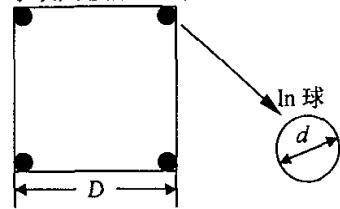


(A) 样品要求

以 GaAs 正方形样品为例, 在样品的四个角上作上 In 球欧姆接触, 对 In 球尺寸要求, 希望正方形边长和 In 球直径之比, 为 10 以上, 如图 7-5 所示, 要求 $d/D \leq 0.1$, 这样 $\Delta n/n \approx 0.1$ 之间, 迁移率的偏差为 $\Delta \mu/\mu \leq 0.1$ 。

在样品的四角点上 In 球后, 在高真空 ($\approx 10^{-4}$ 托) 或高纯 N_2 气氛中通过合金制作欧姆电极。



(B) 通常的 Von der Poum 法测量原理和过程

图 7-5 正方形样品的示意图

Fig7-5 Sketch graph of square sample

霍尔测量对不同的样品采用不同的测试过程和方法。其测量步骤如下:

在样品(图 7-5)中对 1、2 通电流, 3、4 测电压 (V_1), 然后反向再测一次 (V_2); 再对 2、3 通电流, 对 4、1 测电压 (V_3), 当电流反向时, 再测一次 (V_4); 对 3、4 通电流, 1、2 测电压 (V_5), 然后反向再测一次 (V_6); 对 4、1 通电流, 2、3 测电压 (V_7), 然后反向再测一次 (V_8)。

测得上述电压后, 首先要得到表征样品几何特征的 f 因子。决定 f 因子的是电压比率 Q 因子, 如公式 (7-1, 7-2) 所示。 F 因子越接近于 1, 说明样品的几何对称性越好。由 f 因子和样品的厚度 t_s , 得到样品的电阻率如式 7-4 和 7-5 所示, 取平均后得到样品的平均电阻率。

$$Q_4 = \frac{V_3 - V_1}{V_4 - V_2} \quad Q_5 = \frac{V_6 - V_4}{V_5 - V_3} \quad (7-1)$$

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arc cosh} \left(\frac{0.693}{2e^{\frac{f}{2}}} \right) \quad (7-2)$$

$$p_4 = \frac{1.1331 f_s t_s (V_2 + V_4 - V_1 - V_3)}{I} \quad (7-3)$$

$$p_5 = \frac{1.1331 f_s t_s (V_6 + V_5 - V_4 - V_3)}{I} \quad (7-4)$$

$$p_{\text{avg}} = \frac{p_4 + p_5}{2} \quad (7-5)$$

霍尔系数的测量首先是霍尔电压的测量。垂直于电流方向对样品施加正向磁场 (+B), 对样品的 1、3 通电流, 2、4 测电压 (V_1), 然后电流反向再测一次 (V_2); 对样品的 2、4 通电流, 1、3 测电压 (V_3), 然后电流反向再测一次 (V_4); 把磁场方向反向 (-B), 对样品的 1、3 通电流, 2、4 测电压 (V_5), 然后电流反向再测一次 (V_6); 对样品的 2、4 通电流, 1、3 测电压 (V_7), 然后电流反向再测一次 (V_8)。

则霍尔系数 R_H 计算如下:

$$R_H = 1.25 \times 10^7 t_s (V_2 - V_1 + V_4 - V_3 + V_5 - V_6 + V_7 - V_8) / (BI) \quad (7-6)$$

这里 B 为磁场强度, I 为电流, t_s 为样品厚度。

由霍尔系数得到霍尔迁移率 (μ_H) 和载流子浓度 (n 或 p):

$$\mu_H = R_H / \rho \quad (7-7)$$

$$n \text{ 或 } p = 1 / (R_H \times 1.6 \times 10^{-19}) \quad (7-8)$$

7.2.2 霍尔测试程序框图

整个霍尔测试过程如图 7-6 所示。从此程序可以进入高阻测试模块，低阻测试模块。从高低阻模块又可再进入变电流模块和变温测试模块。而整个测试过程中的加电流和电流反向以及电压测试均是通过合上 7065 霍尔卡上的不同开关来完成的。整个测试过程是通过 testpoint 软件编写的程序自动完成的。图 7-7 是变电流测试低阻的霍尔测试程序运行界面。图中最下方的四个曲线图是样品欧姆接触特性的检测曲线，从图中可以看出此样品的确为欧姆接触，接触良好；接触不好的样品从图中可以看出肖特基特性。界面的右上角为样品参数设置，在这里可以设置初始参数和样品测试电流和温度。界面的左边的按钮为测试按钮，按下开始电压测试，结果显示为图中

