

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200610020630.0

[51] Int. Cl.

H01P 3/18 (2006.01)

H01P 1/11 (2006.01)

H01P 1/19 (2006.01)

H01P 1/215 (2006.01)

H01P 1/23 (2006.01)

H01F 1/00 (2006.01)

[43] 公开日 2006年9月20日

[11] 公开号 CN 1835277A

[22] 申请日 2006.3.31

[21] 申请号 200610020630.0

[71] 申请人 电子科技大学

地址 610054 四川省成都市建设北路二段4号

[72] 发明人 文光俊 曹云建 吴凯敏

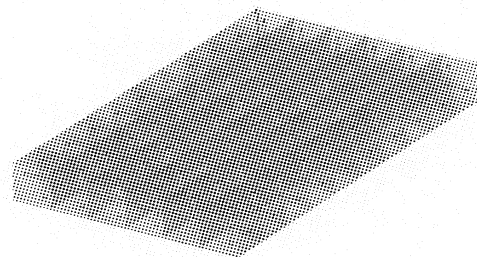
权利要求书2页 说明书9页 附图7页

[54] 发明名称

一种负折射率微波媒质材料及其制备方法

[57] 摘要

一种负折射率微波媒质材料及其制备方法，属于微波材料技术领域。材料由单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料和金属导线组成，所述金属导线均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中。针对金属导线阵列而言，本发明提供了三种负折射率材料：一维晶格型、二维晶格型和三维晶格型。制备方法是將宽带单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料和宽带单负介电常数的金属导线阵列结构，二者相互重叠，构成所述负折射率媒质。本发明的负折射率媒质材料，其工作频率更宽；其折射率可随外加调控磁场的大小而改变；本发明所述的负折射率媒质材料的制备方法简单，所用到的各项技术均为现存的成熟技术。



1、一种负折射率微波媒质材料，由单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料和金属导线组成，其特征是，所述金属导线均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中。

2、根据权利要求1所述的一种负折射率微波媒质材料，其特征是，所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成线状阵列。

3、根据权利要求1所述的一种负折射率微波媒质材料，其特征是，所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成面状阵列。

4、根据权利要求1所述的一种负折射率微波媒质材料，其特征是，所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成立体网格状阵列。

5、根据权利要求1、2、3或4所述的一种负折射率微波媒质材料，其特征是，所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线可以是圆柱形金属导线、也可以是微带状金属导线。

6、根据权利要求1、2、3或4所述的一种负折射率微波媒质材料，其特征是，所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线的截面尺寸在亚毫米量级；阵列间隔尺寸在毫米量级。

7、一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤1 制备适当厚度的YIG类绝缘型铁磁材料基片；

步骤2 在步骤1所得的YIG类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出一维晶格型金属微带线阵；

步骤3 将步骤2所得的沉积了一维晶格型金属微带线阵的YIG类绝缘型铁磁材料基片重叠堆积多层，即可获得本发明所述的线阵（一维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料。

8、一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤1 制备适当厚度的YIG类绝缘型铁磁材料基片；

步骤2 在步骤1所得的YIG类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出二维晶格型金属微带线面阵；

步骤3 将步骤2所得的沉积了二维晶格型金属微带线面阵的YIG类绝缘型铁磁材料基

片重叠堆积多层，即可获得本发明所述的面阵（二维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料。

9、一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤1 制备适当厚度的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片；

步骤2 在步骤1所得的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出二维晶格型金属微带线面阵；并在基片上所有二维晶格点的地方打一个通孔，通孔的大小以略小于金属微带线的尺寸为宜；

步骤3 在将步骤2所得的沉积了二维晶格型金属微带线面阵的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片重叠堆积多层，堆积的过程中，在所有通孔处沉积与金属微带线相同的金属材料，即可获得本发明所述的立体网格阵（三维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料。

一种负折射率微波媒质材料及其制备方法

技术领域

一种负折射率微波媒质材料及其制备方法，属于微波材料技术领域。

背景技术

自然界中天然物质的介电常数与磁导率的实部在整个电磁波谱内都是非同时为负的，其折射率的实部是正数。迄今为止，自然界中尚未发现介电常数和磁导率同时为负值的天然材料。

1964年，前苏联科学家 V. G. Veselago 在 “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ” (Soviet Physics Uspekhi, Vol. 10, No. 4, pp509-514, Apr 1968) 一文中理论分析了电磁波在假想的介电常数与磁导率同时为负数的各向同性均匀媒质中的电动力学行为，预见电磁波与这种假想材料的相互作用将产生非常特殊的传输/折射/反射特性：(1) 假想材料中电磁波电场、磁场和传播波矢三者之间成左手关系，电磁波相速方向与能速方向相反（如图 1 所示）；(2) 电磁波通过假想材料与正折射率材料的分界面时发生逆折射效应 (Reversed Snell Refraction)，在界面上产生负电磁波压力；(3) 逆向多普勒效应 (Reversed Doppler Effect)；(4) 逆切伦柯夫辐射 (Reversed Cerenkov Radiation)；(5) 一块假想材料平板具有理想电磁成像能力。Veselago 称这种假想材料为“左手材料” (Left-Handed Material)，现学术界亦有定义其为双负材料 (Double Negative Materials-DNM)、负折射率媒质 (Negative Index of Refraction Materials - NIRM)、返波材料 (Backward Wave Materials-BWM)、异向媒质 (Metamaterial) 等，本发明采用负折射率媒质 (NIRM) 定义，以强调材料的折射率特征。

