

Quantum Stealth Technology

Kaiyuan Shao¹, Lang Shu^{1,2}, Qiao Wang^{2,3}, Ming Liu^{1,3}, Qifeng Tian², Wenxiang Hu^{1,2,3*}

¹Beijing Excalibur Space Military Academy of Medical Sciences, Beijing

²School of Chemical Engineering & Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

³Institute of Physical Organic and Medicinal Chemistry, Capital Normal University, Beijing

Email: *huwx66@163.com

Received: Feb. 25th, 2015; accepted: Mar. 3rd, 2015; published: Mar. 9th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Stealth technology is originally the product of science fiction, but the electromagnetic radar stealth technology has been widely applied in reality. With the progress of the discovery of metamaterials, quantum and nanotechnology, as well as computer simulation design technology, stealth technology has gained rapid development. Visible stealth technology gradually “surfaces”, and “invisible cloak” is moving from science fiction to reality. From the theoretical study of metamaterials particularly the case of left-handed materials, a comprehensive overview of the current situation and development prospects of quantum stealth materials were presented here.

Keywords

Quantum Stealth, Metamaterial, Left-Handed Materials, Negative Refractive Index, Invisible Cloak

量子隐身技术

邵开元¹, 舒浪^{1,2}, 王乔^{2,3}, 刘明^{1,3}, 田崎峰², 胡文祥^{1,2,3*}

¹北京神剑天军医学科学院, 北京

²武汉工程大学化工与制药学院, 湖北 武汉

³首都师范大学物理有机与药物化学研究所, 北京

Email: *huwx66@163.com

收稿日期: 2015年2月25日; 录用日期: 2015年3月3日; 发布日期: 2015年3月9日

*通讯作者。

摘要

隐身技术，原本是科幻的产物，但雷达等电磁波的隐身技术，已经在现实中得到了广泛的应用。随着超材料的发现，量子技术和纳米技术以及计算机模拟设计技术的进展，隐身技术获得了快速的发展，可见光的隐身技术也渐渐地“浮出水面”，“隐身斗篷”正在从科幻走向现实。本文从超材料特别是左手材料的理论研究情况入手，全面综述了当前量子隐身材料的发展情况及其发展前景。

关键词

量子隐形，超材料，左手材料，负折射率，隐身斗篷

1. 引言

什么是量子隐身技术？量子隐身真实存在吗？量子隐身技术，是利用光的量子性能研制隐身材料的一种技术。据报道，加拿大生物公司 Hyperstealth Biotechnology 研发出名为“量子隐形”的先进材料[1] [2]。用这种材料作为面料被命名为“Quantum Stealth camouflage”（量子隐形伪装材料），通过弯曲光线达到隐形目的（见图 1）。据说这种“量子隐形”材料完全可以在不借助其他技术的情况下实现隐形，甚至可逃过红外望远镜和热力学设备的追踪。研发人员称，“量子隐形”材料可通过折射周围光线来实现“完全隐形”的效果。该公司首席执行官盖伊·克拉默介绍说：“‘量子隐形’材料不仅能帮助特种部队在白天完成突袭行动，而且还能帮助士兵在遭遇不测时顺利逃生。此外，这种材料还有望在下一代隐形战机、潜艇和坦克上得到应用，让其实现真正的隐形，帮助部队在‘无形’中完成对敌方的打击任务。”

所谓的“量子隐形衣”的真实性，引起了大多数人的怀疑。一些人认为，所披露的“效果图”不过是计算机“PS”结果；还有一些人则认为，这可能是把某种微晶反光贴的微晶立方体改变为凹凸结构，使得对侧光产生漫反射或折射，形成的点阵组图像来欺骗视觉，等等。所有这些都与光的量子技术扯不上任何关系，仅仅是一种故弄玄虚骗人的把戏。

那么，量子隐身技术真实存在吗？它的理论基础是什么，目前是否有所发展？我们姑且不管目前“量子隐形衣”存在是否真实，而先来探讨量子隐身技术的可行性。

2. 隐身技术理论问题探讨

我们知道，光具有波粒二象性，即波动性和粒子性。光子与电子、质子、中子和基本粒子等量子一样其运动规律不遵循经典力学的牛顿运动定律，它在介质中的运动遵循量子力学的薛定谔方程。人们所看到的或仪器所监测到目标实物，都是从光源或探测器发出的光子、微波等电磁波照射或辐射到实物表面反射回来的信息，被人的感觉器官或仪器设备所感应。假如某一种物质能够无反射地完全吸收这些电磁波，那么人就无法看到物质的存在，仪器也无法感应到物质的存在。所谓隐身材料，就是将这些吸波材料涂敷在飞机、舰船、坦克及装甲车等的武器装备上，导致敌方的雷达、红外线探测器、激光探测器等无法探测到，达到“隐身”的目的[3] [4]。

