Vol. 45, No. 3 March, 2015

文章编号:1001-5078(2015)03-0287-05

·光电对抗 ·

# 锑化铟光电探测器的远距离激光干扰研究

罗 威,董文锋,许鹏程,杨华兵 (空军预警学院五系,湖北武汉 430019)

摘 要:激光器性能(功率、波长、发散角等)、激光大气传输特性等直接影响激光对光电探测器的远距离干扰效果。测量得到锑化铟光电探测器的光谱响应曲线及饱和功率密度阈值曲线,利用 MODTRAN 软件分析了两种特定传输路径下大气传输透射率随激光波长的变化曲线。结合中红外波段激光器的发展现状,分析了特定激光器的大气传输透射率,计算得到了利用氟化氘激光器和光参量振荡器有效干扰锑化铟探测器所需的激光功率阈值。

关键词:激光干扰;激光大气传输;锑化铟探测器;中红外激光器

中图分类号:TN977 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2015.03.012

# Research of laser jamming on an InSb photodetector from long distance

LUO Wei, DONG Wen-feng, XU Peng-cheng, YANG Hua-bing (No. 5 Department, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract**: The effect of laser jamming on photodetector from a long distance was influenced by the laser performances (laser power, wavelength, angle of divergence, et al) and the laser atmospheric transmission characteristics directly. The spectral response curve and the saturation threshold curve of power density of InSb photodetector were obtained by measurements. The atmospheric transmittance change curve with the laser wavelength under two specific transmission paths were analyzed by MODTRAN software. Combined with the development of mid-infrared laser, the atmospheric transmittance of several mid-infrared lasers was analyzed, and then the required power thresholds of the deuterium fluoride laser and optical parametric oscillator were calculated.

Key words: laser jamming; laser atmospheric transmission; InSb photodetector; mid-infrared laser

## 1 引 言

光电侦察、激光制导、红外制导等装备在现代军 事斗争中得到广泛使用,激光干扰系统利用激光对 其光电探测器件实施干扰使之饱和、迷盲,将极大地 降低其作战效能<sup>[1]</sup>。相比激光武器系统对导弹卫 星等目标的"硬杀伤"——直接毁伤,激光干扰系统 对光电探测器件进行的是"软杀伤"——干扰致盲, 对激光器功率的要求大大降低,因此系统的体积、重 量、消耗等均大幅降低,而可靠性、使用便利性等大 幅提升,因此已经在装备中实际应用并发挥重要 作用。

激光器性能(功率、波长、发散角等)、激光大气

传输特性等共同决定了激光干扰系统对光电探测器 的干扰/损伤效果。对激光器进行选型时,首先需要 使激光波长具有良好的大气传输特性,并位于或接 近光电探测器的峰值响应波长;其次激光器需要达 到远距离干扰所需功率水平,并具有较好的使用便 利性。之前的研究工作中,多种类型激光器在实验 室条件下对不同光电探测器的干扰/损伤效应<sup>[2-5]</sup>, 不同激光器的大气传输特性<sup>[6-8]</sup>均得到了较为深入 的研究。但干扰/损伤效应和大气传输特性对激光 器的要求往往并不一致,因此我们应该把激光干扰 系统作为一个整体,综合分析为了达到致盲光电探 测器效果,对激光器性能和大气传输特性的综合

作者简介:罗 威(1985 - ),男,博士,主要研究方向为光电对抗技术。E-mail:luowei8786@163.com 收稿日期:2014-07-17

要求。

本文以激光远距离干扰锑化铟红外探测器为 例,综合考虑激光器选型、激光大气传输、激光对光 电探测器的干扰效果等因素,分析得到远距离干扰 某型锑化铟探测器所需最低激光功率。

# 2 有效干扰的条件

假设激光从激光器出射后直接照射目标,光电 探测器的接收的激光功率  $P_R$  取决于以下几个因 素:干扰激光器功率  $P_0$ ,激光发散角  $\theta_0$ (光斑大小), 干扰机距被干扰探测器的干扰距离  $R_0$ ,光电探测器 的口径半径  $r_0$ ,激光传输路径上的传输透射率 L等。 其大小如式(1)所示,要实施有效干扰, $P_R$  取必须 大于光电探测器的饱和功率阈值  $P_{th}$ 。

$$P_{R} = \frac{P_{0}}{S}(\pi r^{2}) \times L = \frac{P_{0} \cdot (\pi r^{2}) \times L}{\pi \cdot (\frac{R \cdot \theta_{0}}{2})^{2}} > P_{th} \qquad (1)$$

