(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2012 年 10 月 4 日 (04.10.2012)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2012/129924 A1

(51) 国际专利分类号:
H05K 9/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2011/083221

(22) 国际申请日: 2011 年 11 月 30 日 (30.11.2011)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201110081014.7 2011 年 3 月 31 日 (31.03.2011) CN
201110080843.3 2011 年 3 月 31 日 (31.03.2011) CN

(71) 申请人 (对除美国外的所有指定国): **深圳光启高等理工研究院 (KUANG-CHI INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区高新区中区高新中一道 9 号软件大厦, Guangdong 518057 (CN)。 **深圳光启创新技术有限公司 (KUANG-CHI INNOVATIVE TECHNOLOGY LTD.)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区香梅路 1061 号中投国际商务中心 A 栋 18B, Guangdong 518034 (CN)。

(72) 发明人; 及

(75) 发明人/申请人 (仅对美国): **刘若鹏 (LIU, Ruopeng)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区高新区中区高新中一道 9 号软件大厦, Guangdong 518057 (CN)。 **栾琳 (LUAN, Lin)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区高新区中区高新中一道 9 号软件大厦, Guangdong 518057 (CN)。 **赵治亚 (ZHAO, Zhiya)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区高新区中区高新中一道 9 号软件大厦, Guangdong 518057 (CN)。 **王文剑 (WANG, Wenjian)** [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山

[见续页]

(54) **Title**: WAVE-ABSORBING METAMATERIAL

(54) **发明名称** : 一种吸波超材料

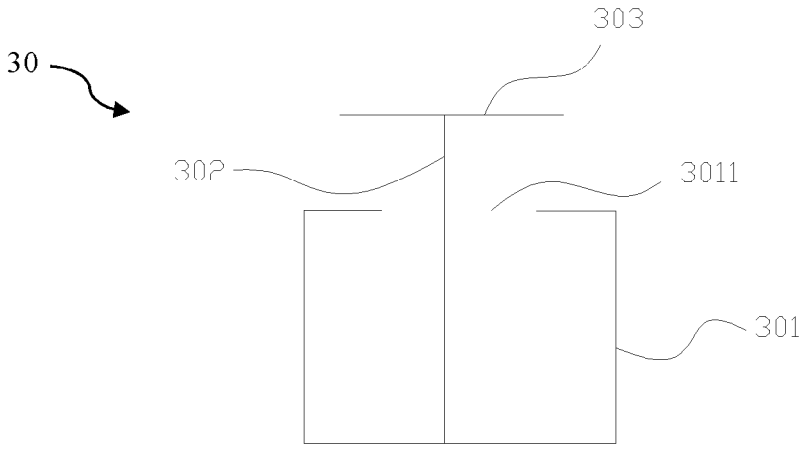

图 3 /Fig.3

(57) **Abstract**: The present invention relates to a wave-absorbing metamaterial, which comprises a substrate having two opposite lateral surfaces. Of the two opposite lateral surfaces, at least one lateral surface has attached thereto multiple periodically arranged artificial metal microstructures. When an electromagnetic wave having an incidence direction perpendicular to the two opposite lateral surfaces of the substrate passes through the metamaterial, the relative dielectric constant of the metamaterial is approximately equal to the relative magnetic permeability thereof. The present invention employs a wave-absorbing principle different from that of conventional wave-absorbing materials, the multiple artificial metal microstructures are periodically arranged on the substrate, and the artificial metal microstructures are adjusted to achieve an ideal wave-absorbing effect. This provides the advantages of lightweight, thinness, and easiness of electromagnetic parameter adjustment.

(57) **摘要**: 本发明涉及一种吸波超材料，其包括具有两相对侧表面的基材，该两相对侧表面至少一侧表面上附着有周期排列的多个人造金属微结构；当入射方向垂直于该基材两相对侧表面的电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和相对磁导率基本相等。本发明采用不同于传统吸波材料的吸波原理，通过将各种人造金属微结构周期排列于基材上并调整该人造金属微结构以达到理想吸波效果，其具有质量轻、厚度薄且电磁参数易于调节的优点。

WO 2012/129924 A1

区高新区中区高新中一道 9 号软件大厦, Guangdong 518057 (CN)。

(74) **代理人**: **深圳市威世博知识产权代理事务所（普通合伙）** **(CHINA WISPRO INTELLECTUAL PROPERTY LLP.)**; 中国广东省深圳市南山区高新区粤兴三道 8 号中国地质大学产学研基地中地大楼 A806, Guangdong 518057 (CN)。

(81) **指定国** (除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) **指定国** (除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则 4.17 的声明:

— 关于申请人有权要求在先申请的优先权 (细则 4.17(iii))

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种吸波超材料

【技术领域】

本发明涉及一种吸波材料，尤其涉及一种吸波超材料。

【背景技术】

吸波材料是指能够吸收和衰减入射电磁波能量，通过材料的介质损耗使其电磁能转换成热能或其他能量形式的一类功能复合材料。吸波材料在治理电磁污染、制造隐身材料等方面具有巨大的应用前景。

目前常用的吸波材料有铁氧体、钛酸钡、金属微粉、石墨、碳化硅、导电纤维等，其中又已铁氧体吸波材料是研究将多且比较成熟的吸波材料。铁氧体在高频下有较高的磁导率和电阻率，电磁波易于进入并能快速衰减。但是，以铁氧体为代表的此类吸波材料存在高温特性差、面密度大且电磁参数匹配困难等缺陷。

【发明内容】

本发明要解决的技术问题在于针对现有技术的上述不足，提出一种吸波性能好、质量轻、厚度薄且电磁参数易于调节的吸波超材料。

本发明解决其技术问题所采用的技术方案是提出一种吸波超材料，其包括基材、周期排列于该基材内部的多个人造金属微结构；当电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和相对磁导率大致相等。

当该电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和/或相对磁导率的虚部大于该基材的相对介电常数和/或相对磁导率的虚部使得该电磁波被吸收。

该吸波超材料包括具有两相对侧表面的基材，该两相对侧表面至少一侧表面上附着有周期排列的多个人造金属微结构；当入射方向垂直于该基材两相对侧表面的电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和相对磁导率基本相等。

当入射方向垂直于该基材两相对侧表面的电磁波通过该超材料时该超材料

的相对介电常数的虚部和/或相对磁导率的虚部大于该基材的相对介电常数的虚部和/或相对磁导率的虚部使得该电磁波被吸收。

该基材两相对侧表面的一侧表面上附着有第一人造金属微结构，另一侧表面上附着有与该第一人造金属微结构一一对应的第二人造金属微结构；该第一人造金属微结构包括相互垂直而连接成“十”字形的两个第一金属分支，分别连接在该第一金属分支两端且垂直于该第一金属分支的第二金属分支；该第二人造金属微结构由一边具有缺口的四边形状的第三金属分支构成。

该第一人造金属微结构的每个该第二金属分支的中点分别设于与其连接的该第一金属分支的端点；该第二人造金属微结构由一边中点具有缺口的正方形状的该第三金属分支构成。

该人造金属微结构包括第一金属分支，该第一金属分支构成一边具有缺口的四边形状；一端设于该缺口相对的四边形边上并向该缺口延伸且突出该缺口的第二金属分支；垂直于该第二金属分支另一端的第三金属分支。

