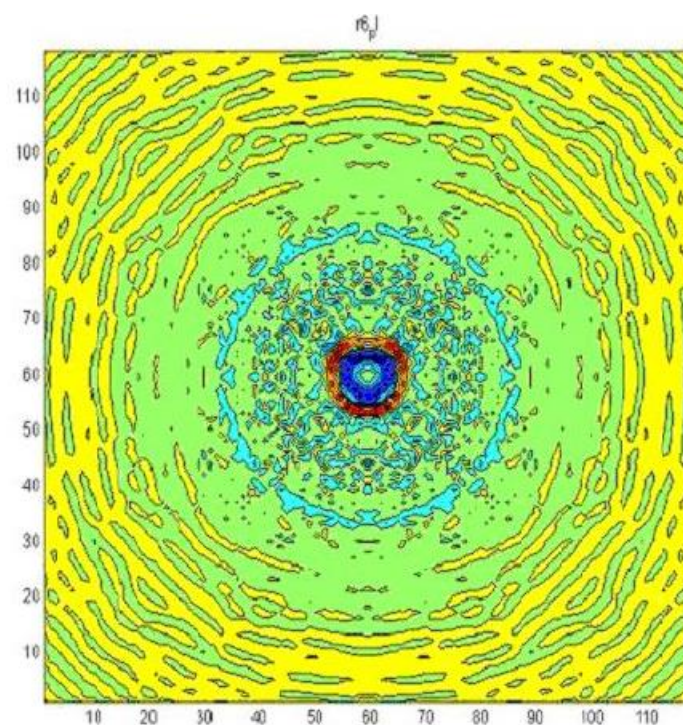


Рис. 21. Напряженность на расстоянии 0,4 мм над поверхностью резонатора

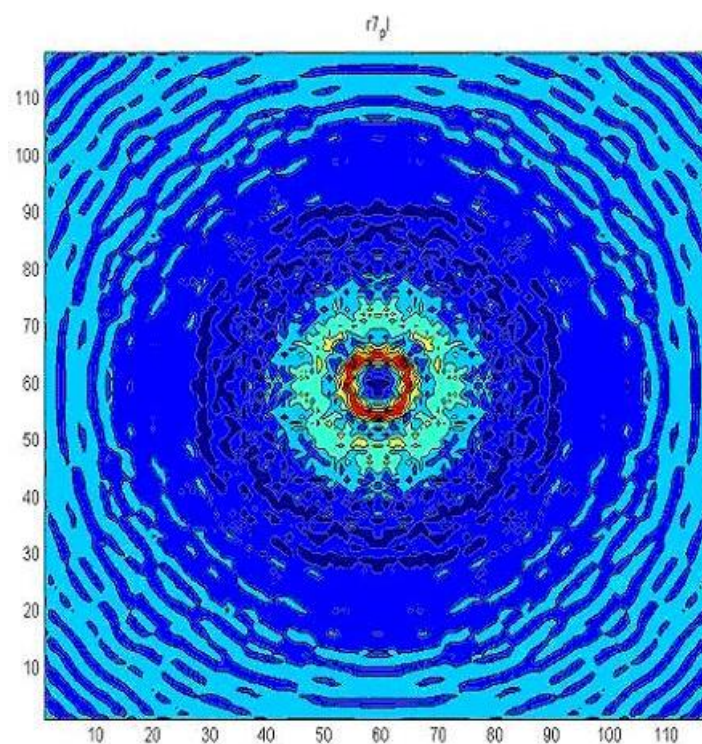


Рис. 22. Напряженность на расстоянии 0,5 мм над поверхностью резонатора

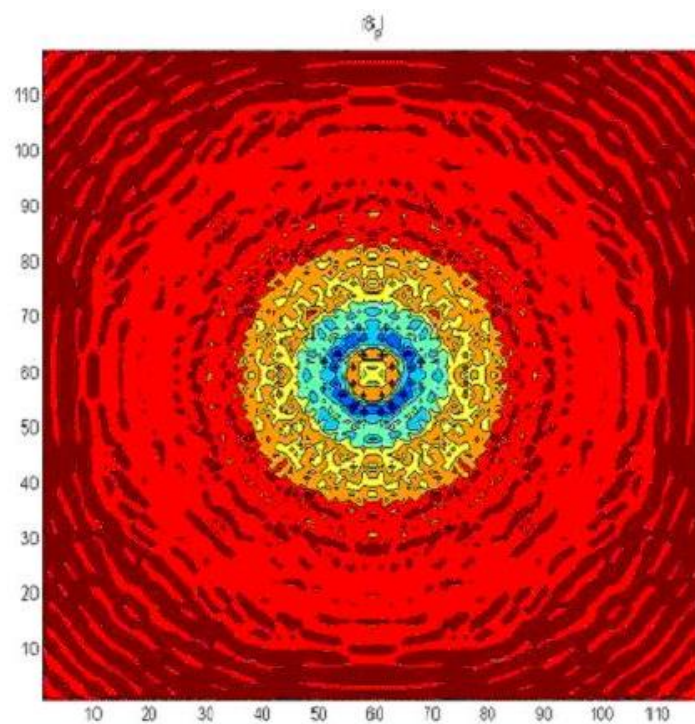