1998年，J. Pendry 等人在 “Low frequency plasmons in thin-wire structures” (J. Phys.: Condens. Matter., Vol. 10, pp4785-4809, 1998.) 一文中提出：对于以金属导体线为单元所构成的晶格型宏观阵列 (如图 2 所示) 来说，在小于金属导体线等离子体频率 f_p 的电磁波谱内，其等效介电常数 $\epsilon_{eff}(f)$ 为负。

物理结构如图3所示，它由3毫米厚的聚苯乙烯薄板交错组成，薄板上置有相距5毫米的平行金属线阵列，金属线为直径20微米的镀金钨线。这些薄板交错叠加从而形成 $5mm \times 5mm \times 6mm$ 的单元格，器件整个尺寸为： $200mm \times 200mm \times 120mm$ (如图4)。各层旋转90度叠加，从而构建成了一个三维结构。此结构可以通过各层之间添加空白层而改变金属

线密度，从而改变其等离子体频率。

1999年，J. Pendry 等人在“Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena”（IEEE Trans. Microwave Theory Tech. , Vol. 47, No. 11, pp2075-2084, Nov 1999.）一文中又提出：对于以双金属谐振环（如图5所示）为单元所构成的晶格型宏观阵列（如图6所示）来说，在大于金属环谐振频率的电磁波谱内，其等效磁导率 $\mu_{eff}(f)$ 为负。

2000年，D. R. Smith 等人基于 J. B. Pendry 提出的构造单负介电常数媒质、单负磁导率媒质的思想，首次人工合成出在 X 波段等效介电常数和等效磁导率同时为负的负折射率微波媒质（如图7所示），并于次年在实验中观察到 X 波段的电磁波通过这种人工合成媒质与空气的交界面时确实发生了负折射现象（实验装置如图8所示）。随后，加拿大多伦多大学 G. V. Eleftheriades 和美国西雅图 Boeing Phantom Works 的 C. G. Parazzoli 所领导的两组研究人员分别发表了在微波波段负折射率材料（如图9所示）的实验报告，他们在实验中直接观测到了负折射率材料的逆切伦柯夫辐射和负折射现象，进一步证实了负折射率媒质的存在，亦表明人工能够合成出负折射率微波媒质。

目前，NIRM 的研究已成为国际物理学和电磁学界一个十分引人注目的前沿领域，众多学者对 NIRM 制造方法，电磁波在 NIRM 中的传播特性、散射特性等进行了较深入的研究，产生了许多新的成果。电磁波在 NIRM 中具有独特的电磁特性，决定了其在军事和民用两方面有着广泛的应用前景。NIRM 可用于制造高定向度天线，实现完美透镜，聚焦电磁波波束，制造大容量光盘等新颖光学元器件。NIRM 研究领域的研究热点主要有：（1）理论上继续完善，力争完美解释 NIRM 领域中存在的各种电磁特性和现象；（2）探索合成稳定的、宽频带、低损耗、可调谐 NIRM 的新方法，以便于在实际中得到更大范围的应用；（3）利用纳米技术和集成电路实现 NIRM 小型化，以推动其工作波长向毫米波，光波波段发展。

迄今为止，人工合成 NIRM 的方法主要有三种：（1）由金属导体线和金属谐振环相重叠的微结构为基本单元构成的晶格型宏观阵列结构，其基本思想是将等效介电常数为负的单金属导体线阵列宏结构与等效磁导率为负的单金属谐振环阵列宏结构二者在空间上相互叠加，构成的复合结构的等效折射率在等效介电常数为负的电磁波频段与等效磁导率为负的电磁波频段相重叠的谱域内为负；（2）由串联电容和并联电感高通传输线基本单元构成的一维、二维或三维阵列结构，其基本思想是将常规低通传输线基本单元——串联电感和并联电容的连接方式对偶交换，产生的串联电容和并联电感为基本单元的高通传输线的等效介电常数和等效磁导率同时为负；（3）光子晶体，由两种或两种以上的电介质材料周期性排列而成的人造材料，排列周期为波长量级，具有光导带隙，从而控制电磁波在其中的传播，在一定条件下，光子

晶体表现出负折射率特性。上述第一种方法存在结构复杂，难于加工，工作频带较窄，不宜推广到光波段等缺点。第二种方法需要加载集总元件，不适合毫米波、太赫兹、红外波段等高频应用。第三种方法要求满足 Bragg 散射条件，使其加工及实际应用困难，如各向异性、模式耦合失配及高阶衍射都是较难解决的问题；由于其工作波长与排列周期在同一个常量级，其在器件小型化方面的应用也有很大的局限性。因此，探索和发展人工合成 NIRM 的新方法具有重要的科学意义和实用价值。

发明内容

本发明提供一种负折射率微波媒质材料及其制备方法，所述负折射率微波媒质材料的工作频率更宽、性能稳定；所述制备方法简单易行。

本发明的基本思想如下：

自然界中一些天然物质，如金属和等离子体，对于频率低于其等离子体频率的电磁波而言，其介电常数表现为负值；铁磁材料和亚铁磁材料，在外静态磁场作用下，对于频率在铁磁材料的铁磁谐振频率至抗铁磁谐振频率之间的电磁波而言，其磁导率为负值。若在单负介电常数的基体材料中嵌入类金属谐振环阵列，或在单负磁导率的基体材料中嵌入类金属导体线阵列，构成的复合媒质有可能在宽电磁波频段内其等效介电常数、等效磁导率同时为负，从而能人工合成出宽带微波 NIRM。

