

文章编号: 2095-4980(2016)03-0329-07

光生等离子体栅扫描天线研究进展

闫兴伟, 李春化

(西安电子工程研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 毫米波和太赫兹(THz)波天线扫描技术已经成为当前电磁领域研究的热点, 光生等离子体栅(PIPG)扫描天线技术作为一种低成本的快速扫描技术为操控毫米波和 THz 波提供了新的方法和思路。本文将对 PIPG 扫描天线的原理、结构、效率和方向图等主要研究进展做详细的论述, 并且对 PIPG 扫描天线的研究意义和存在的主要问题进行讨论和展望, 希望对 PIPG 扫描天线的研究和应用提供参考。

关键词: 光生等离子体栅; 天线扫描; 太赫兹波; 衍射

中图分类号: TN821.9

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201603.0329

Progress on the photo-induced plasma grating scanning antenna

YAN Xingwei, LI Chunhua

(Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: The antenna scanning techniques of Milli-Meter Wave(MMW) and terahertz(THz) wave have attracted much attention in electromagnetic field. Photo-Induced Plasma Grating(PIPG) scanning antenna as a low cost and rapid scanning technology provides a new approach and idea for MMW and THz wave beam steering. In this paper, the recent progresses of the photo-induced plasma grating scanning antenna are reviewed, which covers the working principle, structure, efficiency as well as the pattern. The study significance and main challenges are also discussed and prospected. It is a hope that this review will give a guide for the research and applications of the photo-induced plasma grating antenna.

Key words: Photo-Induced Plasma Grating; antenna scanning; THz wave; diffraction

扫描天线在通信和雷达领域有着广泛的应用, 目前有多种方法可以实现波束扫描^[1]: 机械扫描方法利用整个天线系统或部分的机械运动来实现波束扫描, 优点是结构简单, 但具有机械运动惯性大和扫描速度不高的缺点; 电扫描天线(如相控阵天线)由于无机械惯性限制, 扫描速度快, 波束控制迅速灵活, 但是大量移相器的使用使成本很高, 不适合大规模应用, 特别是在高频毫米波^[2]和 THz 波^[3-4]应用领域, 目前的器件工艺水平还达不到要求或是价格昂贵; 频率扫描天线(如漏波天线^[5])通过改变工作频率来改变波束辐射角度, 但是对需要固定频率的应用不适合; 光控相控阵扫描天线技术^[6]是通过光控的、分离的电子单元或真时延单元来形成波束指向, 具有瞬时带宽大、抗干扰能力强、远程控制、重量轻、低功耗和高适应性等优点, 但是该方法需要大量昂贵、分离的光电器件, 增大了相控单元的体积, 并且电光调制与解调过程会导致信号损失较大, 信噪比劣化和动态范围减小。

近年来, 光生等离子体栅(PIPG)扫描天线引起了学术界及工业界的关注, 这是采用光波控制毫米波和 THz 波波面相位的技术, 是一种非机械的扫描方法, 该方法不需要大量移相器和光电转换单元, 具有扫描速度快、成本低廉的优点, 为低成本操控毫米波和 THz 波提供了新的方法和思路, 因此对 PIPG 扫描天线的研究具有非常重要的意义。本文将对 PIPG 扫描天线的原理、结构、效率和天线方向图等主要研究进展做详细的论述。

1 PIPG 扫描天线工作原理

使用光波照射半导体材料, 当光子的能量大于半导体禁带宽度时, 半导体材料吸收光子, 产生电子和空穴数目相等的非平衡载流子, 也称光生等离子体, 根据 Drude 模型^[7], 等离子体会影响半导体的介电特性, 如式(1)

所示, 半导体复介电常数可表示为:

$$\varepsilon(N) = \varepsilon[1 - \omega_n^2 / \omega(\omega + i\tau_n^{-1}) - \omega_p^2 / \omega(\omega + i\tau_p^{-1})] \quad (1)$$

式中: ε 为材料在平衡状态下的介电常数; N 为光生载流子浓度; ω 为电磁波角频率; ω_n 和 ω_p 分别为电子和空穴的等离子谐振频率, $\omega_{n,p} = \sqrt{4\pi e^2 N / (m_{n,p} \varepsilon_0)}$; e 为电子电荷; m_n 和 m_p 为电子和空穴的有效质量; τ_n 和 τ_p 分别为电子和空穴的平均碰撞时间(载流子寿命), $\tau_{n,p} = \mu_{n,p} m_{n,p} / e$; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的迁移率。材料对电磁波的折射系数实部(n)和虚部(k)可以分别通过对 $n(N) = \text{Re}(\varepsilon(N)^{0.5})$ 和 $k(N) = \text{Im}(\varepsilon(N)^{0.5})$ 计算得到。图 1 所示为 1 THz 频率时 GaAs 材料的折射系数和介电常数(插图)与光生载流子浓度的关系^[8]。

