

文章编号: 1001-9014(2010)05-0357-05

基于高精度端元的混合像元线性分解模型研究

潘明忠, 亓洪兴, 肖功海, 舒嵘

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 从理论上阐述了混合像元的产生机理和混合像元线性分解模型, 研制了一套地面成像光谱实验系统, 直接获取了高精度的端元光谱数据, 通过像元合并的方式构造混合像元, 针对不同丰度的非立体空间混合像元端元, 分析了根据线性分解模型加权计算得到的光谱与实际混合光谱的误差, 进而论证了线性分解模型的精度。

关键词: 超光谱成像; 混合像元分解; 线性分解模型; 端元

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

STUDY OF MIXED PIXEL LINEAR UNMIXING MODEL BASED ON HIGH ACCURATE ENDMEMBER

PAN Ming-Zhong, QI Hong-Xing, XIAO Gong-Hai, SHU Rong

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: The theoretical analysis of emergence mechanism and linear unmixing model of mixed pixel was presented. A novel compact field hyperspectral imaging system was setup, and high accurate spectrum of endmembers was collected directly. Based on these endmembers, the model of linear unmixing of the mixed pixels was studied. The weighted spectrum obtained with the model for endmember with different abundance in the whole non-three-dimensional space was compared with the practical mixing spectrum. The accuracy of the model was verified.

Key words: hyperspectral imaging; mixed pixel unmixing; linear unmixing model; endmember

引言

成像光谱技术是上世纪 80 年初发展起来的一种新型遥感技术。自世界上首台成像光谱仪 AIS-1 (1982 ~ 1985 年, 128 波段) 由美国著名的喷气与推进实验室 (JPL) 研制成功以来, 经过近 30 年的发展, 成像光谱仪器已经成为机载及星载遥感中极其重要的仪器设备, 在地质、植被、生态环境、城市、军事等领域, 发挥着十分巨大的作用^[1]。

通过遥感获取的地面反射或者发射光谱一般以像元为单元进行记录, 它是像元所对应的地表物质光谱信号的综合。像元有纯像元及混合像元之分, 如果像元只包含一种地物类型, 则称之为纯像元, 反映的是该地物类型的光谱特征; 如果像元包含不止一种地物类型, 则称之为混合像元, 反映的是不同地物类型光谱特征的综合, 组成混合像元的纯像元称之为端元。

对于星载、机载遥感, 由于仪器空间分辨率的限制以及探测目标的多样性, 必然会导致混合像元的产生, 因而严重影响了遥感影像的分析精度, 阻碍了遥感技术的定量化发展。目前, 国内外在混合像元分解方面已经做了大量研究工作, 如: Kohei Arai^[2]、D. Heslop^[3]、Lifan Liu^[4]、周昊^[5] 以及吴柯^[6] 等人对混合像元分解模型进行了分析工作, 在混合像元分解模型应用方面的研究则更为广泛, Cheng-hai Yang 等人基于混合像元线性分解模型, 利用机载成像光谱数据对作物产量进行了评估^[7]; Enner Alcantara 等人基于 SMM (Spectral Unmixing Model), 利用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 数据对亚马逊河流域的悬浮物分布进行了研究^[8]; Ben Somers 等人采用非线性分解模型对果园中树木的覆盖情况进行了评估^[9]; Dagrun Vikhamar 等人基于约束的线性分解模型, 利用 MODIS 数据对积雪覆盖进行了研究^[10]; 肖青等人利用

收稿日期: 2009-05-21, 修回日期: 2010-01-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2009CB724005)

作者简介: 潘明忠 (1982-), 男, 吉林辽源人, 博士研究生, 主要从事成像光谱技术研究工作。

Received date: 2009-05-21, revised date: 2010-01-18

混合像元分解模型开展了提取水体叶绿素含量的研究^[11];岳文泽等人基于混合光谱分解模型,对城市的不透明水面分布进行了估算^[12];从文献调研情况来看,研究者的研究重点大多集中于混合像元分解模型的分析及应用,很少有人开展混合像元分解模型的验证及评价工作,然而,对于没有经过科学验证及评价的模型,其实际应用具有很大的局限性.对混合像元分解模型进行科学验证及评价,需要获取混合像元及该混合像元内各端元的高精度光谱数据,然而在以往的工作中,研究者可以利用的数据基本上都是星载或机载遥感数据,此类数据空间分辨率低,很难从中提取端元的精细光谱数据,无法用于验证和评价混合像元分解模型的科学性和有效性^[13,14].因此,如果能够利用某种试验平台直接获取混合像元内端元的高精度光谱数据,将能够很好地解决混合像元分解模型验证及评价的难题,极大地推动混合像元分解技术的发展.

