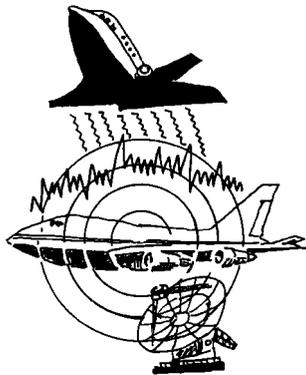


雷达对抗——等离子体隐身技术

林惠祖



一、等离子体

等离子体是由大量带电粒子组成的非束缚态宏观体系,它由自由电子、自由离子和中性粒子混合而成,是除固体、液体、气体之外的第四种物质形态。一般地,不带电的普通气体在受外界高能作用后,部分原子中的电子吸收的能量超过原子电离能后,会脱离原子核而成为自由电子,同时原子因失去电子而成为正离子,就可形成等离子体。等离子体具有足够高的电离度并表现出明显的集体行为,对电磁波的传播有很大影响。

二、等离子体隐身原理

人们从航天器返回大气层时在黑障区发生的通讯中断现象中,认识到等离子体对电磁波的屏蔽作用,产生等离子体用于隐身技术的设想,并进行了大量试验研究,取得了一定成果。等离子体隐身技术是利用磁化或非磁化冷等离子体规避雷达探测的一种新技术。在入射电磁波频率小于等离子体频率的条件下,等离子体能够反射雷达波。当存在磁场时,等离子体中沿磁场方向传播的电磁波极化方向与发射时不一致,造成极化失真,即使场强极小,也能造成较大的极化失真,这种极化失真是不容忽视的。

等离子体的这些性质,可用于对雷达进行无源干扰(有源干扰是指向雷达主动发射干扰信号干扰雷达探测;无源干扰是指通过某些方法改变雷达波的传播方向和反射雷达波强弱的干扰,但不主动发射干扰信号)。在入射电磁波频率大于等离子体频率的条件下,等离子体又能吸收电磁波并改变电磁波的传播方向,理论推导可得电磁波在等离子体中传播距离为 L 时衰减的分贝数 $N = 18n_e L / (\nu_1^2 + \nu^2)$ 。若电子密度 $n_e = 10^{12} \text{cm}^{-3}$, 电子碰撞频率 $\nu = 10^{11} \text{s}^{-1}$, 雷达波长 $\lambda = 3 \text{cm}$ (雷达波频率 $\nu_1 = 10 \text{GHz}$); 在此等离子体中传播 $L = 1 \text{m}$ 的电磁波,将衰减 178dB(分贝) ($N = 10 \lg(E_{\text{末}}/E_{\text{初}})$, $E_{\text{末}}$ 为末能量、 $E_{\text{初}}$ 为初能量、 N 为衰减分贝数,单位为 dB),即能量只剩原来的 $1/10^{17.8}$ 。可见,等离子体通过吸

雷达是现代军事探测的主要设备,它能迅速、准确地确定远距离目标并指引火力攻击,在军事领域起着极其重要的作用,所以研究雷达对抗、发展隐身技术是十分重要的。隐身技术是提高武器系统生存、突防和纵深打击能力的有效手段。在海湾战争中,F-117A 隐身战斗机执行空袭任务约 1270 架次,摧毁巴格达 95% 的目标,而自身却无一伤亡,展示了隐身技术的巨大优越性。等离子体隐身技术作为新的隐身技术,以其独特的优势备受世界各国青睐,许多国家投入大量人力、物力和财力研究等离子体隐身技术和等离子体隐身武器系统,等离子体隐身技术已成为集陆、海、空、天多维一体的立体化现代战争中最重要、最有效的突防技战术手段。据称,武器装备采用等离子体隐身技术后被发现的概率不到原来的 1%,可实现“全隐身”,因而等离子体隐身技术已成为隐身技术领域的研究热点。

