

## 定向红外对抗系统中的激光器技术

孟冬冬<sup>1,2</sup>, 张鸿博<sup>1</sup>, 李明山<sup>1</sup>, 林蔚然<sup>1</sup>, 沈兆国<sup>3</sup>, 张杰<sup>3</sup>, 樊仲维<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 洛阳电光设备研究所, 洛阳 471000)

**摘要:** 便携式防空系统(MANPADs)、各类红外制导导弹等红外热寻的武器是民用、军用飞机重要的威胁。随着红外成像探测器被广泛用于热寻的制导武器,传统的红外干扰机、曳光弹难以形成有效对抗,以红外波段激光作为光源的红外定向对抗(DIRCM)系统是目前对抗热寻的武器的有效手段。文中回顾了目前有代表性的红外定向对抗系统,分析阐述用于红外定向对抗系统中的激光器关键技术,给出红外成像探测器致眩区域计算方法,并讨论展望红外对抗激光器技术的发展趋势。

**关键词:** 红外定向对抗; 便携式防空系统; 光参量振荡; 光泵半导体激光器; 量子级联激光器  
中图分类号: V271; TN21 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1105009

## Laser technology for direct IR countermeasure system

Meng Dongdong<sup>1,2</sup>, Zhang Hongbo<sup>1</sup>, Li Mingshan<sup>1</sup>, Lin Weiran<sup>1</sup>,  
Shen Zhaoguo<sup>3</sup>, Zhang Jie<sup>3</sup>, Fan Zhongwei<sup>1\*</sup>

(1. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
3. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Heat seeking weapons such as man-portable air defense system (MANPADs), various IR guiding missile are the main threaten for civil aircraft and military aircraft. As the appearance of IR imaging seeker, the effect of traditional IR interference equipment and infrared flares are limited. Otherwise, direct IR countermeasure (DIRCM) system has been effective means. In this paper, the international research on DIRCM and key techniques for laser of DIRCM was reviewed. Furthermore, calculating method for dazzling area of imaging detector was given. At the same time, the research trends of DIRCM and laser of DIRCM were forecasted in the future.

**Key words:** direct IR countermeasure; man-portable air defense system; optical parametric oscillation; optically-pumped semiconductor disk laser; quantum-cascade laser

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104500)

作者简介: 孟冬冬(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电技术、激光技术方面的研究。Email: mjf09@163.com

通讯作者: 樊仲维(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事大型复杂激光技术等方面的研究。Email: fanzhongwei@aoc.ac.cn

## 0 引言

各式热寻的武器已成为民用、军用飞机的重要的威胁，热寻的武器包括便携式防空系统(MANPADs)、各类红外制导导弹等。其中便携式防空系统是首要的威胁，有数据估计显示，目前全球扩散的便携式防空系统达到近百万套，被各国军队、非政府武装广泛装备，由于大部分便携式防空系统有效射程 2~7 km、射高 2~5 km，飞行马赫数 2~6，且价格低廉、携带方便、可肩扛式发射，因此对直升机、商务飞机、运输机、轰炸机等各类飞机特别是在 1 000 m 以下低空飞行状态时可以进行有效打击，据统计显示，便携式防空系统自诞生以来，是击落飞机最多的防空武器系统。另外，在空空制导武器中，红外制导也是主流的制导方式，军用飞机在面临空空红外制导武器时也需要有效的防护手段，提高战场生存率。

随着红外制导技术的发展，特别是红外面阵探测器的应用，传统的红外干扰，如红外诱饵弹、红外烟幕等手段难以实现有限的制导干扰，因此，DIRCM

系统成为各国竞相研究的热点，在 DIRCM 系统的研究中，需要解决的主要的技术问题之一就是有效的红外对抗激光光源。在红外对抗激光器的研究中，伴随着 DIRCM 系统的应用牵引从红外激光诱骗(jamming)发展至红外致盲(dazzling)，激光器的功率在不断提升、波段覆盖向全波段发展、光束质量也不断优化提升。

## 1 DIRCM 系统研究进展和发展趋势

### 1.1 定向红外对抗工作方式

利用激光进行定向红外对抗主要有欺骗、致眩、毁伤三种方式，随着制导技术的发展，特别是红外焦平面成像探测器的应用，诱骗式干扰难以达到对抗效果，对抗方式也从诱骗式向致眩发展，探测器毁伤是未来可选择的一种对抗方式，但取决于平台的承载性和激光光源体积的大幅度缩小。表 1<sup>[1]</sup>给出了不同对抗方式下，2 km 范围内定向对抗所需激光光源的功率及工作特点，由表中的数据可以看出，实现 2 km 距离的激光致眩，对激光功率的要求在 2~10 W，工作方式为连续或高重复频率脉冲式。

表 1 带内激光辐射对光电探测器的影响(目标距离 2 km)

Tab.1 Effect of laser radiation on PDA(Distance to the target 2 km)

Manifestation of action	Jamming	Dazzling	Breakdown of detector
Mean power of laser, W	0.5-10 Matched modulation frequency	2-10 cW regime or high frequency of pulse train	10-200(>0.1 J) cw regime or high frequency of pulse train
Brief description of the effect	Creation of a false target. Relatively low SNR	Reversible saturation of the detector. High SNR	cw regime or high frequency of pulse train. Reversible saturation of the detector. Irreversible saturation of the detector.
Application	IR imaging seeker	IR imaging seeker ThVE	IR imaging seeker ThVE

