

广角光接收机研究进展

李光元, 蔡琳, 徐安士*

北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京大学信息科学技术学院电子学系, 北京 100871

* 联系人, E-mail: lyrxas@pku.edu.cn

2008-10-28 收稿, 2009-02-11 接受

国家自然科学基金资助项目(批准号: 60772002)

摘要 广角光接收机在无线光通信、传感和检测系统中有明显的优势和广泛的应用前景。然而, 当它采用传统光器件来实现时, 其视场角会受到这些组件内在矛盾的限制, 而传统的视场角扩展机制无法从根本上打破这些束缚。为此, 提出金属等离子表面波(SPP)作为有效实现广角接收机的潜在机制。文中列举了两个 SPP 的应用实例, 生动地说明了它可以破解一些传统方法无法克服的矛盾, 提供意想不到的解决方案; 而且, 在某些情况下, 为了利用 SPP, 人们需要探索一些不寻常的条件。探讨了 SPP 在光异常透射效应中的几种机制, 并认为与入射角度无关的局域金属等离子表面波(localized SPP)最适合用来实现广角接收。还报道了关于斜入射空间光激励 SPP 的结构优化的一些最新进展。

关键词

广角

光接收机

金属等离子表面波

光异常透射效应

在无线光通信和探测系统中, 光的链路设计极其重要。它根据发射机和接收机的方向性可以分为三大类: 直接连接、非直接连接和混合方式^[1,2]。直接连接方式要求将方向性都很强的发射机和接收机严格对准; 非直接连接方式则利用广角的发射机和接收机从而减弱了对准的要求; 混合方式的发射机和接收机则具有不同的方向性, 其中之一方向性很强, 另一则为广角。目前, 直接连接方式由于链路损耗小、能量利用效率高, 在自由空间光通信、星际光通信、后向散射激光雷达等领域中得到了广泛的应用。

尽管目前采用广角接收机的非直接连接方式或混合方式的应用不多, 但从长远来看这些方式更有优势。由于它们采用广角接收机, 很大角度范围内入射的光信号都能被接收和检测, 从而可以极大地减小对准的要求。更重要的是, 这种广角接收由于不需要任何扫描机制, 因此它可以对多个终端, 甚至是快速移动的终端进行通信或探测。由此, 已被提出多年的个人无线光通信也将可能得到实现。

然而, 广角的光接收机很难实现。这可以从光接收机的三大部分(如图 1 所示)来分析: 用于滤去空间背景光的光滤波器、用于聚光的光学系统和用于进行光电转换的光电检测器。如果这三部分采用传统的器件来实现的话, 它们中存在的固有矛盾将限制接收机的视场角。为了扩展接收机的视场角, 在过去的数 10 年中, 人们提出和研究了诸如机械扫描、CCD 或光电检测器阵列、角度分集接收机阵列^[3,4]等机制。但是这些机制或者需要扫描因而速度慢, 或者结构过于复杂, 所得到的并不是真正的广角光接收机。



图 1 光接收机的结构示意图

近 10 年来, 金属表面等离子波(SPP)因为可以引起许多奇异现象、性能卓越, 受到了人们的广泛关注^[5~14]。特别突出的一点就是, 它能为许多传统光学器件提供意想不到的解决方案。例如, 利用 SPP 就能很

好地解决传统光电检测器所存在的速度和元件尺寸之间的矛盾^[8]。本文中,我们提出将金属等离子表面波作为有效实现广角光接收机的潜在机制,分析了其可能的方法,报道了斜入射空间光激励金属等离子表面波的一些最新进展。

1 传统方案的问题

1.1 传统光接收机各部分对其视场角的限制

目前,多层薄膜滤波器由于其透射频谱窄,被广泛用作光的带通滤波器^[1]。这种滤波器对光的入射角极为敏感,如图2所示,当入射角增大时,其透射谱将向短波段移动,即出现所谓的“蓝移”^[1-3],这将限制其视场角。为此,目前多数的商业红外系统一般都采用对入射角度不敏感的高通滤波器^[1]。但是,这类滤波器由于高于截止波长的光都能通过,因而具有很大的带宽。由此可见,光滤波器中存在着带宽和视场角的矛盾。