该人造金属微结构以该第二金属分支为对称轴成左右对称结构。

该基材为片状基材，该超材料由附着有多个该人造金属微结构的该片状基材叠加而成。

该人造金属微结构由三个相同的平面拓扑结构在三维空间共中心点两两垂直相交而成。

该平面拓扑结构包括：相互垂直相交呈“十”字形的两条第一金属分支；分别连接于该两条第一金属分支两端、长度小于该第一金属分支并垂直于该第一金属分支的四条第二金属分支；从该第二金属分支两端向内延伸的八条第三金属分支；一边具有缺口并设置于该四条第二金属分支围成的平面内的四边形状的第四金属分支，该第四金属分支的四边长度小于该第二金属分支且具有该缺口的一边不与该第一金属分支相交，其他三边均与该第一金属分支相交。

该平面拓扑结构还包括从该缺口两端向内延伸的两条第五金属分支。

该第三金属分支与与其相连的该第二金属分支形成的角度为 45° 。

该第四金属分支中心点与两条该第一金属分支交点重合。

该基材由多个片状基材组合而成，每一片状基材上附着有多个金属分支；当多个该片状基材组合后，附着在多个该片状基材上的多个该金属分支组合为该人造金属微结构。

该基材为高分子聚合物、陶瓷、铁电材料、铁氧材料或铁磁材料。

周期排列的多个该人造金属微结构是通过蚀刻、电镀、钻刻、光刻、电子刻、离子刻附着于该基材两相对侧表面至少一侧表面上。

本发明采用不同于传统吸波材料的吸波原理，通过将各种人造金属微结构周期排列于基材上并调整该人造金属微结构的尺寸以达到理想吸波效果，其具有质量轻、厚度薄、受外部环境干扰小且电磁参数易于调节的优点。进一步地，本发明的人造金属微结构可为三维结构，其对三维空间任意入射方向的电磁波均能有效吸收，提高了吸波超材料的实用性。更进一步地，本发明采用片状基材组合成整体基材的方法来构成超材料，使得超材料内部人造金属微结构的尺寸和间隔均可分别地方便地调节即本发明超材料的相对介电常数和相对磁导率调节方便。

【附图说明】

为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案，下面将对实施例描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。其中：

图 1 是本发明吸波超材料第一较佳实施例中附着于基材一侧表面的第一人造金属微结构图；

图 2 是本发明吸波超材料第一较佳实施例中附着于基材另一侧表面的第二人造金属微结构图；

图 3 是本发明吸波超材料第二较佳实施例中人造金属微结构图；

图 4 是本发明吸波超材料第二较佳实施例中人造金属微结构对入射电磁波电

场和磁场响应的分解原理图；

图 5 是本发明吸波超材料相对介电常数 ε 与电磁波频率 f 的 ε-f 关系示意图；

图 6 是本发明吸波超材料相对磁导率 μ 与电磁波频率 f 的 μ-f 关系示意图；

图 7 是本发明吸波超材料第二较佳实施例中人造金属微结构被附着在基材一侧表面的计算机仿真效果图；

图 8 是本发明吸波超材料第三较佳实施例中人造金属微结构立体结构的平面拓扑图；

图 9 是本发明吸波超材料第三较佳实施例中人造金属微结构立体结构示意图；

图 10 是本发明吸波超材料第三较佳实施例中人造金属微结构平面拓扑图对应三维空间垂直于该平面入射的电磁波而拆分的可对电场响应的多个等效拓扑图；

图 11 是本发明吸波超材料第三较佳实施例中人造金属微结构平面拓扑图对应三维空间垂直于该平面入射的电磁波而拆分的可对磁场响应的多个等效拓扑图；

图 12 是本发明吸波超材料第四较佳实施例中人造金属微结构立体结构平面拓扑图的衍生图。

【具体实施方式】

吸波材料的基本物理原理是材料对入射电磁波实现有效吸收，将电磁波能量转换为热能或其他形式的能量而耗散掉，该材料应具备两个特性即阻抗匹配特性和衰减特性。阻抗匹配特性是指从自由空间入射到吸波材料表面的电磁波被吸波材料表面反射而形成的反射特性。理想的吸波材料要达到完美阻抗匹配特性时应使得从自由空间入射的电磁波在理想吸波材料表面形成零反射，即电磁波全部进入理想吸波材料内部。由于自由空间阻抗 Z=1，根据公式 $Z=\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}$ 可知，当该吸波材料的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 相等时即可达到理想阻抗匹配特性。其中由于吸波材料存在损耗，所以相对介电常数 $\varepsilon=\varepsilon'-j\varepsilon''$，相对磁导率

$\mu=\mu'-j\mu''$。衰减特性是指进入材料内部的电磁波产生损耗而被吸收的现象，损耗大小可用电损耗因子 $\tan\delta e=\varepsilon''/\varepsilon'$ 和磁损耗因子 $\tan\delta m=\mu''/\mu'$ 来表征。既满足阻抗匹配特性又满足尽可能大的衰减特性是各类吸波材料追求的目标。

超材料是由具有一定图案形状的人造金属微结构按照特定方式周期排列于基材中而构成。每一人造金属微结构和其所附着的基材构成了超材料的基本单元，多个超材料基本单元按一定规律排列即可使得超材料对电磁波具有宏观的响应。由于超材料整体需对入射电磁波有宏观电磁响应因此各个超材料基本单元对入射电磁波的响应需形成连续响应，这要求每一超材料基本单元的尺寸小于入射电磁波波长的五分之一，优选为入射电磁波波长的十分之一。本段描述中，我们人为的将超材料整体划分为多个超材料基本单元，但应知此种划分方法仅为描述方便，不应看成超材料由多个超材料基本单元拼接或组装而成，实际应用中超材料是将人造金属微结构周期排布于基材上即可构成，工艺简单且成本低廉。周期排布即指上述我们人为划分的各个超材料基本单元上的人造金属微结构能对入射电磁波产生连续的电磁响应。

改变每一超材料基本单元上的人造金属微结构的图案形状或尺寸使得超材料具有不同的介电常数和不同的磁导率从而使得超材料具有不同的电磁响应。

本发明利用超材料上述原理设计一种能强烈吸收特定频段电磁波的超材料。该超材料包括具有两相对侧表面的基材，在该两相对侧表面的至少一侧表面上附着有多个周期排列的人造金属微结构。当基材表面未附着人造金属微结构时，其对电磁场表现出具有初始相对介电常数 ε_1 和初始相对磁导率 μ_1；当基材表面附着有人造金属微结构后，人造金属微结构会对入射电磁场产生响应从而使得基材和人造金属微结构整体构成一种超材料，超材料对电磁场的响应会因人造金属微结构尺寸的变化而变化，即超材料的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 会因人造金属微结构尺寸的变化而变化。当超材料用作吸波材料时，需要结合基材的初始相对介电常数 ε_1 和初始相对磁导率 μ_1 设计初始人造金属结构的拓扑图案和尺寸使之达到吸波材料的设计要求，即阻抗匹配特性和衰减特性均十分优良。