### 1.2 定向红外对抗装备情况

国外对 DIRCM 系统与技术的研究自 20 世纪 90 年代开始，机载平台导弹预警技术、激光光束高精度瞄准技术不断进步，推动 DIRCM 系统成为现实的装备，其性能也不断提升。国外早期采用高功率氙灯、等离子灯作为干扰红外制导武器的辐射源，典型的代表产品为美军的 AN/ALQ-157 IRCM 系统。随着激光技术的发展，自 21 世纪起，以红外激光为辐射光源的定向对抗成为技术主流，涌现出各类飞机

平台的 DIRCM 装备。在装备方面，美国的诺普罗斯-格鲁门公司是最具有代表性的机构，该机构研发的 DIRCM 系统已装备数百架固定翼、旋转翼飞机。另外，英国的 BAE 公司、Selex Galileo 公司以及以色列 Elbit 系统公司也研发出类似装备，在美国、欧盟的飞机上用于战场防御。目前国外主要的定向红外对抗系统均采用激光光源，激光定向红外对抗系统在民用方面已应用在保护特殊用途的商用客机、政要飞机、民用大型客机等，具体如表 2<sup>[2]</sup>所示。

表 2 国外主要的 DIRCM 系统  
Tab.2 Foreign major DIRCM systems

Designation	Platform	Manufacturer
AAQ-24(V)Nemesis DIRCM system	Fixed-wing aircraft	USA Northrop Grumman, BAE System and Boeing
AAQ-24(V)large aircraft IR countermeasures	Military transport airborne Warning aircraft	USA Northrop Grumman, BAE System and Boeing
Common IR countermeasures (CIRCM)system	Small fixed-wing aircraft helicopter	USA Northrop Grumman, BAE System and Boeing
Tactical aircraft directed IR countermeasures (TADIRCM)	Tactical fixed-wing aircraft, Attack helicopter	USA, Sander
MUSIC DIRCM System	Military transport helicopter	Israel, Elbit system
AN/ALQ-212 advanced threat IR countermeasures (ATIRCM)	Helicopter	USA, BAE System
MIYSIS DIRCM System	Small fixed-wing aircraft, helicopter UAV	UK, Selex ES
ECLIPSE DIRCM System	Fixed-wing aircraft, helicopter	UK, Selex Galileo
MONTA DIRCM System	Fixed-wing aircraft, helicopter	Spain, Indra
ELT-572(v)2 DIRCM System	Helicopter	Italy, Electronica Spa

图 1 为 诺斯罗普-格鲁门公司研发并广泛装备的 AAQ-24 DIRCM 系统<sup>[3]</sup>(底部为红激光器),及多波段 Viper 激光器<sup>[4]</sup>。

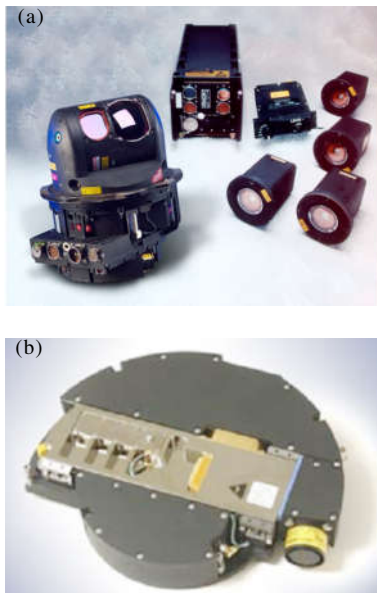


图 1 AAQ-24 DIRCM 系统及 Viper 激光器  
Fig.1 AAQ-24 DIRCM system and Viper laser

图 2 为俄罗斯 Prezident-s 专机配置的定向红外对抗系统,采用光参量振荡的方式产生红外激光,在

面临 MANPADS 威胁时保护飞机。



图 2 俄罗斯 Prezident-s 专机用于防御 MANPADS 的 DIRCM 系统  
Fig.2 DIRCM system of Russia Prezident-s airplane for MANPADS defence

通用定向红外对抗系统(CIRCM) 实现了多波段输出并具有轻量化、高可靠的特点,2015 年 9 月,美国诺斯罗普-格鲁曼公司获得美国陆军的通用定向红外对抗系统的初始生产合同。诺斯罗普-格鲁曼公司的 NH1NH 系统由英国 Selex Galileo 公司提供的轻型跟瞄组件 (ECLIPES) 和美国日光防务公司(DayLight Defense) Solaris 激光器组成。如图 3 所示。

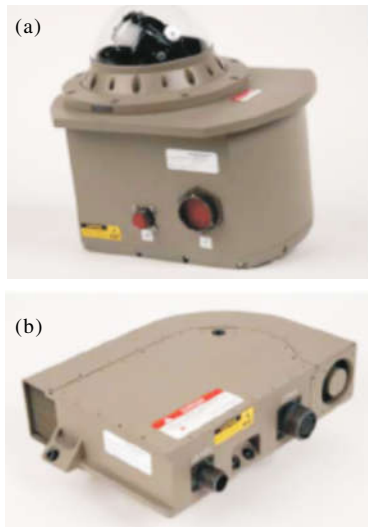


图 3 ECLIPES 对抗系统及 Solaris 激光器<sup>[5]</sup>  
Fig.3 ECLIPES active defense system and Solaris laser<sup>[5]</sup>

