

正电子偶素($o-Ps$)寿命困惑及其最终解决*

刘峰 吴建达 占亮 叶邦角[†]

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 正电子偶素 $o-Ps$ 是由电子和正电子组成的纯轻子束缚系统, $o-Ps$ 在真空中的寿命可由量子电动力学进行精确的理论计算,但长期以来理论值和实验测量值之间存在较大的偏差,为了解决这一问题,理论和实验物理学经过长期共同努力,最终于近年解决了 $o-Ps$ 寿命困惑. 文章简要介绍了正电子偶素 $o-Ps$ 寿命理论值和实验值之间不一致的历史状况和最近的实验技术的改进以及该问题的最终解决情况,并重点介绍了 Tokyo 实验组和 Michigan 实验组的最新结果.

关键词 正电子, 正电子偶素, 寿命, 量子电动力学

The orthopositronium lifetime puzzle and its final solution

LIU Feng WU Jian-Da ZHAN Liang YE Bang-Jiao[†]

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract The ortho-positronium ($o-Ps$), which consists of an electron and positron, is a pure lepton bound system. The $o-Ps$ lifetime can be calculated accurately by quantum electrodynamics, but there is a long-standing discrepancy between the theoretical calculations and the experimental results. Theoretical and experimental physicists have worked hard for a long time to solve the problem, and recently finally solved this lifetime puzzle. We briefly outline the discrepancy between the theoretical calculations of the $o-Ps$ annihilation decay rate and some of the experimental measurements, as well as recent developments of experimental techniques, and its final solution. In particular, the final results of the Tokyo and Michigan groups are discussed.

Key words positron, positronium, lifetime, QED

Dirac 在提出他的相对论性量子力学时,发现 Dirac 方程存在负能解,并于 1930 年预言了正电子的存在. 1932 年美国物理学家 Anderson 在云室中拍摄到宇宙线产生的正电子的照片,从而从实验上证实了正电子的存在. 正电子是一种自旋及质量与电子相同但带有与电子等量异号电荷的轻子. 之后, Mohorovičić 设想如果氢原子中的原子核被正电子代替,能形成一种类似氢原子的束缚体系,并称之为电子偶素.

电子偶素(positronium,以后简记为 Ps)由 Mohorovičić 在 1934 年作出预言,并由 Martin Deutsch 在 1951 年发现. Ps 是由正电子和电子形成的类氢束缚态. 由于电子和正电子的自旋都是 $1/2$,当它们的自旋平行时,总自旋角动量为 1,构成三重态 3S_1 ,即为正电子偶素(ortho-positronium,简记为

$o-Ps$),而当它们的自旋反平行时,总自旋角动量为 0,构成单态 1S_0 ,即为所谓的仲电子偶素(para-positronium,简记为 $p-Ps$). 由于正反粒子间存在湮没效应,所以 $p-Ps$ 和 $o-Ps$ 都是不稳定的,它们的寿命约为 $125ps$ 和 $142ns$,会很快衰变成 γ 光子. 实验中正是通过探测 γ 光子来实现对 $p-Ps$ 和 $o-Ps$ 的寿命的测量. 由于正电子偶素是纯轻子系统,可以由量子电动力学(QED)进行精确计算,测量其寿命可以实现对 QED 的检验. 历史上对 $p-Ps$ 寿命的测量与理论值没有产生矛盾,而对 $o-Ps$ 寿命的测量却经历了一个颇为曲折的过程.

* 中国科学院创新基金资助项目

2003-09-17 收到初稿 2004-02-18 修回

[†] 通讯联系人. E-mail: bjiye@ustc.edu.cn

1 o - Ps 寿命困惑

1.1 QED 对 o - Ps 寿命的精确计算

根据 QED 理论 o - Ps 的衰变率(即为寿命的倒数)为

$$\Gamma = \left\{ 1 + A \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\alpha^2}{3} \ln \alpha + B \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^2 - \frac{3\alpha^3}{2\pi} \ln^2 \alpha + C \frac{\alpha^3}{\pi} \ln \alpha + D \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^3 + \dots \right\} \Gamma_0,$$

其中:

$$\Gamma_0 = \frac{2}{9} (\pi^2 - 9) \frac{m\alpha^6}{\pi} = 7.2111670(1) \mu s^{-1}.$$

