

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0018-06

用于调频/连续波激光成像雷达的高功率激光调制技术

姜 鹏 陆 威 王 骥 韩黎明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 在调频/连续波(FM/CW)无扫描激光成像雷达系统中,高功率输出的宽带强度调制激光发射机是其中的一个关键部件。为了实现远距离、高精度的目标探测,发射机需具备 10 W 量级的光输出功率、大于 70% 的调制深度、良好的调制线性以及 200 MHz 以上的调制带宽。综述了用于 FM/CW 无扫描激光成像雷达的各种高功率激光发射机调制方法,包括半导体激光的直接内调制方案、体材料外调制方案以及波导调制激光结合光放大的方案,分析了它们各自的优势及问题,并提出一种基于电吸收调制的阵列激光调制方案以及作为一种过渡方案的电吸收调制激光器结合光放大的激光调制方法。

关键词 光学器件;激光雷达;高功率激光调制;电吸收调制

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0018

High-Power Laser Modulation Technique for FM/CW Imaging Radar

Jiang Peng Lu Wei Wang Qi Han Liming

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Optic-Electronic Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract In frequency-modulation/continuous-wave (FM/CW) scannerless lidar system the intensity modulated (IM) laser transmitter of high-power is a key component for radar imaging. In order to realize target detection of long imaging range and high ranging accuracy, the transmitter needs to possess output optical power more than 10 W, optical modulation depth higher than 70%, better modulation linearity and radio frequency (RF) bandwidth broader than 200 MHz. This paper introduced various schemes of high-power laser modulation, including the direct modulation of diode lasers, the lithium niobate crystal bulk modulation and the combining waveguide modulated seed laser and optical amplification. Their advantages and disadvantages of schemes were analysed. Finally, the modulated lasers array based on multi-quantum well (MQW) electroabsorption modulation was put forward. As a transitional scheme, the optical modulation combining electroabsorption modulated laser and optical fiber amplification were shown in the paper.

Key words optical devices; laser radar; high-power laser modulation; electroabsorption modulation

1 引 言

美国陆军实验室(ARL)于 1995 年提出一种低成本、短距离的调频/连续波(FM/CW)激光成像雷达。该雷达将微波当中的调频/连续波测距技术拓展到激光波段,使用数百兆赫带宽的线性频率调制的啁啾(Chirp)射频副载波信号对连续的高功率半导体激光发射机的幅度包络进行调制,接收端使用自混频探测器阵列进行焦平面阵列探测和成像。该系统能够实现高速、高帧频、高距离分辨率的无扫描激光四维成像,已成为在民用和军用领域均极具应

用潜力的研究方向之一^[1~6]。

在 FM/CW 雷达系统发射机中,获得高功率连续激光光强的宽带幅度调制是其中的一个关键。ARL 最初采用的是 813 nm 直接调制半导体激光二极管,并于 1998 年完成 750 m 距离处的目标成像,激光调制后的峰值发射功率为 3.3 W,调频信号频率范围为 100~500 MHz,测距精度为 0.375 m^[3]。2004 年后,ARL 在其第二代 FM/CW 激光雷达系统即 Chirp 调幅舰船跟踪激光雷达系统中使用了 Mach-Zehnder (M-Z)波导调制器来调制一个低功率

作者简介: 姜 鹏(1982—),男,博士研究生,主要从事激光空间信息技术方面的研究。E-mail: pengjiang@yahoo.cn

导师简介: 王 骥(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事 X 光激光和激光空间信息技术等方面的研究。

E-mail: qiawang@hit.edu.cn

(1.5 mW)的 1.55 μm 半导体激光二极管(LD),然后利用掺铒光纤放大器(EDFA)对其输出进行放大,该系统中使用低功率(mW级)的直接调制二极管进行放大,所获得的强度调制激光峰值功率为 9.74 W,调制深度为 69%,另有平均功率为 8 W 的报道。该雷达系统可用于 1 km 外的目标跟踪^[7~10]。

