

光子晶体在微波技术中的应用*

江海涛¹ 李云辉¹ 李宏强¹ 朱荣林² 张治文¹ 陈鸿^{1, †}

(1 同济大学波耳固体物理研究所 上海 200092)

(2 上海航天测控通讯研究所 上海 200086)

摘要 文章以高方向性天线及光子晶体微带传输线为例,综述了光子晶体在微波技术中的研究进展.将光子晶体与传统的微波技术相结合,可以设计并制作许多小型、高效的新型微波器件.这类新型光子晶体材料在微波通讯中有着广阔的应用前景.

关键词 光子晶体,微波天线,微带传输线

Applications of photonic crystals in microwave technology

JIANG Hai-Tao¹ LI Yun-Hui¹ LI Hong-Qiang¹

ZHU Rong-Lin² ZHANG Ye-Wen¹ CHEN Hong^{1, †}

(1 Pohl Institute of Solid State Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(2 Shanghai Spaceflight and Telecommunication Institute, Shanghai 200086, China)

Abstract The application of photonic crystals in microwave devices, especially in high directive antennas and photonic bandgap microstrip structures, is reviewed. Many compact and efficient devices based on such crystals can be designed and fabricated with the aid of traditional microwave technology. Photonic crystals will have very promising applications in microwave communication.

Key words photonic crystal, microwave antenna, microstrip structure

光子晶体是一类介电系数周期性分布的人工结构材料,它是由 Yablonovitch 在 1987 年首次提出的^[1].光子晶体为操纵电磁波输运提供了一个理想的工作平台,具有代表性的应用包括:高效率天线衬底、高品质谐振腔、光子晶体光纤、基于光子晶体的全光光路设计、各种滤波器等.其核心在于通过对材料结构的设计,控制一定频率范围内或某固定频率的电磁波在空间不同方向上的滤波、输运和发射,这一思想给光通信技术,特别是给基于体材料电磁特性的传统微波通信技术带来革命性的创新理念.现代微加工技术很容易在微波、毫米波段制备各种具有复杂周期结构的复合材料,而在可见光和红外波段制备同类结构则非常困难.由于在微波波段光子晶体广阔的应用前景,大量在可见光和红外区光子晶体的器件模型被迅速移植到微波、毫米波乃至亚毫米波段,涉及各种微波传输线、谐振腔、天线、超

大规模微波集成电路等各个方面.光子晶体在微波波段有一些奇异的特性,如实验发现金属-介电光子晶体在微波中的某些频段可实现负的有效折射率^[2].这种具有负有效折射率的结构有着广泛的实际应用,如制作光控制器、调制器、带通滤波器及允许亚波长点源聚焦的新型透镜等.利用金属-介电光子晶体还可以制作具有高表面阻抗及相位可控的电磁波反射材料^[3],这种材料可用于高隔离度的低幅面天线基底^[4,5].

本文主要介绍光子晶体在微波技术的两大领域:微波天线及微波传输线中的应用.通过平面工艺

* 国家重点基础研究发展计划(九七三计划)(批准号:2001CB6104),国家自然科学基金(批准号:50277026),上海市科委、中国航天科技集团专项基金资助项目

2003-04-15 收到初稿,2003-07-01 修回

† 通讯联系人. E-mail: honchenk@online.sh.cn

等成熟的微加工技术,可以将光子晶体用于微波集成电路和天线的设计,其优点包括:可使线路小型化,可减少交叉耦合干扰和抑制表面波,抑制功率放大器的滤波器的高次谐波,增加天线增益,改善天线的辐射特性等。

1 基于光子晶体的微波天线

最早利用光子晶体的特性来改善天线的辐射性能是用光子晶体代替传统的金属来做天线的基底^[6]。当发射电磁波的频率落在光子晶体的光子带隙时,可以大大抑制表面波,抑制基底吸收,提高天线的发射效率。目前人们主要是直接用光子晶体来设计微波天线,用以大幅度提高天线的准直性和发射效率。其中主要有两类基于光子晶体的新型高方向性天线。

