

解有限方势阱的波函数决定，其电子和空穴能级满足如下本征方程，

因此考虑 $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ 的应变和量子尺寸效应，对于量子阱中 $n=1$ 的电子态和空穴态的辐射跃迁，其能量和波长分别为

$$E(x, Lz) = Eg(x) + \Delta E_{hh}(x)|_{strain} + \Delta Ec(x)|_{Lz} + \Delta E_{hh}(x)|_{Lz} \quad (4-6)$$

$$\lambda(x, Lz) = \frac{hc}{E(x, Lz)}$$

在式(4-6)中，与温度有关的量我们只考虑第一项，由于温度对 $InGaAs/GaAs$ 的带隙同时产生影响，而式中第二、三、四项均是由于 $InGaAs$ 和 $GaAs$ 之间的应变和量子效应共同作用形成的，它们的值是由两者的能带结构共同决定的。因此在计算由于温度造成对激射波长的影响可以忽略后三项。

对于体材料而言，禁带宽度随温度的变化量可由室温下的禁带宽度和温度系数 dEg/dT 给出。对于 $GaAs$ 半导体， $dEg/dT = -3.95 \times 10^{-4} eV/K$ ； $InAs$ 的温度系数 $dEg/dT = -3.5 \times 10^{-4} eV/K$ 。对于 $In_xGa_{1-x}As$ ，其温度系数为：

$$dEg/dT = -3.95(1-x) - 3.5x = 0.45x - 3.95 \text{ (单位: } 10^{-4} eV/K) \quad (4-7)$$

由上式可得 $In_xGa_{1-x}As$ 的温度系数：

$$dEg/dT (x=0.16) = -3.68 \times 10^{-4} eV/K$$

$$dEg/dT (x=0.22) = -3.851 \times 10^{-4} eV/K$$

对式 $\lambda = hc/Eg$ 对温度求导可得：

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_g^2} \cdot \frac{dE_g}{dT} = \frac{dE_g}{dT} \cdot \frac{\lambda^2}{hc} \quad (4-8)$$

由式(4-7)和(4-8)，可得 $x=0.16$ 和 $x=0.22$ 时的 $In_xGa_{1-x}As$ 的量子阱激射波长随温度的变化为：

$$x=0.16: \quad \frac{d\lambda}{dT} = 3.68 \times 10^{-4} \cdot \frac{\lambda^2}{hc} \quad (4-9)$$

$$x=0.22: \quad \frac{d\lambda}{dT} = 3.851 \times 10^{-4} \cdot \frac{\lambda^2}{hc} \quad (4-10)$$

图 4-6 给出了 950、990nm 双波长激光器的上、下有源区量子阱的激射波长的温度系数与激射波长的关系。由图中看出，量子阱的激射波长越大，随着温度升高波长红移的趋势越明显。 $In_xGa_{1-x}As$ 量子阱中 x 越小，随温度升高的波长红移越显著。对于双波长激光器激射波长为 950nm 和 990nm 附近的光跃迁，波长随温度的变化关系为：

$$[d\lambda/dT]_{\lambda=950} = 0.2766 \text{ nm}/^\circ C \quad (4-11a)$$

$$[d\lambda/dT]_{\lambda=990} = 0.3044 \text{ nm}/^\circ C \quad (4-11b)$$

即温度每升高 10°C , 950nm 的 InGaAs 量子阱激光器的激射波长将向长波方向移动 2.766nm , 990nm 的 InGaAs 量子阱激光器的激射波长将向长波方向移动 3.044nm 。如果知道了波长的红移量, 那么根据上面的数据, 我们可以推算出器件的实际温升。

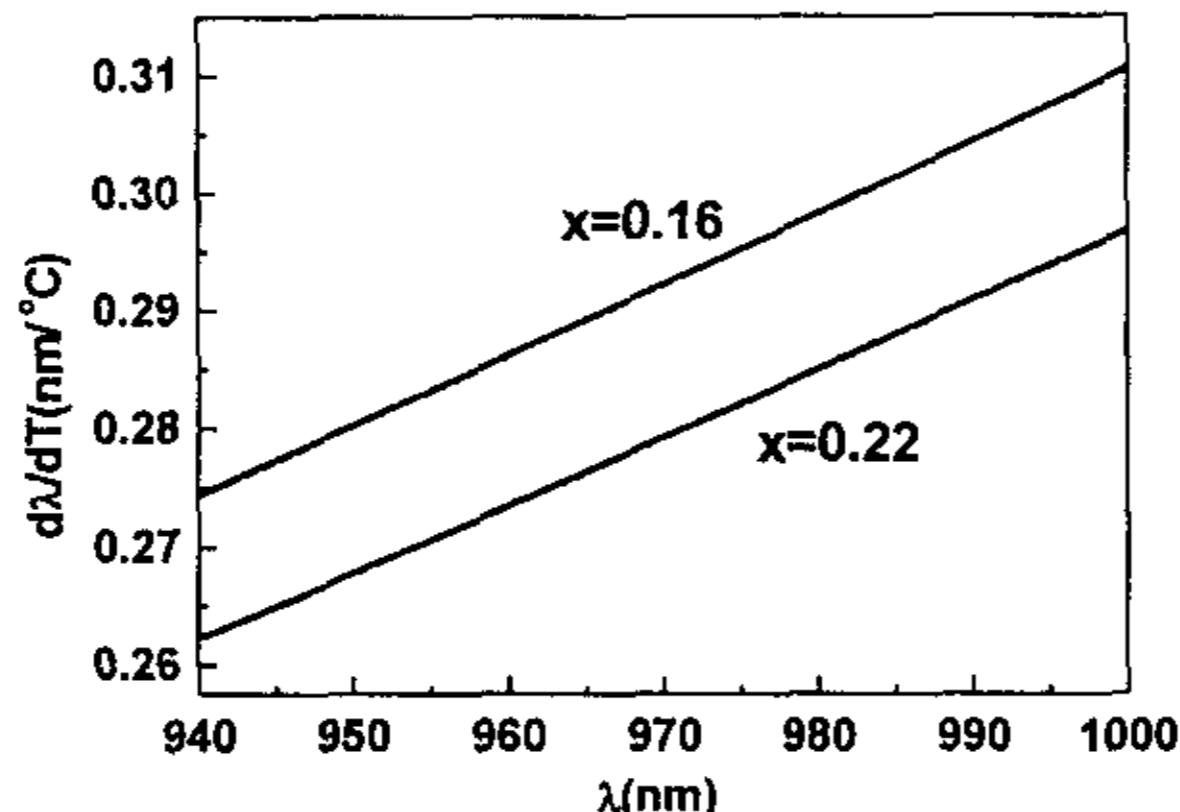


图 4-6 双波长激光器上、下量子阱激射波长的温度系数随温度的变化关系。

Fig.4-6 $d\lambda/dT$ vs. λ on the up and down quantum well of the dual-wavelength laser diodes.

4.2.2 双波长激光器工作时的温升

对双波长器件在不同占空比下测量得到了波长随脉冲占空比增加发生的红移量。根据上一节得到的温度系数, 估算出了器件的相对温升。表 4-1 给出了双波长激光器输出功率恒定在 100mW , 电流在 0.5A 以下, 通过改变脉冲宽度和频率得到的激射中心波长变化的测试结果。从表中可以看出, 随着注入电流脉冲宽度的增加, 可以明显地观察到器件的激射波长在不断地红移。对于占空比为 0.2% 的窄脉冲注入电流, 可认为此时器件产生的热可以被及时散出去, 温升可以忽略。因此波长红移量的计算便为某一注入时的激射波长减去占空比为 0.2 时的激射波长。

从表 4-1 可看出相对于占空比为 0.2% 的不同脉冲占空比条件下的相对温升。 950nm 激光器直流工作时的相对温升为 14.5°C ; 990nm 激光器的相对温升为 24.3°C 。上有源区(激射波长为 950nm)的温升比下有源区(激射波长 990nm)的温升低, 主要是由于双波长激光器的封装是 P 朝下倒扣在 Cu 热沉上, 因此原来的上有源区紧挨热沉, 散热条件好; 而下有源区则离热沉较远, 产生的热量不能及时散出去造成的。

实际上在测试脉冲占空比从 0.2% 增加到 40% 时, 两个激光器的相对温升均较小, 且相差不大。但随着占空比的进一步增加, 相对温升迅速增加。虽然测试功率仅为 100mW , 但温升已经达 24 度。由于双波长器件材料厚, 结压降高(相对于单波长激光器), 如果此类器件要工作在大功率下, 将会有较高的焦耳热产生, 因此它的散热必然成为器件应用的限制因素。集成器件由于串连电阻较高, 这个问题将会更加严重。因此为了获得连续工作, 我们应对双波长隧道再生激光器的

导热及散热装置进行仔细的设计，使得有源层产生的热量都能及时地耗散出去。

表 4-1 不同脉冲占空比下双波长激光器上、下有源区的相对温升
Table 4-1 the relative temperature rise on top and down active layer of the dual-wavelength at different pulse ratio

占空比 (f×t)	LD1 激射波长 (nm)	相对温升 ΔT_1 (°C)	LD2 激射波长 (nm)	相对温升 ΔT_2 (°C)
0.2%	950.4	0	983.8	0
1.0%	950.8	1.4	984.2	1.3
10%	951.4	3.6	984.4	2.0
20%	951.4	3.6	984	1.3
40%	951.8	5.1	986.4	8.5
50%	953.2	10.1	986	7.2
80%	953.8	12.3	990	20.4
100% (cw)	954.4	14.5	991.2	24.3

显然两个激光器的温升差别是由于测试时器件的封装形式是倒装(如图 4-7 所示)，即 p 型电极朝下，这意味着 LD1 靠近热沉，LD2 靠近器件表面。接近热沉的器件能通过热沉很快散热，因此温升比远离热沉的激光器要小。在直流驱动下输出 100mW 光功率时，两个激光器的温升相差近 10°C。那么在大功率工作时器件的相对温升将更加严重。

精确测量激光器的热分布一直是研究者关注的焦点。上面测得到激光器的相对温升给我们一个启发，就是利用双波长激光器可以更精确的给出激光器的纵向热分布。测量时使下面的激光器(LD1)处于工作状态(发热)，用非常小的脉冲信号测量上面的激光器(LD2)的波长漂移而得到温度变化，这样测得的波长漂移是由激光器的绝对温升引起的，即热源 LD1 传递到达 LD2 时引起 LD2 的温升。通过改变两个激光器间的纵向距离可以得到半导体激光器工作时温度的纵向分布。这将为缓解和解决半导体激光器的散热问题提供新的依据。

当然上述方法的实施需要引出 LD2 的电极，在工艺和测试线路的组建方面要面临很多考验。

本章小结

通过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测试发现，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。表明双有源区隧道再生激光器与单波长激光器在载流子限制，光场限制，辐射复合效率以及器件的内部损耗等特性上有所不同，双波长器件的热特性比单波长激光器略差。双有源区隧道再生激光器在温度升高后其效率下降比普通激光器快，这说明在大电流下工作时，由于双有源区隧道再生激光器的高阈值电流引入的高损耗以及不良的散热机制将使器件表现出比普通激光器具有更快的恶化趋势。

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，来获得激光器有源区相对于热沉的温升，来了解激光器的热产生及散热情况。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 。原因是上面激光器离热沉较远，散热不如下面好。集成双波长器件散热状况对连续工作是不利的，需重新考虑隧道再生激光器的散热和封装装置以达到连续工作。

参考文献

- [1] J. P. Van der Ziel, and Naresh Chand , "High-temperature operation (to 180°C) of $0.98\mu\text{m}$ strained single quantum well $\text{In}0.2\text{Ga}0.8\text{As}/\text{GaAs}$ lasers", Appl. Phys. Lett., 58(13),1437-1439, 1991.
- [2] N. K. Dutta, J. L. Lopata, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, "Temperature dependence of threshold of strained quantum well lasers", Appl. Phys. Lett., 58(11), 1125-1127, 1991.
- [3] G. D. Shen, P. Lian, X. Guo et al. Novel Large Coupled Optical Cavity Semiconductor Lasers and Multi-active Region Light Emitting Diodes with High Performances. Proceeding of SPIE. 2000, 4225: 327~330
- [4] YIN Tao, LIAN Peng, XU Zuntu, CHEN Changhua, ZHAO Hongdong, SHEN Guangdi, et al. Carbon doped 980nm InGaAs strained quantum well lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition. (Invited paper), Proceedings of SPIE. 1998, 3547: 48-53
- [5] 杜宝勋. 半导体激光器原理, 第3、4、6章. 兵器工业出版社, 2001
- [6] 黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用. 第二版. 国防工业出版社, 2001: 42~45, 75~83
- [7] P. Lian, T. Yin, Z. T. Xu ,H. D. Zhao, G. D. Shen, et al. High quality carbon doped GaAs/GaAlAs material growth in MOCVD and its application for optoelectronic devices. Proceedings of SPIE. 1998 3547: 278-284

第五章 650nm 和 780nm 激光器的制备和特性分析

课题研究的目标是制备 650–780nm 隧道级联新型双波长激光器。要得到双波长激射的 650–780nm 隧道级联双波长激光器，必须先制备出性能良好的单波长 650 和 780nm 激光器。由于北京光电子试验室没有做过这方面的研究，因此我们分别设计和制备了单波长 650nm 和 780nm 激光器，并对材料特性和器件特性进行了分析讨论。

5.1 780nm 激光器的设计制备和特性分析

由于 780nm 激光器广泛地应用于 CD-R、CD-Audio 及 CD-RW、VCD、DVD 的兼容数据读取系统和激光打印、复印系统以及条码扫描系统，目前仍占有很大的市场份额^[1-3]。而双光头（650、780nm）光碟机仍然是目前可见光激光器应用最多的产品，为了制备双波长激射的 650nm–780nm 激光器，必须首先设计和制备单波长发射的 780nm 激光器。

5.1.1 780nm AlGaAs 激光器的结构设计和器件制备

用于光盘数据读出用的 780nm 激光器采用 AlGaAs\GaAs 材料系。此类器件的主要问题是高功率工作时的腔面损坏，因此要获得高可靠性、高功率工作的器件，通常采用工艺复杂的窗口结构或采用薄有源区结构^[4-7]。

对于 780nm 附近的光跃迁波长，选用 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$ ($x > y$) 量子阱结构。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的带隙与组份 x 的关系为，

$$E_g = 1.424 + 1.247x \quad (\text{eV}) \quad (0 < x < 0.45) \quad (5-1a)$$

$$E_g = 1.424 + 1.247x + 1.147(x - 0.45) \quad (\text{eV}) \quad (0.45 < x < 1) \quad (5-1b)$$

当 $x=0.1$ 时， $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的禁带宽度为 1.549eV，相应的跃迁波长为 800nm，我们采用 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 单量子阱结构作有源区，通过计算，为得到 780nm 的波长，阱的宽度为 10nm。

采用薄有源区结构生长的 780nm 激光器结构如表 5-1 所示。 p 型采用掺碳的结构，一方面掺杂浓度较高可获得较好的欧姆接触，另一方面也避免了掺 Ge 和掺 Zn 带来的工艺和可靠性问题。量子阱的厚度为 10nm，阱里的 Al 组分为 0.1，垒的 Al 组分为 0.5。室温下的光荧光谱测试显示器件的发射光谱在 780.4nm，峰值半宽为 27nm，如图 5-1 所示，与设计目标完全吻合。

