

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2022.05.03

天文光梳技术现状与分析

张志刚

(北京大学 电子学院 区域光纤通信网和新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘要: 天文光谱定标用的天文光梳是解决天体物理学中很多重大科学问题的有力工具。文章简述天文光谱仪对天文光梳的需求和产生天文光梳的几种技术的现状, 并对这些技术的优势和缺点进行分析, 最后对天文光梳技术进行展望。

关键词: 激光频率梳; 天文光谱定标; 电光调制光梳; 微腔光频梳

中图分类号: TB9; O436 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2022)05-0023-07

Advances and analysis of astrocomb technology

ZHANG Zhigang

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronics,
Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As a necessary tool for the calibration of astronomical spectrograph, the astrocomb can help to solve a lot of major problems in astrophysics. This paper reviews the requirements of astronomical spectrograph for astrocombs and the current status of technologies for generating astrocombs, analyses the advantages and defects of those astrocomb technologies. The prospect of astrocombs is also given.

Key words: laser frequency comb; astronomical spectrograph calibration; electro-optically modulated comb; microcavity comb

0 引言

自从激光频率梳被提出作为新型天文光谱仪定标工具——天文光梳, 科学家们就期盼我国天文台能用上中国自己研发的这种新型光谱定标仪。时间过去了十多年, 真正能用的天文光梳在哪儿? 本文将介绍天文光梳及其技术现状, 分析其技术难点及可见光天文光梳所面临的挑战, 最后对天文光梳技术给予展望。

1 天文光梳

天文光梳 (Astrocomb) 是天文光谱和定标频率梳的统称。天文光谱仪没有刻度, 需要对其进

行定标。高精度光谱定标是利用某种标准模板将光谱的谱线在成像器件 CCD 上的位置信息“翻译”为其在频率或波长空间的信息; 模板的精度、稳定性越好, 光谱定标的精度越高。理想的模板需具有大量、稳定、等间隔、可分辨的谱线位置作为定标用的“刻度齿”, 也称为“梳齿”。

在系外行星及星系宇宙学探测中^[1], 光谱定标通常用“视向速度” (Radial Velocity, RV), 即恒星对观察者的速度来表示, 单位为 m/s, 由谱线的多普勒频移转换而来。

在系外行星探测中, 行星围绕恒星转动使恒星视向速度改变, 导致恒星光谱的多普勒频移。自诺贝尔物理学奖获得者 M. Mayor 等人于 1995 年

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-10-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575004); 自然科学基金国际合作项目(61761136002); 国家自然科学基金(U2031208, 61761136002, 61575004)

引用格式: 张志刚. 天文光梳技术现状与分析 [J]. 计测技术, 2022, 42 (5): 23-29.

Citation: ZHANG Z G. Advances and analysis of astrocomb technology [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42 (5): 23-29.



用RV法发现太阳系外行星^[2]以来,太阳系外行星搜寻成为天体物理学的前沿课题之一。搜寻系外行星的方法除了使用RV法,还可使用凌星法(Transit),用天文望远镜可发现类地行星的候选体。但凌星法只能测量行星的轨道周期和大小,不能得到准确的行星质量,采用RV法才能得到准确的行星质量。行星质量除了判断行星的物质构成,还将揭示天体的动力学信息、形成机制以及演化轨迹等。

目前为止,发现的5000多颗系外行星中,大多数质量在海王星(17倍地球质量)以上。科学家们一直在探索发现太阳系外宜居的类地行星,这对光谱定标精度提出了更高的要求。地球对太阳的扰动引起的太阳RV的最大变化是9 cm/s。这个RV非常小($\frac{\Delta V}{C} < 3 \times 10^{-10}$,恒星的视向速度与光速之比),相对于500 nm波长的光的频移仅为200 kHz,在光谱仪感光器件CCD上的移动约为一个原子的尺度。

进行频率测量时,可以测得200 kHz左右的频移,用拍频法测量光频,原则上可以达到0.5 Hz的分辨率,对应的RV小于200 nm/s。实际上恒星发光是连续谱,用于测量的标记主要是金属元素的吸收谱线,这些吸收谱线在光谱仪中表现为暗斑且较宽,不能用拍频法测量,因此只能测量这些谱线的位置变化。