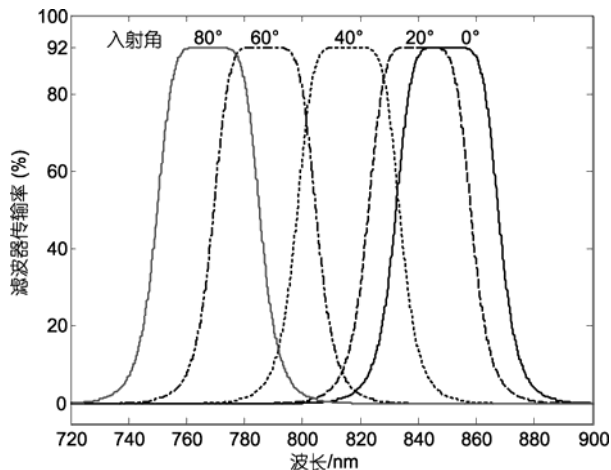


图2 多层薄膜带通滤波器的传输谱-入射角特性^[1]

用于聚光的光学系统满足Lagrange不变量公式^[15]:

$$na \sin \theta_{\max} = n'a' \sin \theta'_{\max}, \quad (1)$$

其中 n 和 n' 分别是光学系统入射端和出射端的介质折射率, $2a$ 和 $2a'$ 分别是入射孔径和出射孔径, $\theta_{\max}$ 和 $\theta'_{\max}$ 分别是相应的视场角半角。在给定的接收端的情况下,光学系统入射端的孔径和视场角将无法同时增大。为增加收集到的光子数而增大孔径将导致较小的视场角。

对于光电检测器,一方面要求它尽可能得快以处理更多的信号,另一方面也需要它尽可能得大以收集更多的光子。然而,其速度与元件尺寸成反比。超快的光电检测器往往尺寸很小。因而,人们需要在

其速度和尺寸之间取折中。

为了实时无线光通信或探测,光接收机需要使用高速的光电检测器,从而尺寸很小,要利用光学聚光系统来收集光子,而根据(1)式,为了提高光学系统的聚光能力,将极大限制接收机的视场角。另一方面,为了抑制背景光噪声以提高信噪比,需要利用窄带的带通滤波器,如多层薄膜滤波器,这种滤波器将进一步束缚接收机的视场角。总之,采用传统器件来实现的空间光接收机受限于其各个主要组成部分的内在矛盾,其视场角非常有限。

1.2 视场角扩展机制的问题

为了扩展光接收机的视场角,人们提出了各种机制。最简单而且应用最广泛的解决方法是机械扫描法。这种方法目前已被广泛应用于对准和跟踪过程中。但是它的速度很低,无法适应快速运动终端的通信或检测。另一种方法是将CCD或光电检测器阵列放在光学系统的接收端,从而在一定程度上扩展接收系统的视场角。然而这种方法并没有解决前文所述的光学滤波系统和聚光系统的矛盾。最近,一种被称为角度分集接收的方法被证明可以实现很大的视场角,甚至可达 180° ^[3,4],但是它需要将非常多的小视场角光接收机合理地组合在一起,使每个接收机负责一定的方向,实现起来非常复杂,尤其是当单个接收机的视场角很小时。

总之,导致接收机视场角很小的传统问题,无法用传统的方法来有效解决。因此,人们需要探索新的解决方案。

2 SPP可提供意想不到的解决方案

SPP是一种沿着金属-介质的界面传播的电磁波^[7]。自1998年Ebbesen等人^[5]报道了光透过金属薄膜上的亚波长小孔阵列发生异常透射的现象以来,人们从理论和实验的角度对SPP展开了广泛的研究。10年来,人们利用SPP的独特性质实现了各种新型器件,如全光调制器和开关^[9,10]、低于衍射极限的光学元件^[7,11],以及各种表面波的波导器件^[12,13]。随着对SPP的研究进一步深入和对其应用进一步增多,人们越来越相信它能为解决传统问题提供意想不到的解决方案。为了说明这一点,本节将举出两个典型的例子:超快光电检测器^[8]和高性能的光学起偏器^[19]。前者重点突出SPP能有效地克服传统的矛盾,后者则强调:为了利用SPP,有时候需要探索一些非寻常的条件。