近年来，隐身技术已经取得快速地发展。与第一代隐身材料相比，现代的隐身材料不但对雷达具有较好的隐身效果，而且对红外、微波、激光等辐射也具有较好的隐身效果。所谓隐身材料，是能吸收微波、激光、红外等电磁波及可见光的某些特殊涂料（目前主要是复合材料），当它涂敷在某一物体表面上后，仪器设备或肉眼无法观测到，从而达到隐身的目的。目前隐形飞行器上主要使用的是雷达吸波（微波）材料，



Figure 1. The effect picture of quantum stealth technology
图 1. 量子隐形技术效果图

它是将雷达波的能量通过耗散作用转化为热能。雷达吸波材料种类繁多，但应用最广的主要有共振和非共振两类磁性雷达吸波材料。即一类是共振型或谐振型，一类是非共振型或宽频带型。其中共振型雷达吸波材料是基于相消干涉和衰减相结合技术的磁性吸波材料。这一类吸波材料频率很窄，是为了某一特定频率而设计的。非共振磁性雷达吸波材料是一类含金属离子的碳基涂料，主要是吸收的雷达波并转化为热量散发掉，这种材料可大大降低微波辐射，并且频宽范围较大。

物体的隐身大致有二种办法：一种是光源或电磁波完全地被吸收，另一种是让光或电磁波完全地穿透。这两种方法光线或电磁波都不会产生反射，仪器设备或肉眼无法感受到物体的存在。第二种方法可能更加有效，更为科学家们所亲睐，因为它能实现完全隐身，甚至存在实现目视隐身的可能。因为人之所以能看到物体，仪器设备之所以能够探测到物体，是因为光或电磁波射到物体上后，被物体阻挡并反射到人的眼睛或仪器设备上。目视目标物与雷达等探测仪器探测目标物的情况是不同的。因为，即使已经拥有对可见光无反射地完全吸收的某种吸波材料，人虽然看不到涂敷这种材料的物体，但还可看见这个物体的背景及其周围的信息，这样，由于物体对背景的阻挡，使得背景及其周围的光线和颜色的差异，人们还是能够感觉到这个物质的实际存在。因此，要达到实际的隐身效果，就得让光无阻挡地完全透过物体，但目前还没有发现这种物质，因此，可见光的隐身材料的研制难度非常之大，几乎是不可能的。

然而，“超材料”，尤其是“左手材料”的发展，为可见光的隐身技术增加了几分可能性。

“超材料”(metamaterial)指的是经过人工设计和制造的结构并具有天然材料所没有的超常物理性质的复合材料，它包括“左手材料”、光子晶体、“超磁性材料”等等[5][6]。

左手材料(left-handed materials, LHM)，也称负折射材料(negative refractive index materials, NIM)。之所以叫左手材料，是因为当电磁波在负折射率材料中传播时，电场、磁场和波矢三者构成左手螺旋关系。物理学中，介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是描述均匀媒质中电磁场性质的最基本的两个物理量。折射率定义为光在介质中传播的速度与在真空中传播速度比。即：

$$n = \frac{v}{c} \quad (1)$$

根据麦克斯韦(Maxwell)电磁波理论，可以推导出：

$$n^2 = \epsilon\mu \quad (2)$$

即：

$$n = \pm\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (3)$$

ε 为介质的介电常数, μ 为介质的磁导率。 ε 和 μ 必须同号, n 才存在, 即光在介质中才能够传播。从数学角度来看, n 可正可负, 但负 n 却被当初的物理学家放弃去, 直到 1968 年苏联学者 Veselago 首次在理论上设想了左手材料[7], 人们才开始意识到负 n 的物理意义。英国伦敦帝国学院物理学家 Pendry 在 1996 年与 1999 年两次提出可以用细金属导线及有缝谐振环阵列构造介电常数和磁导率同时为负的人工媒质的设想[8] [9]。2001 年, 美国杜克大学 Smith 等人采用 Pendry 的方法, 构造出了介电常数与磁导率同时为负的人工媒质, 并首次通过实验观察到了微波波段的电磁波通过这种人工媒质与空气的交界面时发生的负折射现象[10] (图 2)。2003 年后, 许多科学家经过更为仔细的实验, 证实了负折射现象的存在[11]-[15]。

在电介质材料中, 介电常数 ε 和磁导率 μ 都为正值, 电场、磁场和波矢三者构成右手关系, 即右手规则。我们把这些物质称为右手材料(right-handed materials, RHM)。

第一象限为右手材料, 介电常数 ε 和磁导率 μ 均大于 0, 折射率 n 为正值, 自然界存在, 即是常规材料。第二象限 $\varepsilon < 0, \mu > 0$ 时, n 不存在, 为等离子体介质, 光或电磁波不能传播, 只有倏逝波; 第三象限为左手材料, 介电常数 ε 和磁导率 μ 均小于 0, 折射率 n 为负值, 自然界不存在, 但可以通过人工设计制造来实现; 第四象限 $\varepsilon > 0, \mu < 0$ 时, n 不存在, 为开口谐振环, 光或电磁波不能传播, 只有倏逝波(图 3)。