表 5-1 780nm AlGaAs 激光器的结构。

Table 5-1 Structure of 780nm laser diode

导电类型	材料	宽度 (μm)	掺杂浓度
P ⁺⁺	GaAs	0.1	C: $5\text{E}19\text{cm}^{-3}$
P ⁺	GaAs	0.15	C: $1\text{E}19\text{cm}^{-3}$
P	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ x: 0.5–0.1	0.1	$1\text{E}18\text{cm}^{-3}$
P	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	1.4	$1\text{E}18\text{cm}^{-3}$
i	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	100nm	
i	$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$	10nm	
i	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	100nm	
N	$\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$	1.5	Si: $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$
N	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ x: 0.1–0.5	0.1	Si: $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$
n ⁺	GaAs	0.2	Si: $1\text{E}18\text{cm}^{-3}$
n ⁺	GaAs substrate(100)	15degree off(111)	

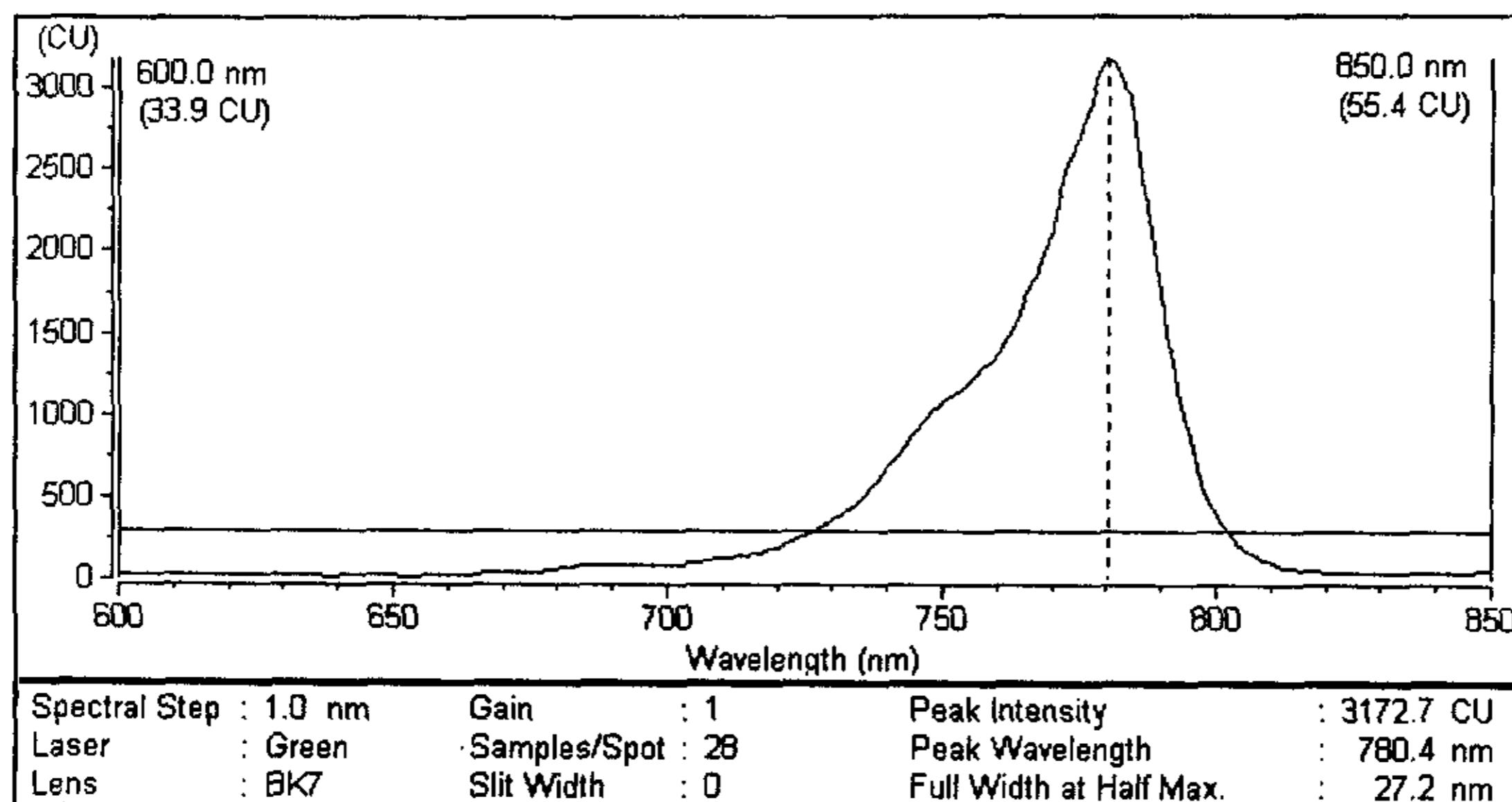


图 5-1 780nm 激光器的光荧光谱

Fig 5-1 The photoluminescence of 780nm laser diode

5.1.2 780nm 激光器基本特性分析

(a) 50 μm 宽条高功率器件的特性分析

图 5-2 是 50 μm 微腐蚀条形激光器光电特性。从图中可以看出，未镀膜激光器件的阈值电流为 252mA，工作电流达到 820mA 时输出功率高达 500mW，斜率效率为 1W/A，光电转换效率为 29%，发射波长为 793nm，其平行和垂直远场发散角分别为 7.2° 和 38.4°。此类激光器的最高功率可达到 1.2W。

图 5-3 是腔长分别为 430 μm 和 650 μm 的 50 μm 条形器件的阈值电流密度和斜率效率随温度的变化关系。从图中可以看出，随着温度的升高，短腔长器件

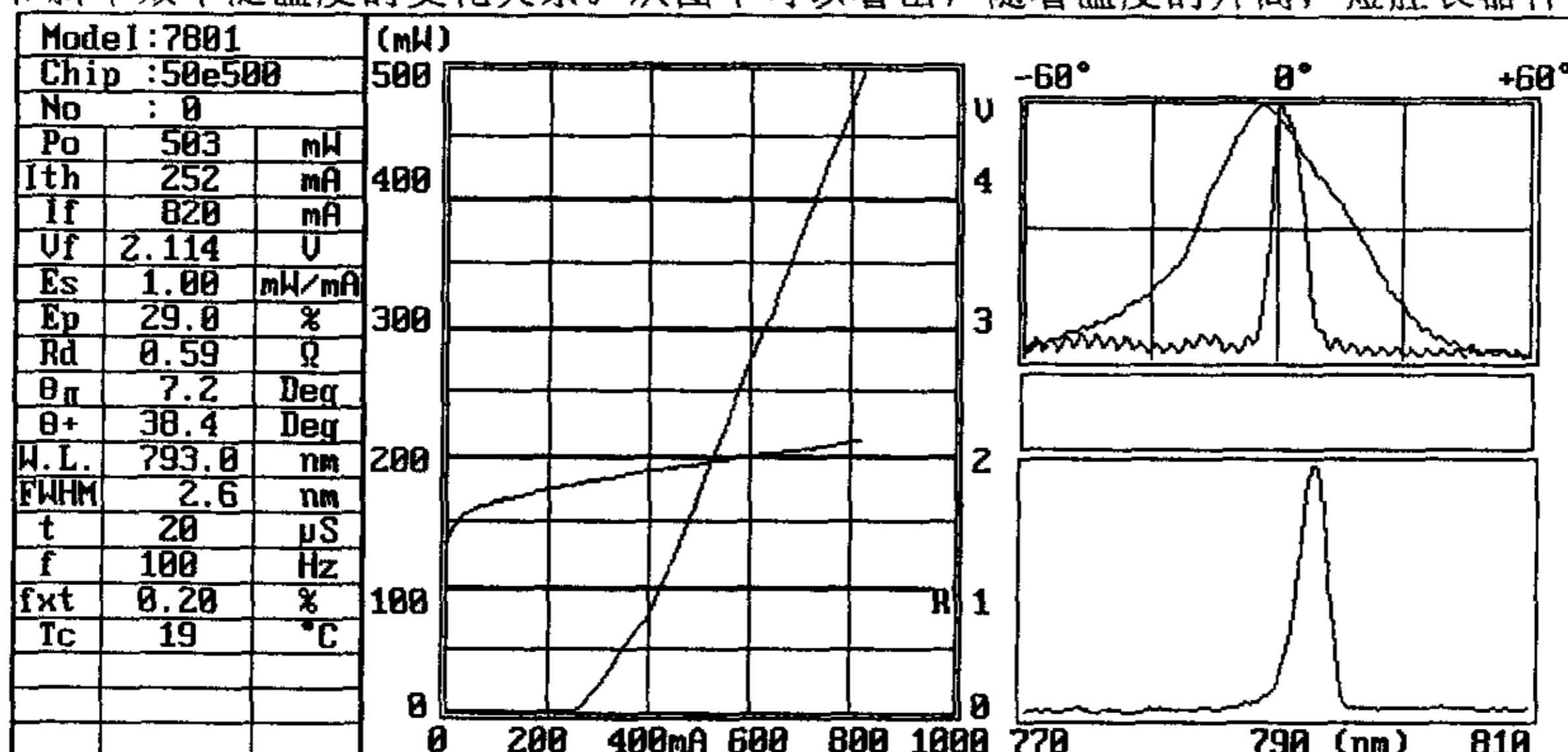


图 5-2 50 μm 微腐蚀 780nm 激光器件的光电特性

Fig 5-2 the Electrical-optical characteristics of 50μm stripe laser diode for 780nm wavelength

的阈值电流密度升高的速率较快，相应的特征温度分别为 57K 和 65K；短腔长器件的斜率效率随温度的下降也较长腔长器件显著，但总的来看器件的热特性较差。此类器件作为大功率器件使用时将面临严重的热和可靠性问题。器件热特性不好的原因是由于材料本身的特性，我们得到的特征温度值比文献报道的掺 P 型掺 Zn 的器件的特征温度值略好一些，可能是掺 C 带来的好处。短腔长器件阈值电流密度较高的原因是短腔长器件中的俄歇非辐射复合使载流子的自发发射寿命显著减少，因而使阈值电流迅速增加。

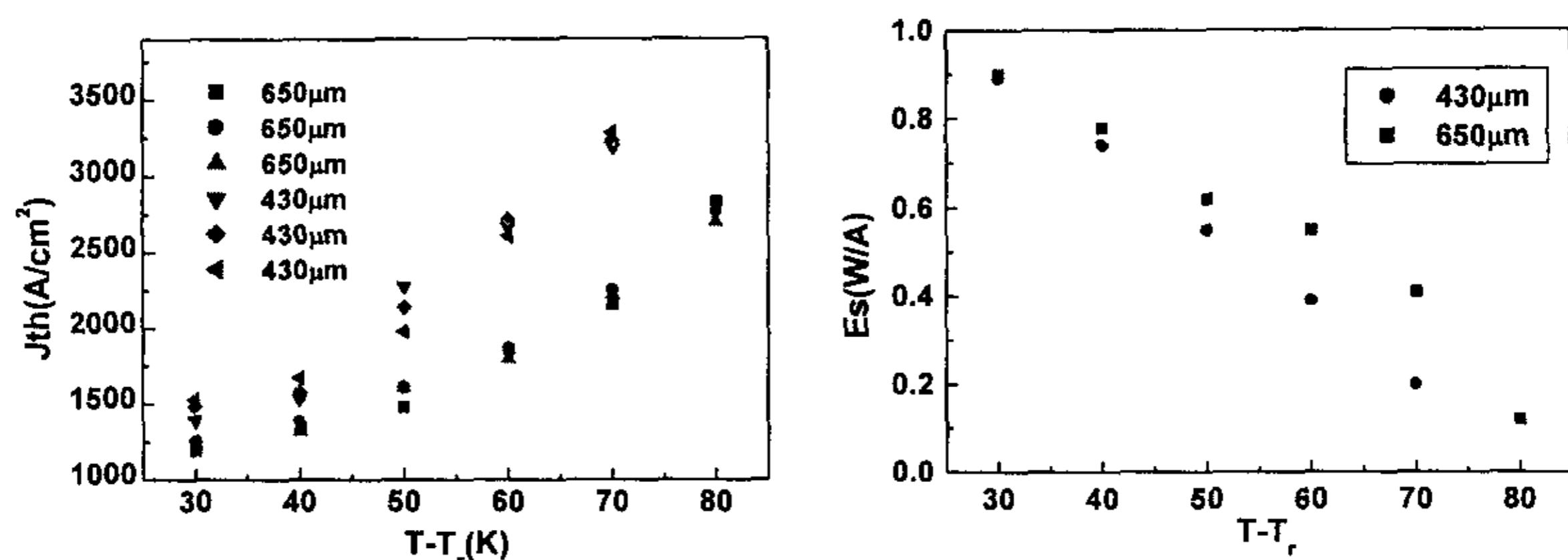


图 5—3 腔长为 430 μm、650 μm 的宽条 (50 μm) 激光器阈值电流密度和斜率效率随温度的变化。

Fig 5—3 Threshold current density and slope efficiency vs. Temperature of 50 width stripe laser with
(b) 10 μm 窄条器件的特性分析

10 μm 脊型微腐蚀条形器件的光电特性如图 5—4 所示。从图中可以看出，未镀膜激光器件的阈值电流为 137mA，工作电流达到 185mA 时输出功率高达 31mW，斜率效率为 0.98W/A，发射波长为 789nm，其平行和垂直远场发散角分别为 6° 和 30°。此类器件的最大输出功率可达到 100mW。10 μm 窄条形器件在直流条件下可连续输出 30mW 的激光。

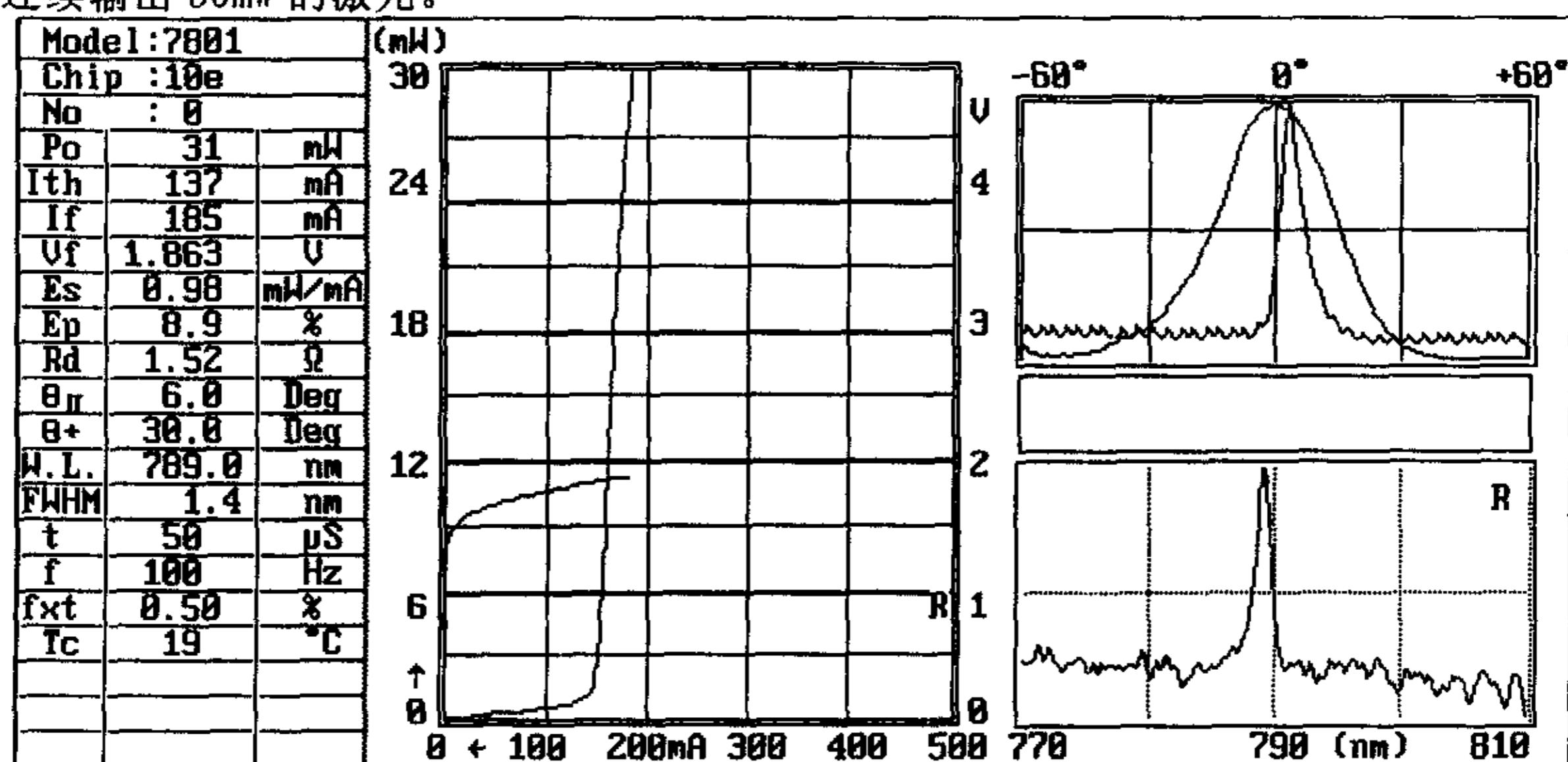


图 5—4 10 μm 微腐蚀 780nm 激光器件的光电特性

Fig 5—4 the Electrical-optical characteristics of 10μm stripe laser diode for 780nm wavelength