每个吸收谱线的暗斑占据几个感光像素,而每个定标谱线在光谱仪中表现为一个空间衍射亮斑,也占据几个感光像素,每个定标谱线的位置定义为若干像素拟合函数的重心。天文光谱仪CCD记录的Echelle光栅衍射的某一级定标谱线如图1所示,图中黑色点代表像素点,每根定标谱线占据几个像素,通过对像素的拟合确定每根定标谱线的“重心”波长。测量吸收谱线的多普勒频移通过数千甚至上万根谱线的互相关进行测量。

常规的定标光源钍氡灯可以提供上千根间隔不等、强度不同的定标谱线,定标精度最高能达到1 m/s,不用光源的碘吸收谱线定标法及光谱干涉法的分辨率也是1 m/s量级。

激光频率梳(Laser Frequency Comb)的出现和在频率测量应用上的普及,可以提高天文光谱

定标精度,其可提供上万根等间隔、强度均匀的标尺刻度,理论上可以达到1 cm/s的分辨率。所以激光频率梳出现不久,科学家就提出用其作为光谱定标光源^[3-4],取代传统的钍氡灯和碘吸收盒,这种新型定标光源称为天文光梳。

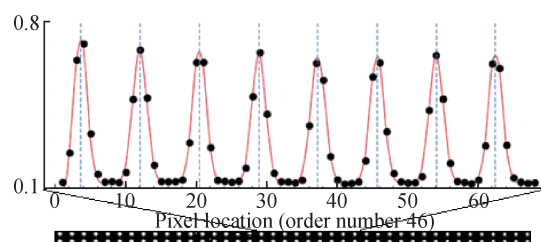


图1 天文光谱仪CCD记录的Echelle光栅衍射的某一级定标谱线^[3]

Fig.1 Astro-spectrograph calibration lines recorded in a CCD from an Echelle order^[3]

和钍氡灯一样,激光频率梳提供的谱线也是衍射斑(如图1),需要像素点拟合来确定重心。设定标谱线可用高斯函数拟合,并设光谱仪的光子噪声为泊松分布,单根定标谱线的光子噪声受限的定标“精度”,即每个梳齿的位置误差(用频宽 $\Delta\nu_{\text{rms}}$ 表示)可用式(1)估算^[3]。

$$\Delta\nu_{\text{rms}} = 0.41 \frac{FWHM}{SNR \times \sqrt{n}} \quad (1)$$

式中: $FWHM$ 为每个定标谱线所占的频率宽度; SNR 为定标谱线中每个定标线的信噪比; n 为每个谱线所占的CCD像素数。所有Echelle级次的定标线个数 N 的积分得到的均方根误差为

$$\sigma_v = \frac{\Delta\nu_{\text{rms}}}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知,为了提高RV定标“精度”或减小定标误差,应该有足够多的定标梳齿和尽可能高的信噪比。但是定标梳齿个数不可以随便定,需要考虑梳齿可分辨,又不能距离太远。根据奈奎斯特定律,最佳的谱线频率间隔应为光谱仪分辨力的3倍^[3],最佳分辨力为小于0.5倍或大于5倍时会使得定标误差翻倍。

因此,赫瑞-瓦特大学的天文光梳专家D. Reid教授提出^[5],为了达到类地行星搜寻的视向速度测量精度,天文光梳的梳齿应为每隔100 THz一个,Reid教授提出的波长范围分别为:375~435 nm, 435~515 nm, 515~630 nm, 630~815 nm,

815~1115 nm 和 1115~2000 nm。若我国某台光谱仪的分辨力是 40000，对应的梳齿频率间隔分别为：60，52，41，35，27，20 GHz，如图 2 所示。根据此建议，在 1115~2000 nm 的红外波段，只需要一个频率间隔的天文光梳，而在可见光波段就需要含 4 段不同频率间隔的天文光梳。

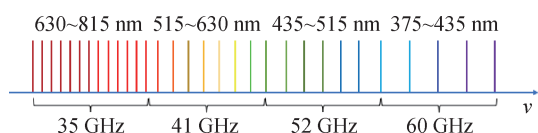


图2 分辨力为40000的可见光域天文光梳的分段频率间隔示意图

Fig.2 Schematic diagram of wavelength division and respective frequency separation of an astrocomb in visible light domain with resolution of 40000

