

文章编号: 1001-3806(2004)03-0298-05

## 半导体激光器光束特性的计算机模拟与实验研究

甘巧强<sup>1,2</sup>,朱晓鹏<sup>2</sup>,潘学俭<sup>3</sup>,邓捷<sup>1</sup>,宋国锋<sup>2</sup>,陈良惠<sup>2</sup>

(1. 复旦大学 材料科学系, 上海 200433; 2. 中国科学院 半导体研究所 光电子器件国家工程研究中心, 北京 100083; 3. 南京大学 计算机科学系, 南京 210093)

**摘要:** 为建立一套快速、准确的测量系统以适用于半导体激光器中、大规模生产的测试要求,利用有限元差分数值模拟方法对半导体激光器光束的近、远场分布,发散角等作理论模拟,利用测量系统对其光束的近远场分布、发散角等进行测量。最后提出相应方案处理测量结果以减小误差。与一般测量光束参数的系统相比,该测量系统具有兼顾简单快速与准确的优点。

**关键词:** 半导体激光器;光束质量;远场分布;发散角

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Computer simulation and experiment research about optical beam characteristics of semiconductor laser

GAN Qiao-qiang<sup>1,2</sup>, ZHU Xiao-peng<sup>2</sup>, PAN Xue-jian<sup>3</sup>, DENG Jie<sup>1</sup>, SONG Guo-feng<sup>2</sup>, CHEN Liang-hui<sup>2</sup>

(1. Department of Material, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Institute of Semiconductors, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 3. Department of Computer Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The goal of this article is to present a measuring system which is fast and simple to be applied for the middle or large scale production of semiconductor lasers. The simulation is performed to the near field pattern, far field pattern and divergence angle etc. of the semiconductor laser with the finite difference analysis. A measuring system is built to measure the characteristics. Finally, the experimental system error is analyzed, and an approach to cut down the error is presented. Compared with other methods, this measuring system is simple, fast and precise.

**Key words:** semiconductor laser; optical beam quality; far field pattern; divergence angle

## 引言

半导体激光器作为一种重要的相干光源,得到了日益广泛的应用,例如 DVD 读写<sup>[1]</sup>、光纤远距离传输(输出光的光纤耦合)<sup>[2]</sup>等。掌握其输出光束的特性对半导体激光器的应用来讲具有重要的意义,其光束质量直接影响着它的应用范围。

2002 年,中国打破了世界 DVD 用半导体激光器的技术垄断,掌握了自主知识产权的半导体激光器制造技术,具有了中等规模的生产能力。故建立一套半导体激光器的光束评价测量系统很有必要。

半导体激光器输出光性质与其它激光器相比有很大差别,简单说有发散角、像散、噪声较大等特点。目前,国际推荐的  $M^2$  因子评价标准主要用于近轴光束质量评价,而半导体激光器的大发散角光束是非傍轴的。虽然不少人试图把傍轴评价标准推广到非傍轴情况,但存在种种问题<sup>[3,4]</sup>。因此,目前评价半导体激光器光束质量仍使用单个参数。如何科学地综合评价半导体激光器的光束质量有待研究。

笔者的重点是设计高效测量系统研究半导体激光器光束的近、远场光强分布和远场发散角特性,为研究如何综合评价其光束质量做实验准备。

## 1 基于半矢量近似有限元差分方法的计算机模拟

有限元差分方法<sup>[5]</sup>是 20 世纪 80 年代发展起来的模拟方法,适合于在波导中的各个矩形区域内介质折射率为常数的结构。这些矩形的边分别平行

基金项目:国家八六三计划资助项目(2002AA313060)

作者简介:甘巧强(1980-),男,硕士研究生,目前主要从事半导体激光器光学参数的测量与研究。

E-mail: 9930032@Fudan.edu.cn

收稿日期:2003-07-07;收到修改稿日期:2003-08-22

于相互正交的两个方向。对于具有渐变折射率部分的波导,可以将渐变部分划分为许多小矩形,在每个小矩形内令折射率是常数,只要分划足够小就能获得足够高的精度。对于非平面结构,可将内部非平面边界划分为平行于  $x$  轴  $y$  轴的折线,以这些折线为边界构造矩形,可以根据所需要的计算精度和内部边界形状来确定折线的细密程度,这样,采用有限差分格式方法几乎可以描述不限于平面波导的任意波导结构了。