由于光生等离子体可以引起材料对电磁波折射系数的改变, 光生等离子体区域增加了对入射电磁波的反射和吸收, 使电磁波透射率减小, 而半导体材料本身对电磁波是透射的, 因此, 可以通过在半导体表面上形成光照图形, 形成等离子浓度的空间变化, 当光照图形为栅形状时, 等离子体空间浓度的分布可形成光生等离子体栅。例如对于透射栅, 形成的栅结构对入射电磁波衍射形成多个波束, 在自由空间条件下栅对入射电磁波进行周期性调制的方程为:

$$\Lambda(\sin \alpha_m - \sin \gamma) = m\lambda \quad (2)$$

式中: Λ 为栅周期; γ 为电磁波入射角度; λ 为入射波长; α_m 为第 m 级衍射波的衍射角。

根据光栅周期和衍射角的关系, 通过改变半导体表面的光照图形, 在半导体表面形成不同周期的 PIPG 就可以对电磁波进行波束扫描。需要注意的是, 衍射波束中零级衍射与栅周期无关, 不能用于波束扫描。PIPG 扫描天线正是利用这个原理实现毫米波和 THz 波的波束扫描控制。

2 PIPG 扫描天线研究进展

对 PIPG 扫描天线的最初研究是基于图 2 所示天线结构, 毫米波信号在半导体波导或者复合介电波导(包含光敏感层)中传播^[9-12]。通过特定的光照射图形, 在半导体波导表面上形成光生等离子体栅, 其结构与金属栅漏波天线^[5]相似, 毫米波信号与等离子体栅作用, 然后以某一角度耦合出波导, 耦合角度与栅周期相关, 其波束出射角度 ϕ 为:

$$\phi = \arcsin[\beta_{wg} / k_0 + m\lambda / \Lambda] \quad (3)$$

式中: Λ 为栅周期; β_{wg} 和 k_0 为电磁波在半导体材料和自由空间的传播常数; λ 为电磁波波长; m 为衍射级次。

按照这种原理设计的光生等离子体栅天线的性能远低于金属栅漏波天线的性能, 这是由于等离子体对电磁波具有明显的衰减作用, 在这种结构中, 毫米波平行于栅结构传播, 因此和每个相遇的等离子体条带作用, 由于衰减的积累导致电磁波的幅度随传播距离的增加而迅速减小, 限制了天线的孔径和增益。

V A MANASSON 提出了一种新的光生等离子体栅天线结构, 克服了上述结构的缺点^[13]。图 3 为 PIPG 天线结构图, 天线由高阻硅平面波导、介电波导(石英棒)和照射系统(脉冲泵浦光源和光掩膜)组成。光源照射光掩膜在高阻硅平面波导表面形成栅图形, 这种天线结构需要的照射面积小, 因此对光源的功率要求也相对小。由于石英棒和高阻硅平面波导间有很小的耦合角度, 电磁波在平面波导中并不是平行栅传播, 因此减小了电磁波的衰减,

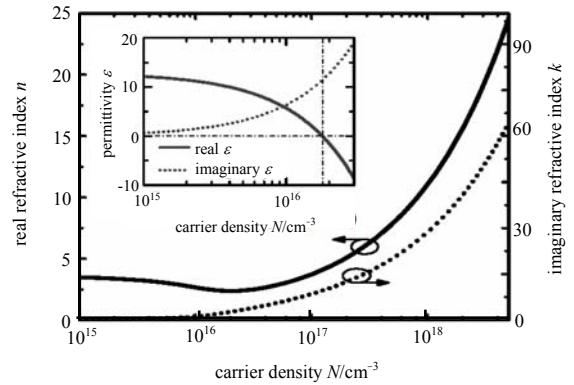


Fig.1 Refractive index and permittivity(inset) of GaAs at 1 THz as a function of the photo-induced carrier density

