

e-报告

激光器及光学器件产业分析

20
17



序言

2017 年发生了什么？

那些让我们又爱又恨的激光器是否进步了？

我们也许不能给你详细的答案

但是

我们却可以

简述它们的发展

总结它们的现状

勾勒出大致发展框架

这份 e-报告

精心挑选了“光电汇 OESHOW”和

“激光内参”微信公众平台

这一年中编写的产业分析文章

每一篇都是我们的精心之作

尽量力求客观和全面

2017 激光器及光学器件产业分析 e-报告

激光器

光纤激光器 20 年间突飞猛进，全球工业市场占有率已超 50%.....01

高功率光纤激光，前景可能远超你的想象.....06

炬光科技刘兴胜：有产业链的企业最适合进入半导体激光器领域.....12

VCSEL 激光器每年或有二三十亿颗的市场缺口，可惜国内却无一移动端量产企业.....15

这 6 个技术方向的不断突破，让固体激光器仍留市场，发展至今.....21

量子级联激光器，它的“前景”和“钱景”有多大？.....26

下一阶段，中红外陶瓷激光器将转入其制备工艺优势的研究.....31

其他光学器件

光纤传感器未来十年市场份额将达 400 亿元？.....37

我国光纤传感器应用的春天还有多远？.....41

非制冷红外焦平面探测器——热成像系统的核心，国际角逐的焦点.....46

光纤激光器20年间突飞猛进，全球工业市场占有率已超50%

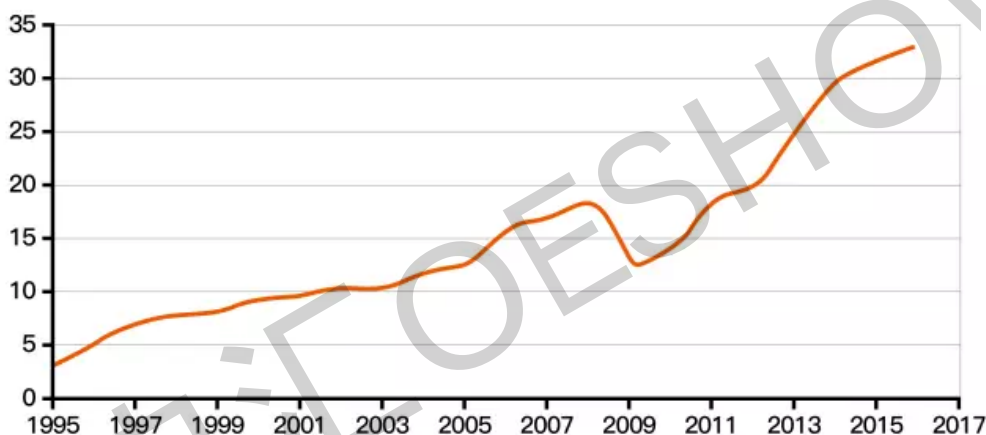
李洪丹 光电汇OESHOW

01

光纤激光器领航工业激光器稳步增长

光纤激光器

众所周知，光纤激光器已成为全球主要的工业激光器之一。相比于半导体激光器、固体激光器和CO₂激光器，**光纤激光器在全球工业市场的占有率已超过50%**。



全球工业激光器销售额稳步增长（单位：亿美元）

（来源：Industrial Laser Solutions）

上图是根据Industrial Laser Solutions在1995~2015年期间，每年公布的全球工业激光器销售额数据整理出的增长趋势图。从图中可以看出，除了2009年金融危机时期，销售额有所下降外，从1995年起的这20年间，工业激光器一直保持着稳定增长，尤其是自2012年之后，涨幅增大。这其中最重要的因素，就是光纤激光器市场份额的大幅增长。

数据显示，2010年时，光纤激光器只占当年全球工业激光器销售额的11%，但是到了2015年，光纤激光器就已占到全球市场份额的50%以上。

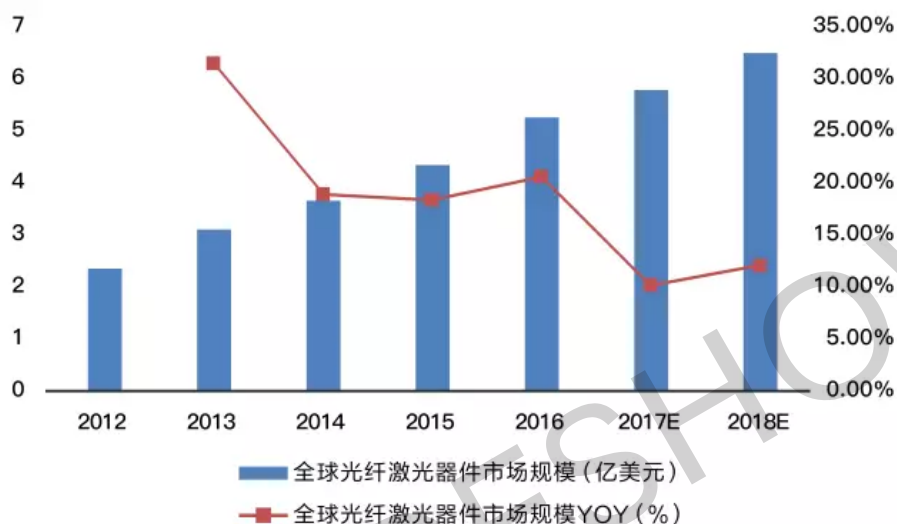
根据IPG公司公布的2017年第一季度财报（截止至3月31日）显示，光纤激光器的增长再次独领风骚。**IPG实现同比增长38%。中国市场尤为明显**，一季度同比增长89%，激光切割和焊接的应用需求增长迅速。

光纤激光器件

全球光纤激光器件市场规模呈现出**不断扩大**的态势。

从2012年的2.34亿美元不断增加到2016年的5.2亿美元，年复合增长率为22.09%。

根据预计，**2018年光纤激光器件市场规模将达到6.40亿美元**，约40亿人民币。



2012~2016年，全球光纤激光器件市场规模不断扩大
(数据来源：公开资料整理)

02

工业和军事应用，助力光纤激光器快速发展

工业应用

以前在板材加工领域主要使用冲床和等离子切割，其中薄板材使用冲床，厚板材就采用离子切割。然而随着光纤激光技术的不断发展，光纤激光切割对传统加工技术和CO₂激光加工产生巨大的冲击。

相比于传统冲床加工，光纤激光是非接触式加工，产生的应力较小，噪声低，完全可以对铝、铜等高反性材料进行批量加工；相比于CO₂激光加工，光纤激光的电光转换效率达到40%，耗电量仅是CO₂激光器的1/3，加工速度提升了2~3倍。

仅仅5~6年的时间，光纤激光器就凭借着各种技术优势掀起了一场激光切割的技术变革。如今，4 kW光纤激光器的需求不断增加，应用领域也开始慢慢向汽车、船舶、航空航天等基础领域渗透。

军事应用

20世纪80年代末，双包层光纤和包层抽运技术的广泛应用，使大功率的光纤激光器的制作成为现实，并迅速拓展至军事领域。如今，**光纤激光器已是战术激光武器的首选光源**。

目前, 美军已将光纤激光器广泛应用于机载激光系统、先进战术激光系统、激光“复仇者”、激光区域防御系统、“空中哨兵”等激光武器系统的测试中, 展现了其良好的发展前景。除此之外，还有德国、日本、英国等。

03

国外巨头洗牌重组 光纤激光器行业竞争加剧

从工业领域来看，IPG公司在全球高功率光纤激光器的市场占有率仍处于**绝对领先地位，市场占有率超过60%**。但是未来，不会是IPG一家独大，因为其他激光行业巨头通过并购一些光纤激光器公司，已成功进入光纤激光器领域。

2016年，美国Coherent公司收购了高性能工业激光光源和激光解决方案及器件厂商ROFIN，而ROFIN此前又收购了美国特种光纤厂商Nufern、半导体激光器厂商DILAS和瑞典专业从事光纤产品的Optoskand公司。由此可见，通过并购，Coherent已经形成了良好的垂直整合能力。

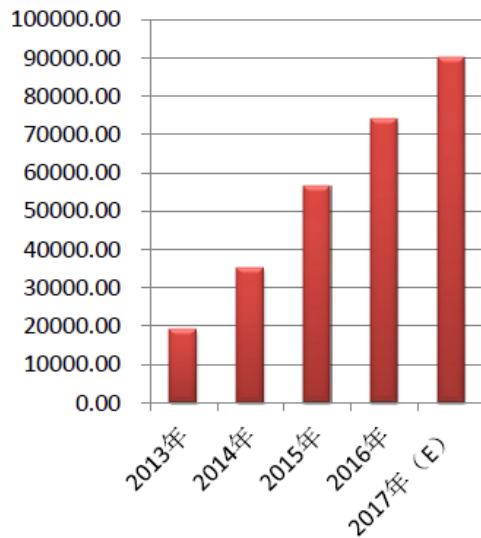
此外还有德国TRUMPF收购英国光纤激光器制造商SPI、英国的JK激光公司，成功进军高功率光纤激光器领域；美国JDSU公司与日本金属加工机床制造商Amada合作开发功率高达4kW的光纤激光器；美国nLight公司收购芬兰特种光纤制造商LIEKKI。

由此可以预见，高功率光纤激光器**行业竞争愈演愈烈**。

04

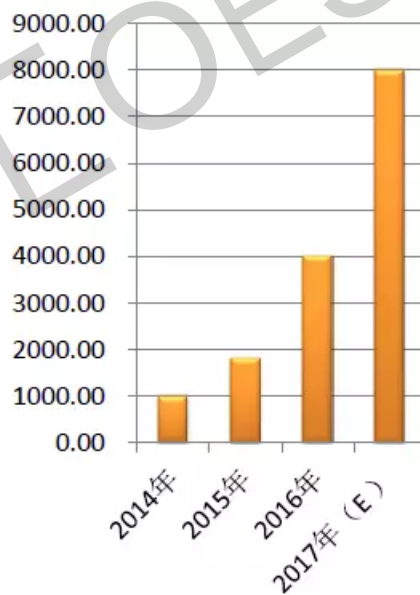
国内市场成绩可喜 国产化进程加速

2016年国内光纤激光器市场增长较大。根据中国光学学会激光加工专业委员会的统计，2016年国内中小功率光纤激光器的**产能达7.4万台**，有近8万台的小功率光纤激光器、约12000台中功率光纤激光器和不少于2200台的高功率光纤激光器（这里的高功率指2000 W以上功率）进行了市场装机。



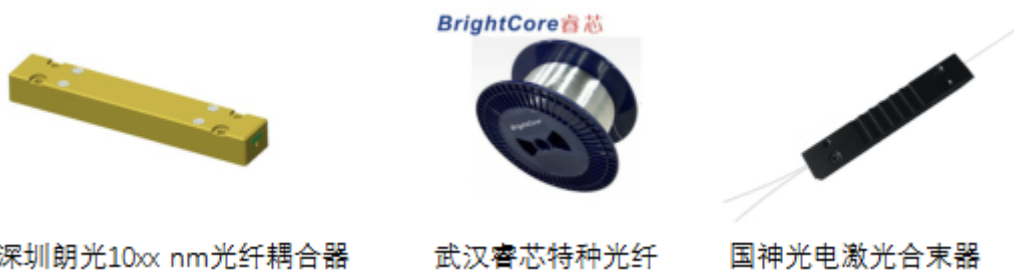
2013~2016年国产光纤激光器产能情况
(来源：中国光学学会激光加工专业委员会)

而国产中功率光纤激光器在2016年的销量达到4000台，相较2015年的1800台，翻了一番多，预计2017年国产光纤激光器的销售量可以再翻一番，超过8000台，同时市场占有率超过50%。



2014-2016年国产中功率光纤激光器装机量情况
(来源：中国光学学会激光加工专业委员会)

我国是世界最大的工业激光器市场，占全球市场的24%，不仅国外企业纷纷把我国作为重要的战略市场，本土企业也厚积薄发，国产化进程加速。武汉锐科、上海飞博、深圳创鑫、中科院上海光机所、西安光机所等一批国内主流的光纤激光器生产企业已开始发力，有个别企业已开发出万瓦级高功率光纤激光器。



深圳朗光10xx nm光纤耦合器

武汉睿芯特种光纤

国神光电激光合束器

但是我们仍然需要清醒地认识到，从光纤激光器的产能和市场占有率来看，我国在规模上都有较大突破，但国产光纤激光器的品质与国外同类产品相比，仍存在较大差距。同时，**80%的高功率光纤激光器需要依靠进口**，高校和科研院所的研发实力雄厚，如何将科研成果与企业生产无缝衔接，是值得我们深思的问题。

从光纤激光器的组件来看，抽运源封装、抽运耦合器、激光合束器、特种光纤、激光传输组件已实现国产化，并全面应用到中、高功率批量化产品中，例如可进行抽运源封装的西安炬光科技、从事特种光纤生产的武汉长飞光纤光缆，都是国产企业的佼佼者，**但是高功率光纤光栅和高功率光闸几乎全部依赖进口**。在国内光电产品汇集较为全面的光电汇网站中，单“光闸”一项是**没有任何产品在线的**，也证明了这一点。

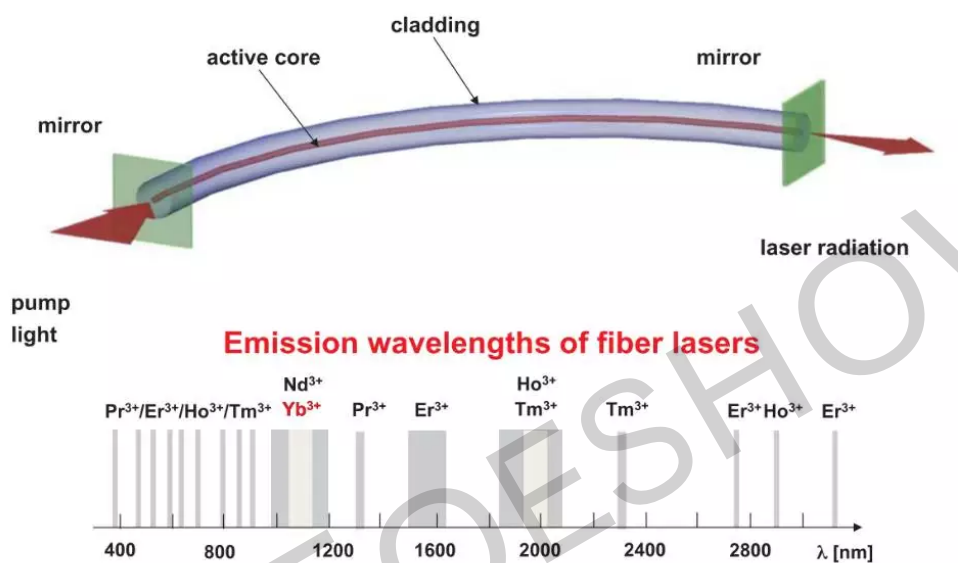
国内市场需要的高功率光闸全部来自瑞典的Optoskand公司。这也就能解释为何我国下游企业的产能增长不快。我国企业的产能受制于国外企业的产能，丧失了主动性，严重制约了我国国产高功率光纤激光器的发展。可喜的是，我国已经意识到其严重性，开始积极布局。希望在未来2~3年内，我们能够看到一些产业成果。