当前,FM/CW 激光雷达发射机所能提供的幅度调制激光水平仍在一定程度上制约着雷达系统的探测能力。为了能够实现更远距离、高精度的目标成像探测,激光发射机需具备 10 W 量级的连续光输出功率、大于 70%的调制深度、良好的调制线性以及 600 MHz 以上的调制带宽以获得超过 0.25 m 的距离分辨率^[8]。因此需要研究更理想的高功率激光调制方法。

不仅仅是激光雷达,卫星间的自由空间光通信、大气空间地面光通信等也同样对高功率的宽带调制激光源提出迫切需求,这也提出了一个高品质、宽带宽的高功率激光调制研究课题。

本文系统介绍目前高功率激光光束的各种调制方法,分析对比它们的各自优势和问题,以及对基于光强调制的激光成像雷达系统应用的适用性。随着半导体生长制造工艺水平的突破,基于电吸收(EA)调制的阵列激光调制光源有望成为解决高功率激光调制问题的一个发展方向并提出了这种光束调制方案的基本构想和组成,以及作为它的一种过渡方案的电吸收调制激光器结合光放大的激光调制方法。

2 光调制方法概述

光调制器的研究工作已有数十年的历史,尤其是随着光纤通信业的飞速发展,激光调制技术也发展到了一个新高度。现有的激光调制方法大体可概括为腔内调制和腔外调制两类。从 20 世纪 70 年代开始,电流注入式半导体激光二极管被广泛研究和应用。将调制信号加载于注入电流,控制注入电流大小改变有源区载流子密度,可实现激光二极管的光强直接内调制。直接内调制的二极管激光器在光通信领域一度发挥巨大作用,但由于啁啾性能不佳、调制速率有限,在现代宽带光纤通信网中相对于外调制已显得后继乏力。

激光外调制通常具有更高的调制速率、更宽的调制带宽以及更好的调制线性。外调制方法分为折射率变化型和损耗型,其原理分别是依靠输入变化的电压或电流来改变电光晶体、声光晶体、磁光晶体和半导体等材料的复折射率实部和虚部。外调制按

照材料形态可分为体材料调制器和波导材料调制器两大类。使用变化的超声场对光载波进行调制的声光体调制器^[11,12],由于渡越时间很长,光强变化难以瞬时响应声强变化,调制频率和带宽均受到很大限制,目前不超过 200 MHz。利用法拉第磁致旋光效应可制成磁光体调制器^[13,14],这种调制器响应速率慢,真正实用化的产品较少。电光调制器目前已取得很成功的应用。体材料电光调制器由表面镀有电极的块状晶体和偏振片构成,由于采用晶体截面较大,往往在很高的人射光功率下也不会发生损伤,但这种器件的问题是由于晶体长宽比不高,半波电压经常高达上百伏,对宽带、高压的调制信号源设计提出了极高的要求。波导调制器由于波导截面只有几个微米,同时又具有相对较长的电光作用长度,使得调制电压被降至数伏。而传输型电光波导调制器采用行波电极设计,其中 M-Z 铌酸锂波导调制器的调制带宽最高达 100 GHz,是目前应用最成熟的高速光调制器^[15,16]。

近十几年来,半导体制造生长工艺取得突破性进展,多量子阱材料电吸收波导调制器(EAM)具有极低半波电压(小于 5 V)、高调制深度[直流电源(DC)调制大于 98%]、较宽调制带宽(可达 40 GHz),对光的偏振方向要求不高。它最引人注目的地方在于它极强的集成能力:由于与同波段的分布反馈式(DFB)或分布布拉格反射(DBR)半导体激光器在制造材料和工艺上具有兼容性,因而可以集成为结构紧密的电吸收调制激光二极管(EML)^[17~22]来直接作为调制光源使用。而更新型的有机聚合物调制器目前仍存在长期稳定性和抗光损伤能力差的问题亟待解决^[23~27]。

虽然波导调制器的高线性、宽带宽等性能非常突出,但是由于光能量被仅仅局限于数微米截面的薄膜波导内,使得波导调制器很容易在高功率的光入射下发生损伤,经粗略计算,M-Z 铌酸锂波导调制器的调制光功率极限难以超过 500 mW。