第一类新型高方向性天线是基于金属网格状的金属-介电光子晶体^[7]。当金属网格的周期小于微波波长时,该结构可看成一种具有低等离子体频率的均匀材料。这意味着该结构中电磁波传播模式的色散关系类似于固体中的等离子体电子气。其有效介电常数在微波频段可写成

$$\epsilon_{\text{eff}} = 1 - \omega_p^2 / \omega^2. \quad (1)$$

当发射电磁波的频率接近该结构的等离子体频率时($\omega \approx \omega_p$),根据上式,该结构的有效介电常数 ϵ_{eff} 或者有效折射率 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 的值将小于1,并最终接近于0。由斯涅耳定律(Snell law)定理可知,电磁波将以非常靠近垂直金属网格平面的方向发射出来,或者说发射场将集中在垂直方向附近。一种由金属-介电光子晶体构成的微波天线的结构如图1(a)所示。该结构由介质中的六层网格状铜板构成。铜板中方格子在 x, y 方向上的周期均为5.8mm,格子长为4.95mm。铜板与铜板之间被6.3mm厚(z 方向)的介质填充。铜板边长为226mm。由同轴线馈电的金属辐射片放置在第三与第四块铜板之间。实验得到该结构的低频等离子体频率 ω_p 为14.5 GHz。图1(b)为天线辐射方向图的测试结果,天线的发射频率为14.65 GHz。从图中可见,发射电磁波集中在竖直方向上。天线的辐射方向性由方向性系数确定:

$$D = 4\pi / (\Delta\theta_1 \Delta\theta_2), \quad (2)$$

式中 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 分别为 H 面和 E 面的方向图中的半功率波瓣宽度。根据 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 的实验结果,可得到这种新型天线的方向性系数高达372。这种天线还有一个有趣的特点,那就是它可以被单一馈电装置

(贴片、单极子等)激励。在体积上,这种新型天线要比传统天线小得多。因此,这类高方向性的小型微波天线在微波通信中的应用前景诱人。

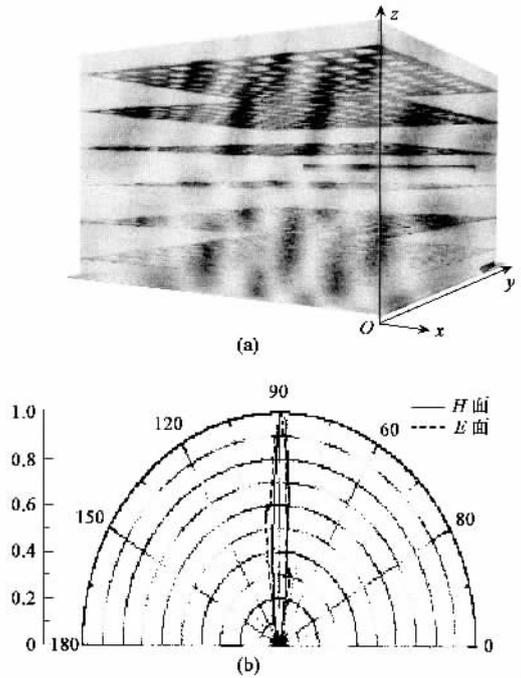


图1 (a)金属网格状光子晶体的微波天线的结构示意图(由同轴线输入的激励源大约位于结构的中心)(b)发射天线在 H 面(实线)及 E 面(虚线)的方向图测试结果

上述现象也可用金属-介质光子晶体在光子带边的方向角特性来解释^[8]。在金属-介电光子晶体中存在一较宽的低频带隙,其带边随入射角度的变化而较敏感地移动。因此,通过选择合适的结构参数及合适的频率,可让垂直方向附近的电磁波发射出去,而偏离垂直方向的电磁波被阻挡。但对于上述两种解释,即零折射率机制及带边方向角机制,它们之间的对应关系目前还不是很清楚。

第二类新型高方向性天线是基于含缺陷的光子晶体共振天线。这种新型天线可利用含缺陷的一维、二维及三维光子晶体^[9-11]。含缺陷的光子晶体也可看作光子晶体微腔,对一维而言,就是两边为布拉格反射镜的法布里-珀罗谐振腔。最简单的基于一维光子晶体微腔的共振天线的结构如图2所示。辐射频率为20 GHz时,上述天线在 H 面及 E 面的方向图类似图1(b)。理论值及实验值均表明,在共振频率附近,发射场具有很好的方向特性。这是由于共振模随入射角的变化而移动导致发射场具有方向性的结果。对于微腔的共振波长,随着入射角的方向偏离垂直方向,发射电磁波的透射系数迅速下降,这就

导致发射场具有很好的方向性. 对于逐层生长的三维光子晶体微腔, 由于朝不同方向发射的电磁波可以耦合到共振模上, 因此其发射效率要高于二维光子晶体微腔^[11]. 这类天线同样可被单一馈电装置激励, 且其体积要比传统的微波天线小得多.