本文从理论上阐述了混合光谱的产生机理及混合像元线性分解模型,研制了一套地面成像光谱试验系统,获取了高空间分辨率数据,直接提取了高精度的端元光谱数据,基于这些数据对混合像元线性分解模型进行了验证性研究,论证了该模型的精度.

1 混合光谱的产生机理及线性分解模型

混合像元所产生的混合光谱,成因可分为线性效应及非线性效应.线性效应是指混合像元中的各个端元之间相互独立、互不影响时,混合像元的光谱是该混合像元内各端元光谱的线性叠加;非线性效应是指由于端元之间的散射、传输路径及遥感仪器的混合效应所引入的光谱非线性叠加.根据混合光谱的产生机理,研究人员建立了许多混合光谱分解模型,主要包括:线性分解模型、非线性分解模型、模糊监督模型及神经网络模型^[13]等,其中线性分解模型物理含义明确,建模简单,因此得到了较为广泛的应用.

通过遥感分析积雪覆盖、草场植被及成片森林等非立体空间目标时,由于端元间的散射效应弱,因此线性效应在混合光谱的成因中起绝对主导作用;对于立体空间目标,由于端元间的散射,会引入部分非线性效应,因此用线性模型来描述此类混合光谱时,精度会有所降低,但此时用线性模型分析混合光谱仍然具有一定的物理意义.通常,在线性分解模型中,将非线性效应作为误差项进行分析.

像元光谱值与遥感仪器探测器接收到的该像元

的辐射功率成比例,因此通过计算探测器接收到的辐射功率来分析线性分解模型.假定遥感仪器瞬时视场内的探测目标为纯像元,则在瞬时视场内,探测器接收到的功率为:

$$P(\lambda) = \frac{1}{4}D_0^2 \cdot \Omega \cdot \rho(\lambda) \cdot E(\lambda) \cdot \tau_\alpha(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \quad , \quad (1)$$

其中: D_0 为光学系统的有效口径; Ω 为系统的瞬时视场角; $\rho(\lambda)$ 为纯像元的反射率; $E(\lambda)$ 为太阳或其它光源在纯像元表面的辐照度; $\tau_\alpha(\lambda)$ 为大气透过率; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的透过率;

当遥感仪器瞬时视场内的探测目标为混合像元时,假定混合像元中含有 N 种物质,即 N 种端元,每种端元的反射率分别为 $\rho_1(\lambda), \rho_2(\lambda), \rho_3(\lambda), \dots, \rho_N(\lambda)$,每种端元的面积占瞬时视场面积的比例分别为 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$,则探测器接收到的总功率 $P(\lambda)$ 为:

$$\begin{aligned} P(\lambda) &= \sum_{j=1}^N P_j(\lambda) \\ &= \frac{1}{4}D_0^2 \cdot \Omega \cdot E(\lambda) \cdot \tau_\alpha(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \sum_{j=1}^N \rho_j(\lambda) \cdot F_j \\ &= K(\lambda) \cdot \sum_{j=1}^N \rho_j(\lambda) \cdot F_j \\ &= \sum_{j=1}^N \rho'_j(\lambda) \cdot F_j \quad , \quad (2) \end{aligned}$$

公式(2)中:

$$K(\lambda) = \frac{1}{4}D_0^2 \cdot \Omega \cdot E(\lambda) \cdot \tau_\alpha(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \quad ,$$

$$\rho'_j(\lambda) = K(\lambda) \cdot \rho_j(\lambda) \quad .$$

公式(2)是线性模型的理论基础,由于非线性效应的存在,导致该模型无法精确地描述混合像元的混合机理,因此引入误差项表征非线性效应.引入误差项后,模型描述为:

$$P(\lambda) = \sum_{j=1}^N \rho'_j(\lambda) \cdot F_j + e(\lambda) \quad . \quad (3)$$