3 高功率激光调制方法

经过前面的分析,目前可应用于高功率激光调制的方法包括二极管激光器的直接内调制以及直接对高功率激光进行外调制的体调制方法。而波导调制虽然具有更好的调制性能,但要获得高功率,需要对其进行线性光放大。

3.1 单管直接内调制

调制注入电流来实现激光二极管的光强直接内

调制是获得半导体激光调制的一种最直接方法。然而,由高电容所导致的低阻抗性使半导体激光二极管很难高效地获得宽带调制。美国陆军实验室在1998年使用了低阻抗和74 W高功率耗散的金属氧化物半导体场效应管(MOSFET)通过一个偏置T电路连入到激光二极管,从而将调制加载到激光器偏置电流上。恒流偏置由一个商用实验室电源给出,同时对激光器进行温控。ARL对4 W的813 nm激光二极管进行直接调制,调制从100~550 MHz,获得的输出光功率峰值为3.3 W^[3]。这也是目前所见单管直接调制激光二极管的最高输出功率。

3.2 多管内调制

使用单管激光二极管很难获得更高功率的调制激光,20世纪70年代初诞生的电介质复合抛物面聚光器(CPC)^[28~30]提供了一种使用多支半导体激光二极管获得高功率调制激光输出的方法。将多支直调激光二极管的输出尾纤捆接入到CPC, F 是抛物面的焦点, n 为电介质折射率。保证所有激光的初相位具有同步性,在传播相同光程的截面上激光具有同相位,可以获得较高输出功率,原理如图1所示。这种调制方法的传递函数具有重要缺陷,光束束散大,引起出射光斑半径大(2° 时,300 mm),使得体积笨重,效率也不是很高。

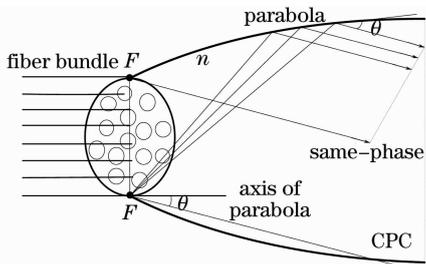


图1 复合抛物面聚光器

Fig. 1 Compound parabolic concentrator

为了解决上述问题,美国物理光学公司(POC)的I. Aguroka等^[4]针对ARL的FM/CW激光雷达应用设计了一种非成像光束合成准直器(NIBCC)。图2是一个包含了三支基于MOSFET的直接调制激光二极管的高功率调制激光照明系统。在三支激光二极管(LD1~3)光纤输出端,利用格林透镜(GL1~3)阵列聚焦于非成像元件(NIE)焦点 F ,照明外罩(IH)在NIE的中心。该系统使用3支3.3 W直接调制激光二极管,利用NIBCC可以获得近似平行光的10 W,813 nm低束散激光照明,且具有进一步提高输出功率的能力。

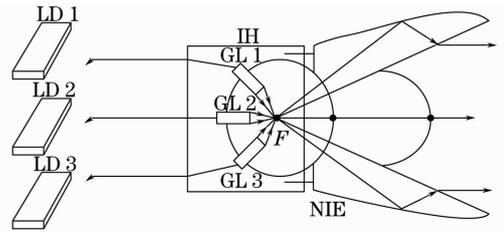


图2 非成像光束合成准直器

Fig. 2 Nonimaging beam combiner collimator

与上述两种方法类似的思想,可以将多支直接调制激光二极管输出灌入到一根石英光纤中并束,也能够实现直接调制的高功率激光输出。

直接调制虽可实现高功率光调制,但从调制性能上来讲仍无法同外调制相比,它的调制非线性和寄生电容导致的相对不高的频率带宽对其是一种限制,因而,使用激光外调制技术仍是一种趋势。