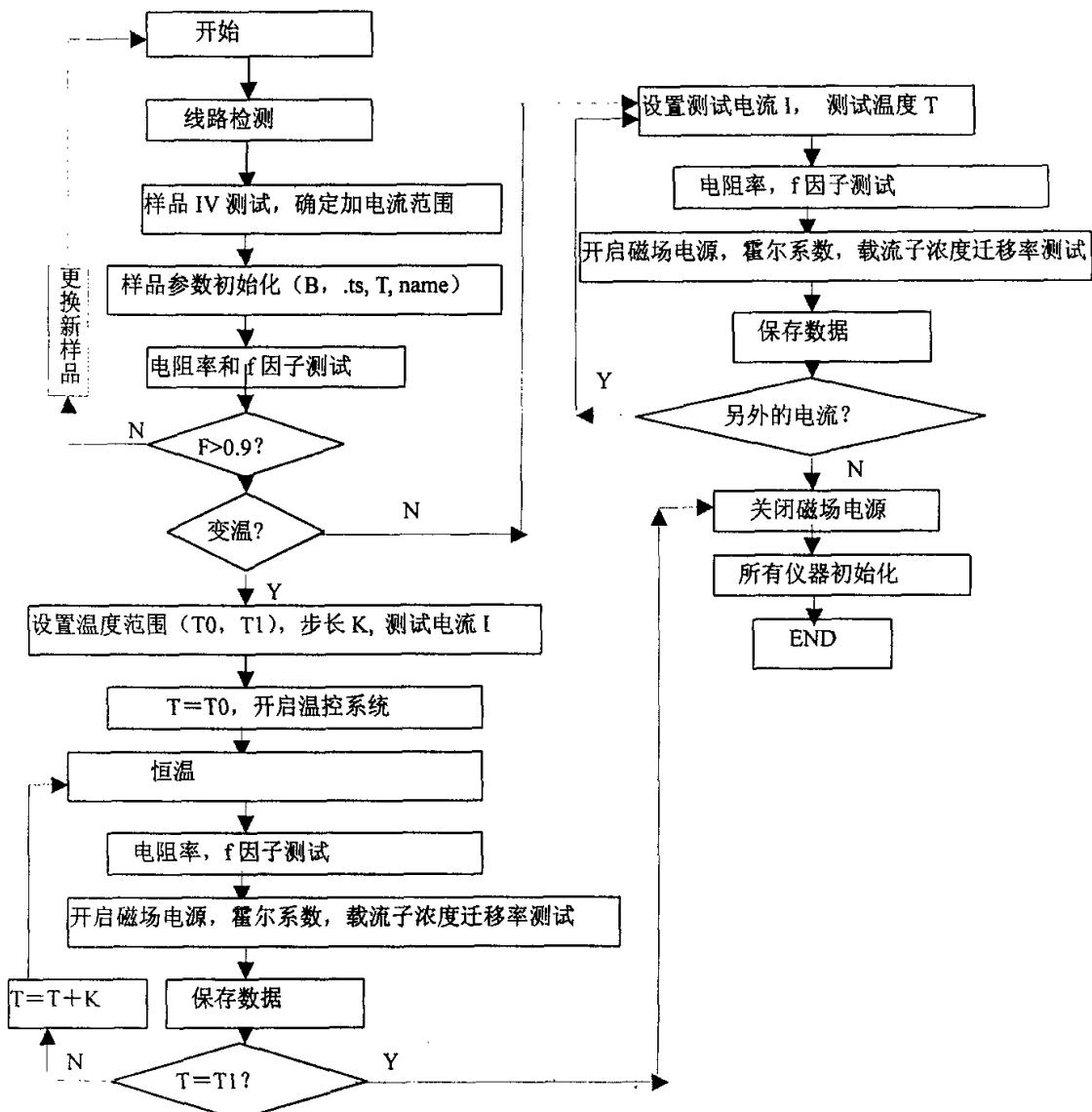


图 7-6 测试程序框图

Fig. 7-6 Diagram of Hall measurement program.

的 CV1—CV4 和 V1—V4。改边电流开始下一组测试。每次从测试电压计算得到的电阻率、迁移率、载流子浓度和霍尔系数显示在中间的列表中。

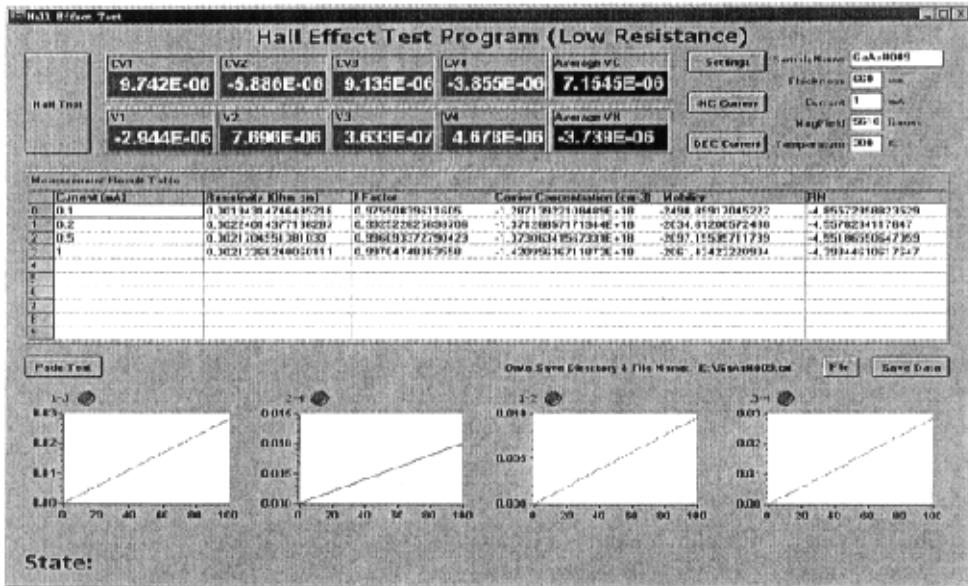


图 7-7 霍尔效应测试程序界面

Fig 7-7 Panel of Hall Effect Test Program

7.2.3 测试结果及其分析

表 7-1 是 GaAs 本底材料在不同电流条件下的霍尔测试结果。从表中可以看出，电流为 0.1mA 下的测试结果明显与其他几个测试电流的结果有偏差。其原因是 0.1mA 尽管仍然在样品 I-V 特性的线性区，但已经接近非线性区，因此仍然会有少许温升。而在电流为 0.05-0.005mA 之间，其测试结果基本保持不变，反映了真正的测量结果。从上述结果可知，在测量时，电流的选取很关键，电流过高会产生焦耳热导致测量误差。电流过低时要考虑测量仪器本身的精度要求。因此，在对样品进行 I-V 测试时，最好选取中间段的电流作为测试电流。