本发明详细技术方案为：

一种负折射率微波媒质材料，由单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料和金属导线组成，其特征是，所述金属导线均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中。

所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成线状阵列（如图 10 所示）。

所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成面状阵列（如图 11 所示）。

所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线构成立体网格状阵列（如图 12 所示）。

所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线可以是圆柱形金属导线、也可以是微带状金属导线。

所述均匀嵌入单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料中的金属导线的截面尺寸在亚毫米量级；阵列间隔尺寸在毫米量级。

一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤 1 制备适当厚度的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片。

步骤 2 在步骤 1 所得的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出一维晶格型金属微带线阵。

步骤 3 将步骤 2 所得的沉积了一维晶格型金属微带线阵的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片重叠堆积多层，即可获得本发明所述的线阵（一维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料（如图 10 所示）。

一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤 1 制备适当厚度的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片。

步骤 2 在步骤 1 所得的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出二维晶格型金属微带线面阵。

步骤 3 将步骤 2 所得的沉积了二维晶格型金属微带线面阵的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片重叠堆积多层，即可获得本发明所述的面阵（二维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料（如图 11 所示）。

一种负折射率微波媒质材料的制备方法，其特征在于，它包括以下步骤：

步骤 1 制备适当厚度的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片。

步骤 2 在步骤 1 所得的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片的表面沉积出二维晶格型金属微带线面阵；并在基片上所有二维晶格点的地方打一个通孔，通孔的大小以略小于金属微带线的尺寸为宜。

步骤 3 在将步骤 2 所得的沉积了二维晶格型金属微带线面阵的 YIG 类绝缘型铁磁材料基片重叠堆积多层，堆积的过程中，在所有通孔处沉积与金属微带线相同的金属材料，即可获得本发明所述的立体网格阵（三维晶格型）金属导线负折射率微波媒质材料（如图 12 所示）。

本发明的实质在于将微观上是宽带单负磁导率的绝缘型铁磁材料或绝缘型亚铁磁材料和宏观上是宽带单负介电常数的金属导线阵列结构，二者在空间上相互重叠，构成复合媒质。其等效折射率将在等效介电常数为负的电磁波频段与等效磁导率为负的电磁波频段相重叠的谱域内同时为负，从而人工合成出 NIRM。

通过调控外加磁场的大小,可调控该复合材料的等效介电常数与等效磁导率,从而使材料的折射率随外加调控磁场的变化而变化,同时,材料的传输/折射/散射/多普勒效应等电磁特性亦随之变化。当金属物体表面裹附有此种 NIRM 后,通过调控外加磁场,则可随之调控物体的雷达散射截面(RCS)和多普勒频移,从而开辟出一条智能控制目标物体的 RCS 和多普勒频移的新途径,其在雷达对抗、后向散射型 RFID 等军事民用领域将有着非常广泛的应用前景,具有重要的科学意义与实用价值。

本发明的有益效果是:

- 1、本发明所述的负折射率媒质材料,其工作频率比现有的折射率媒质材料更宽;
- 2、本发明所述的负折射率媒质材料,其折射率可随外加调控磁场的大小而改变;
- 3、本发明所述的负折射率媒质材料,具有更广的应用前景;
- 4、本发明所述的负折射率媒质材料的制备方法简单,所用到的各项技术均为现存的成熟技术。

附图说明

图 1 为电磁波电场、磁场和传播波矢三者之间的左手关系示意图,其中, S 为代表能量方向的坡印亭矢量, k 为代表相速方向的波矢量,二者方向相反。

图 2 为金属导体线阵列结构示意图。

图 3 为负介电常数材料的物理结构示意图。

图 4 为图 3 所示负介电常数材料物理结构的实物照片。

图 5 为单个金属谐振环结构示意图。

图 6 为具有金属谐振环的负折射率材料结构示意图。

图 7 为具有金属谐振环的负折射率材料的实物照片一。

图 8 为负折射率实验测试装置。被测样品(棱镜)置于两块吸波材料之间;粗黑箭头表示来波方向和折射(按 $n > 0$)方向;检测器是用 X 频段波导连接的微波功率测量装置,实际上是用波导一同轴转换器及 HP8756 A 型标量网络分析仪。

图 9 为具有金属谐振环的负折射率材料的实物照片二。

图 10 为本发明所述的具有一维晶格型金属导带阵列结构的负折射率材料结构示意图。

图 11 为本发明所述的具有二维晶格型金属导带阵列结构的负折射率材料结构示意图。

图 12 为本发明所述的具有三维晶格型金属导带阵列结构的负折射率材料结构示意图。

图 13、14 为电磁波沿垂直于磁化方向传播时本发明所述负折射率媒质材料的等效电磁特性，其中，图 13 为等效介电常数频率响应特性，图 14 为等效磁导率频率响应特性。