### 1.3 定向红外对抗发展趋势

随着制导技术的进步与作战的多样化,DIRCM 系统技术也面临着严峻挑战,主要发展趋势如下。

(1) 发展具有更高输出功率和光谱覆盖范围的定向红外对抗激光源,实际应用中对抗机制从干扰向致眩转变

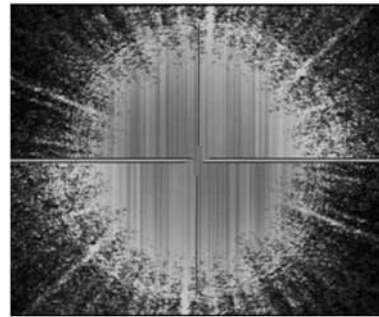
红外制导方式正向多波段复合制导、多模制导、多传感器信息融合方向发展,其中双色复合的方式有短中复合、中长复合、中中复合等方式。目前飞行器探测与反导对抗已呈现出全波段范围、全方位的对抗趋势,因此对抗光源的光谱需要覆盖或者落在红外探测器的响应范围。另外,随着凝视型焦平面红外探测器阵列的应用,红外制导能力和抗干扰能力得到了极大的加强,对抗方式也从传统的点源欺骗式转变为致眩对抗,对激光功率的要求进一步提高,致眩式对抗的典型功率范围在 2~10 W,这就要求激光源的功率和波长覆盖范围都要提高,以满足 DIRCM 系统的应用需求。

致眩对抗通过使红外探测器饱和进而通过“串音”效应使探测器暂时失效,不能正常成像。红外探测器灵敏度可达  $1 \times 10^{-9}$ ,红外探测器的光信号积分时间通常为几微秒至几百毫秒,而产生电荷的时间为  $10^{-12}$  的量级,因此电荷有足够的时间溢出,在有大量电荷存在情况下,电荷的收集、转移、传输过程会出现“串音”效应,如果再增加激光强度,电荷的“串音”效应加剧,电荷溢出到探测器整个像面,产生

全域饱和。虽然光饱和”串音“现象并没有对探测器材料造成破坏,但可以使探测系统无法正常工作。图 4 为探测器致眩画面及某型使用 HgCdTe 中波探测器光学透镜前的饱和阈值曲线,由曲线可以看出,当功率密度  $10^7 \text{ pW/cm}^2$  时,探测器饱和像素点为 60 个,进一步增大功率可以通过串音效应使更多的像素区域饱和。饱和像素区域半径与物平面上的辐射强度关系<sup>[6-7]</sup>:

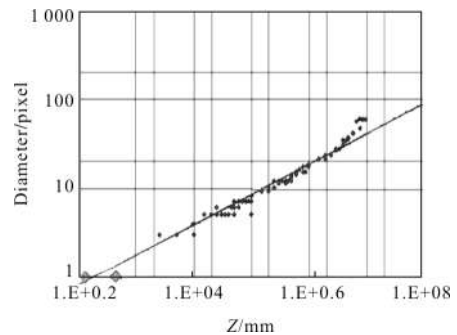
$$\chi_{\text{sat}} = \sqrt[3]{4/\pi(I_0/I_{\text{sat}})} \quad (1)$$

式中: $\chi_{\text{sat}}$  为饱和像素区域半径; $I_0$  为物平面上的激光辐射强度; $I_{\text{sat}}$  为相对于单像素饱和阈值的激光辐射强度。



(a) 红外探测器致眩图像<sup>[6-7]</sup>

(a) Dazzling image of infrared detector<sup>[6-7]</sup>



(b) HgCdTe 饱和曲线<sup>[6-7]</sup>

(b) HgCdTe saturated curve<sup>[6-7]</sup>

图 4 红外探测器致眩图像及 HgCdTe 饱和曲线  
Fig.4 Dazzling image of infrared detector and HgCdTe saturated curve

### (2) 分布孔径定向红外对抗技术

美国陆军近年来将分布孔径定向红外对抗(DIRCM)系统作为一个发展方向,分布式孔径定向对抗技术采用激光孔径与导弹逼近告警组件一体化设计,采用一个高功率激光器经过光纤分束向多个传感器位置发射激光,分布式孔径代替传统的光电

跟瞄系统,体现了 DIRCM 系统与导弹告警系统的一体化设计及技术融合趋势,也更加体现了 DIRCM 系统已经成为电子战的系统绑定技术<sup>[2]</sup>。

### (3) 低功耗、轻量化技术

低功耗、轻量化一直是机载设备的发展方向,定向红外对抗系统的功耗、体积直接决定了其在不同机载平台的可装备性,目前定向红外对抗系统已经可以安装在大型客机、运输机、特种作战飞机、直升机等平台,但随着无人机的快速涌现,对于高价值无人机的红外制导攻击保护势必成为潜在的需求,由于无人机的续航能力及平台限制,进一步要求满足搭载设备的低功耗、轻量化。

## 2 红外对抗激光器现状及发展趋势

飞机平台与 MANPADS 等红外制导武器对抗过程中,从导弹逼近告警到引导 DIRCM 系统激光光束照射导弹使之偏离攻击目标,整个过程在几秒钟内完成<sup>[9]</sup>,这就对红外对抗激光器的性能提出了特殊的要求,DIRCM 系统要求激光器“目标上有效的作用能量”<sup>[9]</sup>满足对抗的功率需求。

