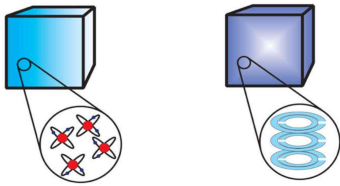


- 超材料的概念 P2
- 介电常数的物理意义 P8
- 左手波和左手材料 P15
- (重点)为什么左手材料折射率为负 P17
- 实现负折射率的一种思路 P25
- 双负负折射率材料 P32
- 超材料的性质-负折射率 P36
- 反常切伦科夫辐射 P44
- 零折射率材料 P47
- 光频段磁性超材料的实现 P51

- 1、超材料的概念与历史
- 2、实现负折射率的一种思路
- 3、超材料的性质
- 4、光频段磁性超材料的实现

1、超材料的概念与历史

1.1 基本概念



- 常规材料：原子构成，远小于光的波长
宏观参数 ϵ, μ 描述光-物质相互作用
- 超材料：人造电磁共振结构，结构单元小于光的波长
宏观参数 $\epsilon_{\text{eff}}, \mu_{\text{eff}}$ 描述光-物质相互作用

1、超材料的概念与历史

1.2 Maxwell方程组

真空中的电磁规律

我们生活在介质中
介质带来了丰富的电磁现象——多彩的世界



1、超材料的概念与历史

1.3 本构关系

ϵ, μ 究竟是什么？
——电磁波两条腿走路

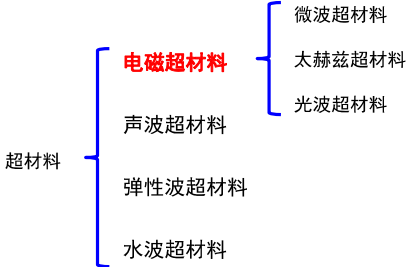


- 电磁波两条腿走路，既有电场 E ，又有磁场 H
- 介电常数和磁导率分别控制两条腿，因此可以操控电磁波

1、超材料的概念与历史

1.1 基本概念

“Metamaterials”, “meta-”超常、超越、另类

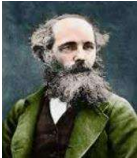


- 共同特点：通过其结构特性和组合调控波的行为
- 主要特征：
 - 人工设计合成制作的复合材料
 - 具有自然界的材料所不具备的物理性质
 - 性质不仅取决于构成材料的本征属性，更取决于其结构单元对波的响应

1、超材料的概念与历史

1.2 Maxwell方程组

麦克斯韦方程组
——所有电磁现象的规律



真空

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 & \text{库仑定律} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \text{法拉第电磁感应定律} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 & \text{没有磁单极} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} & \text{安培定律、位移电流} \end{cases}$$

方程(2)：变换的磁场产生电场

方程(4)：变换的电场产生磁场



电磁波

1、超材料的概念与历史

1.2 Maxwell方程组

介质中的Maxwell方程组

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{E} = \rho / \epsilon_0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_f \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times (\vec{B} / \mu) = \vec{j}_f + \frac{\partial (\epsilon \vec{E})}{\partial t} \end{cases}$$

ϵ, μ 个性化地描述了不同的介质对电磁波的响应

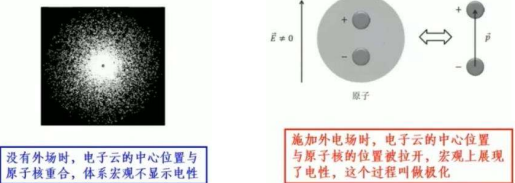
ϵ, μ 导致了电磁波的迥异表现，使得我们的世界绚丽多彩！

1、超材料的概念与历史

1.3 本构关系

介电常数的物理含义

物质由大量原子组成，原子由原子核（带正电）和电子云组成



没有外场时，电子云的中心位置与原子核重合，体系宏观不显示电性

施加外电场时，电子云的中心位置与原子核的位置被拉开，宏观上展现了电性，这个过程叫做极化

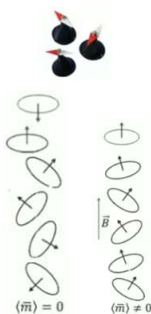
ϵ 描述的正是物质对外电场响应的剧烈程度，就像弹簧

1、超材料的概念与历史

1.3 本构关系

磁导率是什么？

- 介质内部有大量的小磁针（分子环流）
- $B = 0$ 时，这些小磁针随机分布，相互抵消，体系没有磁性
- B 不为0时，小磁针都被拉到磁场的方向排列，体系显示宏观磁性。这个过程叫**磁化**
- 磁导率就是描述体系**对外磁场的响应能力**