图 15 为单独亚铁磁材料-YIG 的电磁仿真模型示意图。

图 16 为电磁波沿垂直于磁化方向在 YIG 中传播时电磁波传输系数仿真结果示意图。

图 17 为电磁波在均匀媒质（相对介电常数为 12.7）内嵌金属导体带阵列结构中的传播特性仿真结果示意图。

图 18 为电磁波在亚铁磁材料-YIG 中内嵌了金属导体带阵列结构的复合媒质中的传播特性示意图（电磁波传播方向垂直于磁化方向）。

图 19 为电磁波在亚铁磁材料-YIG 中内嵌了金属导体带阵列结构的复合媒质与正折射率媒质交界面的折射特性的仿真模型示意图。

图 20 为电磁波在图 19 所示两种媒质交界区域内折射特性的仿真结果示意图（图中箭头方向代表能量方向）。

具体实施方式

以三维细金属导体线阵列结构嵌入到基体 YIG 中的情形为例，具体说明本发明的相关内容。

为了验证基于亚铁磁材料的负折射微波媒质合成方法的可行性，可依据 YIG 在微观上实现负值磁导率，三维金属导体线阵列结构在宏观上实现负介电常数的原理，利用有效媒质理论数值计算出复合媒质的等效介电常数与等效磁导率的频率响应特性。

由于导体线阵列结构的体积远小于 YIG 的体积，可采用 Maxwell-Garnett 有效媒质理论模型：

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_b}{\varepsilon + 2\varepsilon_b} = f_a \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{\varepsilon_a + 2\varepsilon_b} \quad \frac{\mu - \mu_b}{\mu + 2\mu_b} = f_a \frac{\mu_a - \mu_b}{\mu_a + 2\mu_b} \quad (1)$$

其中， f_a 、 ε_a 、 μ_a 分别为媒质 A 的体积分数、介电常数和磁导率， $f_a \ll 1$ ； ε_b 、 μ_b 分别为媒质 B 的介电常数和磁导率； ε 、 μ 分别为复合媒质的等效介电常数和等效磁导率。

Maxwell-Garnett 模型适合于球形微粒的合成，但金属的 Drude 模型与实验证明，利用该模型定性分析 YIG 中内嵌了三维金属导体线阵列结构的复合媒质的电磁特性在理论上是适

合的。

假定媒质 A 为三维金属导体线阵列结构，物理参数设置为 $a = 3.5\text{mm}$ 、 $r = 0.25\text{mm}$ 。媒质 B 为 YIG，物理参数如前所述。那么，我们得到如下解析式

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad \mu_a = 1 \quad f_a \approx \frac{3\pi r^2 a - 2\pi r^3}{a^3} \quad \varepsilon_b = \varepsilon_r = 12.7$$

电磁波沿垂直于磁化方向传播时，由式（2）得到 YIG 中本征波 I 对应的等效磁导率为

$$\mu_b = \dot{\mu}_1^2 - \dot{\mu}_2^2 / \mu_0 \dot{\mu}_1 \quad (2)$$

根据前述参数设置，将 ε_a 、 μ_a 、 f_a 、 ε_b 和 ε_r 以及（2）代入式（1）的数值计算结果如图 13、14 所示。对照图 13 与图 14 可知，存在 C 波段电磁波频率的重叠区域，使得复合媒质的等效磁导率与等效介电常数同时为负。电磁波沿平行于磁化方向传播时，同样存在 C 波段电磁波频率的重叠区域，使得复合媒质的等效磁导率与等效介电常数同时为负。

因此，在亚铁磁材料-YIG 中内嵌金属导体线阵列结构合成 NIRM 的方法在理论上是可行的，这种复合媒质真实的电磁特性还需要通过实验来验证，但初步的数值分析结果为人工合成及设计 NIRM 提供了有益的指导作用。

为了得到严格的数值计算结果与尽量准确的电磁仿真结果，从而进一步验证基于亚铁磁性材料的负折射微波媒质材料的特性，本发明利用时域有限积分法三维电磁仿真程序（三维电磁场仿真商业软件 CST Microwave Studio）模拟了以 YIG 为基体，在其中嵌入等效介电常数为负的金属导体线阵列所构成的复合媒质中电磁波传输特性，电磁波在复合媒质与正折射率媒质交界面处的折射特性。

1 电磁波传播特性仿真

为了便于比较，我们分别对单独的亚铁磁材料-YIG、单独的金属导体带阵列结构及 YIG 内嵌了金属导体线阵列的复合结构进行了仿真。这里仅考虑电磁波沿垂直于磁化方向传播时的情况。

1.1 单独亚铁磁性材料-YIG 的电磁特性仿真

仿真模型如图 15 所示，YIG 三维尺寸 X、Y、Z 分别为 24mm、4mm 和 40mm，设置 YIG 在外加磁场 $H_0 = 1200$ 奥斯特作用下，其饱和磁化强度 $M_0 = 1750$ 高斯，相对介电常数 $\varepsilon_r = 12.7$ ，铁磁谐振线宽 $\Delta H = 300$ 高斯，外加磁场 H_0 沿 Z 轴方向。YIG 两端均匀介质的相对介电常数为

12.7, 相对磁导率为 1。X、Y 方向边界条件均设置为电壁(切向电场为零), Z 方向边界条件为开放波导。在 Z 方向上的起点 Z_{\min} 处与终点 Z_{\max} 处分别设置为激励端口 1 和端口 2。