表 7-1 变电流霍尔测试结果

Table 7-1 Results of Hall Measurement at different bias current

GaAs#5		d=10um	B=5610	T (K) =300K	
I (mA)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	f	n (cm^{-3})	μ_H	R_H
0.1	9.701058871	0.994356481	-9.66771E+13	-6664.033162	-64648.17803
0.05	9.809216348	0.993387121	-7.89699E+13	-8068.342314	-79144.11533
0.02	9.806410901	0.993381482	-7.89893E+13	-8068.660473	-79124.60002
0.01	9.807215221	0.993380131	-7.89821E+13	-8068.740627	-79131.87589
0.005	9.806145254	0.993381246	-7.89908E+13	-8068.728275	-79123.12148

表 7-2 是变温条件下的霍尔测试结果。从表中可见，第一个点为室温测试结果。然后给样品架通液氮，使温度稳定在 85K 后，开始升温测试过程。随着温度的升高，电阻率升高；载流子浓度增大；迁移率下降；霍尔系数也下降。表中仅列举了部分数据，实际的控温测试过程可做到每变化 1K 测试一个点。

表 7-2 变温霍尔测试结果

Table 7-2 Results of Hall Measurement at different temperature

GaAs#5		d=10um	B=5610	I (mA) =0. 01	
T (K)	ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	f	n (cm^{-3})	μ_H	R_H
300	10. 30521237	0. 996531509	-8. 00206E+13	-7579. 159012	-78104. 84318
85	1. 15450961	0. 996434078	-6. 76349E+13	-80040. 85802	-92407. 9398
86	1. 157168091	0. 996525409	-6. 75805E+13	-79921. 22906	-92482. 29608
90	1. 228450438	0. 996461498	-6. 76785E+13	-75174. 71698	-92348. 41399
100	1. 509284039	0. 995822344	-6. 7058E+13	-61753. 01423	-93202. 83873
140	2. 644705204	0. 996339248	-6. 73859E+13	-35069. 85435	-92749. 42629
190	4. 998530628	0. 996542227	-6. 8574E+13	-18233. 85193	-91142. 46734
240	8. 164747928	0. 996412338	-6. 64683E+13	-11516. 55367	-94029. 75771
280	9. 579139614	0. 996576447	-7. 64911E+13	-8529. 878944	-81708. 90129
300	10. 35573144	0. 99648969	-8. 04018E+13	-7506. 433887	-77734. 61341
340	11. 72124816	0. 996272918	-8. 79228E+13	-6064. 63271	-71085. 06497
380	12. 66672555	0. 996247565	-9. 68559E+13	-5094. 361715	-64528. 88168

7.3 半导体激光器的可靠性实验

过去的三十年间, 我们越来越多的依靠基于光电子器件的通讯系统和家用电器, 如电视遥控、电话信号的传输、DVD、VCD、打印机、互联网的数据传输等均是光电器件的直接应用。这些光电子器件主要包括发光二极管、激光器和探测器。可靠性一直是也将永远是光电子器件应用的关键因素。光电器件的可靠性研究主要是针对光纤通讯的应用展开的, 可以说光电器件的开发和应用史即反映了光电器件的可靠性研究史, 尤其是在光通讯领域^[4-6]。

7.3.1 半导体光电器件可靠性研究概述

如同微电子器件一样, 光电子器件的稳定性或寿命也是有其组成材料和应用条件决定的^[3]。表 7-3 是半导体激光器的加速因子和失效部件的因果关系。光电器件的加速因子是电流 (电压), 光或温度。对于压焊和封装还有机械应力。主要的失效原因为:

表 7-3 激光器和发光管的加速因子与失效部位的关系。

Table 7-3 Accelerating factors and parts degraded for LDs (and LEDs)

加速因子	部位
电流	内部区域
光	腔面 (对激光器)
热	电极 热沉, 焊接 异质界面

- (a) 内部区域: 如复合增强缺陷移动引起的位错生长和点缺陷 (空隙原子、空位、杂质原子) 的增加; 基体晶体原子的沉积如 InGaAsP 中的 In; PN 结毁坏。
- (b) 表面或界面: 光增强的氧化; 灾变性烧毁 (COD); 点缺陷增加 (掩埋杂质界面)。
- (c) 电极: 金属半导体反应; 金色半导体间的互扩散。
- (d) 压焊及其它: 在电驱动下的电迁移; 互扩散核反应

如上所述, 光电器件具有多种器件特性和退化/失效模式并且对环境条件非常敏感。由于其失效标准和特征的变化使得可靠性评估和断定更加复杂。表 7-4 是最早用于光纤通讯中的器件的失效判据。实际上后来对于家用光电系统中的光电器件也常用表 7-4 的判据进行可靠性和寿命评估。

