

# 隐身技术的研究进展

## Research Progress of Cloaking Technique

王琦 张大伟 袁丽萌 陈家璧 庄松林

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

Wang Qi Zhang Dawei Yuan Limeng Chen Jiabi Zhuang Songlin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**摘要** 分析了产生隐身的机理,阐述了几种隐身方法的进展情况。详细论述了基于超材料特殊晶体结构和等离子体的隐身技术,并对隐身技术的应用和发展前景进行了展望。

**关键词** 超材料; 等离子体; 隐身; 隐身材料

**Abstract** With discussion of cloaking principle, the development of cloaking is reviewed. The techniques based on plasmonic cloak and 3D metamaterial cloak are proposed in detail. Its applications and development foreground are prospected.

**Key words** metamaterial; plasma; cloaking; cloaking material

中图分类号:TH74, TB34 doi:10.3788/LOP20094608.0055

### 1 引言

隐身技术在外科手术、军事航空等多个领域中获得广泛的应用。已经应用的隐身技术主要集中在外形隐身、材料隐身等方面<sup>[1]</sup>。外形隐身技术的实质是将目标的强反射结构转换为弱反射结构,即通过改变目标的表面形状,在一定角度内减少雷达散射截面(RCS)。材料隐身技术以雷达吸波材料有效地吸收入射雷达波,使目标的总回波强度显著降低,能同时所有方向减小 RCS,通过吸收其对应的特定波长,达到无法探测的效果,实现隐身。雷达是军事探测系统的重要探测手段。对探测技术的改进,产生了一些新的隐身概念和隐身技术<sup>[2]</sup>。

### 2 几种隐身方法、原理及研究进展

隐身技术用途非常广泛,所采用的原理也各不相同。大部分隐身技术是基于锐减散射光的理论。人类

能看到物体是因为光照射到物体上,物体又反射了光。只要中断这个过程,人就看不到物体。从原理上讲,目前的隐身技术可分为两个方向:一种是利用材料的特殊晶体结构,改变物体对光线的折射率,让光波和电磁波绕过需要隐身的物体;另一种即材料隐身,这种技术目前主要针对波长较短的微波,尚未扩大到可见光领域。后一种技术已经在军事上被广泛运用<sup>[3]</sup>,如在飞机或者潜艇上涂上可以阻断红外线的材料,雷达就很难探测到它们的存在。由于红外线具有更好的保密效果,目前利用比较广泛的多为红外隐身技术。而前一种因其应用前景广泛及本身所具的神秘性,近几年研究风头正劲。

#### 2.1 隐身智能衣

2004年东京大学展示的隐身衣是通过摄像技术采集到周围图像信息,给人造成视觉假象达到隐形效果。此隐身原理是在衣服前后面装上摄像机,录制下

周围环境实况景象后将影像转换到衣服前面的投影机,将影像投射到由特殊材料制成的衣料表面。这样能让穿隐身衣者看起来是透明的,穿衣人就好像消失了,如图1所示。它只是利用“光学视觉伪装”技术来达到让人无法辨明实体的目的。该隐身衣只对处于特定位置的观察者有效,若变换角度就达不到隐身效果。制造一件该隐身衣需要6个1160万像素的照相机及性能极强的计算机控制。



图1 隐身衣

## 2.2 等离子体隐身

等离子体隐身技术研究始于20世纪60年代,苏联早在20世纪80年代就对等离子体在高空超声速飞机隐身的潜在应用进行试验研究。等离子体隐身技术与“降低识别特征”的常规隐身技术完全不同,它是利用磁化或非磁化冷等离子体规避雷达探测的一种技术。其机理有很多,例如:折射隐身、吸收隐身、等离子体中的波与人射电磁波相互作用产生其他频率的电磁波、等离子体的共振吸收、时变等离子体隐身等。等离子体对电磁波的折射是等离子体隐身机理的重要组成部分。等离子体具有密度近似相等的自由电子和正离子,是一种特殊的高通滤波器<sup>[4]</sup>。这一特征使等离子体成为新型电子干扰和隐身物质,如图2所示。当雷达频率低于等离子体频率时,雷达波被全反射。等离子体能以电磁波反射体的形式对雷达进行电子干扰,即通过雷达波往返传播途径弯曲,雷达显示屏上出现的是虚像,而非武器的真实位置。当雷达频率高于等离子体频率时,雷达波能进入等离子体被吸收,从而使雷达接收到的攻击武器信号大为减弱<sup>[6]</sup>。