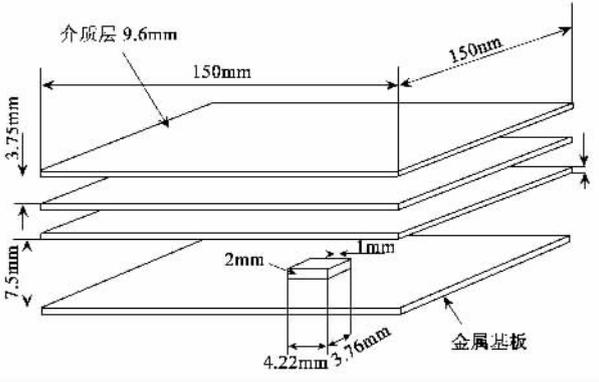


图2 基于二维光子晶体微腔的共振天线的结构示意图

2 光子晶体微带线

对光频段的光子晶体, 带隙的产生取决于介电系数 ϵ 或折射率 $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ 的周期性变化, 而对于微波波段的光子晶体, 特征阻抗 $z = \sqrt{\mu/\epsilon}$ 起着重要作用^[12], 周期性变化的特征阻抗同样可导致微波带隙的出现^[13]. 在微波波段, 人们能够通过控制结构和尺寸来实现空间各种复杂调制的特征阻抗, 这为设计与制作微波光子晶体及器件提供了广阔的参数空间. 相比较而言, 对光频段的光子晶体, 由于制备条件与材料的限制, 要实现空间复杂调制的折射率是非常困难的. 以微带传输线为例, 只需使微带导线或基板的形状周期性地变化即可做成微波光子晶体. 其中最简单的光子晶体微带传输线是在金属基板上周期性地打圆孔^[14]. 在基板上对着导线对称地打三排孔, 这就是二维光子晶体微带线. 理论及实验表明, 由于电磁波被约束在传输导线与金属基板之间, 只需在对着传输导线下的基板上打一排孔即可构成光子晶体微带线, 这就是一维光子晶体微带线. 一维及二维光子晶体微带线构成的微波反射器的结构如图3(a)所示. 相应的 S_{11} 参数(反射系数)实验值如图3(b)所示. 从图中可以看出, 一维及二维光子晶体微带反射器的 S_{11} 参数值相差很小.

由于现有的平面加工工艺可以很方便地在基板或微带导线上制作出各种各样的图案, 同时为了改善结构的幅频特性, 如增加带宽, 使通带变平坦等,

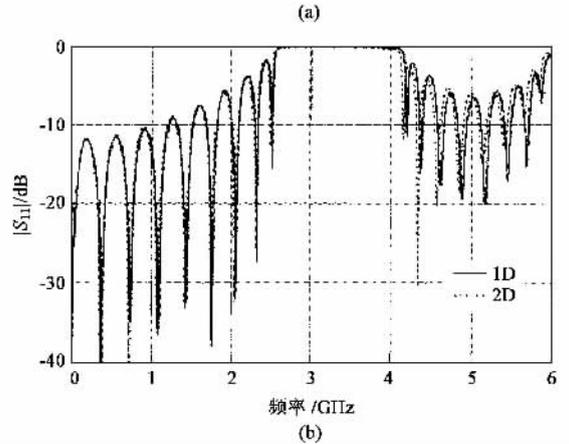
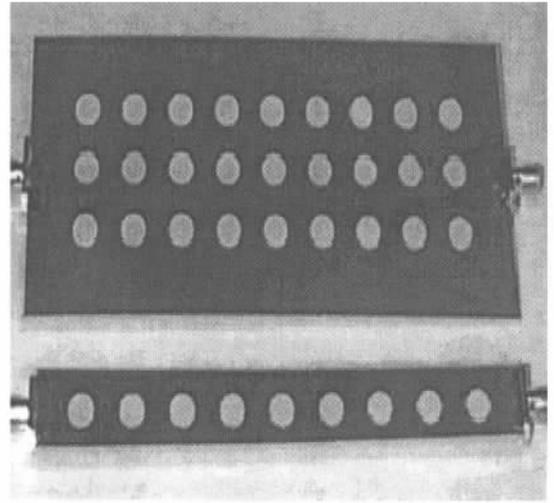