因为人造金属微结构需对入射电磁波的电场和磁场均产生响应，因此人造金属微结构所在平面必须存在电场和磁场分量，根据电磁场理论，当电磁波入射方向垂直于人造金属微结构所在表面时即可满足要求。并且为了更好的满足衰减特性的要求，本发明的基材采用对电磁波损耗大的各类常见材料，例如高分子聚合物、陶瓷、铁电材料、铁氧材料或铁磁材料等，其中高分子聚合物优选 FR-4 或 F4B 材料。

请参阅图 1 至图 7，下面结合对几种人造金属微结构拓扑图案详细说明本发明设计原理。

本发明第一较佳实施例中，在基材两相对侧表面附着有不同的两种人造金属微结构，如图 1 和图 2 所示。基材一侧表面的第一人造金属微结构 10 包括相互垂直而连接成“十”字形的两个第一金属分支 11，分别连接在每个第一金属分支 11 两端且垂直于第一金属分支 11 的第二金属分支 12。基材另一侧表面的第二人造金属微结构 20 包括第三金属分支 201，该第三金属分支 201 构成一边具有缺口 2011 的四边形状。该两个人造金属微结构在基材两相对侧表面一一对应。优选地，第一人造金属微结构 10 的第二金属分支 12 中点分别设于其所连接的该第一金属分支 11 的端点，第二人造金属微结构 20 由一边中点具有缺口 2011 的正方形状的第三金属分支 201 构成。

当入射方向垂直于基材两相对侧表面的电磁波该超材料时，第一人造金属微结构 10 的第二金属分支 12 分别聚集正负电子形成等效容性元件。根据公式 $\varepsilon=\frac{CS}{4\pi kd}$ 可知，其中 ε 为超材料相对介电常数、S 为第二金属分支面积、d 为第二金属分支间隔、k 为常数、C 为等效电容量，超材料的相对介电常数 ε 可通过调整第二金属分支 12 的面积 S 与第二金属分支 12 的间距 d 来调整，第二金属分支 12 的间距 d 即为第一金属分支 11 的长度；第二人造金属微结构 20 的第三金属分支 201 上形成环形电流，根据右手螺旋定则，环形电流产生磁场从而影响超材料的相对磁导率 μ。分别调节第一人造金属微结构 10 和第二人造金属微结构 20 的金属分支的尺寸和间隔即可调节人造金属微结构对入射电场和入射磁场的响应从而调节超材料整体的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ。

超材料整体的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 的与电磁波频率 f 的关系图

如图 5、图 6 所示。在图 5 和图 6 中我们可以发现，相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 在远离谐振频点处，其变化是微小的，因此调整人造金属微结构金属尺寸改变相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 所起到的作用也十分微小。但是在接近谐振频点的频段处，相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 均成指数变化，此时调整人造金属微结构金属尺寸将极大影响超材料整体的相对介电常数ε和相对磁导率μ，因此可以达到本发明的阻抗匹配要求，即一频段处相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 相等。因此，本发明所需的电磁波频段通常为偏离人造金属微结构谐振频点且可使相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 成指数衰减的频段。当然，此段说明仅为描述本发明实验过程中的规律，并非用以限定本发明电磁波入射频段。

当人造金属微结构的尺寸使得具有一频段的入射电磁波通过超材料时，超材料的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 基本相等时即满足本发明阻抗匹配的设计要求。所谓基本相等是指相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 只存在不影响阻抗匹配效果的误差。同时，为了达到优良的吸波性能还需要继续调整人造金属微结构的尺寸使超材料对入射电磁波有最大的能量损耗。能量损耗主要是通过电损耗因子 tan δ e 和磁损耗因子 tan δ m 来表征，不同的基材对应不同的主要损耗因子，例如铁电材料主要为电损耗因子、铁磁材料主要为磁损耗因子而铁氧材料则两者皆有。人造金属微结构对超材料整体衰减特性的影响是通过改善基材的衰减特性即提高超材料整体的相对介电常数和/或相对磁导率的虚部从而提高超材料整体的衰减特性。可以理解的，调整人造金属微结构的尺寸使超材料满足相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 基本相等以及改善基材衰减特性的过程是交互的，并非调整完一个条件以后再在原有基础上调整第二个条件。

图 3 为本发明第二较佳实施例的人造金属微结构图。该人造金属微结构 30 包括第一金属分支 301，该第一金属分支 301 构成一边具有缺口 3011 的四边形状；一端设于缺口 3011 相对的四边形边上并向缺口 3011 延伸且突出缺口 3011 的第二金属分支 302；垂直于第二金属分支 302 另一端的第三金属分支 303。人造金属微结构 30 附着于基材两相对侧表面其中之一表面上，优选地，为了取得

更好的吸波效果在基材两相对侧表面上均附着有人造金属微结构 30 且两相对侧表面的人造金属微结构成镜像对称，更优选地，每一侧表面的人造金属微结构 30 以第二金属分支 302 为对称轴成左右对称结构。

本较佳实施例中人造金属微结构 30 相当于结合了第一较佳实施例中的第一人造金属微结构 10 和第二人造金属微结构 20，其对垂直入射的电磁波的电磁响应原理与第一较佳实施例相同，即相对的金属分支等效为电容元件从而调整超材料的相对介电常数 ε，环形金属分支上感生的电流根据右手螺旋定则感生磁场从而调整超材料的相对磁导率 μ。具体到本实施例可表现为，如图 4 所示，人造金属微结构 30 拆分为呈“工”字形的第一部分 30’以及呈一边缺口的四边形状的第二部分 30’’，第一部分 30’的金属分支分别聚集正负电荷形成等效容性元件从而调整超材料的相对介电常数，第二部分 30’’的金属分支形成环形电流并感生磁场从而调整超材料的相对磁导率。同时，由于本较佳实施例对人造金属微结构独特的图案设计使得基材上附着一面人造金属微结构即可满足设计要求。

基材以及在基材上附着人造金属微结构的工艺与第一较佳实施例相同，在此不再赘述。

图 7 为本较佳实施例的人造金属微结构 30 被附着在基材一侧表面的计算机仿真效果图。在计算机仿真中，用 S_{11} 表示材料的反射系数即阻抗匹配特性，用 S_{21} 表示材料的透射系数即衰减特性。在图 5 中可以看出，在 17GHZ 附近 S_{11} 有明显吸收峰，S_{21} 在很大带宽附近都能小于-15dB，即阻抗匹配特性和衰减特性都较好，能实现电磁波的吸收。

在本发明的另一实施例中，采用立体的人造金属微结构，其独特的拓扑结构设计使得人造微结构对任意入射方向的电磁波的电场和磁场均能产生相同的电磁响应，因此任意入射方向的电磁波通过该吸波超材料时均能被吸收，极大地提高了该吸波超材料的实用范围，下面进行详细描述：

