

文章编号: 1002-2082(2004)06-0016-06

超短脉冲光纤激光器新进展及其应用

黄绣江^{1,2}, 刘永智¹, 隋展², 李明中², 陈海燕¹, 林宏奂²

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 超短脉冲光纤激光器是目前激光技术研究领域中最具有活力的研究课题, 有着巨大的应用前景。本文介绍超短脉冲光纤激光器的发展概况及最新进展, 论述掺稀土超短脉冲光纤激光器原理, 对其关键技术及多种新型技术方案做了介绍和比较, 分析超短脉冲激光器的应用前景及发展趋势。

关键词: 超短激光脉冲; 光纤激光器; 超快光学技术; 光子晶体光纤

中图分类号: TN248-39

文献标识码: A

Development and Application of Ultrafast Pulse Fiber Laser

HUANG Xiu-jiang^{1,2}, LIU Yong-zhi¹, SUI Zhan², LI Ming-zhong²,

CHEN Hai-yan¹, LIN Hong-huan²

(1. College of Optic-electronic Information of UESTC, Chengdu 610054, China;

2. Laser Fusion Research Center of AEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Ultrafast pulse fiber laser is now one of the most active subjects in the field of the laser research, and it will have a wide application for sure. Development of ultrafast pulse fiber laser is introduced in this paper. The principles and critical technology of ultrafast pulse fiber laser are discoursed. Several new methods are compared. The trend and applications of the ultrafast pulse fiber laser are analyzed.

Keywords: ultrafast laser pulse; fiber laser; ultrafast optical technology; photonic crystal fiber

引言

自从1965年人们首次利用被动锁模技术在红宝石激光器上直接产生皮秒级超短激光脉冲以来, 超短脉冲技术的发展异常迅速。掺稀土元素光纤激光器也在60年代出现, 但由于早期光纤材料的损耗很大, 因此, 80年代以前其进展缓慢。进入80年代以后, 由于光纤通讯技术的发展及光纤材料特别是掺稀土元素光纤材料和新的激光泵浦技术的发展, 光纤激光技术研究受到世界各国的普遍重视, 目前已成为激光技术领域一个十分活跃的前沿研究方向^[1]。

90年代初, 光纤超短脉冲光源在光纤通讯系统中的应用得到了进一步的发展, 特别是在1.55

μm 窗口, 掺 Er^{3+} 光纤超短光脉冲激光器伴随着掺 Er^{3+} 光纤放大技术的成熟得到了很大的发展^[2]。以光纤作基质的光纤激光器阈值低、波长可调谐, 是目前光通信领域的新兴技术, 它支持更高的传输速度, 是未来高码率密集波分复用系统和相干光通信的基础。其他稀土掺杂元素的光纤超短脉冲激光器在光纤通信、医疗和生物学等领域也具有诱人的应用前景。

1 超短脉冲光纤激光器原理及特点

目前开发的光纤激光器主要采用掺稀土元素的光纤作为增益介质, 比较成熟的有源光纤中掺入的稀土离子有 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Nd^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Tm^{3+} 、

收稿日期: 2003-05-22

基金项目: 国防预研基金资助项目

作者简介: 黄绣江(1977-), 女, 四川德阳人, 电子科技大学光电信息学院博士研究生, 主要从事光纤与光通信方面的研究。

Ho^{3+} 。光纤激光器由泵浦源、增益介质、腔镜组成,基本结构如图1所示。其中,LD发出的泵浦光经光纤耦合器进入光纤,使光纤中掺杂元素原子激发。腔镜为二色镜,反射输出激光,对泵浦光增透。与固体激光器相同,光纤激光器也是根据锁模原理产生短脉冲激光输出的。光纤激光器在增益带宽内的大量纵模上运转时,当各纵模相位同步,任意相邻纵模相位差为常数时实现锁模,谐振腔内循环的单个脉冲经过输出耦合器输出能量。根据锁模方式不同,可分为主动锁模光纤激光器和被动锁模光纤激光器。由于主动锁模调制能力有限,限制了锁模脉冲的宽度,脉冲宽度通常为ps量级。被动锁模或自锁模光纤激光器是利用光纤或其它元件中的非线性光学效应实现锁模的,激光器结构简单,在一定条件下不需要插入任何调制元件就可以实现自启动锁模工作^[3]。通常自启动被动锁模光纤激光器可以输出fs量级的超短脉冲^[4]。

