

高功率中红外单频连续光参量振荡器 (OPO) ——

SpectroStar

Guenter Hummel t

(德国 Elektronik Laser System GmbH 公司)

张志伟

(北京晨辉日升光电技术有限公司, 北京, 100102)

摘要: 本文介绍了 OPO 的发展过程以及世界首台商品化高功率中红外 (2-5 微米) 单频连续 OPO 的工作原理、技术细节等。

1. 综述:

近 40 年来, 光学参量振荡器 (OPO) 被认为是获得传统激光器所达不到的光谱范围内的相干光的理想光源。一台 OPO 就可以在非常宽的光谱范围中获得连续可调谐的输出, 同时 OPO 具有全固态设计、高效率 and 具有可观的输出功率等优点, 而且从时间域上 OPO 可以连续输出或者输出诸如飞秒等超短脉冲。

OPO 的性能参数几乎完全依赖于泵浦激光器的光谱特性 (是否为单频) 和光束质量, 以及非线性晶体的特性。自从 1965 年第一台原理样机演示以来, 直至许多年以后 OPO 才进入实用化。这主要是由于缺少具有足够的相干性和在所需要的光谱区内具有相当光强的泵浦激光器, 同时缺少具有良好的光学性能和高破坏阈值的非线性晶体。直到二十世纪八十年代, 一大批性能优良的非线性晶体涌现出来, 如 BBO、LBO、KTP 等。它们的破坏阈值远远超过原来的非线性材料而且具有非常好的非线性性能, 从而使对 OPO 的研究再次风靡起来。几乎在同一时间, 市场上出现了光谱和空间相干性都得到了提高的泵浦激光器, 也使 OPO 的输出功率大大提高。最近出现的准相位匹配非线性晶体 PPLN 使 OPO 对泵浦激光器的功率要求大大降低, 从而真正使 OPO 从实验室走向实际应用。而且 OPO 的工作范畴也从以前的有限的谱段和时间域扩展为: 谱段从近紫外 (near-UV) 到中红外 (mid-IR); 时间域从连续 (CW) 到超快飞秒。从目前激光器发展情况看, 中红外谱段的相干光源还是要依赖于 OPO (采用 PPLN 晶体)。

从工作谱段和时间域来看, 脉冲 (ns) 和锁模 (ps/fs) 的 OPO 市场已经有很多成型的产品, 但中红外 (2-5 μm) 的连续 OPO 一直困扰着广大科研人员。随着 PPLN 晶体和高功率单频近红外固体激光器的出现, 市场上已经出现了一种高功率中红外单频连续光参量振荡器 (OPO) —— SpectroStar, 非常适合于中红外高分辨率光谱, 如大气科学中的痕量气体分析, 光声光谱, 废气检测, 机载大范围陆地和海洋污染探测, 大气污染分析等。

2. 工作原理

在典型的 OPO 中, 一台频率固定或可调的泵浦激光器的泵浦光被转换成两个具有新的不同的可调频率的光, 这个转换一定要满足能量守恒和相位匹配的条件。具有较高能量的光被称为信号光 (signal), 而另一束则被称为闲置光 (idler)。

对于低功率泵浦激光器而言，可以选择泵浦增强、双谐振腔或三谐振腔的 OPO，因为它的非线性转换过程可以通过单个或多个谐振腔中的光束共振而得到增强。这种结构的优点是振荡阈值大大降低，OPO 可以工作在毫瓦量级。而主要缺点是调谐范围有限，因为在 OPO 的调谐过程中不仅仅是一个，而是两个、三个频率要与 OPO 的腔长频率保持一致。此外，闲置光的低功率输出也限制了它的应用。

准相位匹配非线性晶体 PPLN 和高功率泵浦激光器（几十瓦）的出现使单谐振腔 OPO 真正进入实用化阶段，由此带来的最大优点是可以非常容易地实现宽带调谐，因为 OPO 只需与一个波长保持谐振。如果泵浦激光器是一台高功率单频可调谐的固体激光器，则 OPO 输出的 idler 信号可以在很宽的波段范围内调谐。前不久，德国 ELS 公司推出了一款可以在 2-5 μm 范围内调谐的商品化 OPO——SpectroStar。它由一台高功率单频 Yb:YAG 固体激光器(>20W) VersaDisk 1030-20 SF 泵浦，通过该激光器在 1024-1034nm 范围内调谐，SpectroStar 就可以在 2-5 μm 内调谐，并在 2.954 μm 处输出高达 3W 的功率！

