

ИСЛАМОВ ИСЛАМ ДЖАМАЛ ОГЛЫ

# МЕТАМАТЕРИАЛЫ В АНТЕННОЙ ТЕХНИКЕ

ИПА РАН 26.03.2014

# Содержание

2

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

# Введение

3

- **1967 г. Виктор Георгиевич Веселаго** описал электромагнитные свойства материалов с отрицательными  $\epsilon$  и  $\mu$

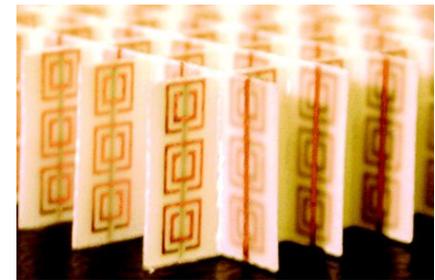
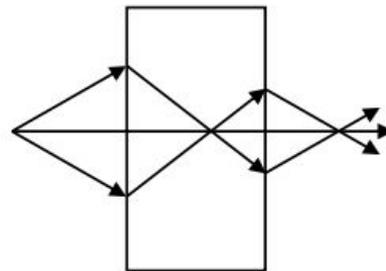
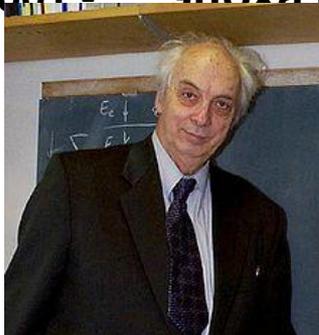
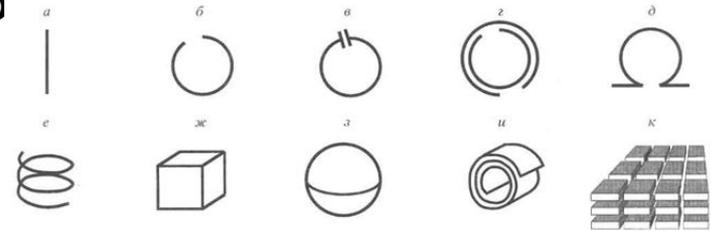
- **90е годы** – исследования КОМПОЗИТОВ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ:

- **John Pendry, Phys. Rev. Lett. 2000** – возможность существования субволновой

линзы на основе отрицательного закона преломления

- **David Smith, Science, 2001** – первое экспериментальное подтверждение существования отрицательного закона преломления

- **2001** – эпоха метаматериалов

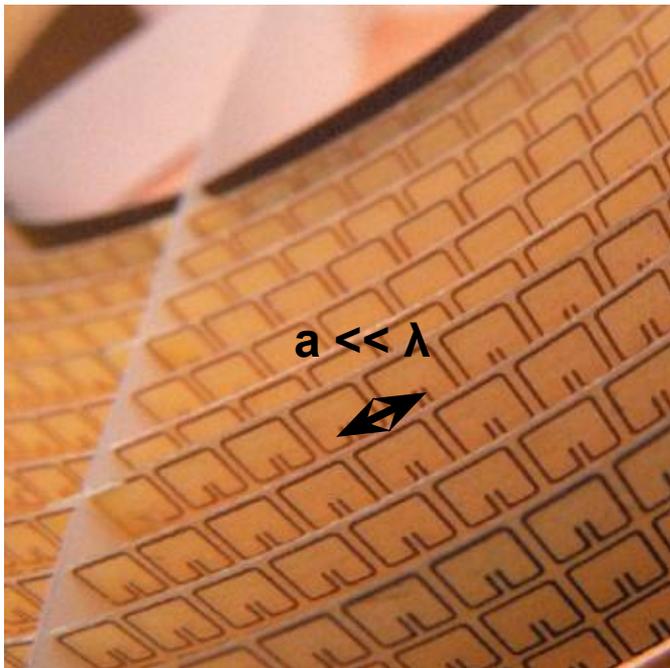


Метаматериалы в антенной технике

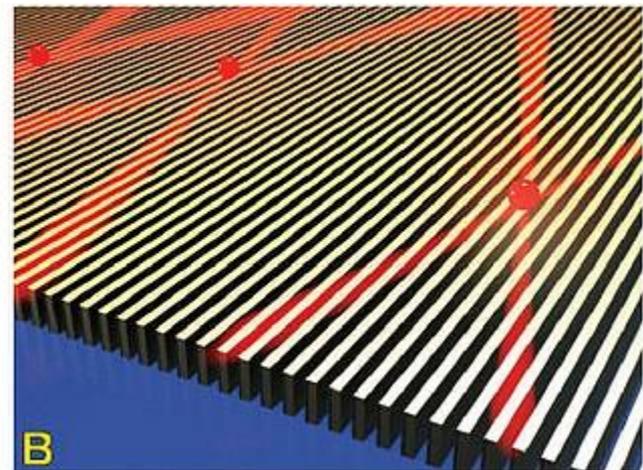
# Введение

4

Метаматериал – композитный материал из искусственных частиц  
с электромагнитными свойствами,  
не присущими естественным материалам  
Поле «не различает» дискретности частиц



Метаповерхность – плоский  
аналог метаматериала



Метаматериалы в антенной технике

# Основные типы антенн

5

## Слабой

направленности ( $< 10$  dBi):

Диполи, рамки, микрополосковые, квадрифиллярные и т.д.

**Применение:**  
мобильная связь, передача данных,



## Средней

направленности:  
( $10..20$  dBi)

Рупоры, спиральные, широкополосные антенны типа Вивальди и др.

**Применение:** базовые станции, измерения,



гели

**Остронаправленные:**  
( $>20$  dBi)

Зеркальные, линзовые, антенные решетки.

**Применение:**  
космические исследования и связь



- Введение
- **Отражательные решетки**
- Прходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

# Отражательные решетки

7

## Параболические антенны:

Простые методы анализа и синтеза  
Массивные, требуют специальной  
формы отражателей, ограничены  
диапазон и скорость сканирования



## Антенные решетки:

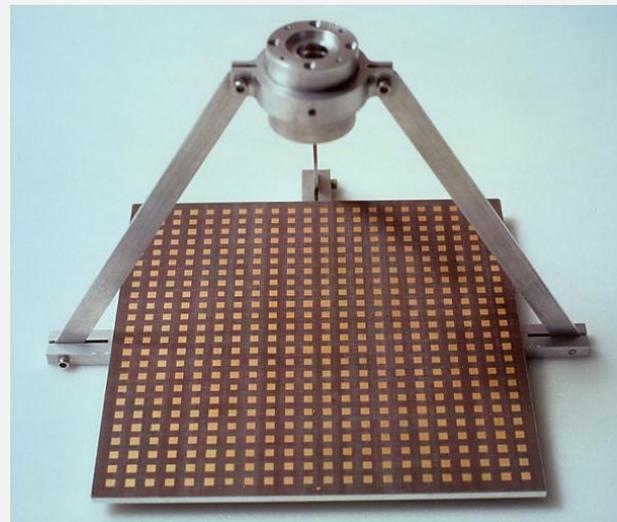
Планарные, быстрое управление  
лучом

Сложность разработки,  
потери в цепи питания элементов



## Отражательные решетки – новый тип антенн

- Планарные
- Малый вес
- Множество функций
- Интеграция с цепью управления



# Отражательные решетки

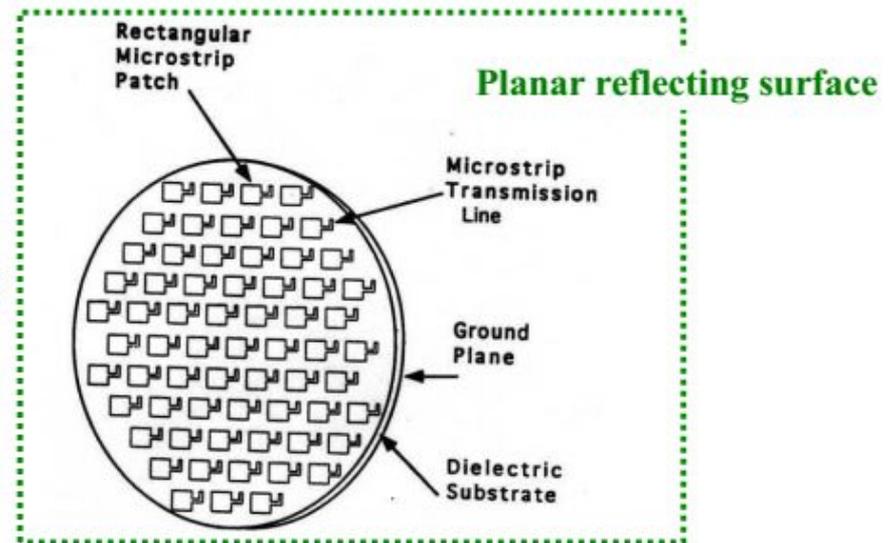
8

Первая – ОР –  
волноводная:



Berry, D. et al. The reflectarray antenna,  
IEEE TAP, 1963

Действительно планарной ОР  
делают элементы в виде  
микростриповых антенн –  
**Печатное исполнение**

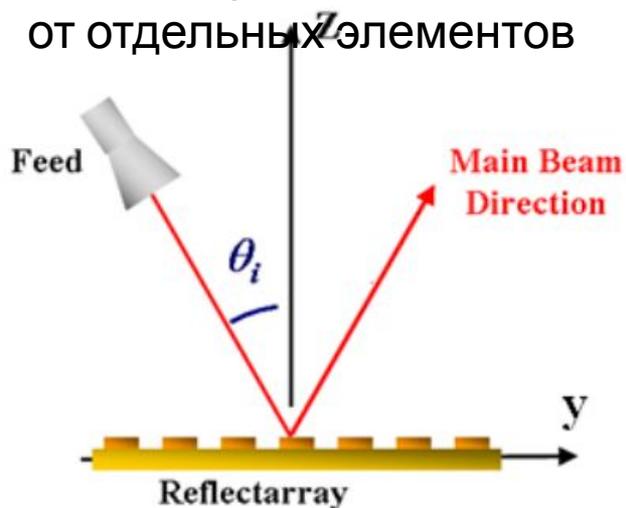


R. E. Munson and H. Haddad,  
U.S. patent 4,684,952, August 1987.

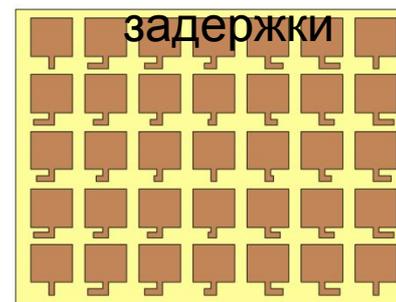
# Отражательные решетки

9

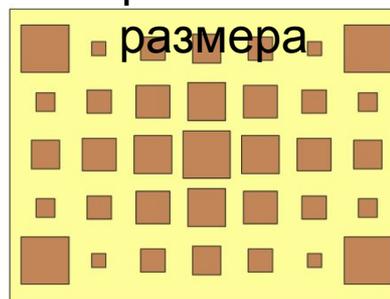
Необходимо сформировать плоский фронт отраженной волны путем регулировки фазы отражения от отдельных элементов



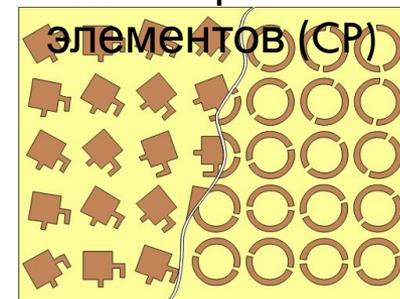
**Методы фазировки:**  
Нагрузка – линия



За счет переменного размера



За счет поворота элементов (CP)



# Отражательные решетки

10

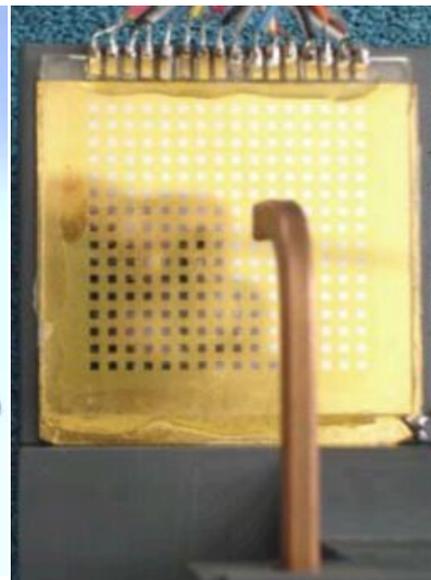
## Примеры реализации отражательных решеток:

Двухчастотная ОР, 3м  
Jet Propulsion Laboratory  
California Institute of  
Technology

Интеграция солнечной  
батареи и ОР для  
космоса  
NASA

ОР на 77 ГГц –  
многослойная  
керамическая плата

Антенный пост  
РЛО С-300

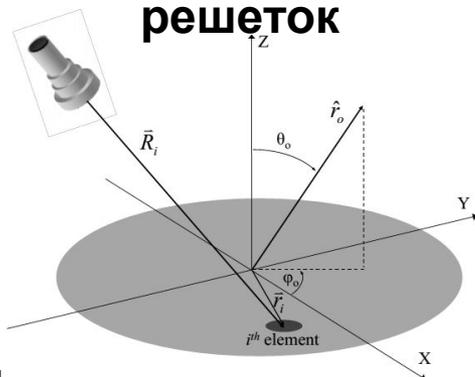


Метаматериалы в антенной технике

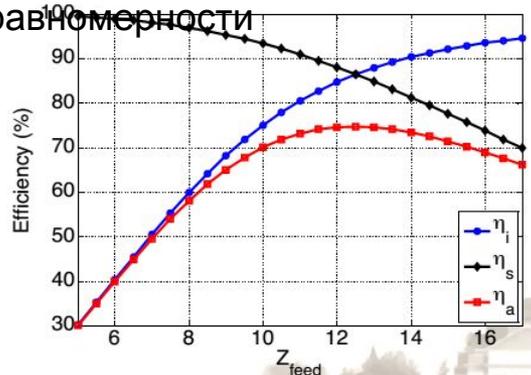
# Отражательные решетки

11

## Разработка отражательных решеток



$\eta_s$  - КПД  
 $\eta_i$  - КПД  
неравномерности



## Критерии:

- Диаграмма направленности
- Направление луча
- Коэффициент усиления
- КПД
- Полоса частот
- Кросс-поляризация

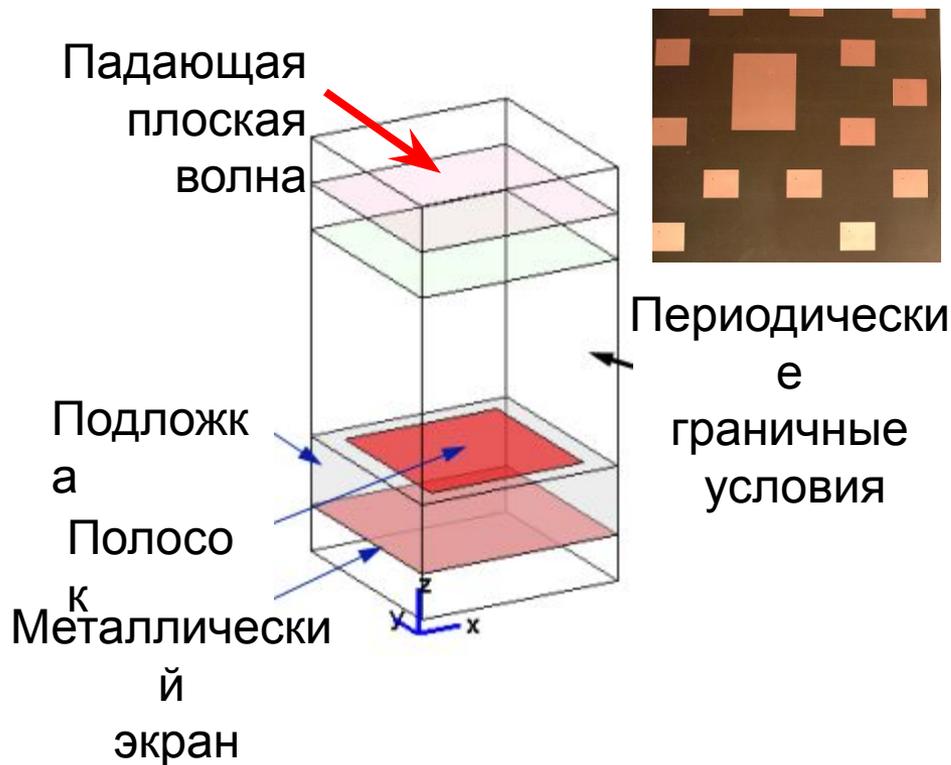
## Параметры разработки:

- Апертура (диаметр, форма)
- Положение облучателя (фок.расст.)
- ДН облучателя
- Тип элемента: МП, кольцо, диполь.
- Подложка (толщина, диэл.прон.)
- Метод фазировки (размер, поворот, линии задержки)

# Отражательные решетки

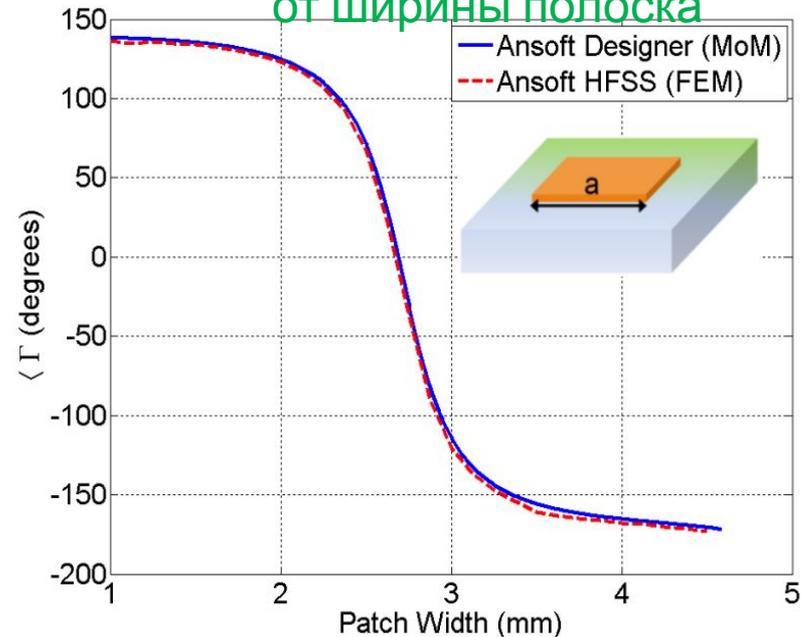
12

Разработка отражательных решеток – подбор параметров одиночного элемента



HFSS  
CST  
FEKO

Зависимость фазы коэффициента отражения от ширины полоска

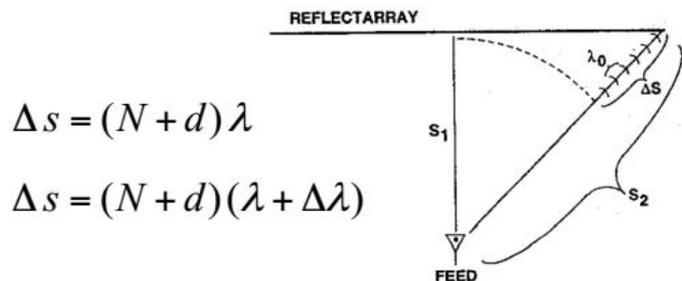


# Отражательные решетки

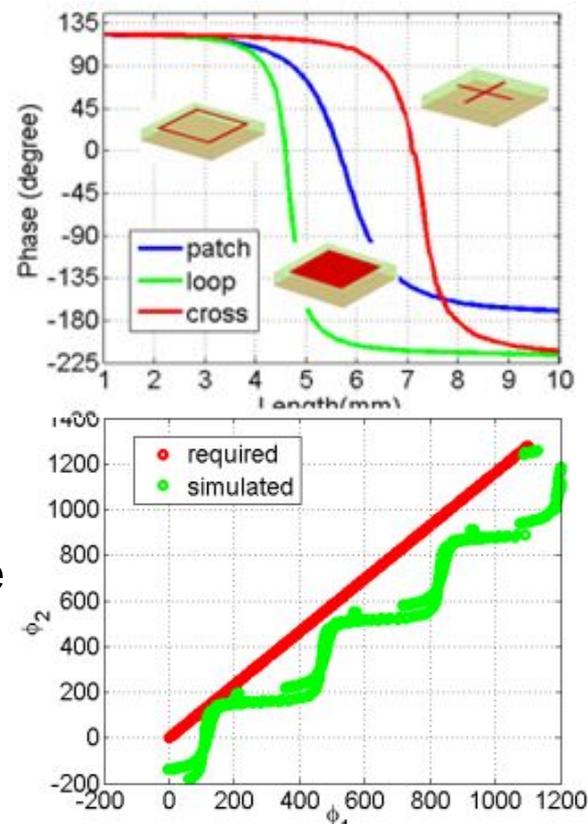
13

## Частотные свойства

- Диапазон частот – принципиально узкий
- Ограничивается двумя факторами:
  1. Полоса элемента (микростриповый элемент имеет полосу 3-5% - резонанс)
  2. Пространственная разность фаз – частотно зависящая (8-16%)



Полоса  
элемент  
а:



Широкополосное  
обеспечение  
фазы:

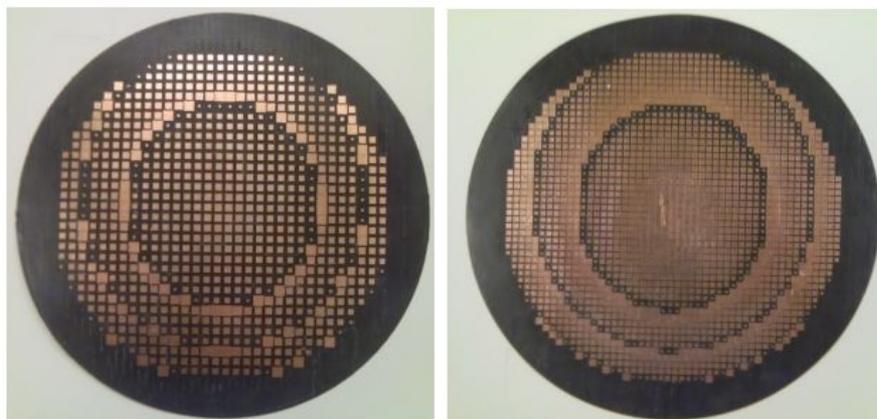
# Отражательные решетки

14

Фазовая ошибка, связанная с разностью фаз соседних элементов – падает с увеличением плотности решетки

$\lambda/2$ , 848 эл.

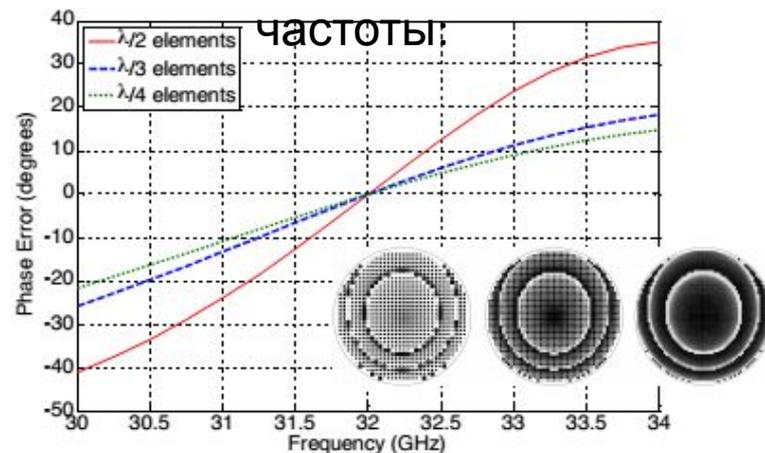
$\lambda/3$ , 1941 эл.