Рис. 23. Напряженность на расстоянии 0,6 мм над поверхностью резонатора

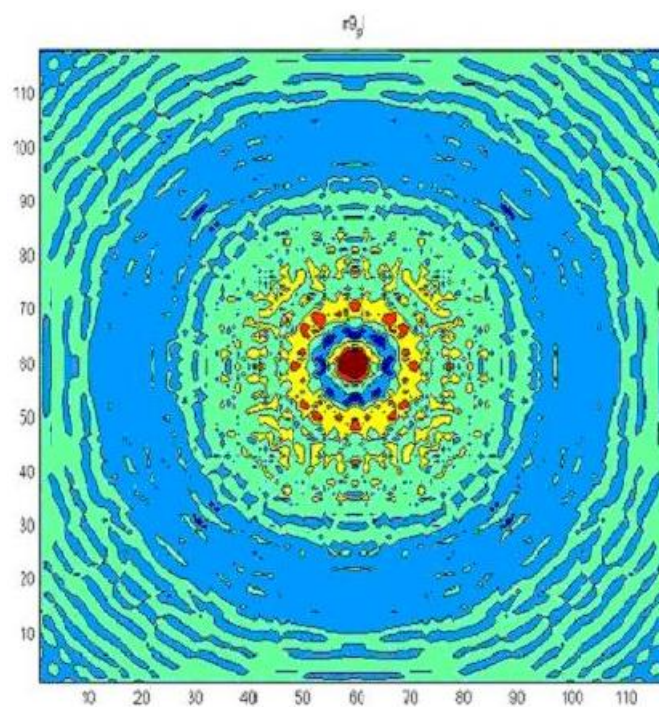


Рис. 24. Напряженность на расстоянии 0,7 мм над поверхностью резонатора

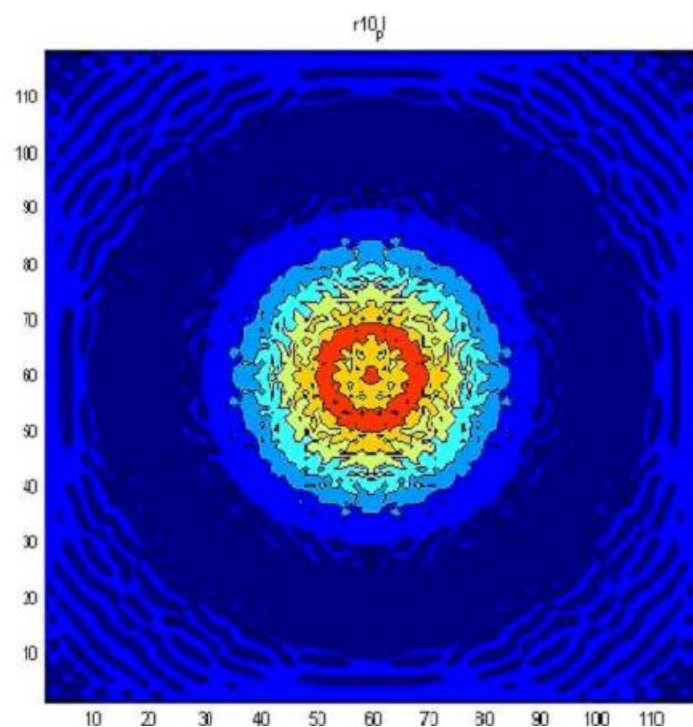


Рис. 25. Напряженность на расстоянии 0,8 мм над поверхностью резонатора