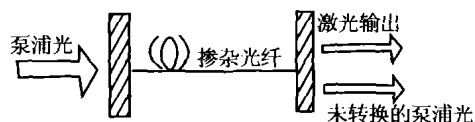


图1 光纤激光器原理图

Fig.1 The principle of fiber laser

由块状工作物质及各种光学元件组成的传统固体激光器存在体积大、质量大、结构松、可靠性差等缺点。而光纤激光器有以下特点^[5]:(1)增益介质长,能方便地延长增益长度使抽运光充分吸收,光-光转换效率超过60%;(2)光纤激光器表面积/体积比大,其工作物质的热负荷相当小,光纤中的场主要约束在纤芯内,使纤芯中的场强很大,加之光纤的低损耗又使这种高光强可以保持很长距离,能产生甚高亮度和甚高功率(140 mW/cm²);(3)易实现单模、单频运转和超短脉冲(fs);(4)光纤激光器体积小且结构简单,工作物质为柔性介质,使用方便;(5)激光器可在很宽光谱范围内(455~3 500 nm)设计与运行,使光纤激光器可调。由于光纤激光器具有以上特点,因此采用光纤作为振荡器产生超短脉冲激光比传统固体激光器更具优势。

2 飞秒脉冲光纤激光器技术方案

超短脉冲的发展经历了如下过程:60年代中

后期是各种锁模理论的建立和锁模方法的实验探索时期。进入70年代,各种锁模理论和方法(如主动锁模、被动锁模、同步泵浦锁模、附加脉冲锁模等)趋于成熟,皮秒(ps)脉冲被初步应用于物理和化学领域。80年代以碰撞锁模染料激光器为代表,脉宽达到飞秒(fs,即 10^{-15} s)量级。90年代飞秒激光介质有了新突破,以掺钛蓝宝石固体^[6~9]为典型代表。

掺杂光纤作为光纤激光器增益介质的研究始于20世纪60年代。在70年代,光纤制备技术以及光纤激光器的泵浦与谐振腔结构等研究取得了较大进展。80年代掺铒光纤的突破使光纤激光器更具有实用性。90年代高功率光纤激光器、超短脉冲光纤激光器和窄线宽可调谐光纤激光器成为研究的热点^[10~16]。

由于光纤材料、光纤元器件技术和激光技术的发展,采用腔内色散调整,腔外光纤啁啾脉冲放大(CPA)等新技术,超短脉冲光纤激光器的输出功率、压缩脉宽都已达到了相当高的水平^[17,18]。德国采用双包层泵浦技术实现了目前世界上光纤激光器的最大功率——2 000 W单模、连续输出1.06 μm 波长的激光,利用光纤光栅压缩脉冲技术在620 nm波段获得了6 fs的超短脉冲。

可实现超短脉冲的光纤激光器主要有锁模环形光纤激光器(MLFRL)、光纤光栅激光器和超连续脉冲(SC)发生器。锁模环形光纤激光器产生的脉冲几乎没有啁啾,输出波长较灵活、稳定性好,但技术复杂,是一种很有前途的光时分复用(OTDM)光源。光纤光栅激光器主要有分布布拉格反射(DBR)光纤光栅激光器和反馈(DFB)光纤光栅激光器。光纤光栅内的非线性效应使采用全光纤器件实现脉冲压缩成为可能,但由于其谐振腔较短,因此存在泵浦吸收效率低、谱线比环形激光器宽、有模式跳跃现象等问题。若采用更大通光截面光纤结构和Er:Yb共掺杂光纤作为增益介质以及内腔泵浦方式、主振荡器和功率放大器一体化等方案则可以解决以上问题^[19]。SC光源的特点是强泵浦脉冲的频谱在某一连续范围被展宽而脉冲性质不变,产生的超短脉冲脉宽小于1 ps。下文分别详细介绍这3种激光器。