### (1) 光谱覆盖度

多样化的热寻的制导武器的红外探测器响应波段可覆盖短波、中波、长波范围,如第一代“SAM-7”地空导弹、“Redeye”红外末制导武器采用的点源探测器大部分采用非制冷型 PbS,响应波段 1.5~2.8  $\mu\text{m}$ ,第二代“SAM-14”、“SAM-16”“FN-8”等红外制导武器,响应波段 1.5~2.8  $\mu\text{m}$  & 3~5  $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>。70 年代中后期,红外制导武器从点源制导向成像制导发展,这一时期,8~14  $\mu\text{m}$  碲镉汞(HdCdTe)线列也走向实用,红外焦平面阵列研制成功,在此基础上,叠层中、长波双色探测器已成为新一代红外焦平面探测器的突出代表,丰富了红外制导武器的制导波段。以红外空空制导武器为例,双色复合红外制导有短中波组合、中长波组合、中中波组合等方式,而最为理想的就是中长波组合<sup>[11]</sup>。因此,若要实现对红外制导武器的有效对抗,红外对抗激光器光谱需要在 1~3  $\mu\text{m}$ 、3~5  $\mu\text{m}$ 、8~14  $\mu\text{m}$  带内,这样才能与红外制导武器的探测敏感波段匹配,实现可靠的对抗。

### (2) 光束质量

为了保证照射到红外制导武器导引头上的激光能量足够集中,结合实际作战对抗距离,实际的发散

角接近 1 mrad 较为实用,虽然理论上通过光学系统可以将激光扩束压窄发散角,但是高光束质量的激光将会减小激光发射光学系统的口径,有利于 DIRCM 系统的小型化,而且为了保证有效的激光作用,这里的激光发散角已经包含光束漂移的影响,在对抗工作周期内,激光光束的漂移应被严格控制。

### (3) 启动时间

由于对抗时间通常只有几秒,要求激光器在几十毫秒内即刻实现指标要求的满功率、指向稳定的全参数输出。如果采用全固态激光器,需要特别注意热焦距建立的时间应满足系统对抗需求,或者激光器设计时留有一定容差,保证激光器快速达到对抗性能。

### (4) 体积、效率及可靠性

对于 DIRCM 系统来说,小型、高效的红外对抗激光器可提高平台适装性、降低系统功耗;坚固、可靠的性能可适应机载平台的振动、冲击及宽温工作等严苛的工作环境,因此,红外对抗激光器的小型化、高效率及可靠性一直是 DIRCM 的固有需求。

在 DIRCM 系统的需求牵引下,红外对抗激光器的技术体制也在不断发展进步,在实现方式上主要有光参量振荡(OPO)方式、量子级联激光器、光纤激光器、光泵半导体激光器一种或多种组合使用的方式。

## 2.1 OPO 调谐方式

OPO 调谐方式一直是红外定向对抗激光器的研究热点,人们致力于研究高脉冲能量、高重复频率、高光束质量中、长波激光的调谐输出。OPO 调谐方式基频光的获得方式上有固体激光器和光纤激光器两种方式,在调谐晶体的应用中 PPLN 晶体与 ZGP 晶体因非线性特性优异最具有代表性,SELEX GALILEO 公司的多波段激光器采用了 PPLN 与 ZGP 级联的方式获得多波长调谐输出<sup>[6]</sup>,激光器外形如图 5 所示。



图 5 SELEX Model 160 激光器  
Fig.5 SELEX Model 160 laser



在 OPO 技术路线中具有代表性的为挪威国防研究局与法德圣易露斯研究所(ISL)的报道,其突出的研究成果为实现了 OPO 方式下的多波长调谐及高光束质量输出。挪威国防研究局 Espen Lippert 等

人采用 1 907 nm 掺 Tm 光纤激光器泵浦 ZGP 获得高重频、中长波高光束质量激光输出。其采用的光路方案如图 6 所示<sup>[12]</sup>。

2010 年, Espen Lippert 等人利用 70 W 1 907 nm

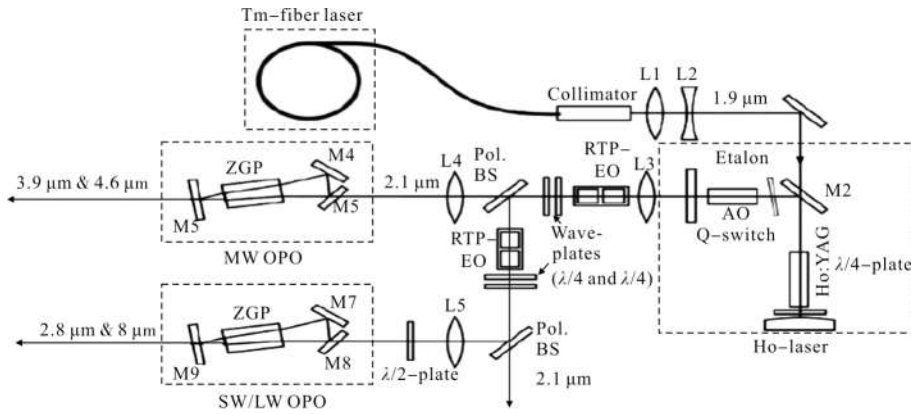


图 6 掺 Tm 光纤激光器泵浦 ZGP 光路图

Fig.6 Layout of a Tm-fiber laser pumps ZGP

掺 Tm 光纤激光器双程泵浦掺杂浓度 0.72% 长度 25 mm 的 Ho:YAG 晶体棒中,泵浦光斑 700 μm,获得了重频 45 kHz 下 42 W 平均功率输出,光束质量  $M^2$  因子 1.7,脉冲宽度 24 ns,用 37.7 W 的 2 090 nm 光泵浦“V”型 OPO 腔,获得 22 W 的 3~5 μm 中红外输出,光-光效率 58%,斜率效率 75%,光束质量  $M^2$  因子约 1.4。同年,Lippert 等人采用三镜环形腔结构,得到了 8.05 μm 平均功率 1.5 W 的高水平输出。实验采用的泵浦源是重复频率为 38 kHz 声光调 Q 运转的 Ho:YAG 振荡器,通过在 Ho:YAG 谐振腔内插入石英材质的 F-P 标准具选择出 2.090 μm 波长,因为相对于 2.096 μm,该波长能够产生更高的功率输出,通过让 2.09 μm 的泵浦光两次通过 ZGP 晶体来达到降低阈值、提高效率的目的。通过角度调谐,当波长调到 8.05 μm 时,输出平均功率达到 1.5 W,转换效率为 4.4%,互相垂直的两个方向的光束质量  $M^2$  因子分别为 1.9 和 1.5,光谱半高宽为 50 nm。