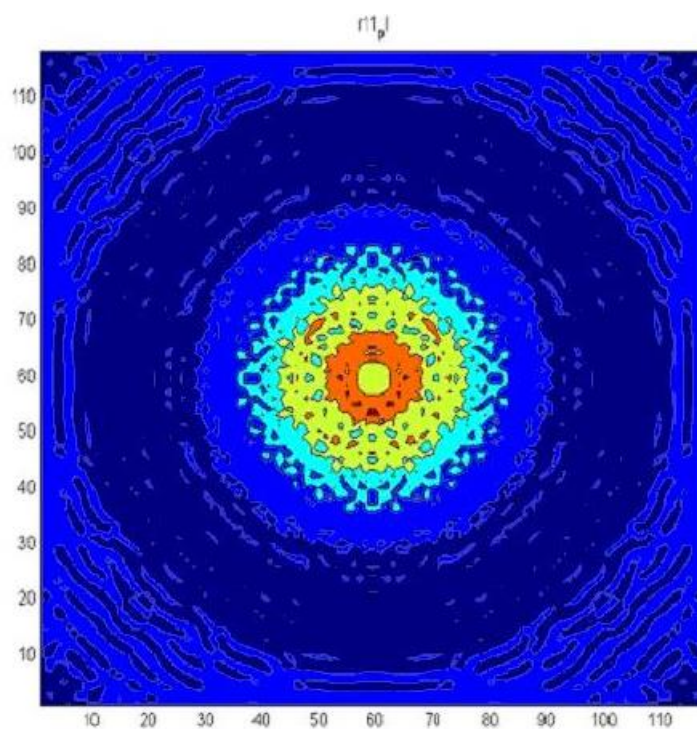


Рис. 26. Напряженность на расстоянии 0,9 мм над поверхностью резонатора

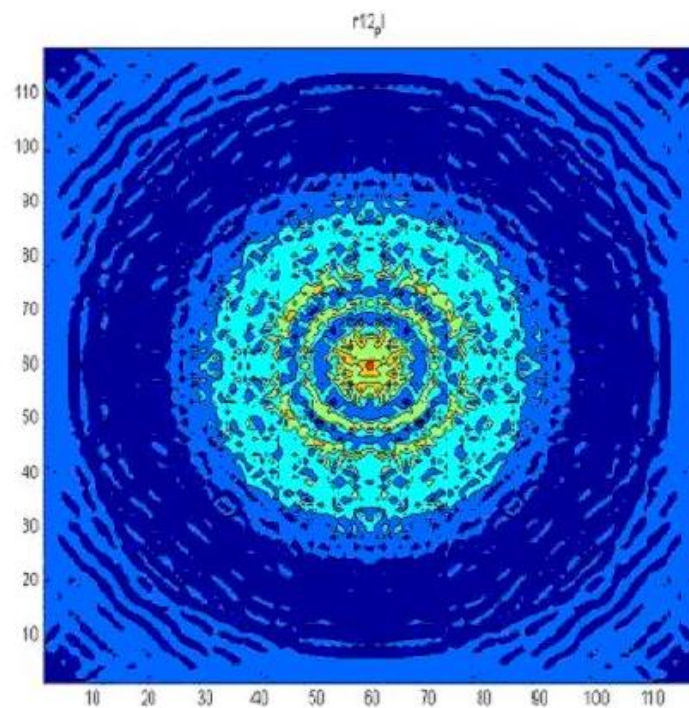


Рис. 27. Напряженность на расстоянии 1 мм над поверхностью резонатора

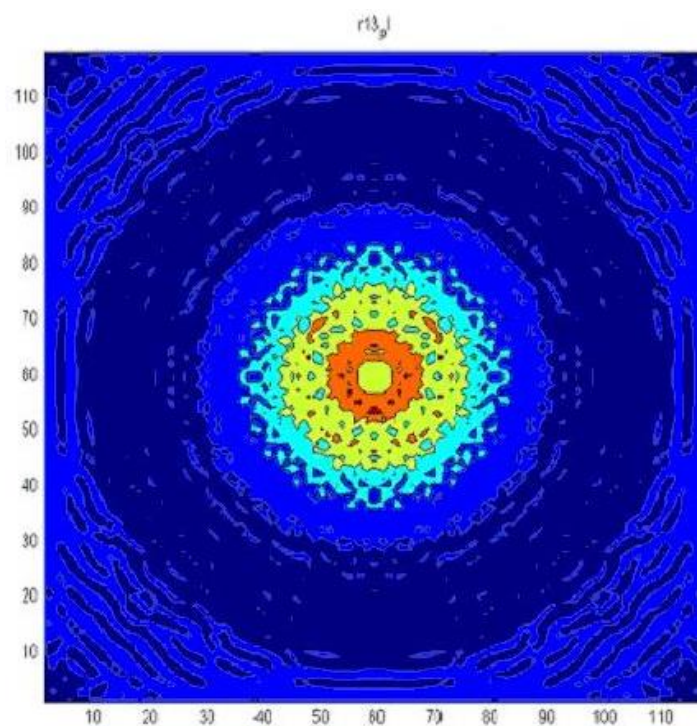