左手材料由于其介电常数、磁导率及折射率均为负值, 电场 E 、磁场 H 、波矢 K 三者之间满足左手规则, 按照电磁学理论推断, 它有许多不同寻常的物理特性: 左手材料折射线和入射线分别在法线的同侧, 波矢方向与折射方向相反, 即逆斯涅尔折射效应(Reversed Snell Refraction) (图 4、图 5); 相速度(波矢方向)和群速度(波印廷矢量方向)方向相反, 即能量传播的方向和相位传播的方向相反, 即逆多普勒效应(Reversed Doppler Effect) (图 6); 能量的传播方向与相速相反, 辐射将背向粒子的运动的方向发出, 即



Figure 2. The first birth of left-handed materials

图 2. 第一个左手材料诞生

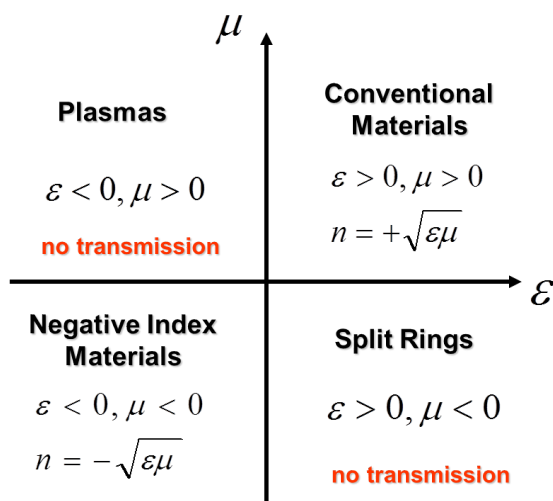


Figure 3. The relationship of dielectric constant and magnetic permeability with material properties

图 3. 介电常数和磁导率与材料性质关系

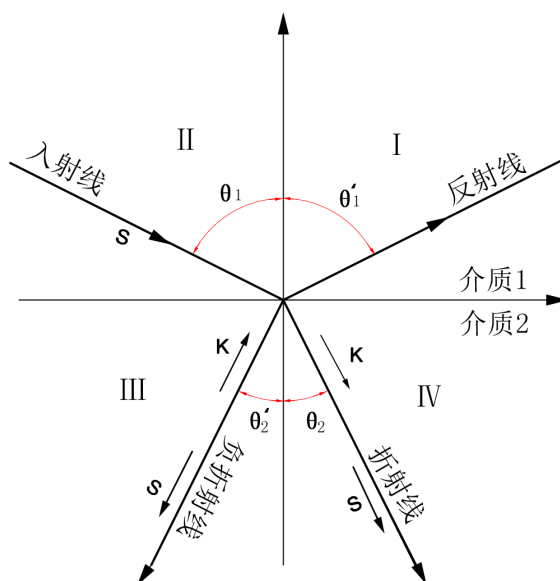


Figure 4. Snell's refraction and Reversed Snell effect

图 4. 斯涅尔折射和逆斯涅尔折射效应

逆切伦柯夫辐射效应(Reversed Cerenkov Radiation) (图 7); 还有完美透镜(perfectlens) (图 8)等等, 此外它能放大倏逝波, 还能导致非同寻常的光子隧道效应。

然而, 上述这些似乎与量子技术关系并不非常密切。一种叫做“量子隐形传态技术”, 可能产生真正意义上的量子隐身技术。当然, 与其说是“隐身”, 倒不如说是“移位”。1993年, Bennett等4个国家的6位科学家联合在《Phys. Rev. Lett.》上发表了一篇题为“经由经典和EPR通道传送未知量子态”的开创性文章。它是利用量子纠缠实现量子隐形传态的方法。奥地利的研究小组于1997年首次成功利用光子完成了量子隐形传态实验[16]。紧接着, 意大利学者于1998年初在《Phys. Rev. Lett.》上也报道了另一个成功的量子隐形传态实验结果[17]。我国科学家在这方面研究位于世界先进行列, 中国科学家曾经创造了97公里的量子远距离传输世界纪录, 引起了世界轰动。而2012年, 同样由奥地利等国家参与的国