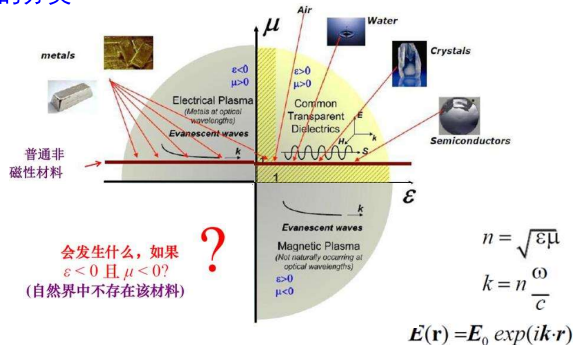


大部分材料在光波频段的相对磁导率 $\mu_r = 1$ ，即对磁场几乎没有响应。

09

1、超材料的概念与历史

1.4 材料的分类



11

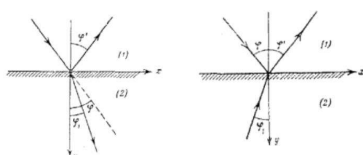
1、超材料的概念与历史

1.5 历史

Schuster-1904: Idea

Negative Refractive Index: A long history

- A. Schuster, An Introduction to the Theory of Optics, (1904)
- Discussed in the context of anomalous dispersion as occurs at any absorption band.
- L.I. Mandelshtam, May 5 1944 (last lecture)



"In fact, the direction of wave propagation is determined by its phase velocity, while energy is transported at the group velocity."
- Translated by E. F. Keuster

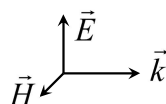
13

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

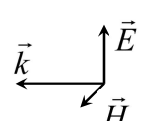
左手波和左手材料

如果 $\epsilon > 0, \mu > 0$ 则 $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{k})$ 满足右手定则：



通常情况

如果 $\epsilon < 0, \mu < 0$ 则 $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{k})$ 满足左手定则：



对应左手波和左手材料

为什么？

15

1、超材料的概念与历史

1.3 本构关系

调控光/电磁波

调节 ϵ, μ

自然材料调节能力有限

ϵ, μ 是材料的本征属性，材料定了， ϵ, μ 就定了

人工材料？？

10

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

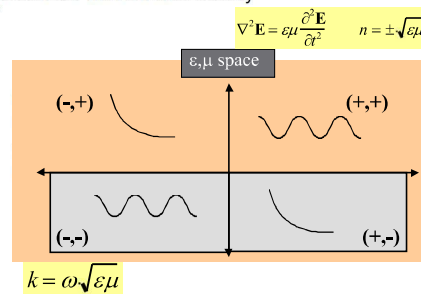
从负折射率到超材料的提出

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

Viktor Veselago- 1967: Theory

"The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ "



V.G. Veselago, Sov. Phys. Usp 10, 509 (1968). (first published in Russian in 1967)

14

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

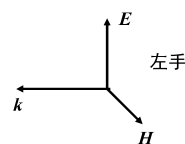
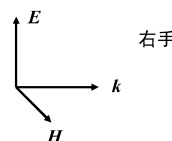
为什么是左手？

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \vec{k} \times \vec{E} = i\omega \vec{B} = \omega \mu \mu_0 \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} = -\omega \vec{D} = -\omega \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \end{cases}$$

$$\text{for } \epsilon, \mu > 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{k} \times \vec{E} = \omega \mu \mu_0 \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} = -\omega \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \end{cases}$$

$$\text{for } \epsilon, \mu < 0 \Rightarrow \begin{cases} \vec{k} \times \vec{E} = -\omega |\mu| \mu_0 \vec{H} \\ \vec{k} \times \vec{H} = \omega |\epsilon| \epsilon_0 \vec{E} \end{cases}$$



能量传播的方向：

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \quad \text{右手定则}$$

16

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

为什么左手材料折射率为负？

$$n^2 = \epsilon\mu \Rightarrow n = \pm \sqrt{\epsilon\mu}$$
 为什么取负号！？

光在任何非理想材料中传输都有损耗 $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i, \mu = \mu_r + i\mu_i$

假定损耗很小 $\epsilon = \epsilon_r + i\delta_1, \mu = \mu_r + i\delta_2, \delta_i$ 为小量

$$\begin{aligned} \epsilon\mu &= (\epsilon_r + i\delta_1) \cdot (\mu_r + i\delta_2) \\ &= \epsilon_r\mu_r + i(\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1) - \delta_1\delta_2 \\ &\approx \epsilon_r\mu_r + i(\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1) \end{aligned}$$

$$n = \pm \sqrt{\epsilon\mu} = \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r + i(\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1)}$$