Рис. 28. Напряженность на расстоянии 1,1 мм над поверхностью резонатора

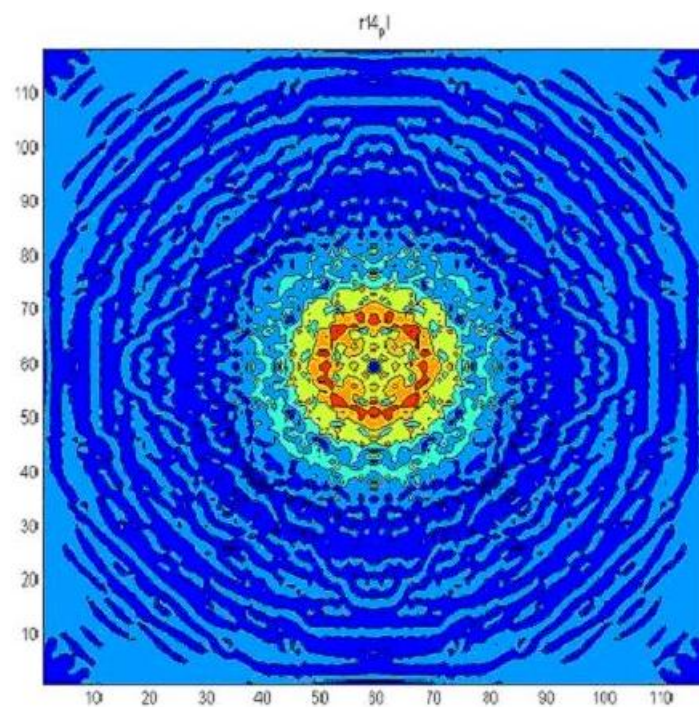


Рис. 29. Напряженность на расстоянии 1,2 мм над поверхностью резонатора

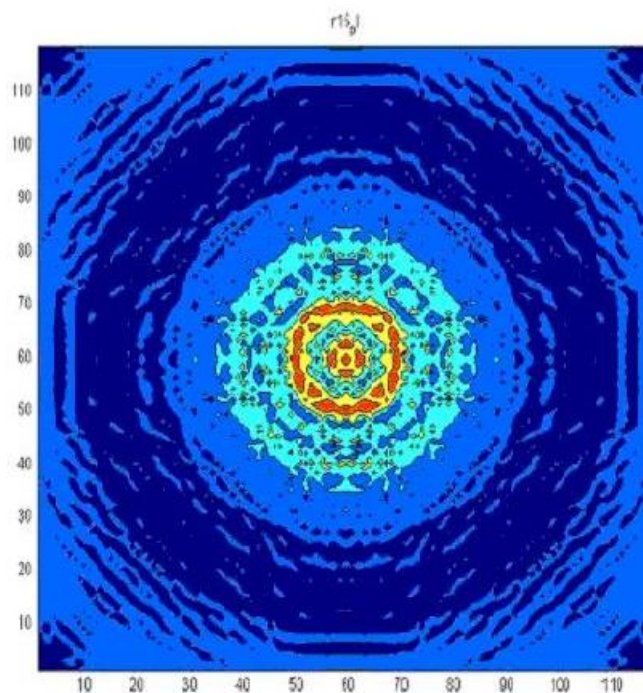


Рис. 30. Напряженность на расстоянии 1,3 мм над поверхностью резонатора