—END—

高功率光纤激光，前景可能远超你的想象

何兵 光电汇OESHOW

高功率光纤激光技术是近年来光电子技术领域，特别是激光技术领域炙手可热的研究方向之一，已在工业制造、医疗、能源勘探、军事国防等领域获得了广泛应用。从整个高功率激光行业的发展趋势来看，光纤激光融合了光纤的波导特性和半导体的抽运特性，具有光束质量好、效率高、散热性好、结构紧凑、柔软性操作等突出优点，代表了高功率、高亮度激光的发展方向。



光纤激光器的原理及覆盖波长

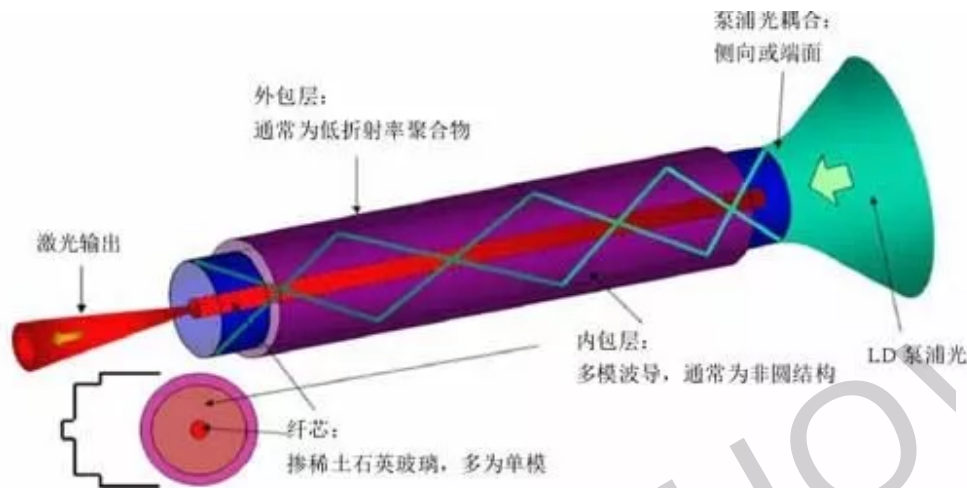
0到百瓦发展了近四十年

目前，采用不同离子掺杂的光纤作为增益介质，可以实现从1~5 μm 的全波段覆盖；采用拉曼和非线性频率转换技术，可以实现紫外光、可见光和红外线的高功率、高亮度的激光输出。实际

上早在1961年，美国科学家E.Snitzer就提出在激光腔内使用稀土掺杂光纤可以得到稳定的单模激光输出，但是受限于光纤制作和抽运光源，未能得到快速发展。

20世纪70到80年代是半导体激光器和光纤拉制工艺快速发展的二十年，得益于气相沉积的现代化工艺和能在室温下工作的半导体抽运源，单模光纤激光器的研究工作逐步展开。但此时光纤的信号光和抽运光皆在纤芯中传输，将低亮度的半导体激光高效耦合到直径几微米的纤芯里较为困难，所以，光纤激光器在很长时间内只能产生毫瓦级的激光输出。

1988年，双包层光纤出现，使光纤激光器的输出功率得到明显提升。典型的双包层光纤结构包括纤芯、内包层和外包层三部分，外包层折射率低于内包层，因此抽运光可以在内包层中传输。内包层的直径和数值孔径可远大于纤芯，便于高效耦合抽运光。抽运光在内包层里经多次全反射后，进入掺稀土离子的纤芯被吸收，实现激光的产生或放大。包层抽运技术的出现使光纤激光器输出功率实现了由毫瓦级到瓦量级的提升。



双包层光纤示意图

20世纪90年代，随着9xx nm高功率半导体激光器和双包层光纤制造工艺的发展，光纤激光器的输出功率得到了迅速提升。90年代末，大模场光纤的研制促进了激光功率进一步提升。使用大模场面积光纤的同时采取一定的模式控制，使激光在大芯径的多模光纤中单模运转，可以大大提高非线性效应的阈值。该技术在1999年顺利实现了100 W单模连续激光输出。

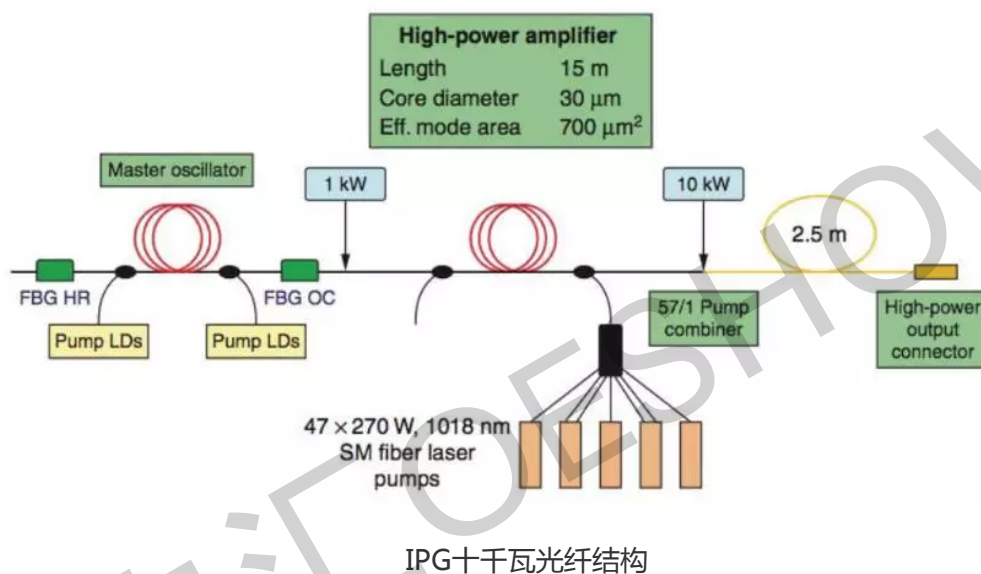
千瓦级的突破催生繁荣市场

2004年，南安普敦大学的Jeong等世界上首次实现了千瓦级光纤激光输出。他们利用975 nm LD双端抽运纤芯直径43 μm 的双包层掺镱光纤，产生了1.01 kW的1090 nm激光输出。同年，进一步优化激光器参数并继续增加抽运功率，使激光器的输出功率提高到了1.36 kW，由于减小了掺镱光纤的纤芯直径和数值孔径，输出激光的光束质量得到了明显改善 ($M^2=1.4$)。

千瓦级光纤激光器的出现使得高功率光纤激光真正走向了应用市场，各研究单位、创业公司如雨后春笋般出现，呈现出欣欣向荣的景象。2012年，IPG曾报道了20 kW的单模和100 kW的多模光纤激光器，这也是目前光纤激光器的最大功率。

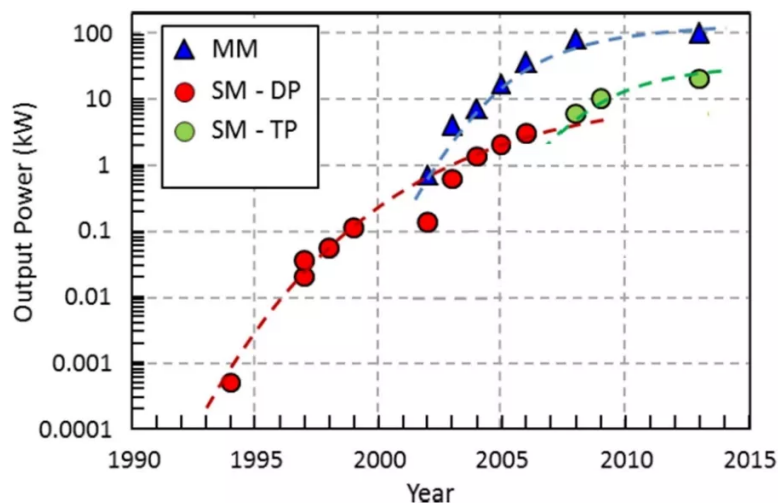
我国的高功率光纤激光器研发起步较晚，但发展迅速。2001年中科院上海光机所在国内率先开展了高功率光纤激光技术的理论与实验研究，2005年率先突破千瓦大关获得单纤连续激光1.05 kW的输出，并在2009年利用国产光纤实现1.75 kW功率输出。随后清华大学、国防科技大学、西安光机所、锐科、创鑫、飞博等多家单位也实现了千瓦和数千瓦级的激光输出。

中科院上海光机所在国内也率先开展了光纤激光相干合成和光谱合成技术研究。2006年，利用自成像结构实现相干合成，随后，国际上首次利用该技术实现了二维光纤激光相干合成。“十二五”期间就率先开展光纤激光光谱合成技术研究，并率先采用光谱合成技术突破10 kW大关，引领高功率光纤激光技术的发展潮流。



以近衍射极限的单模掺 Yb^{3+} 光纤激光器功率发展情况为例（如下图），经预测，如果光纤的模场面积能够合理地增加，采用二极管直接抽运，从单纤激光器或放大器中可得到36 kW的近衍射极限输出，采用同带抽运能够提升输出功率到67 kW甚至更高到97 kW，接近100 kW量级。提升功率到这样超高量级将涉及超大直径的光纤拉制和稳定的单模操作，具有很大的挑战性。

尽管掺镱光纤激光器的输出功率已突破10 kW，但目前光纤激光器的功率提升依然受到抽运光亮度、热效应、非线性效应和模式不稳定的限制。如何设计新颖的光纤结构，发展低损耗的光纤器件，提高抽运二极管的亮度，优化散热结构，改变传统的抽运方式是未来光纤激光器发展的主流趋势。



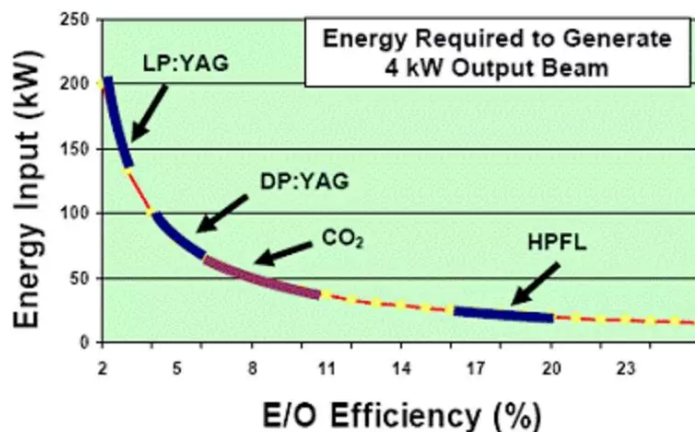
高功率包层抽运的掺 Yb^{3+} 光纤激光器的功率提升。图中同时涵盖了多模光纤激光器（MM），二极管直接抽运（SM-DP）激光器和同带级联抽运（SM-TP）的激光器功率提升情况。

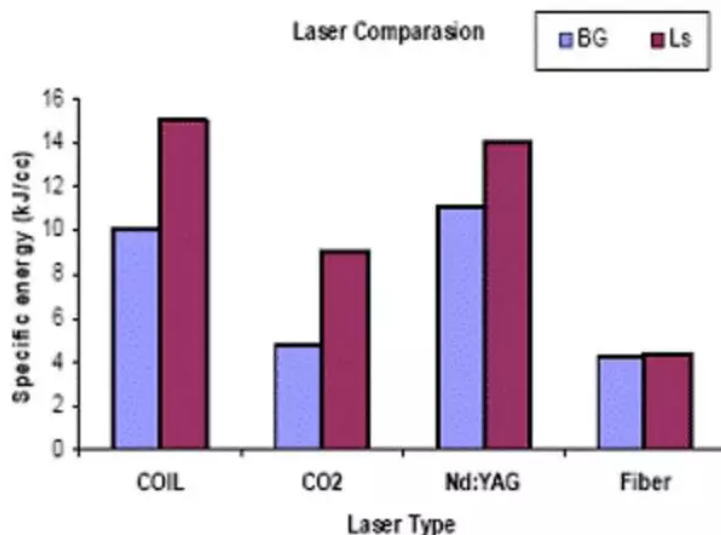
需求驱动技术发展、市场变动

高功率光纤激光技术飞速发展的一个巨大动因是工业制造和国防应用的需求驱动。

光纤激光器按照输出功率可分为三个层次：低功率光纤激光器（ $<100\text{ W}$ ）主要用于激光打标、钻孔、精密加工以及金属雕刻等；中功率光纤激光器（ $<1.5\text{ kW}$ ）主要用于金属材料的焊接和切割，金属表面的翻新处理；高功率光纤激光器（ $>1.5\text{ kW}$ ）主要用于厚金属板的切割、特殊板材的三维加工等。

高功率光纤激光器还有一项重要的工业应用，是天然气钻探和深海新能源的获取。美国气体开发技术研究所使用IPG公司的 5 kW 光纤激光器对岩石进行了切割及粉碎实验，与传统的方法相比，采用光纤激光器穿透的孔眼更深，能够降低损害并提高产量。目前，高功率光纤激光器已广泛应用于工业领域，由于其生产力和成本优势，逐渐取代了以往其他种类的激光器。