其中,光电探测器的接收的激光功率 P<sub>R</sub> 和光电探测器的饱和功率阈值 P<sub>th</sub>均与探测器面积成正比。

#### 3 激光干扰系统各要素分析

3.1 锑化铟探测器

从探测器材料来说,可用于中红外波段探测的 材料类型不多,锑化铟(InSb)探测器是其中最常用 的材料;从探测器工作原理来说分为光伏型和光导 型,其中光伏型更适合制作成大规模焦平面阵列探 测器。

利用温度为 500 K、孔径为 0.8 cm 的黑体(红 外模拟源)对中科院上海技术物理研究所研制的单 元光伏型 InSb 探测器进行了测试,探测器面元直径 为 200  $\mu$ m,测试距离 30 cm,得到光伏型 InSb 光电 探测器的光谱响应曲线如图 1 所示,其峰值响应波 长在 5.35  $\mu$ m 左右,较理想探测区域(响应率高于 最大值的 50%)大致位于 3.5 ~ 5.4  $\mu$ m 范围内。 因此我们将波长位于 3.5 ~ 5.4  $\mu$ m 范围内的激光 称为该 InSb 探测器的波段内激光;而相应地,波长 位于 3.5 ~ 5.4  $\mu$ m 范围外的激光称为该光伏型 InSb 探测器的波段外激光。

测量得到该 InSb 探测器的峰值响应率,即探测器在 5.35  $\mu$ m 处的光响应率为 3.68 A/W,该 InSb 探测器最大能输出的光电流密度为8 × 10<sup>-4</sup> A/cm<sup>2</sup>, 计算 可 得 5.35  $\mu$ m 处 的 光 饱 和 功 率 密 度 为 2.174 × 10<sup>-4</sup> W/cm<sup>2</sup>。显然该探测器在某波长处的 光饱和功率密度与探测器在该波长处的响应率是成 反比的,因此根据图 1 计算得到 InSb 探测器的光谱 饱和阈值(Saturation threshold, *T*<sub>s</sub>)曲线如图 2 所示。 由图 2 可以看出,首先应尽量选用波段内激光来干 扰该 InSb 探测器,此外波段内激光干扰时所需的最 低激光功率密度也是不一样,最多可以相差数倍。



# 3.2 激光大气传输分析

选择干扰激光器另一个必须考虑的重要因素是 激光的大气传输特性。大气对激光束会产生吸收、散 射、折射和湍流效应,这些效应会造成激光的非直线 传输以及到达目标的能量降低,从而影响激光干扰效 果。这里主要研究各种大气传输效应对激光的总体 衰减作用,即研究激光经大气传输后的总透射率。

首先设想了两种激光传输路径,如图 3 所示。 光电侦察飞机在高度为 18 km 的 O 坐标处对地面 目标 A 实施侦察,侦察距离为 30 km,可以在 A 处从 地基平台发射激光实施干扰,也可在 B 处从空中实 施机载激光干扰,飞行高度定为 8 km。大气中水蒸 气、水滴、水雾等对可见光和中红外光都具有非常强 烈的吸收衰减作用,特别是中红外光几乎会被全部 吸收掉。因此仅模拟计算在晴朗无云气候条件时激 光的大气传输透射率。

使用大气传输模拟计算软件 Modtran 对上述两种激光干扰的大气传输路径(AO、BO)进行了大气传输透



curve through the BO transmission path

图中横坐标为激光波长,单位为微米,纵坐标为 激光总的大气传输透射率,表示激光经过路径后的 透射剩余功率占输入功率的百分比。比较两图可发 现:首先,两种大气传输透射率曲线随激光波长的变 化趋势基本相同,这是因为大气传输衰减主要是由 于大气中分子对激光的吸收所造成的,而两种传输 路径中大气分子的组成占比基本不变。其次,两种 传输路径的平均大气传输透射率有较大差别,这同 时与传输距离以及大气浓度分布都有关系。传输距 离越远,大气传输透射率越低,同时由于地球 75% 的大气集中在地面至 10 km 高度的对流层范围内, 在总传输距离相同时,若在底层稠密大气中的传输 距离越远,大气传输透射率也越低。最后,不同波段 的大气传输透射率差异很大。如激光在4.3 μm 处 的传输透射率基本都为零(4.3 μm 附近是大气中 CO<sub>2</sub>分子的强吸收带),而在某些波段均具有很高的 传输透射率。