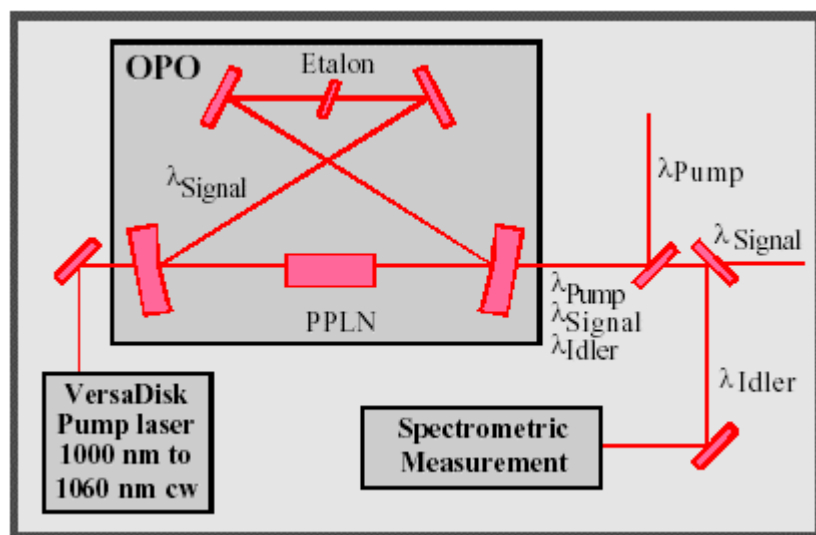


图 1 SpectroStar 的系统结构图

泵浦激光器 VersaDisk 1030-20SF 是一台采用 Yb:YAG 作为激光介质的薄片式固体激光器，Yb:YAG 薄片的厚度为 240 μm ，直径为 10mm。输出功率为单频（线宽 < 5MHz）20W，横模模式为 TEM₀₀，而且波长可以在 1024-1034nm 之间调谐。

光参量振荡器（OPO）SpectroStar 是单谐振腔振荡器（SRO），腔型采用经过实践证明的工作非常稳定的环形腔，环形腔结构使 SpectroStar 对外界影响不敏感（如由于振动、冲击或突然的温度变化带来的谐振腔失调），所以可以在非常苛刻的环境中可靠的工作。SpectroStar 的晶体材料为 PPLN，为了提高转换效率，在整个 2-5 μm 调谐波段中使用 2 块 PPLN 晶体，一块的调谐范围是 2-4 μm ，另一块的调谐范围是 3-5 μm 。即使在 PPLN 工作范围的边缘（4-5 μm ），由于其效率下降，VersaDisk 的高功率也能给予补偿。

SpectroStar 和 VersaDisk 是一对理想的搭档，如 VersaDisk 可以输出 50W 的单频功率和小于 5MHz 的线宽，而且 VersaDisk 的波长可以从 1000nm 到 1060nm 中选择。用频率稳定的 VersaDisk 作为泵浦源，SpectroStar 的线宽小于 $5 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$

(15MHz), 这对于许多高分辨率光谱实验是非常理想的。借助于附加的扫描电子系统, 可以使 SpectroStar 在 5cm^{-1} (150GHz) 范围内实现单纵模输出而没有跳模



图 2 SpectroStar 系统配置图

由于 OPO 本身是一个无源器件, 所以它的性能主要取决于泵浦激光器的性能和参数。SpectroStar 的输出功率取决于泵浦的 VersaDisk 激光器的输出功率, 而线宽和扫描的连续性则主要取决于扫描电子系统和它的频率稳定性。

3. 输出功率

由于 SpectroStar 的用途是作为一个高功率的宽带可调谐中红外光源, 因此如何获得尽可能高的闲置光输出功率就显得尤为重要。为此, SpectroStar 的四块腔镜 (2 块平面镜, 2 块曲面镜) 的镀膜都是对信号光高反而对泵浦光高透的, 而对闲置光的反射率则作为一个自由的参数 (估计在 10%-20% 左右)。PPLN 晶体的入射和出射表面都镀的是对泵浦光、信号光和闲置光的减反射膜。

为了保证 SpectroStar 是单频输出, 除了它本身采用环形腔结构、泵浦源采用单频激光器外, 在它的腔内还放入了一块未镀膜的标准具来增强它的单频特性。

如图 2 所示, 整个 SpectroStar 系统是一个模块化结构。如果泵浦激光器选择 VersaDisk 1030-20 SF (20W 单频), 则在 $2.954\mu\text{m}$ 处可以获得大于 3W 的输出。这是迄今为止世界上报道的 PPLN OPO 获得的最高的单频连续功率 (图 3)。