2.1 锁模环形光纤激光器

图2为腔内展宽腔外压缩脉冲技术原理图。光

纤激光器采用腔内大色散量的正负色散光纤,在光纤环形腔内交替地对光脉冲进行展宽和压缩,使光脉冲在增益光纤放大过程中交替压缩、展宽,减轻了光脉冲峰值功率太高造成的非线性效应对光脉冲放大的影响^[20,21]。这种展宽脉冲附加锁模技术的优点是工作稳定,效率高,可输出较高的超短脉冲能量。用于获得超短脉冲的光纤激光器主要有掺铒光纤激光器和掺镱光纤激光器。

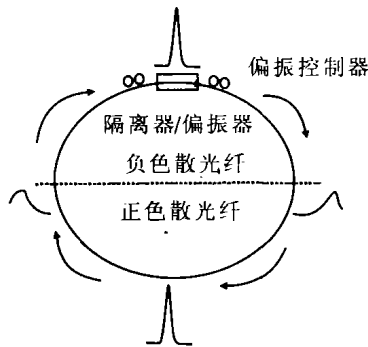


图2 展宽脉冲附加锁模光纤激光器原理图

Fig. 2 The principle of fiber laser with widening pulse and additive locking mode

2.1.1 掺铒光纤激光器

1996年,美国麻省理工学院 G. Lenz, S. B. Fleischer 提出采用 980 nm, 500 mW 半导体激光振荡与放大器(MOPA)泵浦,在光纤环形腔内(其中掺Er³⁺光纤为正色散)交替对光脉冲进行展宽和压缩,正啁啾脉冲经一对硅布儒斯特角棱镜压缩后,展宽脉冲附加锁模(SP-APM)光纤激光器在 1.55 μm 处产生了 91 pJ, 脉宽 73 fs, 平均输出光功率 95 mW, 重复频率 35.2 MHz^[22]的脉冲,其结构如图3所示。

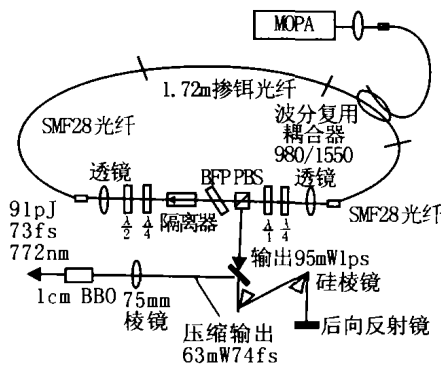


图3 环形腔掺Er³⁺光纤激光器装置

Fig. 3 The arrangement of Er³⁺ doped fiber laser with ring cavity

2.1.2 掺镱光纤激光器

由于铒的发射光谱中恰好包含光纤通信“窗口”波段,所以大多数光纤超短脉冲激光器均以掺铒光纤作为增益介质。从80年代中后期开始,掺镱光纤作为一种激光介质开始受到人们的重视,并取得了很大的进展。

图4为镱的能级结构简图。镱的能级结构中只包含两个多重态,即基态²F_{7/2}和一个分离的激发多重态²F_{5/2}。它具有其它同族稀土光纤不具备的优点:(1)不存在激发态吸收(ESA),因此泵浦-信号光的转换效率高;(2)不存在浓度淬灭效应,可以用较短光纤获得高增益;(3)泵浦光和信号光波长接近,量子转换效率高,材料热负荷降低。除了以上特点外,掺镱光纤在发射和吸收光谱方面和其它稀土元素相比有自己的特点:(1)增益谱很宽,从975 nm到1 200 nm覆盖了几个重要波长;(2)吸收带较宽,从800 nm到1 064 nm,可以有多种泵浦源。因此,掺Yb³⁺光纤成为理想的介质。

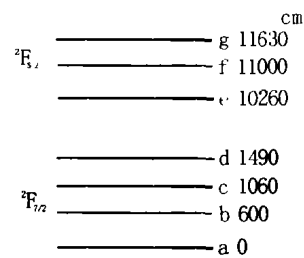


图4 Yb³⁺能级结构简图

Fig. 4 Scheme of energy level of Yb³⁺

2002年 L. Lefort 和 A. Albert 等人提出一种实用的低噪声展宽脉冲掺镱光纤激光器^[23],其原理如图5所示。光纤和光栅分别提供正负色散,在腔内交替地对光脉冲进行展宽和压缩,它的作用与环形腔是等效的。该方案在 1 056 nm 处获得了输出功率为 3 mW, FWHM 为 108 fs, 谱宽为 18.6 nm 的脉冲。