仿真结果如图 16 所示。从图 16 中可见电磁波在 3.89–8.33 GHz 频率范围的传输系数均低于 -40 dB, 表明该频率范围的入射电磁波在 YIG 中受到严重衰减而不能通过, 该频段为电磁波在 YIG 中的传播禁带, 也即是 YIG 等效磁导率为负的频带。

1.2 单独金属导体带阵列宏结构的电磁特性仿真

金属导体线阵列宏结构如图 7 所示, 为了便于加工, 金属导体线采用方形带状结构, 单个导体带的横截面尺寸为 $0.30\text{mm} \times 0.30\text{mm}$, 长度为 4.0mm, 阵列周期 $a=4.0\text{mm}$ 。仿真模型参数、边界条件及电磁波激励设置与图 15 的模型相同, 只是将其中的 YIG 替换为金属导体线阵列结构。为了避免空间色散, 入射的平面波电场方向平行于导体带方向。设置导体线周围媒质的相对介电常数为 12.7, 相对磁导率为 1。仿真结果如图 17 所示。从图 17 可见电磁波在 7.02–9.80 GHz 频率范围的传输系数均低于 -30 dB, 表明该频率范围的入射电磁波在金属导体带阵列结构中受到衰减而不能通过, 该频段为电磁波在其中的传播禁带。根据前面的理论分析, 该金属导体带阵列结构的等效介电常数在频率 7.02–9.80 GHz 范围内为负值。

1.3 YIG 中内嵌了金属导体带阵列结构的复合媒质的电磁特性仿真

人工合成的复合媒质的结构模型如图 10 所示。为了便于复合媒质的加工, 金属导体线采用方形带状结构, 其三维尺寸 X、Y 和 Z 分别为 0.3mm、4.0mm 和 0.3mm。限于计算机内存和软件允许的网格数, 在保证仿真精度的前提下, 仅模拟了 YIG 中内嵌一维导体线阵列的情况。

仿真模型参数、边界条件及电磁波激励设置与图 15 所述模型相同, 只是将其中的 YIG 替换为如图 10 所示的复合媒质。YIG 及金属线物理参数如前所述。在仿真中, 复合媒质未与 Y 方向电壁相互接触, 相距为 1mm, 中间是介电常数为 12.7, 磁导率为 1 的均匀介质。

YIG 中内嵌金属导体带阵列结构的复合媒质中电磁波传输特性的仿真结果如图 18 所示, 由图可见传输系数峰值为 -20.15 dB, 位于频率 8.13 GHz 处, 3dB 带宽为 7.51–8.65 GHz。此频段内复合媒质的传输系数与同频段单 YIG 的传输系数相比较提高了 40 dB 以上, 与单金属导体带阵列结构的传输系数相比较提高了 20 dB 以上, 因此可以认为频带 7.51–8.65 GHz 为该复合媒质的一个电磁波传播通带。通带位于图 16 和图 17 所示禁带的重叠区域, 按照前述理论分析, 该复合媒质等效折射率在此通带内应为负值。

2 电磁波在两种媒质交界面的折射特性仿真

为验证在上述通带内复合媒质的等效折射率是否为负, 本发明仿真了入射电磁波在复合

媒质与正折射率媒质交界面处的折射特性。

楔形复合媒质物理模型如图 19 所示，YIG 中内嵌了方形金属导体带，YIG 与导体带物理参数与前述（如图 15 所示）模型相同。X、Y 方向为开放边界条件，Z 方向为电壁，激励为沿 Y 轴正方向传播的平面波。

工作频率为 8.13 GHz 的电磁波在复合媒质与正折射率媒质交界区域的功率流方向图如图 20 所示。从图 20 可见在两种媒质的交界面，透射波能量向入射波法线的同一侧偏转（如图中箭头所示），表明发生了负折射现象。进一步仿真模拟表明，在 7.51–8.13 GHz 的通带内，电磁波在两种媒质的交界面处依然会发生负折射现象，但是在大于 8.13 GHz 的通带内则逐渐会发生常规的正折射现象。从而确证了在 7.51–8.13 GHz 的通带内，复合媒质的等效折射率为负，此频段位于周期导体线阵列宏结构的等效介电常数为负的 7.02–9.80 GHz 频带与基体 YIG 等效磁导率为负的 5.22–8.14 GHz 频带相重叠的频谱内，表明本发明提出的负折射率媒质材料及其制备方法是有效可行的。