另外,法德圣易露斯研究所(ISL)也在 OPO 调谐输出方面进行长期的研究,2017 年该研究机构 Martin Schellhorn 等人报道了高能量脉冲、高光束质量中波红外输出的 OPO 研究成果,在 100 Hz 重复频率下,中波红外激光单脉冲能量达到 33 mJ,在光束质量改进方面具有显著特色,Martin Schellhorn 等人采用“fractional image-rotation enhancement (FIRE)”共

振补偿的 OPO 方式,实现了信号光 3.8 μm 光束质量  $M^2$  因子约为 1.5、闲频光 4.45 μm 光束质量  $M^2$  因子约为 2 的激光输出。其设计光路如图 7 所示<sup>[13]</sup>。

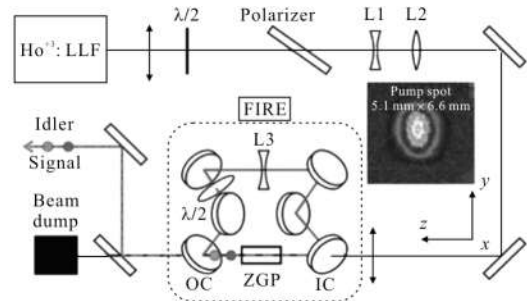


图 7 高能量脉冲、高光束质量中波红外 FIRE 腔光路

Fig.7 Schematic outline of the FIRE ZGP OPO setup for high-pulse-energy, high-beam quality mid-infrared laser output

## 2.2 光泵半导体激光器

光泵半导体激光器(OPSDL)是近 10 年来激光器发展的一个突出方向,其原理如图 8 所示<sup>[14]</sup>,OPSDL Chip 是一个外延生长基于 GaSb 的异质结构,其中,包含一个分布式的布拉格反射镜 (DBR),DBR 作为 OPSDL 腔的全反射镜,半导体激活区生长在 DBR 的前端面,线性 OPSDL 腔终端为一个外部的平凹输出镜。激活区由一个光纤耦合的 980 nm 二极管激光模块泵浦,光纤输出的泵浦光经聚焦透镜聚焦到 OPSDL 薄片上在薄片表面形成一个直径几百微米

的泵浦光点,泵浦光点直径和 OPSDL 腔模在良好匹配的情况下可获得接近衍射极限 2~2.5  $\mu\text{m}$  激光输出。目前,OPSDL 已可以实现短波(1.X  $\mu\text{m}$ )-中波的激光输出,美国空军实验室(AFRL)的公开文献中报道了 OPSDL 在 3~6  $\mu\text{m}$  波带的输出<sup>[15]</sup>。另外,英国克莱德大学报道了 OPSDL 方式在近红外 2  $\mu\text{m}$  的输出,连续输出功率 5 W(光光转换效率大于 25%),脉冲输出 16 W,脉冲宽度 112 ns<sup>[16]</sup>。

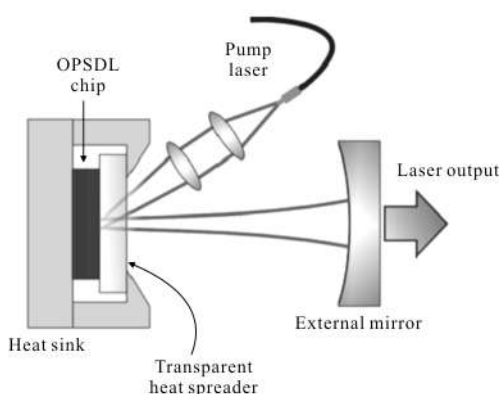


图 8 基于 GaSb 的 OPSDL 示意图

Fig.8 Schematic of OPSDL set-up based on GaSb

### 2.3 量子级联激光器(QCL)

量子级联激光器区别于半导体激光器,半导体激光器发光机理是电子与空穴复合产生光子。量子级联激光器是在半导体低维材料的基础上,多级耦合量子阱串接形成有源区,量子阱间仅有电子在运动,实现光子倍增。量子级联激光器输出可以覆盖近红外至远红外的波带,特别是在中、长波波带更具有优势,在中、长波的输出波段为 3.4~25  $\mu\text{m}$ 。量子级联激光器以脉冲形式输出时,脉宽可在 ns 量级,重复频率可达 100 kHz<sup>[1]</sup>。在红外制导对抗领域,QCL 因其辐射光可覆盖 3~12  $\mu\text{m}$  中波红外、长波红外两个大气窗口,因此显得尤为潜力。