图 1 1 THz 频率时 GaAs 材料折射系数和介电常数(插图)与光生载流子浓度关系

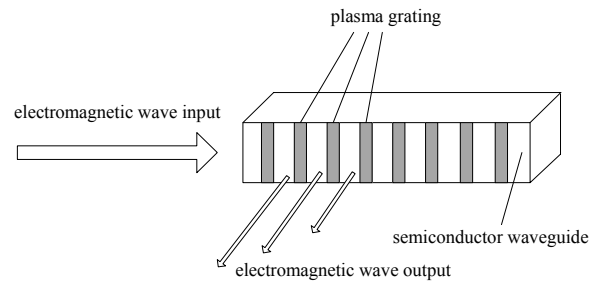


Fig.2 Structure of semiconductor waveguide PIPG antenna

图2 半导体波导光生等离子体栅天线结构

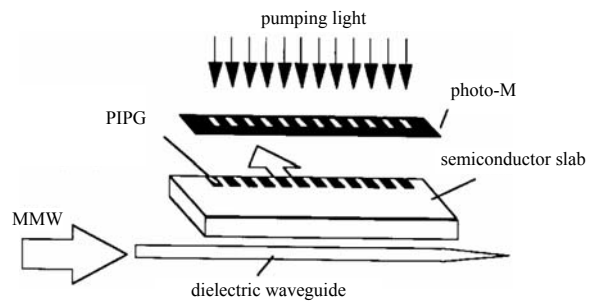


Fig.3 Structure of PIPG antenna

图3 光生等离子体栅天线结构

并且改善了等离子栅上电磁波功率分布的一致性和天线增益。对于这种结构,当栅周期取值范围满足一定条件时可以使得天线只输出0和-1级衍射条纹^[13]。图4为PIPG天线的波束传播图,石英棒作为馈源耦合毫米波进入平面波导中,然后经等离子栅的衍射和半导体/空气界面的反射和折射,0级衍射波束在半导体/空气界面发生全反射,只有-1级衍射波束从半导体/空气界面折射传播出来。传播角 ϕ 为:

$$\phi = \arcsin[\beta_{wg} / k_0 - \lambda / \Lambda] \quad (4)$$

式中: Λ 为栅周期; β_{wg} 和 k_0 分别为电磁波在石英棒和自由空间的传播常数; λ 为电磁波波长。

实验中,脉冲泵浦光源(频闪弧光灯)产生持续时间 $2\mu\text{s}$,重复率 100 Hz ,单个脉冲能量密度 $0.5 \times 10^{-4}\text{ J/cm}^2$ 的光脉冲,毫米波的频率为 90 GHz 。图5为测试得到的使用不同周期(0.091 in, 0.103 in, 0.120 in 和 0.142 in)掩膜板时获得的2个正交极化波的远场天线方向图,实验结果与理论公式预测相符。通过与标准喇叭天线对比,可以得到光生等离子体栅天线的增益为 17 dB 。由于正交极化波具有不同的传播常数,因此同一角度耦合进入平面波导的正交极化波传播角度不同,可以通过调整毫米波在介质波导中的传播角度和介质波导的厚度得到2个线极化波之间不同的相位延迟,可实现不同的极化波输出,并在实验上通过 45° 线极化波输入获得了椭圆极化波和圆极化波输出。

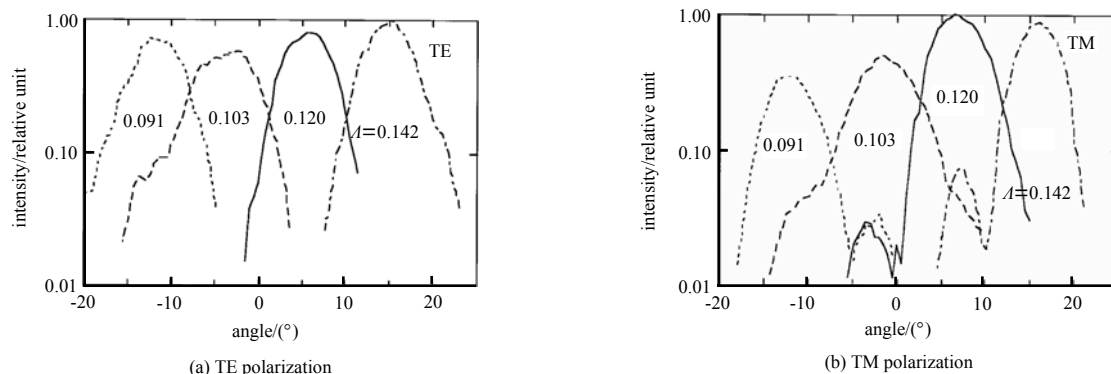


Fig.5 Far-field antenna patterns
图5 TE极化波和TM极化波对应的远场天线方向图

V A MANASSON 报道了等离子栅对自由空间传播的毫米波进行波束操控的实验研究^[14],实验装置如图6所示。放置在硅衬底上的栅掩膜板材料对毫米波透明,通过脉冲氙气灯照射掩膜板在硅衬底上形成光生等离子体栅,喇叭天线辐射的 92 GHz 毫米波被光生等离子体栅衍射,使用GaAs肖特基二极管探测由喇叭天线接收到的不同角度的衍射波束,这种设计的主要优点是电磁波的传播方向垂直于栅表面,因此可以通过改变栅的排列方向进行二维波束扫描。图7为周期分别为 6 mm 和 7 mm 的光生等离子体栅天线方向图,图中左纵坐标零点对应无光照时毫米波最大强度,右纵坐标零点对应0级衍射的最大强度。对于周期 6 mm 的天线方向图,其一级衍射波束强度约为无光照时毫米波强度的 -9 dB 。根据公式(2),可计算得到周期 6 mm 的衍射栅的 ± 1 级衍射角度约为 $\pm 33^\circ$;对于周期 7 mm 衍射图形,其1级和2级衍射角度分别为 28° 和 69° ,实验结果与理论计算结果相符,表明了PIPG对自由空间传播的毫米波进行操纵的可行性。这种设计的缺点是由于天线同时输出多级衍射波束,对大多数应用并不适合。