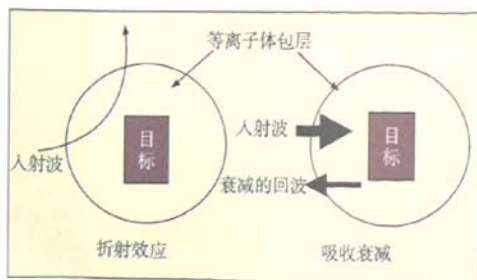


图2 等离子体隐身

美国休斯实验室的实验表明,应用等离子体技术可使长13 cm的微波反射器的雷达截面在4~14 GHz频率范围内平均降低20 dB,即雷达获取回波的信号强度减少到原来的1%。因此,等离子体隐身技术在军事上具有极高的应用价值,并成为世界军事强国竞相研究的焦点<sup>[6]</sup>。

2005年,M. G. Silveirinha等<sup>[7,8]</sup>称他们将他们研究的“隐形罩”罩在某个物体上,能使该物体达到隐形效果。隐形罩依赖于隐形物表面层的“等离子罩”,该等离子罩由金银等合成金属构成,它能够吸收掉大部分入射到物体表面的可见光。当光线照到金属物体上时,“等离子罩”将会产生电子波或等离子波,当光波频率和等离子波频率相等并产生共振时,这两个波的频率将互相抵消,该金属物体表面不反射可见光从而实现隐形<sup>[9-11]</sup>。图3所示是球体直径为 $0.4\lambda_0$ ,当电场垂直平面, $f=f_0$ 时,(a)和(b)图分别为给物体等离子罩前后电场振幅的分布,可以看到等离子罩有效减少了光线在物体表面的散射现象。

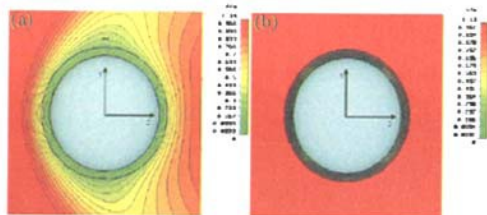


图3 电场振幅分布图

## 2.3 二维结构隐身

超材料结构在电磁波应用领域具有前所未有的灵活性和新的特性,比如隐身特性。2006年美国 and 英国科学家研究的二维隐身衣<sup>[12,13]</sup>成功地使一个铜圆柱体隐身,如图4所示。这件隐身衣由包裹在玻璃纤维

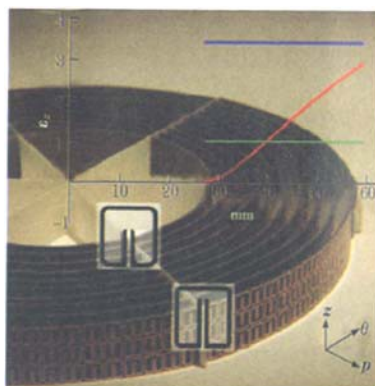


图4 二维隐身衣

内的金属线构成。这种材料吸收特定的光线,该超材料中的同心圆环能让微波辐射沿最内圈弯曲,使反射的微波很少,让人眼感受不到较微弱的光线,就好像物体不存在一样,从而实现隐身效果。

图 5 为仿真 TM 入射下波长 632.8 nm 时的电场分布,(a) 为物体在由金属丝构成的斗篷的电场分布<sup>[14-16]</sup>,其中  $E$  为电场, $H$  为磁场, $K$  为波矢。(b) 为物体处于真空时,没有置于斗篷中的电场分布<sup>[17]</sup>。同心圆表示隐身边界,对应的半径分别为  $a$  和  $b$ , 仿真结构表面最佳隐身效果的物体是半径为  $a$  的圆柱体,如图 6 所示。