图3

(a)一维及二维光子晶体微带反射器的照片 (b)一维及二维光子晶体微带反射器的 S_{11} 参数实验值, 孔半径与孔周期之比为 0.25

人们采用了线性调制及渐变调制等技术来优化改善结构的响应参数, 改善器件的工作性能^[15]. 此外, 利用网络布局技术, 可以抑制频率响应中的二次及高次带隙^[16]. 根据能带理论, 光子晶体的频率响应与折射率或者特征阻抗调制结构的傅立叶分量有关. 如果在金属基板上刻出连续的正弦图案, 如图4(a)所示, 由于正弦函数的傅立叶分量中只有单一频率, 可预期器件的频率响应中的高次带隙将被大大抑制. 实验测量结果表明, 器件的 S 参数图中只存在单一带隙, 二次带隙被强烈抑制, 如图4(b)所示. 具有非周期频率响应的微带线在滤波器的设计中有很好的应用前景. 在底板上刻上由各种不同正弦函数构成的图案, 还可以做成可调多频的光子晶体微带结构^[17].

另一方面, 为了减小微带线的纵向长度, 人们设计出了折叠(弯曲)一维光子晶体微带线^[18]. 这种新

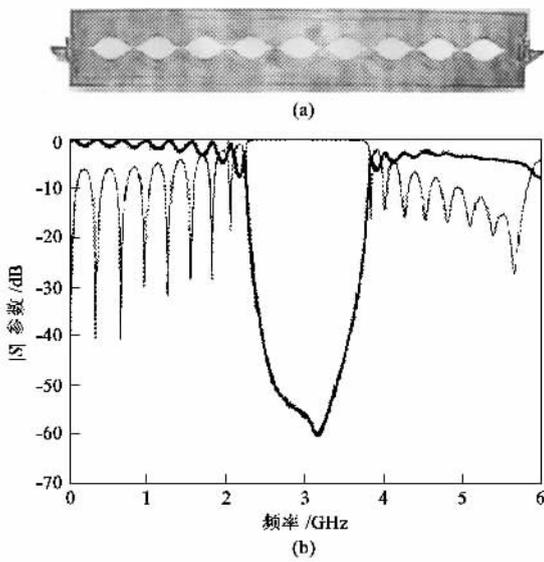


图 4

(a) 基板刻有连续正弦图案的一维光子晶体微带线的照片 (b) 为图 4(a) 所示结构的 S_{11} (细线) 及 S_{21} (粗线) 参数的实验测量值, 其中正弦周期为 23.9mm, 周期数为 9, 振幅与周期比为 0.25

板周期性打孔, 而导线设计成折叠状. 由于电磁波被局限在传输导线与金属基板之间, 电磁波可按照设计的形状拐弯. 参数值相同的折叠光子晶体反射器与笔直光子晶体反射器的 S_{21} 参数(透射系数)模拟值的比较如图 5(b) 所示. 由图可见, 折叠光子晶体反射器的 S_{21} 参数与笔直光子晶体反射器的 S_{21} 参数相差不大, 基本可满足实际需要, 同时又可大大降低器件的纵向长度. 经过优化技术, 这类结构灵巧的光子晶体微带线可获得比较好的响应特性, 在微波集成电路中有很好的应用潜力^[19].