假设 M 波段遥感仪器的各波段中心波长分别为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_M$ 令:

$$p = \begin{bmatrix} P(\lambda_1) \\ P(\lambda_2) \\ \vdots \\ P(\lambda_M) \end{bmatrix}, \quad \rho = \begin{bmatrix} \rho'_1(\lambda_1) & \rho'_2(\lambda_1) & \dots & \rho'_N(\lambda_1) \\ \rho'_1(\lambda_2) & \rho'_2(\lambda_2) & \dots & \rho'_N(\lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \rho'_1(\lambda_M) & \rho'_2(\lambda_M) & \dots & \rho'_N(\lambda_M) \end{bmatrix},$$

$$f = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}, \quad e = \begin{bmatrix} e(\lambda_1) \\ e(\lambda_2) \\ \vdots \\ e(\lambda_M) \end{bmatrix}$$

则公式(3)可写成:

$$p = \rho \cdot f + e \quad . \quad (4)$$

根据附加的约束条件:

$$0 \leq F_j \leq 1, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^N F_j = 1, \quad (2)$$

在已知混合像元光谱 p 及端元光谱 ρ 的情况下,可以推算各个端元在混合像元中的所占比例,即混合像元线性分解.混合像元线性分解的常用方法包括:最小二乘法、凸面几何学分析、滤波向量法、投影寻踪、独立成分分析、正交子空间投影、端元投影向量法、单形体体积法^[15]等.

2 地面成像光谱实验系统

通过地面成像光谱实验系统直接提取端元光谱数据,要求系统测量到的单位像素点为纯像元,由于地物的复杂多样性,必须达到毫米级的空间分辨率才不会产生混合像元.按照观测距离为 1~2m 计算,需要达到毫弧度量级的空间分辨率,单位像素点才不会产生混合像元,同时为了区分各种地物类型,需要一定的光谱分辨率.为了更好地开展混合像元分解研究,本文专门研制了一套地面成像光谱实验系统.

2.1 适用于混合像元分解研究的地面成像光谱实验系统

系统的主要技术指标如表 1 所示:

表 1 系统主要技术指标

Table 1 The main parameters of system

波段范围	400 ~ 900nm
空间分辨率	1 mrad
光谱分辨率	优于 10nm
波段数	344

地面成像光谱仪实验系统基于推帚式成像光谱仪的原理进行设计,采用棱镜-光栅-棱镜 (PGP) 作为分光计,如图 1 所示.系统瞬时视场内的地物在太阳光或其它光源照射下,经扫描镜、物镜成像于分光计的入射狭缝处,再经分光计的前光学系统准直后色散,由分光计的后光学系统会聚成像于面阵 CCD 相机上,获取的数据通过 USB2.0 接口传输至笔记本电脑.系统在扫描机构的配合下,对地物进行一维扫描,便可以得到地物的二维图像信息及光谱信息,即数据立方体.

2.2 地面成像光谱实验系统用于混合光谱分解的优势^[16]

首先,端元提取精度更高.整个系统的架设高度为米级,1mrad 的瞬时视场对应的空间分辨率为毫

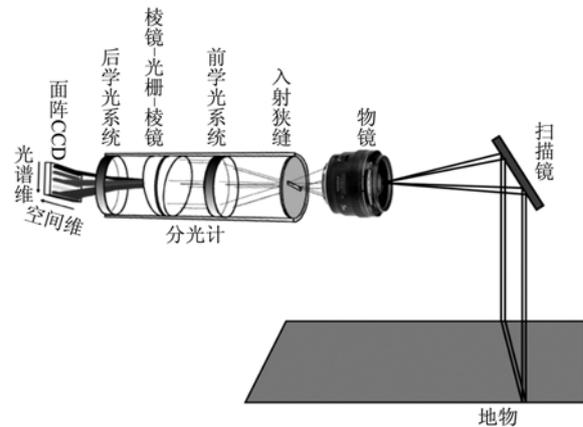


图 1 地面成像光谱实验系统原理

Fig. 1 The principle of field hyperspectral imaging system

米量级,此时瞬时视场内的地物基本为纯像元,因此测得的光谱数据,相对于星载及机载遥感数据来讲,在端元的精度上具有巨大的优势,更加适用于混合像元分解基础研究.

其次,易于开展仿真及验证实验.利用地面成像光谱实验系统,可以方便地对特定目标进行探测,且可以对目标进行多角度、重复性的测量,相对于星载及机载遥感,具有极高的灵活性及自主选择性.