2 天文光梳技术现状

自天文光梳概念提出以来，很多研究单位开展了相关工作^[6]，其中较代表性的有哈佛大学、马克斯-普朗克研究所、美国国家标准局、赫瑞-瓦特大学、北京大学等，所用的光频梳光源，有钛宝石激光器、掺镱光纤激光器、掺铒光纤激光器及电光梳和微腔梳。

图 3 是瑞士电子和微技术中心 T. Herr 等人总结的国际上各研究小组测试的天文光梳现状^[6]，包

括所用激光器的种类、覆盖的波长范围和频率间隔。图 3 中，横坐标为波长，纵坐标为频率间隔，其中年代前面的方括号内标号为原文中引用论文号。文中标记“[18](2016)/HRS”代表的是北京大学研制的天文光梳在国家天文台兴隆站高分辨力光谱仪 (High Resolution Spectrometer, HRS) 上的测试结果。可以看出，激光频率梳特别是钛宝石激光梳和掺镱光纤激光梳通过扩谱可以覆盖大部分可见光区域，而其他类型的光梳，例如电光梳和微腔梳，则都在近红外区域。

天文光梳的定标光谱覆盖范围为 375~2000 nm，根据光谱仪成像器件 CCD 的感光区域，大致可分为可见光和近红外两段。可见光全域 CCD 全感光范围为 375~920 nm，对 $R=40000$ 的分辨力，最佳梳齿间隔为 60~25 GHz。近红外波段为 920~2000 nm，对 $R=40000$ 的分辨力，最佳梳齿间隔为 20 GHz。

上述要求并不高，甚至比一般的光频梳要求还要低一些，比如梳齿线宽，并不要求达到 Hz 量级，MHz 量级也可以接受，因为光谱仪分辨力没有那么高；对于频率不稳定性，只要求长期不稳定性小于 10^{-11} 。和其他光梳一样，要求常年稳定工作，因为天文观测经常是以年为单位的。目前为止，只有德国某公司在出售天文光梳，但其产品还不成熟，而其他天文台都在联合有关大学和研究所研究自己的光频梳。

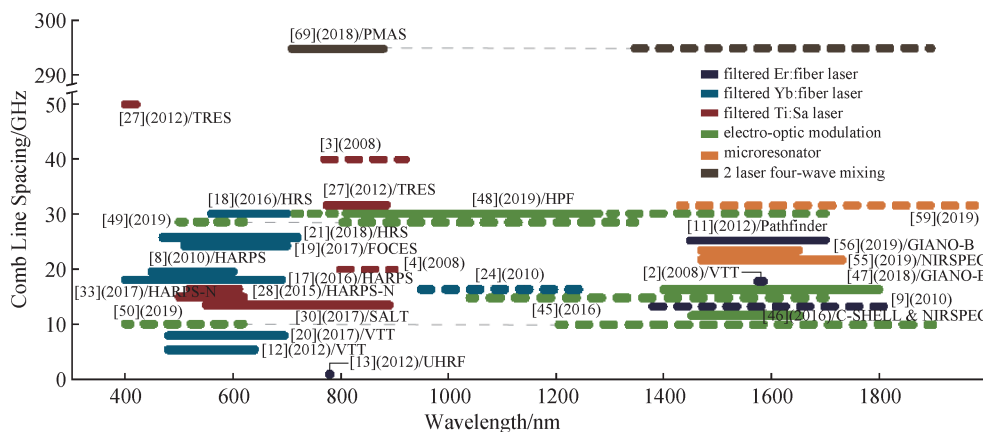


图3 天文光梳从可见光到近红外的布局^[6-7]

Fig.3 Astrocombs achieved from visible to near infrared range^[6-7]

3 天文光梳技术的难点

天文光梳技术的难点主要集中在以下几方面：首先，飞秒激光器直接输出的光谱一般呈孤子形

状，带宽几十 nm，而且成熟的飞秒激光器的波长并不在可见光波段，而是在近红外波段；其次，飞秒激光器的重复频率，一般在几百 MHz，很难直接达到几十 GHz；再有，因为重复频率和频率间