2.1 SPP 可克服传统的矛盾

前文所述的传统光电检测器的速度和尺寸之间存在的不可克服的矛盾可以通过利用SPP来很好地解决,即将尺寸特别小的光电检测器放在“牛眼结构”(bull's eye structure)之后^[8,11],如图3所示。

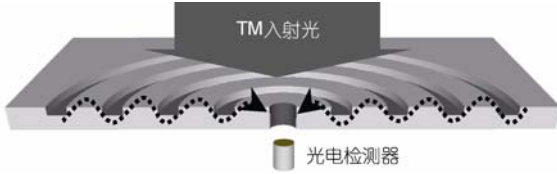


图3 超快光电检测器的结构示意图^[8]

“牛眼结构”在金属薄膜的中间有一个非常小的孔,在薄膜的入射面上有许多同心圆凹槽环绕在孔的周围。入射光通过这种凹槽阵列来补偿它与SPP之间的动量失配,从而激发SPP^[11]。通过合理的结构设计,被激发的SPP传播到小孔,并与孔中的入射光干涉加强,从而极大地增强了透射光的功率^[14]。经过小孔的透射光再被下面的超小尺寸的光电检测器探测。

在这里,“牛眼结构”起着光学天线的的作用,它将尽可能多的入射光收集到超小孔中^[11]。由于小孔后的光电检测器极小,因此其响应速度可以做得特别快。因此,通过利用SPP,传统光电检测器的矛盾能够被有效克服。

需要特别指出的是,与受限于衍射极限的传统光学聚光系统相比,这种SPP结构可突破衍射极限的限制,因而能将光束聚得更小,甚至可达亚波长量级。

2.2 利用 SPP 可能需要探索非寻常的条件

为了提高光波导起偏器的性能,人们提出采用共振层^[16]或金属包层^[17]的方法以使TE模式和TM模式的有效折射率增大,从而在增大某个模式损耗的同时使另一模式的损耗尽可能小。图4所示的结构将上述两种方法结合起来,实验^[17]和理论^[18]先后证实这种结构能获得很好的起偏性能。它能够用WG-1,即给定的单模波导与WG-2(由介质包层、缓冲层和金属包层组成的三层波导)之间的共振耦合来理解。尽管文献^[17]认为当WG-1中的TM模式与WG-2中的 TM_0 模式(SPP)发生共振时,所得的TE模式起偏器的性能会更好,但是该文献认为这种共振的匹配条件无法满足。这种观点从传统的观念来看是合理的,因

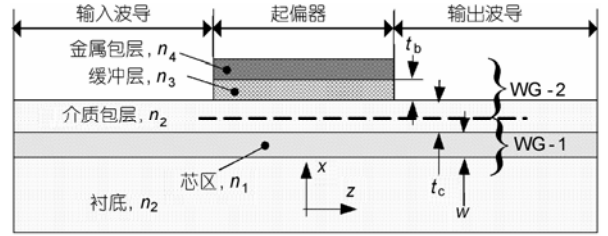


图4 含缓冲层的金属包层光起偏器^[19]

为人们一般默认三层波导WG-2的芯区即缓冲层的折射率 n_3 要大于其包层,即介质包层的折射率 n_2 ^[19]。

事实上,当缓冲层的折射率特别低($n_3 < n_2$)时,我们发现上述的 TM_0 模式共振可以发生^[19]。利用此共振可以获得消光比极高的TE模式起偏器,这是因为此时TM模式由于共振被迅速衰减,而TE模式则被超低折射率介质缓冲而损耗很小。我们还发现这种起偏器的带宽很宽,而且对加工精度的要求较低,对介质包层的厚度并不敏感,此特性对于需要去除一定包层厚度的光纤起偏器而言尤为重要。

