

半导体激光器中电场分布特性的 连续波电光检测*

朱祖华 王硕勤 丁 纯

丁桂兰 吴小萍

(浙江大学信息电子系, 杭州, 310008)

陈 良 惠

(中国科学院半导体研究所, 北京, 100083)

1991年3月28日收到, 同年12月28日修改定稿

利用连续波电光检测法首次成功地对 AlGaAs/GaAs 半导体激光器中的电场分布进行了测量。测量结果直接表征了器件注入电流扩展和载流子限制特性。

本文简要地描述了方法的原理和实验装置, 给出了典型的测量结果并对其进行了讨论。

PACC: 7820J, 4110F, 4255P, 4280S

一、引言

半导体激光器是目前光通信和光信息处理领域中最重要的光源器件。其性能的优劣通常是由伏安特性、光功率-电流特性和阈值电流、模式特性、光谱特性和线宽等来表征。对于半导体激光器, 其载流子限制的好坏和注入电流扩展的大小, 直接与它的量子效率、阈值电流密度、光功率-电流特性、模式和温度特性等密切相关, 因此人们设计了各种不同的器件结构来改善其载流子限制的特性。由此可见, 对其作深入的了解具有重要的现实意义。

设计半导体激光器时, 人们常采用数值分析法, 利用计算机模拟出其中电场或电流分布作为依据。但是, 假设的模型通常是理想化的, 因此模拟的结果与实际半导体激光器中的情况存在较大的差异。对于每一个具体制作的器件而言, 由于工艺重复性问题, 情况更是大相径庭。而实际上, 目前只有从半导体激光器的伏安、光功率-电流、模式等特性的测量间接推断得到一些有关载流子限制、注入电流扩展的信息。至今尚无合适的实验方法对这些特性作直接的测量。

连续波电光检测法 (CWEOP—Continuous Wave Electro-Optic Probing) 是作者

* 国家自然科学基金和国家863计划资助项目。

近年来所提出的一种电子、光电子材料和器件中稳态场分布测量的新方法^[1]。该方法已用于半绝缘砷化镓材料表面特性^[2]、砷化镓波导器件^[3]和光导开关^[4]、分子束外延生长 AlGaAs/GaAs 异质结构二维电子气^[5-7]、以及铌酸锂材料及其定向耦合器中场分布的测量研究^[8,9]。本文将介绍作者运用这种新的光学测量方法首次对工作状态下半导体激光器内部电场分布进行直接描绘的实验结果。半导体激光器工作时需施加正向偏置，使载流子注入，电流达到阈值之上。此时，在器件中形成了稳态的场分布。它代表了器件中注入电流的大小和方向，反映了注入载流子限制的情况。因此，我们的结果将为实验上直接测量研究半导体激光器注入电流扩展和载流子限制特性开辟新途径。本文最后将给出对实验结果的讨论。

二、原 理

连续波电光检测法的原理基于线性电光效应^[10]。所谓线性电光效应是指电光介质（如这里的砷化镓晶体）中，其折射率的变化与外加电场的振幅成正比关系。在一定的实验条件下，对于通过该电光介质的激光而言，由于电场引起的双折射效应，光场沿两个正交感应主轴分量之间相位延迟——电光相位延迟的大小，与外加电场的振幅成正比关系。

对于属立方晶系 $\bar{4}3m$ 点群（闪锌矿结构）的砷化镓晶体而言，若外加电场沿晶体 $\langle 001 \rangle$ 方向（取为坐标 Z 方向），探测激光传播方向与电场方向一致时，对应于纵向电光效应。电光相位延迟 Γ_z 与电场强度 E_z 之间有如下关系

$$\Gamma_z = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} L_z E_z, \quad (1)$$

式中， λ 为探测激光波长， n_0 为砷化镓晶体的折射率， γ_{41} 为砷化镓晶体的线性电光系数， L_z 为探测激光在砷化镓晶体中经过的距离。

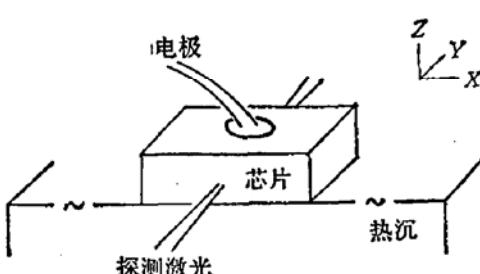


图 1 检测方式示意图

如果探测激光的传播方向与电场方向正交，比如探测激光沿 $\langle 110 \rangle$ 方向（即坐标 Y 方向）传播时，对应于横向电光效应。此时电光相位延迟 Γ_y ，与电场强度 E_z 之间有如下关系

$$\Gamma_y = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} \frac{L_y}{d_z} V_z, \quad (2)$$