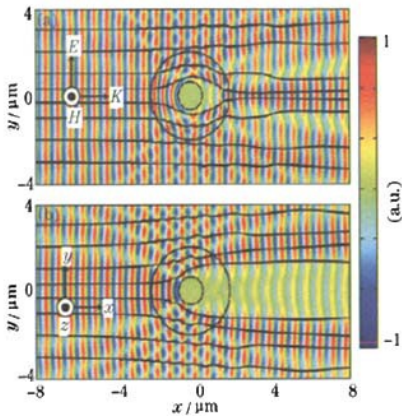


图 5 TM 入射下波长 632.8 nm 时的电场分布

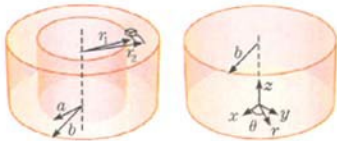


图 6 隐身效果

## 2.4 三维材料隐身

2008 年美国加州大学伯克利分校的科学家设计出能逆转可见光和近红外光传播方向的三维材料<sup>[18-20]</sup>。该超材料具有改变光线传播方向的能力,光线在这种材料中会出现负折射。该材料能完全弯曲物体周围的光波实现隐形效果。

采用电子束蒸镀交替的方法镀导电银层和不导电氟化镁层共 21 层的结构,其中每层银层的厚度为 30 nm,每层氟化镁层厚度为 50 nm,该结构厚度共为 830 nm,其扫描电子显微镜图如图 7(a)所示,其中单位晶格  $p=860$  nm, $a=565$  nm, $b=265$  nm。用刻蚀法

对结构进行刻蚀得到 21 层网状结构,该结构的侧面蚀刻图如图 7(b)所示。

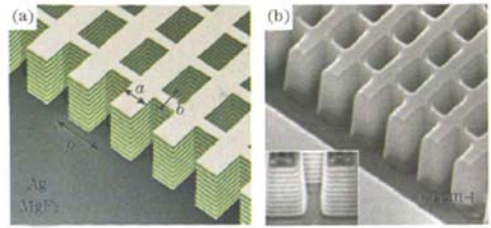


图 7 网状结构示意图

图 8 为光束折射的实验装置。透镜 1 焦距  $f=50$  mm,透镜 2 焦距  $f_2=40$  mm。透镜 2 放置在  $2f$  构造中,使得在摄影位置成为傅里叶图像。可以看到该傅里叶图像发生偏转。图 9 是不同波长下窗口样本光束和棱镜样本光束的傅里叶平面图像。 $n=1$  和  $n=0$  的位置如图中白线所示。可以得出,随着波长在 1200 ~ 1700 nm 内变化,该棱镜样本光束的傅里叶平面图像发生偏移,实现光线偏移的作用。

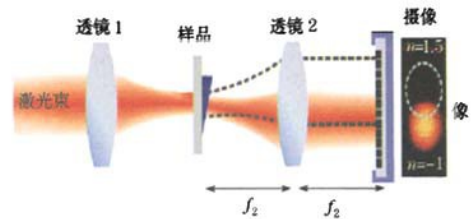


图 8 光束折射的实验装置

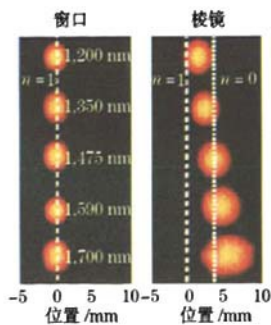


图 9 网状结构折射率测量

图 10 是由加州大学伯克利分校研究人员研究的超材料扫描电子显微镜图像(顶视图和侧视图)。该材料是由内嵌在多孔氧化铝内的平行纳米线组成。当可见光通过此材料时,光线发生负折射现象,使光线偏移,实现隐身。