V A MANASSON 设计了可同时利用多级衍射波束的PIPG天线结构^[15],多级衍射波束沿着同一方向传播,克服

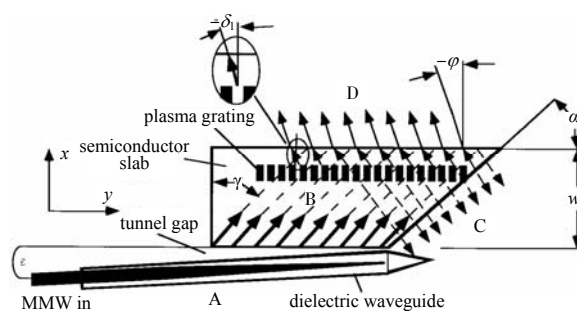


Fig.4 PIPG antenna's ray geometry
图4 等离子体栅天线射线传播图

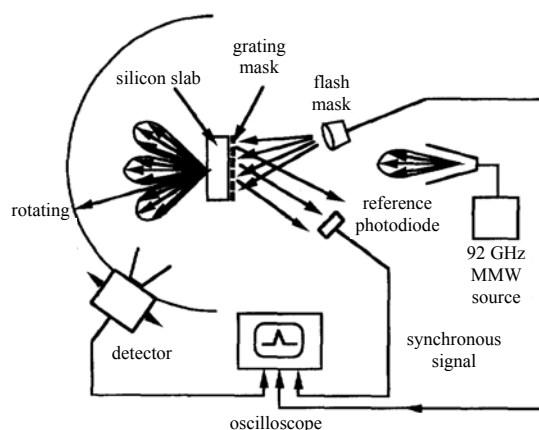


Fig.6 Experimental setup for measuring MMW beam steered by PIPG
图6 光生等离子体栅对毫米波束操控实验装置示意图

了只利用一个级次衍射波束的缺点,因此提高了天线效率。图 8 为天线波束追迹原理示意图,毫米波入射角为 γ ,入射毫米波经 PIPG 衍射,产生的衍射波束被反射体反射,然后被同一等离子栅二次衍射,波束经历衍射-反射-衍射后输出的波束中包括一系列平行传播的波束,波束出射角度为 α 。图中圆括号内为衍射级次,例如,波束(i, j)代表衍射形成的第 i 级次衍射波束,然后经反射体反射,再经过同一等离子栅形成的第 j 级次衍射波束。当栅周期和入射角度选择适当的值时,天线输出波束可只沿一个角度传播,并且输出方向在输出孔径内是可控的,而其他的波束传播方向和 α 有明显区别,可使用吸收体吸收。图 9 为光生等离子体天线结构示意图,光生等离子体天线由硅片、毫米波源、毫米波反射体(ITO)、栅载体、泵浦光源和吸收体组成,耿式振荡器(90 GHz)和辐射喇叭组成毫米波源,由于 ITO 对光波透射,泵浦光通过栅载体和 ITO 后照射硅片形成 PIPG。设计毫米波入射角 γ 为 51° ,栅周期变化为 3.2 mm~6.4 mm,输出波束包括(0, 1),(-1, 0)和(-2, -1)二次波束,而其他的波束,包括镜面反射波束,由于出射角度大于孔径角(30°)被吸收体吸收。实验中,可以通过调节等离子栅与反射镜的距离来调节相位,当 3 个波束相位匹配时,输出的波束强度可明显改善。