图 1 为不等间距<sup>[6]</sup>5 点差分格式单元格式示意图。每个单元格式内折射率为常数,坐标点取在单元格式正中央,电介质不连续的地方处于网格边界上。

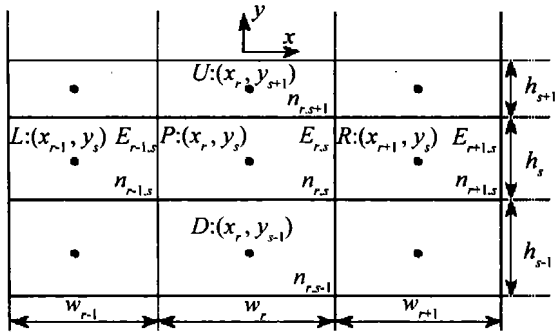


Fig.1 Finite difference lattice

根据麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot D = 0 \\ \nabla \times E = - \partial B / \partial t \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times H = - \partial D / \partial t + j \end{cases} \quad (1)$$

和  $D = \epsilon(x, y) E, B = \mu H, j = \sigma E$  (2)

在半矢量近似下电磁场有如下形式:

$$\begin{aligned} E(x, y, z, t) &= E(x, y, z) e^{i\omega t} = E(x, y) e^{i(\omega t - \tilde{\beta} z)} \\ H(x, y, z, t) &= H(x, y, z) e^{i\omega t} = H(x, y) e^{i(\omega t - \tilde{\beta} z)} \end{aligned} \quad (3)$$

即电场磁场分量只是  $x, y$  的函数,  $z$  方向上变化存在于相位传播因子中。

只考虑电场,推导得两个互相独立的标量 Helmholtz 方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2) E_x = 0 \\ \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + (k^2 - \beta^2) E_y = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $k = k(x, y) = \omega(\epsilon\mu)^{1/2} = 2\pi n(x, y) / \lambda, \partial / \partial z = -i\beta, \partial^2 / \partial z^2 = -\beta^2$ 。

将此场方程由偏微分方程化为二维网格上的 5 点差分格式,得到准 TE 模 5 点差分格式基本方程为:

$$u_r C_{r,s} E_{r-1,s} + l_r A_{r,s} E_{r+1,s} + p_s E_{r,s-1} + q_s E_{r,s+1} +$$

$$(u_r D_{r,s} + l_r B_{r,s} + v_r + o_s + k_{r,s}^2) E_{r,s} = 2\beta^2 E_{r,s} \quad (5)$$

$u_r, v_r, l_r, p_s, o_s, q_s, C_{r,s}, A_{r,s}, D_{r,s}$  都是用网格划分长度  $h, w$ , 折射率  $n$  以及波长  $\lambda$  等表示的系数,是已知的量。这样,波导划分后的每个格子就和其周围的 4 个格子建立了关系,对场分布  $E$  赋初值后,就能根据上述公式进行端面近场分布的模拟计算,当计算精度达到要求以后最终得到模拟结果。再根据近场结果外推远场分布,这里直接给出常用远场公式:

$$S(r, \theta, \phi) = \frac{4\pi^2}{\omega\mu r^2} (k_z^2 + k_{x,y}^2) / A_{x,y} / k^2 \quad (6)$$

式中,  $A_{x,y}$  是电场  $E$  的 Fourier 变换。于是可计算远场分布。上述方程详细推导和系数的具体表达参见文献[3]。

根据上述原理,模拟损耗导引 650nm 掩埋脊形波导量子阱激光器的近场和远场分布。激光器的结构示意图见图 2,各层折射率数据见表 1,采用对称波导,双量子阱,其中阱的折射率虚部  $\kappa$  对应增益。