式中， V_z 为在 z 方向施加的电压， d_z 为电压施加方向晶体的厚度， L_y 为探测激光在晶体中经过的距离。

对于半导体激光器，我们采取了横向电光透射检测方式。图 1 所示为检测方式的示意图。探测激光垂直于被测半导体激光器解理面透射通过芯片。由于正向偏置注入电流在半导体激光器芯片中形成了稳态电场。被 z 方向电场所调制的探测激光的电光相位延迟 Γ_y ，根据公式(2)这时应表示为

$$\Gamma_y = \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} L_y E_z (V_z, d_z, z, x), \quad (3)$$

因为在半导体激光器芯片中， z 方向电场强度不仅取决于 V_z 和 d_z ，还应该与坐标 z 和 x 有关，因此记为 $E_z(V_z, d_z, z, x)$ 。

如下节所描述，探测激光的电光相位延迟引起偏振的变化在我们的实验装置中将转变为探测光强度的变化，最终由锁相放大器读出为电光信号 V_{E-0} ，它与被测的电场强度和入射激光强度（也由锁相放大器读出，标为 V_i ）成正比，有

$$V_{E-0} = V_i K E_z(V_z, d_z, z, x), \quad (4)$$

式中， $K = C \frac{\pi}{\lambda} n_0^3 \gamma_{41} L_z$ ， C 为某常数。

三、实验装置

图 2 为连续波电光检测法测量半导体激光器中电场分布的实验装置示意图。激射波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 半导体激光器作为连续波探测光源 1。其发射的激光由准直物镜 2 准直，经偏振器 3 以保持其线偏振特性，然后通过物镜 4 将激光束聚焦在待测半导体激光器芯片 5 上。最小聚焦光斑大小估测为 $5 \mu\text{m}$ 左右。通过偏置电流源 15 对待测半导体激光器加适当的正向偏置以处于工作状态。受待测半导体激光器中电场调制的探测激光出射后经物镜 6 准直，然后进入显微镜系统 7。从其中透射的光先通过透反镜 8 使探测激光与待测半导体激光器发出的激光两者在空间分离，再经滤光片 9 滤去剩余的非探测激光。经过四分之一波片 10 和检偏器 11 后，探测激光的偏振变化转变为强度的变化。经物镜 12 聚焦由探测器 13 所接受。探测器输出至锁相放大器 14，于是可以直接读出与电场强度成正比的电光信号。

偏置电流源 15 提供可调的正向直流偏置和叠加其上的一个可调低频交流偏置，既使待测激光器处于阈值之上工作状态又保证锁相放大器能正常使用。自显微镜系统 7 反射的激光进入红外摄像仪 16 成像，依靠它可监控测量位置和观察测量情况。

四、测量结果

利用以上描述的方法和实验装置，我们对质子轰击多量子阱和氧化物条形两种 AlGaAs/GaAs 半导体激光器的电场分布特性进行了测量。按照前述的横向电光透射检测方式，移动被测激光器，让探测激光束在其芯片解理面上沿着 X 方向和 Z 方向扫描时，便测得了芯片内电场强度在横截面上的分布。

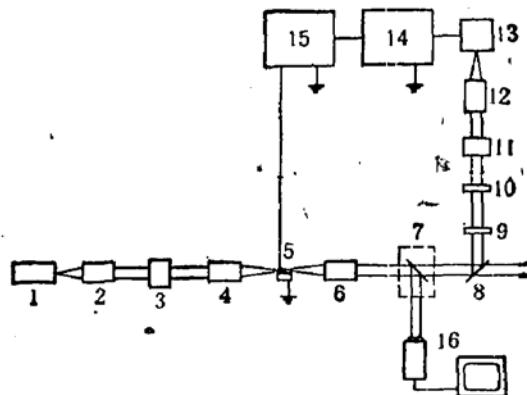


图 2 实验装置示意图

1—探测激光源，2, 6—准直物镜，3—偏振器，4, 12—聚焦物镜，5—待测半导体激光器，7—显微镜系统，8—透反镜，9—滤光片，10—四分之一波片，11—检偏器，13—光电探测器，14—锁相放大器，15—偏置电流源，16—红外摄像仪