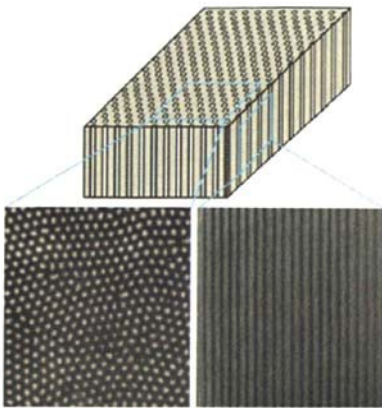


图 10 平行纳米线组成的超材料结构

### 2.5 反隐身

2008年马红儒等<sup>[21-23]</sup>研究了反隐身,从而解决了隐身技术带来的物体内部对外屏蔽的问题。他们设计了一种可以使狭缝的透光性质和宽窗户相同的超材料。利用此设计,只需将此超材料置于大门的中间,整个大门看上去就和周围的墙融为一体,让人认为那只是一面墙,但实际上,物体完全可从大门进入,如图 11

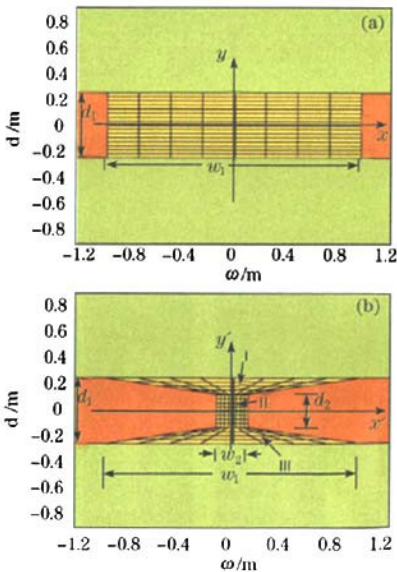


图 11 超材料将(a)图的大窗口转为(b)图的小狭缝

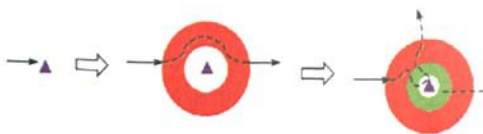


图 12 物体-隐身-反隐身

所示。超散射体将(a)图的大窗口转为(b)图小狭缝,其中  $w_1=2\text{ m}$ ,  $d_1=0.5\text{ m}$ ,  $w_2=0.25\text{ m}$ ,  $d_2=0.25\text{ m}$ 。图 12 所示为物体经过隐身,再增加一层反隐身层,能使物体重现。

近年来,由于太赫兹(THz)的优良特性,在军事领域的应用正在开发研究。太赫兹波具有非常宽的频谱(0.1~10 THz),可工作在目前隐身技术所能对抗的波段之外,因此它能探测隐身目标,仪器作为辐射源的超宽带雷达能够获得隐身飞机的图像<sup>[24]</sup>。空基、海基太赫兹成像的探测应用如图 13 所示。针对隐形作战武器系统或表面涂覆有吸波材料的飞行器、舰艇以及地面武器装备,可以通过太赫兹成像探测技术实现光学谱段的光电成像探测<sup>[25]</sup>目的。



图 13 太赫兹成像探测技术的军事应用

太赫兹雷达发射的太赫兹脉冲包含丰富的频率,可使隐形飞机的窄带吸波涂层失去作用。这种宽带太赫兹雷达波,对扁平形薄边缘不会像普通雷达那样形成共振吸收而减弱反射强度,它仅能产生很小的共振面而使反射波增强。超宽带太赫兹雷达具备高的距离分辨率、强穿透力、低截获率、强抗干扰性以及优越的反隐身性能。宽带电磁波照射目标时,它的低频特性、谐振特性以及光学区特性都充分反映出来,隐身目标在外形设计上的努力也失去了作用<sup>[26]</sup>。