隔互为倒数，频域的大间隔就相当于时域的高重复频率，定标需要的是光谱仪可分辨的大频率间隔，而光梳的扩谱，需要的是高脉冲能量和高峰值功率，这恰恰是低重复频率激光器的特征。

为了达到光谱仪可分辨的光谱间隔，同时又覆盖所需要的波长，通常的方法是滤波和扩谱，只不过是两者先后顺序的问题。

3.1 从激光梳到天文光梳

从激光梳到天文光梳有两种方式：第一种方式是先滤波、后扩谱，即先将激光器输出的几百 MHz 的频率的脉冲通过法布里-珀罗腔（FP腔）滤掉不需要的梳齿，使梳齿间隔倍增到几十 GHz，再通过非线性光纤将光谱扩展到需要的波段；第二种方式是先扩谱、后滤波，即先从激光器输出的脉冲通过非线性光纤扩谱，然后再通过 FP腔滤波到几十 GHz。这两种方式存在本质区别：

第一种方式：先滤波、后扩谱，如图 4 所示。滤波是在频域将不需要的梳齿周期性地滤掉，从而达到扩大梳齿间隔的目的，比如从 250 MHz 倍增到 25 GHz。这对 FP腔的要求不高，精细度只要

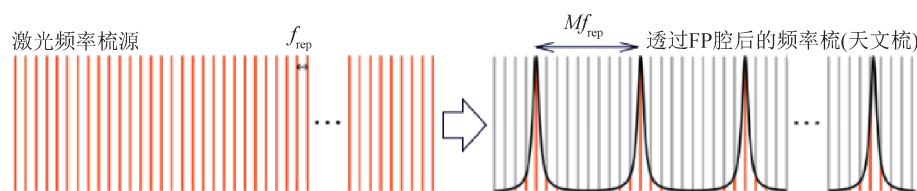


图4 激光频率梳通过FP腔滤波,去掉不需要的梳齿,实现频率间隔的 M 倍增

Fig.4 Filtering of laser frequency comb lines by FP cavity and multiplication of comb tooth spacing

第二种方式：先扩谱、后滤波。如果激光器直接输出的单脉冲能量还是 1 nJ 左右，用高非线性光纤或光子晶体光纤可以轻易扩谱到很宽的范围。滤波的难点在于设计啁啾镜对的时候，要面对零色散带宽和平坦化的矛盾。色散为零的光谱和反射带宽越宽，平坦程度越差。平坦程度会影响到每个谐振峰的线宽和信噪比。如前所述，每个 FP腔覆盖的光谱区间只有 100 THz，此时的带宽并不大，零相位和平坦高反射率的配对啁啾镜很容易设计和制作。

在必须考虑功耗的场合，若采用第一种方式，滤波后需要放大，比如用光纤放大器放大到 10 W，所需的电功率又要增加 50 W，另外还有体积的扩大、重量的增加、放大器和压缩器的成本的增加。

几百，透射光谱宽度只要能将激光器的自身的光谱宽度通过即可，一般的反射镜都能达到。在脉冲重复频率倍增的同时，透过 FP腔的脉冲的平均功率也降低到了原先的 1/100，比如从原来的 250 mW 降低到了 2.5 mW，此时，因单脉冲能量降低到了原来的 1/10000，扩谱很难。也可以放大后再扩谱，比如从 2.5 mW 放大 100 倍，回到 250 mW，但此时的单脉冲能量只有原来的 1/100，相当于每个脉冲的能量为 10 pJ，所以还需要进一步放大。对于高重复频率激光器，高单脉冲能量意味着高平均功率，有两种基本的元件可以用来扩谱：一种是高非线性光纤或光子晶体光纤，光纤扩谱的优点是制作容易、和普通光纤兼容、耦合效率高，缺点是很容易因高平均功率而烧掉^[8]；第二种是高非线性波导，高非线性材料制成的波导，例如氮化铝 AlN^[9]、铌酸锂 LN^[10] 等，非线性系数非常高，可容许较低的脉冲能量扩谱，但是非线性系数高是因为折射率高，而折射率高的波导与普通石英光纤不兼容，耦合效率非常低，甚至只有 10%。