现在分情况讨论： $\epsilon_r > 0, \mu_r > 0$

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \sqrt{1 + i \frac{\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1}{\epsilon_r\mu_r}} \approx \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \left(1 + i \frac{\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1}{2\epsilon_r\mu_r} \right)$$

17

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

如何实现双负？

- 常规介质材料： $\epsilon > 0, \mu \sim 1$
- 金属材料： $\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - i\gamma\omega}, \omega_p = \frac{ne^2}{\epsilon_0 m_e}$

其等离子体频率大多位于紫外

- 大部分非磁性材料 $\mu \sim 1$
- 自然界中 $\mu < 0$ 的材料几乎没有
- 如何使感兴趣的频率区间 $\epsilon < 0, \mu < 0$?

理论很充实，现实很难！

19

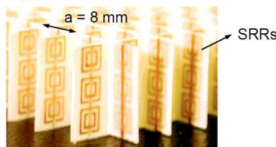
1、超材料的概念与历史

1.5 历史

David Smith – 2000: 实现



“Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”



Experimental demonstration at $\lambda = 60$ mm ($f = 5$ GHz) of a metamaterial with $\epsilon_{\text{eff}} < 0$ and $\mu_{\text{eff}} < 0$

Rediscovery of Veselago's paper

自此超材料的研究从此一发不可收拾

D.R. Smith et al., Phys. Rev. Lett. 84, 4184 (2000).

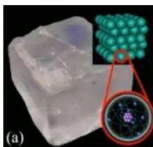
21

1、超材料的概念与历史

1.5 命名——超材料

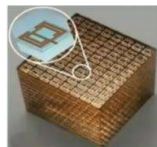
什么是超（构）材料？
Metamaterials

常规材料



- 结构单位：原子
- 不能具有任意的 ϵ, μ

超构材料



- 结构单位：人工原子
- 可具有任意的 ϵ, μ

23

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

为什么左手材料折射率为负？

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \left(1 + i \frac{\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1}{2\epsilon_r\mu_r} \right)$$

介质必然是损耗介质，折射率虚部大于0，因此：

$$n = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \left(1 + i \frac{\epsilon_r\delta_2 + \mu_r\delta_1}{2\epsilon_r\mu_r} \right)$$

如果： $\epsilon_r < 0, \mu_r < 0$

$$n = \pm \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \left[1 - i \frac{(|\epsilon_r|\delta_2 + |\mu_r|\delta_1)}{2\epsilon_r\mu_r} \right]$$

折射率虚部大于0，得到：

$$n = -\sqrt{\epsilon_r\mu_r} + i \frac{(|\epsilon_r|\delta_2 + |\mu_r|\delta_1)}{2\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

$$n_r = -\sqrt{\epsilon_r\mu_r} < 0 \quad \text{负折射！}$$

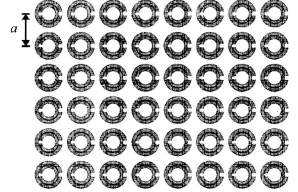
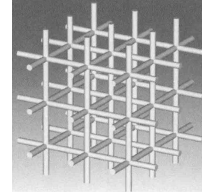
18

1、超材料的概念与历史

1.5 历史

John Pendry的方法

- 1996年 (Phys. Rev. Lett., 76, 4773)：金属细线网格构成的周期性阵列可**有效控制**和**调节金属的等离子体频率**，可在微波波段实现负的介电常数。
- 1999年 (IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 47, 2075) 用金属开口环可以实现微波波段的**有效负磁导率**。



20

1、超材料的概念与历史

1.5 命名——超材料

“超材料”名字 的起源

- “Metamaterial” coined in the late 1990's

- According to **David R. Smith**, **any material composed of periodic, macroscopic structures so as to achieve a desired electromagnetic response** can be referred to as a **Metamaterial** (宽泛的定义)

• Others prefer to restrict the term *Metamaterial* to materials with **electromagnetic properties not found in nature**

• - Still some ambiguity as the exact definition

• - Almost all agree the *Metamaterials* do **NOT** rely on chemical/atomic alterations.