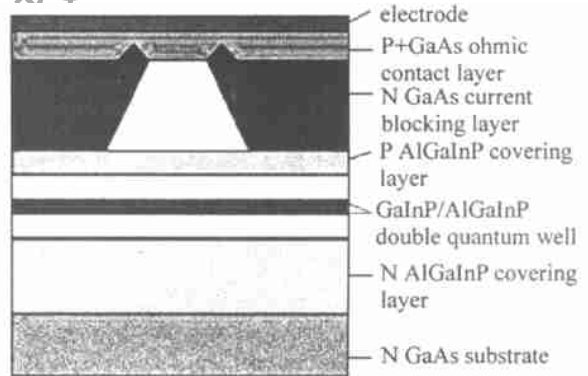


Fig.2 Structure of 650nm semiconductor laser

Table 1 Structure of 650nm laser

|   | material  | refractive index  | width / $\mu\text{m}$ |
|---|---|-------------------|-----------------------|
| substrate ,current blocking layer and ohmic contact layer | GaAs  | 3.830 - i0.8128   | ---                   |
| covering layer  | $(\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$   | 3.282             | 1.1                   |
| waveguide layer   | $(\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ | 3.445             | 0.04                  |
| barrier   | $(\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ | 3.445             | 0.004                 |
| well  | $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$                          | $3.675 + i\kappa$ | 0.007                 |
| blocking layer  | $\text{SiO}_2$  | 1.457             | 0.2                   |
| electrode   | Au  | $0.241 - i6.56$   | 0.2                   |

(1) 近场分布模拟图像

首先模拟波导端面上的近场分布。由此计算出理论上波导中传播的是基模还是存在高阶模成分,

见图3。此结果可对器件参数调整提供参考。

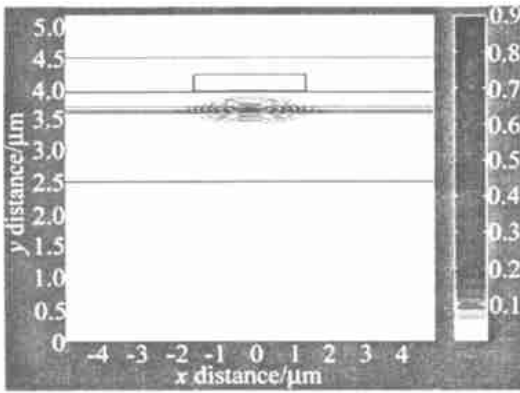


Fig. 3 Simulation result of near field pattern in waveguide

(2) 由近场外推远场

通常,把波导出射端面附近几个波长范围认为是近场,10到20个波长范围内是中间范围,20个波长以外就认为是远场。

从近场到远场实际上是沿平行于结平面方向传播的波的非涅耳衍射。设波沿z轴传播,z > 20λ 以外的远场二维分布示意如图4所示。

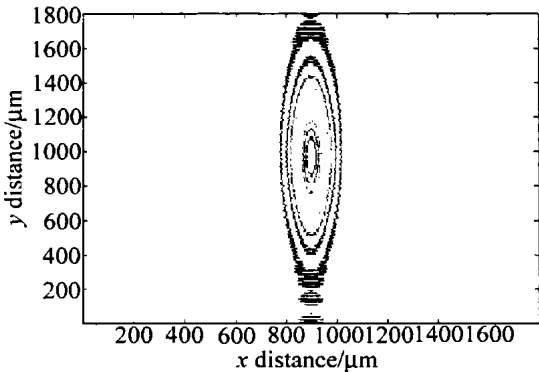


Fig. 4 Simulation result of far field pattern (z > 20λ)

(3) 远场分布与发散角

得到了远场分布以后,分析其垂直于结平面和平行于结平面方向的一维光强分布,直接把x横轴的距离坐标转换成角度坐标,由此模拟得到发散角大小。

垂直于结平面方向上一维分布的半高宽(即纵向发散角)为:θ<sub>⊥</sub> = 45.1°。

平行于结平面方向上一维分布的半高宽(即横向发散角)为:θ<sub>∥</sub> = 8.7°。

## 2 测量系统的设计

### 2.1 近场分布的实验研究

近场分布是指在半导体激光器出光面及其附近几个波长范围内的光强分布。实验测量系统光路图如图5所示,用显微透镜使激光器出光面成像在远处的 CCD 接收平面上,形成放大的图像,由此采集

并分析其光强分布。

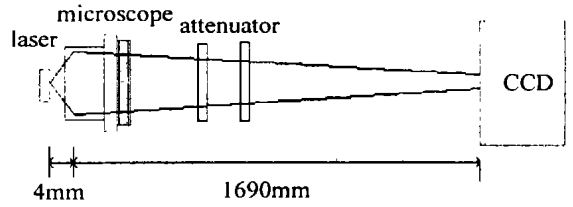


Fig. 5 Experimental system to measure the near field pattern

由于激光强度较大,可能超过 CCD 动态范围,因此,用减光片来使光束强度维持在 CCD 动态范围内(0~255),但这就会带来系统误差,建议在条件允许的情况下选用高动态范围的科学级 CCD 探测器,减小由于加入减光片而带来的畸变等误差。调节显微物镜位置,使出光面的像清晰地显示在 CCD 接收平面上。此图像可由图像采集卡传输到电脑显示屏,通过观察,显示图像判断成像是否清晰。