典型的测量结果如图 3(a)(b) 所示(见图版 I)。图 3(a)所示的曲线是对质子轰击多量子阱 AlGaAs 半导体激光器测得的。器件编号 Mb-8, 阈值电流为 73mA 左右。测量是在偏置电流为 87mA 下进行的, 其中包含有效值为 37mA、频率为 830Hz 的低频交变偏置电流。图 3(b) 所示是对编号为 SG-1 的氧化物条形 AlGaAs/GaAs 半导体激光器测得的结果。该器件阈值电流为 7.0mA。测量是在偏置电流为 76mA 下进行的, 其中包含有效值为 56mA、频率为 830Hz 的低频交变偏置电流。图 3(a)(b) 中纵坐标代表测得的电光信号 V_{E-0} (单位 μV) 用通过芯片探测激光的光功率 V_i (也由锁相放大器读出, 单位 mV) 相除所得到的数值, 我们称之为归一化场强。因为未定标, 它代表待测场强的相对值。横坐标为沿 X 方向的距离(单位 μm), 表示测量的位置。图中右上角所示为待测激光器芯片的横断面图及测量时沿 Y 方向入射的探测激光扫描测量的路线。图中各条曲线分别代表在芯片厚度方向(Z 方向)不同部位处沿 X 方向扫描测量得到的归一化电场强度分布。曲线 a 代表在有源层附近沿 X 方向扫描测量得到的结果, 曲线 b 和曲线 c 代表离开有源层不同部位处沿 X 方向扫描得到的结果。

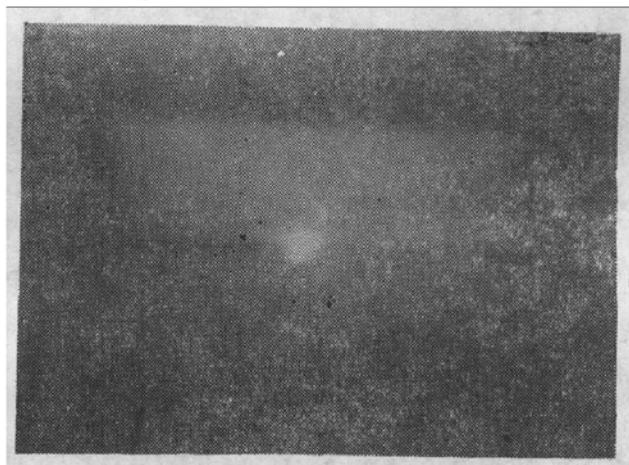


图 4 测量时半导体激光器芯片端面红外摄像图

图 4 所示为 Mb-8 半导体激光器在测量时芯片端面的红外摄像图。芯片底部中央附近靠热沉交界处的亮斑为激光器有源层的发光区。右上方小光斑为 $1.3 \mu\text{m}$ 的探测激光。

五、讨 论

由以上所示的曲线以及其它未在本文中出示的测量结果可以得出的初步结论是:

(1) 所测得的 Z 方向电场强度分布变化规律是, 沿有源层附近扫描测量得到的场强分布曲线具有一明显的峰值, 越是远离有源层测量得到的场分布曲线越趋于平坦。这直接反映了注入电流侧向扩展和载流子侧向限制的情形。

(2) 比较测得的场强分布曲线图和测量时半导体激光器芯片端面的红外摄像图, 可以发现, 场强峰值区与有源层发光区的位置之间基本上有一对应关系。这反映了有源层中注入载流子浓度与激射发光模式之间的联系。但我们也发现有的器件中存在场强峰值区与发光区位置稍有错开的现象。对于激光器模式特性的判断, 这或许是一种启示。

在这里, 我们主要作了如下假设:

(1) 认为半导体激光器芯片中平行于解理发光面的任一截面上，电流注入和电场分布的情况相同，即没有计及在腔长不同位置处(Y方向)注入电流和电场可能的不同分布。

(2) 构成半导体激光器不同 AlGaAs 层和 GaAs 层的折射率(以 n_0 表示)和电光系数(γ_{41})相差不大，对于测量结果的影响可以忽略不计。还假设激光器材料宏观上是均匀的，没有影响折射率和电光系数的宏观缺陷存在。

半导体激光器线度小，结构复杂，其机理牵涉到的物理现象非常丰富，对其作精确的分析是件十分不容易的事情。这里我们拟对载流子效应的影响问题作一初步的讨论。根据有关理论^[11]和实验结果^[12]的报道，对于 AlGaAs 半导体激光器，在阈值下由于自由载流子的等离子体色散效应和能带填充效应等所引起的折射率变化最大约为 $-(3-6) \times 10^{-2}$ 量级。由此根据本文公式(3)或(4)计算表明，载流子注入引起测得的电光信号(正比于电光相位延迟 T_γ)的变化应在 5% 之内。而根据测量数据由公式(4)估算，在载流子注入区场强 E_z 相对于折射率 n_0 和电光系数 γ_{41} 是一个数值很大的量，并且其值在芯片不同的区域应有很大的变化。因此，可以判定，图 3 中测量曲线表明的变化不可能主要是由于载流子导致的折射率 n_0 的变化引起的。在我们的测量中，载流子效应的影响是次要的，决定测量结果的主要原因是电场引起的双折射效应对探测激光产生的调制作用。