表 7-4 典型的失效判据

Table 7-4 Typical failure criteria

器件	特性	失效判据
LED	恒定电流下的输出功率	降低 1—3dB
LD	恒定输出光功率下的工作电流	增加 1—3dB
	恒定电流下的输出光功率	降低 1—3dB
PD	固定电源下的暗电流	增加一个数量级或某一定值
	固定暗电流下的偏置电压	某一定义值

AlGaAs/GaAs 和 InGaAsP/InP 激光器和发光管的可靠性提高的历史回顾如图 7-7 和 7-8 所示。最初的发展在 1970 年, 直流工作的 AlGaAs/GaAs 器件退化非常快。1973 年 AT&T 贝尔实验室发现此快速退化与<100>暗线缺陷有关。经过利用缺陷较少的衬底、提高生长和工艺水平使上述退化得到抑制和降低, 到 1975 年腔面无镀膜的 In 热沉器件室温下的寿命已达到 10^5 小时。在 1975—1979 年间的长期老化试验表明, 进一步的退化与<110>的滑移位错有关, 而这些位错一般是由于芯片键合到热沉时的机械应力造成的。在这一时期腔面退化也是主要的失效模式。人们发现腔面镀介质膜可以有效的抑制 COD 和腔面氧化。在这之前, 老化试验通常采用恒定电流的方式, 当位错问题和腔面退化得到解决后, 老化试验的条件开始由恒定电流变为恒定功率试验。同时人们开始控制激光器的传输模式以提高光与光纤的耦合效率。在这种情况下, 热沉材料也从机械应力的观点进行了研究, 如认为软的热沉材料 In、Sn 不如硬的热沉材料富金的 Au—Sn 材料。1988 年 NEC 证实缺陷增长点的激活能为 0.5eV。这个激活能也出现在腔面镀膜和用富金 Au—Sn 热沉的器件, 寿命估计为 10^6 小时。在八十年代, 780nm 激光器开始用于 CD 系统, 1982 年, 850nm 激光器开始用于短程和局域通讯系统。但这时的激光器仍然不能可靠的应用于光纤通讯。在长期的老化试验中, 又有新的失效模式出现。典型的是<100>线状位错或在腔面和半导体与介质界面的 COD。90 年代, 这种失效模式导致出现用于 980nm 应变 InGaAs/GaAs 激光器的腔面钝化技术, 这类激光器被认为可靠性极高 (1500 FIT), 被用于 Er 掺杂光纤放大器 (EDFA) 的泵浦源^[4-8]。

如上所述, 光电子器件的物理退化和失效机理基本上在七十年代和八十年代已经研究清楚。由此引起的退化也得到了控制和减少, 器件也已经逐步应用于光通讯系统。到九十年代, 光电子器件的研究逐步由器件研究开发转入应用研究。由于网络的应用是这个趋势更明显。可靠性和成本是光电子器件应用于 WDM 系统、LANs、CATV 系统

的两个重要因素。由于器件用量巨大,因此可靠性保证更难。目前的可靠性研究数据主要来自产品制造商,不能轻易采用。解决此问题的方法是制造商和消费者结合起来调查时间间隔、成本和大范围的应用条件和环境。即使器件结构更复杂,未来可靠性研究对于光电子器件的失效物理仍将保持不变,仍是现有的失效机理。

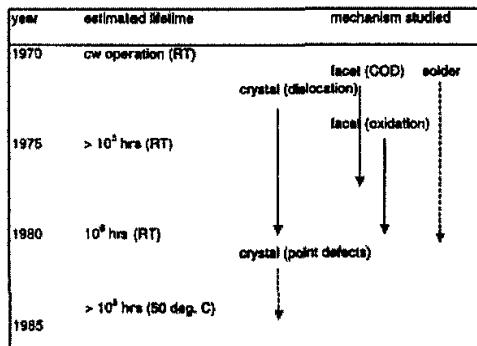


图 7-8 AlGaAs/GaAs 激光器和发光管可靠性的历史回顾

Fig7-8 Historical review of AlGaAs/GaAs LDs (and LEDs)

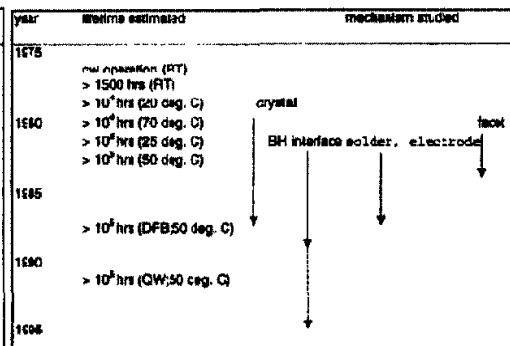


图 7-9 InGaAsP/InP 激光器和发光管可靠性的历史回顾

Fig7-9 Historical review of InGaAsP/InP LDs (and LEDs)

7.3.2 寿命评价实验设计和系统模型

任何一个要进行产业化的器件,都要给出可靠性评价,如寿命、特征温度、热阻等。如上一节所述,首先要有评价系统。图 7-10 是我们准备建立的激光器可靠性评价系统的模型。该系统是在霍尔测试设备的基础上增加 2430 大功率直流、脉冲恒流