而采用第二种方式，后期基本上不消耗能源，激光器部分所需电功率不会超过 10 W，所以从能耗的角度来说，不推荐先滤波后扩谱的方式。

3.2 电光调制光梳

1980 年代末期，Haensh 采用电光调制的方法产生 72 GHz 的边带，以获得更宽的光频测量范围，但是单纯调制产生的边带不能满足更多更宽频率测量的需要。1993 年，时任东京工业大学教授的大津元一和他的助手兴铝元伸，将电光调制器放在一个 FP腔内，将 1550 nm 的激光调制出一种光谱带宽为 4 THz、频率间隔为 6.8 GHz 的光梳^[11]，简称电光梳（EO comb）。两年后，大津又采用 780 nm 半导体激光调制出电光梳，光谱展宽到 7.6 THz（16 nm）^[12]。现在一般奉兴铝元伸为电光梳

的发明人。

电光梳因光谱形状几乎为三角形，远不如几百 THz 的带宽和平坦的光谱的激光频率梳，在相当长的时间内销声匿迹了。随后出现的激光频率梳很快占据主流位置，当激光频率梳的频率间隔受到腔长的限制，不能满足大频率间隔的需求时，需要几十 GHz 频率间隔的高速光通讯光源和对梳齿进行逐根调制的任意脉冲发生器，因此，天文光梳，电光梳重新回到人们的视野。

美国国家标准局 (NIST) 研究人员把电光梳的频率间隔定格在了 30 GHz，被调制的激光器的波长定在 $1\ \mu\text{m}$ ^[13]。研究人员没有像天津那样把调制器放在腔内（因腔实在太短，放不下调制器），而是选用 3 个调制器串联调制。接下来的操作步骤与做激光天文光梳无异：放大、FP 腔滤波、放大、压缩、扩谱。中间怎么还有 FP 腔滤波？这是因为调制出来的光的梳齿有很大的“热噪声”，于是就得用 FP 腔再过滤一次，结果还是没逃脱“腔”的束缚。高重复频率锁模不容易做到，电光梳驱动用的 30 GHz 射频源的价格也不低，其占地面积为 $1.52\ \text{m} \times 0.6\ \text{m}$ 。

3.3 微腔光梳

微腔光梳在高速光通讯、高采样率光谱学、高速测距等方面显示出巨大潜力。自从十几年前“微腔光梳”被提出来，不少人就憧憬着用微腔做天文光梳，理由是：天然的大频率间隔，波长不受增益介质限制的无源腔结构，小巧而可集成。2019 年，国际上两个做微腔光梳的研究组，同时发表了其研制的微腔天文光梳定标测试结果^[14-15]。两个微腔的频率间隔均在 22 GHz 左右，波长均为 $1.5\ \mu\text{m}$ 左右。不同的是，一个采用连续光泵浦，一个采用脉冲光泵浦，泵浦用的脉冲光，实际上是一个电光梳，可使微腔内的孤子脉冲自启动和自锁定。这两种天文光梳的定标误差与激光天文光梳相比，还有很大的差距。

4 可见光天文光梳的挑战

微腔梳和电光梳都工作在近红外波段，特别是微腔光梳。其冠冕堂皇的理由是，银河系中的恒星，70% 都是 M-矮星，即偏冷而光谱偏红和偏红外的恒星。这背后的原因，是红外光梳比可见

光梳容易做，特别是微腔光梳。还有一个支撑条件，是他们的光谱仪感光成像器件可以探测 $1\ \mu\text{m}$ 以上的波长，而我国没有这个波段的光谱仪感光器件。

从科学上看，在和太阳相似的黄矮星光谱中，蓝光甚至紫外波段，金属的吸收谱线更多、更密，携带的信息更多，因此，做可见光甚至紫外天文光梳，更有意义。通过图 3 可知，目前只有激光天文光梳可做到可见光波段，只有 Yb 光纤激光梳可以扩展到 $400\ \text{nm}$ ^[8]。

对先扩谱、后滤波的激光梳来说，就是选择 4 个不同间隔的 FP 腔而已，而对于电光梳来说，意味着要做 4 个不同调制频率的电光梳。接下来的问题是，如何覆盖不同的光谱区间？如果选择四个不同的连续光做成电光梳，用什么放大？