5.1.3 量子阱激光器阈值电流密度的分析计算

由于 780nm 激光器采用 AlGaAs 量子阱，650nm 激光器采用 AlGaInP/GaInP 量子阱，要想两个有源区同时激射，必须上下有源区的阈值电流密度接近或下有源区的阈值电流密度小于上有源区，这样在考虑到隧道结引入的电流扩展效应后，仍可保证下有源区器件的激射。因此 780nm 激光器的阈值电流密度便成为器件结构设计的关键。

对于单量子阱激光器，量子阱的光增益如式(5-2)所示，

$$g(\hbar\omega) = (n/c)B \frac{m_r^*}{d\pi\hbar^2} [f_c(E) - f_v(E - \hbar\omega)] \quad (5-2)$$

其中 g 为光增益， n 为材料折射率， B 为电子与光子相互作用系数， m_r^* 为折合有效质量， d 为阱宽， E_q 为量子尺寸效应产生的子带间带隙， B 如下式所示：

$$B = \frac{\pi\hbar q^2}{4n^2\epsilon_0 m_c^*} [I + (\Delta + \Delta' + \Delta'')/3Eq] \quad (5-3)$$

$$\Delta' = \frac{\hbar^2\pi^2}{2d^2} \left(\frac{1}{m_l^*} - \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5-4)$$

$$\Delta'' = \frac{\hbar^2\pi^2}{2d^2} \left(\frac{1}{m_s^*} - \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (5-5)$$

$$E_q = E_g + E_{cl} + E_{vl} \quad (5-6)$$

其中 m_h^* , m_l^* , m_s^* 分别是重空穴价带、轻空穴价带和自旋-轨道耦合分裂价带的有效质量。由式(5-2)得出最大光增益系数：

$$g = (n/c)B \frac{m_r^*}{d\pi\hbar^2} [f_c(E_{cl}) - f_v(E_{vl} - \hbar\omega)] \quad (5-7)$$

其中： $f_c(E_{cl}) = 1 - e^{-\frac{N}{\xi_c}}$, $f_v(E_{vl}) = e^{-\frac{P}{\xi_v}}$ (5-8)

$$\xi_{c,v,r} = \frac{KTm_{c,v,r}^*}{d\pi\hbar^2} \quad (5-9)$$

根据名义电流密度(J_n)的公式：

$$J_n = qA^*NP \quad (5-10)$$

其中 A^* 为辐射复合系数，

$$A^* = \frac{\xi_r}{\xi_c\xi_v} A, \quad A = \frac{nq^2E_q^2}{4\pi\epsilon_0 m_c^* \hbar^2 c^3} [I + (\Delta + \Delta' + \Delta'')/3Eq] \quad (5-11)$$

$$N = \xi_c \ln(1 + \exp(F_c'/KT)) \quad (5-12)$$

$$P = \xi_v \ln(1 + \exp(F_v'/KT)) \quad (5-13)$$

通过计算得到最大光增益系数 g 与名义电流密度 J_n 的关系如图 5-5 所示（未考

虑温度对带隙的影响)。得到室温下名义透明电流密度为 $13\text{kA}/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$, 若取 AlGaAs 量子阱阱宽为 10nm , 则光增益常数或增益因子约为 $\beta = 5 \text{ cm} / \text{A}$, 透明电流密度 $J' = 130\text{A}/\text{cm}^2$ 。

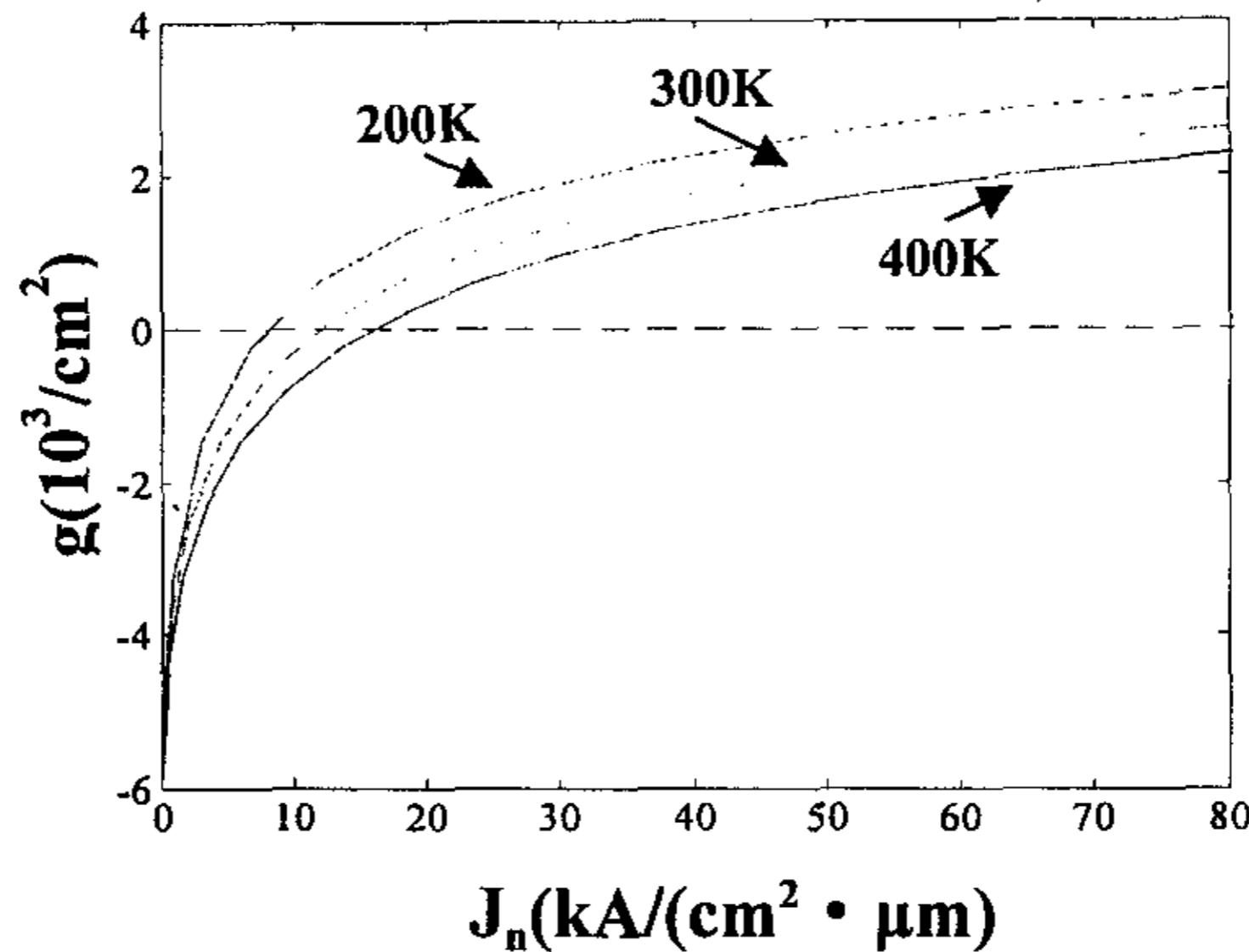


图 5-5 不同温度下最大光增益系数与名义电流密度的关系

Fig. 5-5 Calculated result of maximum optical gain versus nominal current density for different temperature

阈值电流密度 J_{th} 与透明电流密度 J' 、内损耗 A_i 、腔面损耗 A_m 、增益因子 β 、光学限制因子 Γ 、内量子效率 η_i 的关系可表示为:

$$J_{th} = \frac{1}{\eta_i} \left(J' + \frac{A_i + A_m}{\beta \Gamma} \right) \quad (5-14)$$

$$A_m = \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (5-15)$$

内量子效率 η_i 和内损耗 A_i 取实验测得的值 (见图 5-8 的 η_i 和 a_i)。图 5-6 (a) 和 (b) 是根据式 (5-14) 计算得到的 $50\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 条形激光器的阈值电流密度与腔长的关系曲线, 随着腔长的增加, 阈值电流密度下降。图 5-7 (a) 和 (b) 是实验测得的 $50\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 条形激光器的阈值电流密度与腔长的关系, 结果也是随着腔长的增加, 阈值电流密度降低。 $50\mu\text{m}$ 条形微腐蚀器件的试验数据与模拟数据较接近, 计算得到的阈值要略低于试验数据, 原因是计算中未考虑电流扩展造成的阈值电流密度的提高。 $10\mu\text{m}$ 激光器件的试验数据与理论模拟结果相差较大, 一方面是因为测试用小功率条件 (相对测试误差要大于大功率器件); 窄条器件的电流扩展效应更严重一些; 试验数据计算时未考虑到电流扩展带来的影响。另外, 实际上激光器件的阈值电流密度随腔长增加而降低的速率并非计算的那么快, 特别是在长腔长情况下, 阈值电流密度随腔长的增加只略微下降。

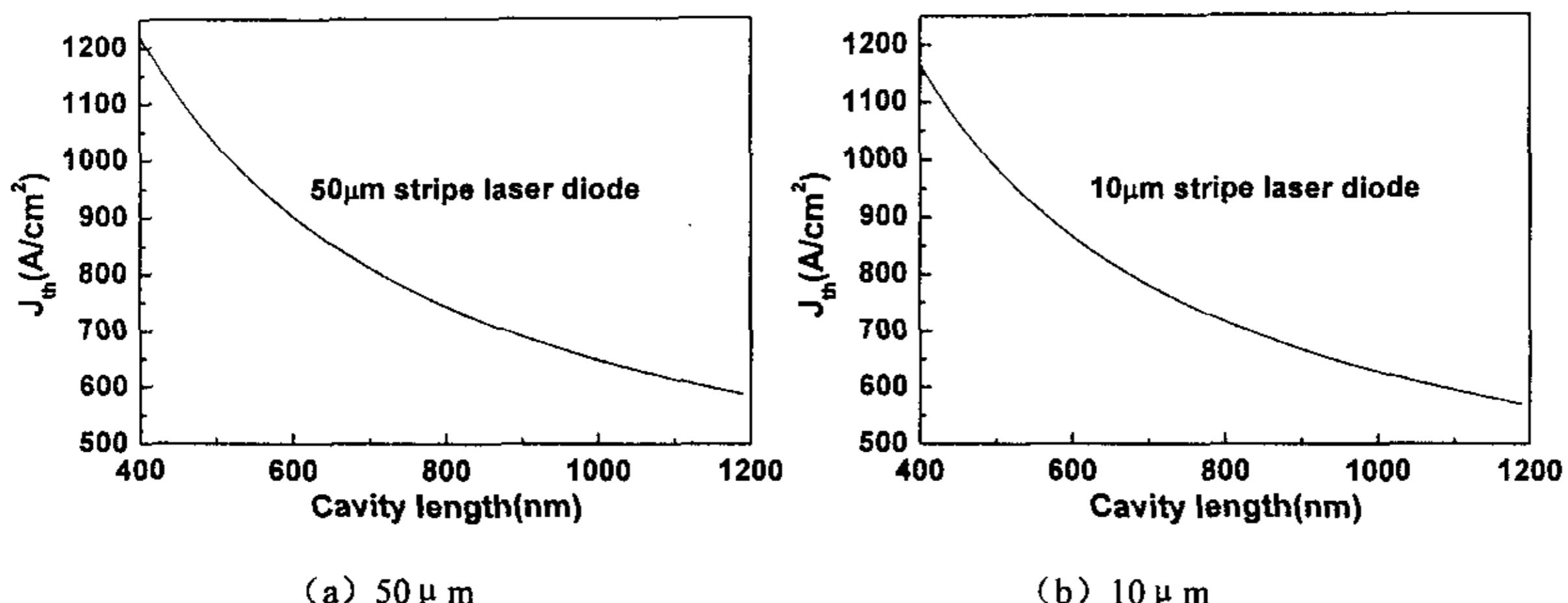


图 5-6 理论计算得到的宽条形和窄条形器件的阈值电流密度随腔长的变化。

Fig. 5-6 Threshold current density vs. Cavity length of 50 μ m and 10 μ m stripe laser diodes from theory.