### 2.2 远场分布和发散角的实验研究

远场分布是指离出光面距离 d ≫ λ 的光场分布。测量系统光路示意图与图5大致相同,将激光器移置于显微透镜的焦距处,使激光经过透镜后转换为平行光束。测量此平行光束的截面光斑,分析其长轴、短轴长度就能进一步计算光束发散角。

## 3 讨论

### 3.1 远场光强分布与发散角的测量数据分析

由于图像仅仅是红光图像,因此,不必采用通常的灰度值计算公式,而可以只用红分量的值来代表光强大小。

发散角的信息包含在远场分布中,在利用程序去除本底影响后,要分析远场发散角的大小。根据常用指标,把光强值下降到中心最亮光强值 1/2 处的点阵定义为发散角边缘,由此测量并计算发散角大小。需要注意的是,这一测量的图像并没有放大,是与实际图像等大的。

远场光强分布如图6所示,其中z轴代表归一

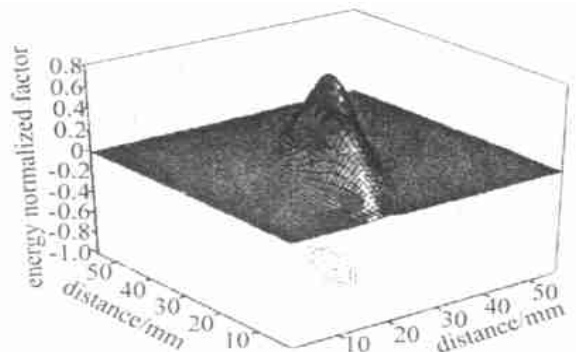


Fig. 6 3-D distribution of far field experimental result



化光强。三维光强分布可更加直观地观察空间范围内激光器是否存在高阶模,以进一步评价激光器的质量。投影到  $x, y$  平面上的是二维分布情况。

把通过远场光场分布重心的长轴和短轴的一维数据取出来作为远场的一维光强分布,纵坐标代表归一化光强。将理论模拟(虚线)和实际测量(实线)的分布曲线放在一起,如图 7 所示。可以计算得到:横向发散角为  $\theta_{\parallel} = 10.67^{\circ}$ ;纵向发散角为  $\theta_{\perp} = 44.88^{\circ}$ 。

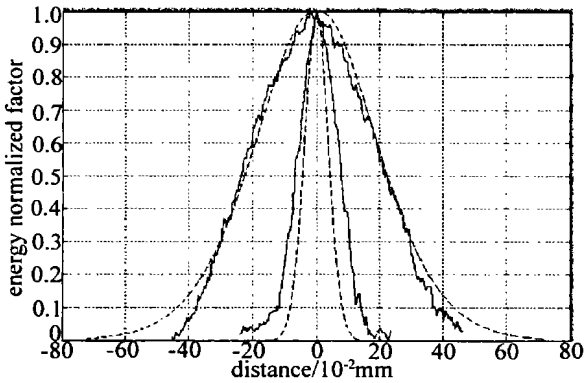


Fig. 7 1-D distribution contrast about far field simulation and experimental results

### 3.2 误差分析

3.2.1 CCD 本底电流和背景杂散光 CCD 本底电流和背景杂散光都属于随机影响因素,并不能非常精确地描述,但是在实际操作中有以下几种办法降低其影响。

(1) 在暗房中进行测量,尽可能减小背景光。每次进行测量时,都应在同一条件下测量背景图像,即测量激光器光斑的同时,在激光器不发光的情况下也进行测量。这样 CCD 的暗电流以及尚未完全排除的背景杂散光等随机因素都将包含于一张看似全黑的图像之中。在后期数据处理时,通过程序把背景信号从激光光斑图像中减去,以此减小背景信号的影响。图 6 是去除本底之后的三维结果,图 8 是没有去除本底的结果,两者的差别很明显。