请参阅图 5、图 6 以及图 8 至图 12，下面对几种人造金属微结构拓扑图案对本发明进行详细说明：

请参照图 8 和图 9。图 9 为本实施例人造金属微结构三维立体结构示意图，其由三个图 8 所示的平面拓扑图案在三维空间共中心点两两垂直相交而成。如图 8 所示，平面拓扑图案包括相互垂直相交呈“十”字形的两条第一金属分支 101；分别连接于两条第一金属分支 101 两端，长度小于第一金属分支 101 并垂直于第一金属分支 101 的四条第二金属分支 102；从第二金属分支 102 两端以相同角度向内延伸的八条第三金属分支 103；一边具有缺口 1041 并设置于第二金属分支 102 围成的平面内的四边形状的第四金属分支 104，第四金属分支 104 的四边长度小于第二金属分支 102，具有缺口 1041 的一边不与第一金属分支 101 相交，其他三边均与第一金属分支 101 相交。

当三维空间任意入射方向的电磁波通过该超材料时，电磁波的电场方向对应的平面的金属分支之间的间隔等效为容性元件。根据公式 $\varepsilon=\frac{CS}{4\pi kd}$ 可知，超材料的相对介电常数 ε 可通过调整具有间隔的金属分支的面积 S 以及间距 d 来调整；电磁波的磁场极化方向对应的平面整体等效为感性元件并在其上形成环形电流，根据右手螺旋定则，环形电流产生磁场从而影响超材料的相对磁导率 μ。

具体到本实施例中，将图 8 所示的二维拓扑图案看作为本发明人造金属微结构其中的一个平面拓扑结构，当入射方向垂直于该平面的电磁波通过该超材料时，该平面拓扑图案响应三维空间垂直于该平面的任意入射方向的电磁波可等效拆分为如图 10 和图 11 所示的多个拓扑结构。其中图 10 为平面拓扑结构响应电场而拆分的多个拓扑结构，图 11 为平面拓扑结构响应磁场而拆分的多个拓扑结构。图 10 中被拆分的拓扑结构是由三类组成：（1）两对第二金属分支 102，（2）四队第三金属分支 103，（3）缺口 1041 相对的第二金属分支 102 以及缺口 1041 相对的对边 1042。图 11 中平面拓扑结构拆分为多个开口环形金属分支，主要由两类组成：（1）第一金属分支 101、第三金属分支 103 以及连接第一金属分支 101 和第三金属分支 103 的部分第二金属分支 102，(2)第四金属分支 104。从图 10 和图 11 中可以看出，由于本发明特殊的拓扑结构设计使得入射方向为三维空间垂直于平面拓扑结构任意方向的电磁波通过超材料时，超材料都可以通过调整人造金属微结构各个金属分支的面积和/或长度来调整超材料整体的相对介电常数和相对磁导率。进一步地，本发明整体人造微结构由三个相同的

该平面拓扑结构在三维空间两两共交点垂直相交而成，因此本发明人造金属微结构对应三维空间任意入射方向的电磁波均可调整其相对介电常数和相对磁导率。

超材料整体的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 的与电磁波频率 f 的关系图如图 5、图 6 所示。在图 5 和图 6 中我们可以发现，相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 在远离谐振频点处，其变化是微小的，因此调整人造金属微结构金属尺寸改变相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 所起到的作用也十分微小。但是在接近谐振频点的频段处，相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 均成指数变化，此时调整人造金属微结构金属尺寸将极大影响超材料整体的相对介电常数ε和相对磁导率μ，因此可以达到本发明的阻抗匹配要求，即一频段处相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 相等。因此，本发明所需的电磁波频段通常为偏离人造金属微结构谐振频点且可使相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 成指数衰减的频段。当然，此段说明仅为描述本发明实验过程中的规律，并非用以限定本发明电磁波入射频段。

当人造金属微结构的尺寸使得具有一频段的入射电磁波通过超材料时，超材料的相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 大致相等时即满足本发明阻抗匹配的设计要求。所谓大致相等是指相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 只存在不影响阻抗匹配效果的误差。同时，为了达到优良的吸波性能还需要继续调整人造金属微结构的尺寸使超材料对入射电磁波有最大的能量损耗。能量损耗主要是通过电损耗因子 tan δ e 和磁损耗因子 tan δ m 来表征，不同的基材对应不同的主要损耗，例如铁电材料主要为电损耗、铁磁材料主要为磁损耗而铁氧材料则两者皆有。人造金属微结构对超材料整体衰减特性的影响是通过改善基材的衰减特性，即提高超材料整体相对介电常数和/或相对磁导率的虚部从而提高超材料整体的衰减特性。可以理解的，调整人造金属微结构的尺寸使超材料满足相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 大致相等以及改善基材衰减特性的过程是交互的，并非调整完一个条件以后再在原有基础上调整第二个条件。

图 12 为本发明吸波超材料第四较佳实施例中人造金属微结构立体结构平面

二维拓扑图案的衍生图。其与第三较佳实施例的不同点在于，缺口 1041 两端还向内延伸有两条相对的第五金属分支 105。第五金属分支 105 使得人造微结构对应三维空间各方向入射的电磁波形成的等效容性元件增加一类，并改变第四金属分支 104 中开口环形电流分布。使得调整整个超材料相对介电常数 ε 和相对磁导率 μ 的参数增加一个，更容易实现本发明目的。

基材可选取高分子聚合物、陶瓷、聚四氟乙烯、铁电材料、铁氧材料或铁磁材料等能量损耗大的材料。

基材通常采用片状结构，每个片状基材根据设计要求在两相对侧表面其中之一表面上或两相对侧表面每一表面上附着多个人造金属微结构，多个片状基材无间隙的叠加而紧密结合构成一个整体。

在基材表面上附着人造金属微结构的制造工艺有多种，例如蚀刻、电镀、钻刻、光刻、电子刻、离子刻等，其中蚀刻是较优的制造工艺，其步骤是在设计好合适的人造金属微结构的平面图案后，先将一张金属箔片整体地附着在基材上，然后通过蚀刻设备，利用溶剂与金属的化学反应去除掉人造金属微结构预设图案以外的箔片部分，余下的即可得到阵列排布的人造金属微结构。上述金属箔片的材质可以是铜、银等任何金属。

上面结合附图对本发明的较佳实施例进行了描述，但是本发明并不局限于上述的具体实施方式，上述的具体实施方式仅仅是示意性的，而不是限制性的，本领域的普通技术人员在本发明的启示下，在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下，还可做出很多形式，这些均属于本发明的保护之内。

权 利 要 求

1、一种吸波超材料，其特征在于：所述吸波超材料包括基材、周期排列于该基材内部的多个人造金属微结构；当电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和相对磁导率大致相等。

2、如权利要求 1 所述的吸波超材料，其特征在于：当该电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和/或相对磁导率的虚部大于该基材的相对介电常数和/或相对磁导率的虚部使得该电磁波被吸收。

3、如权利要求 2 所述的吸波超材料，其特征在于：所述吸波超材料包括具有两相对侧表面的基材，该两相对侧表面至少一侧表面上附着有周期排列的多个人造金属微结构；当入射方向垂直于该基材两相对侧表面的电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数和相对磁导率基本相等。