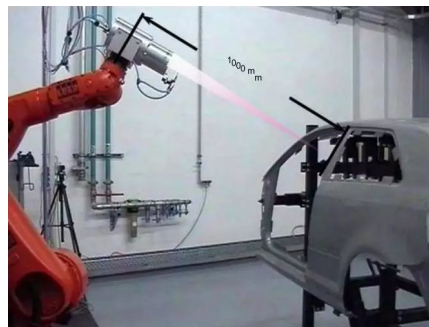




各类光纤激光器在能量需求上和进行岩石去除所需能量的对比（HPFL:高功率光纤激光器）

2016年，全球激光器总销售额为104亿美元，其中千瓦级高功率激光加工市场占据了15亿美元，高功率光纤激光器在激光加工市场备受瞩目。同时，2016年也是全球光纤激光产业整合并购的大年，有相干公司和罗芬公司的联姻、昂纳科技收购ITF公司进军光纤激光产业、NKT收购Fianium公司、大族激光收购光纤制造厂商Coractive、DILAs与m2k-Laser公司的合并等等。

各大公司开始整合光纤激光制造涉及的各个方面，力求把光纤激光核心器件的研发与生产牢牢掌控在自己手中，同时最大限度的降低成本，以期获得更高的商业利润。



光纤在工业加工方面的应用

随着市场应用的推动和国家战略规划，近年，受国家自然科学基金重点基金、国家863计划、科技部重点专项、以及各地方政府的重视，我国对光纤激光技术前沿探索、成果转化、和产业升级均大力支持，国产高功率光纤激光器的研究和产业化也得到了快速发展。

目前，国产千瓦级以下光纤激光器的销量，已经以压倒性的优势超越了进口产品，而且价格也大幅下降，基本实现了全国产化批量生产。然而高功率光纤激光器的国内市场情况截然不同，由于核心材料和器件受限等原因，目前仍处于关键技术和工程化研发阶段，主要由进口产品主导，国产产品数量稀少。中国高功率光纤激光器产业化还有很长的路要走。

国外国防应用需求是重要推手

欧美、俄罗斯等军事强国非常重视高功率光纤激光器的国防应用，这成为了高功率光纤激光技术迅速发展的重要推手。光纤激光器除了光束质量好，亮度高外，其效率高、产热少、结构坚固且紧凑，激光通过光纤传输到光束合成的便利性也是其优势。目前，国外很多研究机构已经开展光纤激光器反简易爆炸装置、迫击炮弹和对抗无人机等目标的研究的报道，装载平台也呈现多样化。



LAWs激光系统和洛克马丁公司的30kW激光器击打无人机实验

早在2004年，美国SPATA公司将2 kW多模光纤激光器安装到“宙斯”激光扫雷系统中，在阿富汗成功执行了扫雷任务；2010年，美国海军进行了光纤激光近防系统(LAWs)的试验，LAWs以非相干合成的方式实现了33 kW的最大功率输出，在随后的试验中，其在3.2 km的距离连续击落了4架时速为300多公里的无人机；2015年，美国洛克希德·马丁公司采用30 kW的光纤激光组束系统成功摧毁了一英里外的激光引擎；2017年在陆军白沙靶场击落了5架翼展3.3 m的“法外狂徒”系统无人机，其集中光束打击和执行速度比之前的激光束快了两倍。

总而言之，大力发展高功率光纤激光技术将满足新时期新环境下众多领域对高亮度激光的需求，对国民经济和国家安全具有重要意义。

—END—

炬光科技刘兴胜：有产业链的企业最适合进入半导体激光器领域

李洪丹 光电汇OESHOW



本期大咖

刘兴胜，现任西安光机所超大功率半导体激光器封装技术产学研示范基地负责人，高功率半导体激光器封装与表征研究室负责人，西安炬光科技股份有限公司董事长兼总经理。回国前曾在美国康宁公司、相干公司和恩耐公司，担任高级研发科学家和工程管理人员。主要从事光电子和电子器件领域的封装技术研究和开发工作。

近几年，国内对半导体激光器的关注度丝毫不亚于光纤激光器，有可能更甚之。那么如今国内半导体激光器技术究竟发展到何种程度？面对国内一拥而上，遍地开花的景象，哪些企业才更适合进入半导体激光器领域？西安炬光科技股份有限公司总经理刘兴胜向记者道出了自己的观点。

1

半导体激光器技术和应用现状如何？

刘总用了两个“非常”来形容：进步非常大，前景非常好。

纵观国内半导体激光器产业，刘总认为有些地方我们仍落后于国际水平，但是我们还是在很多地方取得了很大进步，也应该看到一些技术方面的希望。

开放式器件的封装技术

随着炬光科技在无钢化封装技术、无缺陷键合技术、热管理技术、热应力控制技术等技术突破和进展，开放式器件如叠阵产品、面阵产品、水平阵列HA产品、单巴器件CS产品、单管器件F-mount产品等都具有国际竞争力，产品性能指标、可靠性等都达到国际水平。炬光科技收购全球微光学技术领导者德国LIMO公司，其光学整形技术和带光学整形的开放式器件及模块都将跃居国际领先地位。

耦合技术

基于单管的耦合技术国内已有企业具备国际竞争力；基于巴条的耦合技术差距还是更大一些，因为这其中会涉及到光学整形技术，而国内在光学整形技术方面相较国外，差距较大。

芯片技术

就国内已量产的产品来讲，大部分是单管产品，巴条产品不多。近年来中国在输出功率和可靠性上取得很大进展，但若想赶超国外水平，至少还需3年左右的时间，解决芯片设计和制作工艺问题，尤其是腔面钝化技术。中国对芯片的使用量在不断增加，这会促进芯片技术的投资和发展。总体来说进步很大，并没有行业内想象得落后。

所以无论是芯片、开放式器件的封装上、光纤耦合封装上产品上，刘总认为都有很大的提升，而在开放式器件封装技术上，国内已和国外没有多少差距了。

2

什么样的企业适合进入半导体激光器领域？

最近3-5年，国内新成立的半导体激光器公司非常多，相反国际上新成立的半导体激光器公司非常少，甚至是，倒闭的倒闭，被收购的被收购。半导体激光器现在是国内热、国外冷。但是要问什么样的企业适合进入半导体激光器领域？我认为有产业链的企业适合进入。

刘总认为，半导体激光器目前最大的应用市场是作为光纤激光器、固体激光器的抽运源。它的市场占有率的大小完全依附于光纤激光器、固体激光器市场占有率的起伏，直接应用尚未兴起。作为有产业链的企业，例如从事光纤激光器研发和生产的公司，已经形成了一定的规模，那么他就非常适合再从事半导体激光器的研发和生产。光纤激光器公司最大的成本便是作为其抽运源的半导体激光器。企业自己生产后，便能降低光纤激光器的生产成本，同时也能为半导体激光器找到应用市场，从而提升公司的综合实力。

IPG便是如此。它生产的半导体激光器，很大一部分是自产自销。以2016年前9个月销售业绩为例，公司总销售收入7.26亿美元（约合47.9亿人民币），毛利率为54.7%。

单就毛利润这一项，不论是光纤激光器公司还是半导体激光器公司，小编认为恐怕国内都无人能及。

光学整形是半导体激光器应用可考虑的一个方向

目前国外公司都将目光聚焦在中国市场，加大投资力度。但是如今半导体激光器产业面临的最大的挑战就是欠缺直接应用。刘总认为光学整形是半导体激光器应用可考虑的一个方向。“半导体激光器加上光束整形，那么就有可能找到它在工业或者其他方面的直接应用。从长远来看，5年或者10年，我相信半导体激光器会找到若干个潜力较大的直接应用市场。”

—END—

光电汇 OESHOW

VCSEL激光器每年或有二三十亿颗的市场缺口，可惜国内却无一移动端量产企业

李洪丹 光电汇OESHOW

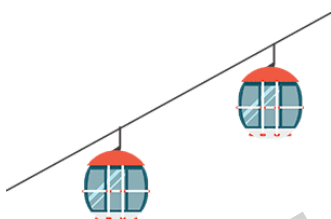
前阵子，iPhone 8或将使用VCSEL激光器，问鼎AR应用顶尖水平的新闻，将VCSEL激光器重新引入了人们的视野。

之所以说“重新”，是因为它曾在光通信应用市场里“发光发热”，被广泛关注，而这次，它的关注源自消费电子领域。

VCSEL激光器是什么？它很厉害吗？它的市场大吗？

这么说吧，每年全世界消费10多亿部智能手机，如果每部手机嵌入2-3颗VCSEL激光器，那么每年就是二三十亿颗的市场规模。

如今，全球VCSEL的总收入已接近8亿美元，预计到2020年该值会增长到21亿美元。

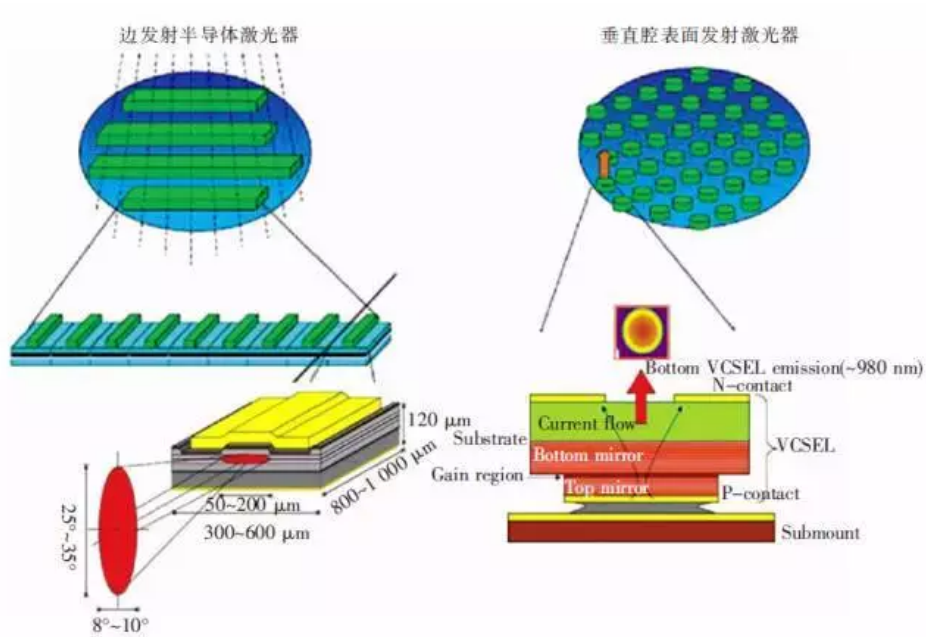


什么是VCSEL激光器

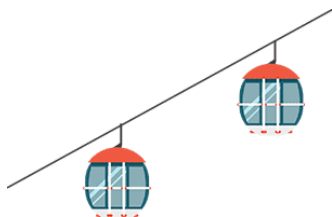
VCSEL激光器全名为垂直共振腔表面放射激光器（Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL），简称面射型激光器。

它以砷化镓半导体材料为基础研制，是一种半导体激光器。其激光垂直于顶面射出，与激光由边缘射出的边射型激光有所不同。

因此相较于边射型激光器，VCSEL激光器具有低阈值电流、稳定单波长工作、可高频调制、容易二维集成、没有腔面阈值损伤等优点，在半导体激光器中占有非常重要的地位。

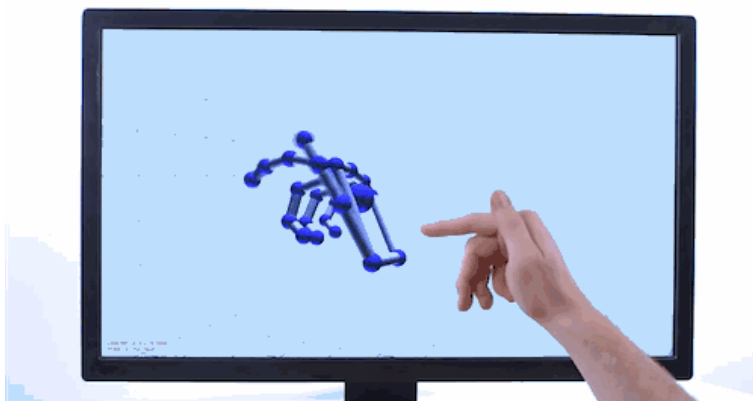


边发射激光器和面发射激光器VCSEL



VCSEL激光器能做什么

VCSEL基本原理就是传递空间三维信息，三维识别、手势识别、虹膜识别、无人驾驶激光雷达等许多我们熟悉的应用，都是通过它得以实现的。



手势识别



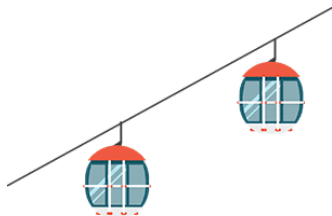
虹膜识别



无人驾驶

虽然目前VCSEL激光器在消费电子领域的市场才刚刚起步，但是它在光通信、光互连、激光引信、激光显示、光信号处理以及芯片级原子钟等领域，早已获得了广泛的应用。

除此之外，它在近红外波段的军用领域起着主导作用，例如用于周边和边境安全的高功率照明、透过烟雾和爆炸进行成像以及远程监视等。



VCSEL激光器市场有多大

BCC Research公司的分析师认为，目前全球VCSEL的总收入已接近8亿美元，预计到2020年该值会增长到21亿美元。

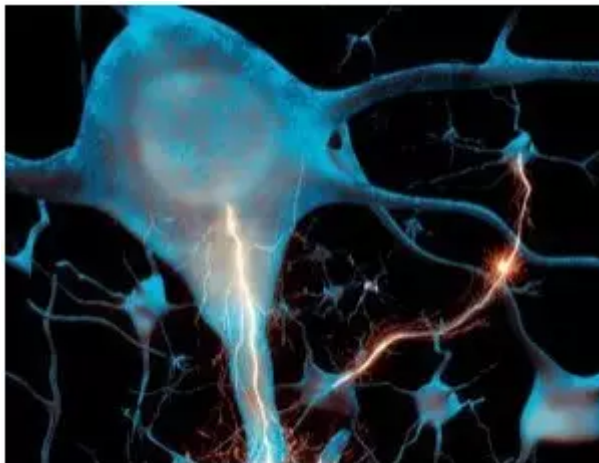
VCSEL的应用主要由短距离光纤数据传输链路的部署所主导，这部分市场大约占据了VCSEL市场近一半的份额。