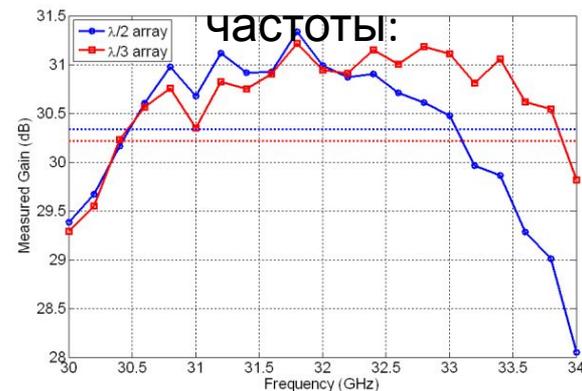
$D = 6.275$  дюйма =  $17\lambda$  @ 32 ГГц / Rogers 5880

P. Nayeri et al. PIER C, 2011

Фазовая ошибка от



Зависимость КУ от



# Отражательные решетки

15

Отражательные решетки могут иметь несколько частотных полос

- Для этого применяются вложенные резонансные элементы сразу нескольких размеров

1. Ка-диапазон (32 ГГц):

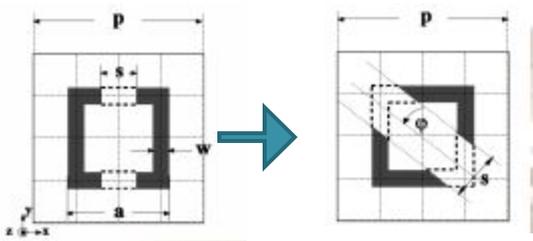
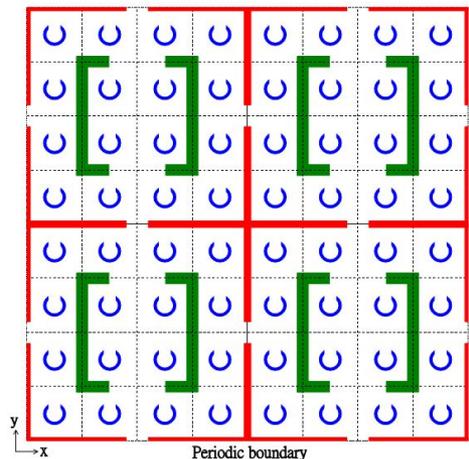
Кольцевой резонатор – поворот элемента

2. С-диапазон (7.1 ГГц):

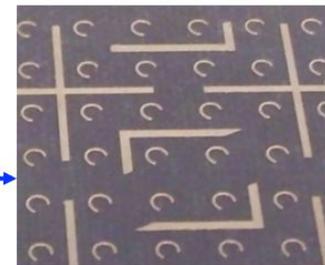
Крест-диполь – настройка размером эл-та

3. X-диапазон (8.4 ГГц):

Разомкнутая квадратная рамка – настройка положением щелей



0.566 м: 692 диполей, 685 квадратов, 10760 колец



A. Yu et al. IEEE APSURSI, 2010

# Отражательные решетки

16

## Многочувые отражательные решетки

- Способы одновременного синтеза нескольких максимумов ДН:

### Суперпозиция АФР:

Поле в апертуре представляется в виде:

$$E_R(x_i, y_i) = A_i^{Feed}(x_i, y_i) \cdot \sum_{n=1}^N e^{j\phi_{n,i}(x_i, y_i)}$$

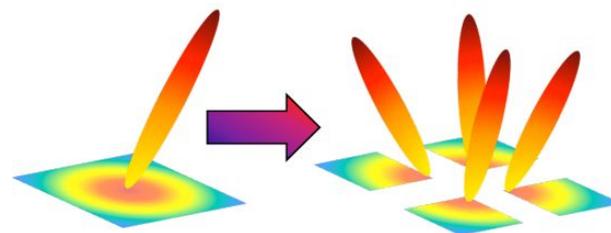
### Недостатки:

- Амплитудная ошибка:
- Ниже КУ
- Выше УБЛ

$$\left| \sum_{n=1}^N e^{j\phi_{n(i)}(x_i, y_i)} \right| \neq 1$$

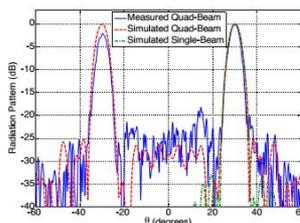
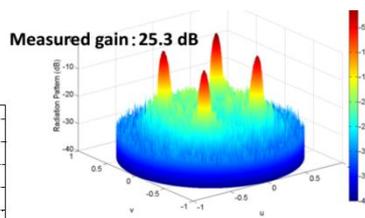
### Геометрический способ:

Решетка делится на N подрешеток, каждая из которых создает луч в заданном направлении

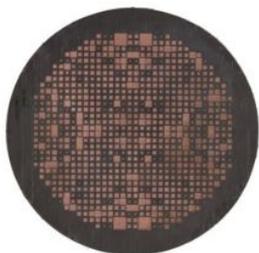


### Недостатки:

- Подрешетки имеют меньшую апертуру
- Ниже КУ
- Выше УБЛ



метаматериалы в антенной технике



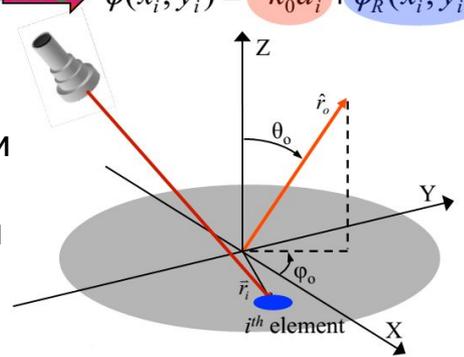
# Отражательные решетки

17

## Многолучевые отражательные решетки с управлением лучом

Необходимо изменять фазовое распределение

$$\phi(x_i, y_i) = -k_0 d_i + \phi_R(x_i, y_i)$$



### 1. Механическое сканирование:

По аналогии с зеркальными антеннами перемещение облучателя приводит к повороту диаграммы, однако при этом снижается КУ и растет УБЛ

### 2. Электронное сканирование:

Фаза отклика каждого элемента контролируется управляющим элементом. Например: ЦФВ

### 3. Гибридные способы:

Увеличить диапазон перестройки, снизить стоимость решетки

Метаматериалы в антенной технике

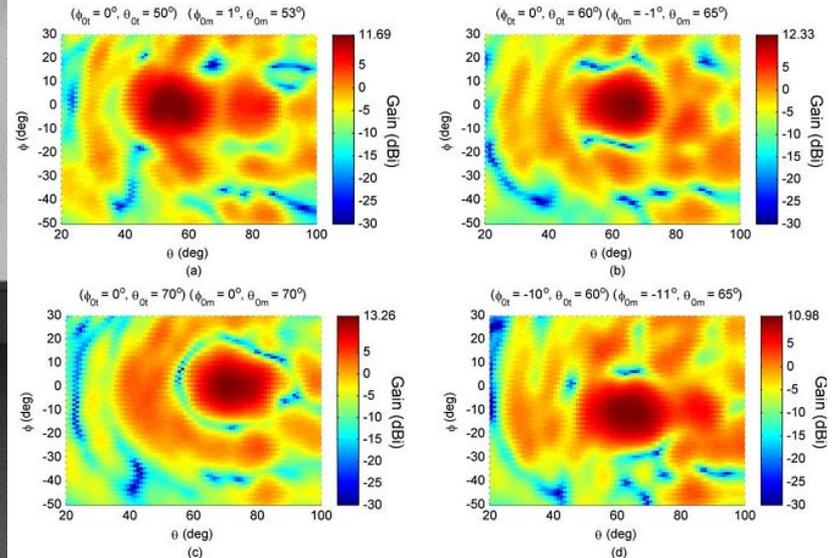
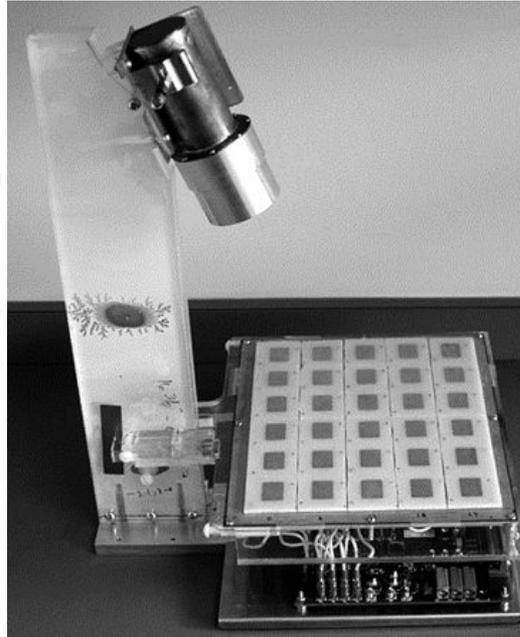
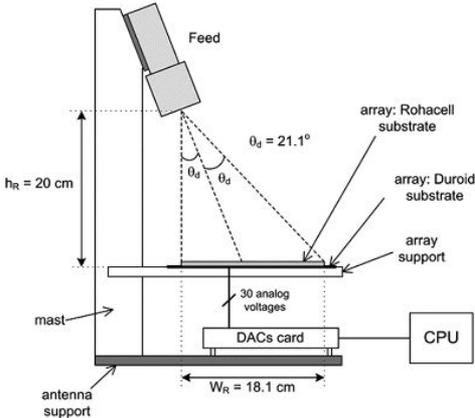
# Отражательные решетки

18

## Многолучевые отражательные решетки с управлением лучом

- Контроль фазы отклика отдельных элементов позволяет управлять лучом

ДН:



Mathieu Riel et al.,  
IEEE TAP, 2007

# Отражательные решетки

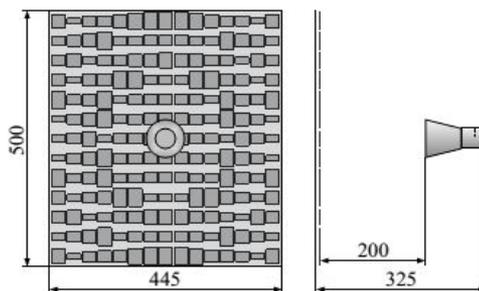
19

**Еще примеры отражательных решеток**  
Разработаны при участии Михаила Ивановича Сугака (ЛЭТИ)

ОР – замена  
бытовой  
спутниковой  
антенны

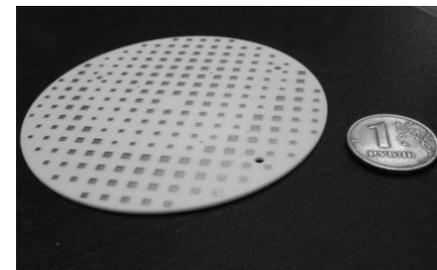


Эскиз и Макет ОР на 5.45  
ГГц



С.В. Поленга, М.И. Сугак. Журнал Сиб.Фед.ун-та, 2011

Прототип ОР ММ-  
диапазона:



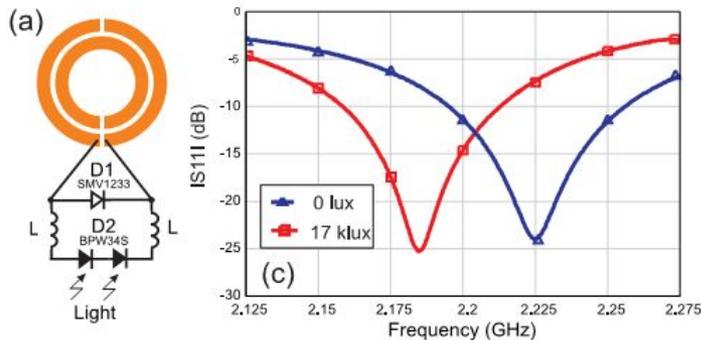
Метаматериалы в антенной технике

# Отражательные решетки

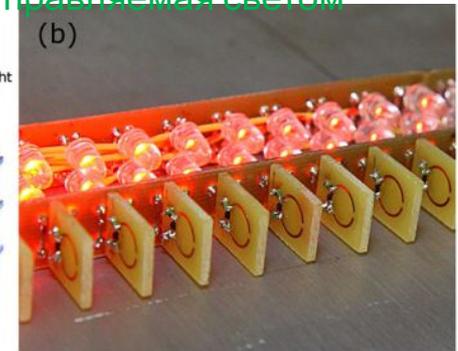
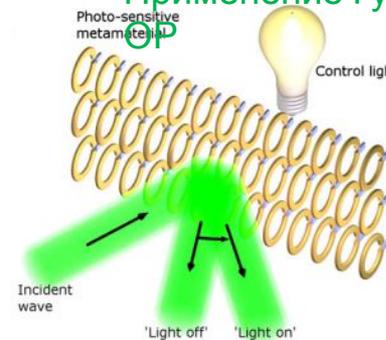
20

## Отражательные решетки можно контролировать внешним ИСТОЧНИКОМ СВЕТА:

Каждый резонансный элемент нагружен на варикап и фотоэлемент, в результате чего его фазу можно перестраивать, регулируя световой ПОТОК