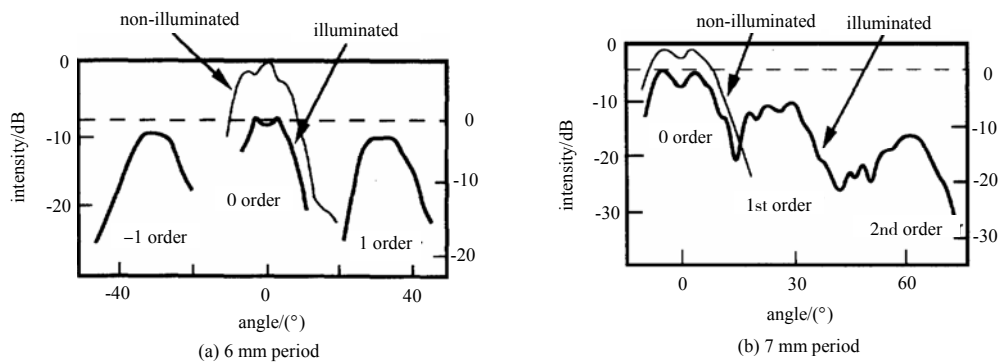


Fig.7 Beam pattern of PIPG with 6 mm and 7 mm periods

图7 栅周期为6 mm和7 mm的光生等离子体栅天线方向图

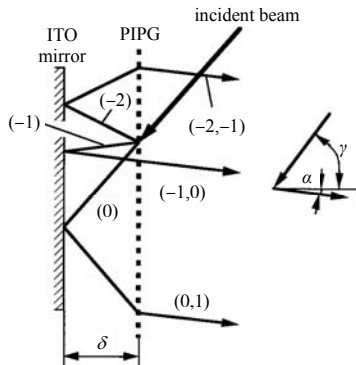


Fig.8 Schematic diagram of beam tracing in PIPG antenna

图8 光生等离子体栅天线波束传输原理示意图

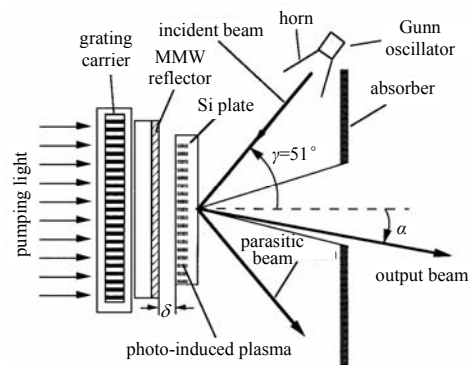


Fig.9 Structure of PIPG antenna

图9 光生等离子体栅天线结构

实验使用 3 种不同的光源和相应的光掩膜测试天线性能,包括机械斩波(1 kHz)氩激光器(波长 514 nm,功率 4.2 W)、短脉冲($\sim 2 \mu\text{s}$)弧闸门灯(5 mJ/脉冲,重复率 130 Hz)和照相闪光灯(0.5 J/脉冲,脉冲持续时间 0.2 ms)。当使用激光源时,通过液晶显示器形成栅图案;由于短脉冲弧闸门灯和照相闪光灯为宽频脉冲辐射源,辐射谱中包含了红外辐射,但液晶显示器对红外辐射对比度低,因此使用脉冲源时通过照相底片做光掩模形成栅图案。图 10 为使用 3 种不同栅周期(3.22 mm,4.29 mm 和 6.43 mm)光掩膜时测试得到的 PIPG 天线方向图,实验结果和理论结果相符。实验发现 PIPG 天线的输出波束强度与等离子栅和反射镜之间距离相关,当距离值为四分之一毫米波波长时可得到最大输出强度。实验测试了 3 种不同占空比(栅宽度与栅周期的比值)条件下的输出波束强度,选择占空比分别为 0.3,0.5 和 0.7 时,发现占空比为 0.5 时可以获得最大值。泵浦光源同样影响输出波束的强度,使用照相闪光灯可以获得最高天线效率($\approx 10\%$),使用弧闸门灯时的天线效率约为 2%,但其泵浦能量小于 0.01 倍的照相闪光灯泵浦能量,使用机械斩波氩激光器时的天线效率小于 1%。考虑到天线效率和泵浦源能量的比值,可以发现最短的泵浦脉冲($\sim 2 \mu\text{s}$,弧闸门灯)可以获得最大的天线效率。图 11 为理论计算得到的稳态照射和脉冲照射条件下硅片对毫米波的透射率,可以发现,由于扩散和复合效应的影响,在稳态照射条件下形成了低对比度的光生等离子体栅,因此对毫米波束不能有效衍射;而在脉冲照射条件下,由于扩散和复合效应对光生等离子体浓度