4、如权利要求 3 所述的吸波超材料，其特征在于：当入射方向垂直于该基材两相对侧表面的电磁波通过该超材料时该超材料的相对介电常数的虚部和/或相对磁导率的虚部大于该基材的相对介电常数的虚部和/或相对磁导率的虚部使得该电磁波被吸收。

5、如权利要求 4 所述的吸波超材料，其特征在于：该基材两相对侧表面的一侧表面上附着有第一人造金属微结构，另一侧表面上附着有与该第一人造金属微结构一一对应的第二人造金属微结构；该第一人造金属微结构包括相互垂直而连接成“十”字形的两个第一金属分支，分别连接在该第一金属分支两端且垂直于该第一金属分支的第二金属分支；该第二人造金属微结构由一边具有缺口的四边形状的第三金属分支构成。

6、如权利要求 5 所述的吸波超材料，其特征在于：该第一人造金属微结构的每个该第二金属分支的中点分别设于与其连接的该第一金属分支的端点；该第二人造金属微结构由一边中点具有缺口的正方形状的该第三金属分支构成。

7、如权利要求 3 所述的吸波超材料，其特征在于：该人造金属微结构包括

第一金属分支，该第一金属分支构成一边具有缺口的四边形状；一端设于该缺口相对的四边形边上并向该缺口延伸且突出该缺口的第二金属分支；垂直于该第二金属分支另一端的第三金属分支。

8、如权利要求 7 所述的吸波超材料，其特征在于：该人造金属微结构以该第二金属分支为对称轴成左右对称结构。

9、如权利要求 3 所述的吸波超材料，其特征在于：该基材为片状基材，该超材料由附着有多个该人造金属微结构的该片状基材叠加而成。

10、如权利要求 2 所述的吸波超材料，其特征在于：该人造金属微结构由三个相同的平面拓扑结构在三维空间共中心点两两垂直相交而成。

11、如权利要求 10 所述的吸波超材料，其特征在于：该平面拓扑结构包括：相互垂直相交呈“十”字形的两条第一金属分支；分别连接于该两条第一金属分支两端、长度小于该第一金属分支并垂直于该第一金属分支的四条第二金属分支；从该第二金属分支两端向内延伸的八条第三金属分支；一边具有缺口并设置于该四条第二金属分支围成的平面内的四边形状的第四金属分支，该第四金属分支的四边长度小于该第二金属分支且具有该缺口的一边不与该第一金属分支相交，其他三边均与该第一金属分支相交。

12、如权利要求 11 所述的吸波超材料，其特征在于：该平面拓扑结构还包括从该缺口两端向内延伸的两条第五金属分支。

13、如权利要求 11 所述的吸波超材料，其特征在于：该第三金属分支与与其相连的该第二金属分支形成的角度为 45° 。

14、如权利要求 11 所述的吸波超材料，其特征在于：该第四金属分支中心点与两条该第一金属分支交点重合。

15、如权利要求 1 所述的吸波超材料，其特征在于：该基材由多个片状基材组合而成，每一片状基材上附着有多个金属分支；当多个该片状基材组合后，附着在多个该片状基材上的多个该金属分支组合为该人造金属微结构。

16、如权利要求 1 所述的吸波超材料，其特征在于：该基材为高分子聚合

物、陶瓷、铁电材料、铁氧材料或铁磁材料。

17、如权利要求 1 所述的吸波超材料，其特征在于：周期排列的多个该人造金属微结构是通过蚀刻、电镀、钻刻、光刻、电子刻、离子刻附着于该基材两相对侧表面至少一侧表面上。