隐身技术是指通过各种措施对雷达目标的特征信号进行控制,使其难于被发现、识别、跟踪和打击的技术,包括有源隐身和无源隐身两类。隐身技术的核心是降低雷达散射截面(RCS),从而减小目标被雷达发现的概率,达到隐身目的。目前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,下面先简要介绍一下这两种隐身技术。

外形隐身技术 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,在一定角度范围内显著减少其 RCS,但某个角度 RCS 的减少必然伴随着另外某些角度 RCS 的增加,所以外形隐身技术存在一定的威胁区域(即在该区域内目标容易被发现)。

材料隐身技术 以雷达吸波材料有效地吸收入射雷达波,使目标总的回波强度显著降低,能在所有方向同时减小 RCS,达到隐身目的。但该技术对吸波材料的要求极高。雷达吸波材料包括涂覆型吸波材料和结构型吸波材料两种,其中涂覆型吸波材料的应用研究一直是隐身材料重要的研究方向。

美国 F-117A、B-2、F-22A 等隐形飞机反映了外形隐身和吸波材料研究的巨大成就。此外,有源隐身技术、无源对消技术在隐身方面也有重要应用。

收雷达波使目标隐身,具有可靠的理论依据。此外,等离子体还能造成射频信号谱的离散和假调制,从而干扰雷达探测。等离子体隐身技术的基本原理就是利用等离子体层吸收和折射雷达波的特性,尽可能降低反射回雷达接收机的能量,使敌方的探测系统难于侦察和发现,从而达到隐身目的。美国休斯(Huges)实验室的实验表明,采用等离子体隐身技术可使充满等离子体的陶瓷内微波反射器波长为13cm的RCS在4G~14GHZ的频率范围内减小20~25dB。1999年,俄罗斯成功地将等离子体发生器安装在“米格”喷气式战斗机上,使其具有隐身性能,这标志着等离子体隐身技术已进入实用阶段。

外界扰动使等离子体内部产生电子和离子的振荡,振荡频率即等离子体频率 ω_{pe} ,等离子体频率是等离子隐身技术的重要参数,决定着等离子体对电磁波的作用方式。其数值为 $\omega_{pe} = (n_e e^2 / m_e \epsilon_0)^{1/2}$, n_e 为等离子体的自由电子密度, $e = 1.602 \times 10^{-19} C$ 为电子的电量, $m_e = 9.109 \times 10^{-31} kg$ 为自由电子质量, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ 为真空中的介电常数。

等离子体层对电磁波的吸收和折射作用,使等离子体隐身成为可能。等离子体对频率为 ν 的入射电磁波的折射率 $n = (1 - \omega_{pe}^2 / \nu^2)^{1/2}$,对频率低于等离子体频率的电磁波, n 为虚数,即电磁波不能在等离子体中传播,而是被其完全反射。当频率大于等离子体频率的电磁波入射到等离子体内部时,等离子体通过碰撞吸收其大部分能量,电磁波的能量被衰减,其作用机理是:电磁波的电场对自由电子做功,把一部分能量传给电子,导致电场自身的能量被衰减,电子又通过与其他离子的有效碰撞,把能量转化为热量,从而极大地减少雷达接收方向的电磁波强度。等离子体隐身的机理有两种,如图1所示。

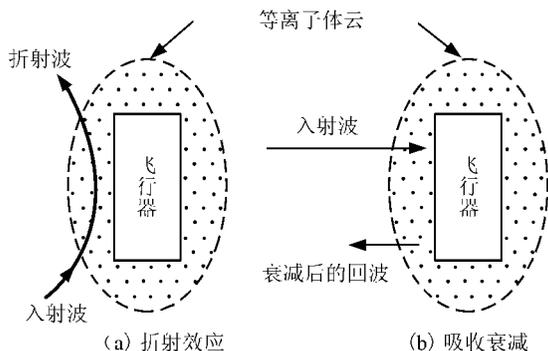


图1 等离子体隐身示意图

吸收隐身 等离子体能以电磁波反射体的形式

对雷达进行电子干扰,同时通过电子与离子的碰撞吸收入射到等离子体内部的电磁波的大部分能量。为减小RCS、提高隐身效果,自由电子密度分布应尽可能地使等离子体能在很宽的频带范围内较强地吸收入射波,同时尽量减小对入射电磁波的反射,使等离子体对电磁波的反射系数降至最小,因此理想的隐身等离子体的自由电子密度应满足以下条件:等离子体自由电子密度应是不均匀的,即形成梯度电子密度;等离子体的折射率应是连续且大于零的实数;等离子体折射率的导数也应是连续的。