22

2、实现负折射率的一种思路

24

2、实现负折射率的一种思路

2.1 电响应的调节

洛伦兹模型-电介质

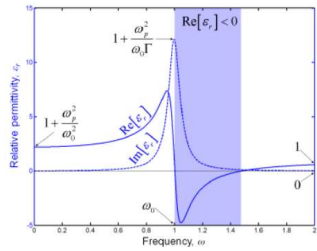
Governing Equation

$$m \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} + m\Gamma \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} + m\omega_0^2 \vec{r} = -q\vec{E}$$

inertia loss restoring force applied electric force

Resulting Dielectric Function

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - j\omega\Gamma}$$
$$\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}$$



ω_0 材料的固有频率，与能带宽度相关

25

2、实现负折射率的一种思路

2.1 电响应的调节

如何调节电响应？

$$\text{介质材料: } \epsilon = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega\gamma}, \quad \omega_p^2 = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}$$

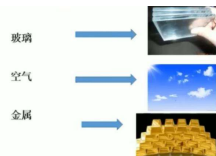
ω_0 对应于电子能带跃迁频率

金属材料:

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad \omega_p^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}$$

有没有可能改变等离子体频率

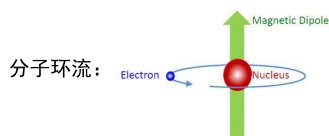
$$\omega_p \propto \sqrt{\frac{n_e}{m_e}}$$



27

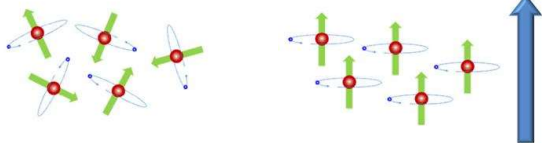
2、实现负折射率的一种思路

2.2 磁响应的调节



Equilibrium State

Polarized State



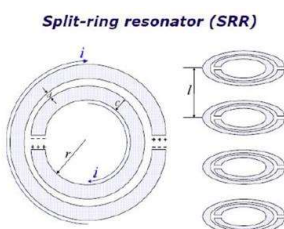
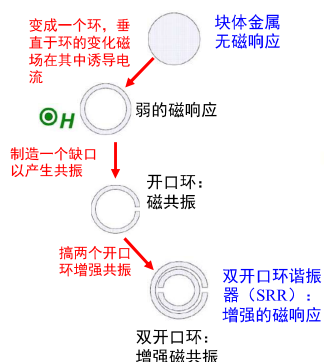
直接操控分子环流几乎不可能，需要另辟蹊径

29

2、实现负折射率的一种思路

2.2 磁响应的调节

设计思路



Theory: Pendry et al., 1999.
Experiment: Smith et al., 2000.

31

2、实现负折射率的一种思路

2.1 电响应的调节

Durde 模型-金属

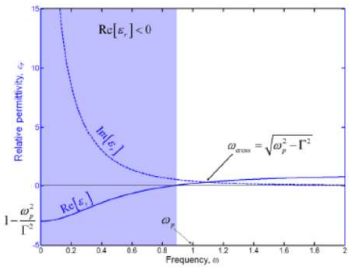
Governing Equation

$$m \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial t^2} + m\Gamma \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = -q\vec{E}$$

Electrons are not bound so restoring force is zero.

Resulting Dielectric Function

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\Gamma}$$
$$\omega_p^2 = \frac{Nq^2}{\epsilon_0 m}$$



ω_p 金属的等离子体频率，与电子浓度和电子有效质量相关

26

2、实现负折射率的一种思路

2.1 电响应的调节

Pendry证明：金属细线立方体网格结构，可以降低等离子体频率

$$\text{等效电子浓度: } N_{\text{eff}} = \frac{\pi r^2 N}{a^2}$$

空气介质稀释电子浓度

等效的电子有效质量:

$$m_{\text{eff}} = \frac{\mu_0 \pi r^2 N_{\text{eff}} q^2}{2\pi} \ln\left(\frac{a}{2r}\right)$$

等离子体频率:

$$\omega_{p,\text{eff}}^2 = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln(a/2r)}$$

与材料固有属性相关的等离子体频率
变成与可以改变的结构参数相关



J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, I. Youngs, "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures," Phys. Rev. Lett. 76, 4773-4776 (1996).

