

# GaAs/AlGaAs 发光二极管列阵场分布特性\* 的电光测量

吴小萍 朱祖华

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310008)

**摘 要** 应用一种新颖的无损测量技术-连续波电光检测法(CWEOP)对 GaAs/GaAlAs 单异质结发光管列阵电场分布进行了扫描测量. 实验结果反映了器件内电流注入的方向和载流子扩展情况; 通过比较各单元电场分布, 反映器件发光均匀性. 文中详细介绍了测量原理、实验装置和实验结果及讨论, 最后用计算机对电场分布作了模拟计算并与实验结果进行了对照.

**关键词**

## 1 引 言

发光管列阵作为一种新型的光电器件发展极为迅速, 其正常工作时, 注入载流子在电场作用下作漂移运动, 在器件内形成一定的分布, 在结区空穴与电子复合发光, 由此建立起稳态电场和光场. 本文应用一种新颖的无损测量技术——连续波电光检测法对 GaAs/GaAlAs 单异质结发光管列阵电场分布进行直接测量, 由此来探求其电流注入方向和载流子扩展情况; 通过比较并联工作时各单元电场分布, 来反映器件发光均匀性. 用数值分析法模拟器件中的电场分布通常是理想化的, 对具体的器件而言, 由于工艺重复性等原因, 每一个器件中的电场分布往往有所差异. 所以理论模型和实验测量相互对照、相互补充, 为研究器件的工作机理提供新的依据, 在器件的电场分布与光场之间及电场分布与工艺制作之间建立一种联系.

## 2 实 验

连续波电光检测技术(CWEOP)是近年来发展的一种无损测量新技术<sup>[1]</sup>, 它具有装置简单, 测量方便, 灵敏度高, 分辨率好等特点, 可用于测量各种电光材料及其制作的器件内的电场分布特性. 近几年来, 作者已成功地将这一技术应用于 GaAs 半绝缘材料和 GaAs/AlGaAs 超薄层异质结外延材料表面电位分布、GaAs 共平面波导、LiNbO<sub>3</sub> 和 GaAs 定向耦合器、GaAs 光导开关、AlGaAs 半导体激光器等各种光电子器件内电场分布的检测<sup>[2,3]</sup>.

\* 国家科委 863 高科技项目.

收稿日期: 1993 年 3 月 30 日; 收到修改稿日期: 1993 年 8 月 25 日

被测量的 GaAs/AlGaAs 单异质结发光管阵列(4×4 结构)样品由中科院上海冶金研究所光电子器件室制备,如图 1 所示. 电极为环状, 电极外径 70 μm, 宽度为 10 μm. 其像素间距 500 μm; 发光区直径 50 μm, 中心波长 785 nm, 半峰谱宽 30 nm.

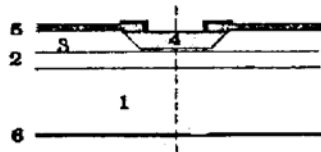


Fig. 1 Structure of LED array

- 1: n<sup>+</sup> - GaAs
- 2: n- Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As
- 3: n- Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As
- 4: diffused Zn region
- 5: SiO<sub>2</sub> mask
- 6: electrode

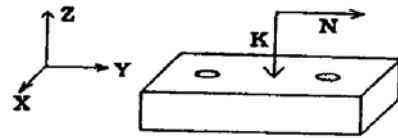


Fig. 2 Sample and probing configuration (K: incident beam, N: scanning direction)

由于样品已装架, 背面不透光, 所以采用了反射光路、纵向检测方式, 如图 2 所示. 所加电场为 Z 方向, 即 GaAs 晶体<001>方向, 探测光也垂直(001)面入射通过样品, 在样品背面反射后, 再从表面出射. 两正交偏振分量间的相位延迟为<sup>[9]</sup>

$$\Gamma_z = (4 \pi / \lambda) n_0^3 \gamma_{41} E_z L \tag{1}$$

$n_0$  为 GaAs 的折射率,  $\gamma_{41}$  为 GaAs 的电光系数,  $L$  为样品的厚度. 采用这样的检测方式, 探测光在样品内经过的路程为  $2L$ . 测得的表面电位分布是器件中电场强度  $E_z$  在上表面和底电极间沿 Z 方向的积分, 即:

$$V(x, y) \propto \int_0^L E(x, y, z) dz \tag{2}$$

实验装置如图 3 所示. InGaAsP 激光器发出的 1.3 μm 的连续光作为探测光, 经物镜准直, 再经起偏器和四分之一波片后, 被分束器分出一半聚焦照到样品表面, 经样品背面电极反射后返回, 携带了样品场分布的信息. 经过 1.3 μm 光 80% 反射片后分成两路: 一路用于摄像机监视, 另一路经检偏器后被光探测器和锁相放大器接收. 当激光束沿着 y 方向扫描时, 便得到样品内电场强度  $E_z$  积分沿 Y 方向的分布. 实验中为避免发光管阵列本身发光的影响, 在光路中设置了三块相应的滤光片.