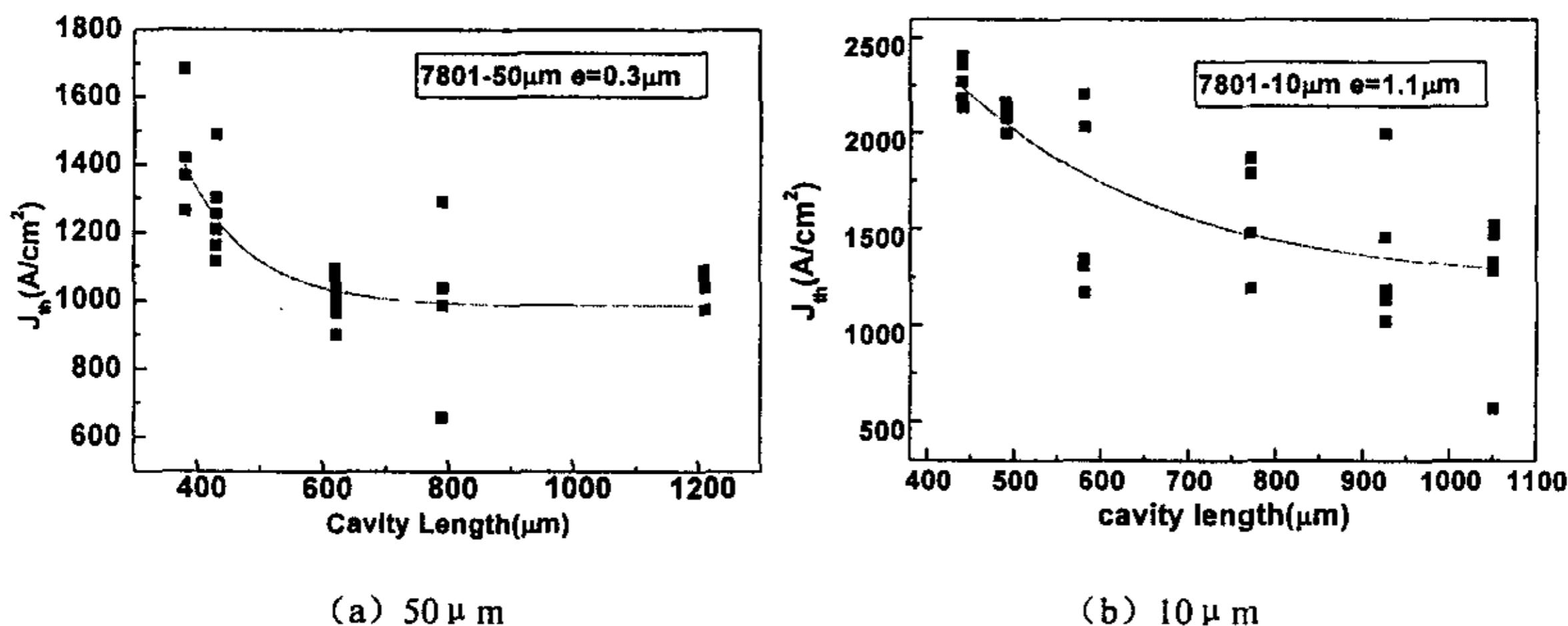


图 5-7 宽条形和窄条形器件的阈值电流密度随腔长的变化。

Fig. 5-7 Threshold current density vs. Cavity length of 50 μ m and 10 μ m stripe laser diodes.

5.1.4 内损耗和内量子效率的分析计算

对 $50\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 条形激光器进行了变腔长试验，得到的外微分量子效率的倒数与腔长的关系如图 5-8 (a) 和 (b) 所示。外微分量子效率是根据试验测得的激光器的斜率效率计算得到的。对图中的数据进行线性拟合，得到 $50\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 器件的内量子效率和内损耗分别为：67% 和 $4.75/\text{cm}$ ；63%， $3.26/\text{cm}$ 。窄条和宽条器件的结果相差不大。器件的内量子效率偏低，原因可能是由于限制层为了得到较好的波导限制，AlGaAs 材料的 Al 组分已经到达间接带隙，使得能带差较小，导致不参加震荡的载流子增加，使辐射复合的内量子效率降低，阈值电流升高，外微分量子效率降低。

总之，通过本小结我们成功制备了光电性能良好的 780nm 激光器，此结构的有源区部分可直接用于双波长激光器，但波导结构则需要根据双波长的条件和隧道结级联再作调整，器件的阈值电流密度也较高，在新的设计中要采用 n 型电流阻挡层或 V 形沟道衬底内条形结构来得到性能良好的器件。

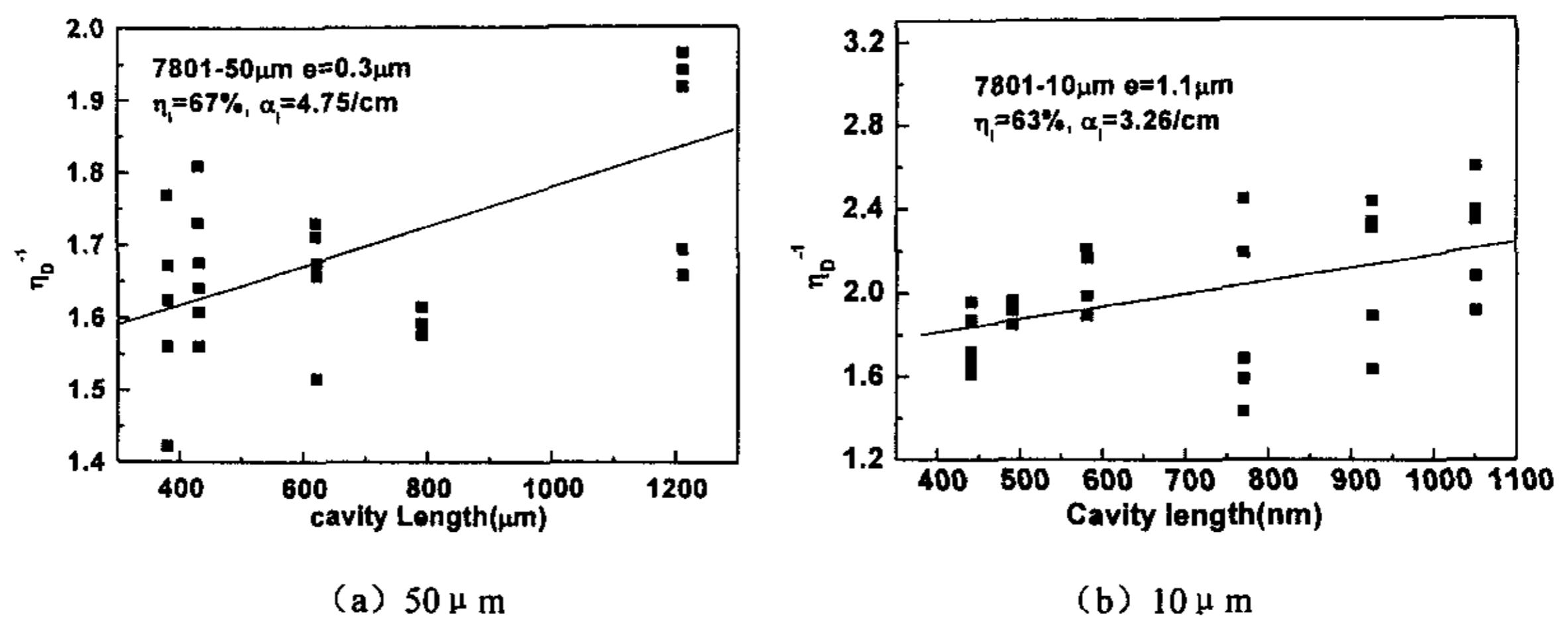


图 5-8 宽条形和窄条形器件的外微分量子效率随腔长的变化。

Fig. 5-8 External differential efficiency vs. cavity length of $50\mu\text{m}$ and $10\mu\text{m}$ stripe laser diodes.

5.2 650nm AlGaInP 应变量子阱激光器的研制

红色激光器是可见光半导体激光器中应用最广的激光器之一，AlGaInP 由于与 GaAs 材料匹配而成为最主要的红光激光器材料，其发射波长从 620nm 至 690nm ，自 1985 年实现室温连续工作以来，AlGaInP / GaAs 激光器经历了从异质结到应变量子阱的发展过程，器件结构也从增益导引结构发展到脊形波导、选择掩埋脊形波导结构、新型窗口结构和选择吸收层结构。实验室器件阈值电流已降低至 10mA 以下，商品化器件的工作电流在 30mA 左右；器件的寿命已达 10^5 小时。

AlGaInP/GaAs 量子阱激光器广泛用于高密度光存储与光读取、条形码扫描、激光打印、激光指示、塑料光纤通讯以及医疗等领域。如引言所述的半导体激光器的一系列优点， 633nm AlGaInP 量子阱激光器因接近 He-Ne 气体激光器波长 632.8nm 而逐步取代了 He-Ne 激光器在激光打印与条形码扫描市场的垄断地位。AlGaInP/GaAs 650nm 左右的激光器主要用于 DVD 播放机与 DVD-ROM 的光学头。条形码扫描与读出是红光激光器的最大市场之一，其所用激光源要求功率限定在人眼安全范围内 (0.5mW)，波长在 610nm — 660nm 左右，体积小、重量轻的 AlGaInP / GaAs 激光器非常适合于这种应用。医疗领域的应用具有很大的市场潜力，高功率与普通 AlGaInP / GaAs 激光器被分别用于激光动态治疗 (PDT) 与外科手术与治疗的激光标识定位，应用波长为 630nm — 680nm 。

随着高速、高密度可读写光驱应用的要求与医疗应用需求，高功率、短波长、高温度稳定工作的 AlGaInP / GaAs 激光器已成为发展方向，2000 年 4 月， 60°C 下， 660nm 波长连续工作功率已超过 100mW ， 650nm 波长连续工作功率可达 50mW ， 60°C 下器件寿命为 10^3 小时。

5.2.1 AlGaInP 激光器的量子阱的设计

为实现 650nm 波长附近的光跃迁，应选用 AlGaInP 材料系。随着组份 x 的增加，与 GaAs 晶格匹配的 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 的禁带宽度线性增加，如图 5-9 所示。对于 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料，根据生长条件的不同，可有有序和无序两种相存在，其直接带隙宽度分别为 1.84eV (有序) 和 1.91eV (无序)。为了向短波长方向拓展波长，我们一般

希望生长无序相。 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 的带隙与 x 的关系为,

$$E_g = 1.91 + 0.61x \quad (5-16a)$$

$$E_g = 2.25 + 0.10x \quad (5-16b)$$

当 x 增加到 0.7 时, $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 由直接带隙向间接带隙转变。

像 AlGaAs 激光器一样, AlGaInP 单量子阱和多量子阱也是采用突变或渐变折射率分别限制异质结构 (SCH)。如果给定限制层和波导层的组分差别, 最佳 SCH 厚度便是限制因子 Γ 达到最大值时的厚度。

由禁带宽度和组分的关系 (图 5-9) 中可见, 为了得到 650nm 附近的跃迁波长, 我们采用 $Ga_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 量子阱结构。图 5-10 给出了 $Ga_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 异质结构的导带底和价带顶的带阶差与组份 x 的关系。对于 Γ 带, 禁带宽度差在导带和价带间的分配为, $\Delta E_c = 0.43\Delta E_g$, $\Delta E_v = 0.57\Delta E_g$, 并且由于 X 带和 Γ 带在 $x=0.7$ 时交叉, ΔE_c 的最大值也只有 0.17eV。这就使得 $Ga_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 对电子的限制作用远比 GaAs/AlGaAs 差, 因此选用四个量子阱的结构作有源区。

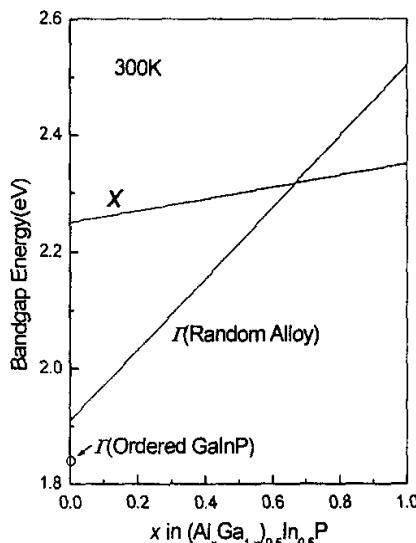


图 5-9 $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 的禁带宽度与组份的关系

Fig. 5-9 Bandgap energy vs. x of $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$

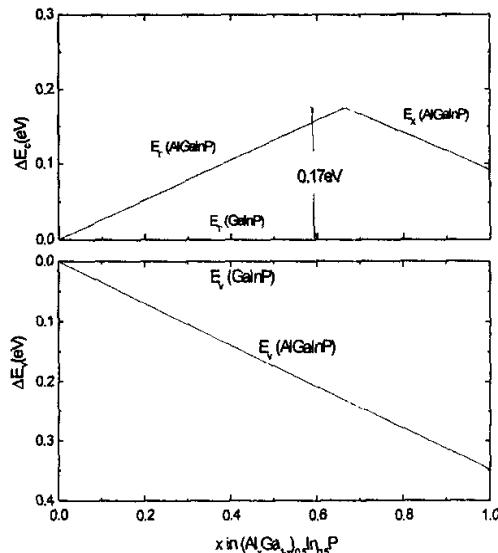


图 5-10 $Ga_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$ 的带阶与组份的关系

Fig. 5-10 ΔE_c and ΔE_v vs. x of $Ga_{0.5}In_{0.5}P/(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$

5.2.2 AlGaInP 激光器件结构与材料生长

AlGaInP 材料系固溶体可表示为 $(Al_xGa_{1-x})_yIn_{1-y}P$, $y=0.5$ 时, 晶格与 GaAs 基本匹配, $0 < x < 0.7$ 时, 材料为直接带隙, 对应的带隙宽度为 1.9—2.3eV。有源区量子阱一般采用 $Ga_yIn_{1-y}P$, $y=0.5$ 时, 生长温度 (700°C) 无应变, 室温下有很小的双轴压应变

(0.1%), 可以认为无应变, $y < 0.5$ 时, $\text{Ga}_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 的晶格常数较大, 所以形成压应变, $y > 0.5$ 时为张应变, 应变引起价带有效态密度的减小, 可以得到更低的阈值电流密度。

高 Al 组分的 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 被用于量子阱激光器的势垒层、波导层及包层以增强对载流子与光的限制。与 AlGaAs 材料系固溶体相比, AlGaInP 材料有较大的带隙, 因此可以获得较短的波长, 但是 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_y\text{In}_{1-y}\text{P}$ 材料的导带差 (band offset) 相对较小, 易造成载流子泄漏, 从而降低激光器的效率与特征温度, 此外, 由于较高的有效态密度, 不易获得高的 p 型掺杂, 非常低的空穴迁移率以及高热阻都给设计与制备低阈值、高效率与高特征温度的 AlGaInP 激光器带来困难。目前普遍采用的技术有多量子阱、应变量子阱、衬底偏离无序生长、选择掩埋脊形波导 (SBR)、p 型 Mg 掺杂、腔面选择生长 GaAs:N 层、多量子垒结构 (选择吸收层), 其中多量子阱结构有利于限制载流子, 增加光限制因子, 量子尺寸效应使波长变短; 应变有利于降低阈值、提高特征温度等, 同时也改变带隙; 衬底由 (100) 偏 (111) 一定角度可以增加带隙能, 提高带隙差, 有利于 p 型重掺杂以及减小与氧有关的深能级等; SBR 可以增强载流子与光的侧向限制; p 型 Mg 掺杂可以使包层有较高的掺杂浓度, 从而提高异质结的势垒, 并降低串联电阻。腔面选择生长 GaAs:N 层可以使无序生长的短波长器件的 COD 功率密度的限制提高; 选择吸收层可以有效降低载流子泄漏。

综合考虑 AlGaInP 材料系的载流子限制, 波导限制, 热特性等因素, 我们首先设计了如表 5-2 所示的一次外延生长的压应变多量子阱有源区结构, 经过多次材料试验和不断改变材料的生长条件和结构, 得到了发射 675nm 波长的红色激光器。衬底材料选用 (100) 偏 (111) 15° 的 GaAs。有源区为 4 个 $\text{GaInP}/(\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 应变量子阱, 阵宽 $5 \mu\text{m}$, 垒宽 $6 \mu\text{m}$ 。为了进一步提高器件的性能, 总共生长了 8 种不同结构的器件基本上是在量子阱的阱、垒的组分和厚度两方面作微小变动, 目的首先是寻找生长条件, 生长出性能良好的器件; 接着调整波长, 尽量使波长接近 650nm。表 5-3 是 V04-V08 结构上的差别和光谱特性比较, PL 波长取强度 90% 时的中值波长, 器件激射波长取 10 只 $8 \mu\text{m}$ 微腐蚀激光器在 20mW 功率时的平均激射波长。图 5-9 是我们生长的 V04、V05、V07、V08 四种器件的光荧光谱结果。

V04 的峰值波长为 657nm, 半宽为 42.3nm , 从光谱特性看, V04 有两个峰值 (650nm 和 667nm), 这说明器件的四个应变量子阱生长的不均匀, 可能是材料组分和厚度不均匀造成的, 实际器件的激射波长为 690nm。

为了使激射波长接近 650nm, 接着生长了 V05 结构。由于 V04 中的限制层 Al 组分 0.75 已经超过了直接带隙和间接带隙的临界组分 (0.7), 因此 V05 把限制层的 Al 组分由 0.75 改为 0.7, 把势垒层的 Al 组分由 0.4 降为 0.3。光谱显示光荧光波长为 650nm, 谱线良好, 半宽为 24nm ; 但作出器件后不激射; 怀疑原因是生长过程机器故障或器件结构的问题。

V06 是 V05 的重复, 结果光谱显示发射 666nm 的光, 器件激射平均波长为 680nm。但器件结果仍然不是很理想, 主要是器件激射后在很小的功率下便烧毁, 稳定性很差, 证实材料结构存在问题, 可能限制层限制的不够。

V07 结构不再过分追求短波长, 只把 V04 中的势垒层的 Al 组分由 0.4 降为 0.3,

结果发射波长在 672nm，器件的稳定性并未有明显好转。

由于 V04 的器件结果较好，因此 V08 重复 V04 结构，希望四个量子阱生长均匀。但从光谱结果看，仍然有双峰出现，但器件稳定性较好，可以在直流条件下输出 20mW 功率，最高功率可达 80mW。

由于时间和经费的限制，最终没有再进一步调整波长。但这个工作将来会继续进行。获得短波长发射的结构调整主要采用的途径有：改变量子阱和垒的厚度；改变阱材料 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ 的组分（压应变时 $y < 0.5$ ；张应变时 $y > 0.5$ ）来得到短波长发射，有报道利用张应变结构， $y = 0.4$ 和 0.38 时分别得到 636nm 的激光波长^[8-11]。

表 5-2 AlGaInP 激光器 (V04) 外延片的生长结构
Table 5-2 structure of AlGaInP laser diode (V04).