但是VCSEL自身的一些发展，包括实现更高的效率、更长的发射波长（大多数商用VCSEL的工作波长在800 nm附近）以及可调谐性，将会为VCSEL创建更加多元化的应用市场。



光通信

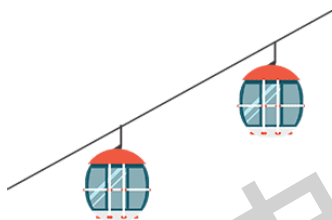
低能量光存储、服务器及高容量数据中心中的快速交换对VCSEL的需求不断增加；超高密度磁存储、工业加热（也许这一点有些令人吃惊）包括油漆固化和商业印刷店对VCSEL的需求也在增长；在消费电子产品中的手势识别和3D传感技术应用中，VCSEL将会获得持续更广泛的应用。



光学神经刺激

此外，预计医疗领域的医学诊断和治疗应用也是VCSEL的市场增长点，例如，在光学神经刺激和计算机X线摄影成像应用中，VCSEL比LED更具出色的电效率，这一优势将使其更多地应用在近程传感中。

随着手势识别、数据存储等一些新应用的快速增多及逐渐普及，VCSEL的年度销售额将有望在未来的几年中快速增长。



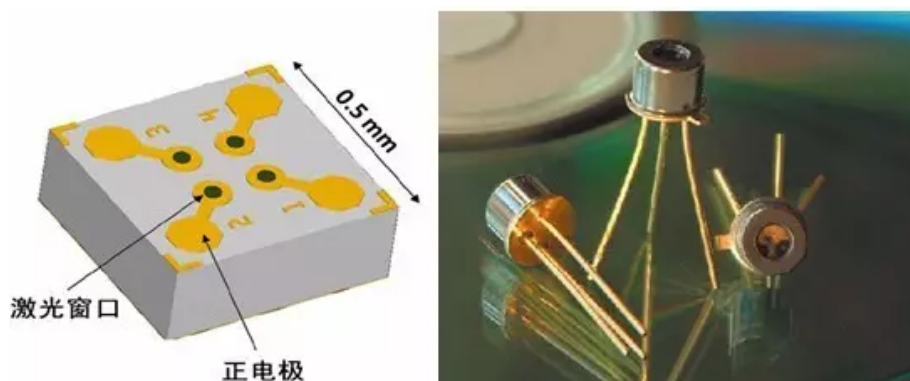
国内外产业化现状如何

目前，致力于移动端设计的VCSEL芯片生产公司全球只有七八家，例如Finsar、Lumentum、Princeton Optronics、Heptagon、II VI等公司，且大部分在美国，它们在移动端VCSEL处于前沿的研发角色。

而报道中也称，为iPhone 8提供VCSEL激光器的生产商是Finsar公司、Lumentum公司和II-VI公司三家。

相比之下，光通讯领域中，国内光通讯器件厂商光迅科技已有VCSEL商业化产品推出，但是在消费电子领域，国内尚无一家拥有VCSEL芯片量产能力的企业。

科研领域中，中科院长春光机所在VCSEL的研究处于世界前沿地位。2014年5月长春光机所在国内首次研制出碱金属原子光学传感技术专用的795 nm和894 nm VCSEL激光器，可作为核心光源用于芯片级原子钟、原子磁力计、原子陀螺仪等碱金属原子传感器。



795 nm VCSEL芯片（左）TO46封装器件（右）

除此之外，还有吉林大学、长春理工大学、北京邮电大学、西南交通大学、厦门大学、华中科技大学、中科院半导体所、中科院物理所等高校及科研院所均对VCSEL开展了不同层次的研究。

业内人士预测，**垂直腔面发射激光器在今年下半年将迎来第一个转折点**。面对未来每年可能二三十亿颗的市场缺口，尚无一量产企业的我们，如何能与国外企业竞争，分得一杯羹？

如果在VCSEL应用全面爆发时，别人已经在吃肉了，而我们连口汤都喝不上，岂不哀哉！

参考来源：温州商报、激光世界、知乎、《大功率半导体激光器研究进展》论文

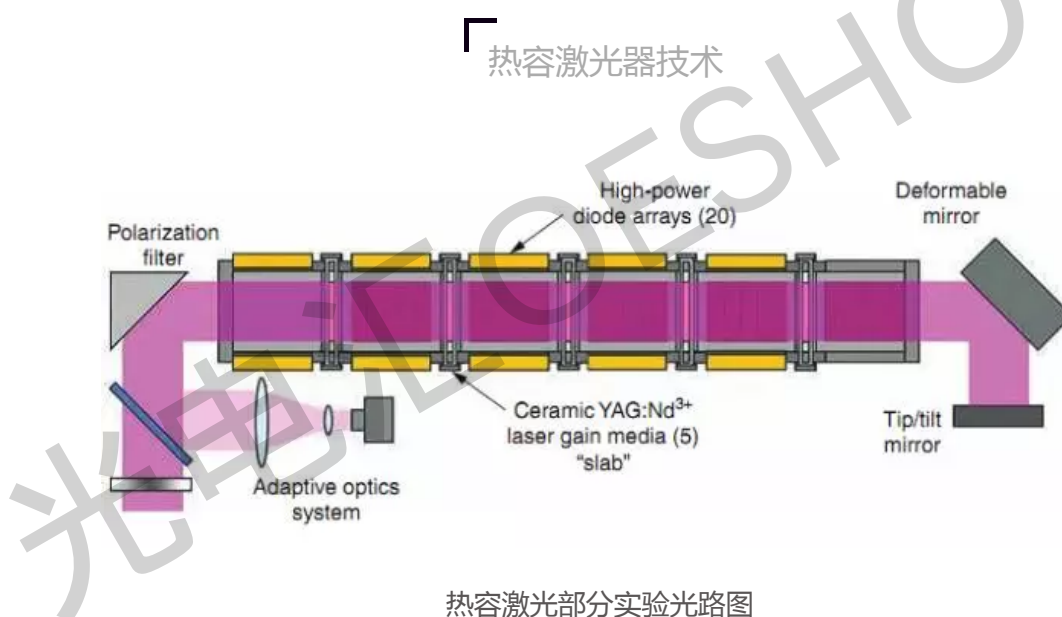
—END—

这6个技术方向的不断突破，让固体激光器仍留市场，发展至今

唐晓军、刘磊、刘娇、刘洋、王超、梁兴波、赵鸿
华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室

进入21世纪以来，固体激光器输出功率由10 kW到100 kW不断获得突破，这时高效散热和主动光束质量控制已成为固体激光器提高性能、继续发展的主要攻关方向。[相应的改进和创新主要是在增益介质结构的变化和冷却方式的改变上](#)。诸如热容激光器、具有大表面积体积比的光纤激光器、薄片激光器及板条激光器等多种激光器得到了深入研究。

目前[热容固体激光技术的发展陷入停滞](#)，[光纤激光技术](#)吸引的[研发力量最多](#)；端面抽运传导冷却[板条激光技术](#)、ThinZag浸入式板条激光技术、液冷薄片激光技术均实现了100 kW以上激光输出，进一步地发展[需要克服各自的短板](#)；[传导冷却薄片以及平面波导激光技术](#)均展示了高效高功率输出的发展潜力，[有望近期取得突破](#)。下面介绍下几种固体激光技术各自的优缺点。



Lawrence Livermore国家实验室在2001年，成功演示了闪光灯抽运的10 kW级热容激光器，实际输出平均功率13 kW，光束质量优于5倍衍射极限。次年采用单片Nd:GGG增益介质，四片二极管激光面阵抽运，获得2.7 kW输出。2006年，进而采用五片陶瓷Nd:YAG增益介质，输出达到了67 kW。但是由于未能有效解决输出光束质量的问题，并且输出激光的时间过短，在与板条激光技术方案的竞争中处于下风。

因为抽运不均匀热容激光器的光束质量随着出光时间迅速退化，难以符合实用要求。因此，热容激光器虽然具有定标放大至100 kW的能力，但其[应用前景并不乐观](#)。

「 光纤激光器技术

光纤激光器**优点在于优良的光束质量和方便的热管理**，**缺点在于单纤的输出功率有限**，要达到100 kW级的功率水平需要复杂的光束合成方案。

光束合成有相干合成、谱合成以及功率合成等方式。相干合成和谱合成能够较好地保持光束质量，但是对激光的线宽有着苛刻的要求，这进一步限制了单纤的输出水平。

随着窄线宽光纤激光技术的进步，光纤激光的合成功率得到了大幅提升。2017年3月初，洛克希德·马丁公司采用光谱合成技术方案实现58 kW激光输出，光束质量接近衍射极限，**这是迄今为止最好光束质量的最高功率的光纤激光合成输出**。

尽管取得了里程碑性的进展，但是合成光束的功率进一步提升空间有限。

「 板条激光器技术

板条激光器利用其介质几何对称性和之字形光路，可以部分抵消热致光程差和双折射效应的影响，是**实现高平均功率高光束质量激光输出的有效方式**。

1

二极管端面抽运传导冷却板条激光器(CCEPS)

诺格（Northrop Grumman）公司在2009年实现了7路CCEPS相干合成输出105.5 kW，光束质量优于3倍衍射极限，电光转换效率达19.3%。

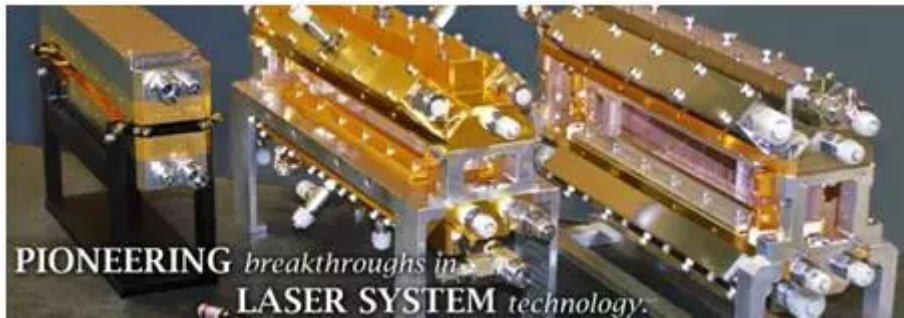
诺格方案单路输出功率有限，相干合成后光束质量的退化效应比较明显，这主要是因为暂时无法找到有足够占空比的光束拼接方案。另外，随着链路数目的增加，将会对实时相位控制技术提出很大挑战。

针对合成后光束质量退化问题，通过偏振合束和利用衍射光学元件合束的方式可以加以改善，随着波前控制技术进步，可合成的路数也将逐步增加。

2

ThinZag浸入式板条激光器

Textron公司采用冷却液直接冷却陶瓷ThinZag板条激光器，开发出了1 kW、5 kW和15 kW的高功率连续激光器产品。



Textron公司“ThinZag”系列高功率激光器产品

2010年，Textron公司串联6个增益放大模块，构成紧凑的单口径输出振荡器，实现了100 kW的激光输出。

放大器模块之间插入变形镜校正波前畸变，但当激光器工作在高功率时，变形镜由于损伤阈值限制发生损坏，造成光束质量急剧下降，仅能工作数秒。

薄片激光器技术

1 传导冷却薄片激光器

薄片内热量沿着轴向传输，所以理论上不存在热透镜效应，可以得到高光束质量的激光输出。

2008年6月，Boeing公司宣称其薄片激光器输出功率达25 kW，光束质量优良；德国物理技术研究所采用端面抽运薄片激光器在2008年实现多模16 kW，光束质量 $M^2 \approx 24$ ，在4 kW时光束质量可以达到 $M^2 = 1.4$ 。

面抽运方式下，薄片激光器的增益介质较薄，使得抽运光单程吸收能力很差，必须设计复杂的抽运系统保证抽运能量的充分吸收，削弱了激光器系统的稳定性；而且实际输出的光束质量并不理想，边缘效应、热应力以及抽运和散热的不均匀都使得光束质量严重退化；另外，单片薄片能力有限，高功率输出需要多块薄片级联放大，需要复杂的抽运光学系统，系统规模较大。

2 液体冷却薄片激光器

General Atomics公司研发的液体冷却薄片激光器，采用的技术方案从未公开报道过，经分析认为可能采用了分布式增益的薄片YLF激光器专利技术。2010年，通用原子公司实现了单模块60 kW功率输出，2015年实现两模块150 kW激光输出。

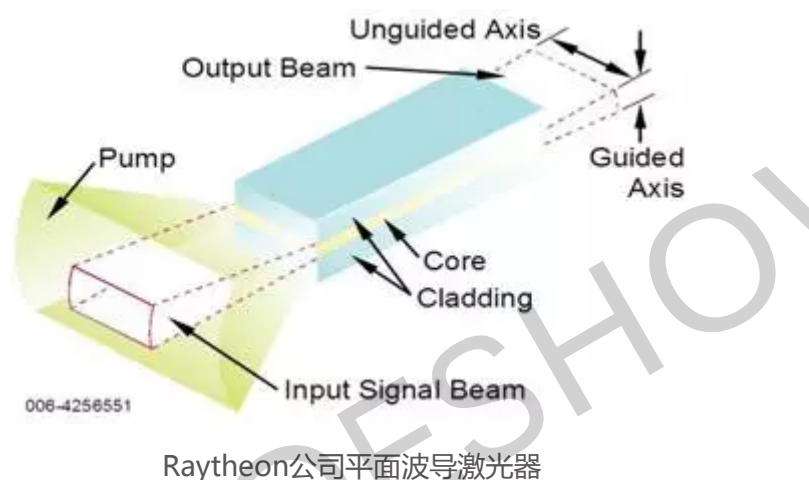
这种激光器通过将热量分散在多个片状单元中，利用流体的强散热能力将热量快速导出，使得增益介质中的温升极低，且只在光轴方向具有温度梯度，大大降低了增益介质本身带来的热畸变。