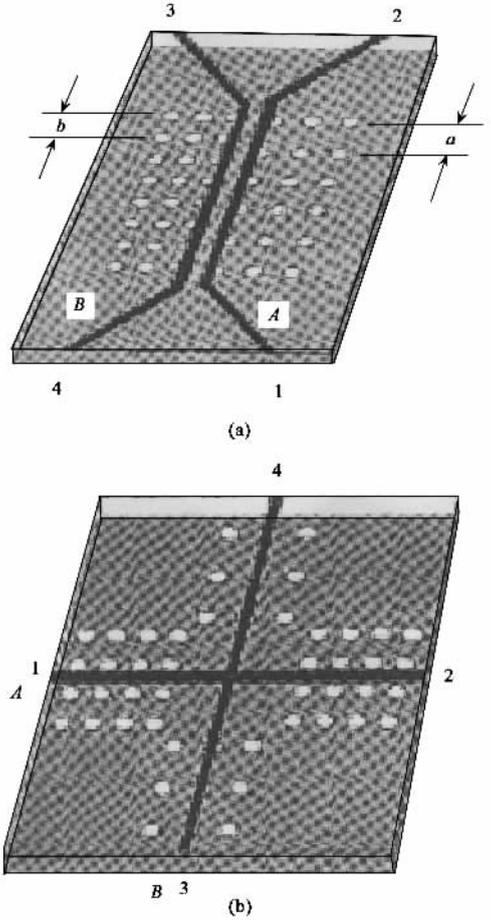


图 6 具有双周期圆孔的光子晶体微带线的结构示意图 (a) 用于抑制平行互耦 (b) 用于抑制交叉互耦

此外, 光子晶体微带线在高密度微波集成电路中的另一应用是可以抑制不同微带线之间的互耦, 包括平行微带线及交叉微带线, 从而大大减小集成电路的体积, 使电路小型化^[20]. 基板具有双周期圆孔的光子晶体微带线的结构如图 6 所示. 在图 6(a) 中, 左边的微带线可以传输 X 波段的信号而屏蔽 Ku 波段的信号, 而右边的微带线则可传输 Ku 波段的信号而屏蔽 X 波段的信号, 这就使得左右传输线之

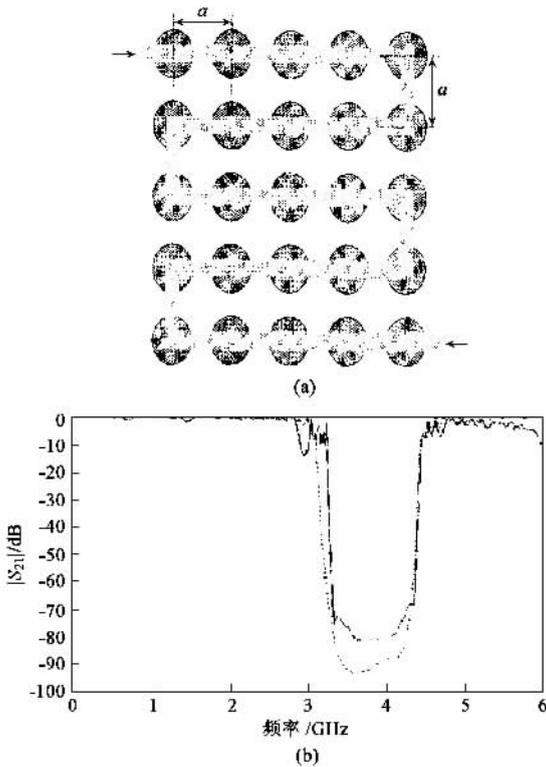


图 5

(a) 折叠一维光子晶体微带线的结构示意图; (b) 折叠(实线)与直线(点线)光子晶体反射器的 S_{21} 参数模拟值. 其中孔周期为 15.5mm, 孔半径与孔周期之比为 0.25, 周期数为 25(5×5)

型光子晶体微带线的结构如图 5(a) 所示, 它是在底

间的互耦大大降低. 实验结果表明, 与传统微带线相比, 左右传输线之间的互耦被大大抑制. 采用同样的方法, 可以抑制交叉光子晶体微带传输线之间的互耦. 传统的高密度微波电路为了避免交叉互耦, 常常需要采用多层结构, 使电路空间增大. 而采用交叉光子晶体微带线结构则可以大量节约电路空间.