导电类型	材料	厚度 (nm)	掺杂浓度
p ⁺	GaAs	130	C: 5E19cm ⁻³
P	GaIrP	50	3E18cm ⁻³
P	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} In _{0.5} P	1100	1E18cm ⁻³
I	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} Ir _{0.5} P	50	
I	Ga _{0.5} In _{0.5} P	6	
I	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} Ir _{0.5} P	6	
I	Ga _{0.5} In _{0.5} P	6	
I	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} Ir _{0.5} P	6	
I	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5	
I	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} In _{0.5} P	6	
I	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5	
N	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} Ir _{0.5} P	50	1E18cm ⁻³
N	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} In _{0.5} P	1100	1E18cm ⁻³
N	GaInF	50	3E18cm ⁻³
n ⁺	GaAs	200	1E18cm ⁻³
n ⁺	GaAs substrate(100)	15degree of ²	

表 5-3 V04, V05, V06, V07, V08 结构和特性比较
Table 5-3 structure and performance comparision of V04,V05,V06,V07,V08.

结构	波导层 Al 组分	势垒层 Al 组分	PL 波长/nm	器件发射波长/nm
V04	0.75	0.4	657	675
V05	0.7	0.3	650	不激射
V06	0.7	0.3	666	681
V07	0.75	0.3	672	687
V08	0.75	0.4	664	688

5.2.3 V04 器件制备和特性分析

采用自对准双沟深腐蚀工艺、脊形自对准工艺制备了条宽分别为 20 μm、8 μm 和 4 μm 的激光器件。测试了器件的光电特性和热特性。

8 μm 微腐蚀器件在直流连续条件下器件输出功率可达 20mW，阈值电流为 100mA。

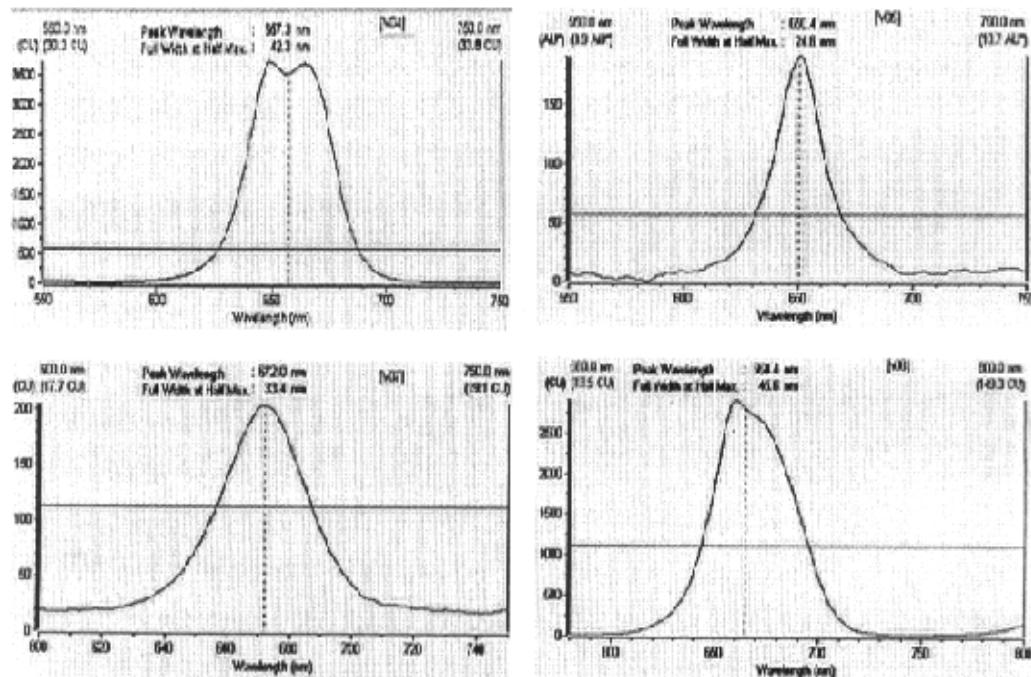


图 5-11 红色激光器 V04、V05、V07、V08 的光荧光谱。

Fig.5-11 Photoluminescence of red laser V04,V05,V07,V08

器件的稳定性较好，激射波长为 675nm。图 5-12 是 8 μm 器件的光电特性。在 20% 占空比脉冲测试条件下的激射波长为 675nm，在直流条件下的激射波长为 678.2nm，有热效应引起的波长红移为 3.2nm。4 μm 窄条形器件的阈值电流降为 64mA，功率可达到 15mW，但稳定性较差。

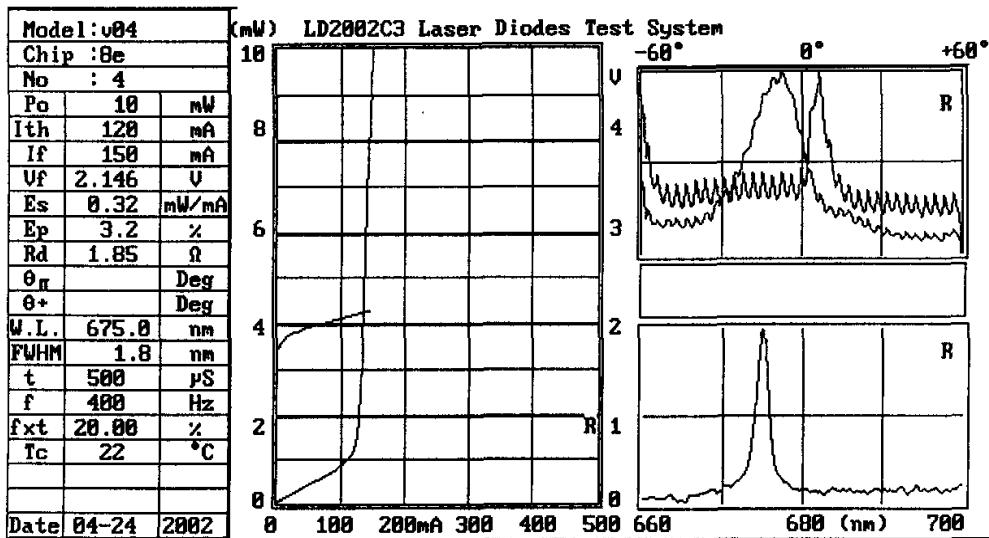
图 5-12 8 μm 微腐蚀条形激光器的光电特性(V04)Fig. 5-12 The optical-electrical characteristics of 8 μm stripe red laser diode of V04

图 5—13 为 $20\mu\text{m}$ 微腐蚀器件的光电特性。从图中可以看出在脉冲条件下器件功率可达到 100mW , 阈值为 162mA , 斜率效率为 0.52W/A 。 $20\mu\text{m}$ 深腐蚀器件的阈值比微腐蚀器件略有下降, 但器件的特性比微腐蚀器件差, AlGaInP 材料深腐蚀后的氧化使器件特性和可靠性降低。

通过对不同腔长的 $8\mu\text{m}$ 条形激光器的 P-I-V 特性进行测量, 得到了图 5—14 (a) 和 (b) 所示的阈值电流与腔长的关系和外微分量子效率的倒数和腔长的关系。对测试结果进行计算可以得到激光器的内量子效率为 45% , 内损耗为 $4.27/\text{cm}$ 。从损耗和量子效率来看, 器件的内部结构仍需进一步优化。

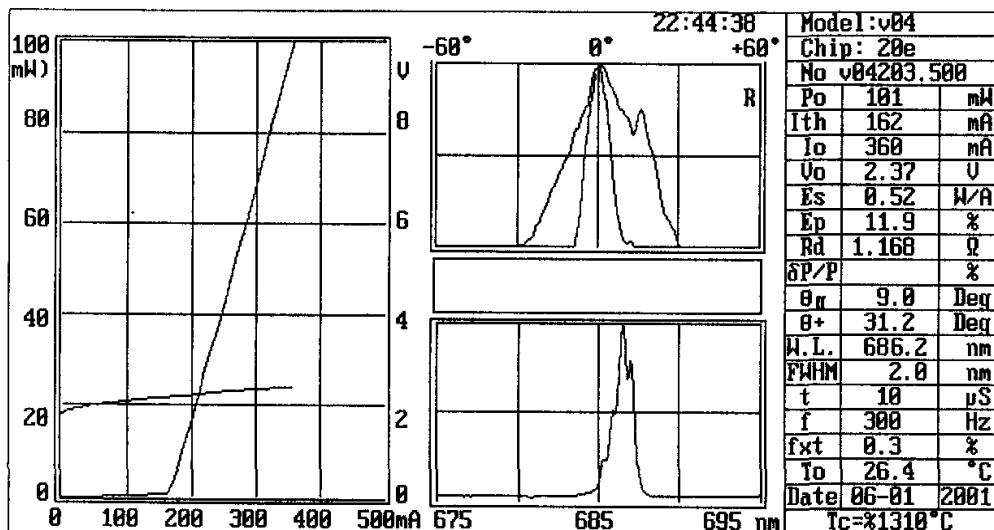


图 5—13 $20\mu\text{m}$ 微腐蚀条形激光器的光电特性

Fig. 5-13 The optical-electrical characteristics of $20\mu\text{m}$ stripe red laser diode

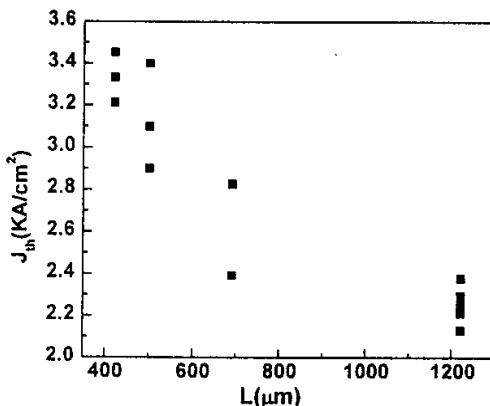


图 5-14 (a) 腔长与阈值电流密度的关系

Fig.5-14 (a) Cavity length vs. Threshold current density.

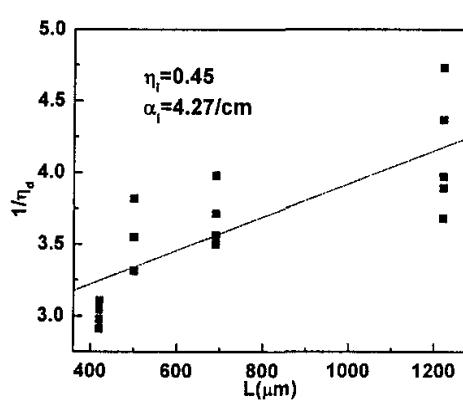


图 5-14 (b) 腔长与外微分量子效率的关系

Fig.5-14 (b) Cavity length vs. External Quantum Efficiency.

5.2.4 V06, V07, V08 的器件特性

图 5-15 是 V06 结构、 $8 \mu\text{m}$ 微腐蚀条形激光器的光电特性。从图中可以看出，激光器的激射波长为 681.6nm ，输出功率可达 20mW ，斜率效率为 0.7W/A ，光电转换效率较高。对多支器件的测试结果比较，器件的平均激射波长为 681nm ，输出功率最高时达 30mW ，但器件的稳定性不好，只能在很小的脉冲条件下工作，原因是小的势垒层铝组分使得带阶变小，结果导致载流子限制变弱。

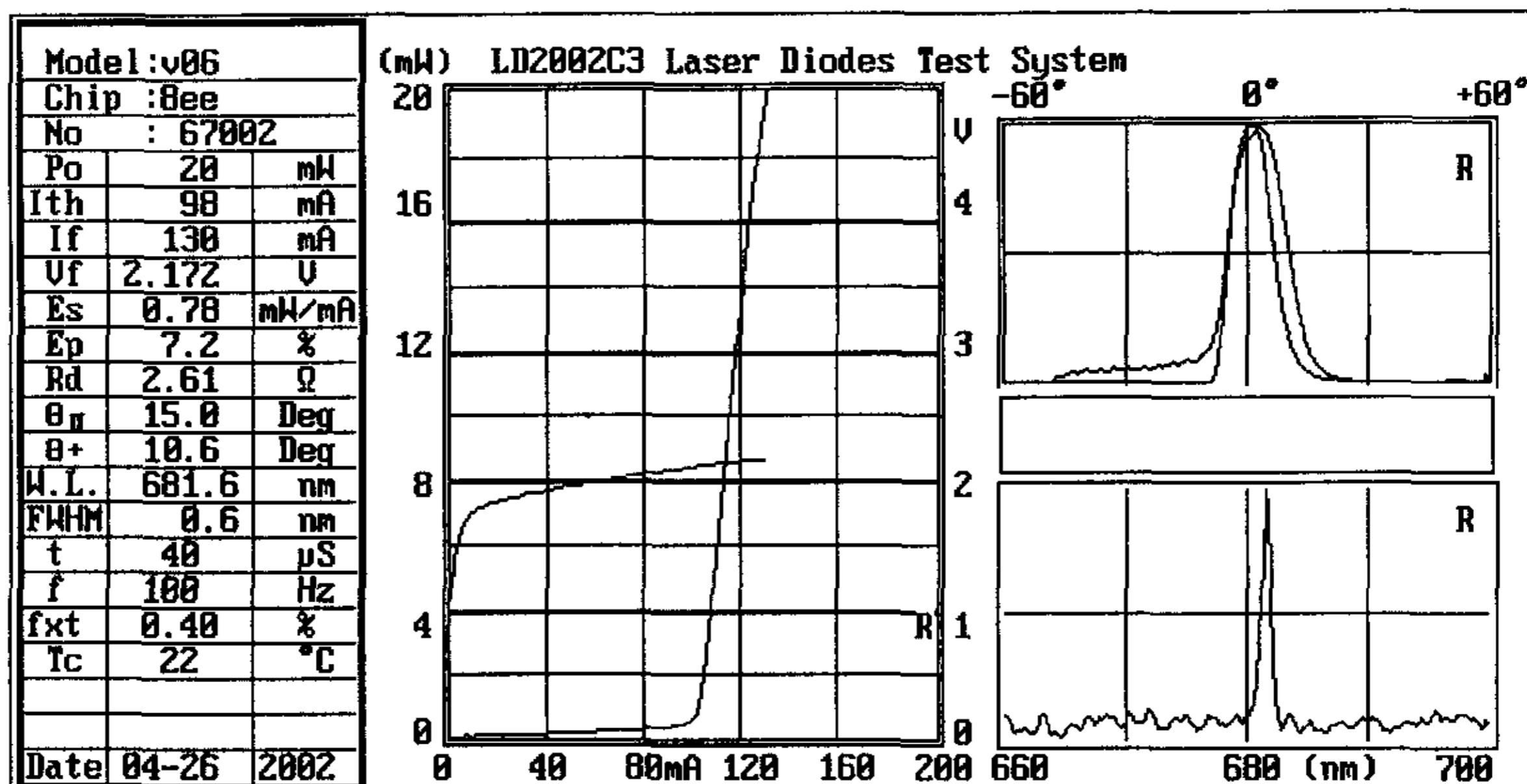


图 5-15 V06 结构激光器的光电特性测试结果。

Fig.5-15 P-I-V, FFP, Specturm of V06 laser diode.