这种方案展示出了良好的定标放大能力，但是冷却液会对激光性能产生严重的影响。因此，这种激光器的光束质量不容乐观。

平面波导激光器技术

平面波导激光技术兼顾了光纤和薄片激光技术的优势，增益区截面积可以扩展，光束质量可控。缺点在于增益介质制备困难，光束的级间耦合要求精度高。

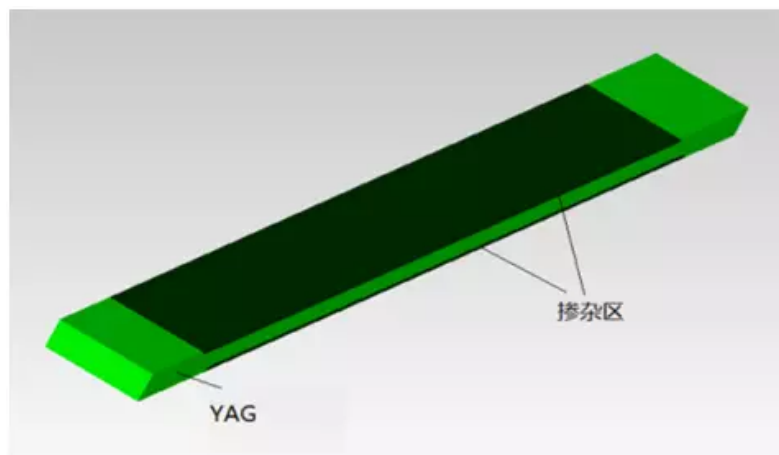
Raytheon公司在2006年用单个平面波导实现了16 kW的多模激光输出，展示了平面波导的巨大技术潜力。在2013年实现了单个平面波导14.5 kW的激光输出（导波方向近单模），并在5.4 kW水平验证了对非导波方向进行自适应校正的可行性，校正后光束质量达到1.7倍衍射极限。



新型表层增益板条激光器技术

提高单模块输出功率最直接的思路是提高增益介质的散热能力，即提高表面积体积比。非均匀掺杂的三明治结构板条应运而生。板条的两个大面处有一定厚度的掺杂区，适应大面传导冷却，称之为表层增益。

区别于现有的端头键合、体增益板条，新型表层增益板条激光器技术可满足更高功率激光系统对低热畸变，高增益、高功率输出增益介质的需求。

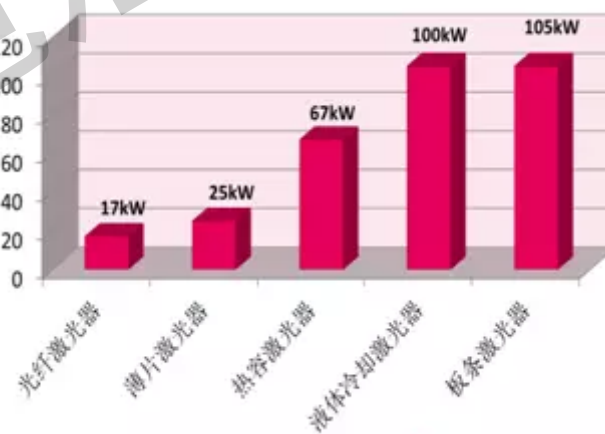


表层增益板条结构示意图

板条内抽运光和主激光沿“之”字传播。表层增益板条与传统板条相比，在相同抽运功率下温升较小，而且在厚度方向对热有很好的匀化作用，具备优异的散热能力。

当信号光功率密度大于 10 kW/cm^2 ，保证放大器模块抽运功率密度大于 10 kW/cm^3 ，单模块的提取效率保持在40%以上。抽运功率为25 kW时，激光输出功率可达到12.2 kW，对应的光-光效率为49%，具备获得高效率大功率输出的能力。在连续谐振腔输出实验中，采用表层增益板条已获得了3 kW的激光输出具有非常好的线性度。

上述激光器设计极大改善了激光器的性能，使激光器单口径输出功率水平继续取得新的突破。



各种大表体比固体激光器输出功率

高功率固体激光技术的突破，关键在于如何消除或补偿固体增益介质中热积累带来的热畸变，即在高功率运行条件下保持光束质量，进行定标放大。通过冷却方式和增益介质构型的进一步优化，相位共轭、自适应光束净化、新型谐振腔以及各种补偿措施的出现，高功率固体激光器输出激光性能还将有新的突破。

量子级联激光器，它的“前景”和“钱景”有多大？

李洪丹 光电汇OESHOW

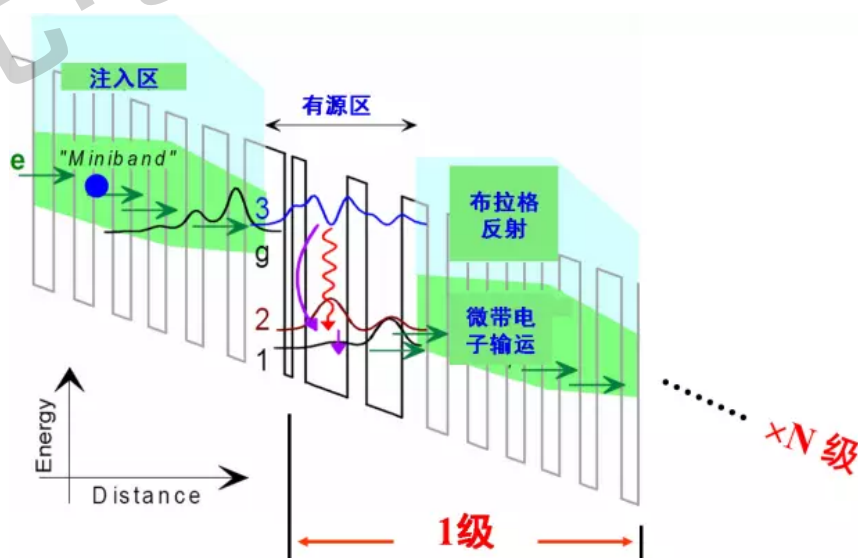
据麦姆斯咨询报道，全球量子级联激光器（Quantum Cascade Lasers, QCL）市场2017~2022年期间的复合年增长率为3.9%，预计市场有望到2022年增长至3.748亿美元。

作为最有发展前景的激光器之一，QCL激光器在短短的二十年，已经实现了从液氮脉冲工作到室温连续5 W输出，成为国内外科研和产业翘首以盼能够产生实质性进展的热门激光器之一。

什么是量子级联激光器

量子级联激光器的发明是半导体激光器领域中具有里程碑意义的发展,开创了中远红外半导体激光的新领域。因为在中远红外波段，能用的激光器太少，而它恰恰能够工作于中红外区域（2.75-25 μm ），甚至太赫兹波段，而且波长可调。

虽为半导体激光器，但是它的工作原理与通常的半导体激光器截然不同。它打破了传统p-n结型半导体激光器的电子-空穴复合受激辐射机制，其发光波长由半导体能隙来决定。QCL受激辐射过程只有电子参与，其激射方案是利用在半导体异质结薄层内由量子限制效应引起的分离电子态之间产生粒子数反转，从而实现单电子注入的多光子输出，并且可以轻松得通过改变量子阱层的厚度来改变发光波长。



量子级联激光器能带结构和工作原理示意图

它的级联过程，即电子从高能级跳跃到低能级过程中，不但没有损失，还可以注入到下一个过程再次发光。这个级联过程使这些电子“循环”起来，从而造就了一种令人惊叹的激光器。

量子级联激光器能做什么

量子级联激光器目前的主要用途是气体检测、红外对抗和太赫兹通信，尤其是在中波红外4-6 μm 波段，基本达到了实用化程度。

1) 气体检测

温室效应气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等，以及神经毒气、糜烂毒气、爆炸物等气体，与疾病诊断如哮喘、溃疡、肾、肝、胸、肺、糖尿病、器官排异、精神分裂等有关的特征气体，其基频吸收谱线均落在2-14 μm 波段内，而这正是QCL激光器的作用波段，所以它可广泛应用于国家安全、环境监测、工农业生产、医疗诊断、太空探索等领域。

通常QCL都会被集成到光谱仪中，完成红外光谱检测。QCL被认为是当前中远红外范围内进行气体检测的优势光源。

2) 红外

定向红外对抗，通俗来说就是防止飞机受到红外制导导弹的威胁，是目前最有效的制导手段，一直备受世界各军事大国的关注。QCL激光器锁定目标后发射低功率激光脉冲来干扰导弹的制导系统，使其失去方向，从而保障飞机的安全，适合配备在直升机、倾转旋翼机和小型固定翼飞机上使用。

早期的定向红外装备中使用的是中波光参量振荡激光器。现在有些国家的军队已开始更新换代，使用QCL激光器。例如美国陆军投入约15亿美元开展了“通用红外对抗系统”(CIRCM)项目，全部采用更新换代的QCL激光器。据悉美国陆军定制了1076套系统，计划2017年底正式装备。

由此可见，QCL激光器将会成为红外对抗系统中的主力。



CIRCUM系统的激光发射器



当前CH-47“支奴干”直升机上装备的“高级威胁红外对抗系统”ATIRCM，其对于陆军的飞机而言体积过大，未来将被CIRCUM取代

3) 太赫兹 (THz) 通信

THz通信是未来THz领域的重要应用，但因THz发射源及探测器的缺乏，导致THz技术起步较晚。目前THz源发射器的研究方向主要有THz-QCL、差频发生器（DFG）、参量振荡器（TPO）及其他THz源发生器。

其中，THz-QCL具有电光转换效率高、体积小、重量轻、适装性好等优点，是QCL的重要发展方向，将在通讯、成像和谱分析等技术领域获得广泛的应用。

QCL的产业市场

据麦姆斯咨询报道，全球QCL市场预计将从2016年的3.029亿美元增长至2022年的3.748亿美元，2017-2022年期间的复合年增长率为3.9%。市场增长预计将来自气体传感及化合物探测应用，以及医疗产业日益增长的非侵入式医疗诊断应用。

对于QCL的非侵入式医疗应用，中科院半导体研究所的刘峰奇研究员也表达了同样的观点。他认为，QCL产业化推进最有望实现重大突破的应用领域就是呼吸气体医疗检测应用。对应疾病的标志性气体在人体呼吸气体的含量非常低（ppb级别），而QCL在高灵敏检测方面具备天然的优势，有望成为呼吸气体分析技术领域瓶颈的最佳解决方案。

在分析技术不断完善的背景下，呼吸气体检测未来将有望成为一个与血检与影像学检查相互补充与竞争的大医疗检测产业。因此，随着呼吸气体检测领域的不断发展，基于QCL的呼吸气体检测仪有望在产业化推进中实现重大突破。

2016年，QCL的工业应用领域占据了最大的市场份额，其次是医疗领域。随着自由空间通讯对QCL的潜在需求，预计通讯产业将获得最高的增长速率。

北美地区作为QCL的主要应用市场，2016年稳居第一；亚太地区凭借中国和印度等工业发展中经济体的市场表现，将会有较高的增长速率。

从封装和工艺上来说，C-Mount封装QCL则凭借较低的成本优势，将占据最大的市场份额；随着QCL在军事与国防产业的需求增长，预计法布里-波罗QCL将在2017-2022年内以很高的复合年增长率保持增长。

QCL的国内外发展情况

目前，国际上针对QCL的应用比较多，国内还非常少，主要原因可能是激光器价格较高，做成系统以后价格更高。QCL的材料结构需要生长上千层，每层的厚度不到一个纳米，生长难度很高。

国内方面，中科院半导体研究所的刘峰奇研究员带领的课题组能够自主生产高性能QCL，已做到室温连续1.2 W工作，波长4-10 μm ，以及太赫兹波段都能覆盖，在低功耗以及气体探测用的DFB-QCL上，优于国外研究组。在气体检测应用方面，中科院半导体所已完成 $^{13}\text{CO}_2$ 同位素呼吸气体检测仪研制，应用于人体胃幽门螺旋杆菌检测。

另外，国内还有少数几家公司是围绕QCL进行封装及系统搭建用于气体检测和分析方面的。

国际上QCL的制造商主要集中在美国和欧洲，包括：

美国的Daylight Solution（国内代理商：科艺仪器）、Block Engineering（国内代理商：森泉科技）、Pranalytica（国内代理商：上海会亚通信科技）、Wavelength Electronics（国内代理商：北京波威科技）、AdTech Optics（国内代理商：上海会亚通信科技）、Thorlabs、AKELA Laser，日本的滨松，瑞士的Alpes lasers（国内代理商：环球科技），法国的mirSense（国内代理商：上海昊量光电）以及德国Nano Plus（国内代理商：唯锐科技）。

滨松的市场部Chelly说，“我们可以提供多种型号的DFB-QCL激光器，满足用户的不同需求，国内用户可以通过光电汇网站查询。”事实上，除了滨松，上述代理商及其代理产品在光电汇网站皆可查询。

由此可以看出，商业化进展国外优于国内，而国内仍集中在科研领域。

量子级联激光器将凭借其优势明显、用途广泛等特点，将成为未来五年内发展第二快速的激光器（增长速度第一的是直接半导体激光器）。

前途不可限量，值得业内同仁持续关注。

参考来源：光电汇、卖姆斯咨询、《轻兵器》（2015年10月）、《量子级联激光器技术内涵及其应用前景》、知乎、百度百科、Ofweek

—END—

下一阶段，中红外陶瓷激光器将转入其制备工艺优势的研究

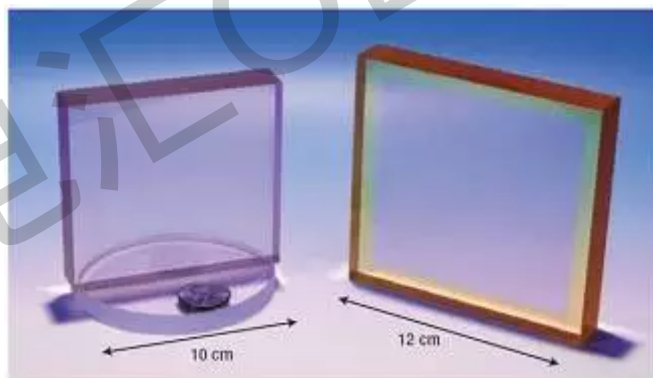
陈浩 江苏省先进激光材料与器件重点实验室

透明激光陶瓷 新，也不新

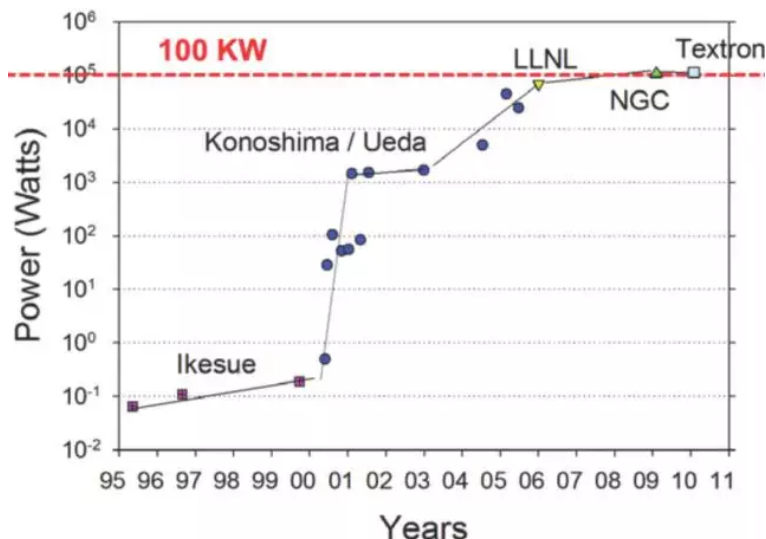
以透明陶瓷为代表的新型激光材料为新型激光器（特别是高功率激光器）的设计与制造提供了新的材料基础。