影响很小,因此等离子体的分布和照射图案相同,形成高对比度的等离子栅,可有效控制输出波束。

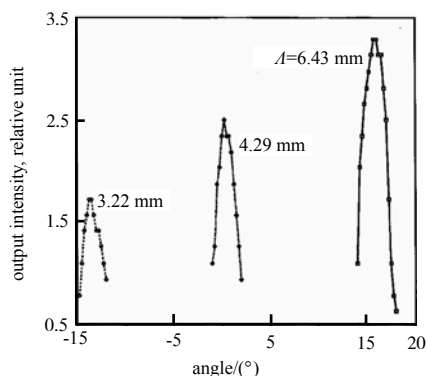


Fig.10 Beam patterns of PIPG with different periods

图10 不同周期等离子体栅天线方向图

S BUSCH 将光生等离子体栅的研究扩展到了 THz 领域^[16],实验装置如图 12 所示,光纤耦合 THz 时域光谱系统用来产生和探测 THz 波。光学调制器为计算机控制的 1 M 像素分辨率的投影仪,其光源是水银弧光灯,可以辐射功率为 8 W 的白光。由于 ITO 材料反射 THz 波束,同时对光波透明,因此用有 ITO 涂层的玻璃将 THz 波和调制光在硅衬底上形成重叠,调制光在高阻硅衬底表面形成 $2.54\text{ cm} \times 2.54\text{ cm}$ 面积的栅图形。由于 THz 波波长较长,为了增加调制深度,将投影仪的分辨力分为 16×12 个像素(每个像素包含 64×64 个子像素)。THz 波探测器放置在 30° 探测角的位置观测第一级衍射波束,图 13 为不同栅密度(栅周期)条件下获得的 THz 波信号,结果发现,对于不同的栅周期(栅占空比 50%),THz 波的频谱和中心频率发生很大变化;图 14 为在 2 种探测角度(30° 和 40°)获得的 THz 频谱峰值频率和栅密度的关系,随着栅密度增加,栅的周期减小,对应的 THz 波频谱峰值频率增加;上述实验现象表明了 PIPG 对 THz 波的衍射能力和对 THz 波的频谱选择能力。

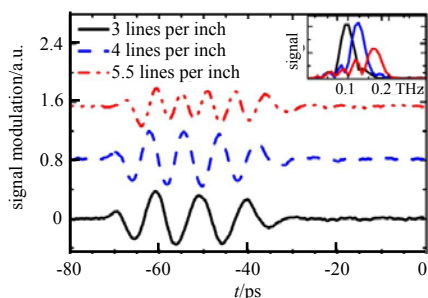


Fig.13 THz signal resulting from the PIPG for different line densities

图13 不同线密度光生等离子体栅对应的太赫兹信号

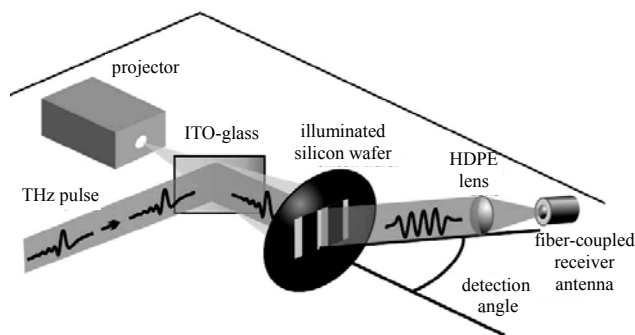


Fig.12 Experimental setup for measuring THz beam steered by PIPG

图12 光生等离子体栅对THz波束操控实验装置示意图

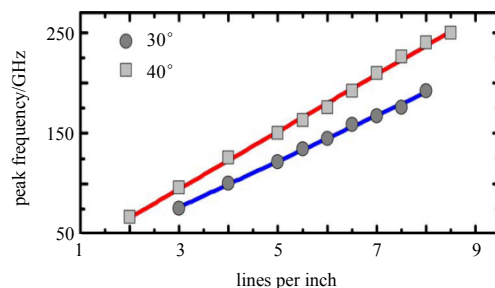


Fig.14 Peak frequency of the THz spectrum as a function of the line density

图14 栅密度对太赫兹波频谱峰值频率的影响

I CHATZAKIS 通过 PIPG 对 THz 波的透射谱测量,研究了其对 THz 波的衍射特性^[17]。图 15 为实验装置示意图,飞秒激光束(800 nm)照射在金属掩模版上,掩模版的图形通过透镜投影在 GaAs 衬底上,在衬底表面形成图 15 中插图所示的明暗相间的栅图案,在衬底形成 PIPG。THz 脉冲的持续时间约为 2 ps,远远小于载流子的扩散和复合时间(约 1 ns),因此 PIPG 对 THz 脉冲可以被认为静态存在的。图 16 为当栅周期为 $69\text{ }\mu\text{m}$,占空比为 50%时,激光能量密度对 THz 透射谱的影响,可以发现,脉冲能量密度越小,透射率越高,这是由于低脉冲能量密度产生相对少的光生等离子体,对 THz 波的反射和吸收少,因此 THz 波透射率高;图 17(a)为使用不同栅周期掩模板获得的 THz 波透射谱线(辐照能量 $96\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$,栅占空比 50%),可以发现随着栅周期的增加,透射谱最小值发生红移,这种现象表明了这种结构可用来制作可重构滤波器的潜力;图 17(b)为不同占空比条件下测得的 THz 波透射谱线(辐照能量 $96\text{ }\mu\text{J}/\text{cm}^2$,栅周期 $60\text{ }\mu\text{m}$),可以发现衍射频率的位置与栅占空比无关;因为电偶极子的谐