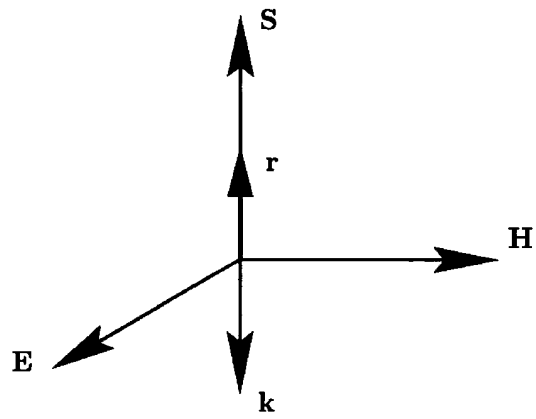


图 1

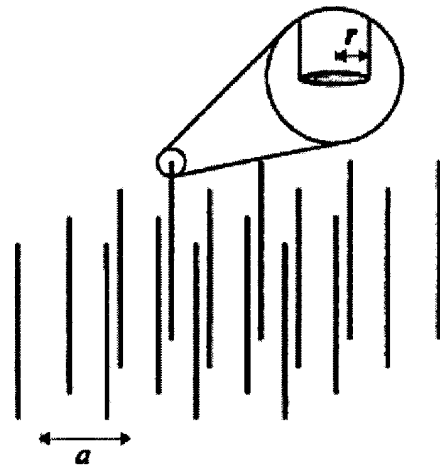


图 2

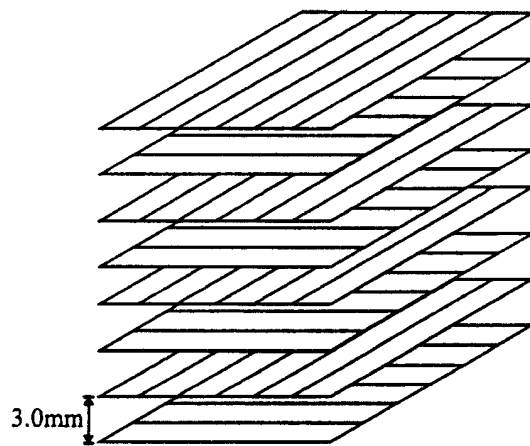


图 3

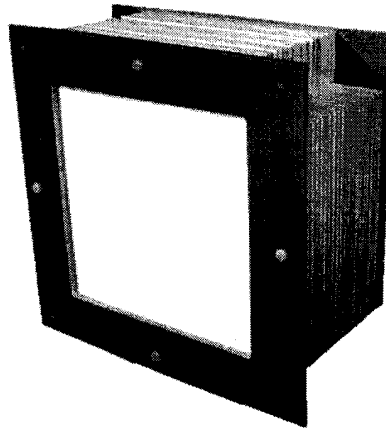


图 4

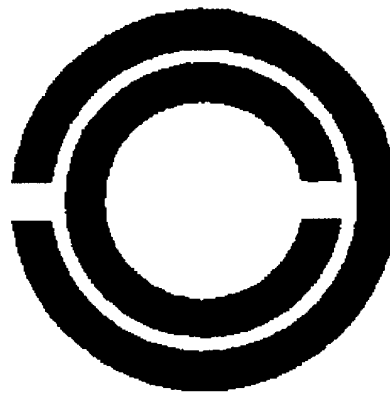


图 5

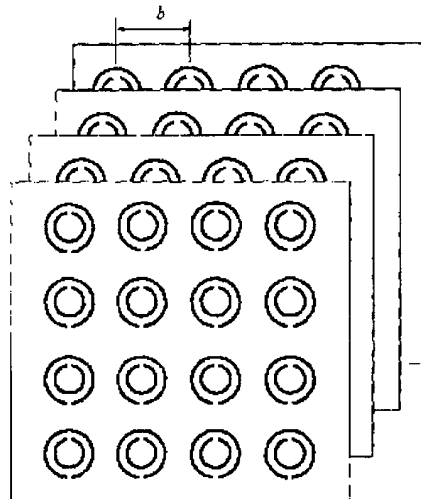


图 6