此外,地面成像光谱实验系统可以实现快速测量、单次测量成本低等优势,使其成为混合像元分解研究的重要工具.

3 利用地面成像光谱实验系统研究混合像元线性分解模型

利用地面成像光谱实验系统对混合像元线性分解模型进行研究.研究方法为:在均匀背景下掺入具有不同光谱特征的物质,即人为地制造混合像元.利用地面成像光谱实验系统对混合像元进行高空间分辨率探测,可以获取各端元光谱 ρ ;通过 CCD 相机像元合并的方式,降低系统的空间分辨率,可以获取该混合像元的混合光谱 p ;混合像元是人造的,因此端元占混合像元的面积比例 f 为已知量;根据公式 (4),可以求得混合光谱与各端元加权计算光谱的误差项 e ,进而分析出线性分解模型的精度.

实验方法为:将反射率为 50% 的灰板作为背景,在其内部放入像素尺寸为 36×28 的绿色阔叶,此时灰板及阔叶组成混合像元,如图 2 所示.

以 10% 为步进,分析阔叶占混合像元不同丰度时,灰板及阔叶的实际混合像元光谱与加权计算混合像元光谱的均方根误差 e :

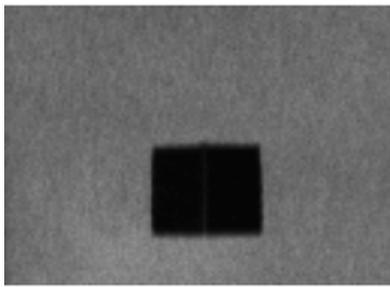


图2 阔叶及灰板组成的混合像元
Fig.2 The mixed pixel of broadleaf and reflectance plate

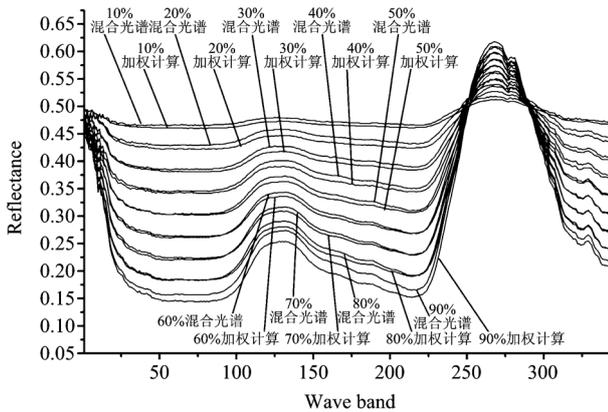


图3 混合像元反射率与加权计算反射率对比图
Fig.3 The comparison of mixed pixel reflectivity and endmember weighted reflectivity

$$e = \sqrt{\frac{1}{M} \sum (p - \rho \cdot f)^2} \quad (5)$$

公式(5)中光谱均以反射率进行计算. 图3为阔叶占混合像元各种丰度时混合像元反射率与加权计算反射率的对比图, 计算出的均方根差如表2所示.

上述结果表明, 对于与本实验类似的非立体空间混合像元来讲, 线性分解模型具有很高的精度. 但在阔叶丰度为90%时, 线性分解模型精度变差, 主

表2 不同丰度值时线性分解模型精度
Table 2 The accuracy of linear unmixing model for endmembers of different abundance

阔叶所占丰度	阔叶尺寸(像素)	混合像元总尺寸(像素)	均方根差
10%	36 × 28 = 1008	112 × 90 = 10800	0.005353
20%	36 × 28 = 1008	80 × 63 = 5040	0.009560
30%	36 × 28 = 1008	60 × 56 = 3360	0.008129
40%	36 × 28 = 1008	63 × 40 = 2520	0.009744
50%	36 × 28 = 1008	48 × 42 = 2016	0.007762
60%	36 × 28 = 1008	42 × 40 = 1680	0.006105
70%	36 × 28 = 1008	40 × 36 = 1440	0.006485
80%	36 × 28 = 1008	42 × 30 = 1260	0.007227
90%	36 × 28 = 1008	40 × 28 = 1120	0.014584

要原因在于: 由于成像光谱实验系统相邻扫描线之间的像元重叠, 导致的阔叶边缘模糊, 以及阔叶自身阴影的影响, 引入部分误差项, 当阔叶丰度较低时, 混合像元总尺寸大, 因此误差项的权重较小, 随着阔叶丰度的提高, 混合像元尺寸变小, 此误差项的影响变大, 导致分析精度变差. 但从总体来讲, 对于此类混合像元, 利用线性分解模型进行混合像元分解, 精度较高, 具有很高的实用价值.