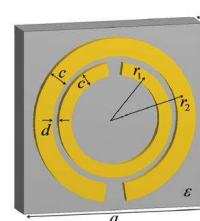
Metallic wire

28

2、实现负折射率的一种思路

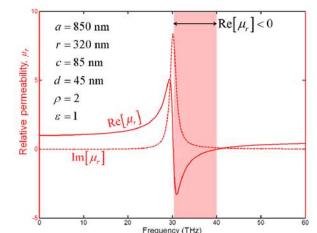
2.2 磁响应的调节

Pendry证明：通过金属开口谐振环结构实现负有效磁导率



垂直圆环的交变磁场在线圈中
诱导电流，产生对磁场的响应

$$\mu_{\text{eff}} = 1 - \frac{F\omega_{\text{mp}}^2}{\omega^2 - \omega_{\text{mo}}^2 + i\omega\gamma_m}$$



- F几何填充因子
- ω_{mp} 等效磁等离子体频率
- ω_{mo} 共振频率
- γ_m 阻尼损耗因子

Split-ring resonators

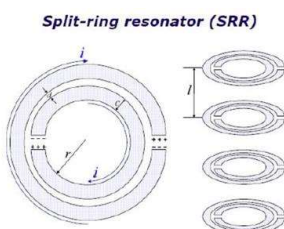
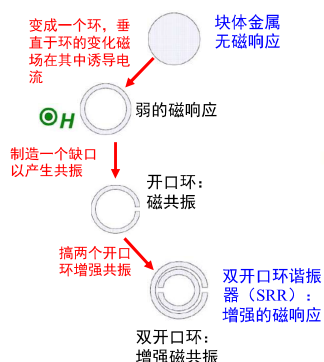
J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, W. J. Stewart, "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques 47(11), 2075-2084 (1999).

30

2、实现负折射率的一种思路

2.2 磁响应的调节

设计思路



Theory: Pendry et al., 1999.
Experiment: Smith et al., 2000.

31

2、实现负折射率的一种思路

2.3 双负负折射率材料——实现思路

一个直接想法
纳米金属线阵列+开口环谐振器阵列



双负材料

VOLUME 84, NUMBER 18

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 MAY 2000

Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity

D. R. Smith* Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz



在GHz范围首次实现双负材料

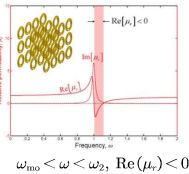
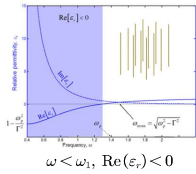
超材料实物图

Smith et al., PRL 84, 4184 (2000)

32

2、实现负折射率的一种思路

2.3 双负负折射率材料



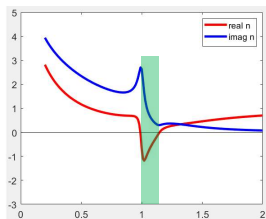
合理设计结构
参数, 使得:

$$\omega_{\text{mso}} < \omega_2 \leq \omega_1$$

在区间 $\omega_{\text{mso}} < \omega < \omega_2$

有 $\text{Re}(\mu_r) < 0$ & $\text{Re}(\epsilon_r) < 0$

对应负折射率区间



缺点:
损耗非常大!
共振附近伴随
巨大的损耗

33

2、实现负折射率的一种思路

2.4 双负与单负负折射率材料

- μ, ϵ 为负, 折射率必然为负
- 要折射率为负, 并不要求介电常数和磁导率同时为负
- “双负” 不是获得负折射率的必要条件

$$n = n_r + i n_i \Rightarrow n^2 = n_r^2 - n_i^2 + 2i n_r n_i$$

$$\epsilon \mu = (\epsilon_r + i \epsilon_i) (\mu_r + i \mu_i) = (\epsilon_r \mu_r - \epsilon_i \mu_i) + i (\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r)$$

$$\text{由 } n^2 = \epsilon \mu \Rightarrow 2n_r n_i = \epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r$$

因 $n_i > 0$, 使 $n_r < 0$ 只需 $\epsilon_r \mu_i + \epsilon_i \mu_r < 0$

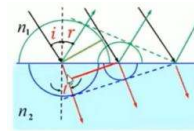
34

3、超材料的性质

3、超材料的性质

3.1 负折射率

- 自然材料依靠反射/折射调控电磁波
- 斯涅尔定律描述反射/折射



$$\sin r = \sin i$$
$$n_1 \sin i = n_2 \sin t$$

- 折射光与入射光在法线的两侧
- 折射取决于折射率的不同
- 子波干涉、光程差相等
- 传统光学器件 (如棱镜) 的基础

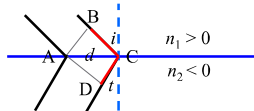
35

36

3、超材料的性质

3.1 负折射率

对负折射材料, 利用光程差相等, 得到折射定律



入射光:
介质1中: A点、B点等相位面

折射光:
介质2中: A点、D点等相位面

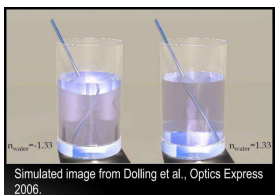
A点到A点的光程: 0

B点到D点的光程: $n_1 \overline{BC} + n_2 \overline{DC}$
A点到A点光程要与B点到D点的光程相等

$$n_1 \overline{BC} + n_2 \overline{DC} = 0$$
$$\Rightarrow n_1 d \sin i + n_2 d \sin |t| = 0$$