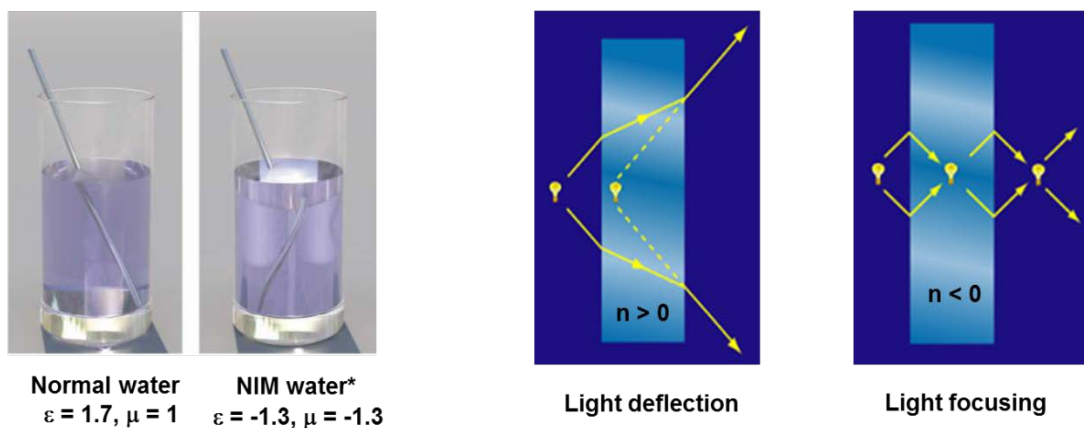


Figure 5. Negative refraction phenomenon
图 5. 负折射现象

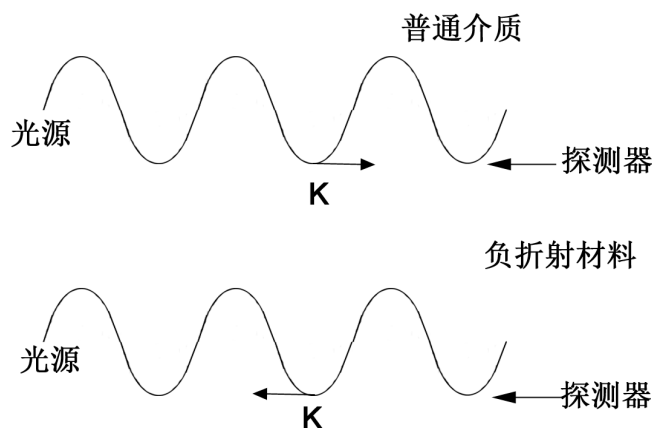


Figure 6. The Doppler effect of two kinds of medium
图 6. 两种介质中的多普勒效应

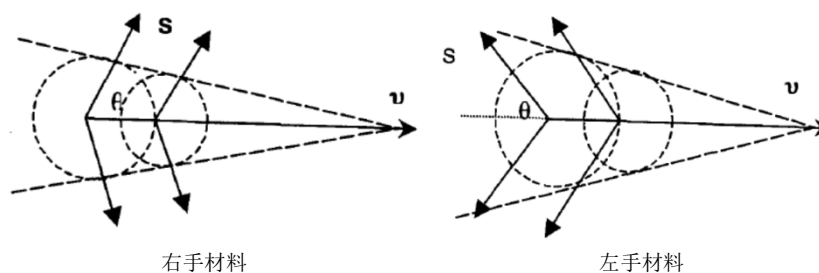


Figure 7. Cerenkov radiation effect of two kinds of material
图 7. 两种材料的切伦柯夫辐射效应

际研究小组在大西洋的岛屿之间创造了 143 公里的隐形传态历史最远纪录。但是，目前量子隐形传态是使信息发生瞬间移动的技术，而非物质。因此，要想人或其它宏观物体进行瞬间移动的话，可能还需要漫长的研究过程。

3. 隐身材料的开发及可实现方法探索

上述已经阐述，左手材料有许多不寻常的特性。正是基于这些不寻常的特性，人们开始着手开发利用。特别是完美透镜，如果能研制成功，将是光学器件制造领域的一次革命。因为当物体通过普通透镜

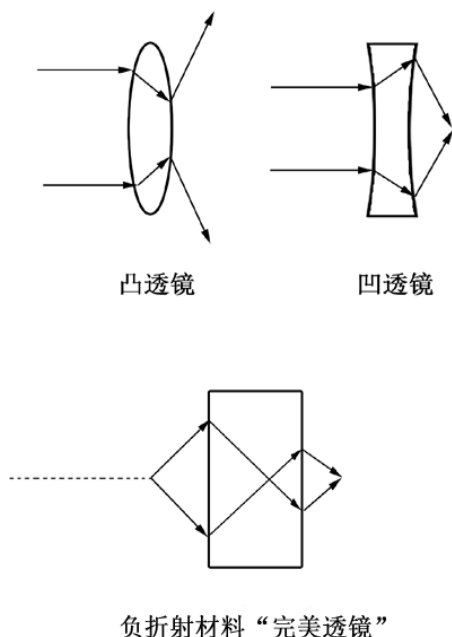


Figure 8. Perfect lens

图 8. 完美透镜

时，物体辐射形成的倏逝波携带着物体精细信息随着距离成指数式衰减，并在很短的距离内完全消失掉。普通透镜成像，反映的是物体粗的信息，精细信息都在倏逝波中。因此，无论显微镜、放大镜等光学器件的镜片材料多么优良，制造的多么精致，但任何比光波波长的物质都是无法观察到的，这就是 Rayleigh 衍射极限，这也是普通介质透镜难以逾越的瓶颈。LHM 制作的透镜，就可突破其瓶颈，它不仅和普通透镜一样能汇聚行波，最重要的是它不是衰减倏逝波而是放大倏逝波，并与行波一起聚焦成像，其波的振幅、相位都会调回原位，从而突破了普通透镜成像的界限，形成了完美透镜(perfectlens)，也称为超级透镜(superlens)。如此这样，分子水平的显微镜就可出现。