需要指出的是,在 TM_0 模式共振的情况下,三层波导WG-2的芯区折射率 n_3 低于其包层折射率 n_2 ,这与人们通常所见的三层波导不同,这应该就是人们没有找出 TM_0 模式共振的原因^[19]。

总之,SPP可以为传统问题提供意想不到的解决方案,也可使传统的光器件获得优异的性能。但是,在某些情况下,为了利用SPP,人们需要跳出传统思维的束缚,去探索一些非寻常的条件。

3 SPP 在广角光接收机中的潜在应用

正由于SPP善于解决传统器件所面临的问题,本文提出将其作为有效实现广角接收空间光,克服前文所述传统矛盾的潜在方法。本节我们将讨论利用SPP实现广角光接收的可能机制,并报道一些最新进展和我们下一步的工作。

为了利用SPP,首先有必要了解其在光异常透射效应中所起的作用。经过10年来的深入研究和不断辩论,人们普遍接受了SPP在光透射增强或减弱效应中起着主要作用,一般认为有两种机制。一是所谓的局域波导模式共振^[6],也被称为Fabry-Perot共振^[4]或局域SPP^[20],它表现为凹槽或狭缝中的波导共振模式^[21],另一种机制被称为耦合SPP^[6],它来自于周期性光栅^[20],可以用激励的SPP与入射光之间的干涉效应来解释^[22,23]。

研究表明,由局域SPP所引起的透射几乎与入射

光的角度无关但对波长极为敏感,而耦合SPP引起的透射则对入射角度极为敏感^[6]。因此,局域SPP有望用于实现对广角入射光的广角接收和窄带滤波。此外,由于SPP被紧紧地束缚在金属-介质的界面,易于操作^[7],因此我们还可以利用局域SPP的非线性或耦合效应来实现空间光的广角接收和检测。

为了提高空间光激励SPP的效率,结构的优化非常重要。研究证明,对于垂直入射情况,优化可以利用激发的SPP与入射光之间的相位差和干涉效应^[14]。事实上,这种方法对于斜入射也同样有效。我们最近的研究证明^[24],这个相位差对于很大角度范围内的入射都可以近似为 π ,结合干涉效应进而很好地解释了斜入射情况下的透射增强和减弱现象^[25,26]。这说明相位差对于入射角度并不敏感。下一步,我们将基于此相位差设计和优化结构,以适应对广角入射空间光的接收。

4 结论

广角光接收机在无线光通信、传感和探测系统中

有许多潜在的优势,它可以大大减轻对对准和跟踪的要求,从而使系统能适应快速运动终端或未知终端。然而,采用传统器件实现的光接收机的视场角受到其三大组成部分—光学滤波系统、聚光系统和光电检测器的内在矛盾的限制,并且这些限制很难用现有的视场角扩展机制来解除。

为了实现广角光接收机,我们提出将SPP作为潜在的解决方案。通过举例证明SPP能很好地解决现有光器件的矛盾,提高器件的性能;并且为了利用SPP,在一定情况下,人们需要摒弃传统观念的束缚,去探索一些非寻常的条件。

SPP的几种机制中,最有可能用于实现广角光接收机的是与入射光角度无关的局域SPP。目前我们已经证明,在很大入射角度范围内,激励的SPP与入射光之间的相位差都可以近似为 π ,下一步我们将利用此相位差进行结构设计和优化,并进一步利用局域SPP的非线性效应或耦合效应来最终实现对空间光的广角接收。