由上述分析可以看出,激光大气传输特性是设 计激光干扰系统必须考虑的要素,若激光波长具有 良好大气传输性能,那么对激光器的功率要求将大 大降低。

3.3 激光器分析

大部分激光器的波长都是固定的,也有一些激 光器波长是可以调谐的,因此根据探测器响应率和 激光大气传输特性来选择最佳波长时,还必须考虑 激光器的发展现状。特别是在中红外波段,可选择 的激光器类型是十分有限的。

中红外波段的激光器主要有:氟化氘(DF)化学 激光器,多谱线输出(5~10 支谱线),波长范围 3.5~4.2 µm;中心波长 4.3 µm 的 CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[9]</sup>; 中心波长 9.6 µm 的 CO<sub>2</sub> 激光器倍频产生 4.8 µm 激光<sup>[10]</sup>;利用非线性光学方法产生中红外激光的激 光器,包括:光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator,OPO)<sup>[11,12]</sup>、光参量放大器(Optical Parametric Amplification, OPA)<sup>[13]</sup>、差频(Difference Frequency)<sup>[14]</sup>,半导体(二极管)激光器<sup>[15]</sup>,波长与材料有 关;超连续谱激光器<sup>[16]</sup>;自由电子激光器 (FEL)<sup>[17]</sup>;特种固体与光纤激光器<sup>[18-19]</sup>等。

DF激光器曾实现 2.2 MW 功率输出<sup>[20]</sup>,但需 要配备真空系统,需要消耗价格昂贵的氘气(D<sub>2</sub>)并 有毒性废气排出,使用性能较差;4.3 μm 的 CO<sub>2</sub>激 光器难于实现粒子数反转,且处于大气吸收带上;中 心波长 9.6 μm 的 CO<sub>2</sub>激光器倍频产生 4.8 μm 激 光的倍频效率很低,相关研究成果很少;OPA、差频、 半导体激光器、超连续谱激光器、自由电子激光器、 特种固体与光纤激光器在中红外波段的输出功率目 前都只达到瓦量级,且工作条件较为苛刻。OPO 是 中红外激光器领域目前研究较多的一种激光器,波 长可调谐,可连续和脉冲输出,虽然在 3.5~4.0 μm 波段范围内的输出功率目前仅达到十瓦量级,但其 发展前景广阔,发展速度迅猛。

DF 激光器与 CO<sub>2</sub> 激光器都是分子激光器,可能出现的谱线位置很多,实际同时出现的谱线数量 及其强度分布与激光器工作状态有关。DF 激光器 一般同时出现 5~10 条谱线,常位于 3.58111~ 4.00526 μm 之间。CO<sub>2</sub> 激光器的同时出现的谱线 数量较少,常见谱线位于 4.803~4.796 μm<sup>[21]</sup>之 间。假设上述各条谱线强度相同,分别计算出其大 气传输的平均透射率列于表 1 中。

Tab 1	Atmosphenic transmittance of middle infrared lesson
表 1	中红外波段激光器的大气传输透射率

1		atmospheric transmittance		
lasers	wavelength/ µm	AO path	BO path	
DF laser	Multi-line, 3. 5 ~ 4. 2	0.481 average	0.931 average	
$\rm CO_2$ laser	4.3	0	0	
frequency doubling CO <sub>2</sub> laser	Multi-line , 4. 7 ~ 4. 9	0.060 average	0.8075 average	
OPO, OPA, FEL, difference frequency,	tuned to 3. 702	0. 8835	0. 9976	
supercontinuum laser	supercontinuum			
Special semiconductors laser, solid laser,fiber laser	related to material			

根据图 4 和图 5 判断得知大气传输透射率最高 所对应的波长为 3.702 μm,因此对于波长可调谐的 激光器,假设将其调谐至 3.702 μm 处。

#### 4 干扰功率阈值计算

根据3.1节得出的对 InSb 探测器的干扰饱和功率 阈值和公式(1),初步推算,干扰激光器的功率要达到 数十瓦至数百瓦,综合考虑功率指标、大气传输特性、 器件成熟度及使用性能等参数,在上述激光器中目前 仅 DF 激光器和 OPO 较适合用于中红外波段干扰。