3.3 直接外调制

体调制器一般采用 LiNbO_3 ,KTP,Si等晶体材料。掺镁 LiNbO_3 电光晶体的抗光损伤阈值高达 $100 \text{ MW}/\text{cm}^2$,有能力在空间内对高功率激光直接进行外调制。由单块晶体构成的电光强度调制器会存在自然双折射现象带来的附加相位差,这种附加相位差随温度等环境因素变化发生漂移,使调制光发生畸变。实际中通常使用组合式调制器结构,采用两种组合方法来消除自然双折射影响:一种是使用两块几何尺寸几乎完全相同的晶体以光轴互成 90° 串接排列;另一种是使用两块晶体的 y 和 z 轴互相反向平行排列串接,并在晶体间放置 $\lambda/2$ 波片。相比之下第一种结构更为常用,这种体调制器的构成如图3所示^[31]。

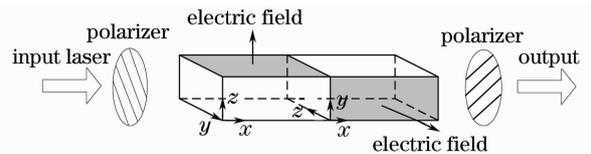


图3 组合式光学体调制器结构

Fig. 3 Structure of combined optical bulk modulator

NewFocus公司的宽带铌酸锂体调制器中使用了两块正交晶体串接,波段涵盖500~1600 nm,射频(RF)带宽为200 MHz,半波电压很高为195 V。共振强度调制器半波电压可降至最低19 V,最高调制频率为250 MHz,但此时RF带宽只有调制频率的2~4%^[32]。

体调制器的特点是易于实现“高光功率”,但同时半波电压动辄高达上百伏,这样的宽带、高压的调制信号源制作难以实现,而且调制光束质量和系统

稳定性相较于经过光纤整形的波导调制器情况要差。

3.4 间接外调制

“间接外调制”是指首先对低功率激光光束进行宽带调幅,获得调制的“种子光”输出,然后再对已调的“种子光”进行光放大,实现高功率输出。该方案原理如图4所示。

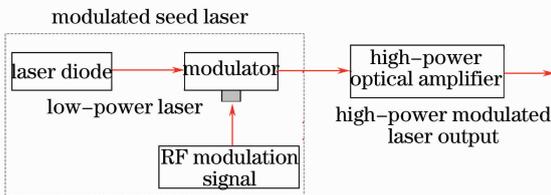


图4 基于调制“种子光”和光放大的调制方案

Fig.4 Laser modulation theory based on modulated seed and optical amplifier

间接外调制依照“种子光”和放大器的类型可以有多种方法。当前“种子光”可采用低功率激光二极管与外调制器相结合来获得。放大器则包括半导体放大器(SOA),光纤拉曼(Raman)放大器和掺稀土类光纤放大器。目前来讲,SOA 仍存在较高噪声,放大倍率也低(输出一般不会超过 1 W);光纤 Raman 放大效率低,体积大;而掺稀土类光纤放大技术相对更为成熟,尤其是 1.5 μm 的 EDFA,使用 V 型槽侧面抽运大大提高了效率,使用铟镱共掺和双级结构可获得更高增益。EDFA 已在光纤通信的信号中继中取得非常成功的应用^[33,34]。目前,法国 Keopsys 的 40 dBm 双级光纤放大器以及美国 IPG Photonics 公司的 EAD-10 均可实现最大 10 W 的 C 波段光放大输出。

美国陆军实验室在啁啾调幅激光雷达中使用三菱(Mitsubishi)公司的 1.5 μm /1.5 mW ML925B11F DFB 激光器获得调制的“种子光”,然后接入到阿帕奇的 EAD-10 进行放大,取得了不错的实验结果^[9],证明了“调制种子光”和“光放大”结合方案的可行性。

然而,目前的光纤放大器能提供较高放大增益的波段以光通信的 1.3 ~1.6 μm 为主,这也导致使用“放大种子光”来获得高功率在实现光波段上目前还具有一定的局限性。需要注意的是,太空中存在的辐射会引起光纤材料的吸收效应,这实际上也会在一定程度上影响到这种方法的应用范围。