4 结论

利用自行研制的地面成像光谱实验系统直接获取了高精度的端元光谱数据, 基于这些有效数据对混合像元线性分解模型进行了验证性研究. 研究表明, 对于非立体空间混合像元, 利用线性分解模型进行混合像元分解, 可以达到较高的精度, 能够满足实际应用的需要. 本文的研究内容为混合像元线性分解模型的科学性提供了数据支持, 为该模型的推广应用提供了科学支撑.

由于探测目标的复杂多样性, 存在着大量的立体空间混合像元, 线性分解模型无法精确地描述此类混合光谱的产生机理, 因此需要采用非线性分解模型来表征混合光谱, 虽然研究者提出了许多非线性分解模型, 但是由于没有高精度的端元光谱数据支持, 大多数研究者并不能验证那些模型的科学性. 利用本文研制的地面成像光谱实验系统, 能够直接获取高精度端元光谱数据, 可以用于混合像元非线性分解模型的验证和建模, 这将是下一步的工作重点.

REFERENCES

- [1] ZHANG Zong-gui, Wang Run-sheng. Imaging spectrometer remote sensing methodological technology and it's application based on spectroscopy[J]. *Remote Sensing for Land & Resources* (张宗贵, 王润生. 基于谱学的成像光谱遥感技术发展与应用. *国土遥感资源*), 2000, **11**(3): 16—24.
- [2] Kohei Arai, Huahui Chen. Unmixing method for hyperspectral data based on sub-space method with learning process [J]. *Advances in Space Research*, 2009, **44**: 517—523.
- [3] Heslop D, Dobeneckvon T, Höcker M. Using non-negative matrix factorization in the “unmixing” of diffuse reflectance spectra [J]. *Marine Geology*, 2007, **241**: 63—78.
- [4] Lifan Liu, Bin Wang, Liming Zhang. Decomposition of mixed pixels based on Bayesian self-organizing map and Gaussian mixture model [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, **30**: 820—826.
- [5] ZHOU Hao, WANG Bin, ZHANG Li-ming. New scheme for decomposition of mixed pixels of remote sensing images [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (周昊, 王斌, 张立明. 一种新的遥感图像混合像元分解方法. *红外与毫米波学报*),

- 2005, **24**(6):463—466.
- [6] WU Ke, ZHANG Liang-pei, LI Ping-xiang. A neural network method of selective endmember for pixel unmixing [J]. *Journal of Remote Sensing* (吴柯, 张良培, 李平湘. 一种端元可变的神经网络混合像元分解方法. *遥感学报*), 2007, **11**(1):20—26.
- [7] Cheng-hai Yang, James H Everitt, Joe M Bradford. Airborne hyperspectral imagery and linear spectral unmixing for mapping variation in crop yield [J]. *Precision Agric*, 2007, **8**:279—296.
- [8] Enner Alc nara, Cl udio Barbosa, José Stech. Improving the spectral unmixing algorithm to map water turbidity distributions [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**:1051—1061.
- [9] Ben Somers, Kenneth Cools, Stephanie Delalieux, et al. Nonlinear Hyperspectral mixture analysis for tree cover estimates in orchards [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**:1183—1193.
- [10] Dagrun Vikhamara, Rune Solberg. Snow-cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **88**:309—323.
- [11] XIAO-Qing, WEN Jian-guang, LIU Qin-huo, et al. Study on spectral unmixing model and its application in extracting chlorophyll concentration of water body [J]. *Journal of Remote Sensing* (肖青, 闻建光, 柳钦火. 混合光谱分解模型提取水体叶绿素含量的研究. *遥感学报*), 2006, **10**(4):559—567.
- [12] YUE Wen-ze, WU Ci-fang. Urban Impervious surface distribution estimation by spectral mixture analysis [J]. *Journal of Remote Sensing* (岳文泽, 吴次芳. 基于混合光谱分解的城市不透明水面分布估算. *遥感学报*), 2007, **11**(6):914—922.
- [13] HUI Wei-wei, YI De-ping, LIAO Cai-xia, et al. The study of decomposing mix element [J]. *Forestry Science and Technology Information* (惠巍巍, 衣德萍, 廖彩霞, 等. 混合像元分解研究综述. *林业科技情报*), 2007, **39**(1):2—3.
- [14] WEI Jian-jun, LI Xin-ping, ZHAO Dong-bo, et al. Review on un-mixing mixed-pixel of remotely sensed data [J]. *Research of Soil and Water Conservation* (卫建军, 李新平, 赵东波, 等. 混合像元分离的研究进展. *水土保持研究*), 2006, **13**(5):103—105.
- [15] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fen. *Hyperspectral remote sensing* [M]. Beijing: Higher Education Press (童庆禧, 张兵, 郑兰芬. *高光谱遥感-原理、技术与应用*. 北京: 高等教育出版社, 2006:246—289.
- [16] PAN Ming-zhong, QI Hong-xing, XIAO Gong-hai, et al. Design of compact field hyperspectral imaging spectrometer [J]. *Infrared* (潘明忠, 齐洪兴, 肖功海, 等. 便携式地面成像光谱辐射计的设计. *红外*), 2010, **31**(1):1—7.