Пример:  
фокусировка/дефокусировка/  
изменение направления луча  
Применение : управляемая светом



<http://phoi.ifmo.ru/metamaterials/>

I. Shadrivov, P. Kapitanova,  
S. Maslovski, and Y. Kivshar PRL, 2012

Метаматериалы в антенной технике

# Отражательные решетки

21

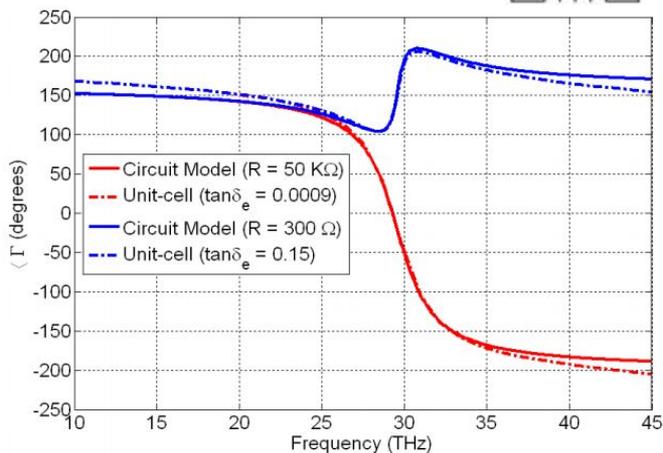
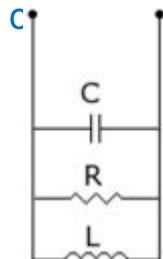
## Решетки ММ и ТГц

С повышением частоты растут потери в резонансных элементах, что не позволяет настраивать их фазу

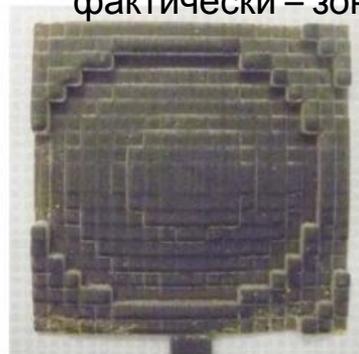
Резонансный МП-элемент



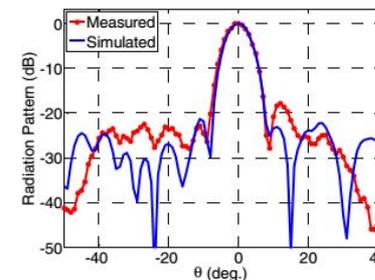
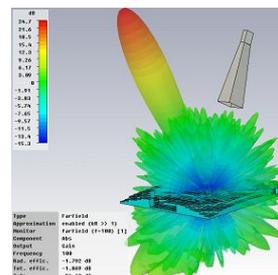
Экв.  
C



Диэлектрическая нерезонансная ОР на 100 ГГц – фактически – зонированная линза



Payam Nayeri et al.,  
IEEE AP-S, 2013



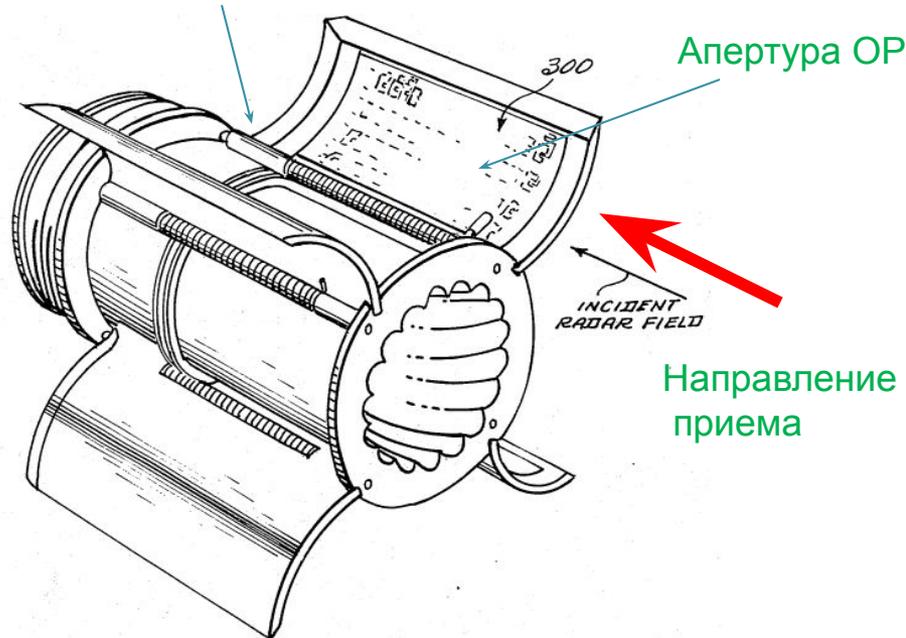
Метаматериалы в антенной технике

# Отражательные решетки

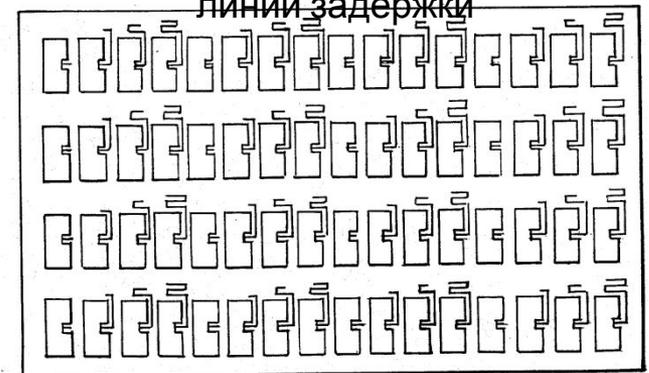
22

## ОР бокового излучения

Периодическая система излучателей (АР) может создавать луч диаграммы параллельно плоскости апертуры (End-fire-array) – разлитие Удо Яги



Фазировка ОР при помощи линий задержки

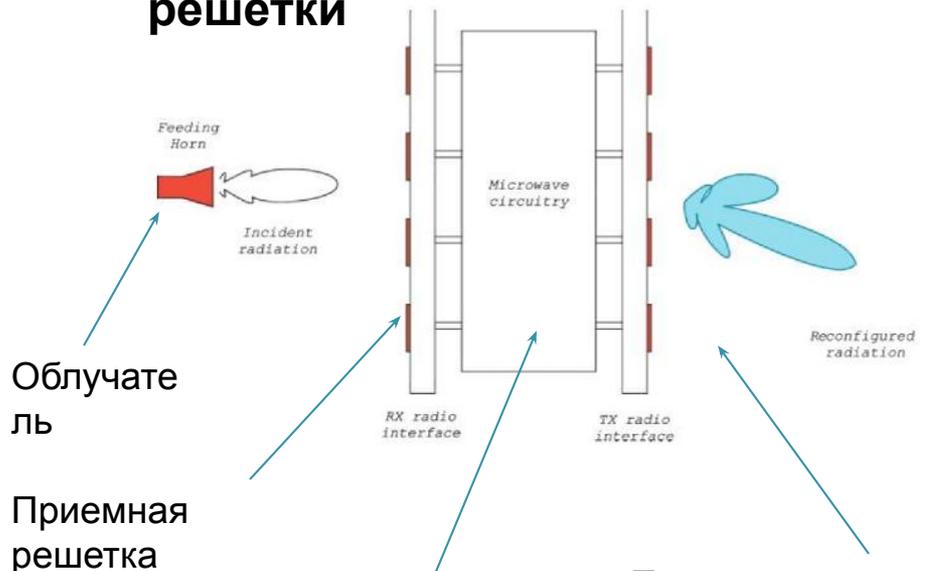


US Patent, Aug 4, 1987, 4,684,952

- Введение
- Отражательные решетки
- **Проходные решетки**
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

# Прходные решетки

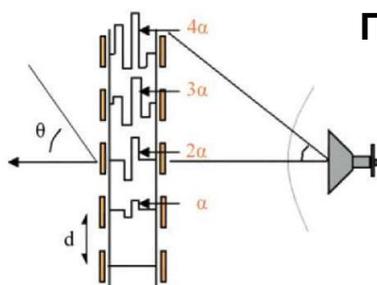
## Принцип работы проходной решетки



Облучатель  
Приемная решетка

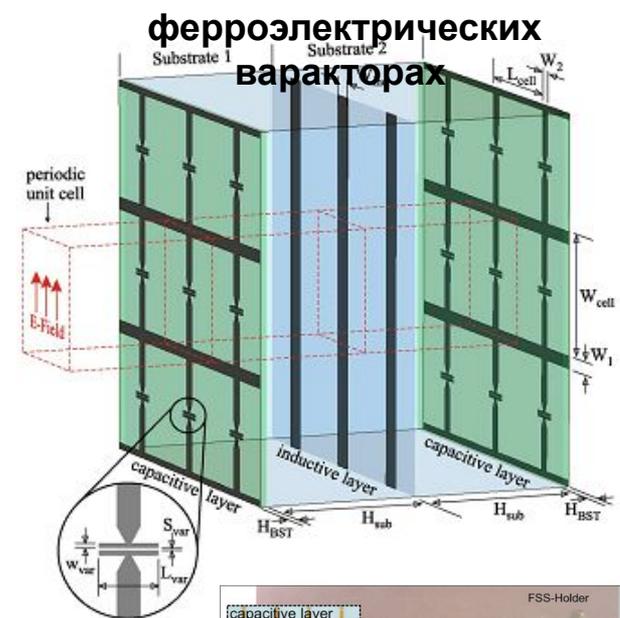
Управляемая СВЧ

Передающая решетка  
Пассивная ПР на линиях задержки

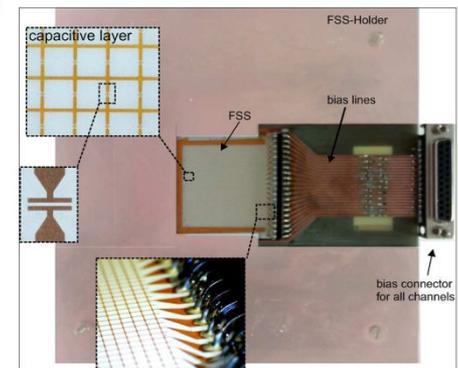


Метаматериалы в антенной технике

## Активная ПР на 12 ГГц из ЧСС на ферроэлектрических варакторах



Mohsen Sazegar et al.,  
IEEE TAP, 2012



- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- **Покрытия из нано-антенн**
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

# Покрытие из нано-антенн

26

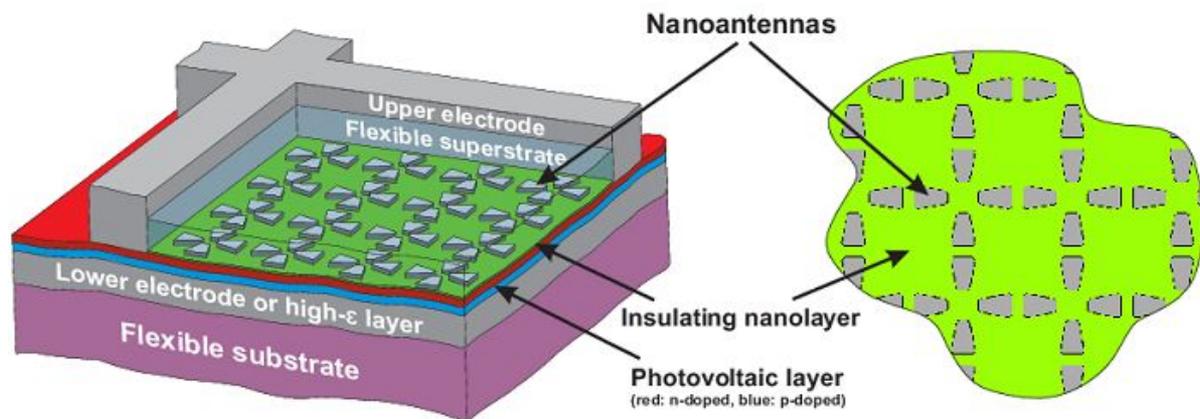
## Широкополосный захват света в сверхтонком полупроводниковом