4 基于 EA 的高功率调制方法

电吸收调制器(EAM)尤其是电吸收调制激光器(EML)的诞生提供了一种可直接应用的高品质的调

制激光源。相比于直接调制,EAM 具有更好的整体性能,相比于 M-Z 铌酸锂调制器则具有更低的调制电压要求和低偏振敏感性。EML 作为一个集成了激光器和调制器的优秀的一体化光源,其应用领域将不仅限于光纤通信,它还有足够的能力和潜力用于空间应用的激光成像和通信系统,而此时 EAM 的高啁啾缺陷也将变得不再重要。然而,目前的 EML 单管出光功率比较低,一般不超过十几毫瓦,如果后面再集成一级 SOA,输出功率最多也只能达到上百毫瓦。EML 虽然集成性好,调制容易,但单管获得大功率输出是不可能的。

对于焦平面阵列探测的激光成像系统,面阵均匀光源是更理想的成像光源,也能够同时获得较高的输出功率。随着半导体生长、制造工艺水平的发展,认为可以将大量由 DFB 半导体激光同 EAM(或者 DFB-LD,EAM 和 SOA 结合)组成的电吸收调制激光单元构为一个集成面阵。其中,调制激光单元的数量可以根据成像对光源的功率要求而定。图5是一个 4×4 的面阵调制光源结构示意图实例。这种器件的制作过程与大功率半导体激光二维阵列的制作类似,可以采用调制激光线阵的堆栈来实现^[35,36]。其基本组成主要包括调制激光发光线阵条、散热器、制冷器。利用微透镜阵列使每个激光调制单元的输出束散角大致相同,其大小应该与所希望的整个面阵光源的照明视场角相同。目前该方法已申请国家专利^[37]。图6为预期的 2 D 调制光源组成结构示意图。

这样的面阵调制光源具有以下优点:1)可以获

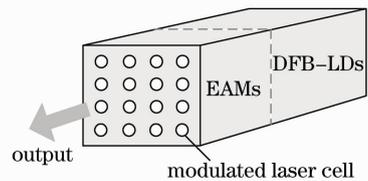


图5 一个 4×4 的 2D 调制光源结构示意图实例

Fig.5 4×4 2D modulated array lasers source

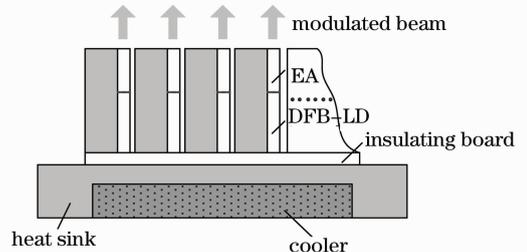


图6 2D 调制光源制作结构示意图

Fig.6 Structure of 2D EMLs array

得较高的出光功率,有希望获得 10 W 以上的调制激光输出,这由调制激光单元数目和单元功率决定,可以使每个单元输出功率较低,降低散热难度;2)各种半导体激光波长的调制激光阵列几乎都可以被获得,避免了使用光纤放大器的波段限制;3)由于在远场的照明是所有激光单元辐射的非相干叠加,其照明场近似为均匀光照明,可避免相干光成像在阵列探测器上的焦扰造成图像空间分辨力差的缺陷,也可避免非均匀高斯光束照明所造成的视场边缘探测概率降低问题,更利于激光成像;4)光源的视场角可以根据需要制作;5)LD+EAM 集成单元的长度一般不到 600 μm ,还可进一步集成 SOA,其封装后模块体积也较小,具有小型化和集成化的特点,符合激光雷达系统的集成化趋势。

作为这种阵列调制激光的过渡方案,对电吸收调制激光进行线性光纤放大实现高功率的方法在现阶段更容易实现,这种方案的组成可参考图 4。目前,本实验室已开展此项工作并取得了一定实验成果。