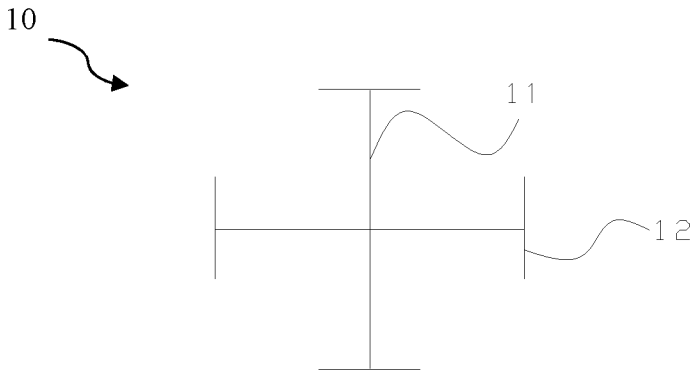

图 1

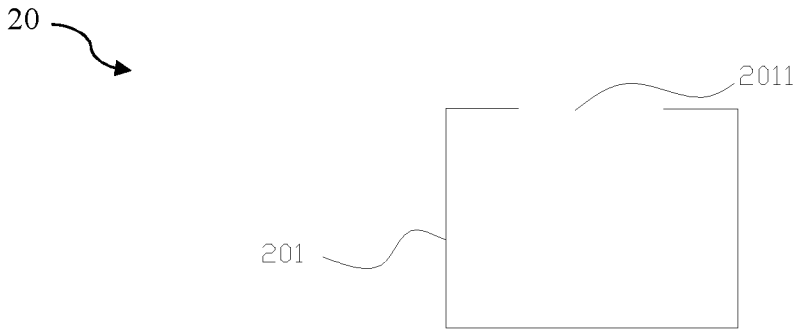

图 2

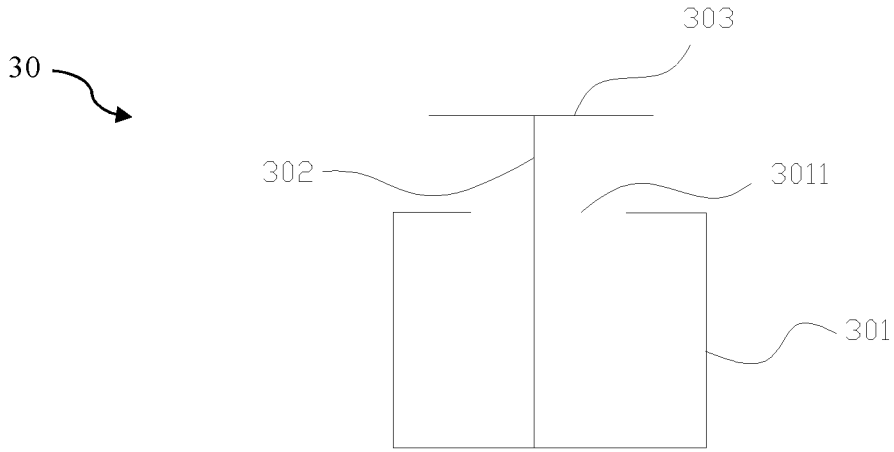

图 3

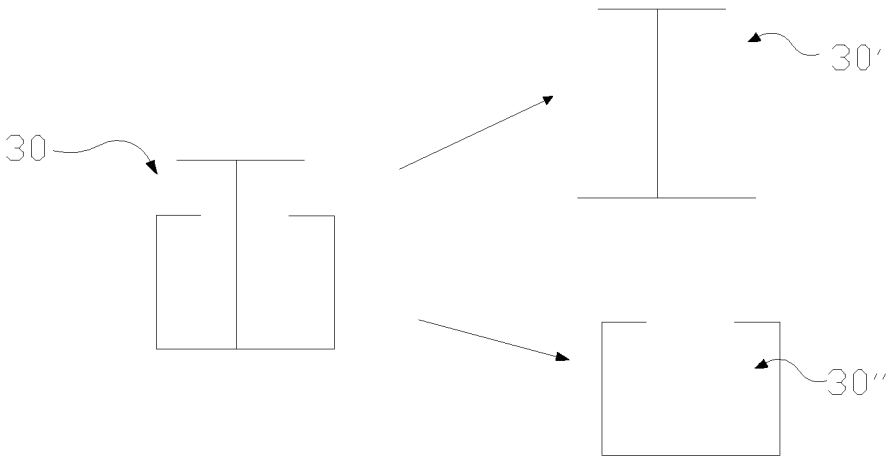

图 4

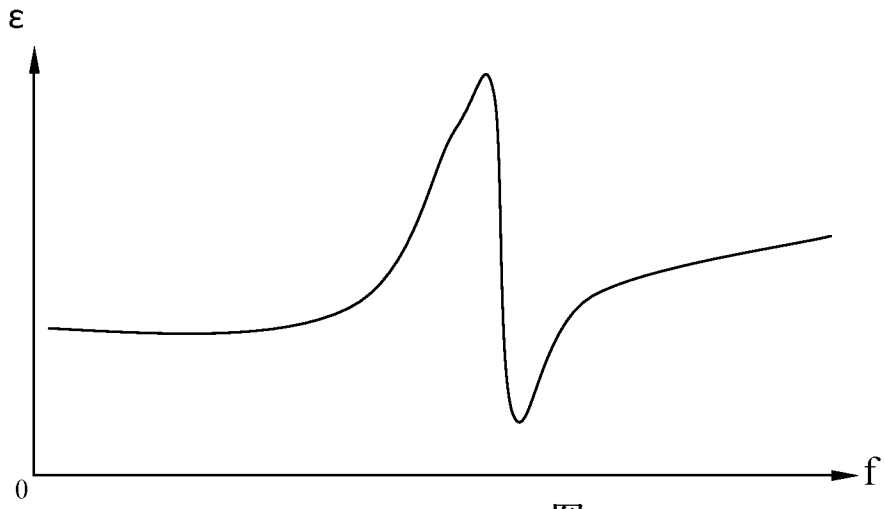

图 5

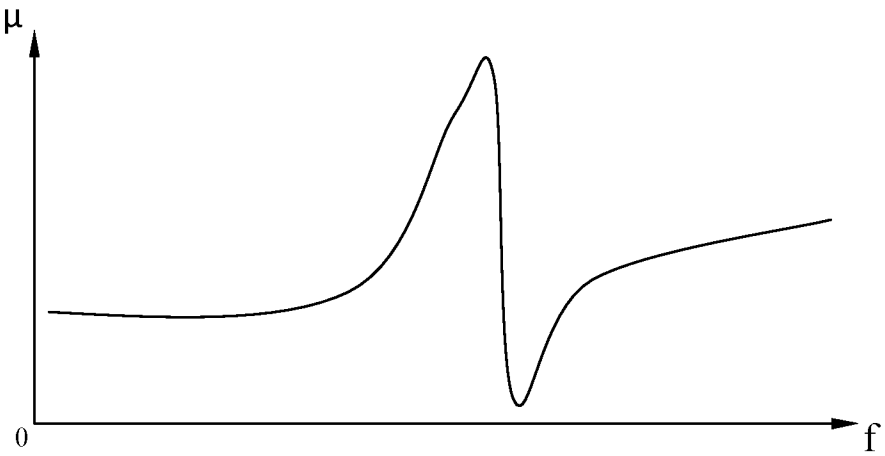

图 6

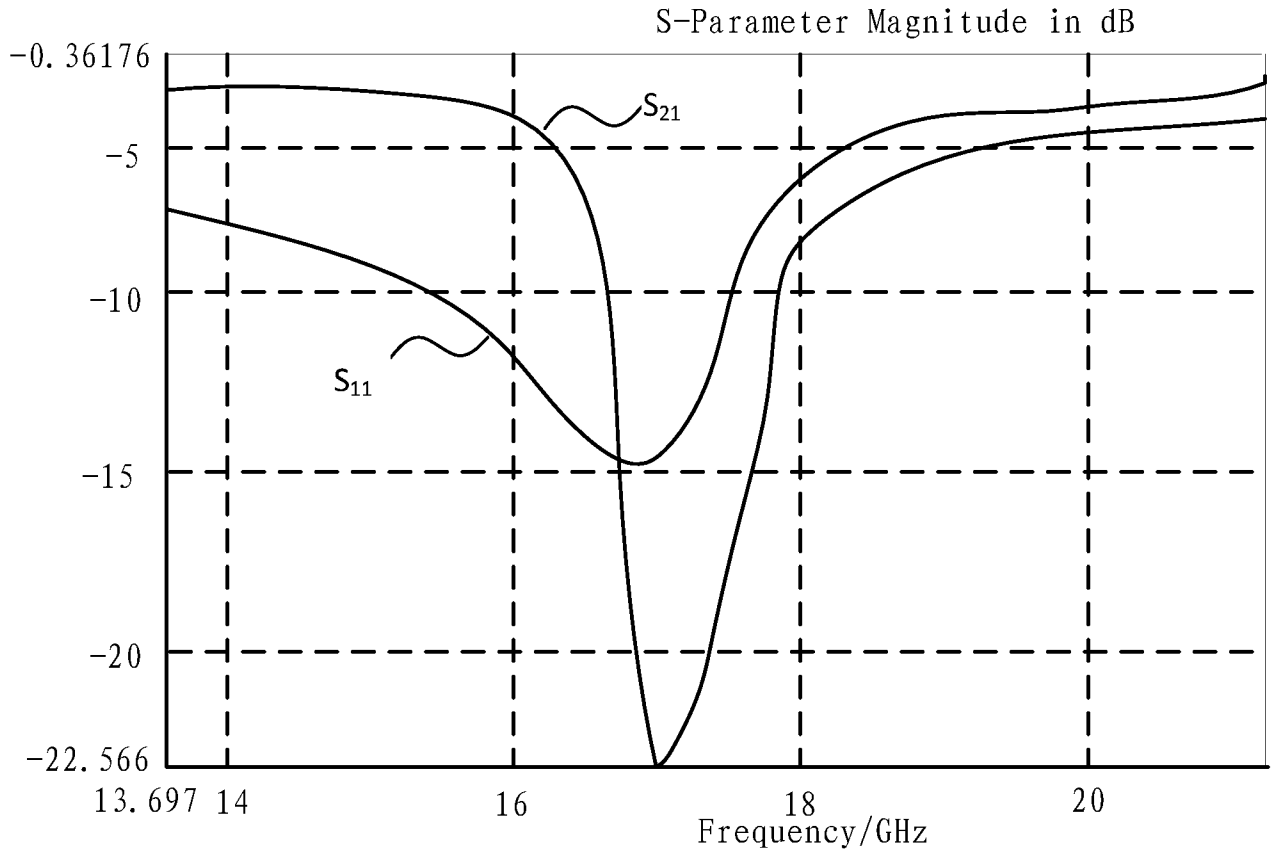
S-Parameter Magnitude in dB
-0.36176
-5
-10
-15
-20
-22.566
S21
S11
13.697
14
16
18
20
Frequency/GHz