要实现完全目视隐身，关键是要让可见光能够完全穿透物体。但这不可能，因为可见光可以穿透涂敷物体表面的特殊材料，但不可能完全穿透物体本身。但假如能让光绕过物体，也就相当于光穿透物体了。让光绕过物体，就是说让光线“弯曲”，这在已知物质世界里是不可能的。然而，LHM 却具备使光波“弯曲”的可能性。因此，光波“弯曲”，是可见光区隐身技术的基础和条件。

美国杜克大学电子与计算机工程系 D. R. Smith 教授等人和英国帝国学院物理系 J. B. Pendry 等人合作，设计了第一个基于人工电磁材料在微波频段的二维电磁波传播路径图(图 9)，圆环内部分代表负折射材料，实线代表波的传播，可以看出电磁波在材料内发生了弯曲，从整个圆压缩到圆环内，在中间形成没有波传播的“空洞”。电磁波或光波在负折射材料覆盖的空间里面没有发生波的折射和散射，而是绕过“空洞”传播，如果将物体放在“空洞”中，因为波没有触及物体，也就不可能有关于物体的任何信息的波被反射回来，而且人或雷达可以看到或探测到物体背景的信息，因此物体无法被发现，从而使物体产生视觉隐身[18]。

这个设计与设想中的“隐身斗篷”(Invisible cloak)基本吻合，即是将隐身材料包覆在物体表面，当光或电磁波经过包覆层时，如同小溪里的流水，遇到石头时拐弯并绕过石头又从石头的后面汇聚后向前流去一样。当然，目前尚处于概念研究阶段。

那么如何实现这种“左手材料”呢？

实现之一：按图 3 所示的第二象限 $\varepsilon < 0$ 的等离子介质和第四象限 $\mu < 0$ 开口环型谐振环结构组合材

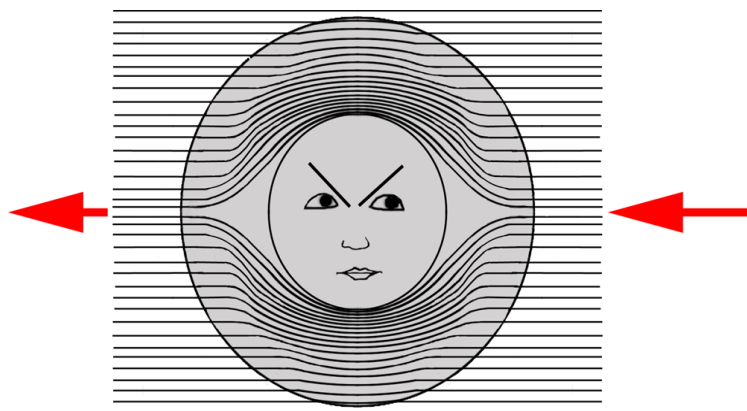


Figure 9. The graph of electromagnetic wave propagation path
图 9. 电磁波传播路径图

料，满足介电常数和磁导率均为负的性质。目前这种人工超材料已经得到了。即采用开口的环型谐振器与细长金属导线阵列结合。开口环型谐振器形状如字母“C”，大小为毫米尺度，材料取自商用印刷电路板。在微波磁场的作用下，一方面开口环型谐振器会感应出环电流，形成一个磁矩，当此磁矩与原磁场反向时抵抗原磁场，从而使得介质具有负磁导率的性质[19]；另一方面，细长导线阵列结构提供了具有等离子体型的介电系数。当电磁波频率低于其共振频率时，就会出现负的介电系数[20]。

实现之二：在某种特殊的磁性材料中，通过化学方法连接上一个手性分子，形成磁性手性材料。从理论上说，如果平面简谐波在无限均匀手性介质中传播，可由 Maxwell 方程组得到以下的本构关系：

$$D = \varepsilon_c E + i\kappa\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} H \quad (4)$$

$$B = \mu_c H + i\kappa\sqrt{\mu_0\varepsilon_0} E \quad (5)$$

式中： κ 为介质的手性参数， ε_c 和 μ_c 分别为手性介质的介电常数和磁导率， ε_0 和 μ_0 分别为真空介质的介电常数和磁导率。当真空中的光入射到手征性材料时会观察到两束折射光，通过计算可得到右旋圆极化波的折射率为：

$$n = \sqrt{\frac{\mu_c \varepsilon_c}{\mu_0 \varepsilon_0} - \kappa} \quad (6)$$

当 $\kappa > \sqrt{\frac{\mu_c \varepsilon_c}{\mu_0 \varepsilon_0}}$ 时，则 $n < 0$ ，就能实现负折射。这就要求增加手性参数，和/或减小 ε_c 和 μ_c 值。因此，