## слое 150-250 нм при помощи покрытия из нано-антенн

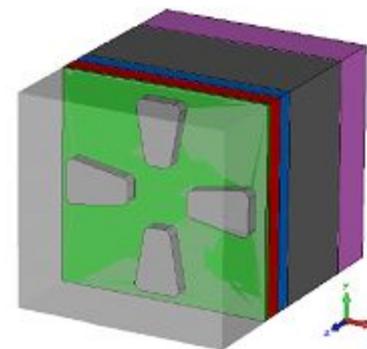
Солнечные батареи на тонких пленках — гибкие, более практичные и дешевые в изготовлении,

но менее эффективные, чем объемные

НИУ ИТМО совместно с Aalto university



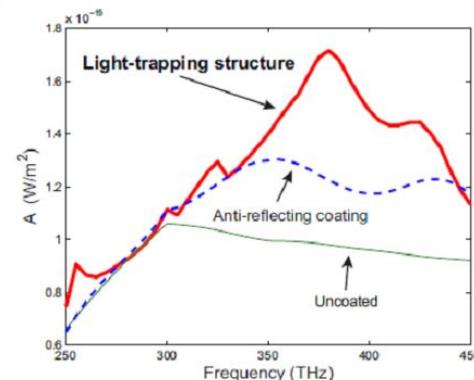
Комп. модель ячейки



Размер антенн —  
160 нм

Выигрыш в поглощении энергии  
до 30% в ИК-диапазоне и  
до 15% - в видимом

Метаматериалы в антенной технике

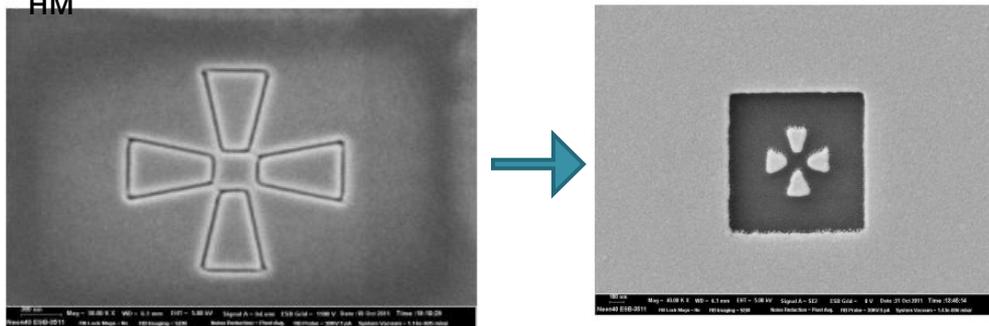


# Покрывтие из нано-антенн

27

## Разрабатываемые технологии для покрытий из нано-антенн

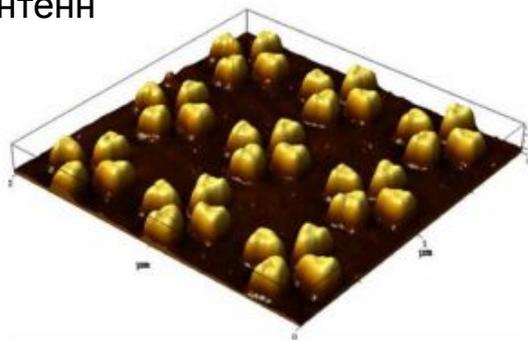
Фокусированное ионное травление в золотой пленке 50 НМ



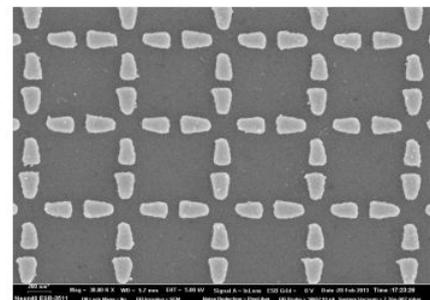
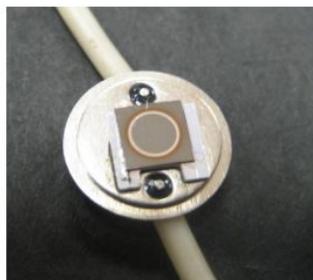
<http://phoi.ifmo.ru/metamaterials/>

Аналогичная задача существует для повышения чувствительности ТГц детекторов

Матрица золотых нано-антенн



Серебряные нано-антенны на фотодетекторе



метаматериалы в антенной технике

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- **Линзы из метаматериалов**
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

# Линзы из Метаматериалов

**Сферическая линза Лüneберга фокусирует излучение точечного источника на ее периферии.**

Для этого она должна быть неоднородна (показатель преломления зависит от расстояния)

$$n(r) = \sqrt{2 - r^2}$$

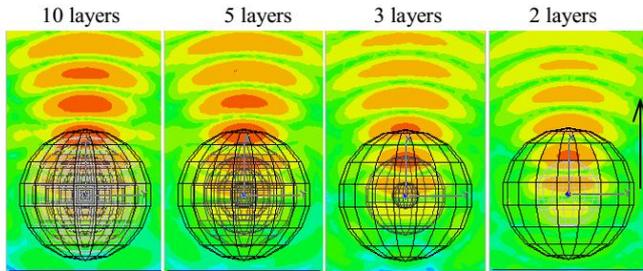
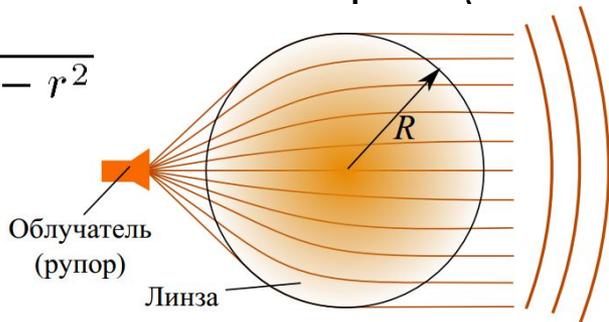
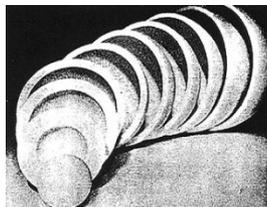
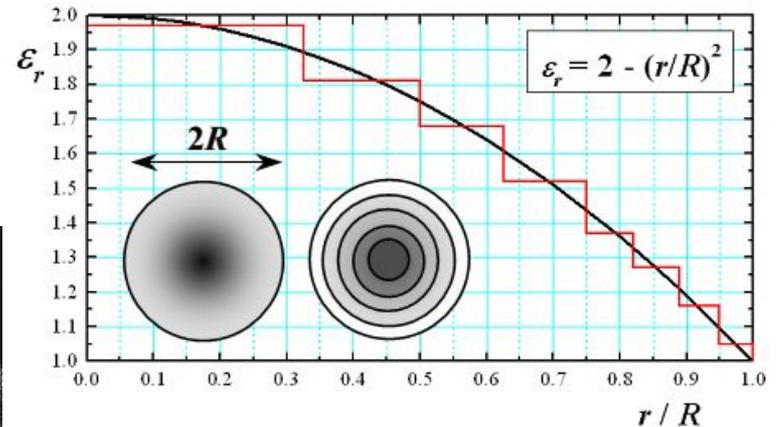


Fig. 3. Focusing abilities of 200-mm Lüneburg lens with different number  $N$  of layers ( $f = 3.5$  GHz): the focussing effect becomes worse, when  $N \leq 2-4$  (log scale)



**Стандартная реализация –**  
Множество вложенных шаровых слоев с разным показателем преломления



**Требуется большое число слоев – высокая стоимость**  
**Объем полностью заполнен – значительный вес**

# Линзы из Метаматериалов

30

## Сферическая линза Люнеберга на основе диэлектрического метаматериала

Разработана совместно СПбГПУ и ИТМО

Радиальные диэлектрические штырьки переменного профиля образуют неоднородный материал

Экспериментальный образец:

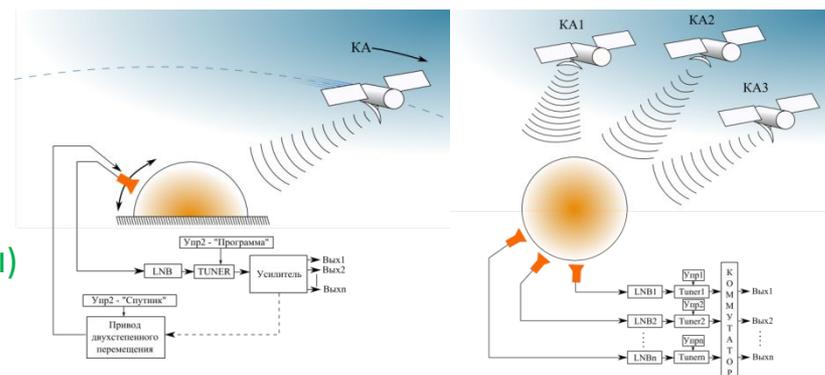


- Широкая полоса частот (5-15 ГГц)
- Малый вес (в 3-4 раза ниже многослойной линзы)
- Состоит из одинаковых элементов
- Используется один материал
- Может быть изготовлена на 3D-принтере

Сопровождение движущихся спутников



Одновременная работа по нескольким спутникам



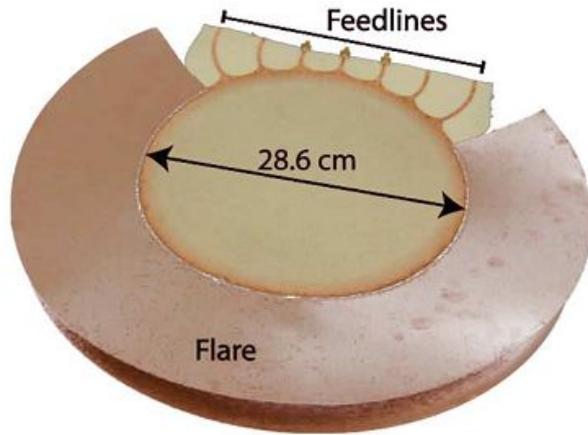
И.К. Мешковский, Д.В. Шанников, ПЖТФ, 2002

# Линзы из Метаматериалов

31

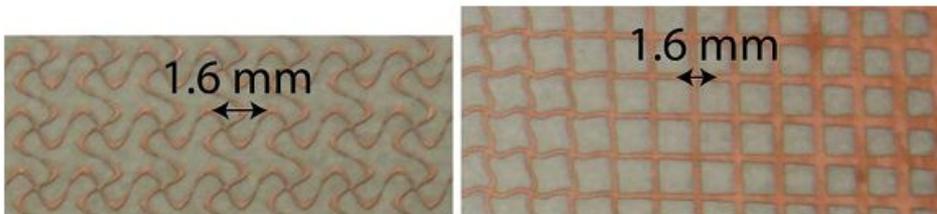
## Планарная линза Лüneберга на основе сетки

Между двумя периодическими структурами возможно замедление TEM волны – меняется показатель преломления

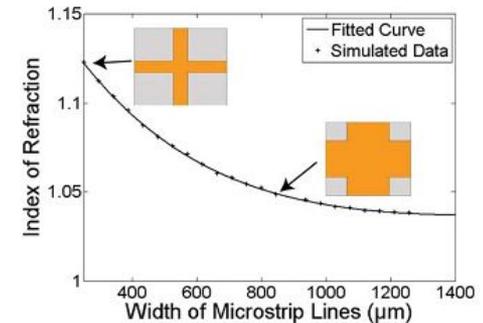
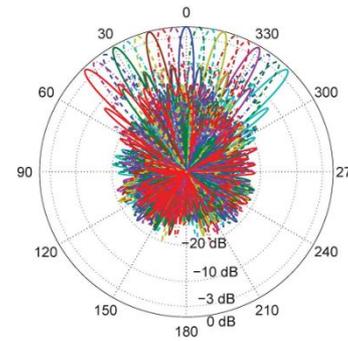
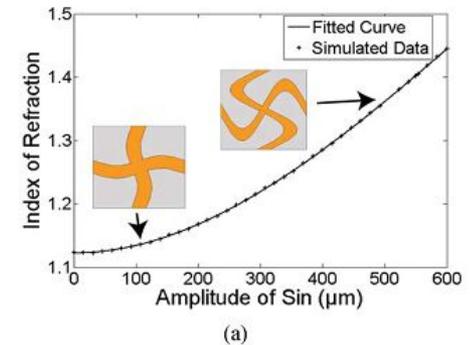
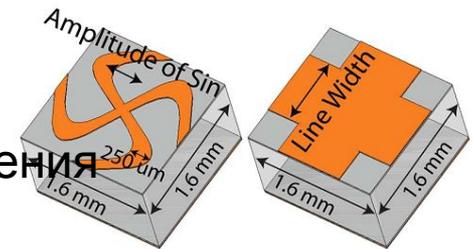