图 7

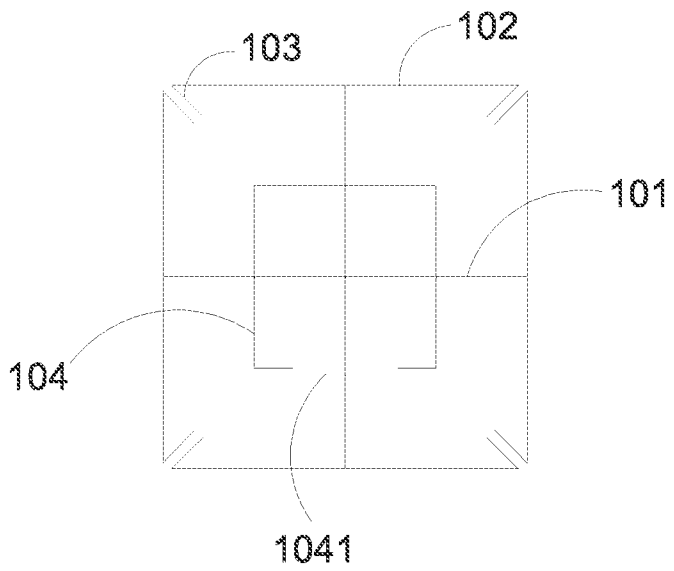
103
102
101
104
1041

图 8

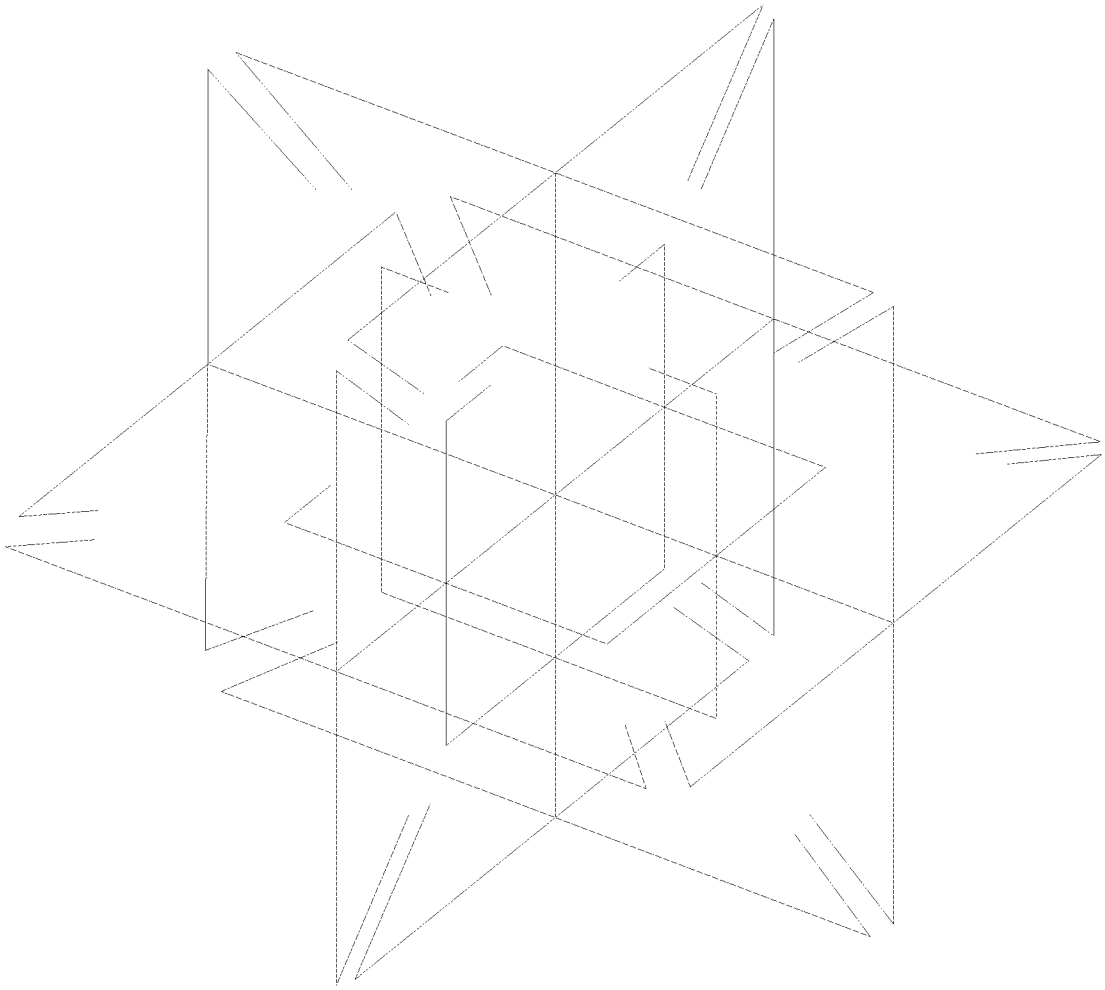

图 9

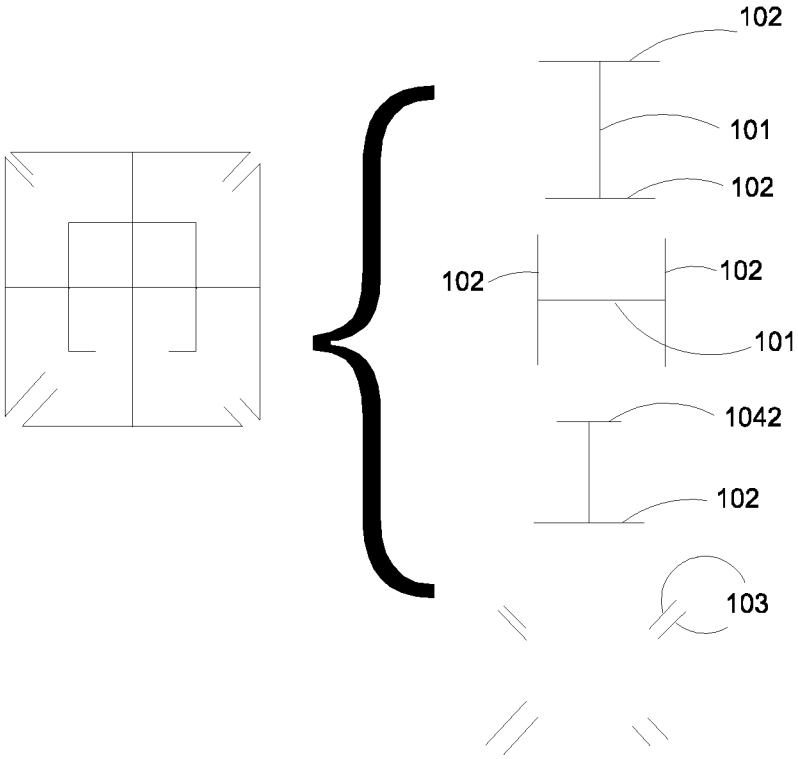

图 10

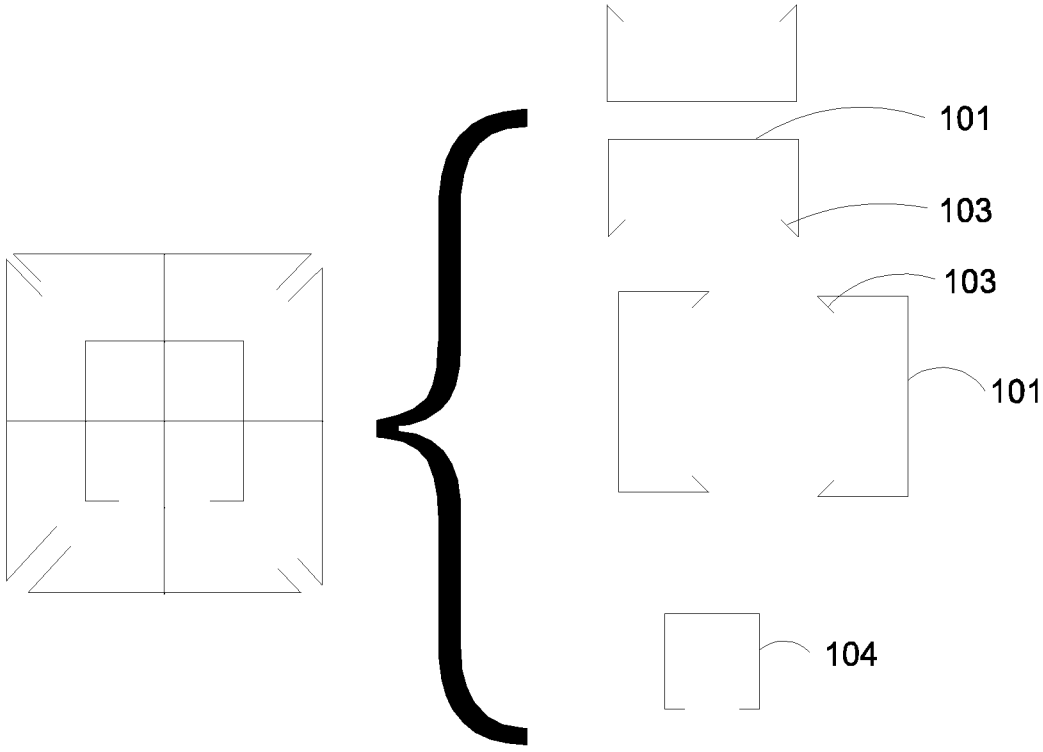

图 11

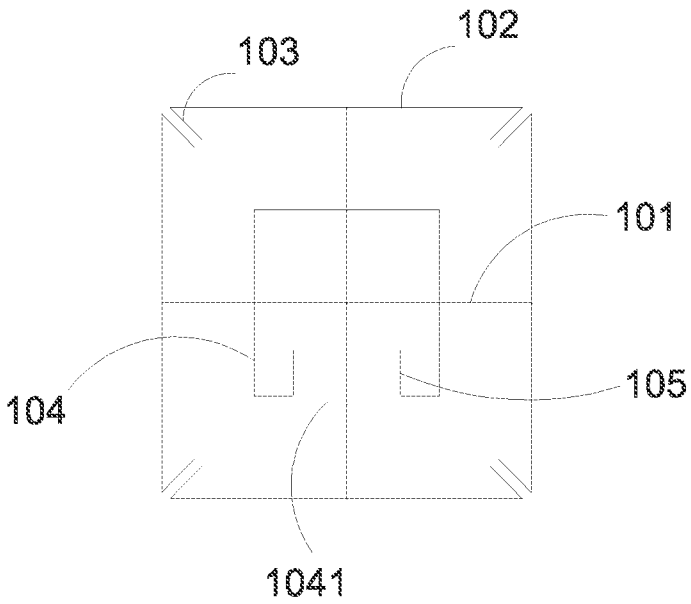

图 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2011/083221

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H05K 9/00 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: H05K G12B 17/

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

WPI; EPODOC; CNKI; CPRS: (ultra) material, periodicity, wave absorbing ultra material substrate man-made metal microstructure periodical dielectric constant magnetic permeability metal branch

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 101540207 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA), 23 September 2009 (23.09.2009), the whole document	1-17
A	JP 2006127427 A (FUJI XEROX CO., LTD.), 18 May 2006 (18.05.2006), the whole document	1-17
A	JP 2003324008 A (DAIDO TOKUSHUKO KK), 14 January 2003 (14.11.2003), the whole document	1-17
A	LIU, Lingyun et al., Research on Absorbing Properties of Metamaterial Absorber, MATERIALS REVIEW: the research part, May 2010, vol. 24, no. 5, pages 1-3 and 18	1-17

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
06 February 2012 (06.02.2012)	**23 February 2012 (23.02.2012)**
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer **LI, Qian** Telephone No.: (86-10) **62412075**

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2011/083221

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 101540207 A	23.09.2009	None	
JP 2006127427 A	18.05.2006	None	
JP 2003324008 A	14.11.2003	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2011/083221