早在1964年Hatch等人就研发出世界上第一台陶瓷激光器（ $\text{Dy}^{2+}:\text{CaF}_2$ ）；但直到1995年，日本科学家Ikesue等人首次开发出具有实用价值的Nd:YAG透明陶瓷，并采用激光二极管（LD）抽运方式实现了70 mW的激光输出（斜率效率为28%）。

这一研究成果极大地激发了研究人员对透明陶瓷材料的兴趣，陶瓷激光器的输出功率、光-光转换效率记录不断被刷新。2010年，Textron公司使用透明陶瓷实现了100 kW以上的激光输出，达到了战术武器级别要求。



67 kW热容激光器用大口径陶瓷片



Nd:YAG陶瓷激光器发展历程

特性与单晶 相似，也不相似

随着制备工艺的突破，透明激光陶瓷作为激光增益介质不仅具有可与单晶相比拟的物理化学性能、光学品质、光谱和激光特性，而且具有显著的制备优势：

- （1）具有与单晶相似的物理特性、化学性质、光谱特性和激光性能。
- （2）制备周期短，生产成本低，容易实现批量化生产；容易制备出大尺寸的激光材料，且形状容易控制。
- （3）可实现高浓度掺杂，光学均匀性好，可以实现高浓度掺杂和分子水平上的均匀性。
- （4）可以在远低于熔点的温度下，短时间烧结高熔点的固体颗粒，如倍半氧化物 Y_2O_3 、 Sc_2O_3 和 Lu_2O_3 等（熔点约 $2400^{\circ}C$ ）。
- （5）可以制备多层和多功能的激光材料，为激光系统设计提供了更大的自由。例如将Nd:YAG和 Cr^{4+} :YAG复合在一起构成被动调Q开关，甚至将调Q和受激拉曼散射效应相结合，这对单晶材料而言几乎是不可能的。

制备工艺

简单，也不简单

透明激光陶瓷典型的制备工艺分为液相反应和固相反应两种。固相反应烧结法通常使用商业化的高纯度 α - Al_2O_3 粉体、化学沉淀法制备的 Y_2O_3 粉体和 Ho_2O_3 粉体（以Ho:YAG为例），按照不同掺杂浓度Ho:YAG的化学计量比精确称取各原料粉体，复合添加MgO等烧结助剂。

以无水乙醇为球磨介质，磨球采用高纯的 Al_2O_3 磨球，将混合的原料粉体放在行星球磨机上球磨分散；球磨后的浆料放在烘箱中干燥后过筛。热处理后的粉体经压力初步成型后，再以200 MPa压力压成素坯。素坯800℃素烧后，置于真空度不低于 10^{-3} Pa的钨丝真空炉中于1780℃下保温8~12 h，在空气中1450℃退火处理。退火结束的透明陶瓷样品经双面研磨、抛光后即可用于激光实验。



透明陶瓷
(掺杂不同稀土元素，在可见光范围显现不同颜色)

产生中红外激光的方式

多，也不多

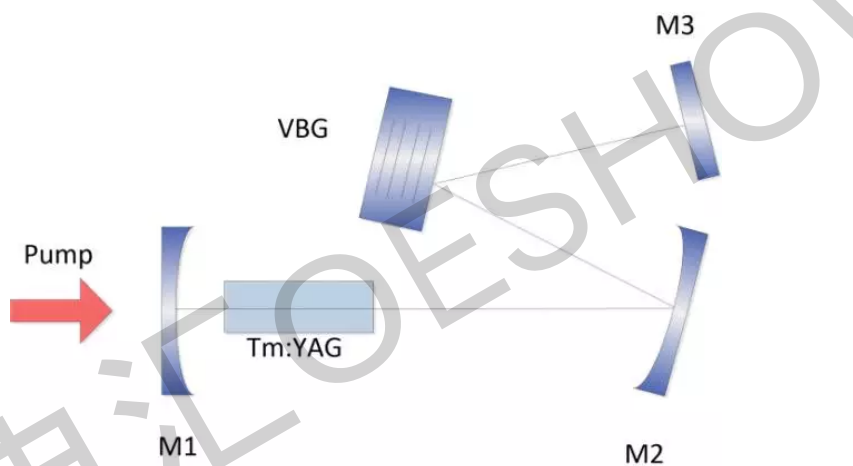
在激光技术领域中，一般将中红外定义为2~5 μm 波段。该波段激光在国防、医疗、通信等方面有着特殊的重要应用，但其产生、探测以及应用技术都远远落后于人们已经熟知的1 μm 波段的激光。

产生中红外激光的主要方式包括：掺杂离子的直接发射、半导体技术、非线性手段等。

可以直接通过“离子间的能级跃迁”来产生中红外波段激光的稀土离子主要包括 Er^{3+} ， Tm^{3+} ， Ho^{3+} ， Pr^{3+} ， Dy^{3+} 离子以及过渡金属离子 Cr^{2+} ， Fe^{2+} ， Ni^{2+} ， Co^{2+} 等。稀土掺杂的基质可以是晶体、陶瓷，也可以是光纤材料。

一般来讲，稀土离子的能级丰富，同一种离子可以具有多个发射峰，这为实现多波长激光运转提供了便利的条件。使用稀土离子掺杂的激光增益材料直接产生中红外激光一直占有绝对的主导地位，其中 Er^{3+} ， Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 是最常用的3种稀土离子。

2 μm 掺Tm透明陶瓷激光器

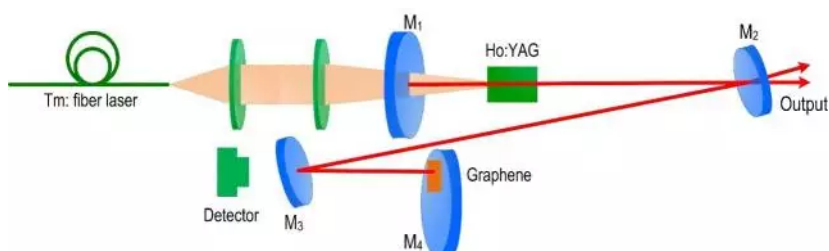


使用VBG的Tm:YAG陶瓷激光器调谐装置图

Tm:YAG陶瓷在2016 nm、1960 nm和1882 nm处各有一个发射峰，在波长短于1900 nm的区域，重吸收较严重，因此，在常规情况下，2016 nm附近的激光振荡具有竞争优势。

如今，Tm:YAG激光陶瓷通过定标放大可实现52 W的激光输出。而在宽谱调谐特性方面，可以实现从1956.2 nm到1995 nm的连续调谐，激光光谱的典型带宽为0.1 nm左右。

2.1 μm 掺Ho透明陶瓷激光器



2.1 μm 的 Ho^{3+} 的 Y_2O_3 和YAG陶瓷用同带抽运的方式都已经实现激光振荡。2011年5月，江苏师范大学以自制的高质量 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 陶瓷作为激光增益介质，采用掺Tm光纤激光共振抽运技术，成功实现了21.4 W的连续波输出。

此外，他们首次使用石墨烯作为 $\text{Ho}:\text{YAG}$ 陶瓷激光器的可饱和吸收体，实现了调Q激光输出，在重复频率为 $\sim 64\text{ kHz}$ 时，获得了最大单脉冲能量为9.3 μJ 。

3 μm 掺Er透明陶瓷激光器

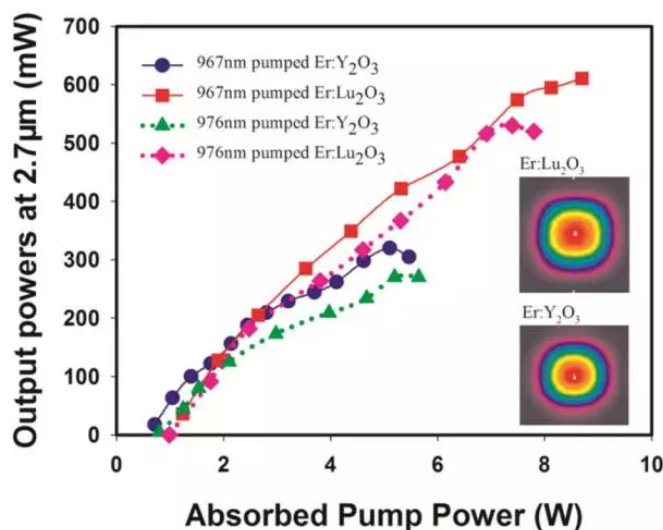
倍半氧化物热导率比YAG材料高约50%，其声子能量也比YAG材料低很多（YAG 857cm^{-1} ， Y_2O_3 591cm^{-1} ， Lu_2O_3 612cm^{-1} ， Sc_2O_3 672cm^{-1} ）。因此，掺Er倍半氧化物激光增益材料被认为是一种较为理想的中红外基质材料。

通过970 nm的半导体激光器抽运掺Er增益材料，可以直接产生3 μm 波段的中红外激光。并采用烧结工艺，仅需 $1600^\circ\text{C}\sim 1800^\circ\text{C}$ 就可以制备出高质量的透明激光陶瓷。

2014年，江苏师范大学使用自制、未镀增透膜的3 at.%，7 at.%和15 at.% 掺杂 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 与 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷作为激光增益介质，均实现了波长为2.7 μm 的激光输出，这是首次在室温下获得倍半氧化物透明陶瓷的连续激光输出。

其中，7 at.% 掺杂的12 mm长 $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 与10 mm长 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 表现出较为优异的激光性能，分别获得了1.73 W和1.4 W的连续激光输出，相应波长分别为2724 nm和2723 nm。

在调Q运转中，简单的两镜腔 $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器和被动调Q $\text{Er}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的结果相当：平均输出功率为850 mW @ 2737 nm、脉冲重复频率为128~282 kHz、脉冲宽度为183~588 ns。



15 at.% $\text{Er}:\text{Lu}_2\text{O}_3$ and $\text{Er}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 陶瓷激光器

一代材料 一代器件

纵观透明激光陶瓷材料的发展历史，从1995年至今的短短20年，Nd、Yb、Tm、Er和Ho等各类稀土掺杂透明陶瓷均实现了激光运转，表现出不弱于同体系单晶材料的物理、化学、光谱和激光运转特性，并展现出一些独特的性能。

透明激光陶瓷（器）的相关研究已经取得了巨大的历史进展，基本完成了“在性能上与单晶可比拟”、“以取代单晶材料”为研究目标的历史阶段。

下一阶段，透明激光陶瓷材料的研究重点或许将很快转入“充分体现透明激光陶瓷所独有的、高度灵活的制备工艺优势”，例如复合结构、超大尺寸、任意形状、超高温透明陶瓷等等。

“一代材料，一代器件。”正是材料和激光技术的相辅相成，才推动着激光行业的不断进步。

可以预见的是，透明激光陶瓷新材料和新功能器件的不断涌现，将会推动激光技术的持续发展，获得更多的突破。

—END—

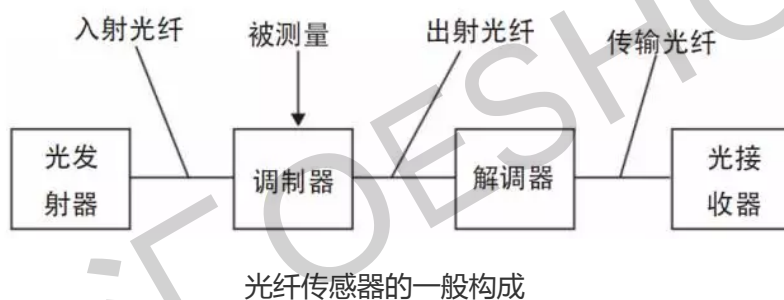
光纤传感器未来十年市场份额将达400亿元？

李洪丹 光电汇OESHOW

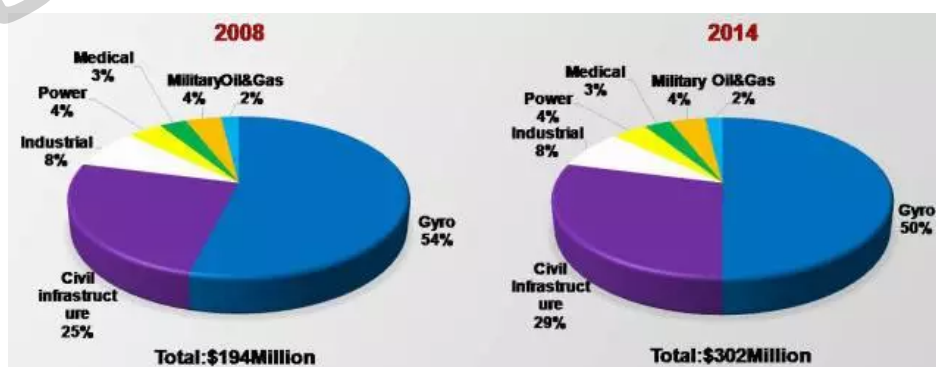
光纤传感技术是20世纪70年代末兴起的技术领域。因其一系列独特的、其他载体和媒质难以相比的优点，以及几乎在各个领域的研究与应用，成为全球热点。

点式和分布式光纤传感器

光纤传感器的基本工作原理是将来自光源的光信号经过光纤送入调制器，使待测参数与进入调制区的光相互作用后，导致光的光学性质（如光的强度、波长、频率、相位、偏振态等）发生变化，成为被调制的信号源，再经过光纤送入光解调器，经解调后，获得被测参数。