5 结 论

FM/CW 激光成像雷达需要发射机能够提供宽带调幅的高功率激光。目前,获得 10 W 级的高功率宽带强度调制激光仍是一个难点。直接调制激光二极管单管目前很难获得超过 3.3 W 的输出功率,虽然采用复合抛物面聚光器、非成像光束合成准直器等辅助有助于使用多支激光二极管合束来获得高功率输出,但直接调制光束的整体性能仍受到自身特点所限。

外调制是一种趋势。采用传统的体调制器能够实现高功率光调制,但是极高的半波电压导致难以获得超过 200 MHz 的宽带调制。采用本文所述的间接外调制方法能够获得 10 W 级 C 波段宽带调制激光。最后提出的基于 EA 的集成 2 D 面阵调制光源兼有集成化特点、外调制的性能以及相对均匀的照明视场,有望成为阵列探测式激光成像雷达更理想的高功率调制激光光源。

参 考 文 献

- 1 B. Stann, W. Ruff, Z. Sztankay. A practical low-cost high-range-resolution lidar [C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 118~129
- 2 B. Stann, W. Ruff, Z. Sztankay. Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(11): 3270~3278
- 3 B. Stann, M. Giza, D. Robinson *et al.*. Scannerless imaging lidar using a laser diode illuminator and FM/cw radar principles

- [C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 421~431
- 4 I. Aguroka, B. Stann, Z. Sztankay. An extremely low beam divergence illumination system for laser radar applications [C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 334~345
- 5 B. Stann, A. A. Auf, W. Ruff *et al.*. Line imaging lidar using a laser diode transmitter and FM/cw radar principles for submunition applications [C]. *SPIE*, 2000, **4035**: 192~203
- 6 B. Stann, K. Aliberti, D. Carothers *et al.*. A 32×32 pixel focal plane array lidar system using chirped amplitude modulation [C]. *SPIE*, 2004, **5412**: 264~272
- 7 B. Redman, B. Stann, W. Ruff *et al.*. Anti-ship missile tracking with a chirped amplitude modulation lidar [C]. *SPIE*, 2004, **5413**: 113~124
- 8 B. Redman, W. Ruff, B. Stann *et al.*. Anti-ship missile tracking with a chirped AM lidar-update design, model predictions, and experimental results [C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 330~341
- 9 B. Redman, B. Stann, W. Lawler *et al.*. Chirped AM lidar for anti-ship missile tracking and force protection 3D imaging; update [C]. *SPIE*, 2006, **6214**: 621400
- 10 B. Stann, B. C. Redman, W. Lawler *et al.*. Chirped amplitude modulation lidar for range and Doppler measurements and 3-D imaging [C]. *SPIE*, 2007, **6550**: 655005
- 11 J. R. Boyd, E. H. Young, S. K. Yao. Design procedure for wide bandwidth acoustooptic modulator [J]. *Opt. Eng.*, 1977, **16**(5): 452~454
- 12 H. P. Layer. Acoustooptic modulator intensity servo [J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(17): 2947~2949
- 13 D. L. Flannery, A. M. Biernacki, J. S. Loomis *et al.*. Real-time coherent correlator using binary magneto-optic spatial light modulators at input and Fourier planes [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(4): 466~466
- 14 J. D. Downie, B. P. Hine, M. B. Reid. Effects and correction of magneto-optic spatial light modulator phase errors in an optical correlator [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(5): 636~643
- 15 Y. Nihei, A. Harada, K. Kamiyama. Bulk periodically poled MgO:LiNbO₃ with high optical damage resistance [C]. Conference on Lasers and Electro Optics, 2000, **5**: 632~633
- 16 K. Noguchi, O. Mitomi, K. Kawano *et al.*. Highly efficient 40 GHz bandwidth Ti:LiNbO₃ optical modulator employing ridge structure [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(1): 52~54
- 17 D. Miller, D. Chemla, Schmitt Rink. Relation between electro-absorption in bulk semiconductors and in quantum wells; the quantum-confined Franz-Keldysh effect [J]. *Phys. Rev. B*, 1986, **33**(10): 6976~6982
- 18 Masahiro Aoki, Hirohisa Sano, Makoto Suzuki. Novel structure MQW electroabsorption modulator DFB-laser integrated device fabricated by selective area MOCVD growth [J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(7): 2138~2140
- 19 S. Kaneko, M. Noda, Y. Miyazaki. An electroabsorption modulator module for digital and analog applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**: 669~676
- 20 G. L. Li, P. K. L. Yu. Optical intensity modulators for digital and analog applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**: 2010~2030
- 21 Li Tongning, Jin Jinyan, Luo Yi *et al.*. Monolithic integrated DFB-LD/EA for 2.5 Gbit/s optic fiber communication system [J]. *Study on Optical Communications*, 1999, (3): 42~46
- 李同宁, 金锦炎, 罗毅等. 2.5 Gbit/s 用 DFB-LD/EA 单片集成器件 [J]. *光通信研究*, 1999, (3): 42~46
- 22 Hou Guanghui, Wen Jimin, Huang Hengpei *et al.*. High frequency characterization measurement of electroabsorption modulated-integrated distributed-feedback laser module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1427~1430
- 侯广辉, 温继敏, 黄亨沛等. 电吸收调制激光器集成芯片的高频