#### (1) QCL 研究进展

1971 年,前苏联约飞技术物理研究所 Kazarinov 和 Suris 提出了强电场下多量子阱中量子化的电子态之间可以实现光放大的概念<sup>[17]</sup>,1994 年,贝尔实验室试验成功第一个量子级联激光器<sup>[18]</sup>。2002 年,在 QCL 的发展进程中重要的标志性进展为第一款室温连续 9.1  $\mu\text{m}$  QCLs 的报道<sup>[19]</sup>。2004 年,DAPAR 资助两个助推 QCL 发展的项目,第一个为 L-PAS (laser

photoacoustic spectroscopy) 项目,该项目的进展使 QCL 从实验室走向实用。第二个为 EMIL(Efficient Mid Wave Infrared laser, EMIL),通过 Au:Sn 硬焊料匹配 AlN 提高热扩散系数等工艺及材料创新以及采用非共振抽取(NRE)设计方式突破了传统 QCL 利用纵向光学声子共振对粒子抽取这一概念,使 QCLs 输出功率从几十 mW 提升至 1 W 以上<sup>[20]</sup>。NRE 设计方法的突破促进了 QCL 的高功率输出、高效率及波长拓展。

国外对 QCL 研究领先的单位有美国西北大学、Daylight Solutions 和 Pranalytica 公司等单位,Daylight Solutions 和 Pranalytica 公司在大功率连续工作模式中红外量子级联激光器方面突破其高温工作等核心技术,开发出商用较高输出功率的中红外量子级联激光器,并且将技术拓展到外腔宽调谐量子级联激光器中,近年来引起美国军方的关注并获得资金支持。表 3 为 Pranalytica 公司研究人员 2015 年发表的室温下商用蝶形封装 QCL 指标<sup>[21]</sup>。

表 3 商用 QCLs 指标

Tab.3 Performance of commercially available QCLs

Wavelength/ $\mu\text{m}$	Output power/W	WPE
-4.6	>4.0	>16%
-4.0	>2.5	~10%
-7.1	>1.4	~10%
-9.3	>2.0	~12%

近期,美国西北大学报道了 3~12  $\mu\text{m}$ ,室温连续输出功率达到 5.1 W 的 QCLs 成果<sup>[22]</sup>,在脉冲式输出的 QCLs 研究方面,单激光器峰值功率达到 203 W,占空比 0.02%,脉冲宽度 200 ns,亮度达 156  $\text{MW cm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ <sup>[23]</sup>。

#### (2) QCL 的封装及功率放大

QCL 的封装对系统级应用非常重要,为确保 QCL 器件乃至整个系统长期可靠,采用 TEC 制冷器有效消除 QCL 芯片自身产生的热,并将热量传送到外部;此外,组件还需要把 QCL 光功率输出有效耦合到外部最后,整个封装需要气密结构,以进一步提升器件可靠性,如图 9 为 Pranalytica 公司典型的蝶型 QCL 组件封装。

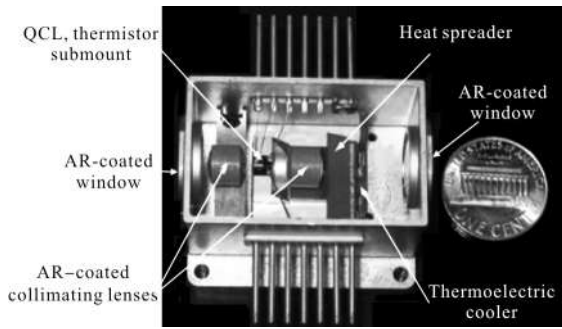


图 9 Pranalytica 公司典型的蝶型 QCL 组件封装

Fig.9 Photograph of typical butterfly-style package of Pranalytica company

(3) QCLs 光束组合放大

QCL 可以采用外腔光谱光束组合(Wavelength Beam Combining, WBC)的方式进行光谱组合和功率放大,即通过线列的方式实现多波长、高功率集成,进而通过光学整形系统实现高光束质量对抗光束输出,原理图如图 10 所示<sup>[24]</sup>。在多线列的组合中,QCL 的间距应尽可能小,最好在 100~150  $\mu\text{m}$  之间<sup>[25]</sup>。

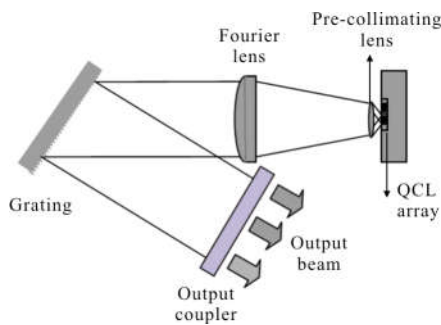
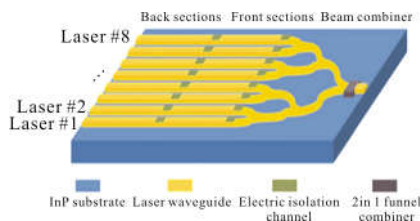


图 10 QCL 对抗激光器原理图

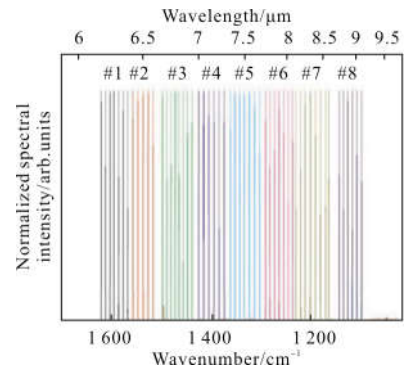
Fig.10 Schematic of QCL countermeasure laser

美国西北大学采用采样光栅分布式反馈(SGDFB)技术,实现了室温下 QCL 的宽带、电调谐,并实现了对 QCL 的集成化设计,图 11 为其报道的八个 SGDFB QCL 的集成原理图及波长调谐图<sup>[26]</sup>, 8 个间隔窄至 100  $\mu\text{m}$  的 SGDFB QCL 通过片上光束耦合