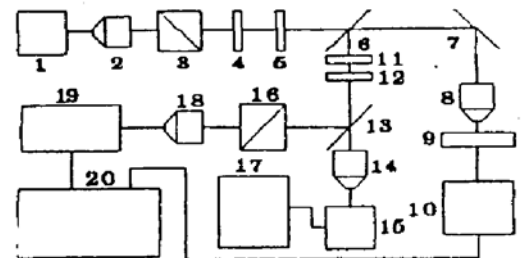


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup 1 InGaAsP laser 2, 8, 14, 18 objective 3 polarizer 4 quarter wavelength plat 5, 11, 12 filter 6 beam splitter 7 13 reflector 9 sample 10 voltage supply 15 TV camera 16 analyzer 17 monitor 19 photodetector 20 lock-in amplifier

测量中, 对于扫描的每一点都测其(1)电光信号与本底信号的总幅度  $a$  和相位  $\Psi_1$ , (2) 本底信号的幅度  $b$  和相位  $\Psi_2$ , (3) 斩光信号的幅度  $C$ . 数据处理的方式为:

$$E = 4 \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\Psi_1 - \Psi_2)} / C$$

其合理性证明如下:

- 1) 探测器测得的电光信号加本底信号为  $a \cos(\omega t + \Psi_1)$
- 2) 本底信号为  $b \cos(\omega t + \Psi_2)$

所以, 除去本底信号噪声的干扰, 电光信号

$$E \propto a \cos(\omega t + \Psi_1) - b \cos(\omega t + \Psi_2)$$

$$E \propto \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos(\Psi_1 - \Psi_2)} \cos(\omega t + \theta)$$

斩光信号是在样品未加偏置的条件下在光路中加入斩波器, 由锁相放大器测得的电压, 这样测得的斩光信号作电场归一用, 因为知道测到的电光信号正比于样品中透过的探测光强, 归一化能避免由于样品各部位不均匀, 透光情况不同造成的误差.

实验中激光器输出功率 5 mW, 样品偏置为: 直流 110 mA, 交流 183 mA(峰值)频率 810 Hz. 测量了单管芯、两管芯、三管芯及  $2 \times 2$  四个管芯并联时的场分布. 图 4 所示为四管芯并联的实验结果. 根据测量结果可得的结论是:

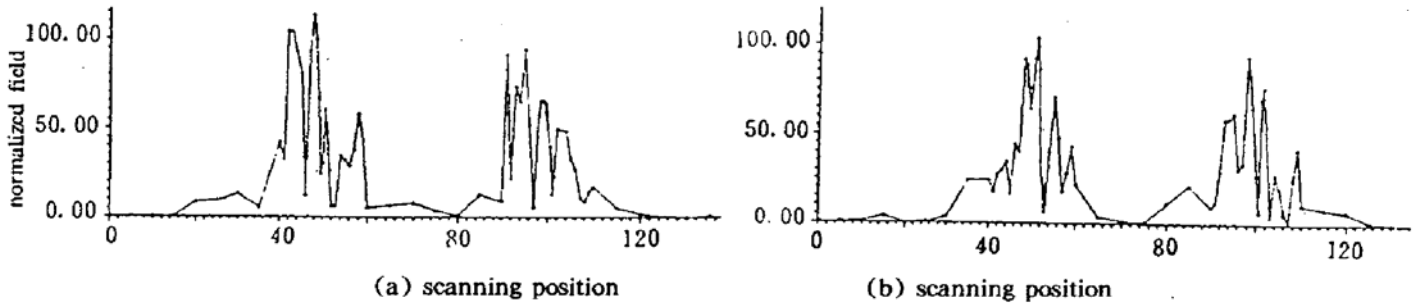


Fig. 4 Measured normalized field distribution for LED array ( $2 \times 2$ )

1) 发光管列阵的管芯发光区域, 对应于电场分布峰值区, 也即注入电流较大的区域. 对照监视器看其发光情况, 当电流慢慢往上加时, 总是电极圈周围的发光区先亮, 再扩展至发光区中心. 这反映了电流注入的方向是从电极圈周围向中心扩展.