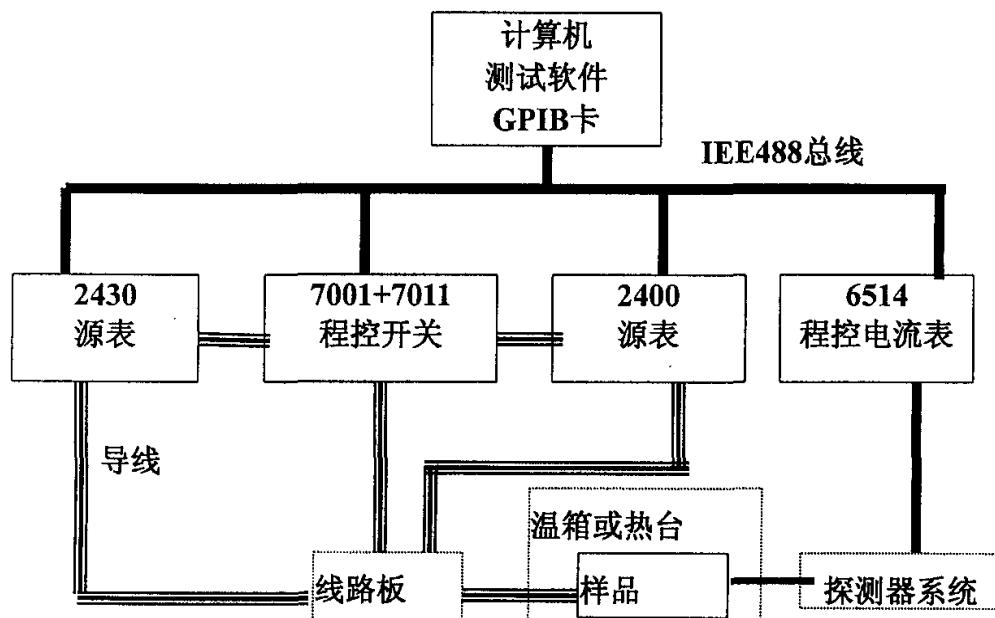


图 7-10 激光器可靠性测试系统示意图

Fig7-10 Sketch Map of reliability measurement system for semiconductor Laser diodes.

恒压源；7011 程控开关卡(80 组开关)；探测器系统；线路板；样品架(带热台)。测试线路通过线路板连接起来，样品的加应力部分，通过 2430, 2400 恒流恒压源完成，测试部分，电学测试，如 I-V，由 2430, 2400 完成，光功率测试由 6514 小电流表连接到探测器系统并通过软件处理得到。整个测试过程可以全自动完成。设计的系统可一次完成 10 个激光器的测试。测试条件可以是恒定电流下的输出功率，也可以用恒定输出功率下的工作电流。对于测试来说，恒定电流下的输出功率更易于测试。

激光器的样品架和电路板连接线路如图 7-11 所示。对于恒定电流下的输出功率，我们可以串联 10 个激光器，分别检测每个激光器的电压、输出功率来判断器件是否失效。图 7-11 左边的开关总线连接电压表，右边的开关总线连接电流表。

对于恒定输出功率下的工作电流的测试，测试线路和测试过程要复杂的多。测试连接线路如图 7-12 所示。首先十个激光器必须分别用十套恒流输出，原因是恒定功率必须通过调节工作电流来得到。在试验过程中，不断检测输出功率，一旦输出功率下降，立刻增大工作电流；输出功率增大，立刻降低工作电流。这种测试要求测试的时间间隔小，因此测试会相对频繁。但恒定功率应力条件得到的寿命值能更好的反应器件的实际应用条件下的寿命，因为激光器在应用条件下大都要求恒定功率而不是恒定电流。