振频率与栅电容相关,可排除上述实验中透射率减小的现象是由电偶极子谐振引起的;由于实验结果与栅衍射理论相符,可以说明上述实验现象是由于栅衍射导致的。

3 讨论和结论

随着研究的不断深入,光生等离子体栅的研究得到了不断的发展进步,其频段已经由毫米波扩展到 THz 波,PIPG 的研究对毫米波和 THz 波的扫描应用及相关研究领域具有重要的意义:

1) 由于器件成本和工艺水平限制,目前在高频毫米波和 THz 波成像领域主要采用机械扫描成像方式,因此 PIPG 技术可明显改善目前毫米波和 THz 波的扫描成像速度,并且可通过在同一基片上的不同区域形成不同周期栅结构实现多波束输出,该技术将对毫米波和 THz 波在传感、通信和雷达等应用领域产生有益影响;

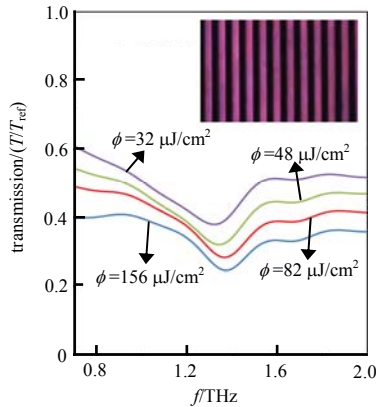


Fig.16 THz transmission spectra of the PIPG for different pump fluencies
图16 不同泵浦能量密度时太赫兹波透射谱

2) 金属栅漏波天线通过改变工作频率来改变波束辐射角度,然而在固定频率的应用场合是不适用的。而采用可重构的光生等离子体栅结构不需要改变工作频率即可完成波束扫描,因此可以实现定频扫描操作,可扩展漏波天线的应用范围;

3) 相关的研究成果有助于可调毫米波和 THz 波器件研发。常规工艺制作的器件其性能在设计时就已经确定,并且每个器件都需要单独工艺过程制作,而利用光生等离子体器件的可重构特性可以制作一系列可重构的器件,例如:光生等离子体天线^[18]、光生等离子体滤波器^[17]和光生等离子移相器^[9]等,只需改变光照图形即可构成不同器件,且其性能可调。

PIPG 为毫米波和 THz 波扫描调控技术发展提供了一种新思路 and 机遇,但目前离真正走向实际应用还有一定距离,接下来的研究中,还存在如下的主要问题需解决:

1) 从目前研究结果来看,PIPG 扫描天线只能利用部分衍射级次能量,而其他级次的衍射波束能量,特别是零级衍射波束的能量损失了,所以天线效率低。因此如何从机理、半导体材料选择及结构设计上提高天线效率是目前急需解决的问题;

2) 文献报道的应用于 PIPG 扫描天线的光源和光调制器多为其他领域的商用产品,性能有待进一步改善,应为 PIPG 扫描天线设计开发光源及光调制器,光源和光调制器所提供的光辐射强度、光脉冲时间和光栅精度等性能应满足实际工程应用要求;

3) 目前 PIPG 扫描天线的部件多采用分离设计,这并不适合实际工程应用,应对各部件进行系统集成探索,缩小系统体积,增加系统稳定性。

本文对 PIPG 扫描天线的原理、结构、效率和方向图等主要研究进展做详细的论述,并对 PIPG 扫描天线的

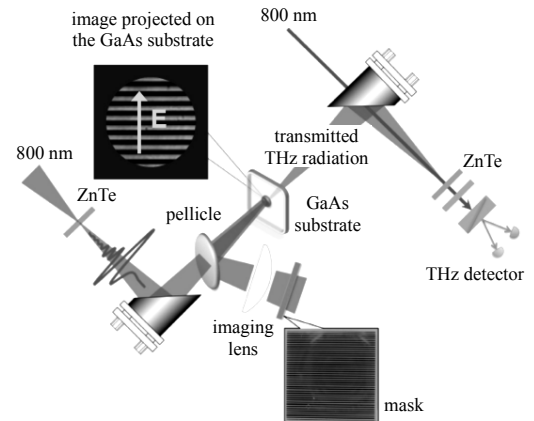


Fig.15 Experimental setup for measuring THz transmission spectra diffracted by PIPG
图15 光生等离子体栅对THz透射谱衍射实验装置示意图

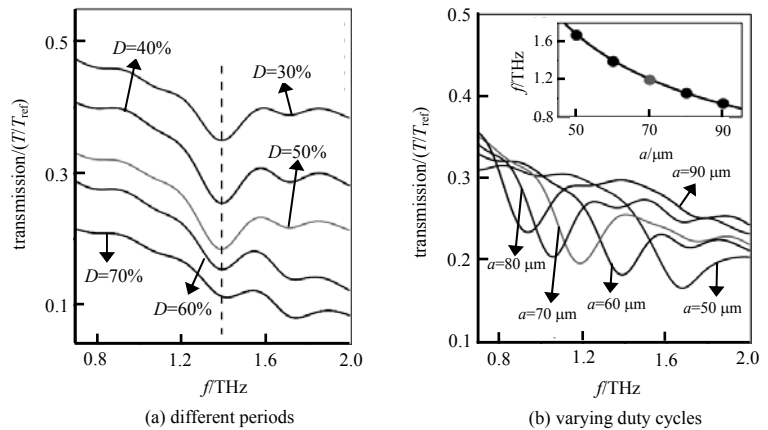


Fig.17 Transmission spectra for masks with different periods and varying duty cycles
图17 不同栅周期与不同占空比条件下太赫兹波透射谱