2) 就单管工作看, 在发光区外约  $200 \mu\text{m}$  范围内电光信号逐渐变小, 这表明电流注入时, 不只是垂直向下, 还有横向扩展效应.

3) 各管芯相互间电场叠加效应很小, 几乎无干扰.

4) 各管芯电场分布峰值有差异, 从监视回路结果看, 各管芯发光不均匀.

### 3 发光管列阵电场分布的计算机模拟

采用有限差分法进行数值计算, 衬底、限制层、N 区、P 区都可看作是由电导率不同的介质组成. 由于结构的对称性, 在柱坐标下解泊松方程. AB、CD 满足边界条件:

$$\partial \Psi / \partial n = 0$$

由于衬底较厚 ( $300 \mu\text{m}$  左右), 而 P-N 区及限制层都很薄, 所以采用不均匀网格划分法: 衬底区采用  $5 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$  网格划分, 其余区域采用  $5 \mu\text{m} \times 0.1 \mu\text{m}$  网格划分. 采用非均匀划分的好处是可以节约内存.

采用超松弛迭代法, 超松弛因子  $\omega$  的选择对收敛速度有很大的影响, 在计算中常按由实践经验得到的数值来确定. 采用卡里 (B. A. Carre) 提出的在迭代过程中不断估算值的近似计算方法<sup>[10]</sup>, 大大提高了收敛速度.

图 5(a) 为模拟得到的发光管列阵正向偏置条件下表面电位分布. 考虑实际测量中由于电极对探测光的反射, 使在电极圈部位探测光不能通过, 测不到场, 为了与实验比较方便, 在

图中电极圈处场取为零(实际上场不为零), (b) 为实验测得的电场分布.

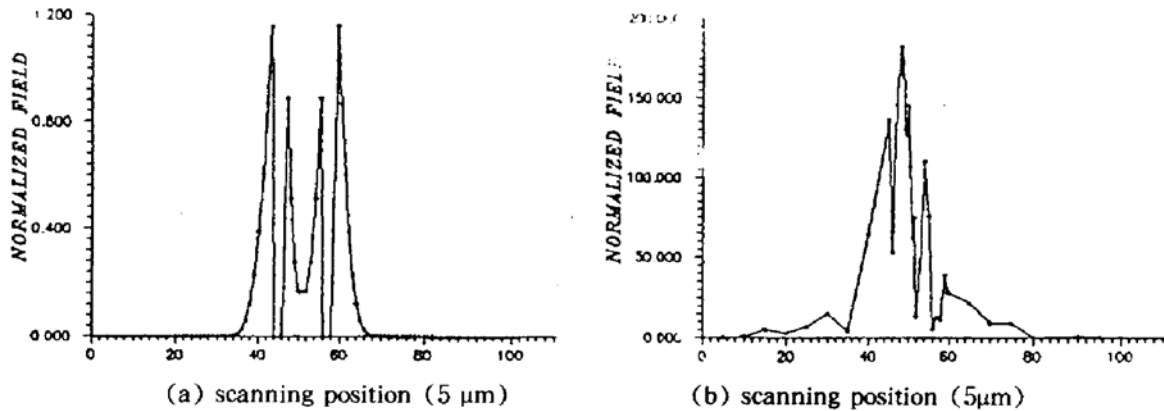


Fig. 5 Electric field distribution (a) computer-aided simulation result (b) experimental result

## 4 讨 论

### 4.1 电流注入方向

电流注入是由电极周围向中心注入, 从监视器上观察到的样品发光情况, 发现沿电极圈周围发光特别亮, 计算机模拟和实验测得的结果也证实了这一点: 即在电极圈附近电场较大, 而在电极中心处, 电场有一谷值. 对同一个单管, 取不同的偏置电流的情况也进行了模拟, 发现偏置电流越大, 谷值处相对于峰值凹陷越厉害.

