

电子回旋共振微波等离子体及其在材料科学中的应用

施 昌 勇

(北京服装学院基础部 100029)

低气压、低温放电方面的一个重要的最新进展是电子回旋共振(ECR)放电。这种技术首先是在核聚变研究中发展起来的。最初,它被用于磁镜实验装置产生和加热等离子体,后来,又被发展成为托卡马克、串级磁镜等聚变装置实验中进行等离子体加热的主要手段之一,即电子回旋共振加热(ECRH)。目前,这一高技术已被移植到各种低温等离子体应用之中,显示了蓬勃的生命力。

电子回旋共振微波等离子体是指:当输入的微波频率等于电子回旋共振频率 ω_{ce} 时,微波能量可以共振耦合给电子,获得能量的电子电离中性气体,产生放电。电子回旋频率为 $\omega_{ce} = eB/m$, e 和 m 为电子电荷及其质量, B 是磁场强度。我们通过调节磁场位形,使得这个条件在放电室某一体积或表面积中得到满足,即 $\omega = \omega_{ce}$ 。在磁场中,电子通过共振吸收机制获得能量,从而电离或激发中性粒子。这种放电可以在低气压下进行。通过改变放电气压、气体流量、磁场形态和输入微波功率可以获得参数满足需要的等离子体。

ECR 等离子体的物理研究工作包括微波在等离子体中的传播和吸收的基本物理过程,等离子体的电磁约束和稳定的特性等。这些研究工作目前已经卓有成果,现在主要是进行 ECR 等离子体的应用研究。

件失效或烧毁;当微波照射功率密度达到 $10 \sim 100\text{W}/\text{cm}^2$ 时,高频率微波辐射形成的瞬变电磁场可使金属表面产生感应电流,通过天线、导线、电缆和各种开口或缝隙耦合到卫星、导弹、飞机、舰艇、坦克、装甲车辆等内部,破坏传感器和电子元器件等各种敏感元件。

5. 攻击隐身武器。隐身武器除了具有独特的外形以减少雷达反射波之外,更重要的是采取吸波材料,吸收雷达要探测的电磁波。如美国的 B-2 隐身轰炸机和 F-117A 隐身战斗机等不仅机体采用吸波材料,而且机体表面也涂有吸波涂料。高频率微

一、ECR 微波等离子体技术的特点

在等离子体应用技术中,可以定义能量活性系数 $= (E_i + E_o) / E_i$ 其中 E 是碰撞离子能量, E_o 是中性粒子能量。

随着离化率及等离子体密度的提高,能量活性系数可以大大提高,从而增加了等离子体的强化作用。于是,寻求高离化率、大面积均匀、高密度的等离子体产生技术并将其应用于材料表面改性过程是科学工作者多年来追求的目标。

传统的低气压、低温等离子体是在气压范围从 1Pa 到 100Pa 的气体中进行直流、微波或射频放电产生。直流放电首先被研究和应用,但直流放电等离子体是有极放电,而且密度低、电离度低、运行气压高,这就限制了其应用的广泛性。随后,人们又开发出射频放电、微波放电等离子体技术,它们都是无极放电,产生的等离子体密度比辉光放电要高,因而获得较广泛的应用。

一般的微波放电是在以放电室壁为边界的有限体积中进行的。实际的放电壁可以是导电的波导壁,也可以是由能透射微波的材料(如石英玻璃)构成的谐振腔壁。它有一个出口,以便激发态或带电的粒子通过这个出口扩散到处理区。等离子体包含电子、离子和中性粒子 3 种成分,对于稳定放电它们各自的密度应当是空间位置的函数。维持放电的微波能量可用一变化的电场表示:

波的强度和能量密度要比雷达微波高几个数量级,它产生的纳秒级脉冲的频带达到数千兆,远超过吸波涂层的带宽,足以抵消这种隐身效果,轻者可以使机毁人亡,重者甚至可以使武器即刻熔化。

微波武器有一系列的优点,如近于全天候的运用能力;波束比较宽,对波束的瞄准没有太高的要求,可以同时杀伤多个目标。微波武器类似于雷达系统,只不过具有更高的功率,因此有可能设计出一种系统,让其首先探测和跟踪目标,然后提高功率杀伤目标,并且全部以光速进行。因此可以预见,微波武器将成为 21 世纪的太空武器。

$$E(r) = E(r_0) \exp[i(k \cdot r - t)]$$

当微波频率足够高时,主要吸收机制只考虑电场对电子所作的功,电场对离子的作用可忽略。

微波能量耦合有无稳态磁场和存在稳态磁场两种情况。

1. 无稳态磁场的情况

这种情况下的能量耦合是通过弹性碰撞及非弹性碰撞实现。由于电子的有效碰撞频率 ν_e 是放电气压 P 的函数,研究表明,对于 300K 氦气,微波激发频率为 $\omega = 2.45 \text{ GHz}$ 时,维持一个无磁场放电的氦气气压范围是 $51.33322 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 101.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。对于其他气体,维持一个无磁场放电的氦气气压范围是 $0.51.33322 \times 10^2 \text{ Pa} \sim 101.33322 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。