- 测试[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1427~1430
- 23 I. McCulloch, H. Yoon. Fluorinated NLO polymers with improved optical transparency in the near infrared [J]. *Polymer Sci. A*, 1995, **33**(7): 1177~1183
- 24 Y. Shi, W. Lin, D. J. Olson *et al.*. Electro-optic polymer modulations with 0.8 V half-wave voltage [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(1): 1~3
- 25 L. Mark, K. Howard, E. Christoph *et al.*. Broadband modulation of light by using an electro-optic polymer [J]. *Science*, 2002, **298**(5597): 1401~1403
- 26 Liu Zilong, Zhu Daqing. Electro-optic polymer modulators modulated only in cladding and its theoretical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1516~1520
刘子龙, 朱大庆. 包层调制的聚合物电光调制器及其理论分析 [J]. 光学学报, 2004, **24**(11): 1516~1520
- 27 Wang Zhi, Zhang Jinlei, Meng Qinwen. Effect of the electrodes in an electro-optic polymer modulator on waveguide characteristics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 379~382
王 智, 张金磊, 孟庆文. 光纤聚合物电光调制器电极对波导特性的影响 [J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 379~382
- 28 R. Winston. Dielectric compound parabolic concentrators [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**: 291~292
- 29 J. R. Hull. Dielectric compound parabolic concentrating solar collector with a frustrated total internal reflection absorber [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(1): 157~162
- 30 J. M. Gordon. Complementary construction of ideal non-imaging concentrators and its applications [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5677~5682
- 31 Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000. 8~22
蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000. 8~22
- 32 [Http://www.newfocus.com](http://www.newfocus.com)
- 33 R. J. Mears, L. Reekie, I. M. Jauncey *et al.*. Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm [J]. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(19): 1026~1028
- 34 E. Desurvire, J. R. Simposon, P. C. Becker. High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(11): 888~890
- 35 Xin Guofeng, Chen Guoying, Feng Rongzhu *et al.*. InGaAs/AlGaAs semiconductor laser 2-D arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 684~686
辛国锋, 陈国鹰, 冯荣珠 等. InGaAs/AlGaAs 半导体激光器二维阵列 [J]. 中国激光, 2003, **30**(8): 684~686
- 36 Xin Guofeng, Qu Ronghui, Chen Chen *et al.*. Characterization of a 2D array high power semiconductor laser module [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 447~450
辛国锋, 瞿荣辉, 陈 晨 等. 大功率半导体激光器二维阵列模块特性分析 [J]. 中国激光, 2006, **33**(4): 447~450
- 37 Lu Wei, Wang Qi, Jiang Peng. A technique and corresponding device for broadband amplitude modulating high-power laser [P]. *China Patent*, 2009, 10119749.7
陆 威, 王 骐, 姜 鹏. 一种获得宽带调制的高功率激光输出的方法及相应装置 [P]. 中国发明专利, 专利申请号: 200910119749.7