图 5-16 是 V07 结构、 $8 \mu\text{m}$ 微腐蚀条形激光器的光电特性。从图中可以看出，激光器的激射波长为 688nm ，输出功率可达 20mW ，斜率效率为 0.42W/A ，但从 p-I 特性可以看出，在功率达到 10mW 时曲线出现扭转，斜率效率开始下降，说明器件热特性和稳定性很差。 $20 \mu\text{m}$ 宽条形器件的结果显示器件的输出功率仍然只能达到 20mW ，且只能在脉冲条件下工作。原因是小的势垒层铝组分使得带阶变小，导致载流子限制不够。

V08 器件的光电特性明显优于于 V06,V07，基本与 V04 接近。在测试过程中发现，对于 $8\mu\text{m}$ 窄条形器件，脉冲条件下 10mW 和 20mW 输出时的激射波长几乎没多大差别，平均波长均为 687nm ，这说明器件的温升差别很小，直流输出 10mW 时平均输出波长仍为 687nm 。 $20 \mu\text{m}$ 宽条形器件的输出波长则在直流和脉冲条件下差别较大， 20mW 输出功率时，直流条件下的激射波长为 693.3nm ，占空比为 10% 时的脉冲测试激射波长为 688nm ，波长红移 5.3nm ，可见直流条件下 AlGaInP 材料系的热温升显著增加。实际上对于应用最关心的是器件的波长，阈值电流，工作电流，输出功率，特征温度，远场发散角，象散等。那么对于 650 类激光器，由于对象散和发散角以及阈值的要求，通常都选用窄条形器件 ($2-4 \mu\text{m}$)。但由于我们目前光刻设备的限制，我们只能做到 $4-8 \mu\text{m}$ 的尺寸。

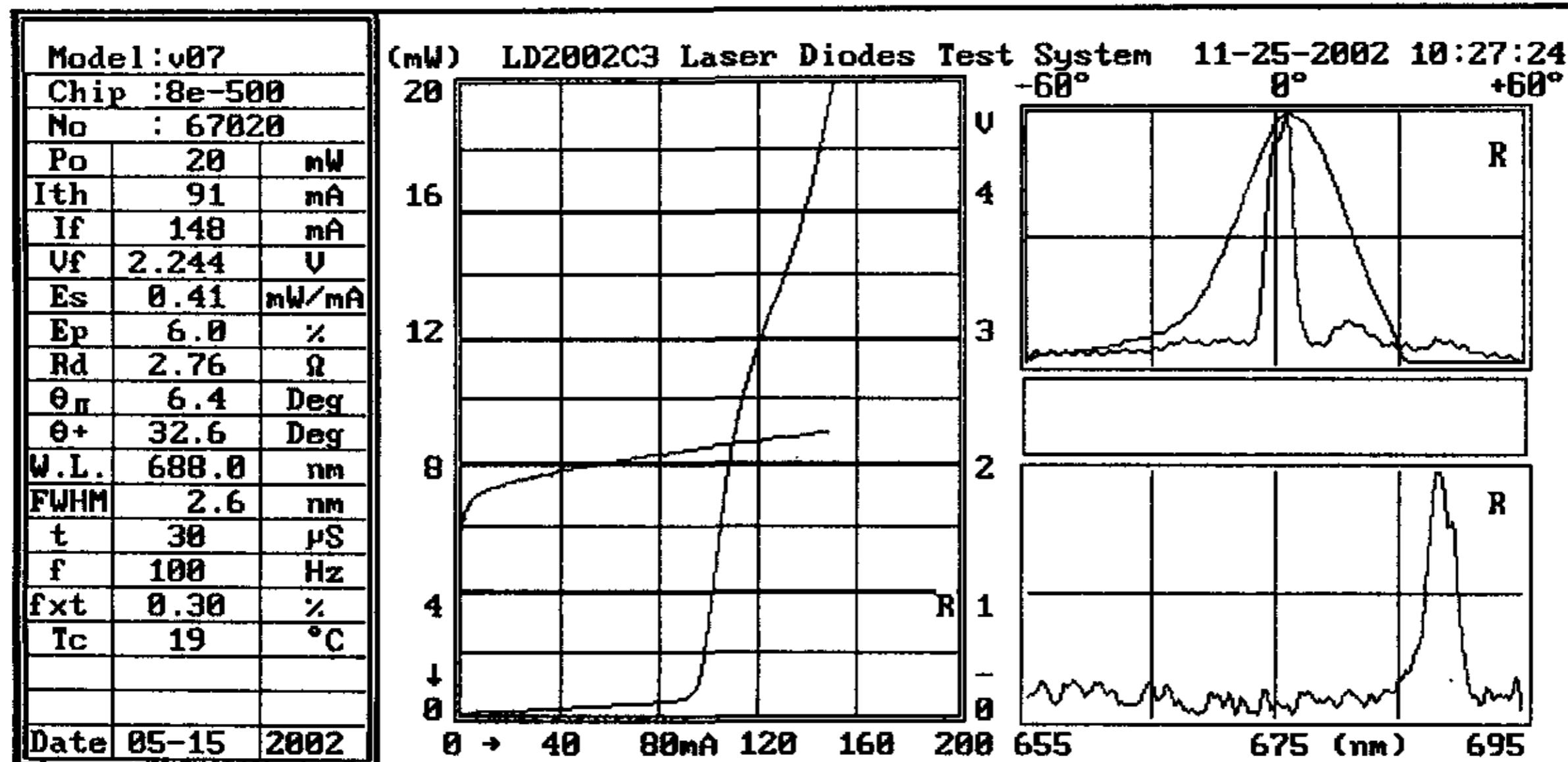


图 5-16 V07 结构激光器的光电特性测试结果。

Fig.5-16 P-I-V, FFP, Specturm of V07 laser diode.

图 5-17(a) 是 V08 结构的 $8 \mu\text{m}$ 微腐蚀脊形器件在直流条件下的光电特性。10mW 功率下的激射波长为 686nm，半宽 1nm；平行和垂直发散角分别为 6.6 度和 33.6 度。阈值电流为 90mA，斜率效率为 0.8W/A。器件连续几次重复直流测试性能良好。图 5-17 (b) 是 V08 结构的 $20 \mu\text{m}$ 微腐蚀脊形器件在直流条件下的光电特性。输出功率可达 20mW，阈值电流为 154mA。器件的特性良好。图 5-17 (c) 是 V08 结构的 $20 \mu\text{m}$ 微腐蚀脊形器件输出功率高达 80mW 时的输出特性。从图 (b) 和 (c) 可以看出，直流条件下的阈值电流和斜率效率都比脉冲条件下的低。同时，从波长来看，直流下输出 10mW 功率时的波长为 686nm，直流下输出 20mW 功率时的波长为 691.8nm，而 1% 脉冲条件下输出 80mW 光功率时的波长为 688.4nm。从温度升高波长红移的因素来看，显然脉冲条件下高功率输出引起的温升介于直流下 10 和 20mW 功率引起的温升之间。

5.2.5 AlGaInP 器件的热特性和可靠性

采用 AlGaInP 材料系制备的红色激光器在温度大于 75°C 时由于自脉动现象 P-I 特性易出现扭折，且由于载流子限制比 AlGaAs 材料差导致的高阈值电流密度，使得与 InGaAs/AlGaAs 激光器相比，它的热特性更引人关注^[12]。高的特征温度值意味着较强的载流子限制，这时热能不足以引起大量的载流子散射越过势垒。同时高的特征温度值也意味着较弱的非辐射复合，这是一个温度敏感的载流子损耗^[13-14]。理论计算显示波导限制层的 Al 组分越大，特征温度值越高，阈值电流密度越低，最佳组分为 0.7^[12]。通常 AlGaInP 激光器的特征温度为 80—140K，但 222K 的特征温度也有报道。与 InGaAs/AlGaAs 材料不同的是，AlGaInP 激光器的阈值电流密度与温度的关系并非简单的指数关系，所以通常有两个特征温度，在温度较低时的特征温度较高，而在温度较高时的特征温度较低。这个温度的转折点通常为 $20 \leq T_b \leq 80^\circ\text{C}$ 。造成双特征温度的原因是电子势垒漏电流的突然增加强烈依赖于温度^[15]。与 AlGaAs 激光器一样，直流

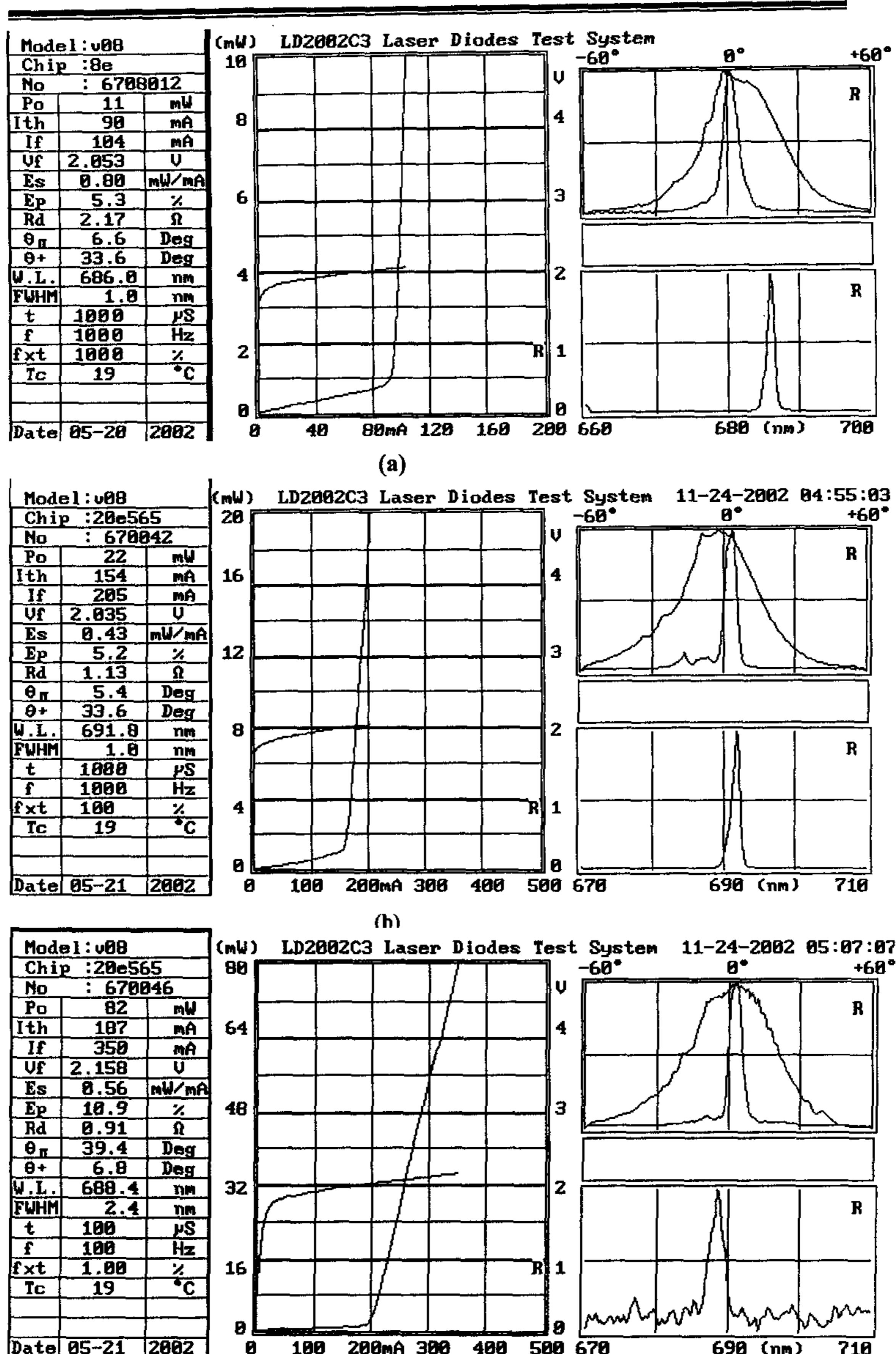


图 5-17 V08 结激光器的光电特性。 (a) 直流, 10mW; (b) 直流, 20mW; (c) 脉冲, 80mW

Fig.5-17 P-I-V, FFP, Specturm of V08 laser diode. (a) 10mW at DC, (b) 20mW at DC,(c) 80mW at pulse

条件下 AlGaInP 激光器的特征温度要低于脉冲条件下的特征温度，这是由于阈值电流较高、热导率较低导致的在直流下相对较高的结温升引起的。

图 5-18 (a) 是腔长为 $610\text{ }\mu\text{m}$ 的 $4\text{ }\mu\text{m}$ 微腐蚀器件在不同占空比下阈值电流密度随温度的变化，由于选取的温度范围为 $30-70^\circ\text{C}$ ，所以在此温度段内用指数关系来模拟特征温度，得到在不同占空比下的特征温度。显然，特征温度随占空比的变化非常显著。占空比为 0.2% 时的特征温度为 270K ，而在 4% 时降为 138K ，但我们看到特征温度在占空比为 2% 和 4% 时的变化不大。通常特征温度的测量要求在小占空比 ($\leq 1\%$) 下进行，以保证真正反映温度对阈值的影响。参考文献报道的特征温度时要参考其测试条件。