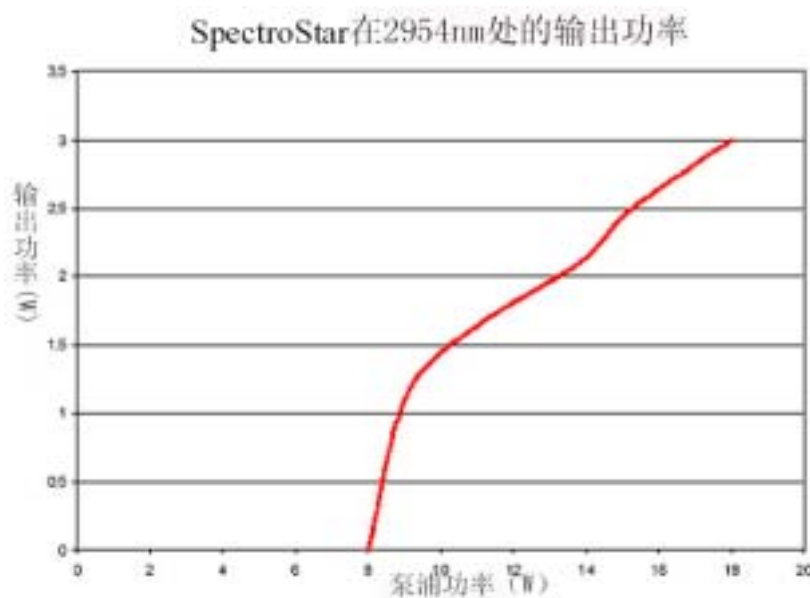


图 3 SpectroStar 的泵浦光与输出功率的关系曲线

4. 可以在 $4\text{-}5\mu\text{m}$ 之间工作的 OPO

由于有许多实验样品的吸收峰都大于 $4\mu\text{m}$, 所以任何把 OPO 的可调谐范围拓展到长于 $4\mu\text{m}$ 就成了非常重要的问题, 并引起了广大科研工作者的浓厚兴趣。从前使用铌酸锂晶体的连续波 OPO 要实现长于 $3.9\mu\text{m}$ 的输出非常困难, 因为铌

酸锂在长波的吸收非常大。所以采用 PPLN 晶体的 OPO 的出现再次激起了人们的兴趣,因为在此以前在该波段还没有具有可观输出功率的宽带可调谐单频连续光源。

由于泵浦激光器的宽带可调谐性和具有 8 个极化周期的 PPLN 晶体的完美结合,可以轻松实现 3.3 μm 到 4.6 μm 的输出。图 4 给出的是用 11.5W 泵浦功率时 SpectroStar 的输出功率。

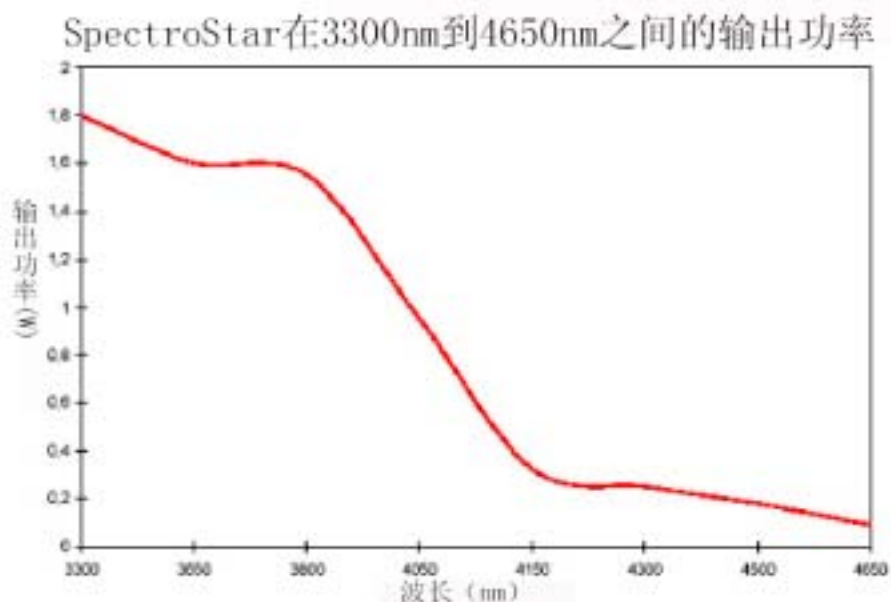


图 4 SpectroStar 在 3.3 μm 到 4.6 μm 的调谐曲线 (11.5W 泵浦功率)

正如预计的那样, SpectroStar 的输出功率在波长大于 3.9 μm 时下降的很快。在 3.8 μm 处的输出功率是 1.5W,而在 4.66 μm 处为 90mW,这是由于 OPO 的振荡阈值从 3.5W 增加到 7.5W。而当泵浦激光器在满功率下 (20W) 工作时,在 4.235 μm 就可以产生 200mW 的输出功率。