在低气压下 ($< 10013.33322 \text{ Pa}$),电子和中性粒子、电子和离子碰撞平均自由程很长,即电子的有效碰撞频率很小, $\nu_e \ll \omega$,在此条件下,为维持无磁场放电需要较高的微波输入功率和高 Q 值的谐振腔体,这是难以做到的。

一个有效的解决方法是,加上磁场来增加电子回旋共振加热的能量耦合部分,用 ECR 放电来维持低气压放电。

2. 存在稳态磁场的情况

当微波频率足够高时,主要吸收机制仍然只考虑电场对电子所作的功。存在稳态磁场时,电子能量的吸收包括焦耳热(弹性碰撞及非弹性碰撞加热)和电子回旋共振加热,电子得到能量后,通过碰撞将能量转换给离子和中性粒子。

波和等离子体相互作用的物理研究表明:当输入的微波频率 ω 等于电子回旋共振频率 ω_{ce} 时,微波能量可以共振耦合给电子,获得能量的电子电离中性气体,产生放电。电子回旋频率为 $\omega_{ce} = eB/m$,其中, e 和 m 分别为电子电荷及其质量, B 是磁场强度。共振仅仅与磁场有关,我们通过调节磁场,使得这个条件在放电室某一面积或表面积中得到满足,既 $\omega = \omega_{ce}$ 。这就是所谓电子回旋共振加热技术。

研究还表明,存在稳态磁场时,在低气压下,当 $\omega = \omega_{ce}$ 时,即使 ν_e 很小,在低电场强度下,也可以得到高功率的吸收,这相当于在回旋区增加了有效电场;从物理图像上看,在回旋区电子垂直磁场的速度增加了。

虽然存在碰撞,但在 $\nu_e \ll \omega$ 条件下,在两次碰撞之间,由于电子回旋共振加热电子获得的能量反比于 ν_e ,于是,在低气压下,电子能在低电场中耦合

获得较大的能量。当气压增加时, ν_e 上升,当 $\omega = \omega_{ce}$ 时,放电变成碰撞占优势,能量耦合为碰撞吸收,磁场效应变弱。所以,ECR 技术是低气压放电的能量耦合技术。在低气压下,电子在两次碰撞之间可以回旋很多圈,从而获得较多的能量来维持放电。

实际上,ECR 放电都是在非均匀磁场中进行的,这种磁场通常是用线圈产生的磁镜型磁场或用永久磁铁产生的多极会聚形态的磁场,图 2 给出了电子在磁镜型磁场中的运动轨迹,电子围绕磁力线作螺旋运动,进入会聚场后其回旋半径减小,直到由于磁镜效应被反射回来。如果存在一个横向的微波电场,电子在 ECR 区域被加速,如图 2(b) 所示。在磁镜磁场中,电子被强场区反射回来,又由于气压较低, ν_e 比较小,在两次碰撞之间,它可以多次通过 ECR 层,从而多次被加速而获得较多的能量。

图 1 在稳态磁场中电子的运动

(a) $E=0$ (b) $E = E_0 e^{j\omega t}$, $\omega = \omega_{ce}$, $E_0 \perp B$

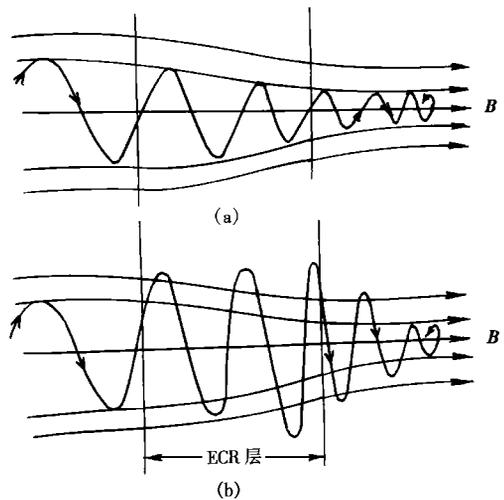


图 2 磁镜型磁场中的电子运动

(a) 没有加速电场 (b) 存在垂直于磁场的加速电场

这个 ECR 层通常很薄,在该区域外,几乎没有能量耦合给电子,因此,该能量的耦合是高功率密度的。这个 ECR 层就相当于直流放电中的热阴极,它

提供了维持低气压放电的高能电子。ECR 放电是非麦克斯韦能量分布的,它决定于磁场强度、位形、ECR 层的情况等。

因此,ECR 微波等离子体具有以下特点:

放电气压低($1\text{Pa} \sim 10^{-3}\text{Pa}$),无极性放电;

电离度高($>10\%$),等离子体密度高($10^{11} \sim 10^{13}$),可形成大面积均匀的、高活性的等离子体;

离子能量呈较小的能量分散,平均离子能量为 $20\text{eV} \sim 30\text{eV}$,能量分布是非麦克斯韦能量分布,其高能尾巴较短,减少了高能离子对基片及薄膜的破坏作用;

等离子体电位较低,这对基片及薄膜损伤较轻;

磁场约束减少了等离子体与器壁的相互作用,金属器壁的溅射可以忽略;

可稳态运行,设备简单,效率高,参数易控制。

正是由于 ECR 放电具有直流、射频等其他放电方法所无法取代的优点,微波 ECR 等离子体应用于材料制备和处理时,可以在室温下获得高纯度、高质量的沉积物和处理物,因此,近年来各国对微波 ECR 等离子体应用研究工作发展极为迅速。

二、ECR 微波等离子体技术在材料科学中的应用

1. 薄膜制备

可以用于微波 ECR 等离子体化学气相沉积(E- CRPCVD);用 ECR 微波溅射和反应溅射等方法沉积金属薄膜、陶瓷薄膜、高温超导薄膜等各种薄膜,具有沉积速率高、结构致密、表面光滑平整、薄膜对基片的附着力强等优点。实验研究表明,在室温下就可以沉积出纳米晶体膜。

用于 ECR 微波等离子体激发金属有机化合物气相外延(MOVPE)。外延生长薄膜时,生长温度低,会降低缺陷密度。用 ECR 微波等离子体技术能在较低温度下气相外延生长单晶薄膜。例如,常规的 MOCVD 外延生长 GaN 单晶膜,需要 900°C 左右的生长温度,而用 ECR 微波等离子体激发 MOVPE 在 300°C 左右就能出 GaN 单晶膜。另外,单晶膜外延生长时,离子能量高会使沉积变成多晶,而在 ECR 微波等离子体中,离子能量低到几十 eV,有利于均匀外延生长单晶膜。

用于 ECR 微波等离子体氧化成膜。对于普通的有极放电等离子体产生装置来说,由于有电极,高温下不可避免地要被氧化,产生等离子体是很难的,而 ECR 微波等离子体氧化成膜是个有效方法。例如,在低于 300°C 下,用 ECR 微波等离子体技术氧化产生的约 20cm^2 面积均匀氧化硅层可以和其他氧化

工艺在 1000°C 下氧化产生的氧化硅性能相媲美。ECR 该氧化技术也可用于高温超导膜的氧化及其他氧化物膜的生成。1989 年,中科院等离子所成功地在小于 450°C 温度下的硅片上形成高温超导 YBaCuO 膜, $T_c = 91\text{K}$ 。若用磁控溅射法制备,基片温度须在 750°C 以上。

ECR 微波等离子体聚合应用。由于自由基是造成等离子体聚合的主要的粒种,表面自由基与从等离子体扩散来的那些基的反应使得等离子体聚合物生长。很显然,ECR 微波等离子体技术提供的高电离度和高密度的等离子体是极丰富的活性粒种和各种基的源,该技术最适合用于等离子体聚合。ECR 微波等离子体聚合沉积速率比射频等离子体沉积速率要高得多。

金刚石合成。通常合成金刚石的工艺有化学气相沉积 CVD、离子束沉积和激光诱导 CVD 等。而用微波等离子体辅助 CVD 合成工艺有可能得到高质量的金金刚石薄膜。

2. 参杂、刻蚀、表面清洗

半导体工艺中广泛采用离子注入代替高温扩散工艺,并广泛应用于金属材料表面改性。采用微波 ECR 等离子体技术获得的高密度、大面积宽束强离子流,对于注入剂量大的工艺,所需时间短。又由于微波 ECR 等离子体技术的无极性,避免了热阴极和气体相互作用寿命短的问题。

实验证明,微波 ECR 等离子体技术应用于刻蚀工艺中有以下优点:ECR 等离子体中离子能量低,不会引起光刻胶的损伤;可使用高活性气体,并可较长周期地工作;等离子体密度高,提供大量高活性反应粒种,从而提高刻蚀速率;气压低,使离子流有很好的方向性;ECR 等离子体有很好的各向异性刻蚀性能。因此,ECR 微波等离子体刻蚀技术非常适用于半导体工业中要求的刻蚀精细图形。