(a) SGDFB 激光线列

(a) SGDFB laser array



(b) SGDFB 激光线列合成光谱

(b) Combined spectrum of SGDFB laser array

图 11 SGDFB 激光线列和 SGDFB 激光线列合成光谱

Fig.11 SGDFB laser array and its combined spectrum

器进行耦合,实现 6~10  $\mu\text{m}$  波长共孔径输出,耦合芯片紧凑、可快速电调谐并且对冲击振动不敏感。光束耦合器采用多个曲率波导,降低散射损耗,波导曲率 1 800  $\mu\text{m}$ ,波导的脊宽 10  $\mu\text{m}$ ,以实现基模输出。

在实际装备应用中,2012 年 2 月 6 日,Northrop Grumman 公司联合 Selex Galileo 和 Daylight Solutions 公司获得美国军方支持的第五代红外对抗系统(CIRCM)开发合同,其主要技术特点是利用量子级联激光器作为对抗辐射源,以降低系统的质量提高可靠性。目前,多波段的紧凑型量子级联激光器输出功率可达到 20 W,美国 Daylight 公司采用外腔 WBC 方法,获得了超过 15 W 的激光输出,产品图如图 12 所示。未来,100 W~1 kW、 $\text{M}^2 < 2$  的高功率的量子级联激光器正在研发之中。



图 12 Daylight Solutions 公司量子级联激光器

Fig.12 QCL of Daylight Solutions company

2.3 国内研究现状和水平

国内高校、研究所近年开展中、长波激光研究,大多采用 OPO 的方式,在变频晶体的使用上差异较



大。一种技术途径为采用掺 Ho 激光介质产生 2  $\mu\text{m}$  激光,进而泵浦 ZGP 产生 3~5  $\mu\text{m}$  或 8~12  $\mu\text{m}$  高重频激光。另外一种技术途径,采用 PPLN 调谐方式实现中波红外激光输出,波长调谐范围可在 1.5~4.3  $\mu\text{m}$  之间。在量子级联激光器方面,国内相关科研院所开展了多年的研究,制备出中、长波的 QCLs<sup>[27]</sup>。1998 年,国内第一个量子级联激光器与第一个中红外分布反馈量子级联激光器分别于 1998 年、2004 年报道。近几年,国内成功研制出室温脉冲分布反馈量子级联激光器,可在低阈值电流密度条件下工作<sup>[29]</sup>。

就定向红外对抗效果评估验证方面,国内也开展了相关研究,以中、长波红外调谐输出的为主,目前在 DIRCM 需求的全波段红外对抗激光器方面,尚未见应用产品报道。

### 2.3 多波段红外对抗激光器系统技术趋势

OPO 技术、量子级联激光器、光泵半导体激光器以及光纤激光器技术的不断进步使红外对抗多波段激光器系统方案有了更灵活的技术选择,如:短波波段采用 2  $\mu\text{m}$  光纤激光器,中、长波采用量子级联激光器,通过光束整形、耦合的方式实现多波长输出;采用 OPO 调谐与量子级联激光器结合的方式实现多波段输出等,另外,光泵半导体激光器也是极具应用潜力的单元技术。各个技术方向的成熟度、器件的性能也制约着多波段红外对抗激光器的系统方案。定向红外对抗激光器发展趋势如下:

(1) 定向对抗激光器向着微芯片化、集成化方向发展,以适应载荷平台的多样化适装

1) 采用固体激光器的 OPO 技术,特别是基频光的小型化需要重点突破,微芯片固体激光技术同时具备短脉冲、体积小的优势,是固体激光器技术途径的发展方向之一;

2) 量子级联技术中,多个 QCL、合束波导的芯片化集成在小型化方面的优越性使其具有较大的发展优势;

3) 光纤激光器、光泵半导体激光器在多波段集成方面可以提供更为灵活的技术选择,具备成为组件技术的条件,在单元技术的发展上具有一定潜力。

(2) 定向对抗激光器向着高功率、高光束质量、高指向性的多波段输出技术发展,以适应有效对抗的应用需求

1) 定向对抗应用中要求有效的激光能量作用于

制导探测器,高功率、高光束质量的激光输出有助于提高对抗距离和对抗效果,多波段激光输出有利于对抗红外复合制导武器;

2) 高精度激光光束的指向性将是决定对抗激光光源能否在有效对抗时间内稳定作用于制导探测器的关键因素,因此在激光器设计中需要特别关注激光光束的指向精度,需对其精确设计、测试。

随着国内激光技术的不断进步和器件的实用化进步,多波段红外对抗激光器也将会在装备中逐渐得到应用,为电子对抗提供不可或缺的技术支撑。

### 3 结束语

综上,航空飞行器正在向着多样化发展,机载 DIRCM 的轻量化、多平台适装是必然趋势,以便在电子对抗中消除热寻的武器的威胁,保护飞行器。DIRCM 的主要的功耗组件红外对抗激光器也在不断寻求新的技术体制突破,OPO 技术成熟度相对较高,而光泵半导体激光器和量子级联激光器在体积、波长拓展、高功率集成方面具有优势,在系统应用中具有潜在优势。定向红外对抗激光器将向着小型化、高功率、高光束质量、高指向精度的方向发展。