假设两种激光器的发散角均为 0.2 mrad, 且跟 踪系统精度能够满足需求,结合上述各参数,代人式 (1)计算得到 DF 激光器和 OPO 激光器在两种传输 路径下所需的最低干扰功率如表 2 所示,实际所需 干扰功率应大于此最低干扰功率,激光干扰系统各 指标参数也列入表 2 中。需指出的是, DF 激光器的 功率水平能够满足需求, 而 OPO 激光器的功率水平 目前尚不能满足需求。

# 表 2 激光干扰系统指标参数表 Tab. 2 Parameters table of the laserjammer

path	lasers	parameters of the laserjammer					
		divergence angle /mrad	distance /km	atmospheric transmittance	wavelength ∕µm	saturation threshold $/(W \cdot cm^{-2})$	power threshold ⁄W
AO	DF laser	0.2	30	0. 481	3.5~4.2	$3.22 \times 10^{-4}$	189. 3
	OPO	0.2		0. 8835	tuned to 3.702	3. 44 × 10 <sup>-4</sup>	110. 1
BO	DF laser	0.2	16. 67	0. 931	3.5~4.2	$3.22 \times 10^{-4}$	30. 2
	OPO	0.2		0. 9976	tuned to 3.702	3. 44 × 10 <sup>-4</sup>	30. 1

#### 5 结 论

光电探测器、激光器、大气传输是激光干扰系统中 相互联系、相互制约的三个要素。从锑化铟探测器来 说,其峰值响应波长为5.35 μm;从所设定的斜程30 km 和斜程16.67 km 的两种大气传输路径来说,波长3.702 μm 的激光大气传输性能最佳;从激光器波长、功率水 平、大气传输性能等角度综合分析,认为目前或短时间 内预期可用于干扰中红外波段探测器的激光器类型仅 有 DF 激光器(中心波长3.8 μm)和 OPO 激光器(波长 可调谐)。根据激光出口功率与光电探测器饱和功率 阈值的关系式,计算得到远距离干扰某型锑化铟探测 器所需最低激光功率。文献中对激光干扰光电探测器 的研究多为要素独立研究,本文的研究方法为综合分 析激光干扰系统效能提高了参考。

## 参考文献:

[1] LI Yunxia, MENG Wen, MA Lihua, et al. Principle and application of optoelectronic countermeasures [M]. Xi'

an: Xidian University Press, 2009, 125 - 132. (in Chinese)

李云霞,蒙文,马丽华,等.光电对抗原理与应用[M]. 西安电子科技大学出版社,2009,125-132.

- [2] ZHANG Zhen, ZHOU Menglian, ZHANG Jianmin, et al. Entirely saturated unilateral smear of laser spot in CCD
  [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25
  (06):1351-1353. (in Chinese)
  张震,周孟莲,张检民,等. CCD 中激光光斑的全饱和
  单侧拖尾现象[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(06):
  1351-1353.
- [3] WANG Siwen, LI Yan, GUO Lihong, et al. Analysis on the disturbance of CO<sub>2</sub> laser to long-wave infrared HgCdTe detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010,29(2):102 104. (in Chinese)
  王思雯,李岩,郭立红,等. CO<sub>2</sub> 激光对长波红外 HgCdTe 探测器干扰的分析[J]. 红外与毫米波学报, 2010,29(2):102 104.
- [4] JIANG Tian, CHENG Xiangai. Saturation interference to three-channel CCD camera by CW laser[J]. High Power

Laser and Particle Beams, 2010, 22 (11): 2571 - 2573. (in Chinese)

江天,程湘爱. 连续激光对 3 通道 CCD 相机的饱和干扰效 应 [J]. 强激光与 粒子 束, 2010, 22 (11): 2571-2573.

[5] ZHENG Xin, JIANG Tian, CHENG Xiangai, et al. A new phenomenon of photoconductive InSb detector under the irradiation of out-band laser [J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(4):047302. (in Chinese) 郑鑫,江天,程湘爱,等. 波段外激光辐照光导型 InSb

探测器的一种新现象[J].物理学报,2012,61 (4):047302.

[6] CAO Bailing, WU Chengjiu, RAO Ruizhong, et al. Atmospheric attenuation of the HF and DF laser radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1):18 - 21. (in Chinese)
曹百灵, 邬承就, 饶瑞中, 等. HF/DF 激光传输的大气

衰减特性[J].强激光与粒子束,2003,15(1):18-21.