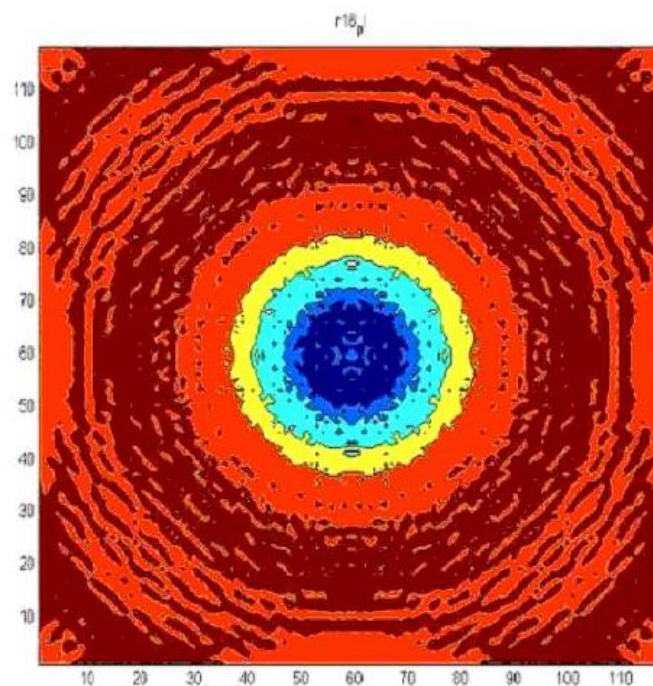


Рис. 31. Напряженность на расстоянии 1,4 мм над поверхностью резонатора

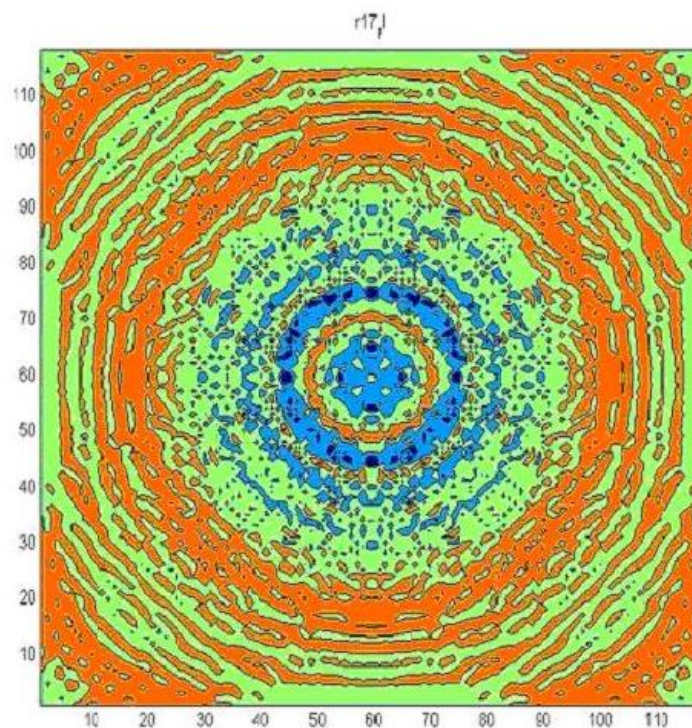


Рис. 32. Напряженность на расстоянии 1,5 мм над поверхностью резонатора

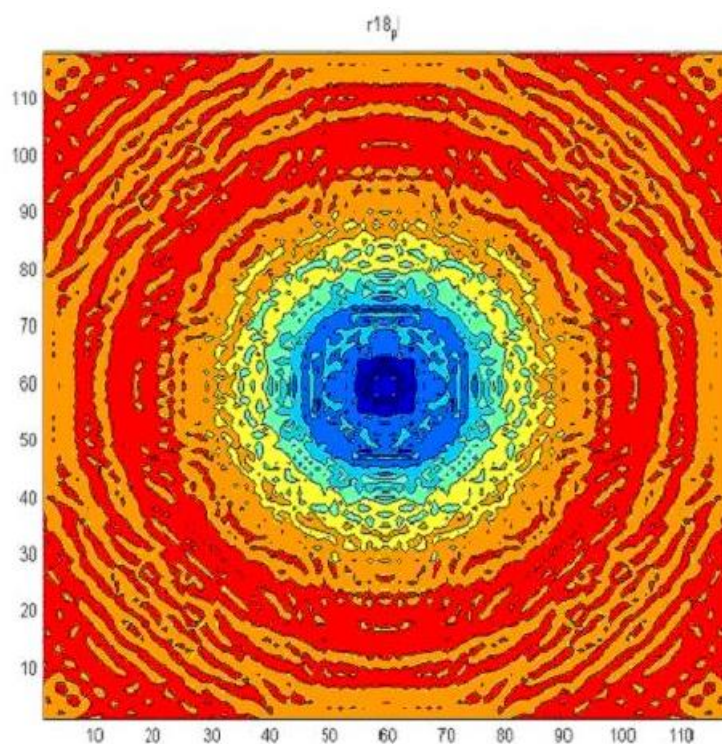