Линза Лüneберга фокусирует излучения источника на ее периферии

$$n(r) = \sqrt{2 - r^2}$$



Carl Pfeiffer and Anthony Grbic, IEEE TAP, 2010



# Линзы из Метаматериалов

32

## Массив из композитных линз Микаэляна

Концепция искусственного неоднородного диэлектрика находит применение и для цилиндрических линз

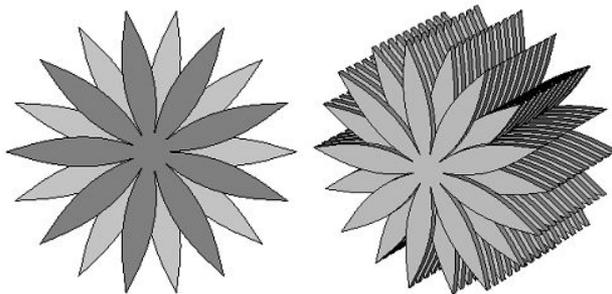
Неоднородная линза Микаэляна фокусирует излучение

точечного источника, расположенного

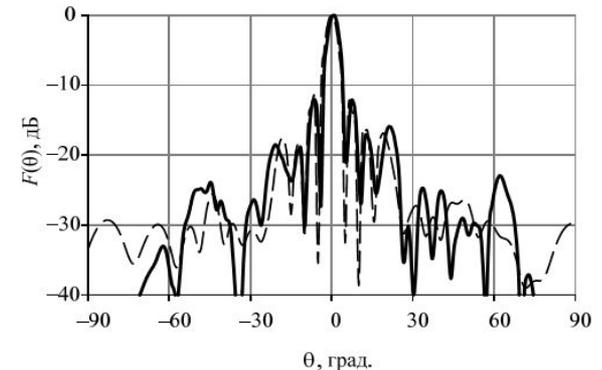
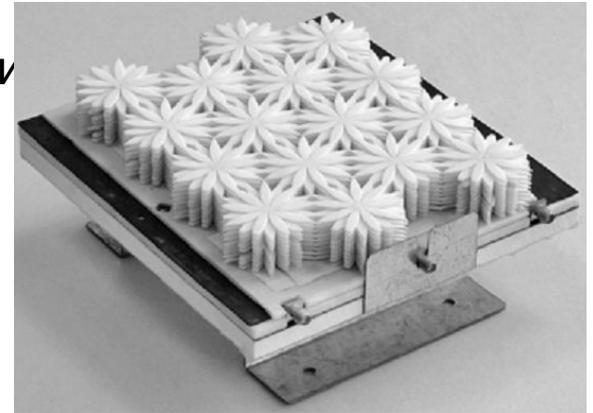
в торце цилиндра если:

$$n(r) = \frac{n_0}{\text{ch}[(r/r_0)\text{Arch } n_0]}$$

Распределение показателя преломления достигается использованием многослойной структуры с элементарной ячейкой определенной формы:



Метаматериалы в антенной технике



А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов.  
Доклады ТУСУРа, 2012

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- Высокоимпедансные поверхности

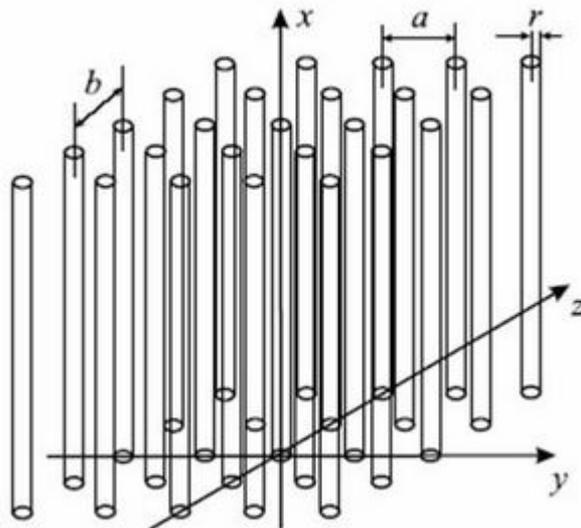
# Проволочные среды

34

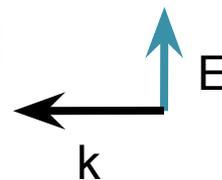
## Среда из параллельных проводов круглого сечения, образующих решетку

Структуру можно рассматривать как анизотропную (одноосную) среду с эквивалентными параметрами:

$f_p$  - плазменная частота, зависит от геометрических параметров решетки



$$\epsilon_{\text{reff}} = 1 - \frac{f_p^2}{f^2 - \left(\frac{q \cdot c}{2\pi}\right)^2}$$



### Режимы работы:

- $f < f_p$  – запределный режим, экспоненц.затухание,  $\epsilon_{\text{reff}} < 0$
- $f = f_p$  – ENZ метаматериал, бесконечная фазовая скорость,  $\epsilon_{\text{ref}} = 0$
- $f > f_p$  – распространяющаяся волна,  $\epsilon_{\text{ref}} > 0$

# Проволочные среды

35

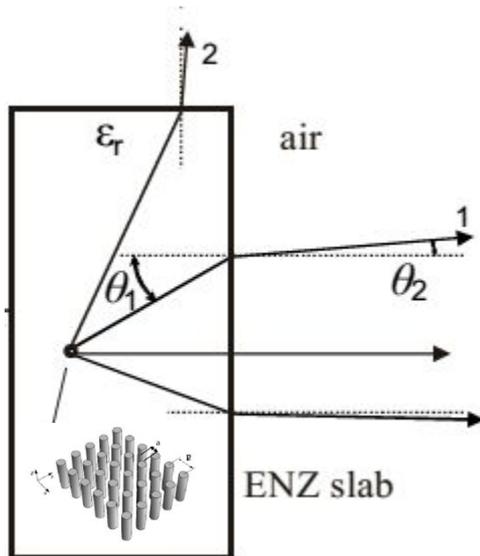
## Синфазная апертура при помощи проволочной среды

В режиме  $\epsilon_{\text{ref}}=0$ :

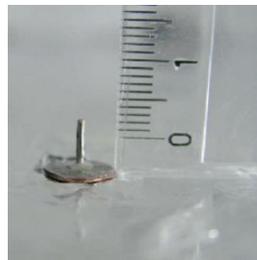
- фазовая скорость в среде бесконечна:
- все лучи выходят из среды под углом, близким к нормали

-> можно расположить точечный диполь внутри слоя и получить синфазную апертуру

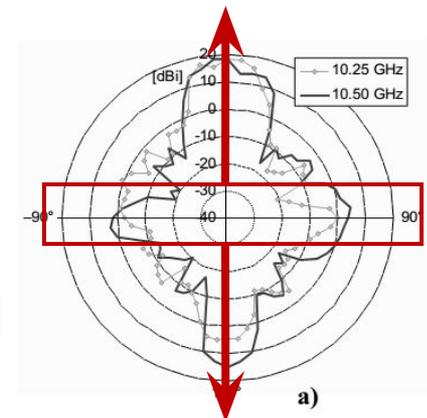
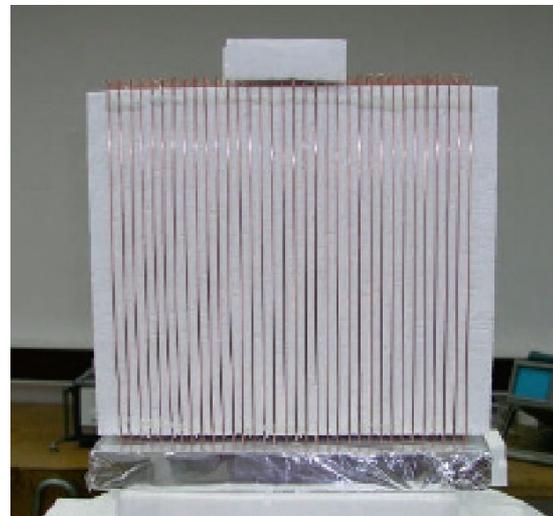
Лучи в слое из проводов:



Точечный  
монополю:



Экспериментальная реализация  
слоя из проводов:



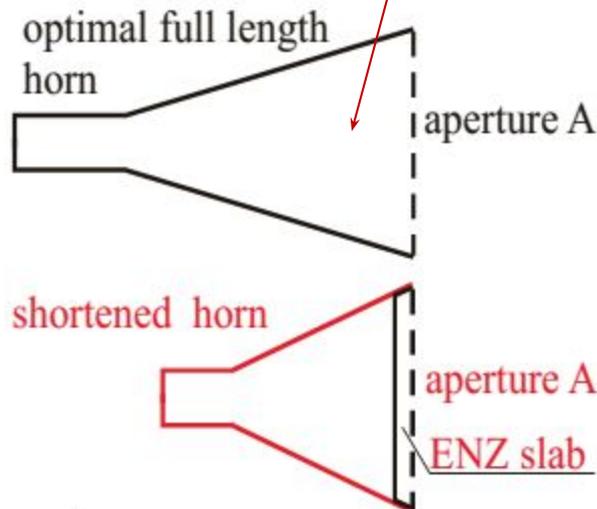
# Проволочные среды

36

## Укороченная рупорная антенна за счет вставки из проволочного материала

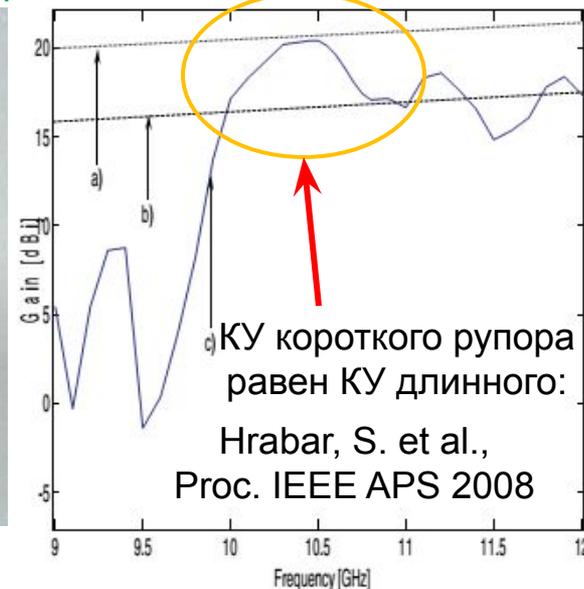
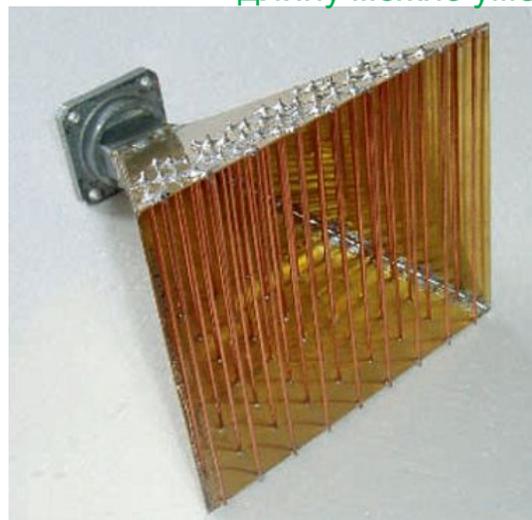
За счет бесконечной фазовой скорости можно реализовать фокусирующую вставку в рупор

Оптимальный рупор для заданной длины имеет фиксированные размеры апертуры



За счет вставки из проволочного метаматериала

длину можно уменьшить с тем же КПД



Не содержит диэлектрика! Удобно для космических систем.