(上接 332 页)

腔面发射激光器有源区中的电流密度分布的进行了模拟计算,由计算结果可知有源区中的电流密度由氧化孔直径和 p 面电极直径共同决定.当 p 面电极直径大于氧化孔直径时,电流密度分布主要由氧化孔直径决定;当 p 电极直径小于氧化孔直径时,电流密度分布由氧化孔直径和 p 面电极直径共同决定,氧化孔直径对电流分布的影响随着 p 型电极直径的减小而不断减小,当 p 面电极直径远小于氧化孔直径时,氧化孔径失去对电流的有效限制,此时电流密度分布只由 p 面电极直径决定.在确定氧化孔直径后,通过优化设计 p 面电极直径,在对电流进行有效限制的同时实现有源区中电流密度的均匀分布,从而抑制远场光斑中高阶边模的产生.将 p 面电极直径由 650 μm 减小到 580 μm 后,制作的氧化孔径为 600 μm 的 VCSEL 器件的远场发散角从 30° 减小到 15°,优化后器件的阈值电流和最高输出功率都略有增加.通过改进封装方式后,器件室温连续最高输出功率为 2.01 W,激光波长为 982.6 nm.

REFERENCES

- [1] MEDERER F, JAGER R, SCHNITZER P, et al. Multi-Gb/s graded-index POF data link with butt-coupled single-mode InGaAs VCSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, **12**(2):199—201.
- [2] IGA K. Vertical-Cavity Surface-emitting laser: Its Conception and Evolution [J]. *Japan. J. Appl. Phys*, 2008, **47**(1):1—10.
- [3] JAGER R, GRABHERR M, JUNG C, et al. 57% wallplug efficiency oxide-confined 850nm wavelength GaAs VCSELs [J]. *Electronics Letters*, 1997, **33**(4):330—331.
- [4] AMANN M C, ORTSIEFER M, SHAU R, et al. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diodes for Telecommunication Wavelengths [C]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4871**:123—129.
- [5] UEKI N, NAKAYAMA H, SAKURAI J, et al. Complete polarization control of 12 × 8-bit matrix-addressed oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser array [J]. *Japan. J. Appl. Phys*, 2001, **40**:L33—L35.
- [6] WU Jian, IORDACHE G, SUMMERS H D, et al. Optical characteristics of VCSEL pumped microchip lasers [J]. *Optics Communications*, 2001, **196**:251—256.
- [7] JIN Zhenhua, SUN Yanfang, NING Yongqiang, et al. 980nm High power bottom emitting VCSELs [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (金珍花, 孙艳芳, 宁永强, 等. 980nm 大功率垂直腔底发射激光器. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1):61—64.
- [8] SEURIN J F, GHOSH C L, KHALFIN V, et al. High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays [C]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **6908**(08):1—14.
- [9] HARDLEY G R, LEAR K L, WARREN M E, et al. Comprehensive numerical modeling of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1996, **32**(4):607—616.
- [10] ANGELOS C, HINCKLEY S, MICHALZIK R, et al. Simulation of Current Spreading in Bottom-Emitting Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for High Power Operation [C], *Proceedings of SPIE*, 2004, **5277**:261—272.