除此之外,很多其他科研人员也就隐身技术这一领域做了很多研究。2007年印第安纳州珀杜大学<sup>[27,28]</sup>提出使物体在可见光范围内完全隐身的理论并准备将其应用于研发“隐身斗篷”。该研究成果仍然停留在理论阶段,尚未在实验中得到印证。在技术上还面临一个巨大挑战,即当前技术只能一次改变一种波长范围内的可见光的方向,而不能同时改变全部范围内的可见光。就算只能改变单一波长光线方向的斗篷仍然拥有诸多用途。例如它能掩护士兵躲避只发散同一种波长的夜视仪。

2008年伊利诺伊大学研究组<sup>[29]</sup>在隐身技术方面获得重大突破,让可见光绕过了用特殊材料制成的物



体,首次实现了三维物体在可见光下的隐身。他们利用了一种具有特殊光电性质的硅光晶片,这些处在同一平面内的硅光晶片可以根据入射光波的波长,制成特定的形状达到改变光线折射率的效果,这样光线就不会因为被物体阻挡产生反射,而会绕开物体。该研究组对一块贴满硅光晶片的材料进行模拟,使其在可见光下达到了隐身效果。从本质上讲,目前的隐身技术都是针对某个光波频段来说的,如隐形飞机实现了对雷达波的隐形,该研究的创造意义在于加宽了这个频段,将隐形扩展到可见光领域。

### 3 应用

隐身技术在外科手术、军事航空等多个领域中获得广泛的应用。隐身的用途还不仅限于此,还可给飞行员和司机带来方便,比如在飞机座舱的内部布满微小的“后向反射器”,飞行员只要看一下飞机舱底上的投影,就能判断出飞机离地面的高度及地面状况,有助于飞机降落。同理,隐身技术也可以应用在其他交通运输工具上,比如汽车,如果可以用肉眼透视车后面,那么倒车时就不必再因为后视镜的视野广度不足必须把头探出车窗外。另外,隐身技术也可以应用到医学,在进行外科手术时,主刀者常常会被自己的手或

其他器材挡住,无法看到全部细节。利用隐身技术,将来外科医生能利用计算机断层扫描或核磁共振成像的数据,把患者体内的情况投射到他们手术时戴的手套上。

### 4 结论

由于太赫兹辐射具有比微波更短的波长及更长的时间检测精度,因而可做成太赫兹雷达对目标进行敏感探测与监视,与微波雷达相比,它可探测更小的目标和实现更精确的定位。因此,太赫兹雷达反隐身技术在国家安全与军事上有着广阔的应用前景<sup>[9]</sup>。

尽管目前隐身技术尚有许多技术问题有待解决,但其诸多优越性及应用的可行性已使它受到世界各国的广泛关注,隐身技术必将拥有广阔的发展前景。

收稿日期: 2008-10-31; 收到修稿日期: 2009-02-17

基金项目: 上海科委项目(07DZ22026)、上海市自然科学基金(08ZR1415400)和上海市研究生创新基金资助课题。

作者简介: 王琦(1984-),女,博士研究生,主要从事微纳米光学方面的研究。E-mail: shelly3030@163.com

导师简介: 庄松林(1940-),教授,博士生导师,主要从事信息光学方面的研究。

E-mail: slzhuangx@yahoo.com.cn

通信作者: 张大伟, E-mail: dwzhang@siom.ac.cn

## — | 参 考 文 献 | —

- 1 黄勇, 陈宗胜, 徐记伟. 等离子体在飞行器隐身中的应用[J]. 飞航导弹, 2008, (4): 46-48
- 2 赵清荣. 雷达隐身涂料的发展现状[J]. 雷达与对抗, 2001, (3): 20-23
- 3 凌永顺. 等离子体隐身及其用于飞机的可能性[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 1-3
- 4 莫锦军, 刘少斌, 袁乃昌. 等离子体的隐身机理[J]. 现代雷达, 2002, (5): 9-12
- 5 高艳东, 自立春, 安永丽. 等离子体隐身技术及其应用现状[J]. 中国科学技术, 2008, (8): 30-31
- 6 唐恩凌, 张静. 等离子体隐身技术及发展现状[J]. 飞航导弹, 2008, (5): 13-15
- 7 M. G. Silveirinha, A. Alù, N. Engheta. Parallel plate metamaterials for cloaking structures [J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **75** (3): 036603
- 8 A. Alù, N. Engheta. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings[J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(1): 016623
- 9 A. Alù, N. Engheta. Plasmonic materials in transparency and cloaking problems: mechanism, robustness, and physical insights[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **15**(6): 3318-3332
- 10 A. Alù, A. Salandrino, N. Engheta. Negative effective permeability and left-handed materials at optical frequencies [J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(4): 1557-1567
- 11 A. Alù, N. Engheta. Three-dimensional nanotransmission lines at optical frequencies: a recipe for broad band negative-refraction optical metamaterials[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **75**(2): 024304
- 12 I. I. Smolyaninov, Y. J. Hung, C. C. Davis. Two-dimensional metamaterial structure exhibiting reduced visibility at