A. 主题的分类

H05K 9/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: H05K G12B17/

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用）)

WPI;EPODOC;CNKI;CPRS: 吸波 (超)材料 基材 人造金属 微结构 周期性 介电常数 磁导率 金属分支 wave absorbing ultra material substrate man-made metal microstructure periodical dielectric constant magnetic permeability metal branch

C. 相关文件

类　型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN101540207 A(电子科技大学) 23. 9 月 2009(23.09.2009) 全文	1-17
A	JP2006127427 A(FUJI XEROX CO LTD) 18. 5 月 2006(18.05.2006) 全文	1-17
A	JP2003324008 A(DAIDO TOKUSHUKO KK) 14. 1 月 2003(14.11.2003) 全文	1-17
A	刘凌云等，超材料吸波体吸波特征研究，材料导报：研究篇幅，5 月 2010，第 24 卷，第 5 期，第 1-3，18 页	1-17

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。　　☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

"A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

"E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

"L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

"O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

"P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

"T" 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

"X" 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

"Y" 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

"&" 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
06. 2 月 2012(06.02.2012)	**23.2 月 2012 (23.02.2012)**
ISA/CN 的名称和邮寄地址： 中华人民共和国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088 传真号：　(86-10)62019451	受权官员 李倩 电话号码：(86-10) **6241 2075**

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2011/083221

检索报告中引用的专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN101540207 A	23.09.2009	无	
JP2006127427 A	18.05.2006	无	
JP2003324008 A	14.11.2003	无	