Γ_0 是由 Ore 和 Powell 在 1949 年根据 QED 所计算出的 o - Ps 衰变率的最低阶结果^[1]. 其中 $A = -10.286606$ 是 α 的一阶修正系数, $\alpha^2 \ln \alpha$ 项是由 Caswell 和 Lepage 在 1979 年给出^[2], $\alpha^3 \ln^2 \alpha$ 项是由 Karshenboim 等人在 1993 年给出^[3] (α/π)² 项有两部分: 来自五光子 $0.187(11)^{[4,5]}$ 和三光子衰变的贡献. 新近的关于三光子衰变的结果是: $44.86(26)^{[6]}$. 而 (α^3/π) $\ln \alpha$ 项的系数 $C = A/3 - 229/30 + 8 \ln 2 = 5.517^{[7-9]}$.

各项对 Γ 的贡献列表如下:

表 1 各项的数值结果

各项	数值(μs^{-1})
1	7.211167
$A(\alpha/\pi)$	-0.172303
$\alpha^2 \ln \alpha / 3$	-0.000630
$B(\alpha/\pi)^2$	0.001753(11)
$-3\alpha^3 \ln^2 \alpha / 2\pi$	-0.000032
$C\alpha^3 \ln \alpha / \pi$	0.000024
$D(\alpha/\pi)^3$	0.00000009D
总和	7.039979(11) + 0.00000009D

Γ 的计算公式中的 D 目前还无法计算出结果. 从表 1 中可以看出, 高阶项收敛性很好, 例如, (α/π) 与 $(\alpha/\pi)^2$, $(\alpha^2 \ln \alpha / 3)$ 与 $(\alpha/\pi)^2$ 的比值分别为: $|A/1| \alpha/\pi = 0.023$; $|B/A| \alpha/\pi = 0.010$. 按照这种趋势, 假设 $|D/B| \alpha/\pi = 0.010$, 那么 $D = 192$, 则该项的贡献为: $D(\alpha/\pi)^3 \Gamma_0 = 0.000017 \mu s^{-1}$. 即使把 D 扩大 10 倍, 其值也远小于现在的实验误差. 于是最终结果为

$$\Gamma = 7.039979(11) \mu s^{-1} (1.6 \text{ ppm}).$$

1.2 o - Ps 寿命困惑

为了对 QED 的理论计算进行检验, 很多实验组

精确测量了 o - Ps 的衰变率. 表 2 列出了近几十年来 o - Ps 衰变率的实验值.

表 2 近几十年 λ_0 的测量值

年份	衰变率 ($1/\mu s$)	类型	作者	参考文献
1968	7.29(3)	气体	Beers, Hughes	[10]
1973	7.275(15)	气体	Hughes	[11]
1973	7.262(15)	气体	Coleman, Griffith	[12]
1976	7.104(6)	粉末	Gidley, Marko, Rich	[13]
1976	7.09(2)	真空	Gidley, Zitzewitz, Marko et al.	[14]
1977	7.058(15)	气体	Griffith, Heyland	[15]
1978	7.122(12)	真空	Canter, Clark, Rosenberg	[16]
1978	7.056(7)	气体	Gidley, Rich, Zitzewitz et al.	[17]
1978	7.067(21)	粉末	Gidley, Rich, Zitzewitz et al.	[17]
1978	7.050(13)	真空	Gidley, Zitzewitz	[18]
1978	7.045(6)	气体	Griffith, Heyland, Lines et al.	[19]
1982	7.051(5)	气体	Gidley, Rich, Sweetman et al.	[20]
1987	7.031(7)	真空	Hasbach, Hilkert, Klempt et al.	[21]
1989	7.0514(14)	气体	Westbrook, Gidley, Conti et al.	[22, 23]
1990	7.0482(16)	真空	Nico, Gidley, Rich et al.	[24]
1995	7.0398(29)	粉末	Asai, Orito, Shinohara	[25]

从表 2 可以看出, 1968 年至 1990 年间的实验主要采用了缓冲气体和真空技术的方法. 其中气体方法的最精确测量值是 $\lambda_0 = 7.0514(14) \mu s^{-1}$ (200ppm), 比理论值高 1400ppm, 而用真空方法测量的最精确值是 $\lambda_0 = 7.0482(16) \mu s^{-1}$ (230ppm), 比理论值高 1200ppm, 都比理论值明显偏大, 这就是所谓的 o - Ps 寿命困惑. 为了解释实验值比理论值偏大, 很多人做各种实验寻找 o - Ps 非 QED 衰变过程(例如轴矢, C - odd 的玻色子系统、禁戒光子数衰变等各种过程), 但先后都被各个实验所否定.