图 5-18 (b) 是不同腔长的微腐蚀 $4\text{ }\mu\text{m}$ 条形激光器的阈值电流密度随温度的变化。从图中可以看出，AlGaInP 激光器的特征温度与腔长的关系并非 GaAs 激光器那样随腔长增加而增大。这是因为由载流子限制效应温度敏感主宰的 AlGaInP 激光器，俄歇复合的影响不显著甚至可以忽略，主要原因是基态带隙比价带自旋分裂能级大^[16]。对于 GaAs 激光器，由于在高温下或短腔长时俄歇复合较严重，此时的阈值载流子浓度较高，导致 GaAs 激光器的特征温度强烈地依赖于腔长。与我们的测试结果一致，文献也报道了在 AlGaInP 激光器中并无此现象^[17]。

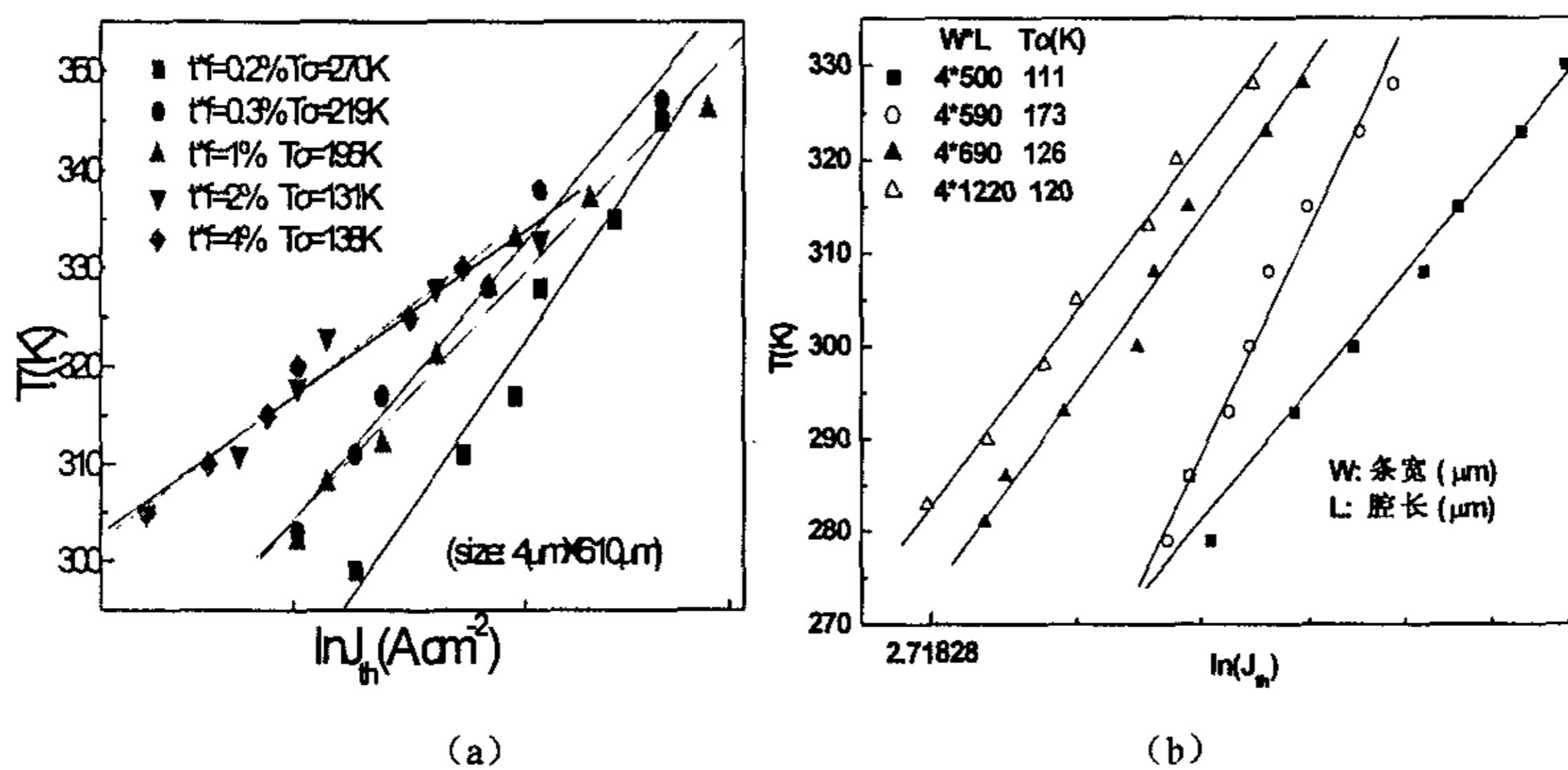


图 5-18 $4\text{ }\mu\text{m}$ AlGaInP 激光器的阈值电流密度与温度的关系。(a) 不同占空比下 (b) 不同腔长

Fig.5-18 Threshold current density(j_{th}) vs. temperature(T) of $4\text{ }\mu\text{m}$ stripe AlGaInP laser diode.

(a) at different (b) with different cavity length(L)

由于测试条件的限制，我们未能得到更高占空比条件下 AlGaInP 激光器的阈值电流密度与温度的关系以及特征温度，但从现有的测试结果看，特征温度值与测试脉冲的占空比密切相关，随着占空比的增加，器件的特征温度显著降低，因此在参考文献报道的特征温度时，一定要参照相同的测试条件。

可靠性直接决定器件的应用。AlGaInP 激光器的某些寿命特征与 AlGaAs 激光器类似，如由于含有 Al 的材料在空气中的活性导致的腔面氧化。实际上，发光区的腔

面氧化是导致 AlGaInP 激光器逐步退化的典型模式，其激活能为 0.65eV。影响可靠性的另一重要因素是上面提到的热效应，较差的热导率产生的过热现象将加速 AlGaInP 激光器的退化。当然，腔面灾变性烧毁（COD）也是 AlGaInP 激光器的失效模式之一，目前提高 COD 水平的方式有腔面硫化处理和对有序 GaInP 有源区的选择性无序化处理来增加带隙和降低腔面吸收^[18, 19]。

我们研制的 AlGaInP 激光器的结构有待进一步优化。器件的光学特性如象散和动态特性需要进一步考虑。可以通过二次外延的方法生长 n 型电流阻挡层，增加窗口结构和增加量子势垒结构等来得到性能良好的器件。

本章小结

单波长激光器是隧道级联双波长激光器的基础，因此，要做好 650nm-780 nm 双波长激光器就必须先做好 650nm 及 780nm 的单波长激光器件。本章首先通过计算和分析成功制备了理论与技术较成熟的 AlGaAs/GaAs 材料与器件，得到性能良好的输出波长为 789nm 的激光器。对波长较短、难度较大的 AlGaInP/GaAs 材料系的 650nm 单波长激光器进行了计算分析与实验。采用压应变多量子阱有源区与脊形波导结构初步得了性能较好的 680nm 红光激光器。其中 V04 器件和 V08 器件在未镀膜条件下得到较高输出功率 100mW 和 80mW，在直流条件下均可输出 20mW 功率。

参考文献

- [1] Shigeo Yamashita, Shin-ichi Nakatsuka, Kenji Uchida et al, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.27, No.6, 1541-1549(1991)
- [2] Takemasa Tamanuki, Fumio Koyama and kenichi Iga, Japanese Journal of Applied Physics, 30(3), 499-500(1991)
- [3] H.Narui, M.Do, O.Matsuda and Y.Mori, Electronics Letters, 28(13),1282-1283 (1992)
- [4] Mitsuhiro Matsumoto, Kazuaki Sasaki, Masaki Kondo et al, J.Appl.Phys., vol.32, part2, No.5A, L665-L667(1993)
- [5] H.C.Ko, M.W.Cho, J.H.Chang et al, Appl.Phys.A, 68, 467-470(1999)
- [6] Shin ichi, Nakatsuka, Sigeo Yamashita, Kenji Uchida, Japanese Journal of Applied Physics, 30(3), 493-498(1991)
- [7] Kuihiko Isshiki, Takeshi Kamatzato, Akihiro Takami et al, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.26, No.5, 837-842(1990)
- [8] A. Vlster, Van Der Heijden, J.M.M., M.J. Boermans, et al, (1990). Tech.Digest. Conf. On Lasers and Electro-Optics(CLEO 1990), 12
- [9] A. Vlster, C.T. Liedenbaum, Van Der Heijden, et al, (1990). Tech.Digest, 12th IEEE int. Conf. On Semiconductor Lasers, paper C-1
- [10] Chang Hasnain, C.J., Bhat. R. And Koza. M.(1991), Tech.Digest, Conf. on Lasers and Electro-Optics(CLEO 1991), 94
- [11] D. F. Welch., T. Wang and D.R. Scifers(1991), Electron. Lett. 27, 694
- [12] H. Okuda, M. Ishikawa, H. Shiozawa et al, IEEE J.Quantum Electron., (1989)Qe-25,1477
- [13] Zory P.S., Reisinger A.R., Mawst L.J., Costrini G., Zmudzinski C.A., Emanuel M.A.,

Electron. Lett., vol.22, 475(1986)

- [14] Chinn S.R., Zory P.S., and Resinger A.R., IEEE J.Quantum Electr., vol.24, 2191(1988)
- [15] Ishikawa M., Ohba Y, Sugawara H, Yamamoto M et al, Electron. Lett., 1985, 21:1084
- [16] A. Haug, J.Phys. Chem. Solids, 1988, 49:599
- [17] D.P.Bour,N.W. Carlson and G.A. Evans, Electron. Lett., 1989,25:1243
- [18] S.Kamiyama, Y. Mori, Y. Takahashi, K.Ohaka, Appl.Phys. Lett., 58:2595
- [19] Y.Ueno, K.Endo, H.Fujh, K.Kobayashi et al, Electron. Lett., 1990, 26:1727

第六章 650nm、780nm 隧道级联双波长激光器的研制

制备 650nm、780nm 双波长激光器的目的是为了替代目前市场上广泛应用的用于 DVD/VCD 和 CDRW 兼容读写系统的双激光器光头，它的优点是减少系统的光学组件，减小光学头的尺寸、降低集成时间，从而降低总体成本。通过第五章对单波长 AlGaInP 激光器和 AlGaAs 激光器的研制，了解了两种材料和结构激光器的基本特性。本章根据单波长激光器的结构和性能指标，通过理论分析和计算，设计和制备了隧道级联 650—780nm 双波长激光器。

6.1 双激光器光学头在 DVD 中的应用

DVD 的全名原本是 Digital Video Disk，即数字视讯光盘或数字影碟，是利用 MPEG2 的压缩技术来储存影像，希望以更小的体积、更大的储存容量，取代 12 寸的 LD 影碟，有点像是使用 MPEG1 的 Vedio CD 的进级产品。然而看中 DVD 大储存量的电脑界和觊觎它高传真的数位声音的音乐界，对 DVD 亦同样寄予厚望，于是又称 DVD 是 Digital Versatile Disk，是数位多用途的光碟，它集计算机技术、光学记录技术和影视技术等为一体，其目的是为了满足人们对大存储容量、高性能的存储媒体的需求，主要用于存储多媒体软件和影视节目。DVD 光盘的用途之广，可以从已设定的五种规格用途看出，包括：

- [1] DVD-ROM 是电脑资料档唯读光碟，用途类似 CD-ROM；
- [2] DVD-Video 是家用的影音光碟，用途类似 LD 或 Video CD；
- [3] DVD-Audio 是音乐碟片，用途类似音乐 CD；
- [4] DVD-R（或称 DVD-Write-Once）是限录一次的 DVD，用途类似 CD-R；
- [5] DVD-RAM(或称 DVD-Rewritable)是可多次读写的光碟，用途类似 MO。

DVD 具有高密度、高画质、高音质、高兼容性和高可靠性等特点。DVD 盘与 CD 光盘一样，其直径均为 120mm，但 CD 光盘的容量为 680MB，仅能存放 74 分钟动态视频图象，而单面单层 DVD 记录层具有 4.7GB 容量，若以广播级电视图象质量的平均数据率 4.69Mbps 播放，能够存放 133 分 20 秒的电影。双面双层光盘的容量高达 17GB，可以容纳 4 部电影于单张光盘上。这就要求在 DVD 中采用更先进的技术手段来提高信息记录密度，从而增加盘的容量。表 6-1 列出了为提高 DVD 光盘记录密度所采用的与 CD 不同的技术手段。

从表面上看，DVD 盘与 CD/VCD 盘很相似，其直径为 80mm 或 120mm，厚度为 1.2mm。但实质上，两者之间有本质的差别。按单/双面与单/双层结构的各种组合，DVD 可以分为单面单层、单面双层、双面单层和双面双层四种物理结构。CD 的最小凹坑长度为 $0.834\mu\text{m}$ ，道间距为 $1.6\mu\text{m}$ ，采用波长为 $780\sim790\text{nm}$ 的红外激光器读取数据，而 DVD 的最小凹坑长度仅为 $0.4\mu\text{m}$ ，道间距为 $0.74\mu\text{m}$ ，采用波长为 $635\sim650\text{nm}$ 的红外激光器读取数据。单面 DVD 盘可能有一个或两个记录层。与 CD 一样，激光器从盘的下面读取单面盘上的数据。双面 DVD 盘上的数据分别存放在盘的上下两面。有两种方法读取双面盘上的数据：(1)在播放完盘上第一面的节目后，将盘从播放机中取出，翻面后再放入播放机中继续播放第二面上的节目；(2)在播放机中装两个读激光器，分别从盘的上下两面读取数据，或者在播放机中只装一个读激光器，但在读完

盘的第一面后可以自动地跳到盘的另一面继续播放。无论是单层盘还是双层盘都由两片基底组成，每片基底的厚度均为 0.6mm，因此 DVD 盘的厚度为 1.2mm。对于单面盘而言，只有下层基底包含数据，上层基底没有数据；而双面盘的上下两层基底上均有数据。

表 6-1 CD、DVD 技术手段比较

Table 6-1 compare of the

技术手段	CD	DVD
镜数值孔径 NA	0.45	0.6
纠错编码冗余度	31%	15.4%
通道码调制方式	8/17 调制	8/16 调制
激光波长 λ	780nm	650nm/635nm
光斑直径	1.74μm	1.08μm
道间距	1.6μm	0.74μm
凹坑最小长度	0.83μm	0.4μm
凹坑宽度	0.6μm	0.4μm
容量	650MB	4.7GB

目前 DVD 播放机的光头的种类很多，可以分为单激光器方式和双激光器方式两种，而每一种的应用又可细分为：

(1) 单激光器方式

只有一个激光发射器，只能发射 650nm 的激光，故无法兼容 CD-R。单激光器方式有下列形式：

- ◆ 双透镜方式：采用两个焦距不同的透镜，分别用于 DVD 和 CD 系统，透镜必须采用机械方式进行切换。
- ◆ 双焦点透镜方式
- ◆ 全息技术
- ◆ 在透镜上做环状切割
- ◆ 快门方式(孔径控制方式)

(2) 双激光器方式

由于采用了两个激光器，能发射两种不同波长 (650nm 和 780nm)，故能读取 CD-R。

- ◆ 双激光头方式：备有两套激光器和透镜系统，分别用于 CD 和 DVD。
- ◆ 双激光器单光路方式：备有分别适用于 DVD 和 CD 的专用激光器，光路和透镜系统则利用棱镜等实现公用。

由于 DVD 与 CD 规格的差异，光源波长的不同，所以 DVDROM 无法读取 CD，CDROM 无法读取 DVD，但因 DVD 要顾及到向下兼容，所以各家有不同的方法来兼顾 CD 的读取。因为光源波长及碟片厚度的不同，所以激光无法正确地读取片子。分别有以下三种解决方法：