- 500 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(12): 1342~1344
- 13 D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice *et al.*. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977~980
- 14 Wenshan Cai, Uday K. Chetiar, Alexander V. Kildishev. Optical cloaking with metamaterials [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**: 224~227
- 15 Wenshan Cai, Uday K. Chetiar, Alexander V. Kildishev. Nonmagnetic cloak with minimized scattering [J]. *Appl. D Phys. Lett.*, 2007, **91**: 111105
- 16 Wenshan Cai, Uday K. Chetiar, Alexander V. Kildishev. Designs for optical cloaking with high-order transformations [J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(8): 5444~5452
- 17 Smith D. R., Pendry J. B., Wiltshire *et al.*. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, **305**(5685): 788~792
- 18 Pendry J. B., Schurig D., Smith D. R.. Controlling electromagnetic fields[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1780~1782.
- 19 Jason Valentine, Shuang Zhang, Thomas Zentgraf *et al.*. Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index[J]. *Nature*, 2008, **455**(7221): 376~380
- 20 Na Liu, Harald Giessen. Three-dimensional optical metamaterials as model systems for longitudinal and transverse magnetic coupling[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(26): 21233~21238
- 21 Xiaohe Zhang, Huanyang Chen, Xudong Luo *et al.*. Transformation media that turn a narrow slit into a large window [J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(16): 11764~11768
- 22 Huanyang Chen, Xudong Luo, Hongru Ma. The anti-cloak[J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(19): 14603~14608
- 23 Tao Yang, Huanyang Chen, Hongru Ma *et al.*. Superscatterer: enhancement of scattering with complementary media [J]. *Opt. Exp.*, 2008, **16**(22): 18545~18550
- 24 汤庆乐. THz 成像探测技术[J]. *光学与光电技术*, 2005, **3**(6): 61~64
- 25 戚祖敏. 太赫兹波在军事领域中的应用研究[J]. *红外*, 2008, **29**(12): 1~4
- 26 戴慧莹, 李希阳, 侯军燕 等. 基于 GaAs 光导开关的 THz 超宽带反隐身雷达研究[J]. *弹箭与制导学报*, **26**(1): 459~462
- 27 Yu Hua Yao, Tie Jun Cui, David R. Smith *et al.*. Realization of a super waveguide for high-power generation and transmission using right/left-handed transmission-line circuits[J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **76**(3): 036602
- 28 R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, **292**(5514): 77~79
- 29 D. Xiao, H. T. Johnson. Approximate optical cloaking in an axisymmetric silicon photonic crystal structure[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8): 860~862
- 30 赵尚弘, 杨晓铁, 谢小平. 超宽带冲击雷达与反隐形技术[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2000, **1**(2): 28~58

作者: [王琦](#), [张大伟](#), [袁丽萌](#), [陈家璧](#), [庄松林](#), [Wang Qi](#), [Zhang Dawei](#), [Yuan Limeng](#),  
[Chen Jiabi](#), [Zhuang Songlin](#)

作者单位: [上海理工大学, 光电信息与计算机工程学院, 上海, 200093](#)

刊名: [激光与光电子学进展](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [LASER & OPTOELECTRONICS PROGRESS](#)

年, 卷(期): 2009, 46(8)