2 o - Ps 寿命问题的最终解决

由上述的非 QED 的假设被实验否定来看, 我们应回到解决实验的精度问题上来. 在 1995 年 Tokyo 实验以前的所有实验中, 都假设了 o - Ps 已经完全热化并保持恒定速度(而实际上这个假设包含严重的系统误差^[25, 26]), 同时又简单地认为 o - Ps 与材料物质的碰撞归结为刚体间的碰撞, 而忽略了二者间的复杂的相互作用过程, 导致了 1995 年以前的实验值与理论值之间的较大偏离.

2.1 Tokyo 实验

1995 年 Tokyo 大学的 Asai ,Orito ,Shinohara 等人^[25]采取了有异于前述实验方法的新的技术,克服了以上所提到的不必要的系统误差.下面扼要介绍 1995 年 Asai 等人的实验方法.其实验装置如图 1 所示.活度为 20mCi 的²²Na 正电子源被夹在两个塑料闪烁体之间.²²Na 源由一镀铝的聚脂薄膜锥体支撑着且被置于一玻璃制的真空容器中央.该容器由密度为 0.03g/cm³、颗粒直径为 7nm 的二氧化硅粉末所填充.大部分的正电子穿过闪烁体后在二氧化硅的纳米颗粒中形成 Ps.

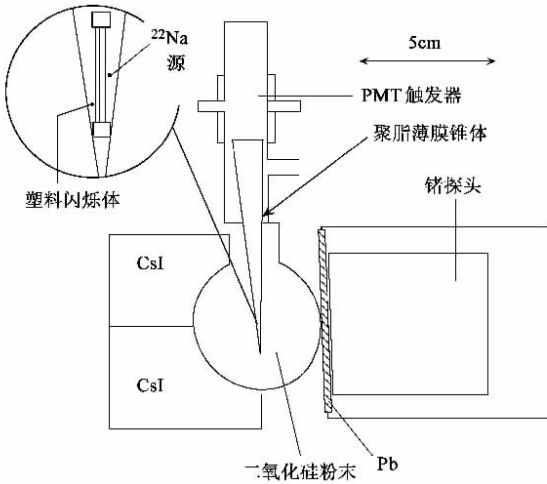


图 1 实验装置(圆形内为箭头所在区域的放大图像)

o - Ps 衰变放出的光子的能量及时间信号由四个 CsI(Tl)闪烁体和半导体锗探头进行测量.在测量中厚为 2.08mm 的铅片被置于锗探测器前,以阻止来自 3γ 衰变中的两个低能光子同时撞击在锗探测器上对测量产生影响.

实验中测得的能谱由两部分构成:3γ 能谱和 Pick off 湮没谱.从能谱中能够求出 3γ 湮没和 Pick off 湮没的比例,从而在实验测得时间谱中剔除 Pick off 衰变的影响,求得 3γ 衰变的衰变率:

$$\lambda_0 = 7.0398 \pm 0.0025(\text{统计误差}) \pm 0.0015(\text{系统误差}) \mu\text{s}^{-1}.$$

这个值与理论值已相当接近,为了得到更好的结果, Tokyo 大学实验组在以后的几年中认真分析了 1995 年实验中的问题:

- (1)精度只有 350ppm,比以前其余的同类实验的误差大;
- (2)在起始信号 200ns 以前存在未知的系统误差(所以扣除此因素,最后的数据是在 220ns 后获得的);

(3)没有估计 Stark 效应引起的系统误差.

考虑这些因素之后,该实验组于 2001 年对实验设备进行全面的更新^[27],并于 2003 年^[28]得到最后与理论值符合得很好的结果.图 2 即为更新后的实验设备.

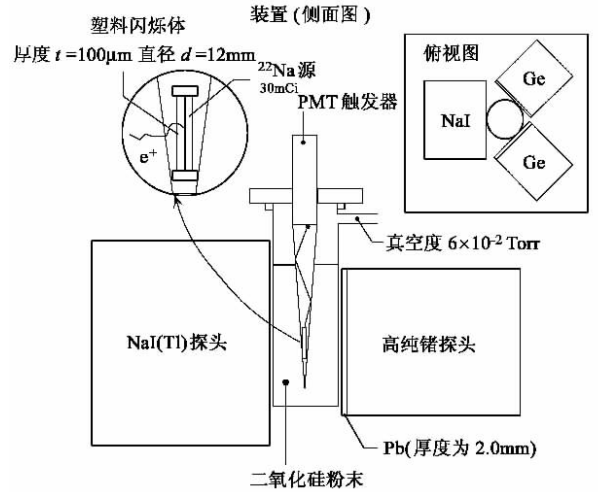


图 2 实验装置(圆形内为箭头所在区域的放大图像)