2.2 光纤光栅激光器

使用掺稀土元素光纤激光器的一个重要因素就是可以采用插入啁啾光纤光栅作为腔内色散调整元件从而得到大能量超短光脉冲。引入啁啾光纤光栅可使整个光纤激光器在保持腔体内非线性不变的情况下增大腔内的色散量,输出大能量的超短激光脉冲。1996年Fermann等人采用腔内插入2个用于控制脉冲宽度的啁啾光纤光栅被动锁模激光器,获得了最大平均功率为 170 mW, 脉宽为 4 ps

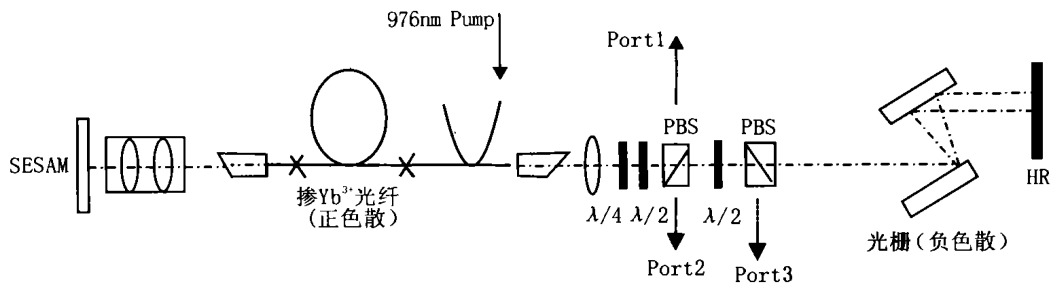


图5 NPE展宽脉冲锁模光纤激光器

Fig. 5 Locking mode fiber laser with NPE widening pulse

的超短脉冲^[24]。

2.3 超连续谱(SC)光纤激光器

具有超连续谱的超短光脉冲在TDM/WDM系统中有着重要的意义。超短光脉冲不但能提高TDM系统的单信道码率,同时其宽大的连续谱也能为WDM系统提供多个波长信道。大部分SC光源都需要一个高峰值功率的短脉冲或特殊光纤。光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)就是一种具有特殊色散和非线性结构的光纤。它是在1992年由ST. J. Russell提出的^[25],其结构如图6所示。在石英光纤中沿轴向均匀排列空气孔,当一个孔遭到破坏或缺失时出现缺陷,光在缺陷内传播,因此又叫多孔光纤或微结构光纤。由于PCF空气孔的排列和大小有较大的控制余地,并可根据需要设计PCF光传输特性。因此,近年来它引起了人们极大的兴趣。PCF与传统的光纤相比,能够在波长低于1.3 μm时获得反常色散,同时保持单模,这种奇异的色散特性为短波长光孤子传输提供了可能,也为超短脉冲激光器提供了一种新型的光纤材料。

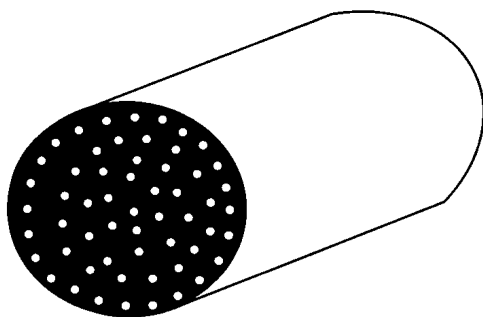


图6 光子晶体光纤结构

Fig. 6 Construction of photonic crystal fiber

2002年H. Lim等入提出了采用光子晶体光纤作为色散控制的飞秒掺镱激光器^[26],其结构如图7

所示。采用声光锁模,通过调节偏振控制器建立锁模机制,用光子晶体光纤代替棱镜或衍射光栅实现脉冲压缩,在1.3 μm处获得了脉宽为100 fs的超短脉冲。选择不同的增益介质还可以将系统应用于0.7至1.3 μm波段。