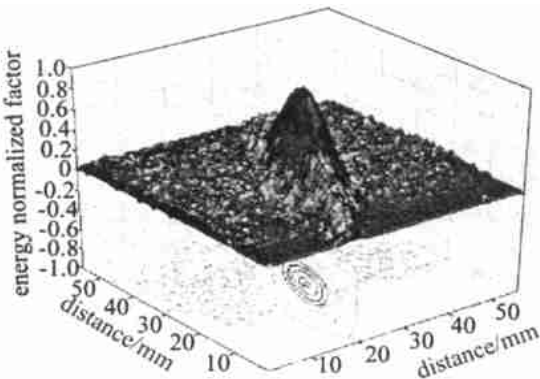


Fig. 8 3-D distribution of far field experimental result which hasn't been dealt

(2) 可采用多次测量求平均值的方法来尽可能减少测量时背景信号的不确定性带来的误差。同样,多次测量求平均值也应应用于测量激光光斑图像。这就会使检测次数增多,精确度可以适当提高,但未必符合快速简便的实际测量要求。

(3) 鉴于快速简便的要求,在精确度要求不是特别高的情况下,可只测量一次背景图像和激光光斑图像。但把背景从激光光斑图像中减去之后处理出来的数据随机性很大,会有比较多的“毛刺”,弥补的办法是对图像进行平滑处理,消除“毛刺”,把随机起伏的影响降低。这些都是后期编程处理的工作,可以加快测量速度,使测量更加简便。

实际测量中可以斟酌利弊,选择采用(2)或(3)的方法来达到合适的精度和测量速度。

3.2.2 基于光线追迹的误差分析方法 从测量结果可见,横向发散角和纵向发散角分别为  $10.67^{\circ}$  和  $44.88^{\circ}$ ,都大于  $5^{\circ}$  的傍轴近似限度,因此,对半导体激光器光束,必须考虑非傍轴光线造成的像差(主要是轴上球差)。

处理这一误差的基本思路如图 9 所示,追迹两条非傍轴光线,它们从激光器出射时夹角假设为  $1^{\circ}$ ,在透镜左侧界面的  $B_1, B_2$  射入透镜,两者间距  $H$ ;经过折射等一系列传播后,分别从透镜界面的两个不同位置  $A_1, A_2$  射出来;当它们传播到 CCD 镜头的时候分别达到位置不同的两点  $a_1, a_2$ ,间距  $h$ 。于是原本应该平行于主轴出射的两条光线现在和主轴成一定角度出射,原本应该分布在  $H$  范围内的光强在 CCD 镜头处分布在了  $h$  范围内,显然造成了系统误差。

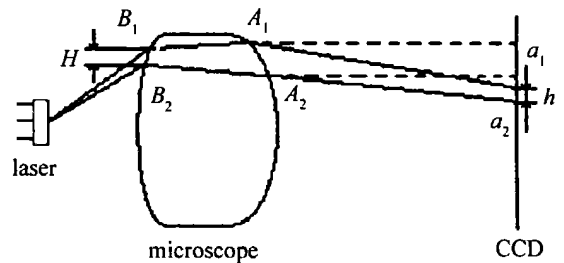


Fig. 9 Error analysis

把接收到的图像数据中分布在  $h$  范围内的光强值求和,除以  $H$  后将此平均值分布到  $H$  范围中。依此方法将有效范围内所有光强数据都进行处理,得到新的数据矩阵,这样就达到减小系统误差的目的。对程序作修改,追迹各个角度出射的光线。只要所追迹的两条光线之间的夹角取得足够小,误差处理就可以达到相当的精度。

另外,由于 CCD 动态范围不够而在光路中加入减光片会对结果带来误差,但由于减光片的误差也

主要影响到非傍轴部分的光线,在本实验中对发散角测量结果影响并不大,但对光场分布有一定影响,也可根据光线追迹的方法作进一步修正。如果在测量系统中选用动态范围大的科学级 CCD,就可以避免由于减光片带来的误差。

这些工作本身也是后期编程处理,在整个测量系统建成之后,并不影响测量速度和简便程度。

## 4 结论

(1) 利用半矢量近似的有限元差分方法,详细模拟得到了损耗导引 650nm 掩埋脊型波导量子阱半导体激光器光束的近场分布、远场分布、远场光斑平行和垂直方向的光强分布以及远场发散角的理论计算值。(2) 设计建立了一套满足中大规模生产测试需要的测量系统。从实际测量的数据和分析结果看,实际测量和理论模拟吻合较好,初步达到设计要求,具有简单易行,快速准确的优点。(3) 对该测量系统中存在的主要误差进行了分析,给出了减小 CCD 探测器误差的方法和结果;利用光线追迹法进行了减小或消除光路系统误差的探索,给出了处理测量数