该实验装置的整体结构与 1995 年相似,在实验设备的性能方面有了很大的提高.具体采用了四个高性能的 NaI(Tl)闪烁体探头和两个高纯锗探头,并且使用了先进的电子学设备,其在测量时间方面的精度有了很大的提高.

经过对两种不同类型的二氧化硅粉末进行长达 6 个月的实验,得到了 o - Ps 3γ 衰变的衰变率:

$$\lambda_0 = 7.0396 \pm 0.0012(\text{统计误差}) \pm 0.0011(\text{系统误差}) \mu\text{s}^{-1}.$$

该结果和该实验组 1995 年的结果一致,并将精度提高了 2 倍,也和 QED 的预言一致.

2.2 Michigan 实验

Michigan 大学的正电子实验组对 o - Ps 寿命进行了长期的测量,在 1989 年和 1990 年, Gidley 等人^[23,24]分别用气体和真空方法测得了 λ₀ 的相当精确的值.1990 年的真空实验用慢正电子束进入一个被抽真空的铝盒内,在铝盒内表面上的 MgO 粉末层内形成 o - Ps.铝盒的作用是把 Ps 限制在一个探测器的探测效率均匀的小区域内. MgO 粉末的作用是减小 Ps 与铝盒内壁碰撞发生 Pick off 湮没的几率.其实验装置如图 3 所示.

活度为 50mCi 的²²Na 作为正电子源放射出的正电子被减速剂减速后,投射到 Ni 箔上再次被减速,传输进入铝盒.当正电子打到 Ni 箔上时,会放射

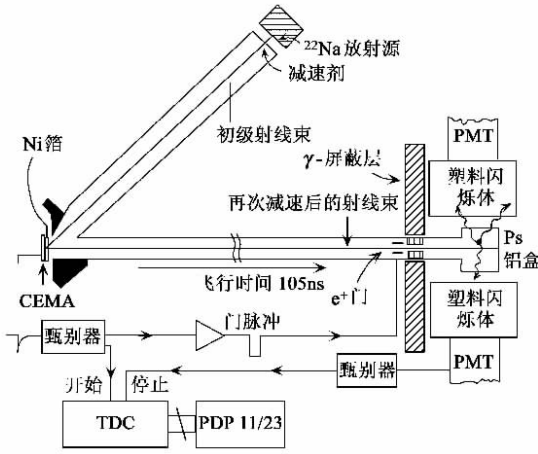


图3 1990年Michigan真空实验装置

出次级电子,其中15%会被探测到,作为TDC起始信号,触发门控脉冲产生器,打开正电子门让正电子进入铝盒。铝盒内的正电子束以700eV的能量进入MgO粉末层内,其中25%形成o-Ps,最后衰变成γ光子,被铝盒外的两个快塑料闪烁体探测到作为TDC停止信号。每个闪烁体通过两个光导与两个光电倍增管相连,四个光电倍增管的输出信号一起输出增强停止信号。开始信号与停止信号之间的时间差在0—2μs间的事件被记录下来,得到湮灭寿命谱。

实验中得到o-Ps的真空衰变率 $\lambda_0 = 7.0482 \pm 0.0016 \mu\text{s}^{-1}$ (230ppm)。这个测量值与该实验组在1989年用气体法测得的 $\lambda_0 = 7.0514(14) \mu\text{s}^{-1}$ (200ppm)符合得比较好,但是依然比理论值高1200ppm。

Michigan实验组在看到了日本东京大学实验组1995年的文章以后,对1990年的实验进行了认真的分析,改进了实验装置。1990年的实验的缺点是高能背散射o-Ps从入射小孔逃逸出去及与铝盒内壁发生Pick off湮没会使测量的 λ 比o-Ps的真空衰变率 λ_0 大,而采用外推法来消除以上影响会带来很大的误差。Michigan实验组采用的措施有:把入射正电子束能量由700eV改为在很宽的范围内(1—5keV)可调,减小背散射产生的o-Ps与总o-Ps的比率;Ps形成介质改用多孔硅,使Ps热化,减小Ps运动速度;铝盒重新设计为两室空腔(具体结构如图4所示)。这样Ps从入射小孔逃逸出去及与铝盒内壁碰撞发生Pick off湮没的几率就很小,可以忽略,而不必像1990年那样用外推法。