### 参考文献:

- [1] Abramov P I, Kuznetsov E V, Kvortsov L A. Prospects of using quantum -cascade lasers in optoelectronic countermeasure systems: review [J]. *Journal of Optical Technology*, 2017, 84: 331.
- [2] Fan Jinxiang, Li Liang, Li Wenjun. Development of direct infrared countermeasure system and technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S3): 789-794. (in Chinese) 范晋祥,李亮,李文军.定向红外对抗系统与技术的发展[J].*红外与激光工程*, 2015, 44(S3): 789-794.
- [3] Northrop Grumman, Electronics Systems, Directional Infrared Countermeasures (DIRCM) Gallery. [2018 -05 -04]. <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/nemesis/gallery.html>
- [4] Northrop Grumman, Electronics Systems, Directional Infrared Countermeasures (DIRCM) Gallery. [2018 -03 -02]. <http://www.es.northropgrumman.com/solutions/nemesis/gallery.html>.
- [5] Zhang Yuansheng, Xu Liang, Chen Fang, et al. Mid-infrared lasers used in airborne directed infrared countermeasures system and its key technologies [J]. *Electronics Optics &*

- Control*, 2017, 24(5): 56–59. (in Chinese)  
张元生, 徐亮, 陈方, 等. 机载定向红外对抗系统的中波红外激光器及关键技术[J]. *光电与控制*, 2017, 24(5): 56–59.
- [6] Schleijsen R M A, Heuvel J C, Mieremet AL, et al. Laser dazzling of focal plane array cameras [C]//Proc SPIE, 2007, 6738: 673800.
- [7] Schleijsen R M A, Heuvel J C, Mieremet A L, et al. Laser dazzling of focal-plane-array cameras[C]//Proc SPIE, 2007, 6543: 65431B.
- [8] Andrew Sijan, Development of military lasers for optical countermeasures in The mid-IR[C]//Proc SPIE Technologies for Optical Countermeasures VI, 2009, 7483: 748304.
- [9] Ian Elder. Performance requirements for countermeasures lasers [C]//Proc SPIE Technologies for Optical Countermeasures VII, 2010, 7836: 783605.
- [10] Cornelius J Willers, Maria S Willers. Simulating the DIRCM engagement component and system level performance [C]//Proc SPIE, 2012, 8543: 85430M.
- [11] Li Lijuan, Bai Xiaodong, Liu Ke. Analysis of the key technologies for dual color IR imaging guidance of air-to-air missile[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 1036–1039. (in Chinese)  
李丽娟, 白晓东, 刘珂. 空空导弹双色红外成像制导关键技术分析[J]. *激光与红外*, 2013, 43(9): 1036–1039.
- [12] Lippert E, Fonnun H, Stenersen K. High power multi-wavelength infrared source; proceedings of the Security + Defence, F [C]// International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [13] Martin Schellhorn, Gerhard Spindler, Marc Eichhorn. Improvement of the beam quality of a high-pulse-energy mid-infrared fractional image-rotation-enhancement ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillator[J]. *Opt Lett*, 2017, 42: 1185.
- [14] Wagner J, Hugger S, Rösener B, et al. Infrared semiconductor laser modules for DIRCM applications [C]//Proc SPIE Technologies for Optical Countermeasures VI, 2009, 7483: 74830F.
- [15] Tauke-Pedretti A. Power sharing in dual-wavelength optically pumped midinfrared laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(14): 1011–1013.
- [16] Hopkins J M. High-power (AlGaIn)(AsSb) semiconductor disk laser at 2.0 μm[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 201–203.
- [17] Kazarinov R F, Suris R A. Possibility of the amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattice [J]. *Sov Phys Semicond*, 1971, 5(4): 707–709.
- [18] Jerome Faist, Federico Capasso, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264: 553–556.
- [19] Matthias Beck, Daniel Hofstetter, Thierry Aellen, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature [J]. *Science*, 2002, 295: 301–305.
- [20] Alexei Tsekoun, Rowel Go, Michael Pushkarsky, et al. Improved performance of quantum cascade lasers through a scalable, manufacturable epitaxial-side-down mounting process[J]. *Proc Nat Acad Sciences*, 2006, 103: 4831–4835.
- [21] Kumar C, Patel N, Arkadiy Lyakh. High power quantum cascade lasers for infrared countermeasures, targeting and illumination, beacons and standoff detection of explosives and CWAs [C]//Proc SPIE Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications VII, 2015, 9467: 946702.
- [22] Manijeh Razeghi, Zhou Wenjia, Steven Slivken, et al. Recent progress of quantum cascade laser research from 3 to 12 μm at the Center for Quantum Devices [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): H30–H44.
- [23] Heydari D, Bai Y, Bandyopadhyay N, et al. High brightness angled cavity quantum cascade lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 091105.
- [24] Hopkins J-M. High-power (AlGaIn)(AsSb) semiconductor disk laser at 2.0 μm[J]. *Optics Letter*, 2008, 33(2): 201–203.
- [25] Zhou W J, Bandyopadhyay N, Wu D H, et al. Monolithically, widely tunable quantum cascade lasers based on a heterogeneous active region design [J]. *Sci Rep*, 2016, 6: 25213.
- [26] Bradshaw J L, Tober R L, Bruno J D, et al. Wavelength beam combined quantum cascade lasers for IRCM [C]//Proc SPIE Laser Technology for Defense and Security V, 2009, 7325: 73250K.
- [27] Liu Fengqi, Wang Zhanguo. Infrared quantum cascade lasers [J]. *Physics*, 2001, 30(10): 596–601. (in Chinese)  
刘峰奇, 王占国. 红外量子级联激光器[J]. *物理*, 2001, 30(10): 596–601.
- [28] Song Shufang, Xing Weirong, Liu Ming. Theory and research advancement of quantum cascade lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 972–976. (in Chinese)  
宋淑芳, 邢伟荣, 刘铭. 量子级联激光器的原理及研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(9): 972–976.