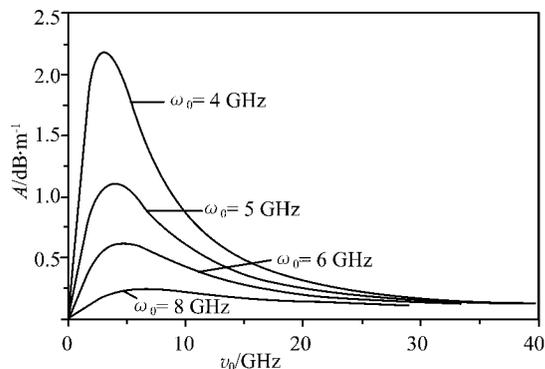


图2 吸收衰减与碰撞频率的关系

假设等离子体层为球形,则 $n(r_0) = 1, n(0) = 0$,其中 r_0 为等离子体球半径。当入射电磁波的频率高于等离子体频率时,等离子体对电磁波的衰减以碰撞吸收为主。当入射波频率接近最大等离子频率时,等离子体对电磁波的衰减非常大,称为共振衰减。因此,利用等离子体的共振衰减将使目标的隐身效果更好。但是实验中很难做到等离子体频率等于入射电磁波的频率,由图2(其中 ω_0 为入射雷达波频率,横坐标 ν_0 为等离子体频率,纵坐标 A 为单位长度上的衰减分贝数,峰值为等离子体频率等于入射雷达波频率时入射雷达波的能量衰减量)可知,即使等离子体频率与入射电磁波的频率相差1倍多,也能取得很好的隐身效果。实际应用中,等离子体频率只需接近入射雷达波频率即可。所以实用的隐身等离子体装置要针对工作在不同频段的雷达进行设计,使等离子体频率接近雷达波频率,才能更有效地发挥隐身效能。

折射隐身 折射隐身是利用非均匀等离子体对入射波的折射使电磁波传播轨迹发生弯曲,导致雷达回波偏离雷达的接收方向,从而使目标难以被雷达发现,达到隐身目的。在1992年出版的美国国防报告AD-A250710上,格雷戈意尔(D. J. Gregoire)

等人首先提出等离子体折射隐身的思想。不均匀非磁化等离子体中电磁波的传播主要取决于等离子体的折射率;通过分析发现,等离子体折射率的变化对目标隐身的影响非常大,等离子体的电子密度变化得越快、隐身效果越好。当入射到等离子体中的电磁波频率大于等离子体频率时,折射率 n 为小于 1 的实数,电磁波可以在等离子体中传播,但由于等离子体内自由电子密度不均匀,导致电磁波折射,通过一来一回两次折射,电磁波传播轨迹将严重弯曲以致严重偏离原方向,造成反射回波偏离雷达的接收方向,明显降低目标的 RCS,从而提高目标的隐身性能。