Рис. 33. Напряженность на расстоянии 1,6 мм над поверхностью резонатора

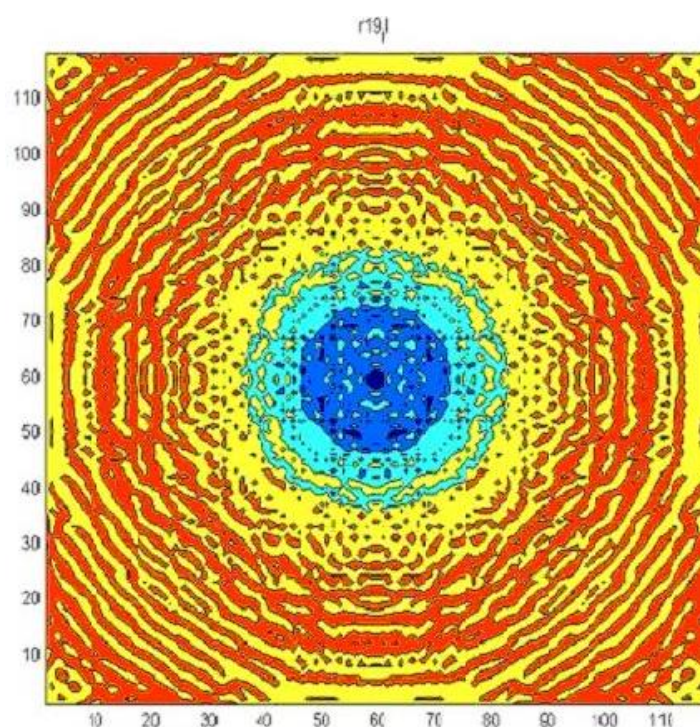


Рис. 34. Напряженность на расстоянии 1,7 мм над поверхностью резонатора

На следующем рисунке приведена динамика изменения напряженности над поверхностью резонатора со временем.