5. 结论:

Yb:YAG 激光器 VersaDisk 1030 被证实是非常适合于用来泵浦 2-5 μm 的宽带可调谐连续 OPO。VersaDisk1030 最主要的优点是它有非常高的输出功率,从而可以得到非常高的 OPO 闲置光输出功率。此外, VersaDisk 1030 的宽带可调谐性可以使 OPO 的调谐非常容易,用户只需调节 OPO 腔内标准具或 PPLN 晶体的温度,而这些都是由扫描电子控制系统自动完成的。

由于泵浦激光器 VersaDisk1030 采用 Yb:YAG 作为激光晶体,可以在 1000-1060nm 进行选择波长调谐,所以 SpectroStar 的调谐可以只依靠 VersaDisk1030 的调谐来实现。精心设计的扫描电子系统同时控制 VersaDisk1030 的标准具、双折射滤光片和 SpectroStar 的标准具及 PPLN 晶体温度(角度),从而实现自动宽波段连续调谐。此外,由于该系统采用模块化设计,用户可以根据自己的科研工作对功率的要求来选择不同功率的泵浦激光器 VersaDisk1030,从而得到最佳输出。

SpectroStar 在工作时,可以先调节到所需要的波长(粗调),然后通过手动或者自动调节 VersaDisk 1030 (泵浦激光器)来在 5 cm^{-1} 或者 150GHz 范围内精调。如果需要调节到下一个波长,可以通过调节 PPLN 晶体的温度或角度(两种方法均可)来实现。

在实验中，需要一台波长计或光谱分析仪来测量泵浦光或 SpectroStar 的波长。如果泵浦光的波长固定的话，那么 SpectroStar 的波长可以通过 PPLN 晶体的周期数和它的温度得出（图 5）。

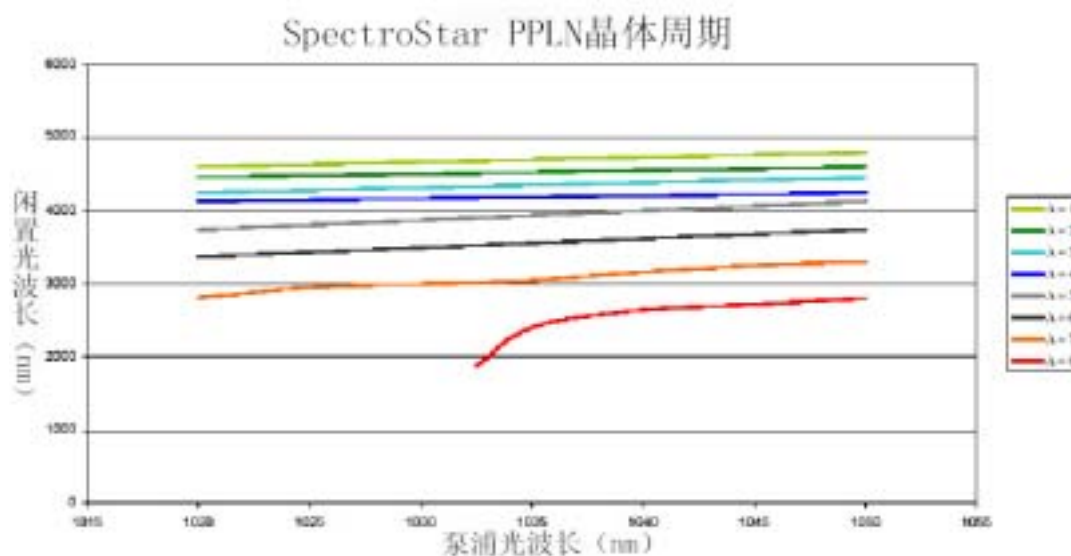


图 5 泵浦波长与 SpectroStar 的输出波长的关系曲线

SpectroStar 的主要应用领域是中红外高分辨率光谱，它的工作波长范围是 2-5 μm ，整个范围需要 2 块 PPLN 晶体（2-4 μm 和 3-5 μm ）和多套腔镜，在这一点上就象一台染料激光器。因此，配有一块 PPLN 晶体和一套腔镜的 SpectroStar 的实际工作波段范围是 750nm 左右，要远大于高分辨率染料激光器的工作范围（100nm），而这对于一个特定分子来说已经足够了。

作者介绍：

张志伟 博士
北京晨辉日升光电技术有限公司
地址：北京市朝阳区望京新城 422 楼 806 室
邮编：100102
电话：010-84718152；传真：010-64740680
手机：13901104240
网址：www.bjlaser.com
Email:zzw512@vip.sina.com