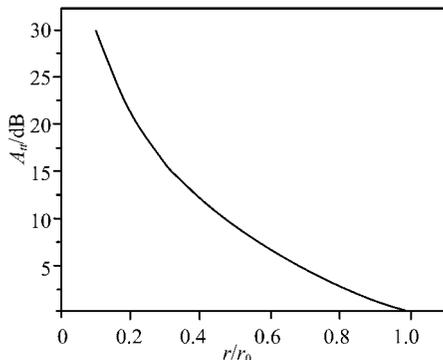


图3 折射衰减量与等离子体包层厚度的关系

若等离子体的自由电子密度随半径逐步递减,即越靠近外层,自由电子密度越低,则平行入射等离子体层的电磁波将是发散的,所以适当选取等离子体层的厚度和自由电子密度可以使目标尽可能少地被雷达波照射,从而减小目标的 RCS。由图3可知,折射效应可产生很好的隐身效果,当 $r/r_0 = 0.4$ 时就可衰减10dB,其中 r 为目标半径、 r_0 为等离子体层的厚度, A_u 为与横坐标 r/r_0 对应的衰减分贝数。当 $r/r_0 = 0.2$ 时衰减量接近22dB,所以缩小目标半径或增加等离子体层厚度均能急剧增加衰减量,从而取得更好的隐身效果。

三、等离子体的产生方法

等离子体隐身的关键问题是产生隐身等离子体并使其维持足够大的密度范围和足够长的时间,只有飞行器的等离子体包层和电子密度控制在一定范围内,才有隐身效果。等离子体普遍存在于自然界中,太阳紫外线和宇宙射线可使空气电离形成地球上空的等离子层——电离层;核爆、放射性核素的射线和超音速飞行器的激波等都可形成弱电离等离子体,但并不适用于等离子体隐身。等离子体隐身所用等离子体的产生方法主要有以下三种:一是利用

高压气体放电产生等离子体,即在常温下通过电源以高压的形式产生气体放电,将气体电离成等离子体,强电离放电已成为飞行器等离子体隐身技术目前的关键研究课题;二是利用喷流式等离子体发生器产生等离子体;三是在目标的特定部位,特别是强散射区,涂一层放射性同位素,其在衰减过程中放出的射线具有很高能量,在穿行于空气的过程中可轰击空气分子使其电离,产生大量的中子和离子,形成等离子体。第二、第三种方法属于低温等离子技术,是现在世界上主要的隐身等离子体产生方法。

据报道,俄罗斯斯克尔德什研究中心在1999年1月研究电弧放电产生等离子体的第一代等离子体发生器;1999年3月,他们就研制出气体经“脉冲电晕”产生等离子体的第二代等离子体发生器,它不仅能衰减反射信号,还能制造许多假信号,大大增加了飞行器的跟踪难度。以后他们又致力于研究利用飞行器周围静电能量产生等离子体的第三代等离子体发生器,这种设备将会圆满解决等离子体隐身技术的离子源问题,使该技术向前迈进一大步,但到目前为止还未见其研制成功的报道。

四、等离子体隐身对现代战争的影响

等离子隐身技术是电子战的新概念,能够给予对方巨大威慑,等离子隐身技术可用于飞机、坦克、舰船,甚至是地面重要军事目标的隐身,在军事上具有极大的应用价值。与其他隐身技术相比,等离子体隐身具有以下优点:宽频带、高吸收率、使用时间长、价格便宜,可通过开关迅速控制等离子体的产生和消失,使用简便、隐形效果好。此外,等离子体隐身无需改变目标外形,解决了隐身性与气动性的矛盾,不但不会影响飞行器的飞行性能,还可减小飞行阻力。俄罗斯的风洞实验表明,等离子隐身技术可使飞行阻力减少30%以上,大大提高飞行器的速度。

等离子隐身技术是21世纪新型战机、舰船的核心技术之一,是反雷达探测的有效方法,一旦投入使用,将对未来战争产生重大影响,因而为世界各国广泛重视。为了尽快将这一技术投入装备使用,我国已把等离子隐身技术列为国家重大基础研究和国家自然科学基金重大项目的研究内容之一。

等离子体隐身技术最主要的难点是设计这样一种等离子体发生器——能耗低、产生足以将目标包裹起来的等离子体包层、适应各种武器平台,而且易于控制。等离子体隐身技术的发展对雷达研究提出

分子电子学

邵建新

一、什么是分子电子学

分子电子学(molecular electronics),是指用有机功能材料的分子构筑电子线路的各种元器件,如分子开关、分子整流器、分子晶体管等,并测量和解析这些分子尺度元器件的电特性或光特性的一门学科。