理论上来说，实现负折射完全是可能的，这也是值得材料化学科技人员研究的关键所在。连接的手性分子应当具有大的手性参数，而磁性材料应当具有较低的磁导率和介电常数。手性分子一般是有机物，磁性材料为金属及其氧化物或有机磁性材料，导电材料一般为金属、离子固体和离子液体。通过化学方法，三者结合难度较大，但可以采用化学办法两两结合，最后采用物理办法参杂在一起。一般来说，增加手性参数 κ 和减小磁导率都比较困难，而减少介电常数相对容易些[21] [22]。降低介电常数，意味着需要提高材料导电性。目前本办法仍处于理论探讨阶段。

目前已经研制开发成功的大都是按“实现之一”的方法获取左手材料。近年来，人们开始探索光学波段的左手材料。通过双金属棒结构、渔网结构等演绎了某种金属结构在光波段实现负折射和完美透镜成像的可能性。本世纪开始，纳米材料及纳米加工技术飞速发展，对负折射材料加工技术发挥着越来越大的作用。2001 年 Smith 等在微波波段成功地观察到 LHM 的负折射效应。目前，对 LHM 的研究已经从微波发展到太赫兹以及光波波段。光波波段的 LHM 的实现和应用，成为研究技术难点，也是当代科技

的前沿。2004年 Pendry 提出了采用手性介质与谐振电偶极子组合实现负折射材料的可能性[23]。2004年 Linden 等用“U”型的金纳米阵列实现了无线电频段(200 THz)和可见光频段(370 THz)的负磁导率[24]。2007年 Dolling 等在玻璃基板上刻蚀了双渔网结构,实现了可见光 780nm 的左手效应[25]。2008年 Liu 等制备了多层的“U”形金纳米环结构,分别在 120 THz 和 200 THz 附近实现了负的介电常数和负的磁导率[26]。2008年 Valentine 等用多层渔网结构第一次在红外波段实现三维的 LHM,并通过棱镜折射实验验证了其负折射行为[27]。但由于 LHM 的结构单元远小于其波长,以目前的刻蚀工艺形成这样的结构单元还很难获得突破,光波频段的 LHM 的进一步发展受到严重制约。2008年, Liu 等利用双模板辅助化学电沉积法制备了周期性排列的金属银树叶枝阵列,得到了红外波段的左手材料[28]。Liu 等利用化学沉积法直接在 ITO 导电玻璃基底上沉积银树枝状结构,发现其在红外波段具有很强的透射通带,并且在对应频率表现出明显的平行聚焦效应。这是首次利用化学方法制备左手材料,对左手材料的发展起到了很大的推动作用。

在研究左手材料时,一些研究人员提出了对左手材料实施可调的设想,即将电场或磁场施加于左手材料,并利用其对折射率进行调控,这样可根据需要从正值调到负值,这就需要研究电场或磁场对左手材料的影响。目前人们正在尝试利用铁氧体室温铁磁共振效应来实现负的磁导率,并且取得了一些研究进展[19]。金属材料中能够产生负介电常数已经被证实,非金属介质中是否也能产生负折射材料呢?如果可行的话,那么负折射材料的选择面将大大拓宽。从理论上讲,通过介电共振,某些特殊性能的非金属材料,至少能够产生“表观”的负介电常数。

4. 隐身技术及其材料的发展前景

当然,除了“左手材料”能实现负折射外,其它方式如:光子晶体等也可能实现负折射效应。

计算机负折射材料的性能模拟和设计技术方面,也有大量的研究,并取得了一定的进展[29] [30]。

A. Baev 等人提出了基于手性分子介质的负折射率材料的计算机模拟和设计的方法。应用从头计算方法计算了两个手性聚合物的单体单元构成的有机金属分子。将计算结果数据与聚合物的实验数据相比较,虽然获得手性参数比实验数据小,但它表明了负折射率可以通过引入等离子体谐振与金属纳米颗粒夹杂物来实现。近年来,材料的多尺度模拟技术发展迅速。所谓多尺度模拟,其主要思想是在模拟体系的核心部分采用精确的量子力学模拟方法,而在外围区域采用相对粗糙的模拟(例如全原子模型和粗粒化模型)分子力学模拟方法。因为,对微波、激光、红外、可见光等具有及其它力学优良性能的材料等作为分散相组装于一个聚合体中,这就存在多层次多尺度关联问题。材料的模拟计算按研究对象的空间层次大致分为微观(Microscopic)、介观(Mesosopic)和宏观(Macroscopic)三个层次,而每一个层次又有多个尺度。量子力学原理能精确地描述物质所表现出的不同现象,分子动力学方法是基于所有粒子运动都遵循经典牛顿运动定律和粒子间的相互作用满足叠加原理的分子模拟方法。两者结合,即 QM/MM 方法,已经成为研究凝聚态体系最为重要的方法。可以想见,利用这种方法对手性分子介质的负折射率材料进行计算机模拟,可能大大加速负折射材料的发现和应用。