由于使用了锁相探测技术，方法的测量灵敏度很高，即使使用国产仪器(如南京大学 ND-203 双相锁定放大器)正常时可以测量小于 μV 的电光信号。因此，可以认为测量灵敏度优于 μV 。测量的分辨率则由两方面因素来决定：一是机械移动精度，二是探测光斑大小。目前我们使用的是普通的螺旋测微移动台，其最小刻度为 10\AA ，最高可估读到 5\AA 。探测激光($\lambda = 1.3\text{\mu m}$)采用显微物镜聚焦。根据瑞利判据，若采用焦距为 6.5mm 、通光孔径为 8mm 的聚焦镜，计算所得的光斑尺寸为 1.28\mu m 。若采用焦距为 14.5mm 的聚焦镜，所得光斑尺寸为 2.87\mu m 。目前，由于不具备合适的仪器或实验手段来精确地测定聚焦光斑的大小，我们只是从监视测量位置的摄像机电视屏上光斑的成像来作一粗略的估计。此外，从一些测量结果(如图 3(a)中曲线 a)可以清楚看出，对于 5\mu m 的机械位移，测量结果仍能敏锐地反映出场强的变化。综上所述，我们认为探测激光光斑大小 5\mu m 左右，分辨率为 μm 量级。测量分辨率进一步提高的途径已在考虑之中。

由于注入电流的扩展并非局限于有源层内，而应表现在芯片中很大的范围内。因此，在目前仪器设备精度不太高的条件下对半导体激光器的测量研究仍然是很有意义的。一些更为详细的实验结果和进一步的分析讨论将另文发表。

六、结语

利用连续波电光检测法我们首次成功地对工作状态下半导体激光器中的电场分布进行了测量。测量的结果直接反映了半导体激光器注入电流扩展和载流子限制的特性。在进行场分布的测量过程中还可以清楚地观察半导体激光器解理面的情形，比如表面沾污、解理质量好坏，以及激光器的近场特性等。这为器件特性分析和质量判断提供了附带的依据。

连续波电光检测法的优点是非破坏、不接触、对被测器件无干扰，具有很高的测量灵

敏度和较好的空间分辨率,对设备要求较简单,投资不大。因此,很有希望成为半导体激光器和其它光电子器件特性评估的一种新颖、有力的检测手段。

作者对中国科学院半导体研究所王启明、徐俊英、张敬明、肖建伟,中国科学院上海光机研究所方祖捷、陈高庭,北京大学王舒民对本工作的热忱支持和所进行的有益讨论,致以深切的谢意。

参 考 文 献

- [1] Z. H. Zhu, J-P Weber, S. Y. Wang and S. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **49**, 432(1986).
- [2] Y. H. Lo, Z. H. Zhu, C. L. Pan, S. Y. Wang and S. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1125 (1987).
- [3] 朱祖华,丁纯,第五届全国集成光学学术讨论会论文集(1988年10月,上海), p183.
- [4] 朱祖华,丁纯,陈建新,张剑良,朱丽津,第六届全国化合物半导体和微波光电器件学术会议论文集(1990年10月,大庸), p185.
- [5] P. Hendriks, F. J. M. Schnitzeler, J. E. M. Haverkort, J. H. Wolter, Kees de Kort, and G. Weimann, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1763 (1989).
- [6] Zhu Zuhua, Ding Chun, Ding Guilan, and Wang Shuoqin; Shen Haoying, Peng Zhengfu, and Wang Cuilian, Proceedings of the International Conference on Materials and Process Characterization For VLSI, P541, Oct. 1991, Shanghai.
- [7] 丁纯,丁桂兰,王硕勤,朱祖华;沈浩瀛,彭正夫,王翠莲,1991年砷化镓及有关化合物会议论文集,(1991年11月,奉化溪口), p139.
- [8] 朱祖华,丁纯,丁桂兰,王硕勤,高根华,吉林大学自然科学学报1990年特刊,p186.
- [9] 朱祖华,丁纯,丁桂兰,王硕勤,光学学报, **11** (10), 944 (1991).
- [10] 朱祖华,《信息光电子学基础》,浙江大学出版社,1990年.
- [11] C. H. Henry, R. A. Logan and K. A. Bertness, *J. Appl. Phys.*, **52**, 4457 (1981).
- [12] J. Manning, R. Olshansky and C. B. Su, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-19**, 1525 (1983).

Measurements on Electric Field Distribution in Semiconductor Laser Using CWEOP Method

Zhu Zuhua Wang Shuoqin Ding Chun Ding Guilan Wu Xiaoping

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

Chen Lianghui

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing 310008)

Abstract

The electric field distributions in AlGaAs/GaAs semiconductor lasers are successfully measured using Continuous Wave Electro-Optic Probing (CWEOP) method for the first time. The experimental results reflect directly the characteristic of carrier confinement and spread of injected current. This paper describes briefly the principle and the experimental setup of the CWEOP method, and gives the experimental results and discussion. The prospects of the CWEOP method are reviewed.

PACC: 7820J, 4110F, 4255P, 4280S