引用次数: 0次

## 参考文献(30条)

1. [黄勇](#), [陈宗胜](#), [徐记伟](#) 等离子体在飞行器隐身中的应用[期刊论文]-[飞航导弹](#) 2008(4)
2. [赵清荣](#) 雷达隐身涂料的发展现状[期刊论文]-[雷达与对抗](#) 2001(3)
3. [凌永顺](#) 等离子体隐身及其用于飞机的可能性[期刊论文]-[空军工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2000(2)
4. [莫锦军](#), [刘少斌](#), [袁乃昌](#) 等离子体隐身机理研究[期刊论文]-[现代雷达](#) 2002(3)
5. [高艳东](#), [白立春](#), [安永丽](#) 等离子体隐身技术及其应用现状[期刊论文]-[中国科技信息](#) 2008(8)
6. [唐恩凌](#), [张静](#) 等离子体隐身技术及发展现状[期刊论文]-[飞航导弹](#) 2008(5)
7. [M G Silveirinha](#), [A Alù](#), [N Engheta](#) [Parallel plate metamaterials for cloaking structures](#) 2007(3)
8. [A Alù](#), [N Engheta](#) [Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings](#) 2005(1)
9. [A Alù](#), [N Engheta](#) [Plasmonic materials in transparency and cloaking problems:mechanism, robustness, and physical insights](#) 2007(6)
10. [A Alù](#), [A Salandrino](#), [N Engheta](#) [Negative effective permeability and left-handed materials at optical frequencies](#) 2006(4)
11. [A Alù](#), [N Engheta](#) [Three-dimensional nanotransmission lines at optical frequencies:a recipe for broad band negative-refraction optical metamaterials](#) 2007(2)
12. [I I Smolyaninov](#), [Y J Hung](#), [C C Davis](#) [Two-dimensional metamaterial structure exhibiting reduced visibility at 500 nm](#) 2008(12)
13. [D schung](#), [J J Mock](#), [B J Justice](#) [Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies](#) 2006(5801)
14. [Wenshan Cai](#), [Uday K Chetiar](#), [Alexander V Kildishev](#) [Optical cloaking with metamaterials](#) 2007
15. [Wenshan Cai](#), [Uday K Chetiar](#), [Alexander V Kildishev](#) [Nonmagnetic cloak with minimized scattering](#) 2007
16. [Wenshan Cal](#), [Uday K Chetiar](#), [Alexander V Kildishev](#) [Designs for optical cloaking with high-order transformations](#) 2008(8)
17. [Smith D R](#), [Pendry J B](#), [Wiltshire](#) [Metamaterials and negative refractive index](#) 2004(5685)
18. [Pendry J B](#), [Schurig D](#), [Smith D R](#) [Controlling electromagnetic fields](#) 2006(5781)
19. [Jason Valentine](#), [Shuang Zhang](#), [Thomas Zentgraf](#) [Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index](#) 2008(7221)
20. [Na Liu](#), [Harald Giessen](#) [Three-dimensional optical metamaterials as model systems for longitudinal and transverse magnetic coupling](#) 2008(26)
21. [Xiaohu Zhang](#), [Huanyang Chen](#), [Xudong Luo](#) [Transformation media that turn a narrow slit into a large window](#) 2008(16)

22. [Huanyang Chen, Xudong Luo, Hongru Ma](#) [The anti-cloak](#) 2008(19)
23. [Tao Yang, Huanyang Chen, Hongru Ma](#) [Superscatterer:enhancement of scattering with complementary media](#) 2008(22)
24. [汤庆乐](#) [THz成像探测技术](#)[期刊论文]-[光学与光电技术](#) 2005(6)
25. [戚祖敏](#) [太赫兹波在军事领域中的应用研究](#)[期刊论文]-[红外](#) 2008(12)
26. [戴慧莹, 李希阳, 侯军燕, 杨丽娜](#) [基于GaAs光导开关的THz超宽带反隐身雷达研究](#)[期刊论文]-[弹药与制导学报](#) 2006(1)
27. [Yu Hua Yao, Tie Jun Cui, David R Smith](#) [Realization of a super waveguide for high-power generation and transmission using right/left-handed transmission-line circuits](#) 2007(3)
28. [R A Shelby, D R Smith, S Schultz](#) [Experimental verification of a negative index of refraction](#) 2001(5514)
29. [D Xiao, H T Johnson](#) [Approximate optical cloaking in an axisymmetric silicon photonic crystal structure](#) 2008(8)
30. [赵尚弘, 杨晓铁, 谢小平](#) [超宽带冲击雷达与反隐形技术](#)[期刊论文]-[空军工程大学学报\(自然科学版\)](#) 2000(2)