Метаматериалы в антенной технике

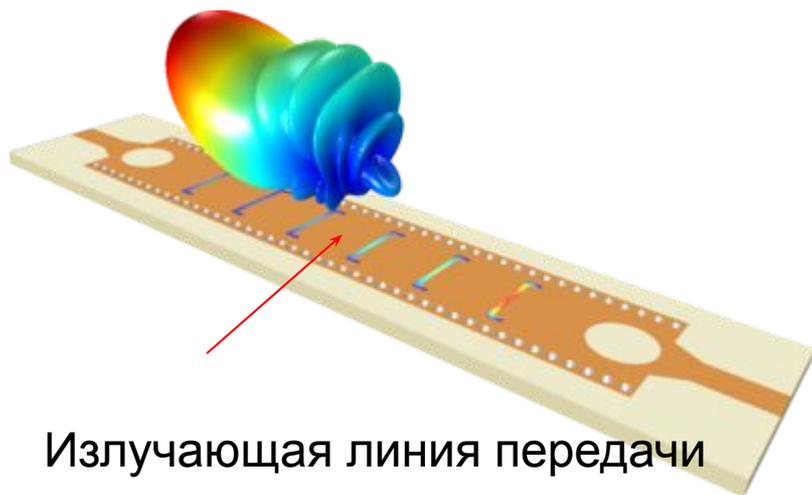
# Проволочные среды

37

## Антенна бегущей волны на волноводе с проволочным заполнением

Бесконечная фазовая скорость дает антенну бегущей волны с синфазным раскрывом!

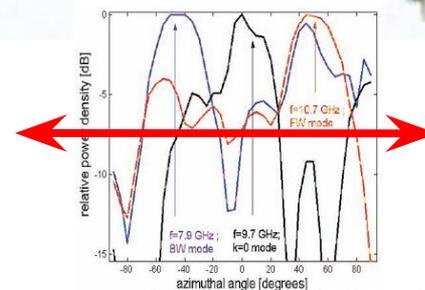
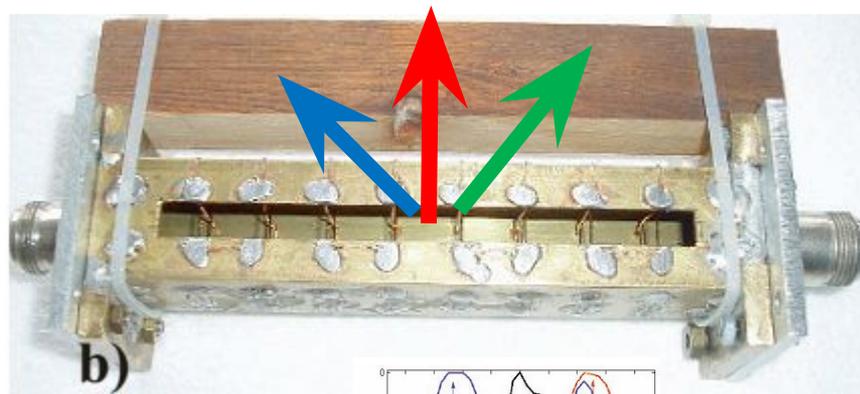
Типичная антенна бегущей волны:  
максимум излучения – под углом



Излучающая линия передачи

Волновод с проволочной средой реализует:

- Режим обратной волны
- Режим с бесконечной фазовой скоростью
- Режим с прямой волной



Hrabar, S et al., Proc. Meta 2008

Метаматериалы в антенной технике

частотное сканирование

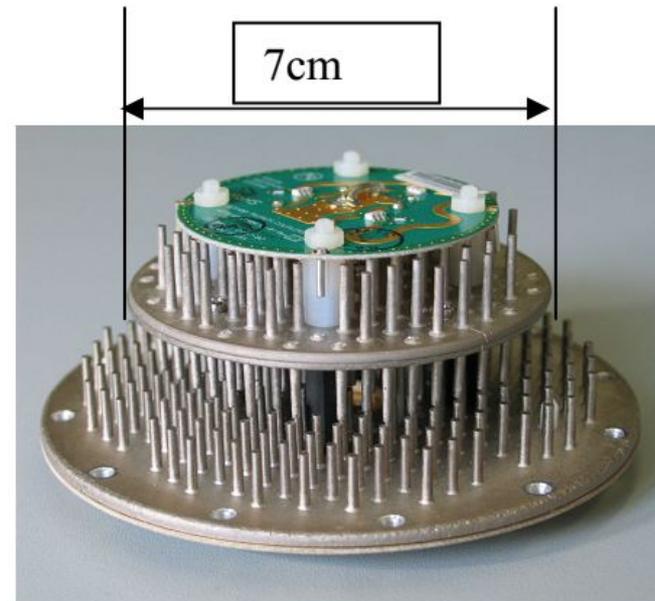
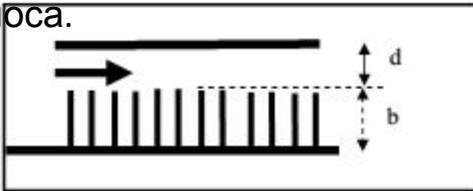
# Проволочные среды

38

**Система из близких разомкнутых проводов между двумя близкими пластинами играет роль замедляющей структуры – искусственный диэлектрик**

Для всенаправленности МП антенну нужно делать меньше – растёт с подложки – уменьшается полосу.

Искусственный диэлектрик на замедляющей структуре даёт широкополосность и всенаправленность одновременно



Dmitry Tatarnikov, Topcon

- Введение
- Отражательные решетки
- Проходные решетки
- Покрытия из нано-антенн
- Линзы из метаматериалов
- Проволочные среды
- **Высокоимпедансные поверхности**

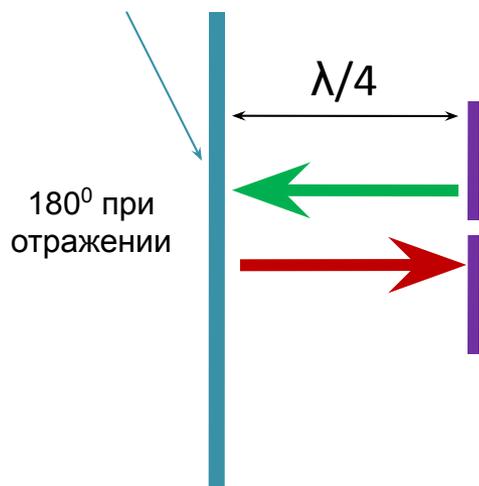
# Высокоимпедансные пов-ти

40

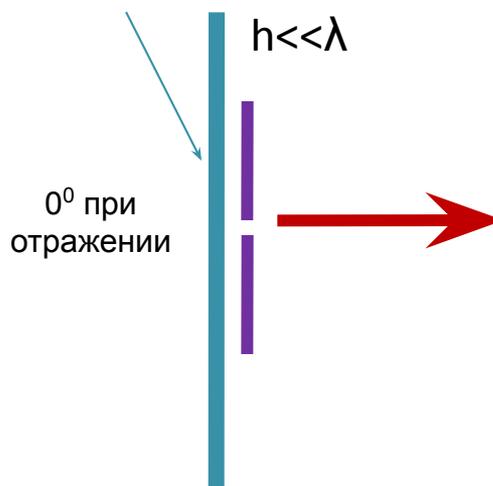
## Планарные структуры, в т.ч. периодические – импедансные поверхности

От импеданса зависит коэффициент отражения. **Не существует природных стенок с магнитными свойствами**

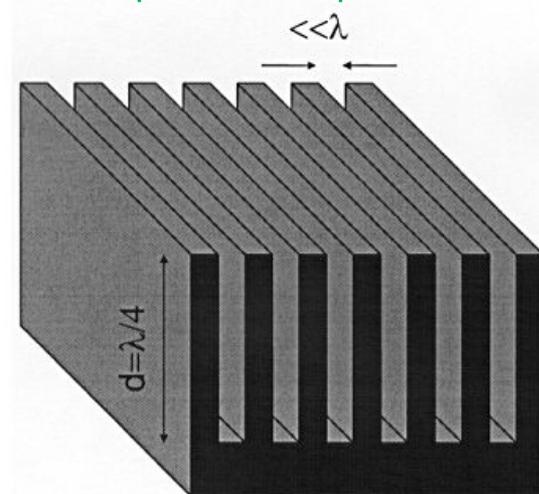
Металлический экран  
( $E=0, Z=0$ )



Магнитный экран  
( $H=0, Z=\infty$ )



Corrugated Surface  
Отражение с фазой  $0^\circ$



**НО! Это – не совсем планарная структура! Нужна миниатюризация!**

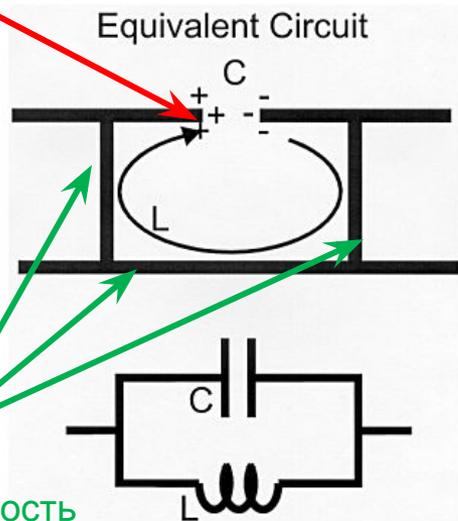
# Высокоимпедансные пов-ти

41

Для миниатюризации необходимо уменьшить объем элементарной ячейки –увеличить емкость и индуктивность

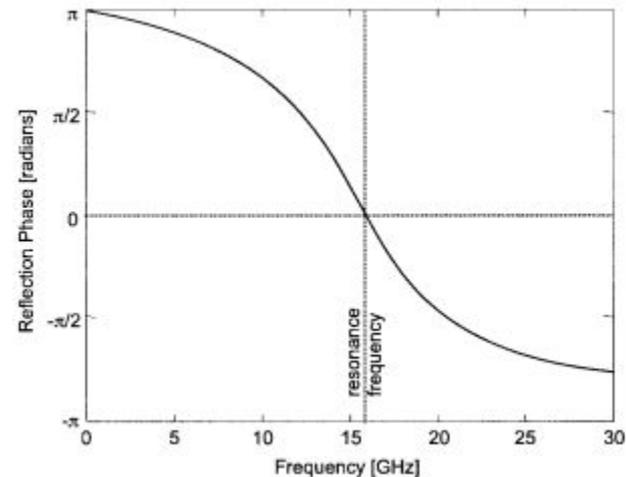
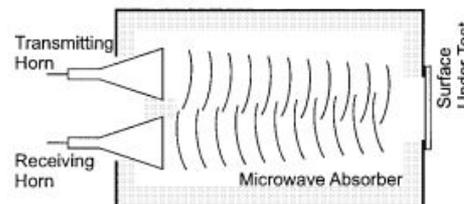
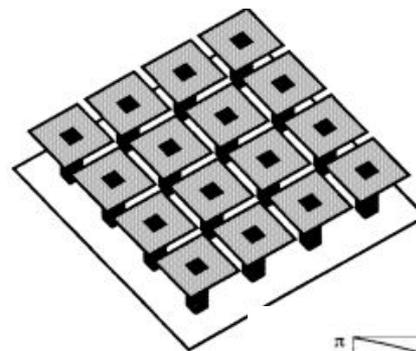
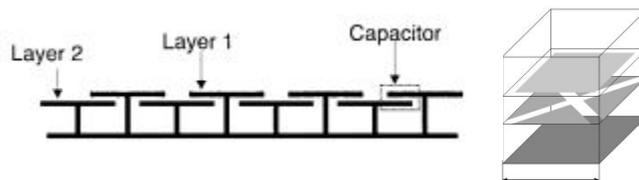
Высокоимпедансная поверхность (грибная)

Краевая емкость



Индуктивность контура

Можно еще увеличить емкость:



Метаматериалы в антенной технике

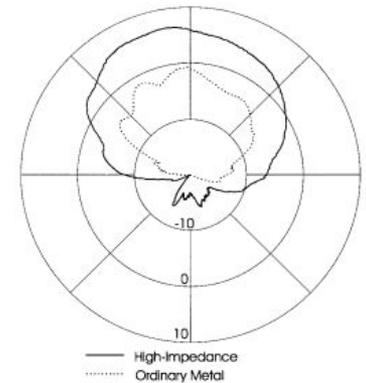
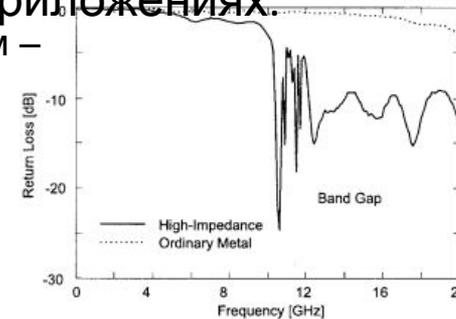
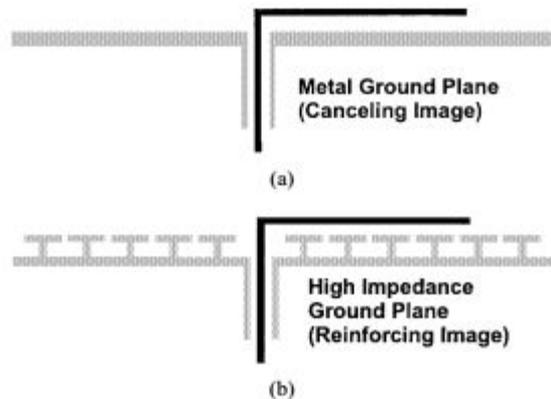
# Высокоимпедансные пов-ти

42

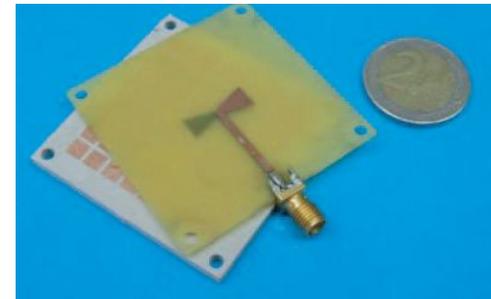
Грибные поверхности могут легко изготавливаться в виде печатных плат,

что делает их наиболее популярными в приложениях.