虽然,加拿大生物公司 Hyperstealth Biotechnology 的“量子隐形衣”的水分很大,但是量子隐形技术这个概念还是可取的。特别是“超材料”的发现,它的功能已经远远超出了人们惯常的思维,它的设计与制作工艺正在不断发展和完善,或许在不久的将来会出现真正的肉眼、红外、微波等都无法觉察的“隐形衣”。近年来,我国的浙江大学陈红胜教授研究团队提出了一种可见光波段多边形“隐形衣”的设计方法,并从理论上证明能够实现各个方向上的隐身效果。经过不懈的努力,终于有所突破,研制出一种六边形柱状“隐形衣”,并于 2013 年 10 月 31 日进行了实验演示(图 10)。诚然,这与真正意义上的“隐形衣”还相距甚远,但对“隐形衣”从理论走向实用起到了重要的促进作用。

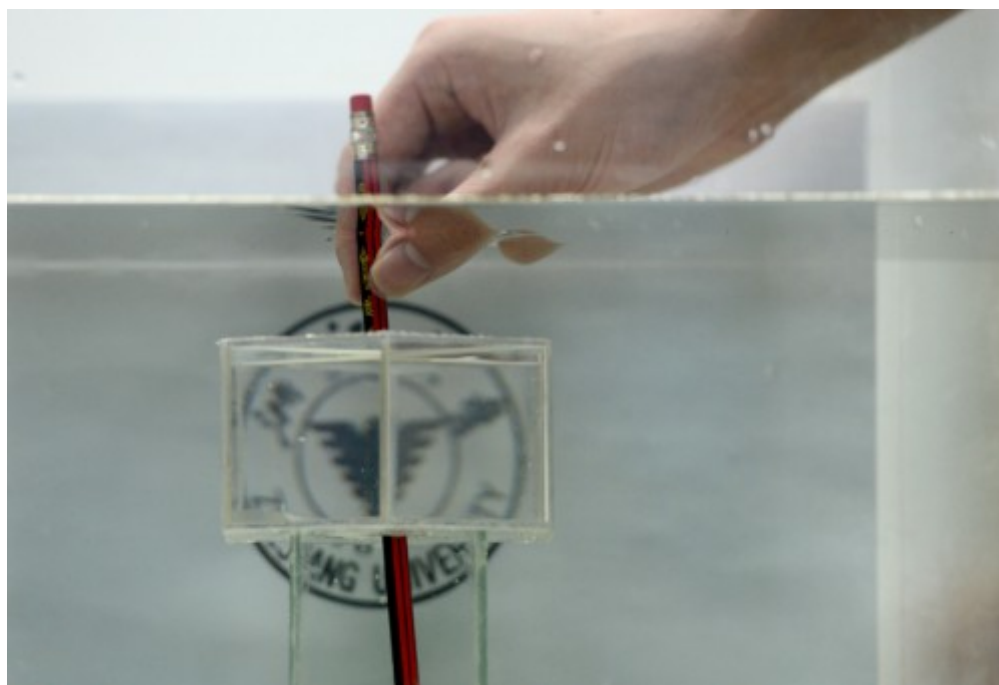


Figure 10. Hexagonal columnar “invisibility cloak” developed by Zhejiang university
图 10. 浙江大学研制出六边形柱状“隐身衣”

最近，浙江大学陈红胜教授研究团队工作人员演示一件“隐身”装置的效果。当一支铅笔被放入该装置中时，铅笔的中间部位“不见了”，但该部位的背景图案仍然可见。

5. 结论

我们已经综述了量子隐身技术和量子隐身材料的概念及其发展。但是，我们认为，就目前的技术而言，对宏观物体进行隐身技术处理除了对微波、红外隐身已经获得实际应用外，对可见光的隐身仍处于设想或概念阶段，其理论和技术都还很不完善，尚需长期的发展。量子隐形传态技术发展方兴未艾，在信息技术发展上成绩斐然，或许在不远的将来对宏观物质会有质的突破。超材料，特别是左手材料的开发，可能具有发展隐身技术的现实意义。然而，对于材料化学研究的科技人员，寻找具有手性分子的负折射材料，才是我们的重中之重的工作。

新材料的开发研究，已成为世界各国战略发展的重点。因为历史上每当一个新型材料的出现，都会引发一场应用技术上的革命。目前光子晶体正在取代传统的电子型晶体引起光电子学的革命。左手材料的发展，可能意义将更加重大，应用更加广泛。可以预见，未来的世界必将更加丰富多彩。

参考文献 (References)

- [1] Gayle, D. (2012) The camouflage fabric “that can make soldiers INVISIBLE”: Company claims it has pentagon backing for miracle material. Daily Mail, 10 December.
- [2] 朱蕾 (2012) 加拿大研发隐形衣. 城市信报, 12月12日.
- [3] Lin, H.Y., Zhu, H., Guo, F. and Yu, L.F. (2008) Microwave-absorbing proper of Co-filled carbon nanotubes. *Materials Research Bulletin*, **43**, 2697-2702.
- [4] Wang, M., Duan, Y.P., Liu, S.H., Li, X.G. and Ji, Z.J. (2009) Absorption properties of carbonyl-iron/carbon black double-layer microwave absorbers. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **321**, 3442-3446.
- [5] Cui, T.J., Smith, D.R. and Liu, R.P. (2009) *Metamaterials: Theory, design, and applications*. Springer-Verlag New

York Inc., New York.