### 4.2 电场分布的扩展区

测得的电光信号的扩展区有  $200 \sim 300 \mu\text{m}$ , 远大于载流子在耗尽层外的扩散(计算得电子、空穴的扩散长度分别为  $5.59 \mu\text{m}$ 、 $1.77 \mu\text{m}$ , 耗尽层宽度在  $0.1 \mu\text{m}$  量级). 这主要是由于底电极很大, 而顶电极只是一个内径为  $50 \mu\text{m}$  的圆环. 当两电极间加有偏置时, 电场本身的横向分布使载流子作漂移运动, 其值远大于纯粹浓度不均引起的扩散. 电极本身的结构决定了注入电流的流向.

### 4.3 发光均匀性

考虑图 4 四管芯并联工作情况, 测得各单元正向电阻各为: I-2 管芯  $1.1 \text{ k}\Omega$ , I-3 管芯  $6 \text{ k}\Omega$ , IV-2 管芯  $2 \text{ k}\Omega$ , IV-3 管芯  $6 \text{ k}\Omega$ . 在四管芯并联工作情况下, 上表面电极与底电极间电势差都为外加电压定值. 由于工艺制作等原因, 造成各单元正向电阻不同. 正向电阻小的管芯, 电流分流较大. 从监视器上看, 当偏置电流慢慢往上加时, 总是电流分流大的管芯先发光, 且光场最强. 器件发光的不均匀表现为各单元的电场有大小差别. 从实验结果看, 正向电阻大的管芯对应的电场值也大. 光场的大小与载流子注入复合有关, 而电场的分布由器件的结构及工艺制作、外加偏置电流和注入载流子的分布等多方面因素决定. 器件电极的结构造成结区电力线较密集, 电场较大, 而越到衬底底部, 载流子越向底电极四周扩散, 使衬底电力线较稀, 电场较弱. 注入电流较大时, 结区电场随之减小; 而结区外(下限制层和衬底)电场却随之增大, 测得的表面电位是这两者的积分. 对正向电阻大的管芯, 结区电场和衬底电场的综合效果使其表面电位较大. 更深入的讨论尚需进一步的工作.

### 4.4 实验和模拟结果的对比

实验结果基本上和模拟的一致, 都是在电极周围电场较高, 而电极中心处电场有谷值.

由于所建的模型是理想化的, 与实际的样管有差异, 且由于测试中采用  $10\ \mu\text{m}$  机械扫描精度, 所以实际测得的电场分布与计算机模拟的结果有些差异.

实验测得的曲线有些点异常跳动, 分析其原因, 可能是电极及其引线对光的强烈反射使探测光在这些部位不能透进样品, 造成在这些部位测不到电场. 实验测得的斩波信号有突变, 如图 6 所示. 其原因如下:

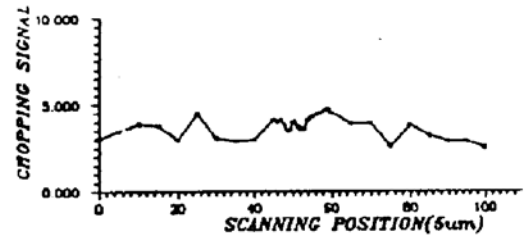


Fig. 6 Measured chopping signal distribution for a unit

1) 样品背面未抛光, 反射不均匀, 会引起斩波信号的变化. 同时, 也会造成入射光和反射光经过不同的场区, 引起测量结果的偏差.

2) 在一些点样品透光不均匀, 样管在此可能不均匀, 在这些部位附近电流流向会有曲折变化, 电力线密集度改变, 电场会有突变.

实际的电场分布与样品制作工艺密切相关. 列阵中每个单元工艺制作中不可能完全一致, 外延层质量的好坏, 扩 Zn 区掺杂的均匀性, 光刻质量,  $\text{SiO}_2$  淀积的好坏, 电极欧姆接触是否一致, 这些都可能影响到每个管子的电流注入, 使各个管子情况和模型有差异. 正向导通电阻小些的单元, 电流注入就多些. 这样, 就可能影响实际发光区电场分布.

**结 语** 运用连续波电光检测法成功地测量了发光管列阵的内场分布, 并与计算机模拟的结果对比. 由内场分布的测量研究, 可以研究发光管列阵的工作机理和反映器件工艺制作的情况. 这种无损伤的电光检测技术, 对新型光电器件发光管列阵的研制是很有用的.

诚挚感谢中科院上海冶金所邬祥生、吕章德、吴学海等给予的帮助.