Горизонтальный диполь над металлическим экраном – изображение в противофазе – **трудно согласовать**



Горизонтальный диполь над поверхностью с высоким импедансом – изображение в фазе – **легко согласовать!**



Dan Sievenpiper et al., IEEE MTT Trans., 1999

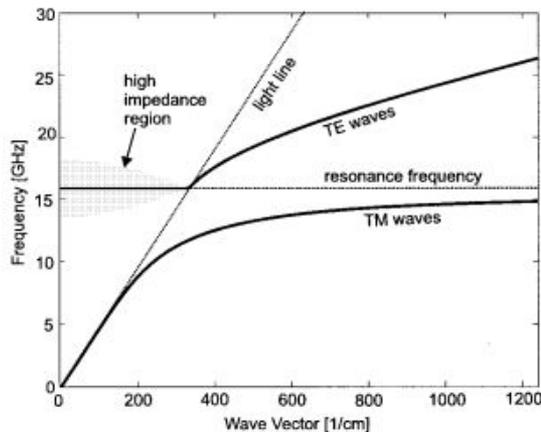
Метаматериалы в антенной технике

# Высокоимпедансные пов-ти

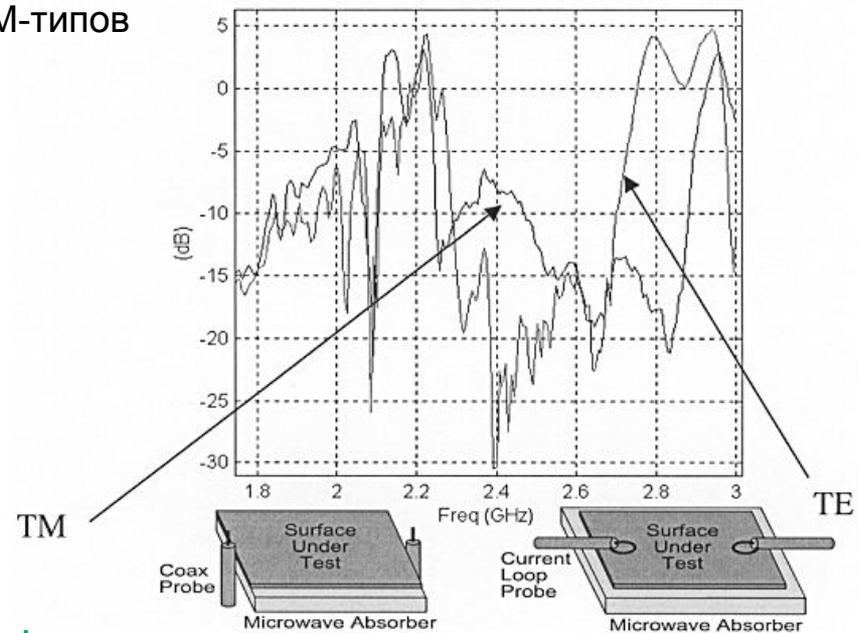
43

**Вблизи резонанса поверхности с высоким импедансом блокируют поверхностные волны**  
(при возбуждении как электрическим, так и магнитным диполями)

ВИП подавляют поверхностные волны TE- и TM-типов  
– эффект запрещенной зоны



Структура из метаматериала позволяет добиться развязки элементов антенной решетки!



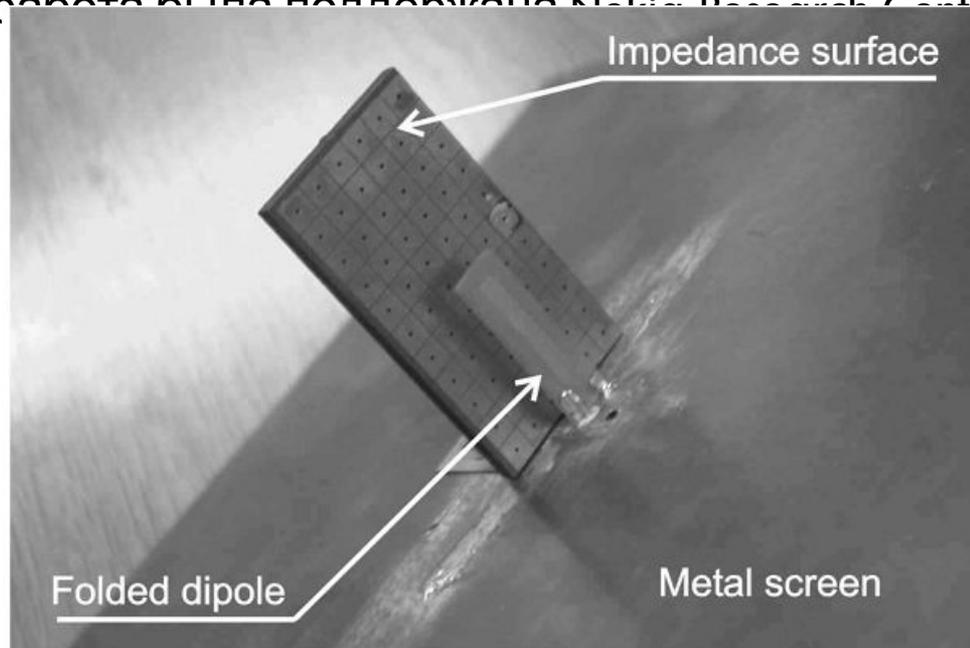
G. Poilasne, PIER, 2003

# Высокоимпедансные пов-ти

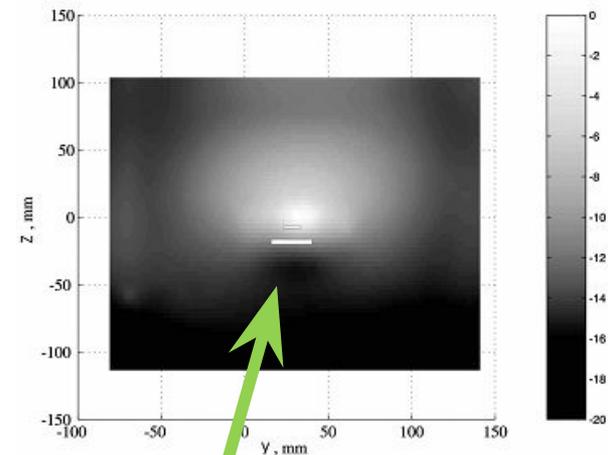
44

**Конечные высокоимпедансные поверхности могут управлять ближним полем**

Это важно для уменьшения вредного действия устройств радиосвязи – работа была поддержана Nokia Research Center



Результат измерения ближнего поля



Область пониженного поля в ближней зоне

S.A. Tretyakov et al, Improving antenna near-field pattern by use of artificial impedance screens, 2005

Метаматериалы в антенной технике

# Высокоимпедансные пов-ти

45

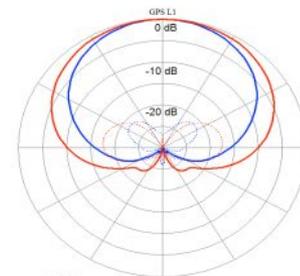
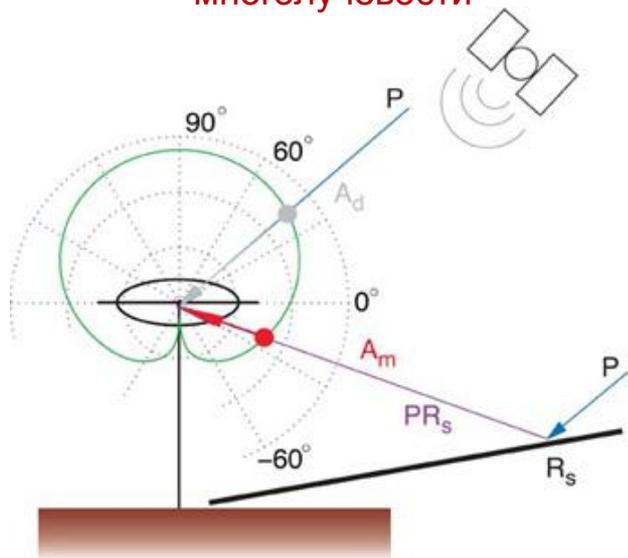
**Другое применение – снижение краевых эффектов отражателя антенн**

Поверхностные волны затухают и не доходят до края – не портится форма

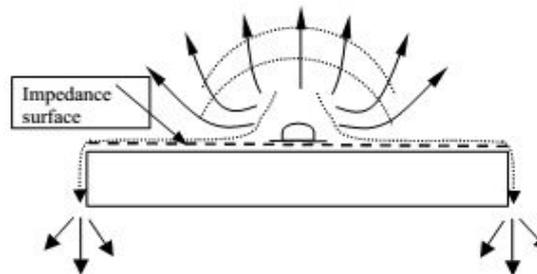
**ДН** обычной GNSS антенны – высокое боковое и заднее излучение –  
Ошибка измерения координат из-за многолучевости

Промышленные GNSS антенны делают с подавлением многолучевости за счет высокоимпедансных поверхностей

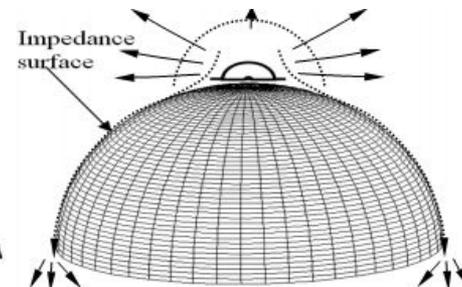
Происходит подавление краевых эффектов – ровная форма ДН – нет фазовых ошибок



Плоская поверхность:



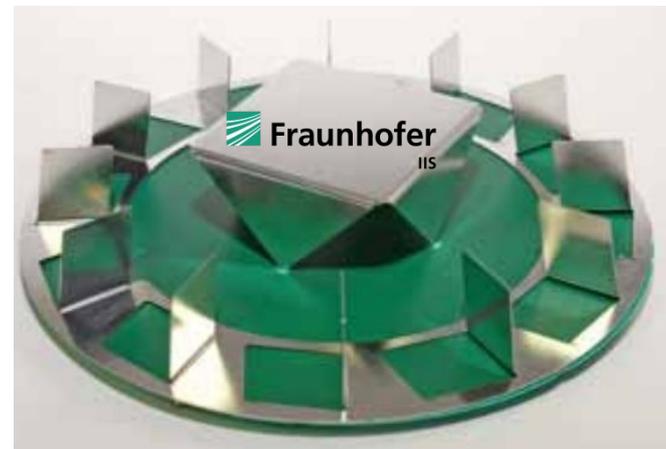
Выпуклая поверхность:



# Высокоимпедансные пов-ти

46

Модели высокоточных GNSS антенн на высокоимпедансных поверхностях, имеющиеся на рынке



*В рамках работ по модернизации комплекса "Квазар-КВО" в июле 2010 г. на обсерватории Зеленчукская установлен совмещённый GPS/ГЛОНАСС-приёмник фирмы Javad GNSS Delta-G3T с антенной RingAnt-DM Choke Ring.*

Метаматериалы в антенной технике

*Спасибо за внимание!*