研究意义及存在的主要问题进行了讨论。随着 PIPG 扫描天线研究的不断深入和天线设计制作的成熟度越来越高,作为一种低成本快速扫描天线, PIPG 扫描天线在毫米波和 THz 波领域将有越来越广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春. 雷达原理[M]. 4 版. 北京:电子工业出版社, 2008. (DING Lufei, GENG Fulu, CHEN Jianchun. Radar Principle[M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.)
- [2] 王坚,侯辉,代红. 毫米波器件的技术发展与应用[J]. 电讯技术, 2007,47(1):4-6. (WANG Jian, HOU Hui, DAI Hong. Technical development and application of millimeter wave devices[J]. Telecommunication Engineering, 2007,47(1):4-6.)
- [3] 刘丰,朱忠博,崔万照,等. 太赫兹技术在空间领域应用的探讨[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):857-866. (LIU Feng, ZHU Zhongbo, CUI Wanzhao, et al. Application of terahertz techniques in space science[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):857-866.)
- [4] 闵碧波,曾嫦娥,印欣,等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):351-354. (MIN Bibo, ZENG Chang'e, YIN Xin, et al. Application of terahertz techniques in military and space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):351-354.)
- [5] SCHWERING F, OLINER A A. Millimeter-Wave Antennas[M]. US:Springer, 1993:1-148.
- [6] 张明友. 光控相控阵雷达[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (ZHANG Mingyou. Optically Controlled Phased Array Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [7] MOSS T S, BURRELL G J, ELLIS B. Semiconductor Opto-Electronics[M]. London: Butterworths, 1977.
- [8] STEINBUSCH T P, TYAGI H K, SCHAAFSMA M C, et al. Active terahertz beam steering by photo-generated graded index gratings in thin semiconductor films[J]. Optics Express, 2014,22(22):26559-26571.
- [9] LEE C H, MARK P S, DEFONZO A P. Optical control of millimeter-wave propagation in dielectric waveguides[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1980,16(3):277-288.
- [10] MATSUMOTO M, TSUTSUMI M, KUMAGAI N. Radiation of millimeter waves from a leaky dielectric waveguide with a light-induced grating layer[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1987,35(11):1033-1052.
- [11] ROSEN A, STABILE P J, HERCZFELD P, et al. Optically controlled IMPATT diodes and subsystems[C]// Proceeding of 1989 SBMO International Microwave Symposium. Sao Paulo, Brazil: [s.n.], 1989:589-594.
- [12] ALPHONES A, TSUTSUMI M. Leaky wave radiation from a periodically photoexcited semiconductor slab waveguide[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(9):2435-2441.
- [13] MANASSON V A, SADOVNIK L S, YEPISHIN V A, et al. An optically controlled MMW beam-steering antenna based on a novel architecture[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997,45(8):1497-1500.
- [14] MANASSON V A, SADOVNIK L S, MOUSSESIAN A, et al. Millimeter-wave diffraction by a photo-induced plasma grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technology, 1995,43(9):2288-2290.
- [15] MANASSON V A, SADOVNIK L S, SHNITSER P I, et al. Millimeter-wave optically scanning antenna based on photoinduced plasma grating[J]. Optical Engineering, 1996,35(2):357-361.
- [16] BUSCH S, SCHERGER B, SCHELLER M, et al. Optically controlled terahertz beam steering and imaging[J]. Optics Letters, 2012,37(8):1391-1393.
- [17] CHATZAKIS I, TASSIN P, LUO L, et al. One- and two-dimensional photo-imprinted diffraction gratings for manipulating terahertz waves[J]. Applied Physics Letters, 2013(4):043101-043101-4.
- [18] GEORGIU G, TYAGI H K, MULDER P, et al. Photo-generated THz antennas[J]. Scientific Reports, 2014,4(1):3584.

作者简介:



闫兴伟(1982-), 男, 吉林省双辽市人, 博士, 工程师, 主要研究方向为太赫兹技术和雷达系统设计, email: yan.xingwei@stu.xjtu.edu.cn.

李春化(1964-), 男, 陕西省扶风县人, 博士, 研究员, 兵器工业集团科技带头人, 主要研究方向为气象雷达、太赫兹技术、信号处理等。