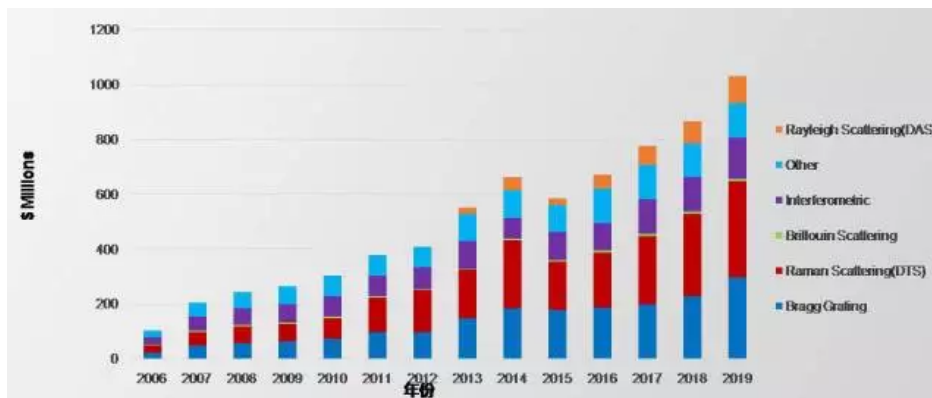
根据是否能够随距离的增加连续监测，光纤传感器可分为点式光纤传感器和分布式光纤传感器。



点式光纤传感市场2008年与2014年情况的对比

（来源：凌云光子集团李白《光纤传感行业应用技术发展及解决方案》的报告）

从2008年到2014年，点式光纤传感市场总规模从1.94亿美元增长至3.02亿美元，深入医疗、电力、工业、民用基础设施、陀螺仪、油气和军事等领域。从上图可以看出，民用基础设施中使用点式光纤传感器的市场在逐步增加。

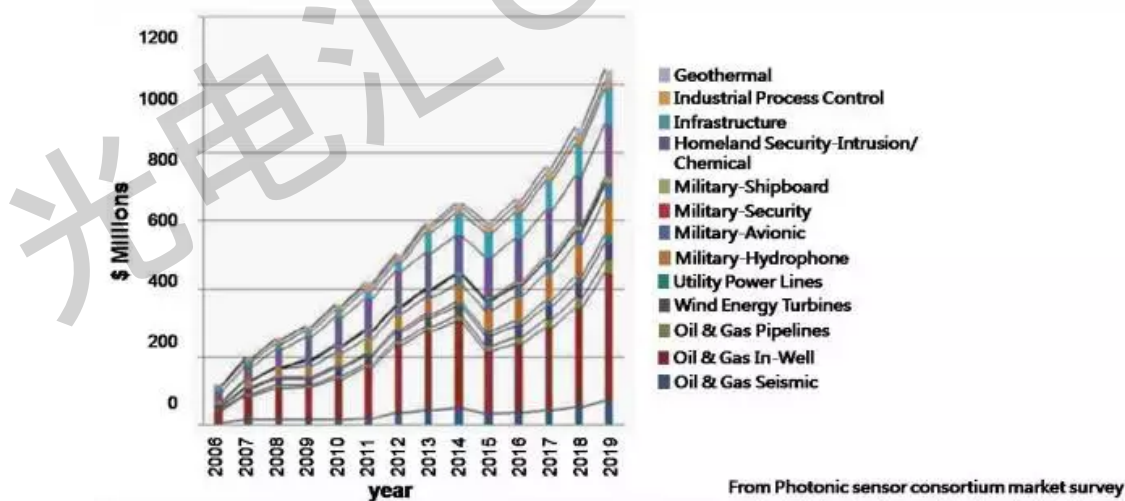


2006-2019年分布式光纤传感市场情况（按技术）

（来源：凌云光子集团李白《光纤传感行业应用技术发展及解决方案》的报告）

从技术来看，基于布拉格光栅的分布式光纤传感器和基于拉曼散射的分布式光纤传感器从2006年开始，在整个分布式光纤传感类别中所占比例逐渐扩大，增长速度远超其他技术类别的光纤传感器。

从上图中可以看出，预计2019年基于布拉格光栅的分布式光纤传感器所占比例为25%，基于拉曼散射的分布式光纤传感器所占比例为30%-40%。



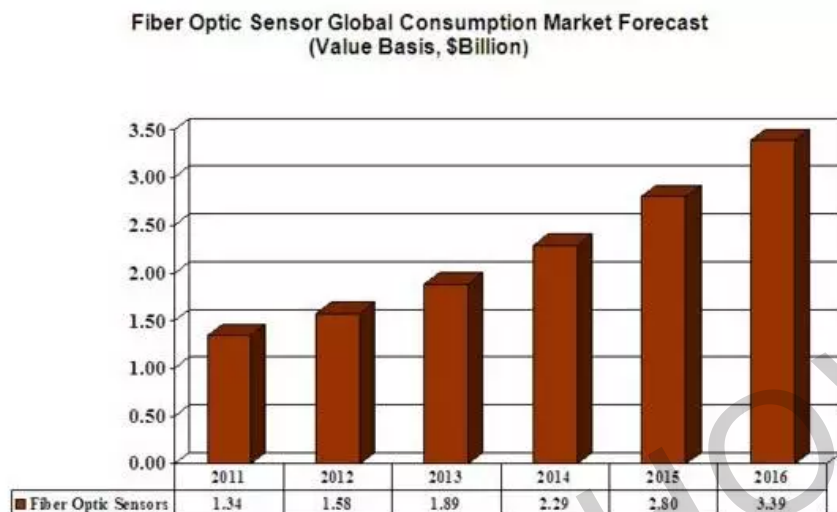
2006-2019年分布式光纤传感市场情况（按应用）

（来源：凌云光子集团李白《光纤传感行业应用技术发展及解决方案》的报告）

从应用来看，分布式光纤传感市场应用以油气为主，包括油气管道、油气井下和油气抗震的应用，占了整体应用的46%。2015年的明显下降，则是由于当年油价下跌导致光纤铺设量随之下降所致。

未来十年市场预测

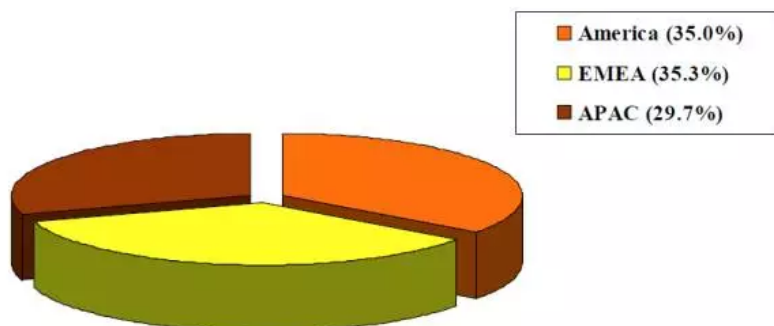
2012年时，ElectroniCast曾预测2011-2016年间，光纤传感器市场将以20.5%年均增长率增长，从13.4亿美元增长到33.9亿美元。



2011-2016年间光纤传感器全球市场预测

2017年5月，ElectroniCast发布最新的全球光纤传感器市场预测（2016-2026年）。报告称2016年全球光纤传感器（包括点式和分布式）消费值达到33.8亿美元（折合约221.32亿人民币），2026年这一数值将达到59.8亿美元（折合约391.57亿人民币）。

Continuous Distributed and Point Fiber Optic Sensor
Global Consumption (\$3.38 Billion in 2016)
Source: ElectroniCast Consultants



2016年美洲和EMEA（欧洲、中东和非洲）地区的光纤传感器需求量平分秋色，EMEA地区略高一点。然而，未来十年，亚太地区将超过美洲和EMEA地区，成为光纤传感器主要的应用市场。

从技术来看，分布式光纤传感系统在EMEA地区应用发展较好，这主要是基于该地区在航空航天和油气、石化等能源领域的需求驱动。

点式光纤传感器方面，美国至少在未来五年内保持在该领域中的领先地位，这主要是受到在军事和航空航天领域中光纤陀螺仪的应用驱使。

2016年，光纤陀螺仪占全球光纤传感器市场份额的65%。ElectroniCast Consultants的分析师Stephen Montgomery说：“所有地区中，光纤传感器在的航空航天的应用都有所增长，军事应用中（例如无人机、导弹制导、导航、跟踪、机器人及航空飞行术等）光纤陀螺仪的增长将会令人印象深刻。”

参考来源：

<http://www.electroniccastconsultants.com/forecasted-technology.html>

凌云光子集团李白《光纤传感行业应用技术发展及解决方案》的报告

—END—

我国光纤传感器应用的春天还有多远？

李洪丹 光电汇OESHOW

上一篇中，我们报道了ElectroniCast今年5月最新发布的全球光纤传感器市场预测（2016–2026年）报告。

报告称，2016年全球光纤传感器（包括点分式和分布式）消费值达到33.8亿美元，而2026年这一数值将达到59.8亿美元。

那么中国市场如何呢？

国内技术正在加速靠拢国际水平

资料显示，从我国整体的传感器领域来看，传感器新品研制率相比于美日等国，落后近10年，产业化水平落后10–15年。中国约有60%的传感器件依赖进口，而核心芯片依赖进口高至80%左右，物联网中使用的MEMS传感器，几乎全部依赖进口。

但是单就光纤传感技术而言，我国科研人员在光纤传感技术领域的研究成果已经很接近世界先进水平，并且差距在不断缩小中，国产化进程加速。

从近两年的一些大型光纤传感会议来看，例如APOS2016亚太光学传感会议、第六届中国（北京）国际光纤传感技术及应用大会等，之前在报告中提到的解调等设备还在依赖进口，如今而言，包括南京大学、深圳中科传感、无锡联河、珠海光辰在内的高校和企业却都已拥有了全套的光纤传感解调方案。

在光纤传感系统的核心部件上，包括厦门彼格的窄带光源，世维通的铌酸锂波导，长飞和长盈通的保偏光纤、先品光子的耐高温耐辐射特种光纤及相关的器件方面也都实现了国产化。

以往光纤传感系统里比较前沿的技术，例如光频域反射技术（江苏昂德）、布里渊光时域反射技术（南京大学、上海交大、中电41所和重庆大学等），国内也已经有许多机构可以研发。

市场利好消息不断 新生代辈出

光纤传感技术从发展之初就因其广阔的市场应用前景而备受瞩目，但由于种种原因，应用市场一直没有得见大规模的开展。

虽然前景被看好，但是国内不少实体公司，却有销售额不升反降的情况出现，今年这种情况似乎有所转好，市场开始回暖起来。

资本市场也来凑了热闹：2016年知觉科技获得了天使轮融资、理工光科上了创业板、稍微边缘一些的镭神智能也获得近亿元A轮融资。

光纤传感市场的前景也吸引了众多新生代的加入，例如苏州至禅、厦门彼格、深圳中科传感、江苏昂德、山东圣海光科、南京发艾博光电等。

应用潜力巨大 小小器件大有作为

光纤传感备受关注，是因为它能在油气、煤炭、铁路、城市建筑、电力、医疗、安防等涉及亿万民众的基础建设中以及军用领域大有作为。

以下举例几个应用市场，具体说明。

1. 油气应用 ▶

光纤传感器可以克服恶劣的井下环境取代传统的电子传感器，实现油井的持气率、含水率、压力、温度、多相流和声波的测量。目前在石油测井系统中主要应用的是非本征光纤F-P腔传感器。

国内陆上油田以新疆克拉玛依和辽河油田为代表，已经进行了大量实验。在国内，包括山东激光所在内，很多机构都在和石油公司开展光纤传感方面的合作研究。总体上看，目前国内这一领域的产品处于中试阶段。

2. 城市建筑应用

在建筑工程中，可以利用光纤传感器实时监测桥梁、大坝、重要建筑物等的温度、应力、压力、振动、倾角等物理量，以评估其短期及长期的结构安全性能。例如干涉陀螺仪和光栅压力传感器可预埋在混凝土等材料中，用于测试应力松弛、施工应力和动荷载应力。

在大型工程中，因为需要实时监测，并且范围较广，所以主要使用的是连续性分布式光纤传感器。

此外，城市管廊的信息化系统中，至少一半需要用到光纤，其系统动辄一公里几千万的造价，光纤系统即便在里面只占一小部分，也有很大的市场。目前城市管廊的监控整体方案中光纤传感占比并不高，代表城市有青岛、珠海等。

3.电力系统 ▶

在电力系统中，需要测定温度、电流等参数，由于电类传感器易受强电磁场的干扰，无法在这些场合中使用，只能用光纤传感器。还有一个重要的应用是利用OPGW、OPPS等电力复合缆分布式监测电缆线的温度、覆冰、舞动、偷盗、杆塔倒塌等事故。

国内长飞和上海康阔等企业，在光纤电流互感器领域已经通过了多次测试，距离实际应用尚有一段时间。但是长飞光纤特种产品事业部童维军博士预测这一领域在未来5-8年内会形成相当规模的市场。

4.军用领域 ▶

光纤传感在军用领域同样存在庞大的市场需求。军事应用的光纤传感器可用于水声探潜（光纤水听器）、光纤测导、姿态控制（光纤陀螺）、航天航空器的结构损伤探测（智能蒙皮）以及战场环境的探测等方面。

在航空航天领域中，战术导弹用光纤陀螺精确制导。光纤陀螺还可应用于雷达无人控制直升机的姿态控制。

由光纤水听器构成的海防传感网络系统，是目前正在开发的新型防卫系统，该系统已开始用于海上边防和重要军事地区的海防警戒。

近几年发展起来的基于光纤传感技术的光纤网络安全警戒系统，也开始在边防及重点区域防卫中得到推广应用。

目前，世界上发达国家使用的安全防卫系统就是基于分布式光纤传感网络系统的安全防卫技术。

我国市场上有包括西安耐威、北京菲斯罗克等四五十家公司涉足光纤陀螺领域，包括航天电子等多家上市公司切入。一年的总需求有数十万个，市场总额数十亿人民币。

我国在光纤陀螺和水听系统开发上投入重金，势必打造光纤传感系统另一个庞大市场。

应用起不来 问题何在

光纤传感应用潜力巨大，技术也在靠拢国际水平，国内企业信心十足，似乎一切准备就绪，为何总觉得差一口气？

南京大学张旭萃教授说，原因是多方面的，有内在的，也有外在的。

内在就是光纤传感本身过于敏感，这既是其优点，在某些场合下也是其缺点。在实验室里各项数据都完美的光纤传感系统，在现场应用中却经常发生问题。周围应用环境稍微的改变都有可能对传感系统造成影响。