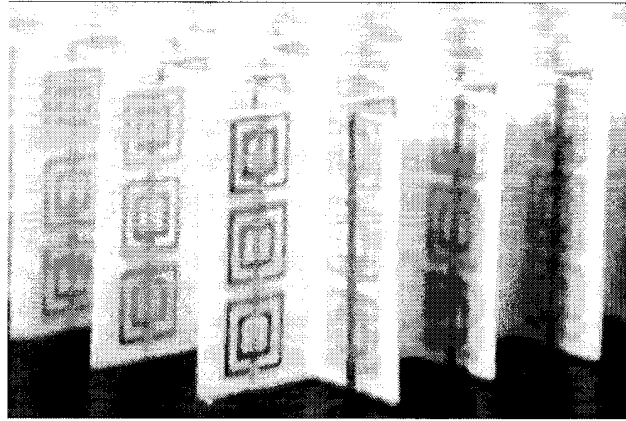


图 7

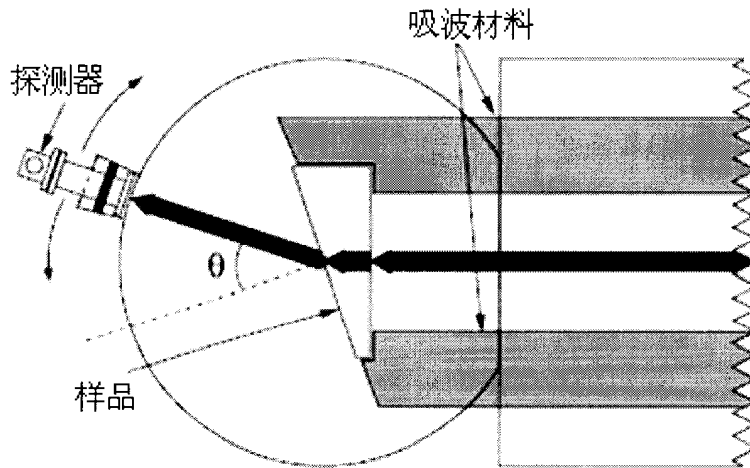


图 8



图 9

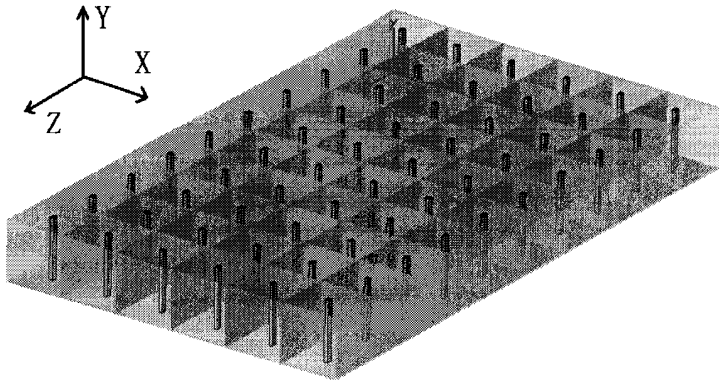


图 10

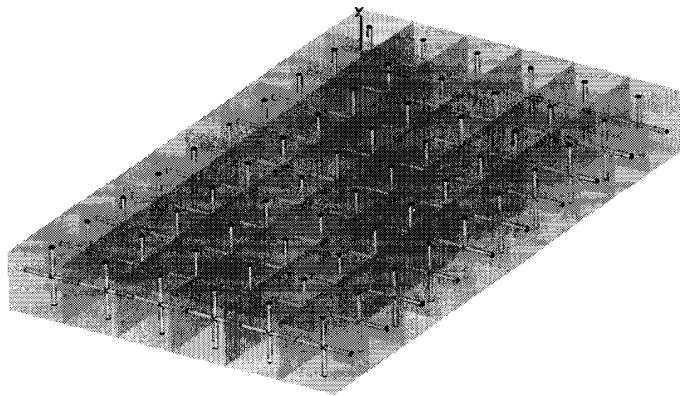


图 11

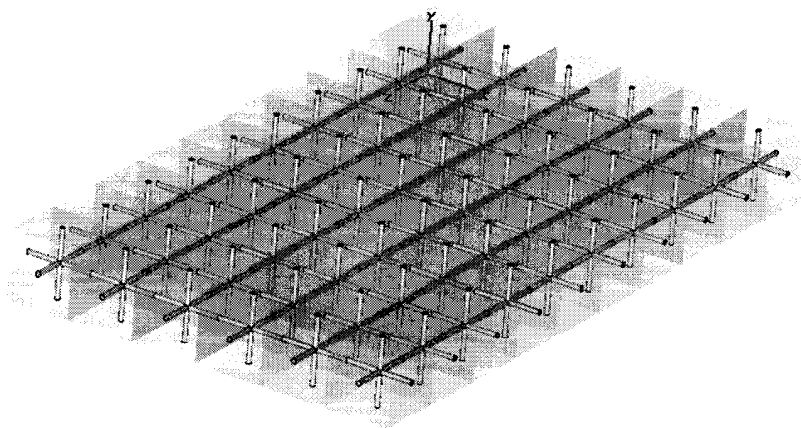


图 12

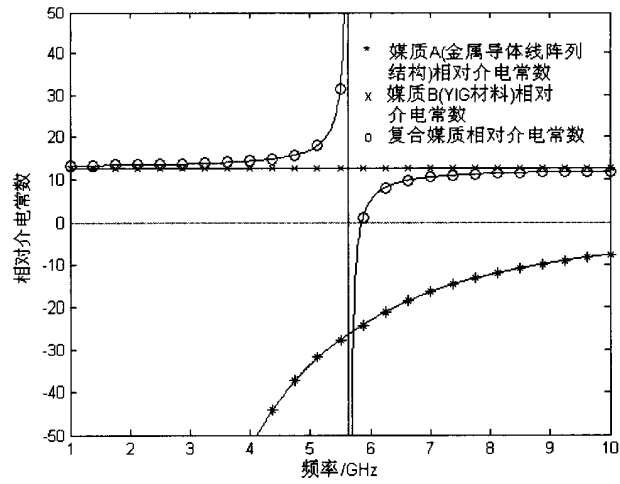


图 13

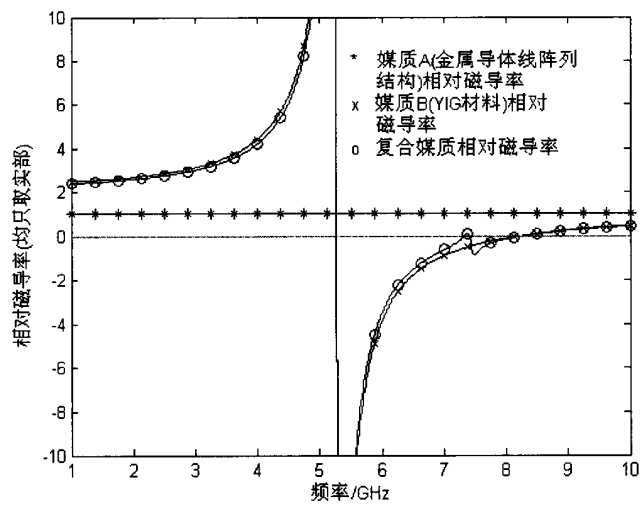