- [6] 周济 (2004) 超材料(metamaterials): 设计思想、材料体系与应用. *功能材料*, **Sup.**, 125-128.
- [7] Veselago, V.G. (1968) The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, **4**, 509
- [8] Pendry, J.B., Holden, A.J., Stewart, W.J. and Youngs, L. (1996) Extremely low frequency plasmons in metallic meso-structures. *Physical Review Letters*, **76**, 4773-4776.
- [9] Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J. and Stewart, W.J. (1999) Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **47**, 2075-2084.
- [10] Shelby, R.A., Smith, D.R. and Schultz, S. (2001) Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, **292**, 77-796.
- [11] Parzoli, C.G., Gregor, R.B., Li, K., Koltenbah, B.E.C. and Tanielian, M. (2003) Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law. *Physical Review Letters*, **90**, Article ID: 107401.
- [12] Eleftheriades, G.V., Iyer, A.K. and Kremer, P.C. (2002) Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **50**, 2702-2712.
- [13] Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F. and Smith, D.R. (2006) Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, **314**, 977-980.
- [14] Nemirovsky, J., Rechtsman, M.C. and Segev, M. (2012) Negative radiation pressure and negative effective refractive index via dielectric birefringence. *Optics Express*, **20**, 8907-8914.
- [15] Zou, Y.H., Tassin, P., Koschny, T. and Soukoulis, C.M. (2012) Interaction between graphene and meta-materials: Split rings vs. wire pairs. *Optics Express*, **20**, 12198-12204.
- [16] Bouwmeester, D., Pan, J.W., Mattle, K., Eibl, M., Weinfurter, H. and Zeilinger, A. (1997) Experimental quantum teleportation. *Nature*, **390**, 575-579.
- [17] Boschi, D., Branca, S., De Martini, F., Hardy, L. and Popescu, S. (1998) Experimental realization of teleporting an unknown pure quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Physical Review Letters*, **80**, 1121-1125.
- [18] Pendry, J.B., Schurig, D. and Smith, D.R. (2006) Controlling electromagnetic fields. *Science*, **312**, 1780-1782.
- [19] 毕科, 周济, 赵宏杰, 李勃 (2013) 基于铁磁共振的超材料研究进展. *科学通报*, **19**, 1785-1795.
- [20] Eleftheriades, G.V., Iyer, A.K. and Kremer, P.C. (2002) Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines. *Optical Society of America*, **12**, 2702-2712.
- [21] Tretyakov, S., Nefedov, I., Sihvola, A., Maslovski, S. and Simovski, C. (2003) Waves and energy in chiral nihility. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **17**, 695-706.
- [22] 董建峰, 徐超, 徐键 (2009) 手征负折射研究进展. *量子电子学报*, **4**, 385-393.
- [23] Pendry, J.B. (2004) A chiral route to negative refraction. *Science*, **306**, 1353-1367.
- [24] Linden, S., Enkrich, C., Wegener, M., Zhou, J., Koschny, T. and Soukoulis, C.M. (2004) Magnetic response of metamaterials at 100 terahertz. *Science*, **306**, 1351-1353.
- [25] Dolling, G., Wegener, M., Soukoulis, C.M. and Linden, S. (2007) Negative-index metamaterial at 780 nm wavelength. *Optics Letters*, **32**, 53-55.
- [26] Liu, N., Guo, H.C., Fu, L.W., Kaiser, S., Schweizer, H. and Giessen, H. (2008) Three-dimensional photonic metamaterials at optical frequencies. *Nature Materials*, **7**, 31-37.
- [27] Valentine, J., Zhang, S., Zentgraf, T., Ulin-Avila, E., Genov, D.A., Bartal, G. and Zhang, X. (2008) Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index. *Nature*, **455**, 376-379.
- [28] Liu, H., Zhao, X.P., Yang, Y., Li, Q.W. and Lv, J. (2008) Fabrication of infrared left-handed metamaterials via double template-assisted electrochemical deposition. *Advanced Materials*, **20**, 2050-2054.
- [29] Baev, A., *et al.* (2007) Quantum chemical molecular analysis and design used to predict and optimize chiral parameter κ . *Optics Express*, **15**, 5730-5741.
- [30] Dolling, G., *et al.* (2006) Lighting the way to technology through innovation. *Optics Express*, **14**, 1842.