而外在，就是用户对光纤传感系统的认识不够、行业标准的缺失，以及大量实际应用中的工艺、工程问题尚未解决。

应用就类似光纤的“最后一公里”，只要解决了，即刻可以大面积铺开。国内诸多专家表示，光纤传感厂商对应用端的了解不足限制了光纤传感的应用拓展，只有在应用领域获得突破才能让光纤传感获得更多应用。

国内光纤传感界奠基人之一廖延彪教授说：“经过这十几年的发展，我国在光纤传感方面已经取得了很大的成绩，能发展起来的特色就在于中国现在欣欣向荣的广大市场，所以我国发展光纤传感最关键的是要有应用，没有应用就没有生命力。”

也有人认为，是因为科研方和应用方不在一个频道上。很多项目都是以科研发文章为目的，一套系统安装不久就拆掉了，不能解决实际问题。

然而不管怎样，就目前总体而言，实验室技术已经成熟，但应用尚不成熟。

整理完这篇文章，小编发现，技术很好，潜力很大，只要解决了应用的问题，我国的信息化能力将会得到整体地快速提升。

以往，用户对于应用方面的问题总是等着光纤传感系统开发商自己解决。可是现在，越来越多越迫切的应用迫使用户主动参与到光纤传感系统的开发中来。

国家也已认识到光纤传感在航空、国防、大型基础设施等领域的重大潜力，立项、重金发展.....一切都在向好的方向发展。

参考来源：光电汇OESHOW、光纤在线、北京知觉科技有限公司、光电子中国博览会、《光纤传感技术的发展与应用》——光电技术应用

—END—

非制冷红外焦平面探测器——热成像系统的核心，国际角逐的焦点

冯涛 金伟其 司俊杰 北京理工大学光电学院

1

非制冷打败了制冷 并分成三大技术模块

红外焦平面探测器是热成像系统的核心部件，是探测、识别和分析物体红外信息的关键，探测器的性能直接决定了热成像系统的最终性能。

红外焦平面探测器可分为制冷型和非制冷型两大类。

制冷型红外焦平面探测器的优势在于灵敏度高，能够分辨更细微的温度差别，探测距离远，但是其结构复杂且成本高昂，主要应用于高端军事装备；

非制冷红外焦平面探测器无需制冷装置，能够在室温状态下工作，具有启动快、功耗低、体积小、重量轻、寿命长、成本低等诸多优点。

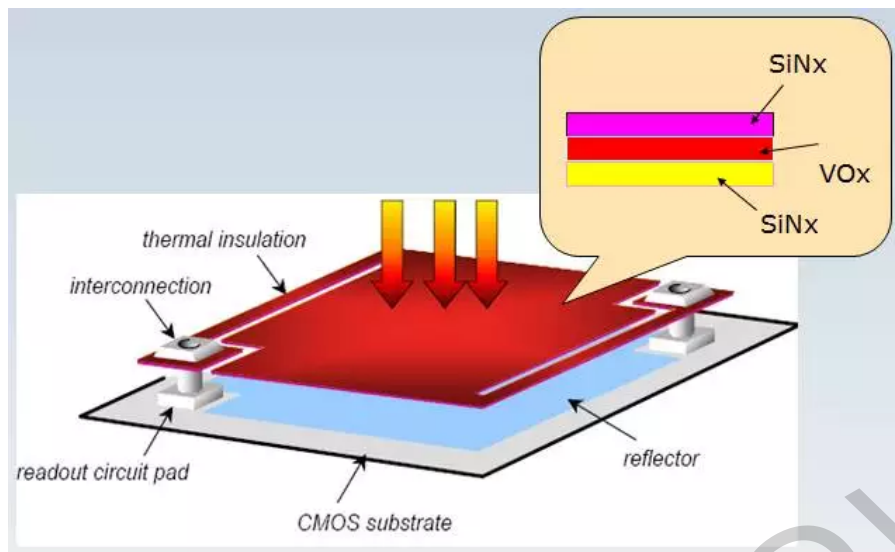
非制冷红外焦平面探测器虽然在灵敏度上与制冷器件有一定差距，但经过近十余年的发展，其在性价比上已经明显优于制冷型探测器，具有更加广阔的应用前景。

其中，微测辐射热计的技术路线战胜了热电堆/热电偶、铁电等其他类型，使其成为非制冷红外焦平面探测器的主流技术方向，并几乎占据了该领域的全部市场份额。

非制冷红外焦平面探测器**从技术上可分为微测辐射热计、读出电路、真空封装等三大模块**，这三大模块既有一定的独立性又相互影响，共同推动非制冷探测器的技术发展。

目前国内外相关研究机构和生产厂商都是围绕着这三大技术模块进行技术开发，在各个模块上各有侧重，形成了具有不同技术特点的非制冷探测器产品。

微测辐射热计



微测辐射热计像元结构示意图

上图为单个微测辐射热计的结构示意图，在硅衬底上通过MEMS技术生长出与桥面结构非常相似的像元，故而也称之为微桥。桥面通常由多层材料组成，包括用于吸收红外辐射能量的吸收层，和将温度变化转换成电压（或电流）变化的热敏层。桥臂和桥墩起到支撑桥面，并实现电连接的作用。

热敏层材料的选取对于微测辐射热计的灵敏度（NETD）有非常大的影响，目前最为常用的热敏材料包括氧化钒（ VO_x ）和多晶硅（a-Si）两类，相应的非制冷红外焦平面探测器也据此分成了两大技术阵营。

20世纪80年代末，美国的Honeywell公司在军方资助下率先研制出非制冷氧化钒微测辐射热计。多晶硅技术起步大约晚了十年，法国原子能委员会与信息技术实验室/红外实验室（CEA2LETI/LIR）从20世纪90年代初开始研究多晶硅薄膜，大约用了十年时间推出了多晶硅探测器产品。

氧化钒由于其更加突出的综合性能而成为非制冷红外焦平面探测器的主流技术路线，截至目前在全球市场上占据了超过80%的份额，多晶硅材料探测器所占市场份额还不到20%。

读出电路

非制冷红外焦平面探测器的读出电路将每个微测辐射热计的微小电阻变化以电信号的方式输出。由于微测辐射热计对于其衬底温度的变化非常敏感，所以一开始必须使用热电温控器（TEC）来保持非制冷探测器的焦平面温度稳定。

近年来随着读出电路设计水平的提高，一些抑制像元输出信号随温度漂移的补偿电路也逐渐加入读出电路设计中，从而可以实现无TEC应用，使得非制冷红外焦平面探测器在功耗、体积、成本等方面更具备优势。

真空封装技术

微测辐射热计接收目标红外辐射后的温度变化很微弱，为了使其上面的热量能够维持住，避免与空气分子进行热交换，需要将其置于真空环境下工作。

对非制冷红外焦平面探测器真空封装的要求是：优异且可靠的密闭性、具有高透过率的红外窗口、高成品率、低成本。

目前的封装技术可分为金属管壳、陶瓷管壳、晶圆级、像元级等，业内也常按照封装形式来对探测器产品进行分类。

金属管壳封装

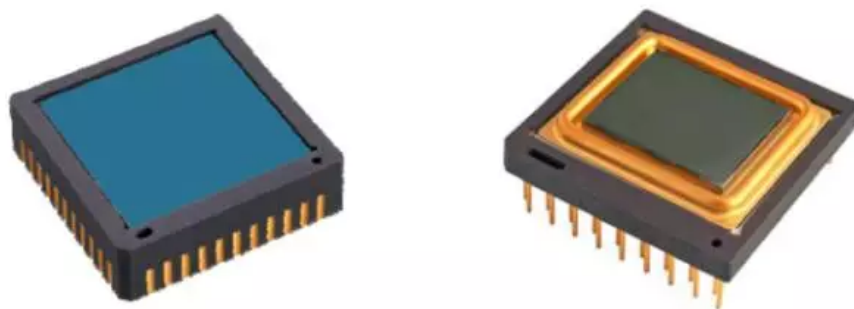
这是最早开始采用的封装技术，技术已非常成熟。但由于采用了金属管壳、TEC和吸气剂等成本较高的部件，导致其成本一直居高不下，使其在低成本器件上的应用受到限制。



非制冷红外焦平面的金属管壳封装

陶瓷管壳封装

这种封装形式得益于无TEC技术的发展，可显著减小封装后探测器的体积和重量，且从原材料成本和制造成本上都比传统的金属管壳封装大为降低，适合大批量生产。



非制冷红外焦平面的陶瓷管壳封装

晶圆级封装

晶圆级封装是刚刚进入实用阶段的封装技术。该技术需要制造与探测器晶圆相对应的另一片硅窗晶圆，将红外探测器芯片与硅窗精确对准，在真空腔体内将两片晶圆焊接在一起，最后再裂片成为一个个晶圆级红外探测器。晶圆级封装技术的集成度更高，工艺步骤更简单，更适合大批量和低成本生产。



非制冷红外焦平面的晶圆级封装

像元级封装技术

目前还处于研究阶段，离产品化还有相当距离。该技术相当于在目前的MEMS工艺过程中增加了一个封装步骤，在真空腔体内为每个像元微桥结构制造一个倒扣的微盖，将各个像元独立密封起来。像元级封装技术把封装整合进MEMS工艺过程中，简化了非制冷红外焦平面探测器的制造过程，使封装成本几乎降低到极致。

2

国内正追赶国外 技术市场双提速

进入21世纪以来，非制冷红外焦平面探测器的技术发展明显提速，在短短十几年间取得了产品化的长足进步。

但由于技术本身所具有的复杂性与难度，目前在非制冷红外焦平面探测器产品上居于领先地位的厂商仍然**主要集中在西方几个技术强国**，包括美国的FLIR、DRS、Raytheon、L-3，法国的ULIS，英国的BAE，以色列的SCD、日本的NEC等。

近几年来，中国在非制冷红外焦平面探测器技术上进步神速，在世界上争得了一席之地，代表厂商有北方广微、烟台艾睿、杭州大立、武汉高德等。

国内外主要厂商的技术对比情况如表所示。从表中可以看出，目前国内外产品的几项主要技术指标中，热敏材料、阵列规模、热响应时间、NETD等基本居于同一水平，在像元尺寸方面国外厂商具有一定领先优势。

但在表中未列出的封装技术方面，国内明显落后于国外。目前国内产品仍然以金属封装为主，陶瓷封装刚开始起步，而国外厂商已逐渐淘汰金属封装，完全进入了陶瓷封装时代，甚至FLIR的晶圆级封装产品已经在批量供货。

主要厂商技术对比

厂商	热敏材料	阵列规模	像元尺寸	热响应时间	NETD	最新技术进展
FLIR	VOx	336×256 640×512	25μm 17μm	10~15ms	< 40mK	640×512@12μm , 40mK
ULIS	a-Si	160×120 384×288 640×480	25μm 17μm	< 10ms	50~80mK	640×480@12μm , 6.6ms , 53mK
DRS	VOx	320×240 640×480	25μm 17μm	13ms	< 50mK	1024×768@17μm
BAE	VOx	320×240 640×480	28μm 17μm	4~20ms	<50mK	1024×768@17μm
L-3	a-Si	320×240 640×480	30μm 17μm	~10ms	50mK 35mK	1024×768@17μm
NEC	VOx	320×240 640×480	23.5μm 17μm	~15ms	60~70mK	640×480@12μm , 60mK
北方广微	VOx	384×288 640×512	25μm 20μm	8~15ms	< 40mK	640×512@17μm , 40mK

目前FLIR无论是在技术水平还是在出货量上，都稳居全球首位，成为当之无愧的行业老大。ULIS是多晶硅路线的领军者，其出货量排在全球第二。FLIR和ULIS在中国市场上也是出货量最多的，但由于历史和政治原因，ULIS在中国市场的占有率要高于FLIR。其他几家厂商，如DRS、BAE、SCD等，虽然也具有较高技术水平和产能，但是其产品主要在国外销售，国内很少见到。

近年来，随着中国军方核心器件国产化要求的普及，国内厂商获得了宝贵的发展契机，以北方广微为代表的国产非制冷红外焦平面探测器逐渐进入军方定型装备，取得批量订单。

由于起步较早，北方广微的技术水平在国内是最为成熟稳定的，出货量在国内厂商中也遥遥领先。

近两年烟台艾睿的技术水平发展神速，在新产品开发上跑在了国内前列，据报道于2016年推出了 $1024 \times 768/14 \mu\text{m}$ 的探测器。

杭州大立作为国内仅有的多晶硅探测器厂商，其制造的探测器主要用于本公司的民品整机产品，也已经具有一定规模的产量。

国内非制冷红外焦平面探测器技术比国外起步晚了近二十年，虽然经过近年来的努力追赶，已经将技术差距缩短到几年内，但是从技术的先进性和成本控制上仍然居于劣势。

国内市场上，国产器件得益于政策支持和军方需求的激增，在军品市场上有非常好的机会。国内厂家必须借助军品订货量的大幅增长来实现探测器制造成本的下降，从而为国产器件在民品市场和海外市场上创造更大的竞争力。

3

发展趋势已明 并以市场需求为导向

综观主要非制冷探测器生产厂商的技术发展情况，也呈现出一种以市场需求为导向的特点。预测未来几年非制冷红外焦平面探测器的技术发展和市场需求将呈现出以下趋势：

- 像元尺寸不断减小；
- 面阵规模不断增大；
- 金属管壳封装探测器因其高昂的封装成本会逐渐退出市场，陶瓷管壳封装探测器进入全面推广时期，晶圆级封装的探测器以其更低的成本优势在民用市场开始快速增长；
- 集成了数字积分、非均匀性校正和其它数字图像处理功能的片上处理技术成为非制冷红外焦平面探测器读出电路的重要发展方向，在探测器读出电路中集成处理器和存储器将逐渐成为现实；
- 响应波段向中波以及太赫兹波段的扩展。

—END—