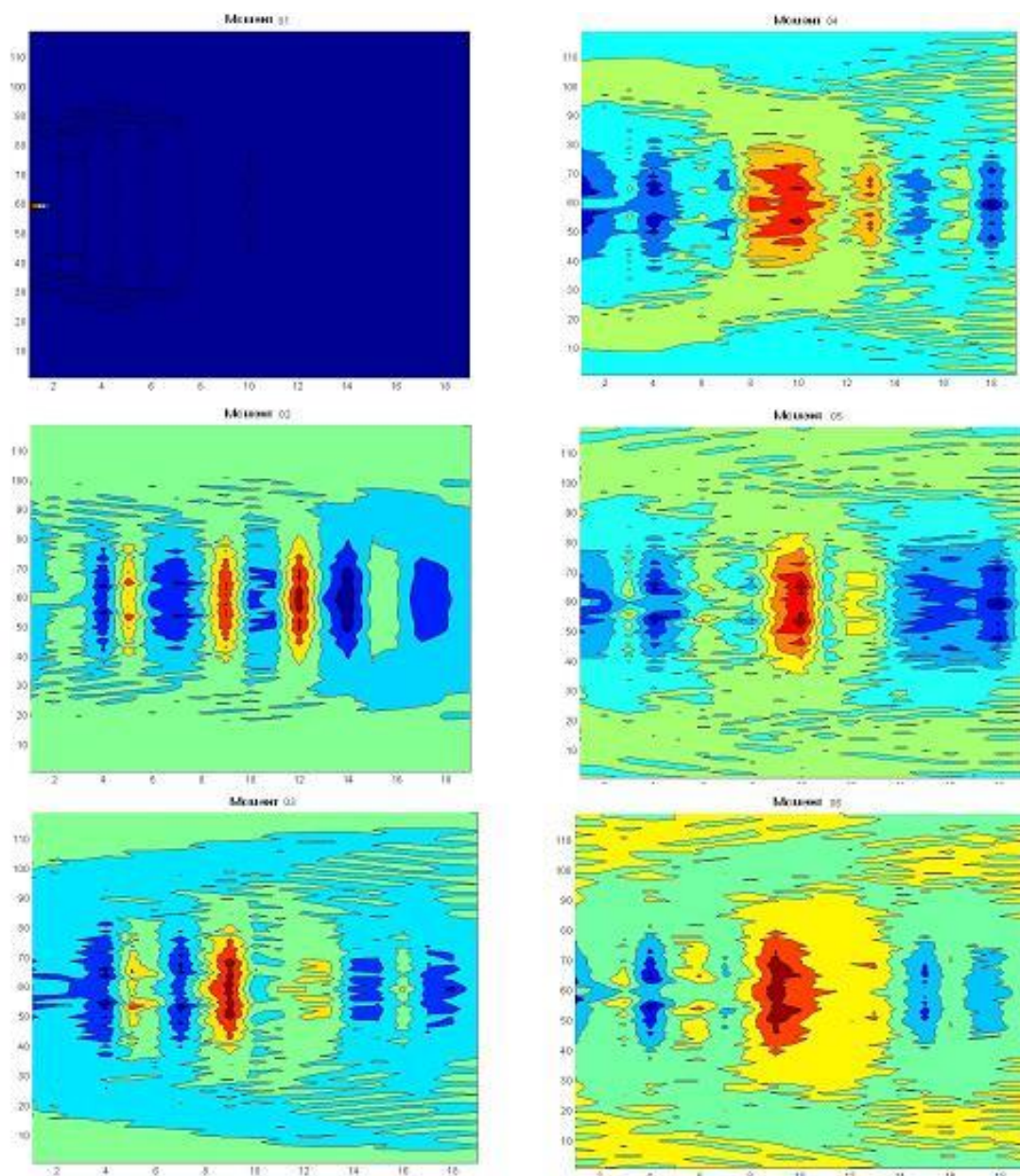


Рис. 39. Динамика изменения напряженности над поверхностью резонатора со временем. Вверху слева момент «0». Слева в центре момент «1». Внизу слева момент «2». Вверху справа момент «3». Справа в центре момент «4». Справа внизу момент «5».

Литература:

1. Серов И.Н., Лукьянов Г.Н., Копыльцов А.В. Безопасность электромагнитного излучения при его взаимодействии с самоафинной поверхностью. IV Санкт-Петербургская межрегиональная конференция «Информационная безопасность регионов России (ИББР-2005)», СПб, 14-16 июня 2005 г.
2. Серов И.Н. Устройство для структурирования электромагнитного поля. Патент РФ № 2249862
3. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Университетская книга, 2005.
4. Серов И., Жабров В., Лукьянов Г., Марголин В., Солтовская И., Тупик В., Потехин М. Исследование воздействия фрактальных структур на процессы образования наноразмерных пленок. Тяжелое машиностроение, 2005, №11, с. 19-21

Данные об авторах:

СЕРОВ Игорь Николаевич, президент фонда «АЙРЭС», тел. 596-35-51

ЛУКЬЯНОВ Геннадий Николаевич, декан инженерно-физического факультета СПбГУИТМО,
д.тех. наук, доцент, тел. 571-64-50, e-mail: gnluk@rambler.ru.

КОПЫЛЬЦОВ Александр Васильевич, с.н.с. лаб. ВС и ПЗИ
СПИИРАН, д. тех. наук, проф.,
тел. 544-39-97, 312-86-24, e-mail: KOPYL2001@MAIL.RU