#### 相似文献(3条)

##### 1. 期刊论文 [付建国](#) [相干超材料和等离子体激光器](#) -[光机电信息](#)2009, 26(10)

2003年, Berman和Stockman介绍了受激等离子体的概念及辐射激发引起的表面等离子体的量子放大器. 通过开发金属/绝缘体混合介质, 可构成一个纳米结构, 在该结构内, 会形成一个空间尺度小于波长的很强的相干场. 还讨论了V型金属结构与半导体量子点相结合的结构实现等离子体激光的可能性. 通过将超材料和等离子体辐射结合起来可以产生一种由等离子共振泵浦的小发散角电磁辐射相干光源. 文章还讨论了能够实现高Q值的相干电流的一定结构的两维阵列等离子体振荡器的激发, 它能够为实现高空间和时间相干的激光光源提供一个很好的机会, 即等离子体激光器.

##### 2. 期刊论文 [徐记伟, 张政, 黄勇, 陆益敏, 张玮](#) [周期性结构材料在隐身中的应用](#) -[飞航导弹](#)2009(4)

随着加工技术的进步, 越来越多的新材料出现在人们的面前, 一些周期性结构材料具有传统材料不具备的特殊性能. 分别介绍了频率选择表面、光子晶体、声子晶体和超材料这四种周期性结构材料, 并阐述了它们在隐身中的应用.

##### 3. 学位论文 [全保刚](#) [左手材料的制备与特性研究](#) 2006

本文利用微米加工技术分别制备了微波左手材料、太拉赫兹左手材料以及红外左手材料, 并且研究了相应材料的特殊物理性质. 以传统的紫外光刻技术结合溶脱技术, 在石英衬底上制备了微波左手材料. 我们制作了石英基左手材料和FR4基左手材料模型样品, 通过角分辨微波谱仪, 验证了左手材料中存在的负折射现象, 并且得到了这两种左手材料的负折射率. 讨论了衬底材料对左手材料工作频率的影响, 并且通过实验和时域有限差分数值模拟对这一结论进行了证实. 对太拉赫兹频率左手材料的制备工艺进行了优化, 优化后的工艺能够提高左手材料制备的成品率, 而且可以实现大面积高质量的太拉赫兹左手材料的制备. 利用太拉赫兹时域光谱系统, 研究了左手材料与构成左手材料的结构的各向异性; 通过改变P极化的太拉赫兹频率电磁波脉冲的电场与开口环形谐振器开口边的位置关系, 观测到了电耦合产生的磁共振. 根据实验测得的特征共振参数, 结合有效介质理论, 证明了开口环形谐振器超材料具有负的有效介电常数和有效磁导率. 研究了开口环形谐振器之间的距离对环与环相互作用的影响. 初步对“S”形太拉赫兹左手材料电磁特性进行了研究. 研究了利用电子束曝光技术制备红外左手材料的工艺条件, 对制备的超材料的特性进行了研究. 为了消除电子束曝光过程中由衬底产生的电荷积聚效应, 对三种不同工艺进行了探索. 最终利用PMMA/Au双层膜工艺, 结合溶脱和等离子体刻蚀工艺制作了能够在红外频率工作的“U”形开口环形谐振器超材料. 利用红外光谱系统, 对红外超材料的表面等离子体激发进行了研究.

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_jgygdzjz200908010.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jgygdzjz200908010.aspx)

下载时间: 2010年2月22日