致谢 感谢在2007年国际纳米光子学会议上与加州大学伯克利分校的Eli Yablonovitch教授深入而有成效的探讨,感谢匿名审稿人认真严谨的审稿意见。

参考文献

- 1 Kahn J M, Barry J R. Wireless infrared communications. *Proc IEEE*, 1997, 85: 265—298^[DOI]
- 2 Barry J R, Kahn J M. Link design for nondirected wireless infrared communications. *Appl Opt*, 1995, 34: 3764—3776^[DOI]
- 3 Ramirez-Iniguez R, Green R J. Optical antenna design for indoor optical wireless communication systems. *Int J Commun Sys*, 2005, 18: 229—245^[DOI]
- 4 Jeong W, Kavehrad M, Jivkova S. Broadband infrared access with a multi-spot diffusing configuration: Performance. *Int J Wireless Info Netw*, 2001, 8: 27—36^[DOI]
- 5 Ebbesen T W, Lezec H J, Ghaemi H F, et al. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays. *Nature*, 1998, 391: 667—669^[DOI]
- 6 Porto J A, Garcia-Vidal F J, Pendry J B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits. *Phys Rev Lett*, 1999, 83: 2845—2848^[DOI]
- 7 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics. *Nature*, 2003, 424: 824—830^[DOI]
- 8 Ishi T, Fujikata J, Makita K, et al. Si nano-photodiode with a surface plasmon antenna. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44: L364—L366^[DOI]
- 9 Krasavin A V, Zheludev N I. Active plasmonics: Controlling signals in Au/Ga waveguide using nanoscale structural transformations. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 1416—1418^[DOI]
- 10 Pacifici D, Lezec H J, Atwater H A. All-optical modulation by plasmonic excitation of CdSe quantum dots. *Nat Photon*, 2007, 1: 402—406^[DOI]
- 11 Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes. *Nature*, 2007, 445: 39—46^[DOI]
- 12 Gramotnev D K, Pile D F P. Single-mode subwavelength waveguide with channel plasmon-polaritons in triangular grooves on a metal surface. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 6323—6325^[DOI]
- 13 Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and

- ring resonators, *Nature*, 2006, 440: 508—511 [\[DOI\]](#)
- 14 Janssen O T A, Urbach H P, Hooft G W. Giant optical transmission of a subwavelength slit optimized using the magnetic field phase. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 043902 [\[DOI\]](#)
 - 15 Welford W T, Winston R. *High Collection Nonimaging Optics*. New York: Academic Press, 1989
 - 16 Hammer J M, Evans G A, Ozgur G, et al. Isolators, polarizers, and other optical waveguide devices using a resonant-layer effect. *J Lightw Technol*, 2004, 22: 1754—1763 [\[DOI\]](#)
 - 17 Kim K T, Kwon H W, Song J W, et al. Polarizing properties of optical coupler composed of single mode side-polished fiber and multimode metal-clad planar waveguide. *Opt Commun*, 2000, 180: 37—42 [\[DOI\]](#)
 - 18 Wu G, Wang Z Y. Propagation characteristics of multi-coating d-shaped optical fibres. *J Opt A: Pure Appl Opt*, 2006, 8: 450—453 [\[DOI\]](#)
 - 19 Li G Y, Xu A S. Analysis of the TE-pass or TM-pass metal-clad polarizer with a resonant buffer layer. *J Lightw Technol*, 2008, 26: 1234—1241 [\[DOI\]](#)
 - 20 Ruan Z C, Qiu M. Enhanced transmission through periodic arrays of subwavelength holes: the role of localized waveguide resonances. *Phys Rev Lett*, 2006, 96: 233901 [\[DOI\]](#)
 - 21 Garcia-Vidal F J, Lezec H J, Ebbesen T W, et al. Multiple paths to enhance optical transmission through a single subwavelength slit. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 213901 [\[DOI\]](#)
 - 22 Schouten H F, Kuzmin N, Dubois G, et al. Plasmon-assisted two-slit transmission: Youngs experiment revisited. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 053901 [\[DOI\]](#)
 - 23 Janssen O T A, Urbach H P, Hooft G W. On the phase of plasmons excited by slits in a metal film. *Opt Express*, 2006, 14: 11823—11832 [\[DOI\]](#)
 - 24 Li G Y, Xu A S. Phase shift of plasmons excited by slits in a metal film. *Proc SPIE*, 2008, 7135: 71350T
 - 25 Cao Q, Lalanne P. Negative role of surface plasmons in the transmission of metallic gratings with very narrow slits. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 057403 [\[DOI\]](#)
 - 26 Xie Y, Zakharian A R, Moloney J V, et al. Optical transmission at oblique incidence through a periodic array of sub-wavelength slits in a metallic host. *Opt Express*, 2006, 14: 10220—10227 [\[DOI\]](#)