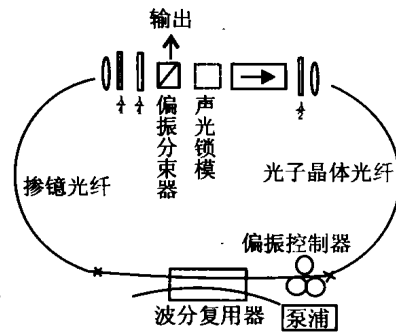


图7 光子晶体光纤激光器结构图

Fig. 7 Configuration sketch of photonic crystal fiber laser

3 超短光纤激光器的应用及发展趋势

超短脉冲激光器最直接的应用就是作为超快光源,形成多种时间分辨光谱技术和泵浦/探测技术,作为飞秒固体激光放大器的种子光源,可用于光纤型光参量振荡器与放大器系统,并可使用周期性极化铌酸锂(PPLN)进行高效倍频或频率转换。它的发展带动了物理、化学、生物、材料与信息科学的研究进入微观超快过程领域^[27]。超短脉冲光纤激光器在通信、军事、工业加工、医学、光信息处理、全色显示和激光印刷等领域具有广阔的应用前景。

超短光脉冲发生技术是实现超高速OTDM系统的必要条件之一。发送的信号光脉冲越窄,单位时间内发送的脉冲就越多,传输的信息量就越大。模同步掺铒光纤环形激光器温度稳定,产生的脉冲

几乎没有啁啾,在高频条件下,不需要进行啁啾补偿或脉冲压缩就能产生 10 ps 以下的超短脉冲。

若将光纤激光器的输出功率提高到千瓦数量级,并开发高亮度、光照面积小的系统就可以作为激光防御武器替代目前看好的化学激光器。激光波长在 1 080 nm 附近的掺镱光纤激光器的效率和功率密度在材料加工方面可与传统的 YAG 激光器相媲美。功率超过几瓦的光纤激光器在显微外科手术中能为外科手术提供较大的高能辐射源。

新型的光纤结构、高储能的光纤材料和性能更好的光纤飞秒光脉冲展宽器、压缩器使超短脉冲光纤激光器向着脉宽更窄、功率更高的方向发展。特别是以光纤光栅、滤波器、光子晶体光纤等为基础的新型光纤器件的出现,为光纤激光器的设计提供了新的对策和思路。覆层泵浦技术、掺镱石英光纤的应用为实现高功率超短脉冲光纤激光器带来了希望。目前光纤激光器的研发正向着多功能化、实用化、小型化方向发展。

4 结束语

随着光通信网络及其相关领域技术的飞速发展,光纤激光器在光通信、军事、工业加工、医疗、光信息处理、全色显示和激光印刷等领域将发挥越来越重要的作用。超短脉冲激光技术在激光制导、激光战略武器研制、激光双星定位技术、激光受控热核反应、强场物理及惯性约束快点火等领域都有着重要的应用。我们相信,超短脉冲光纤激光技术的发展一定会带动相关学科的飞速发展,并成为人类认识未知物质世界的有效工具。

参考文献:

- [1] D Richardson, *et al.* Fiber laser systems shine brightly[J]. *Laser Focus World*, 1997, (9): 87—96.
- [2] H A Haus, *et al.* Stretched-pulse mode-locking in fiber ring laser: theory and experiment[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(3): 591—598.
- [3] Dirk H Sutter, Isabella D Jung, *et al.* Self-starting 6.5 fs pulses from a Ti: Sapphire laser using a semiconductor saturable absorber and double chirped mirrors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 169—179.
- [4] 蓝信钜,等. 激光技术[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 105—118.
- [5] 杨青,俞本立,等. 光纤激光器的发展现状[J]. *光电子技术与信息*, 2002, 15(5): 13—18.
- [6] Asakictal M T. Generation of 11-fs pulses from a self-mode-locked Ti: Sapphire laser [J]. *Opt Lett*, 1993, 18(12): 977—979.
- [7] Huang Chung-Po. Generation of transform-limited 32 fs pulses from a self-mode-locked Ti: Sapphire laser [J]. *Opt Lett*, 1992, 17(2): 139—141.
- [8] Sting A. Generation of bandwidth-limited 8 fs optical pulses from a mirror-dispersion-controlled Ti: Sapphire laser[R]. Baltimore: CLEO'95, 1995: 252—253.
- [9] 王清月,等. 采用半导体可饱和吸收镜的钛蓝宝石激光器中的自启动机理[J]. *激光与光电子学进展*, 2001, (9): 7.
- [10] A Galvanauskas, D Harter, *et al.* High-energy femtosecond pulse compression in chirped fiber gratings [R]. Anaheim: CLEO'96, 1996: 499—500.
- [11] F O Hday, F W Wise. High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror[R]. Long Beach: CLEO'02, 2002: 518—519.
- [12] B Galvanauskas, M E Fermann, *et al.* High-energy high-average-power femtosecond fiber system using a QPM-grating pulse compressor [R]. San Francisco: CLEO'98, 1998: 364.
- [13] Antoine Courjaud, *et al.* High-power diode-pumped Yb: KGW ultrafast laser [R]. Long Beach: CLEO'02, 2002: 501—502.
- [14] D T Reid, G T Kennedy, *et al.* Widely tunable, near-to mid-infrared femtosecond and picosecond optical parametric oscillators using periodically poled LiNbO₃ and RbTiOAsO₄ [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 238—250.
- [15] Fermann M E Galvanauskas A, *et al.* Tunable Er³⁺ fiber femtosecond source amplified to W-level average power at 1.03~1.06 μm in Yb³⁺ fiber[R].