### 参 考 文 献

- [1] Z. H. Zhu, J-P. Weber, S. Y. Wang *et al.*, New measurement technique; CW electro-optic probing of electric field. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**: 432~433
- [2] Y. H. Lo, Z. H. Zhu, C. L. Pan *et al.*, New technique to detect the GaAs semi-insulating surface property—CW electro-optic probing. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**: 1125~1127
- [3] Z. H. Zhu, Chun Ding, Guilan Ding *et al.*, Electro-optic measurement research on potential profile of modulation-doped AlGaAs/GaAs heterostructure materials. ICMPC' 91 1991, **10**, Shanghai, China, 541~544
- [4] 丁 纯, 丁桂兰, 王硕勤等, MBE 生长 GaAs/GaAlAs 异质结构材料均匀性的测试. 91 GaAs 及有关化合物会议论文, 浙江宁波, 1991, **11**: 139~140
- [5] 朱祖华, 丁 纯, 丁桂兰等, 用连续波电光检测技术进行  $\text{LiNbO}_3$  定向耦合器波导调制器的场分布测量. *光学学报*, 1991, **11**(10): 944~950
- [6] 朱祖华, 丁 纯, 王硕勤等, 吉林大学自然科学学报 1990 年特刊, 中国长春: 186~187
- [7] 朱祖华, 丁 纯, 陈建新等, GaAs 光导开关中电场分布电光检测研究. 第六届全国化合物半导体与微波光电器件学术会议论文集, 1990: 185
- [8] 朱祖华, 王硕勤, 丁 纯等, 半导体激光器电场分布特性的连续波电光检测. *半导体学报*, 1992, **13**(7): 417~423
- [9] 朱祖华, 信息光电子学基础, 杭州, 浙江大学出版社, 1990: 367

# Electro-Optic Measurement and Simulation of Electric Field Distribution in GaAs/AlGaAs Array

Wu Xiaoping      Zhu Zhuhua

(Department of Information and Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310008)

(Received 30 March 1993; revised 25 August 1993)

**Abstract** This paper introduces a new nondestructive method — continuous wave electro-optic probing (CWEOP), which we have applied to detect the electrical field distribution of GaAs/AlGaAs LED array. The experiment results reflect the direction of injected current, the spreading of charge carriers and the homogeneity of the light emission by comparing the field distribution of each unit. The principle, experimental setup of the method and the experimental results and discussions to them are given. The comparison between the result of computer-aided simulation and the experiment one is also given at last.

**Key words** continuous wave electro-optic probing (CWEOP), electric field distribution, LED array.

\*\*\*\*\*

(上连 512 页)

## 1992~1993 年中国自然科学核心期刊

1 中国科学	54 金属学报	67 人工晶体学报	72 色谱
2 科学通报	55 系统科学与数学	68 四川大学学报	72 数学进展
5 物理学报	55 自然杂志	68 数学物理学报	72 小型微型计算机系统
6 化学学报	58 高能物理与核物理	69 分析测试学报	72 原子与分子物理学报
10 高等学校化学学报	59 北京师范大学学报	69 感光科学与光化学	73 电子显微学报
11 数学学报	59 厦门大学学报	69 华东师范大学学报	73 工程热物理学报
18 计算机学报	61 低温物理学报	69 计算机科学	73 固体力学学报
26 力学学报	61 应用数学和力学	69 力学进展	73 航空学报
30 光学学报	61 中国激光	69 应用化学	73 结构化学
34 南京大学学报	62 波谱杂志	70 核技术	73 空气动力学学报
36 物理化学学报	62 数学研究与评论	70 化学试剂	73 强激光与粒子速
39 分析化学	63 中山大学学报	70 石油学报	73 数学季刊
42 数学年刊	64 化学物理学报	70 武汉大学学报	73 石油化工
43 化学通报	64 兰州大学学报	71 分析实验室	73 无机材料学报
46 有机化学	64 物理	71 环境化学	73 无机化学
48 应用数学学报	64 中国稀土学报	71 计算数学	73 云南天文台台刊
52 电子学报	65 自然科学进展	71 软件学报	73 应用概率统计
53 半导体学报	66 物理学进展	71 水动力学研究与进展	73 中国科技大学学报
53 北京大学学报	67 复旦学报	72 大连工学院学报	73 真空科学与技术
54 催化学报	67 吉林大学自然科学报	72 分析仪器	73 陕西师范大学学报
54 计算机研究与发展	67 计算物理	72 硅酸盐学报	73 西南师范大学学报