最后得到o-Ps衰变率的最新测量结果为: $\lambda_0 = 7.0404(10)(8) \mu\text{s}^{-1}$ [29],此值与东京大学所测

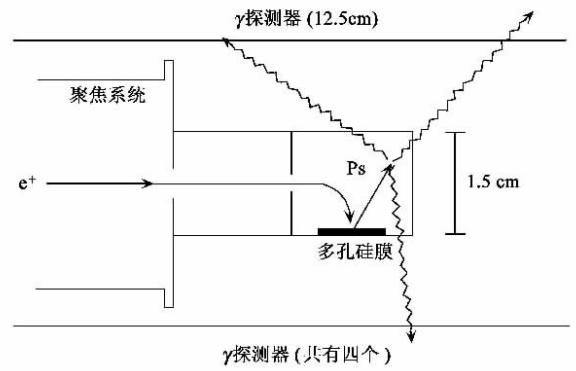


图4 改进后的两室空腔

得的结果及理论值都符合得很好。至此o-Ps寿命困惑获得解决。

3 结束语

图5绘出了近30年来实验值在理论值附近的波动情况。图中竖直的长黑线即为理论值,每一点代表了各年的测量值,与点相连的线段对应于误差棒。从图中可以明显看出,实验值与理论值从开始的不一致到最后与理论值完全符合的过程,也间接反映出近几十年为了解决o-Ps寿命困惑而在实验技术和实验方法方面的不断改进的过程。

o-Ps寿命困惑的最终解决主要是Tokyo大学实验组及Michigan大学实验组长期不懈努力的结果,而该结果无疑是又一次对QED的有力支持。作为纯轻子系统的正电子偶素,是研究材料微米纳米

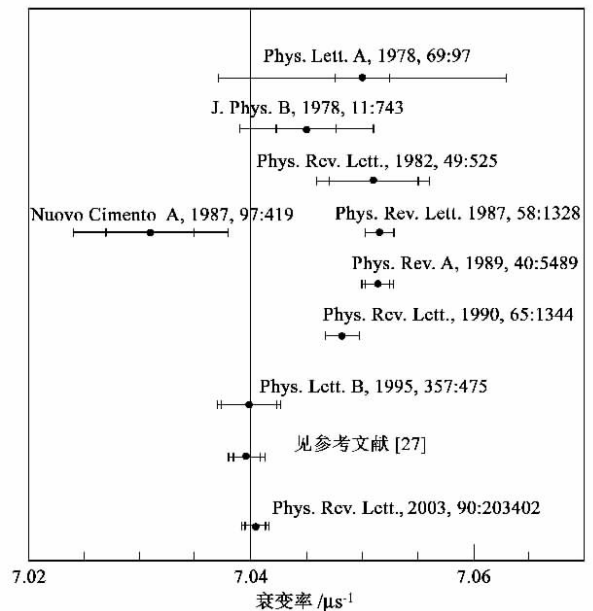


图5 主要实验结果与理论值的比较

结构的有力探针,具有其他手段不可替代的优点, ρ -Ps 寿命困惑的解决及对其寿命的精确测量将对材料的微观结构性能的研究产生积极的影响。

参 考 文 献

[1] Ore A , Powell J L. Phys. Rev. ,1949 75 :1696
 [2] Caswell W E , Lepage G P. Phys. Rev. A ,1979 20 :36
 [3] Karshenboim S G. Zh. Eksp. Teor. Fiz. ,1993 103 :1105
 [4] Adkins G S , Brown F R. Phys. Rev. A ,1983 28 :1164
 [5] Lepage G P , Mackenzie P B , Streng K H *et al.* Phys. Rev. A ,1983 28 :3090
 [6] Adkins G S , Fell R N , Sapirstein J. Phys. Rev. Lett. ,2000 , 84 :5086
 [7] Hill R , Lepage G P. hep - ph/0003277
 [8] Kniehl B A , Penin A A. hep - ph/0004267
 [9] Melnikov K , Yelkhovsky A. hep - ph/0008099
 [10] Beers R H , Hughes V W. Bull. Am. Phys. Soc. ,1968 13 : 633
 [11] Hughes V W. Physik 1973 , Plenarvortrag Physikertagung 37th. Weinheim :Physik Verlag ,1973. 123
 [12] Coleman P G , Griffith T C. J. Phys. B ,1973 6 :2155
 [13] Gidley D W , Marko K A , Rich A. Phys. Rev. Lett. ,1976 , 36 :395
 [14] Gidley D W , Zitzewitz P W , Marko K A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1976 37 :729
 [15] Griffith T C , Heyland G R. Nature ,1977 269 :109
 [16] Canter K F , Clark B O , Rosenberg I J. Phys. Lett. A ,1978 ,