对于微腔光梳，在片子上做几种频率间隔的微腔不算什么，问题和电光梳一样，如何将波长覆盖到这四个不同的光谱区间？做四个不同材质的微腔？用四个不同波长的可调谐稳频泵浦激光器？还是都从一个波长出发去放大和宽带扩谱，然后滤掉不需要的光谱？在这之前，四个微腔是否要自己先做成重复频率和初始频率锁定的光频梳？

所以，如果说激光梳还有两种选择，还可以在低平均功率、高脉冲能量下倍频和扩谱的话，频率间隔一步到位的电光梳和微腔梳，别无选择，只能面对艰辛的探索：扩谱后倍频，或倍频后扩谱。这一切都需要经过放大和脉冲压缩。这不仅使系统更加复杂，也对扩谱元件造成巨大压力。

在可见光波段，哈佛大学以钛宝石激光器为基础的天文光梳和某公司以 Yb 光纤激光器为基础的天文光梳是相对成功的例子。它们分别安置在欧南台坐落在西班牙的 HARPS North 和坐落在智利的 HARPS South。这两个天文光梳代表着两种技术路线的真实实践。

哈佛大学的先扩谱后滤波方案，虽然只有绿光到红光的 $120\ \text{nm}$ 带宽（因无法放大），在分辨力为 120000 的 HARPS 光谱仪上还够用^[16]。赫瑞瓦特大学也坚定地支持这个技术方案^[5]。

某公司的先滤波后扩谱的方案，把自己逼上低脉冲能量、高平均功率扩谱的艰难道路。即使

是 18 GHz 的频率间隔、几瓦的平均功率，也使其扩谱用拉锥光子晶体光纤不堪重负，不得不经常更换。

2011年起，北京大学电子学院研究组基于 1 GHz 掺镱光纤激光器的天文光梳，经过各种实验和理性分析，最终选择先扩谱后滤波的方案。该激光器直接输出功率在 600 mW 以上，可不用放大直接扩谱到可见光，精确设计和自己拉制的拉锥光子晶体光纤，使 500~900 nm 光谱强度波动在 3 dB 以内；精确设计的零色散啁啾镜对，保证宽带滤波。把光谱仪感光区间分为两个频段，频率间隔分别设为 45 GHz 和 30 GHz，可保证天文光梳在全波段维持高信噪比并工作在最佳频率间隔。针对固定间距被动腔长期稳定性问题，北京大学电子学院研究组还提出了采用真空和温控的固定间隔超稳腔滤波的方案，并在国家天文台兴隆站进行了测试实验^[17]。结果表明，真空 FP 腔的长期漂移对视向速度误差的影响小于 0.3 cm/s，还可以避免每次开机时复杂的初始准直程序。

为了保证天文光梳能长期稳定远程工作，北京大学电子学院研究组还研制了一种集成在玻璃上的重复频率为 1 GHz 的掺镱光纤飞秒激光器，时间抖动达阿秒量级，长期稳定性远超过机械结构的激光器^[18]。

5 总结与展望

综上所述，对于天文光梳，特别是对可见光天文光梳来说，一步到位地把频率间隔提高到数十 GHz 也许不是聪明的主意。电光梳和微腔梳是高重复频率脉冲发生器，并不能解决激光频率梳遇到的工作波长、光谱带宽和光谱平坦化的难题。这些问题不是新的科学问题，而是和做高重复频率激光脉冲扩谱相似的老问题，即如何实现宽带倍频，用何种介质和结构实现可见光到紫外的扩谱。不同的是，微腔光梳还叠加上了自身如何锁定成真正的光频梳这个核心难题。

随着天文光梳技术的发展，各种技术也在竞争中不断进步。本文并未讨论光谱平坦化问题，但是最近出现了片上大动态范围光调制器阵列做成的光谱平坦化器件^[19]，向光梳集成化迈进了一步。随着材料科学的发展和集成光子学器件的进