20世纪是无机半导体的世纪,21世纪将是有机分子电子学的世纪。科学家们根据摩尔定律预测,无机半导体集成电路的发展,将在2020年左右达到极限。随着人类进入信息时代,电子技术要求器件和系统向“更小”“更快”“更冷”的方向发展。“更小”指器件和电路的尺寸更小,“更快”指响应和操作速度更快,“更冷”指单个器件的功耗更小。但近年来,人们在向“更小”发展的过程中遇到了较大困难。以硅集成电路为例,国际上已能生产最小线宽为130纳米的电路,但在进一步发展到线宽小于100纳米以下的电路(即所谓“纳米电子器件”)时就会遇到两大困难,一是由于这一尺寸无法使用光刻技术,因为它已远远小于光刻技术中所用光束的波长,而且掩膜和硅片的平整度及两者的平行度也成为工艺方面的瓶颈;二是工艺设备和研发的投资可能远远大于回报,因为根据摩尔第二定律,这种成本随器件尺寸的减小呈指数增长。如果能在一个有机分子的区域内实现对电子运动的控制,使分子聚集体构成有特殊功能的器件——分子器件,则完全有望突破摩尔定律,极大地提高电路的集成度与计算机的运行速度。因此,科学家将注意力逐渐集中到分子电子学,也是很自然的事情。

二、分子电子学研究的基本问题

分子电子学研究的基本问题大体上可分为两类,即分子器件和分子材料。分子器件主要研究分子导线、分子开关、分子整流器、分子存储器、分子电

路、分子电子芯片等,与传统的固体电子器件相比,分子器件具有很多优点。分子电子芯片的尺寸比目前的硅芯片小3个数量级;一个同样体积的分子芯片具有比通常芯片高出几百万倍的计算能力;在不明显增加成本的前提下,由于集成度的提高,计算速度也会大大提高。而通过自组装方式构造分子器件,可成功解决有机功能分子与界面的接触问题及界面接触导致的测量误差。分子材料主要研究哪些材料能够用于制作分子器件、材料的制备方法及性能测试等。这两类基本问题是相辅相成、密不可分的。如何将分子材料与分子器件的研究有机结合,并协调发展,是分子电子学研究的精髓,也是推动分子电子学发展的核心动力。

构筑任何一个分子器件的基本前提是:必须将少数几个分子,甚至单个分子镶嵌在两个电极之间,形成电极-分子-电极(metal-molecules-metal,即MMM连接)。这种连接可以采用两个方法实现:(1)采用扫描隧道显微镜(STM)或导电针尖原子力显微镜(CP-AFM)构筑模型器件;(2)采用纳米间隙的电极对,构筑实际的连接器件。但这种MMM连接的研究,大多局限在少数大分子如DNA和纳米碳管上。现在,分子与电极的连接大多是一种简单的机械接触,其接触电阻对器件的作用严重影响了器件的性能与可重复性。为了解决这些问题,在功能材料的末端,可有目的地引入一些用于自组装的功能性基团,通过自组装使材料与电极通过化学键接触而非机械接触结合。因此,自组装技术近年来在分子器件研究中得到越来越广泛的重视。

三、构筑分子器件——人工组装与自组装

依据分子器件构筑过程当中的驱动力是靠外因还是靠内因,可将分子器件分为两类,即人工组装分

了新的挑战,为对抗等离子体隐身技术,可利用其存在“频率窗口”的不足之处——等离子体隐身不是全频段的隐身(在低频段,等离子体密度低、衰减能量少、隐身效果差;而在高频段,则需要很高的等离子体密度,难以取得理想的隐身效果),有针对性地开发新型雷达,提高雷达对抗等离子体隐身的性能。

目前,世界各国都在研究对抗隐身技术的方法,随着各种探测技术的发展,单靠一种隐身方法已不能满足需要,必须在隐身理论的指导下,综合运用外形隐身、材料隐身和等离子体隐身等各种方法,才能有效地实现全天候、宽频带、全方位、智能化隐身。

(湖南省长沙市国防科学技术大学 410073)