目前上述系统模型仍在完善中，热台、探测器阵列和连接线路都在进行中。但对于需要十路恒流输出的恒定功率测试系统，最佳方案是自己搭建恒流源，这样可以大大降低系统成本。

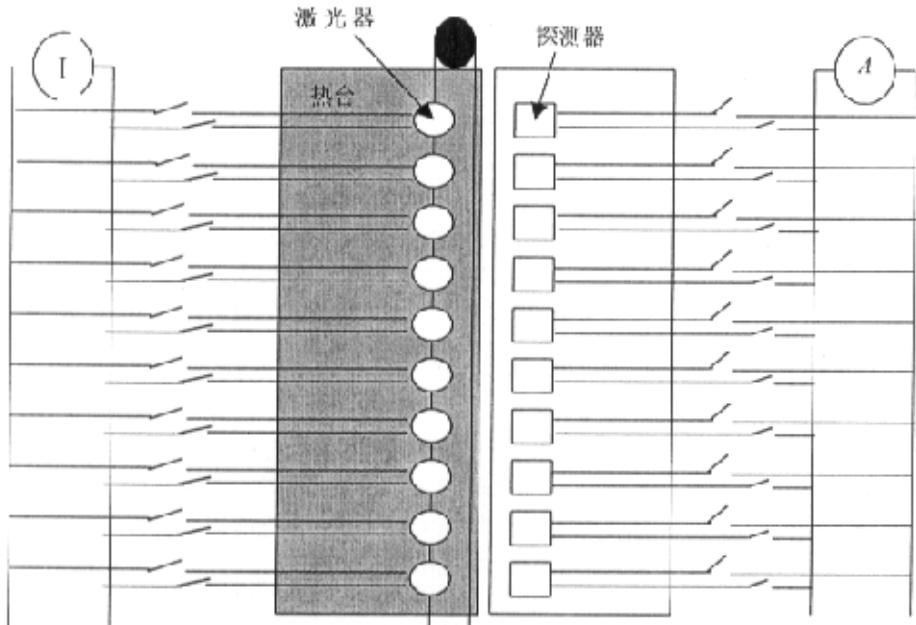


图 7-11 恒定电流下的输出功率测试连接线路

Fig7-11 Circuit diagram for condition of output power at constant current

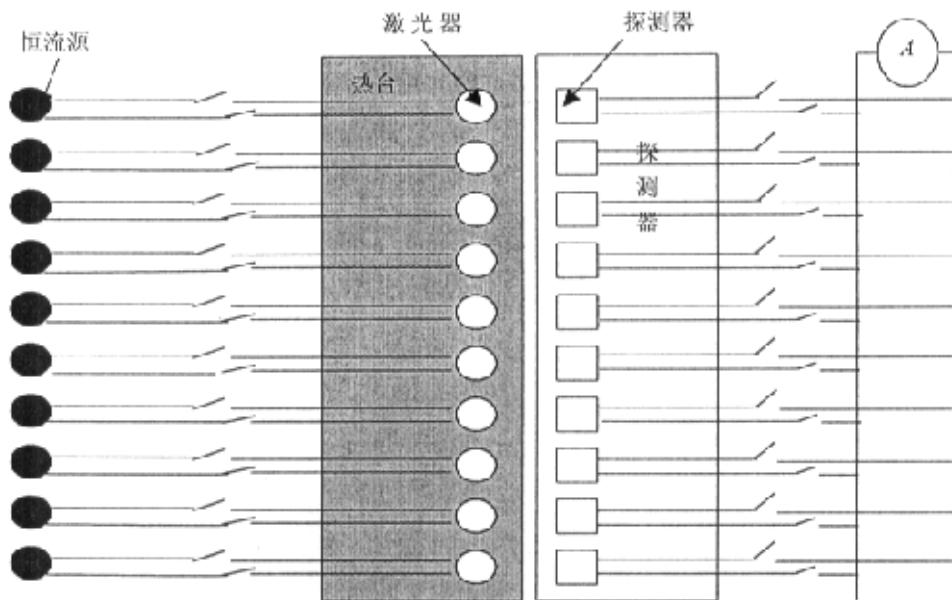


图 7-12 恒定输出功率下的工作电流测试连接线路图
Fig. 7-12 Circuit diagram for condition of operation Current at constant output power.

7.3.3 可靠性试验及其分析

对于半导体激光器的可靠性试验，与微电子器件可靠性试验类似，通常采用加速寿命试验。加速寿命试验的前提是保证加速条件的失效机理和外推条件的失效机理一致。通常选用在不同恒定温度下的累计失效分布图，得到每个温度下的中值寿命（MTF：mean time to failure），根据中值寿命与温度的阿列尼乌斯曲线，得到器件的失效激活能和外推的工作条件寿命^[9]。阿列尼乌斯方程如下：

$$MTF \propto \exp(-E_a/kT) \quad (7-9)$$

其中 E_a 为激活能，它是一种外推能量，不仅体现了退化过程的基本热激活特性，还体现了诸如器件的热特性和种种可能的电流或光功率过应力效应。

实际的激光器的加速寿命试验中有很多困难，必须考虑的因素包括：工作条件、寿命中止定义、电流过应力、在整个温度范围内阿列尼乌斯外推法的正当性、对不同批次的激光器使用相同激活能的正当性。同时，加速寿命试验的失效判剧除上述恒定电流下的光功率和恒定光功率下的工作电流外，还有用阈值电流作为判剧的。某些特殊的对光束、色散等要求严格的器件，判剧也会随之变化^[10]。

图 7-13 是两只未镀膜小功率激光器在 40°C，150mA 直流驱动下 P-I, V-I 特性随时间的变化。采用的失效判剧为输出功率下降 3db。采用的测试过程是间断测试。从 P-I 特性可以明显看到随时间增加输出功率下降、阈值电流增加和斜率效率下降。LD1 在第 7 个小时失效。LD2 在第 6 个小时失效。