总之, 光子晶体微带线由于其特有的优点, 在微波集成电路及天线中应用广泛. 例如, 它可被用来制作高效宽带的小型带通滤波器、反射器、选频器、能量放大器、天线的基底等.

3 展望

光子晶体在微波技术中的应用非常广泛. 高方向性天线及微波传输线只是其中的两大应用领域. 由于微波材料的工艺制作相对简单, 成本较低, 这类新型的光子晶体材料将会在微波技术中有着非常诱人的应用前景和十分广阔的潜在市场.

参 考 文 献

- [1] Yablonovitch E. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58 2059
 [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S. *Science*, 2001, 292 77
 [3] Sievenpiper D F. High-impedance electromagnetic surface. University of California. Ph. D. Thesis, 1999
 [4] 张治文, 陈鸿. *电工技术杂志*, 2002, 12 :10 [Zhang Y W, Chen H. *Electrotechnical Journal*, 2002, 12 :10 (in Chinese)]
 [5] 宋文仙, 黄晓岳, 李宏强等. *微波学报* 2003, 19 57 [Song W X, Huang X Y, Liu H Q *et al.* *Acta Microwave Sinica*, 2003, 19 57 (in Chinese)]

- [6] Brown E R, Parker C D, Yablonovitch E J. *Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10 #04
 [7] Enoch S, Tayeb G, Sabouroux P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 89 213902 - 1
 [8] Tayeb G, Enoch S, Sabouroux P *et al.* http://gerard.tayeb.free.fr/fac/JINA_2002.pdf
 [9] Serier C, Cheype C, Chantalat R *et al.* *Microwave Opt Technol Lett* 2001, 29 312
 [10] Enoch S, Guerin N, Tayeb G *et al.* <http://gerard.tayeb.free.fr/fac/Estec2001.pdf>
 [11] Temelkuran B, Bayindir M, Ozbay E *et al.* *J. Appl. Phys.* 2000, 87 603
 [12] Kee C. S, Park I, Lim H *et al.* *Current. Appl. Phys.* 2001, 1 84
 [13] Li J, Zhou L, Chan C T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90 : 083901
 [14] Falcone F, Lopetegi T, Sorolla M. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1999, 22 #11
 [15] Laso M A G, Lopetegi T, Erro M J *et al.* *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2000, 24 357
 [16] Lopetegi T, Laso M A G, Erro M J *et al.* *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2000, 25 33
 [17] Laso M A G, Lopetegi T, Erro M J *et al.* *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, 2000, 10 220
 [18] Falcone F, Lopetegi T, Irisarri M *et al.* *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 1999, 23 233
 [19] Lopetegi T, Laso M A G, Irisarri M *et al.* *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2000, 26 211
 [20] Leong K M K H, Guyette A C, Elamaram B *et al.* *IEEE Microwave Wireless Compon Lett.*, 2002, 12 169

· 物理新闻与动态 ·

太阳与太阳黑子的活动期

(Evidence for an unusually active Sun)

许多自然现象都与太阳黑子的活动周期有关, 例如太阳辐射的强弱、太阳黑子数的变化等. 过去受许多原因不明的涨落的影响, 使研究黑子数在较短时期内的变化变得较为复杂, 且数据不太正确. 显然原始资料提供的时间愈长, 则愈有把握给出有关太阳黑子变化的历史图像.

早在伽利略时代, 就可以对太阳黑子进行直接的计数. 早期的计数方法是利用铍-10 原子在格陵兰岛和南极洲的冰层内的遗迹来推断的. 因为在太阳黑子的活跃期, 太阳的磁性活动也变强, 这时就会排斥来自银河系的宇宙射线, 从而导致铍-10 原子在地球大气层内的数量变少. 铍-10 原子在地球上产生凝结, 这个结果的痕迹可以在南极洲冰层内保持几个世纪. 利用这个方法, 法国 Oulu 大学和德国 Max Planck 研究所的科学家们对从公元 850 年以来的有关太阳黑子的活动重新进行核算. 他们发现, 计算后的数据要比原始资料大 3 倍之多. 同时他们还确定在这 1150 年内, 太阳在最近的 60 年内是最活跃的, 而且太阳黑子数也达到最高.

(云中客 摘自 *Physical Review Letters*, 1 November 2003)