定义 t 在左侧为负, 则有: $n_1 \sin i = n_2 \sin t$

负折射率: 折射光与入射光在法线的同侧

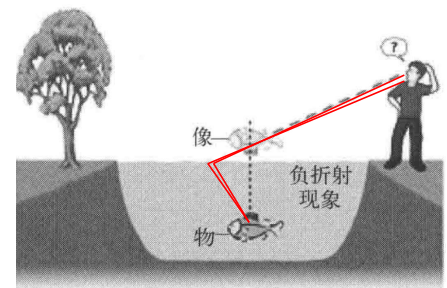


37

3、超材料的性质

3.1 负折射率

岸上的人观察负折射率水中的鱼, 观察到的是实际光线汇聚的**实像**, 并且相位于**水面**上方



38

3、超材料的性质

3.1 负折射率

实验验证

$-\epsilon$: 电共振结构 — 金属线
 $-\mu$: 磁共振结构 — 开口环



英国帝国理工: Pendry

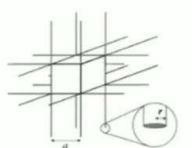


FIG. 1. The periodic structure is composed of infinite wires arranged in a simple cubic lattice, joined at the corners of the lattice. The large self-inductance of a thin wire delays the onset of current, mimicking the effect of electron mass.

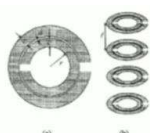


Fig. 12. (a) Plan view of a split ring during deformation of distance. (b) Sequence of split rings shown as they stacking sequence. Each split ring comprises two thin sheets of metal. The ring shown is a scaled-up version, defined by the parameters shown in Fig. 13.

共振原理 - 响应参数随频率变化可正、可负

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\omega_{ep}^2}{\omega_p^2 - \omega^2}$$
$$\mu_1 = 1 + \frac{\omega_m^2}{\omega_m^2 - \omega^2}$$

39

超材料的性质

3.1 负折射率

实验验证

Science

Current Issue First release papers Archive About

HOME > SCIENCE > VOL. 292, NO. 5514 > EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A NEGATIVE INDEX OF REFRACTION

REPORTS

f t in

Experimental Verification of a Negative Index of Refraction

R. A. SHELLEY, D. R. SMITH, AND S. SCHULTZ Authors Info & Affiliations

SCIENCE · 6 Apr 2001 · Vol 292, Issue 5514 · pp. 77-79 · DOI:10.1126/science.1058847

3,832 6,959

1 0

Abstract

Abstract

NOTES

REFERENCES

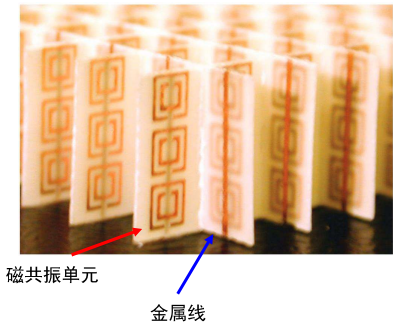
We present experimental scattering data at microwave frequencies on a structured metamaterial that exhibits a frequency band where the effective index of refraction (n) is negative. The material consists of a two-dimensional array of repeated unit

40

超材料的性质

3.1 负折射率

实验验证



3、超材料的性质

3.1 负折射率

实验验证

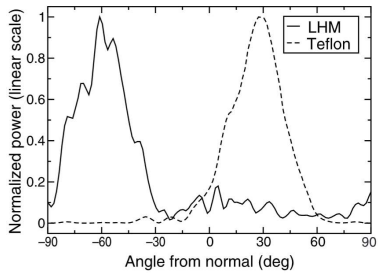
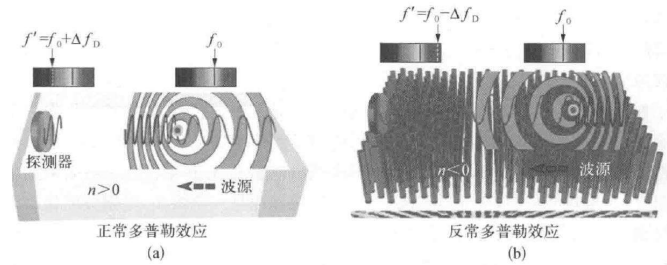