- Baltimore: CLEO'99, 1999, CPD9/1-CPD9/2.
- [16] Fermann M E, Stock M L, *et al.* Wavelength tunable soliton generation in the 1400 ~ 1600 nm region using an Yb fiber laser [J]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2001, (2): 1-3.
- [17] Carruthers T F, Horowitz M, *et al.* A dispersion-managed, harmonically mode-locked fiber soliton laser [R]. Baltimore, IEEE LEOS'99, 1999, (2): 774-775.
- [18] Liem A, Limpert J, *et al.* Femtosecond fiber CPA system with high average power [R]. Long Beach: CLEO'02, 2002, (1): 593-594.
- [19] Augst S J, Goyal A K, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers in a MOPA configuration [R]. Long Beach: CLEO'02, 2002, (1): 594-595.
- [20] K Tamura, E P Ippen, H A and L E Nelson. 77 fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. Opt Lett, 1993, 18: 1080-1082.
- [21] G Lenz, S B Fleischer, *et al.* 91-pJ, 73-fs pulses from a frequency-doubled stretched-pulse additive-pulse mode-locked fiber laser [R]. Anaheim: CLEO'96, 1996: 30-31.
- [22] Wilcox R B, Browning D F, *et al.* Fiber DFB lasers as oscillators for high-power MOPA systems [R]. Baltimore: CLEO'99, 1999: 243.
- [23] L Lefort, J H V Price, D J Richardson. Practical low-noise stretched-pulse Yb³⁺ doped fiber laser [J]. Opt Lett, 2002, 27: 291-293.
- [24] M E Fermann, *et al.* Generation of a 0.5 W average power train of femtosecond pulses at 10 GHz in the 1.55 μm region [J]. Electron Lett, 1996, 32 (9): 835-836.
- [25] 池灏, 曾庆济, 等. 光子晶体光纤的原理、应用和研究进展 [J]. 光电子·激光, 2002, 13(5): 534-537.
- [26] H Lim, F O Ilday, F W Wise. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control [J]. Optics Express, 2002, 10 (25): 1497-1502.
- [27] 侯洵. 超短脉冲激光及其应用 [J]. 深圳大学学报(理工版), 2001, 18(2): 1-2.

(上接第 11 页)

行处理, 可以将光电探测器 CCD 的分辨率提高到更高的精度, 如 $\frac{1}{4}$ 或 $\frac{1}{8}$ 像元。

参考文献:

- [1] Kai M Hock. Effect of oversampling in pixel arrays [J]. Optical Engineering, 1995, 34(5): 1281-1287.
- [2] Toni Tolker Nielsen. Pointing, acquisition and tracking system for the free space laser communication system, SILEX [J]. SPIE, 1995, 2381: 194-205.
- [3] 胡渝, 刘华. 空间光通信技术及其发展 [J]. 电子科技大学学报, 1998, 5(27): 453-460.
- [4] 郝云彩, 杨秉新, 张国瑞. 线阵 CCD 相机细分采样成像像质研究 [J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1407-1411.
- [5] 陈鸿强, 李静. 用面阵 CCD 模拟测定星光漂移的方案研究 [J]. 光学技术, 2000, 26(5): 454-456.