据以减小误差的基本思路和可行方法。

感谢复旦大学材料系江素华博士、曾韦副教授,99 级黄丽、瞿欣、陈柱等在研究过程中给予的帮助和讨论,感谢中国科学院半导体所钟源博士、康香宁博士、邱伟彬博士对本工作的支持。

## 参考文献

- [1] HUANG M F, LEE H Ch, HO J K *et al.* Laser diode for DVD pickup head [J]. Proc SPIE, 1998, 3419: 110~118.
- [2] YANG G W, XU J Y, ZHANG I M *et al.* Theoretical investigation on quantum well lasers with extremely low vertical beam divergence and low threshold current [J]. J A P, 1998, 83(1): 8~14.
- [3] 朱晓鹏. 光波导数值模拟与半导体激光光束性质研究 [D]. 北京: 中国科学院半导体研究所, 2002. 3~10.
- [4] 吕章德, 周国泉, 王绍民. AlGaInP/GaInP SCH S-SQW 激光器光束质量的矢量矩分析 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(6): 549~551.
- [5] BIERWIRTH K, SCHULZ N, ARNDT F. Finite-difference analysis of rectangular dielectric waveguide structures [J]. IEEE Trans Microwave Theory Technol, 1986, 34(11): 1104~1114.
- [6] KIM C M, RAMASWAMY R V. Modeling of graded-index channel waveguide using non-uniform finite-difference method [J]. IEEE J Lightwave Technol, 1989, 7(10): 1581~1589.
- [7] 陈军, 黄鹏. 利用 CCD 准确测量激光远场发散角 [J]. 强激光与粒子束, 1997, 19(4): 552~556.

(上接第 297 页)

表中第 2 列为挠度分布, 第 3 列为光程差与激光波长之比。按照激光全息条纹分布理论, 计算出其理论条纹分布为图 5。

Table 1 Theoretical distribution of displacement and the relevant optical path difference

| coordinate<br>/ mm | deflection<br>/ m | displacement optical path difference<br>( $\lambda = 632.8\text{nm}$ ) |
|--------------------|-------------------|--|
| 0                  | 0                 | 0.000000   |
| 10                 | 4.22E-08          | 0.066755   |
| 20                 | 1.64E-07          | 0.259824   |
| 30                 | 3.60E-07          | 0.568410   |
| 40                 | 6.21E-07          | 0.981718   |
| 50                 | 9.42E-07          | 1.488951   |
| 60                 | 1.32E-06          | 2.079313   |
| 70                 | 1.74E-06          | 2.742009   |
| 80                 | 2.19E-06          | 3.466241   |
| 90                 | 2.68E-06          | 4.241216   |
| 100                | 3.20E-06          | 5.056135   |
| 110                | 3.73E-06          | 5.900204   |
| 120                | 4.28E-06          | 6.762625   |
| 130                | 4.83E-06          | 7.632605   |
| 140                | 5.38E-06          | 8.499345   |
| 150                | 5.92E-06          | 9.352050   |

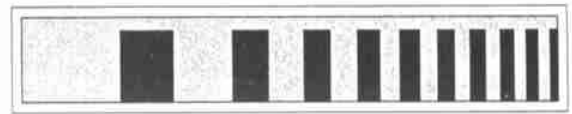


Fig. 5 Deflection distribution by analog computation

## 4 结论

比较图 4 与图 5 可以看出, 实拍条纹与理论计算条纹分布基本一致, 从而证明本文中所提出的方法是切实可行的。同时表明, 激光全息技术的应用, 为金属某些特性的研究提供了新的直观而有效的手段。

## 参考文献

- [1] 赵九江, 张少实, 王春香. 材料力学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1995. 138.
- [2] 朱晨, 张志津, 徐舟. 用激光全息技术进行飞机发动机活塞杆疲劳检测 [J]. 光电子·激光, 2002(1): 62~64.
- [3] 熊秉衡, 王正荣. 实时全息干涉计量术的发展近况和趋势 [J]. 激光杂志, 1999, 20(3): 3~6.
- [4] 陈笑梅. 利用激光全息光弹实验测量圆盘片的主应力分布 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2000(4): 27~30.
- [5] 谢宜燕. 激光全息无损检测实验 [J]. 大学物理实验, 2000(3): 47~49.
- [6] 赵凯华, 钟锡华. 光学(下) [M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. 150~155.