步，扩谱问题会得到解决。无论用哪种技术，我们都期待着满足我国天文光谱仪需求的天文光梳尽快出现，为解决天体物理学中的重要科学问题，提供可靠的工具。

参考文献

- [1] KASTING J F, WHITMIRE D P, REYNOLDS R T. Habitable zones around main sequence stars [J]. *Icarus*, 1993, 101: 108-128.
- [2] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star [J]. *Nature*, 1995, 378(6555): 355-359.
- [3] MURPHY M T, UDEM T, HOLZWARTH R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380: 839-847.
- [4] WILKEN T, CURTO LO G, PROBST R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level [J]. *Nature*, 2012, 485: 611-614.
- [5] CHARSELEYA J M, MCCRACKENA R A, REID D T, et al. Comparison of astrophysical laser frequency combs with respect to the requirements of HIRES [J]. *Optical measurement systems for industrial inspection X*, 2017: 103290Y.
- [6] HERR T, MCCRACKEN R A. Astrocombs: recent advances [J]. *IEEE Photonic technology Letters*, 2019, 31: 1890-1893.
- [7] MA Y, ZUO L, MENG F, et al. A compact 30 GHz spaced astro-comb based on 1 GHz Yb: fiber laser [C]// *Lasers & Electro-optics. IEEE*, 2016.
- [8] PROBST R A, CURTO G LO, AVILA G, et al. Relative stability of two laser frequency combs for routine operation on HARPS and FOCES [C]// *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. International Society for Optics and Photonics*, 2016.
- [9] LIU X, BRUCH A W, LU J, et al. Beyond 100 THz-spanning ultraviolet frequency combs in a non-centrosymmetric crystalline waveguide [J]. *Nature communication*, 2019, 10: 2971.
- [10] WU T H, LEDEZMA L, FREDRICK C, et al. Ultraviolet to near-infrared frequency comb generation in lithium niobate nanophotonic waveguides with chirped poling [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2022.
- [11] KOUROGI M, NAKAGAWA K, OHTSU M. Wide-span

- optical frequency comb generator for accurate optical difference measurement[J]. IEEE J quantum electron, 1993, 29(10): 2693-2701.
- [12] KOUROGI M, WIDIYATOMOKO B. Limit of optical-frequency comb generation due to material dispersion[J]. IEEE journal of quantum electronics, 1995, 31(12): 2120-2126.
- [13] METCALF A J, ANDERSON T, BENDER C F, et al. Stellar spectroscopy in the near-infrared with a laser frequency comb[J]. Optica, 2019, 6: 233-239.
- [14] SUH M G, YI X, LAI Y H, et al. Searching for exoplanets using a microresonator astrocomb[J]. Physics optics, 2019, 13: 25-30.
- [15] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. A microphotonic astrocomb [J]. Nature photonics, 2019, 13: 31-35.
- [16] LI C H, GLENDAY A G, PHILLIPS D F, et al. Green astro-comb for HARPS-N [C]. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering, 2012, 8446.
- [17] MA Y, MENG F, LIU Y, et al. Visible astro-comb filtered by a passively stabilized Fabry-Perot cavity[J]. Review of scientific instruments, 2019, 90: 13102.
- [18] YANG R, ZHAO M, JIN X, et al. Attosecond timing jitter from high repetition rate femtosecond "solid-state fiber lasers"[J]. Optica, 2022, 9: 874-877.
- [19] JOVANOVIĆ N, GATKINE P, SHEN B, et al. Flattening laser frequency comb spectra with a high dynamic range, broadband spectral shaper on-a-chip [J]. Optica express, 2022, 30: 36745-36760.

(本文编辑:朱俊真)



第一作者: 张志刚 (1955—), 教授, 主要研究领域为高重复频率光纤飞秒激光器的频率梳技术、光纤远距离频率传输和时间同步技术、时域脉冲相干合成技术等。

1982年与1984年在北京工业大学分获理学学士和硕士学位, 1992年在澳大利亚MONASH大学获理学博士学位。教育部首批“长江学者奖励计划特聘教授”。历任北京工业大学讲师、日本国财团法人产业创造研究所客员研究员、日本国经济产业省新能源产业技术综合研究机构NEDO Fellow、天津大学教授。曾在麻省理工学院、法国傅立叶大学、日本国北海道大学、电气通信大学做过访问教授。曾获教育部和国家科技进步奖。目前主持国家自然科学基金重点项目、联合基金重点支持项目及国际合作项目。