Fig. 3. Transmitted power at 10.5 GHz as a function of refraction angle for both a Teflon sample (dashed curve) and a LHM sample (solid curve). The two curves were normalized such that the magnitude of both peaks is unity. For

3、超材料的性质

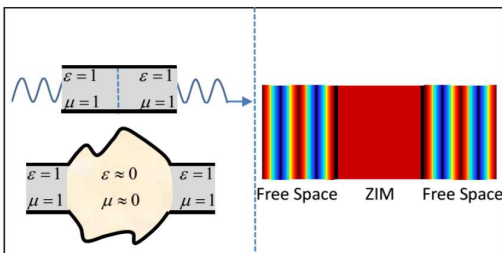
3.3 逆多普勒效应



3、超材料的性质

3.5 零折射率材料的性质

光通过零折射率材料和没通过一样，材料“隐身”了。



$$\Phi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = nk_0 \cdot \mathbf{r} = 0$$

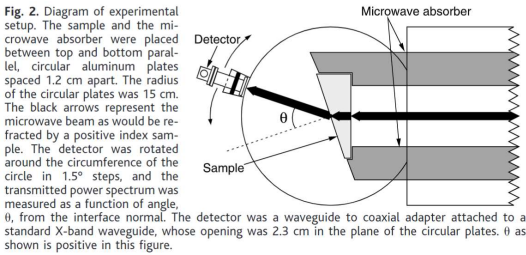
3、超材料的性质

3.1 负折射率

实验验证

楔形超构材料

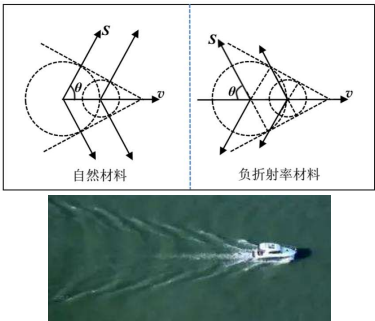
如果入射波和折射波在法线同侧，则为负折射！



3、超材料的性质

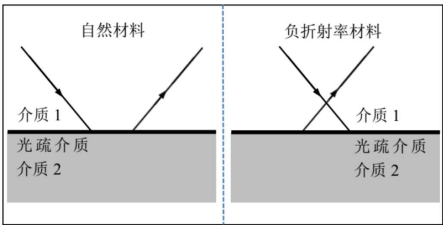
3.2 反常切伦科夫辐射

带电粒子在介质中运动的速度超过介质中的光速产生的辐射。



3、超材料的性质

3.4 逆Goos-Hanchen位移

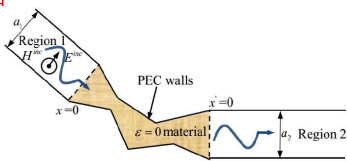


发生全反射时，反射光束在入射面内偏离几何光学路径的一小段横向位移

3、超材料的性质

3.5 零折射率材料的性质

波导超耦合



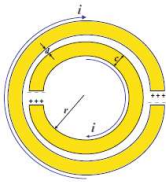
- 介质中波长： $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$
- 0折射率材料中波长无限大
- 波导与0折射率材料连接处反射损耗很小
- 实现波导间的任意耦合

4、光频段磁性超材料的实现

49

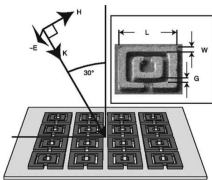
4、光频段磁性超材料的实现

开口环共振器（SRR）在光频段实现困难



等效为LC谐振电路

- 材料制备困难：亚波长尺寸——几十纳米量级
- 金属材料的特性于频率相关，在光频段不能看做完美导电
- 光刻工艺方便加工平面结构
- SRR要求**磁场分量垂直于环形面**，入射光只能倾斜入射



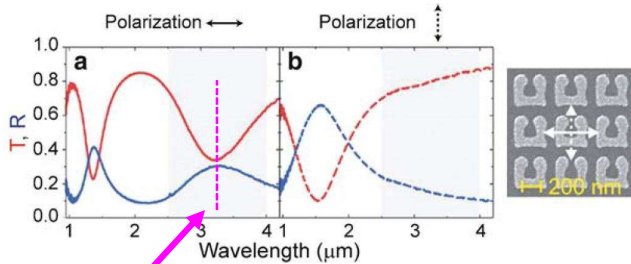
- SRR: 40 μm
- 1 THz
- 共振频率附近相对磁导率[-1.4]