采用稳态的微波 ECR 等离子体对各种类型的聚变装置进行真空清洗,得到较通常采用的直流辉光放电好得多的效果,它不仅迅速除去真空壁上吸附的轻杂质,而且可以十分有效地除去水分。

3. ECR 离子源技术

若 ECR 微波等离子体发生室的引出孔除去限制环,加上屏栅、加速栅和抑制栅及相应电位,则装置成为 ECR 离子源,可广泛应用于离子注入、生物技术、离子束沉积等各种离子束处理中。

ECR 微波等离子体技术有着广阔的发展和应用

全球定位系统的原理及其应用

黄振平

(靖江电视大学 江苏 214500)



在生活中, GPS 这个词时常出现在我们的视野中,那什么是 GPS?

一、GPS 系统的提出

全球定位系统是美国国防部部署的一种卫星无线电定位导航与报时系统, GPS 是全球定位系统的简称。

20 世纪 50 年代后期, 美国派侦察船跟踪侦察苏联向太平洋发射洲际弹道导弹时发现, 如果知道导弹轨迹, 就可推出船的位置, 那么导弹换成在轨卫星也行。在此思想指导下, 1958 年底, 美国海军委托霍普金斯大学应用物理实验室研究军用舰艇导航服务的卫星系统, 即海军导航卫星(又称子午仪导航系统), 于 1964 年 1 月研制成功, 用于北极星核潜艇的导航定位并逐步用于各种军舰导航定位。尽管子午仪导航系统已得到广泛的应用, 并显示出巨大的优越性, 但也存在严重缺陷, 一台接收机需观察 15 次合格卫星通过才能达到 10m 的单点定位精度, 而且只能给出 2 维坐标——经度和纬度, 不能给出高程。

鉴于子午仪导航系统存在的缺陷及海陆空三军和民用部门对导航要求越来越高, 美国于 1973 年正式开始 GPS 的研究和论证工作。开始方案是 24 颗卫星平均分布在互成 120° 的 3 个轨道平面上, 对于地球上的任何位置均能同时观测到 6~9 颗, 后调整为 18 颗卫星分布在互成 60° 的 6 个轨道面上, 每个轨道面上布 3 颗, 彼此相距 120° , 从一个轨道面到下一个轨道面的卫星错动 40° , 保证地球上任何一点均能同时观察到 4 颗星, 经过一段实验后于 1990 年初对卫星配置进行第三次修改, 最终由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用星组成, 于 1993 年建成(如图 1)。

二、GPS 系统的组成

GPS 系统由导航星座、地面台站和 GPS 接收机

3 部分组成。导航星座由 21 颗工作星和 3 颗备用星, 分布在 6 条轨道上, 轨道呈圆形, 偏心率为 0.01, 轨道高度 20200km, 倾角 55° , 运行周期为 12 小时, 每颗星以 1575.42Hz 和 1227.60Hz 两种频率为军事用户播发加密的高精度导航数据(P 码), 定位精度可达 10 米, 测速精度 0.1m/s, 授时精度为 10ns, 同时以 1575.42Hz 的频率为民用用户播发精度较低的导航数据(C/A 码), 定位精度 100 米。

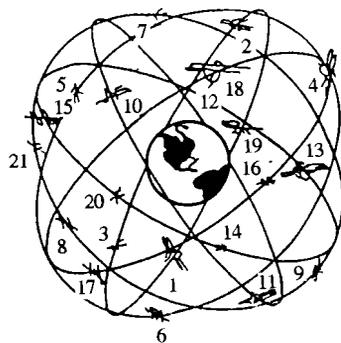


图 1 GPS 工作星座

GPS 地面站由 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站组成。监测站对每颗卫星长年连续不断地进行观察, 每 6 秒进行 1 次伪距测量和积分多普勒观察。采集气象要素, 定时将观测数据送往主控站, 经大型计算机计算各卫星原子钟钟差、电离层、对流层校正参量等各种测量数据, 编制各卫星星历, 编成电文发送到注入站, 当卫星通过注入站视界时, 注入站通过 S 波段发射机将导航信息注入卫星, 每天 1 次, 然后由卫星实时地播送给用户。

GPS 系统采用无源工作方式, 用户不需向卫星发射信息或询问而只接收由导航星送下的信息, 所以用户设备主要包括导航接收机和处理控制解算显示设备。

前景。表面科学和工业生产的需要, 理论和实验研究的需要, 都将进一步推动该项技术的发展。预计

未来, 作为离子技术中的一只奇葩, ECR 微波等离子体技术的应用必将取得更加突出的成就。