65 :301
 [17] Gidley D W , Rich A , Zitzewitz P W *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1978 40 :737
 [18] Gidley D W , Zitzewitz P W. Phys. Lett. A ,1978 69 :97
 [19] Griffith T C , Heyland G R , Lines K S *et al.* J. Phys. B , 1978 11 :L743
 [20] Gidley D W , Rich A , Sweetman E *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1982 49 :525
 [21] Hasbach P , Hilkert G , Klempt E *et al.* Nuovo Cimento A , 1987 97 :419
 [22] Westbrook C I , Gidley D W , Conti R S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1987 58 :1328
 [23] Westbrook C I , Gidley D W , Conti R S *et al.* Phys. Rev. A , 1989 40 :5489
 [24] Nico J S , Gidley D W , Rich A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1990 ,65 :1344
 [25] Asai S , Orito S , Shinohara N. Phys. Lett. B ,1995 357 :475
 [26] Asai S , Hyodo T , Nagashima Y *et al.* Materials Science Forum ,1995 175 :619
 [27] Jinnouchi O. Study of bound state QED : precision measurement of the orthopositronium decay rate. Ph. D. thesis , University of Tokyo 2001 ; Jinnouchi O , Asai S , Kobayashi T Precision Measurement of Orthopositronium Decay Rate Using SiO2 Powder. accepted by Phys. Lett. B
 [28] Asai S , Jinnouchi O , Kobayashi T. UT-ICEPP 03 - 06 July 2003
 [29] Vallery R S , Zitzerwitz P W , Gidley D W. Phys. Rev. Lett. 2003 90 203402

BSOE 北京晨辉日升光电技术有限公司
 BEIJING SUNRISE OPTOELECTRONICS CO., LTD.
 ——专业激光及光电产品代理商

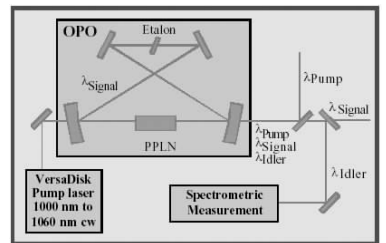
德国 ELS 公司

VersaDisk : 连续固体激光器,采用德国斯图加特大学专利 Thin Disk 技术 (DE 19835107A1), 获得 Excellence Award 2003 大奖。

- 1030nm, 连续输出:
 - 输出功率: 5/10/20/30/50/100W, TEM₀₀ 模, 并有大于 50W 的单频输出 (线宽<5MHz)。
 - 波长可以在 1000-1060nm 范围选择。
 - 自锁模型 (采用可饱和吸收镜技术), 重复频率 100MHz, 脉宽 500fs。
 - 应用: 原子冷却, 光镊, 中红外高分辨率光谱 (与连续可调谐 OPO 一起使用)。
- 515nm, 连续输出: 可选 515/1030nm 双波长输出。
 - 单频输出功率 (线宽<5MHz): 2.5/5/10/15W, TEM₀₀ 模。
 - 波长可以在 514-517nm 范围选择, 可完全替代氩离子激光器。
 - 应用: 高功率钛宝石和染料激光器泵浦、绝对频标、干涉、全息、印刷。

SpectroStar: 高功率连续中红外 (2-5 μm) 参量振荡器 (OPO):

- 谱段范围: 2-5 μm ; 峰值输出功率: 3W@2954nm(泵浦功率 20W); 线宽: $<5 \times 10^{-4} \text{cm}^{-1}$ (15MHz); 连续扫描范围: 5cm^{-1} (150GHz)。
- 应用: 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。



欲了解我公司产品详细信息, 请参阅我公司网站: www.bjlaser.com

公司地址: 中国北京市朝阳区望京新城 A5 区 422 楼 806 室 邮编: 100102
 电话: 010-84718152 传真: 010-64740680 电子邮件: zzw512@vip.sina.com