T. J. Yen, et al, Science, 303, 1494 (2004)

31

4、光频段磁性超材料的实现

平面SRR结构实验结果



磁共振

- 电场驱动电流引起的磁响应
- 间接的磁响应
- 相比于磁场直接引起的磁共振而言更弱

S. Linden, et al., Science, 306, 1351 (2004)

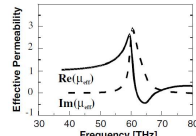
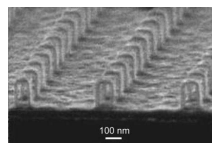
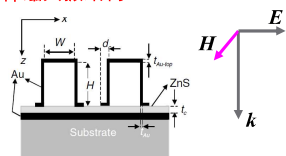
33

4、光频段磁性超材料的实现

新的设计方案需要满足的条件

- 1、同纳米加工工艺相兼容
- 2、磁共振由外界磁场直接激发
- 3、在高频的饱和行为可忽略

一种磁共振结构



- Au金属订书钉与其镜像构成一对SRR
- 实验验证~65 THz, $\mu_r \sim -0.5$
- 仿真：缩小尺寸，共振波长可以达到1.3 μm

35

4、光频段磁性超材料的实现

自然界的材料在光频段相对磁导率为1

- 原因：相比于光波分量同原子的耦合，磁分量同原子的耦合弱得多
- 同原子的磁耦合正比于波尔磁子 μ_B

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} = \alpha \frac{e}{2}$$

α : 精细结构常数 $\alpha = 1/137$

- 原子的电耦合正比于 ea_0

因此，光引起的磁效应**弱于电效应 α^2 倍**。

相当于仅光的电场分量在起作用。

- 自然材料在由于电子自旋引起的磁响应在频率高于GHz完全消失
- 没有磁单极子，不可能像电子一样获得磁等离子体

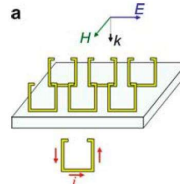
50

4、光频段磁性超材料的实现

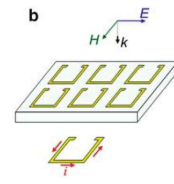
推向光频段的设计思路

设计一种基本单元，能够支持一种**环形电流分布模式**以便于产生磁矩。磁矩同磁场相互作用，引起磁响应

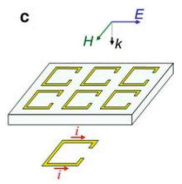
单SRR阵列结构



SRR垂直于衬底
外界磁场产生磁偶极子
磁场诱导电流：**直接作用**
制作困难



SRR平行于衬底
在H方向开口
外界电场产生磁偶极子
电场诱导电流：**间接作用**



SRR平行于衬底
在E方向开口
没有磁响应

32

4、光频段磁性超材料的实现

平面SRR阵列存在的问题

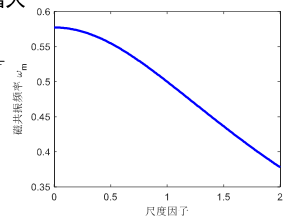
- 平面SRR结构随着尺寸的缩小，存在**共振频率饱和**的现象，即共振频率不随尺寸的缩小而继续增大

$$\text{磁共振频率: } \omega_m = \frac{1}{\sqrt{a^2 + \text{const.}}}$$

a : 尺度因子，正比于SRR尺寸

- 饱和现象源于金属的等离子体效应，是平面SRR谐振器的本征特性，与激发方式无关

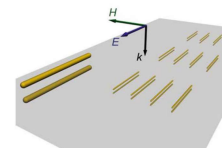
- 仿真表明共振波长最短只能到 800 nm



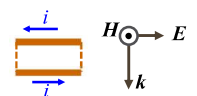
34

4、光频段磁性超材料的实现

纳米棒阵列磁共振结构

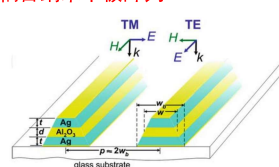


基本单元：
等效为双
开口线圈

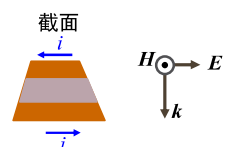


可实现近红外负磁导率：1-1.5 μm
G. Dolling, et al., Opt. Lett., 30, 3198 (2005)

耦合纳米平板阵列



基本单元：
等效为双
开口线圈



36