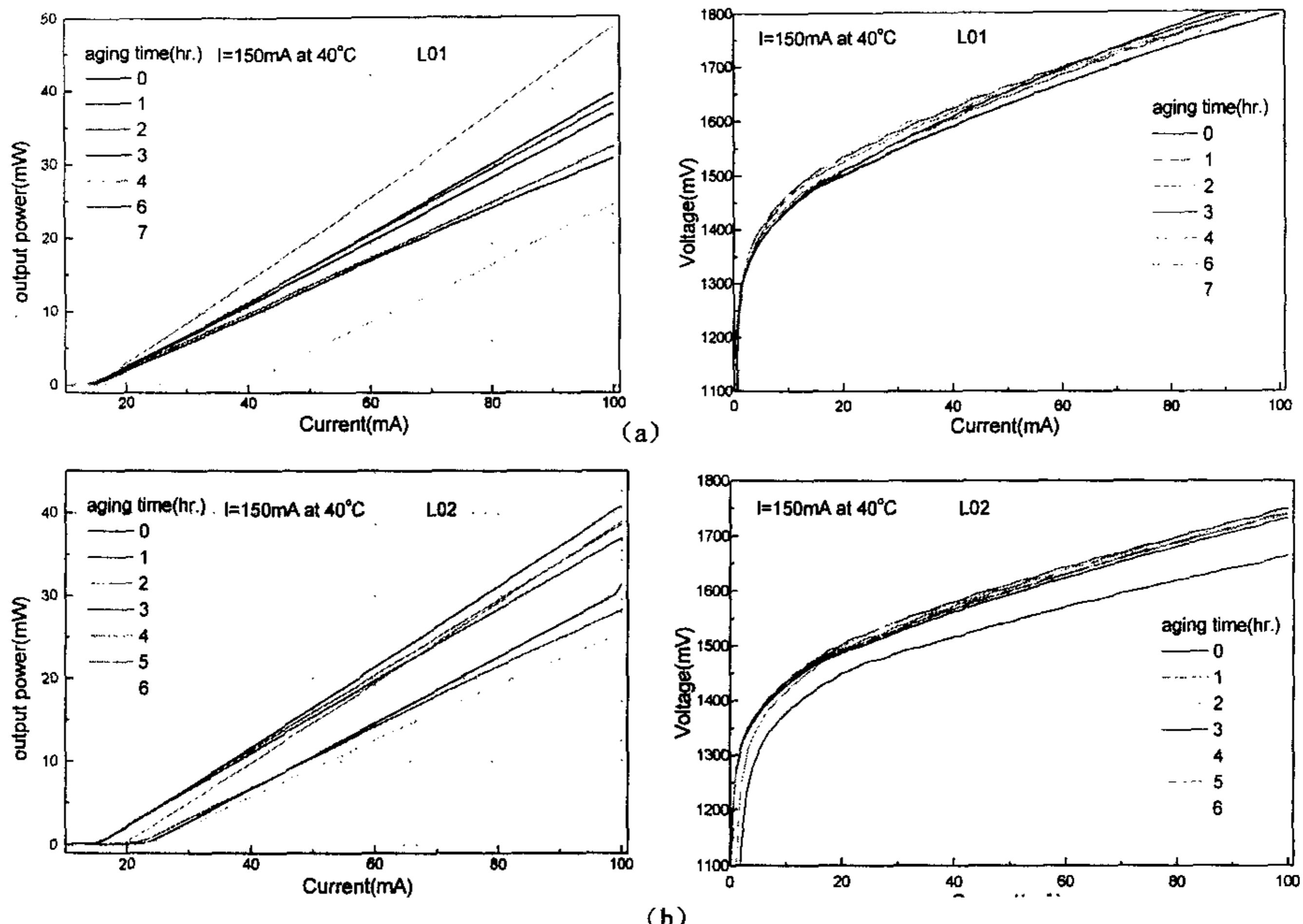


图 7-13 在 40°C, 150mA 直流驱动下激光器的 P-I-V 特性随实际的退化. (a) LD1 (b) LD2

Fig. 7-13 The degradation of P-I-V of laser bias at 150mA and 40°C. (a) LD1 (b) LD2

本章小结

本章对半导体激光器材料测试手段, 光荧光谱系统的应用测试结果进行了介绍和分析. 自己组建了一套半导体材料的霍尔效应测试系统, 对系统构成、编程、使用进行了介绍, 并对测得的变温、变电流测试结果进行了分析. 本章提出了半导体激光器可靠性测试和评价系统的初步模型, 并对半导体激光器可靠性试验进行了分析和讨论. 测试系统的组建是一个细致、繁琐的工作, 在系统的购置、组建和调试过程中得到的个人综合能力的锻炼远远超过了为此付出的努力和系统本身的成功.

参考文献

- [1] PLM100 system user's guide for Photo-Luminescence.
- [2] Model 7065 hall effect card Instruction Manual
- [3] Mitsuo Fukuda, Microelectronics Reliability, 2000, 40:27-35
- [4] Mizuishi K, Chinone N, Sato H, Ito R, J. Appl.Phys., 1979, 50:2518-22
- [5] Ettenberg M, Kressel H, IEEE J. Quantum Electron, 1980, QE-16:186-96
- [6] Grasso G, Magistrali F, Salmini G, Oosenbrug A et al, Tech. Dig. Conf. Optical Fiber

第七章 半导体光电材料测试和激光器可靠性实验

- Communication, San diego, February-March, 1995.Paper ThC2, OSA Tech Dig Series, 1995,8:232
- [7] Fukuda M, Hirono T, Kurosaki T, Kano F, IEEE Photon Technol Lett, 1993, 5:1165-7
- [8] Fukuda M, Kano F, Kurosaki t, Yoshida J, Quality and reliability engineering inter, New York, wiley, 1995, 11:295-7
- [9] 高光勃、李学信, 半导体器件可靠性物理。科学出版社, 1987: 340—357
- [10] M.J.豪斯, D.V.摩根, 半导体器件和电路的可靠性与退化, 科学出版社, 1989: 282—337

总 结

在北京光电子技术实验室的大力支持下, 通过完成北京市基金项目和科委项目, 从实验上证实了我们创新提出的利用隧道带间级联机理实现多波长激光器物理思想, 主要取得了以下成果和结论:

1. 创新地提出了隧道带间级联双波长和多波长激光器结构, 对隧道带间级联双波长激光器进行了理论分析和结构设计, 得到了双波长激光器各量子阱有源区、波导层以及隧道结的结构参数。
2. 首次生长并制备了 950-990nm 波段的隧道级联双波长半导体激光器。器件的阈值电流为 124mA, 在 600mA 时的光输出功率为 500mW, 斜率效率为 1.12W/A, 远场的水平和垂直方向发散角分别为 10 度和 36 度, 器件的两个激射波长分别为 951nm 和 988nm, 相差 37nm, 与 PL 测试结果相一致。器件在 2A 电流时输出功率达 2.4W, 在 3A 电流时输出功率达 3.1W。
3. 首次提出集成四端隧道级联双波长激光器的思想, 设计了工艺版图, 并制备了集成双波长半导体激光器。通过对不同电极间加驱动, 器件可分别工作在 950nm、990nm 和 950+990nm 三种状态。集成器件的光学特性良好, 可与单波长激光器相比。
4. 对新型双波长激光器的双波长和单波长激光器在不同温度下的光电特性进行了研究, 结果发现双波长激光器的阈值电流密度随温度升高而增大的变化速率比单波长激光器的变化速率要快。双波长器件的热特性比单波长激光器略差。通过测试激光器在脉冲占空比为 0.2% 的注入电流到准连续工作时的激射中心波长, 对比了上、下激光器的温升情况, 发现倒扣封装后的激光器上表面的激光器的温升比下面接近热沉的激光器的温升高 10°C。
5. 分别设计和制备了 650nm 和 780nm 的单波长激光器并对器件的特性进行了分析。成功制备了激射波长为 680nm 的 AlGaInP 激光器和激射波长为 790nm 的 AlGaAs 激光器。AlGaInP 激光器的脉冲工作的输出功率可达 100mW, 直流下可达 20mW。特征温度最高达 270K。
6. 首次设计和生长了可见光波段隧道级联双波长半导体激光器。器件的阈值电流为 177mA, 在 265mA 时的光输出功率为 100mW, 斜率效率为 1.3W/A。器件有两个激射波长, 分别为 699nm 和 795nm, 相差 96nm。远场的水平方向发散角为 8 度, 垂直方向的发散角为 44 度。首次成功制备四端集成 650-780nm 双波长激光器, 器件光学性能良好。
7. 成功组建了一套全自动霍尔效应测试系统, 并对相应当测试结果进行了分析讨论。提出组建一套全自动半导体激光器可靠性评价系统的模型。

尽管本文已成功制备出通过一次外延的单片双波长激光器。950、990nm 双波长激光器的性能良好, 特性稳定。650nm-780nm 双波长激光器也能够实现室温连续激射 20mW (650nm) 和 100mW (780nm) 的激光。集成器件也实现了两个波长分别激射和同时激射的工作状态。可以说顺利完成了课题目标。然而, 由于双波长器件的研究时间和经费问题, 还存在着许多不理想和不完善之处, 如 950nm、990nm 集成器件的结构优化, 大功率工作设计; 650nm 器件的波长和生长结构优化等, 只能在今后的研究工作中开展。

在今后的研究工作中，我认为主要的攻关目标是实现 650nm、780nm 隧道级联双波长集成激光器的稳定工作，并获得实用化的商品器件。为此应从以下几方面开展研究工作：

1. 进行 AlGaInP 量子阱结构和材料的试验，优化器件的输出波长和特性。
2. 进一步通过实验优化隧道结的厚度和掺杂浓度，在保证高遂穿几率的基础上隧道结还要可制备良好的欧姆接触以得到集成器件的输出电极。
3. 通过隧道级联提高每个波长的输出功率。
4. 在器件制作上解决重掺杂层带来的严重的电流扩展（对于下有源区）及造成的阈值电流升高等问题，可以通过质子轰击及干法刻蚀工艺来解决。
5. 通过多次外延和工艺改进，制备多波长集成激光器件。

另外利用隧道级联机理研究多波长发光二极管和白光二极管也是一个非常有前景的工作。北京光电子试验室已经开始此方面的研究。

致 谢

首先感谢我的导师沈光地教授几年来对我在学习和研究中给予的细心指导、鼓励和支持。沈教授在光电子和微电子学方面取之不尽的新思想新观点、他对科学的献身精神和他的天才的洞察力深深的影响了我，使我从中得到许多宝贵的研究经验。我为有这样的导师感到幸运和自豪。

特别感谢邹德恕研究员、李建军博士在材料生长、结构设计、器件制备等諸多方面给予的指导和帮助。

特别感谢电控学院院长陈建新教授，北京市光电子室高国、徐晨、廉鹏、邓军、韩军、王学忠、孙泽长、杜金玉、王东风、董欣、韩金茹、刘莹、高新焕等全体老师和史辰、崔碧峰、丁颖、鲁鹏程等同学对我学习和生活等帮助。特别感谢可靠性物理室李志国教授、程尧海、吕长志教授和其他老师和同学给予的关心和支持。感谢电控学院领导和各办公室的领导和工作人员几年来的帮助和支持。

特别感谢研究生部的老师们对我在研究生学习过程中的帮助和支持。

特别感谢和悼念我的另一位良师益友，香港大学工学院副院长李华刚教授。李教授在光电子和多媒体研究领域的卓越成就，非凡的社交能力和他的幽默、乐观、知难而上的精神将使我终生受益。和他共同工作的日子令人终生难忘。愿上帝保佑他的女儿。愿他在那个花园里快乐依然！

无言的感谢送给我最爱的儿子闫龙。感谢他小小年纪对我的学习给予行动上的理解和支持。感谢他带给我人生的无尽幸福和快乐。永远感谢闫水茂先生多年来苦乐与共的日子，没有他的鼓励、支持和个人牺牲，我将无法按时完成此论文。最深的感谢献给我亲爱的父母，感谢他们支持我学习和帮我照顾孩子。

向所有关心、鼓励和帮助过本论文工作的同志和朋友们表示衷心的感谢！

郭伟玲

2002年8月