图 14

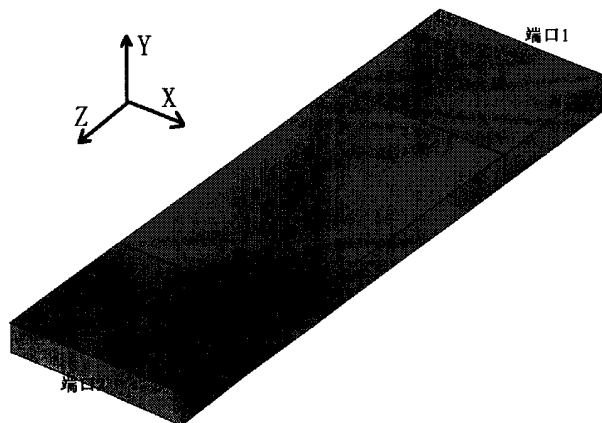


图 15

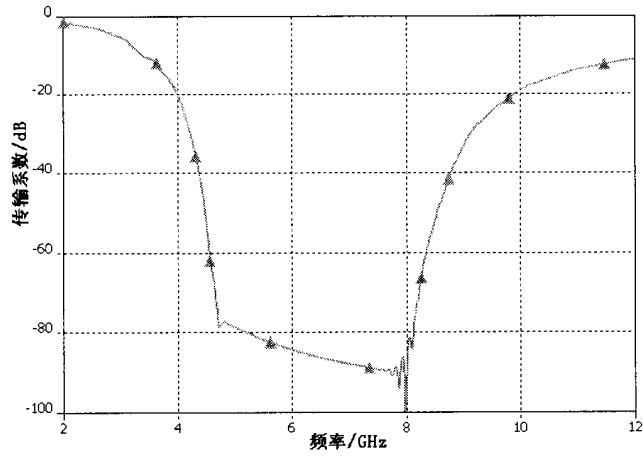


图 16

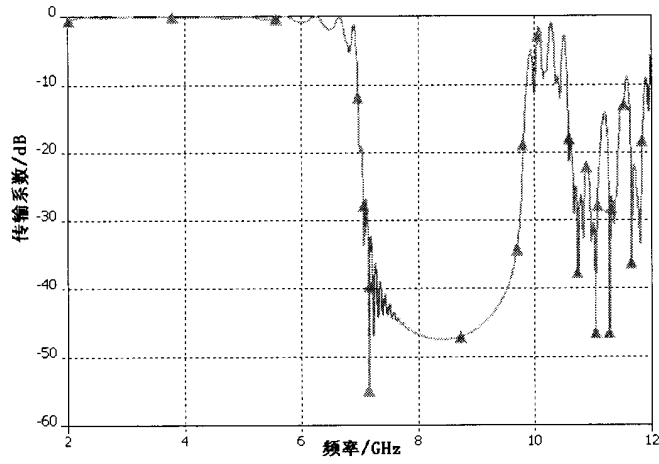


图 17

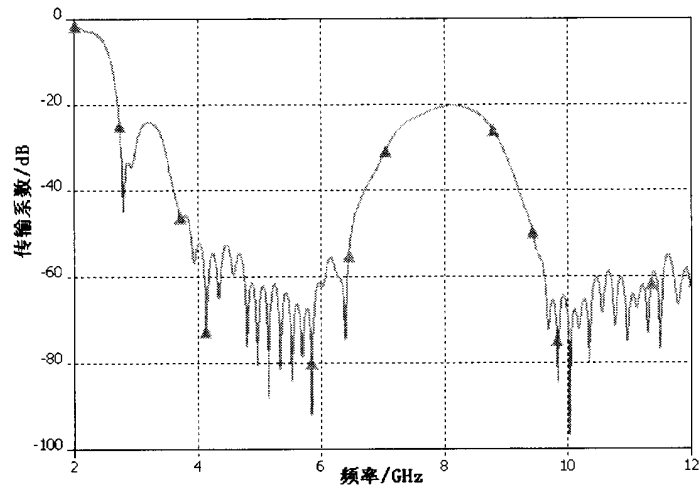


图 18

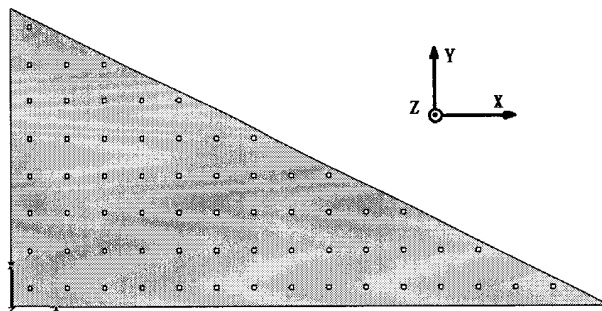


图 19

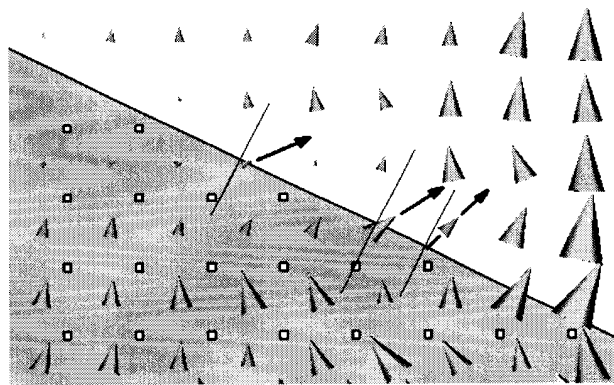


图 20