- [7] CHENG Ling, WEI Hongyan, ZHANG Hongjian, et al. Scintillation index of echo wave in slant atmosphere turbulence[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25 (09):2262 - 2266. (in Chinese)
  程玲,韦宏艳,张洪建,等. 斜程大气湍流中激光回波的闪烁指数[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25 (09):2262 - 2266.
- [8] LIU Yanwu, WANG Hongxing. Research on laser atmospheric transmittance in the slant path on the sea[J]. Applied Laser, 2010, 30(3):223 225. (in Chinese) 刘延武, 王红星. 海上激光斜程传输的大气透过率研究[J]. 应用激光, 2010, 30(3):223 225.
- [9] Drozdowicz Z, Rudko R I, Linhares S J, et al. High gain 4.3-4.5μm optically pumped CO<sub>2</sub> laser[J]. IEEE Journal of Quantum electronics, 1981, 17(8):1574-1580.
- [10] WANG Tiejun. Studies on tunable mid-infrared lasers
  [D]. Changchun; Jilin University, 2007. (in Chinese)
  王铁军. 中红外可调谐激光技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [11] JIANG Hailin, BIAN Jintian, NIE Jingsong, et al. Theoretical investigation on a method generating 4.3 μm laser based on the tandem optical parametric oscillator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 210 219. (in Chinese)
  姜海林, 下进田, 聂劲松, 等. 利用双光学参量振荡器 结构输出 4.3um 激光方案[J]. 红外与激光工程,

结构物出4.3um 激元万条[J]. 红外与激元工住 2011,40(2):210-219.

[12] LIU Lei, WANG Xiaobo, LI Xiao, et al. Thermal-induced dephasing in mid-infrared continuous-wave singly resonant optical parametric oscillator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(01):24 - 28. (in Chinese) 刘磊,汪晓波,李霄,等.中红外连续波单谐振光学参 量振荡器热致相位失配[J].强激光与粒子束,2012, 24(01):24-28.

- [13] Haakestad M W, Arisholm G, Lippert E, et al. High-pulseenergy mid-infrared laser source based on optical parametric amplification in ZnGeP2[J]. Optics Express, 2008, 16 (18):14263-14273.
- [14] JIANG Jian, CHANG Jianhua, FENG Sujuan, et al. Mid-IR multiwavelength difference frequency generation laser source based on fiber lasers [J]. Acta Physica Sinica, 2010,59(11):7892-7898. (in Chinese) 蒋建,常建华,冯素娟,等. 基于光纤激光器的中红外 差频多波长激光产生[J]. 物理学报,2010,59(11): 7892-7898.
- [15] Yakovlev Y, Moiseev K, Mikhailova M, et al. High power mid-infrared lasers based on type II hetero structures with asymmetric band offset confinement [J]. Proc of SPIE, 2000,3947:144-153.
- [16] YANG Weiqiang, HOU Jing, ZHANG Bin, et al. Numerical simulation of mid-infrared supercontinuum generation in telluride with pulsed laser pumping [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24 (09): 2031 2036. (in Chinese)
  杨未强, 侯静, 张斌, 等. 激光泵浦碲化物产生中红外超连续谱数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24 (09): 2031 2036.
- [17] WANG Zihua, LU Huihua, DAI Jianping, et al. Design consideration of BFEL to realize infrared and soft X-ray double waveband operation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20 (11): 1913 - 1918. (in Chinese)

王子华,陆辉华,戴建枰,等.BFEL 实现红外和 X 射线 双波段运行的初步设计[J].强激光与粒子束,2008, 20(11):1913-1918.

- [18] Bluiett A G, Condon N J, Connor S O, et al. Thulium-sensitized neodymium in KPb2Cl5 for mid-infrared laser development [J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2005, 22 (10): 2250-2256.
- [19] Hitz B. Fiber laser produces 2.5W in the 3um region [J]. Photonics Technology World, 2004, 38(4):1-2.
- [20] James A H. Directed energy weapons: promise & reality [C]// 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA, 2006, 3753:1 - 17.
- [21] LUO Wei. Research of a discharge driven continuouswave middle infrared and long infrared dual-band laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)

罗威.电激励连续波中、远红外双波段激光器研究 [D].长沙:国防科技大学,2012.