切换双镜头：Toshiba 公司的技术，分别准备 2 个焦距不同的透镜切换，但是激光发射和接受还是共用的，成本适中。

独立双镜头：sony 公司的技术，独立的两组镜头，成本最高，技术含量低，但是兼容性是最好的。

双焦距单镜头：Pioneer 公司技术，同一个镜头，同一组激光接受发射器，利用液晶

快门的技术来达到控制焦距的目的，成本最低，技术含量高，兼容性一般。

尽管目前所有的 DVD 都可以读 CD，但并非都能读 CD-R。因为 CD-R 采用的色层只对目前 CD 系统采用的 780nm 的激光束反射率最大，而对于 DVD 激光头的 650nm 的激光则基本予以吸收而不产生反射，用 DVD 激光器根本无法区分 CD-R 信息凹坑与无纪录面的差别，也就无法读取 CD-R 碟片。Sony 7000 是市场上第一台采用双激光器可以读取 CD-R 碟片的 DVD 播放机。从此，MultiRead 标准被光学存储科技委员会(Optical Storage Technology Association:OSTA)确定下来，并且申明 MultiRead DVD-ROM 驱动器必须能读取 CD-R。目前大多数的第二代 DVD-ROM 驱动器都已包括一个 780nm 的激光头。

从市场要求和发展来看，双波长激光器是 DVD 光头的必然选择^[1]。而双激光器单光路方式是目前最先进的 DVD 系统，但由于双激光器通过后工艺集成在一起，因此精确定位的精度很难控制，而新型隧道级联双波长激光器是通过隧道级联结构在外延伸生长时把两个激光器连接在一起，可以精确地排列两个激光器的间距，从而提高成品率和降低系统成本。

6.2 650nm、780nm 激光器的光波导设计

新型隧道级联多波长半导体激光器是通过隧道结将多个不同的子激光器级联起来，为了使各子激光器按各自的波长激射，必须减少子激光器间的相互影响，避免相互之间的耦合，这就需要确定出各有源区间的最小间隔距离，即光场限制层的最小厚度。我们知道，导波模式在光限制层中是以指数形式衰减的，即，

$$E \propto \exp(-|x|/L_d) \quad (6-1)$$

其中 L_d 称为消失长度。光波在全内反射的情况下，反射光线和入射光线的交点不在实际界面上，而是进入光疏介质内。也就是说，在光疏介质内有一假想界面，反射光线和入射光线的交点在这个假象界面上。因此，在实际界面上，反射光线相对于入射光线向前移动一段距离 Z ，这就是古斯-汉欣位移。上述实际界面和假象界面间的距离等于表面波的消失长度。我们以五倍的光场消失长度作为确定隧道级联双波长激光器的光场限制层最小厚度的判据。

6.2.1 780nm 激光器的光波导

新型隧道级联激光器中选用的 780nm 激光器的光波导结构如表 6-2 所示。模拟得到的近场和远场分布如图 6-1 所示，计算得到的光场在光限制层中的衰减长度为 163nm。因此光场限制层的最小厚度为 815nm。在实际的双波长器件中，考虑到隧道结的吸收、上下有源区间的波导耦合，波导限制层的厚度选为 1.5μm。

表 6-2 780nm 激光器波导结构

Table 6-2 Waveguide structure of 780nm laser diode

导电类型	材料	层厚
P	Al _{0.8} Ga _{0.2} As	1.5 μm
i	Al _{0.4} Ga _{0.5} As	100nm
i	Al _{0.1} Ga _{0.9} As	10nm
i	Al _{0.4} Ga _{0.5} As	100nm
N	Al _{0.8} Ga _{0.2} As	1.5 μm

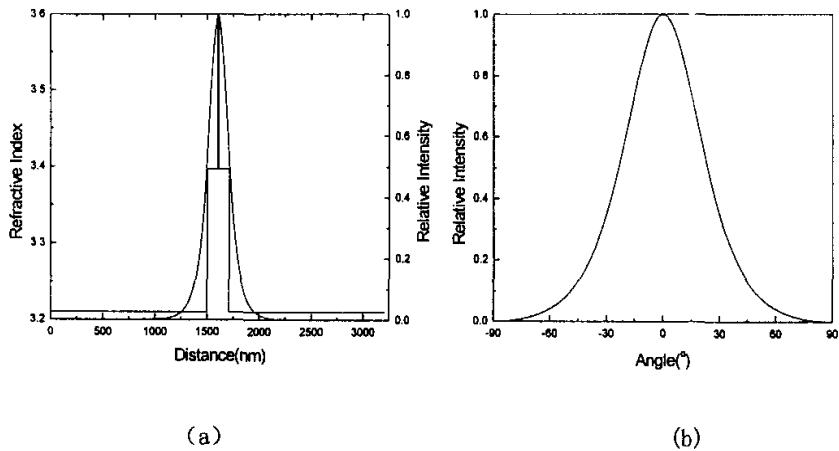


图 6-1 780nm 激光器的 (a) 近场分布 (b) 远场分布
Fig. 6-1 For 780nm Laser diode (a) Near-Field spectrum (b) Far-Field Spectrum

6. 2. 2 650nm 激光器的光波导计算

650nm 激光器的光波导结构如表 6-3 所示, 由于 $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 与 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 的导带带阶差小, 对电子的限制作用小, 因此我们采用了有四个量子阱的多阱结构作有源区。图 6-2 给出了模拟得到的 650nm 激光器的近场和远场分布, 在 $(\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 光限制层中, 光场的消失长度为 143nm。由此得到限制层的最小间距为 715nm。实际在设计双波长激光器时, 考虑到隧道结的影响和上下有源区的相互影响, 最后波导层和电流限制层的累计厚度选为 1.1μm。

表 6-3 650nm 激光器波导结构

Table 6-3 Waveguide structure of 650nm laser diode

导电类型	材料	层厚
P	(Al _{0.7} Ga _{0.3}) _{0.5} In _{0.5} P	1100nm
i	(Al _{0.3} Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	70nm
i	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5nm
i	(Al _{0.1} Ga _{0.9}) _{0.2} In _{0.8} P	6nm
i	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5nm
i	(Al _{0.5} Ga _{0.5}) _{0.5} In _{0.5} P	6nm
i	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5nm
i	(Al _{0.2} Ga _{0.8}) _{0.5} In _{0.5} P	6nm
i	Ga _{0.5} In _{0.5} P	5nm
i	(Al _{0.3} Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	70nm
N	(Al _{0.75} Ga _{0.25}) _{0.5} In _{0.5} P	1100nm

6.3 双波长器件结构设计和材料生长

650nm-780nm 间双波长半导体激光器的外延生长结构如表 6-4 所示。650nm

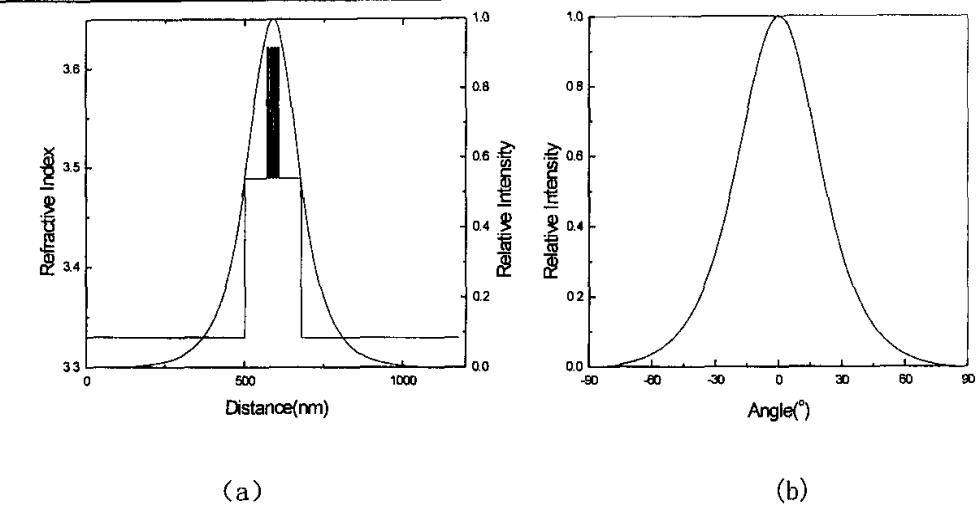


图 6-2 650nm 激光器的 (a) 近场和(b)远场分布
Fig. 6-2 For 650nm laser diode (a) near field spectrum (b) Far field spectrum

AlGaInP 结构生长于 780nm AlGaAs 激光器的上面，这一方面考虑由于 AlGaAs 材料的生长温度为 730°C，AlGaInP 量子阱的生长温度为 700°C，这种结构设计可以避免第二个有源区过温度带来的有害影响；另一方面，从第五章中可以看到 AlGaInP 激光器的阈值电流密度要高于 AlGaAs 激光器，考虑到隧道结的电流扩展效应，阈值电流密度小的器件应放在下面以保证上面激光器激射时下面也能激射^[2-8]。如果阈值电流小的器件在上面，则上面的器件功率很大时下面的器件有可能还未达到激射条件，结果是造成上面的器件功率过大而烧毁，无法得到双波长同时激射。

器件是在(100)偏(111)晶向 15° 的 n 型 GaAs 衬底上，进行各层的外延生长。对于 780nm 附近的子激光器，有源区采用非掺杂的 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 量子阱结构，波导层厚度为 210nm，量子阱宽 10nm，光限制层是 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 材料，其中 n 型用 Si 作为掺杂剂，p 型用 C 作掺杂剂，掺杂浓度都是 10^{18}cm^{-3} 。对于 650nm 附近的子激光器，有源区采用非掺杂的 $(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}/\text{GaInP}/(\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 四量子阱结构，量子阱宽 5nm，光限制层是 $(\text{Al}_{0.75}\text{Ga}_{0.25})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ 材料，其中 n 型用 Si 掺杂，p 型用 Mg 掺杂，掺杂浓度也都是 10^{18}cm^{-3} 。两个有源区通过 GaAs 隧道结进行带间级联，隧道结的 p 区的厚度为 12nm、掺杂浓度 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ，n 区的厚度为 180nm，掺杂浓度为 $4\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。器件的最顶层是 150nm 的 p 型 C 掺杂 GaAs 帽层，掺杂浓度为 $5\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 。具体生长条件为，反应室压力 80mbar，电机转速 1000 转/分，隧道结处的生长温度 600°C，780nm 激光器的生长温度 730 °C，650nm 附近激光器的生长温度为 700 °C。用 H₂ 作载气，AsH₃ 作为 As 源，PH₃ 作为 P 源，TMGa、TMAI 和 TMIn 分别作为 Ga、Al 和 In 源，CCl₄ 作为 p 型 C 掺杂剂，Cp₂Mg 作为 p 型 Mg 掺杂剂，Si₂H₆ 作为隧道结的 n 型掺杂剂，其它 n 型区域用 SiH₄ 作为掺杂剂。生长隧道结的 p 区时的 V/III 为 20，其它区生长时的 V/III 大于 100。

对 650-780nm 双波长半导体激光器外延生长材料的解理面作了 SEM 分析（图 6-3）。从图中我们清晰的可以看到 GaAs 衬底上的过渡层，接着是 650nm 激光器的下限制层和波导层，AlGaInP 量子阱和上波导层和限制层，以及 50nm 的 GaInP 腐蚀停层。接着是隧道结，隧道结上面是 780nm 激光器的下波导层，量子阱和上波导层。可以看出，各光限制层、量子阱层以及隧道结都生长得非常平整。厚度显示与设计的

厚度一致。

表 6-4 650nm-780nm 双波长半导体激光器结构
Table 6-4 Structure of 650-780nm dual-wavelength laser diodes

导电类型	材料	宽度(μm)	掺杂浓度
P	GaAs(C)	0.15	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
P	Ga _{0.5} In _{0.5} P(Mg)	80nm	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
P	[Al _{0.7} (Ga _{0.7}) _{0.3} In _{0.5}]P(Mg)	1.1	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
i	(Al _x Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	20nm	
i	GaInP	5nm	
i	(Al _x Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	6nm	
i	GaInP	5nm	
i	(Al _x Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	6nm	
i	GaInP	5nm	
i	(Al _x Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	6nm	
i	GaInP	5nm	
i	(Al _x Ga _{0.7}) _{0.5} In _{0.5} P	70nm	
N	(Al _{0.5} Ga _{0.5}) _{0.5} In _{0.5} P(Si)	1.1	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
N	Ga _{0.5} In _{0.5} P(Si)	50nm	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
n ⁺	GaAs	180nm	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
p ⁺	GaAs	12nm	$5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
P	Al _x Ga _{1-x} As	0.1	x:0.8-0.1 C: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
P	Al _{0.8} Ga _{0.2} As	1.5	C: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
i	Al _{0.4} Ga _{0.6} As	100nm	
i	Al _{0.1} Ga _{0.9} As	10nm	
i	Al _{0.4} Ga _{0.6} As	100nm	
N	Al _{0.8} Ga _{0.2} As	1.5	Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
N	Al _x Ga _{1-x} As	0.1	x: 0.1-0.8 Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
n ⁻	GaAs	0.2	Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

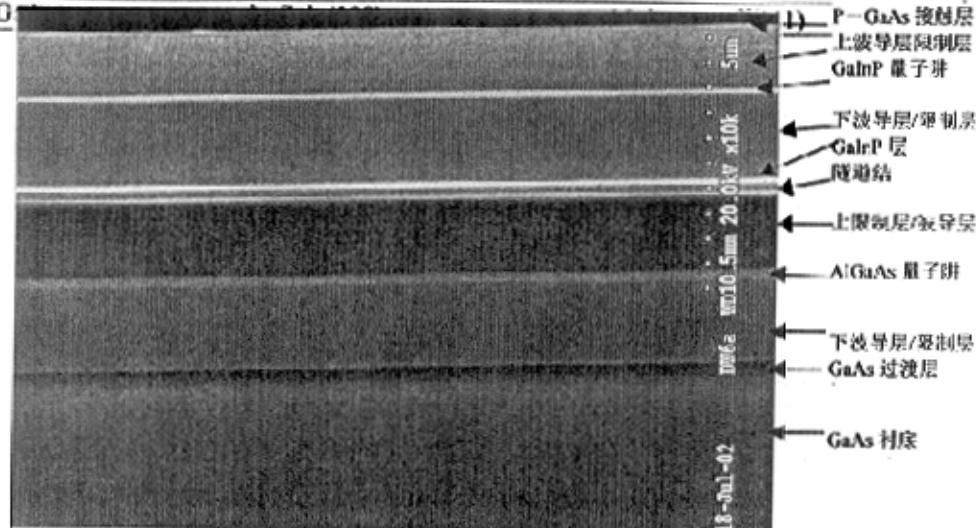


图 6-3 650、780nm 双波长激光器的 SEM 图片
Fig.6-3 SEM photo of 650-780 dual wavelength laser diodes

对于 650、780nm 双波长半导体激光器外延生长材料，通过湿法腐蚀去掉帽层，测量了 GaInP 量子阱有源区的 PL 谱，再腐蚀过隧道结测量 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 量子阱有源区的 PL 谱，结果如图 6-4 (a) 和 (b) 所示。其中 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 量子阱有源区的 PL 谱峰值波长为 779nm，而 GaInP 量子阱有源区的 PL 谱峰值波长为 688nm，大于 650nm，这是由于在生长时我们有意使 In 的含量稍微偏多，以有利于器件的激射，位于 661nm 处的峰值波长是由导带量子能级到价带轻空穴量子能级的跃迁引起的。

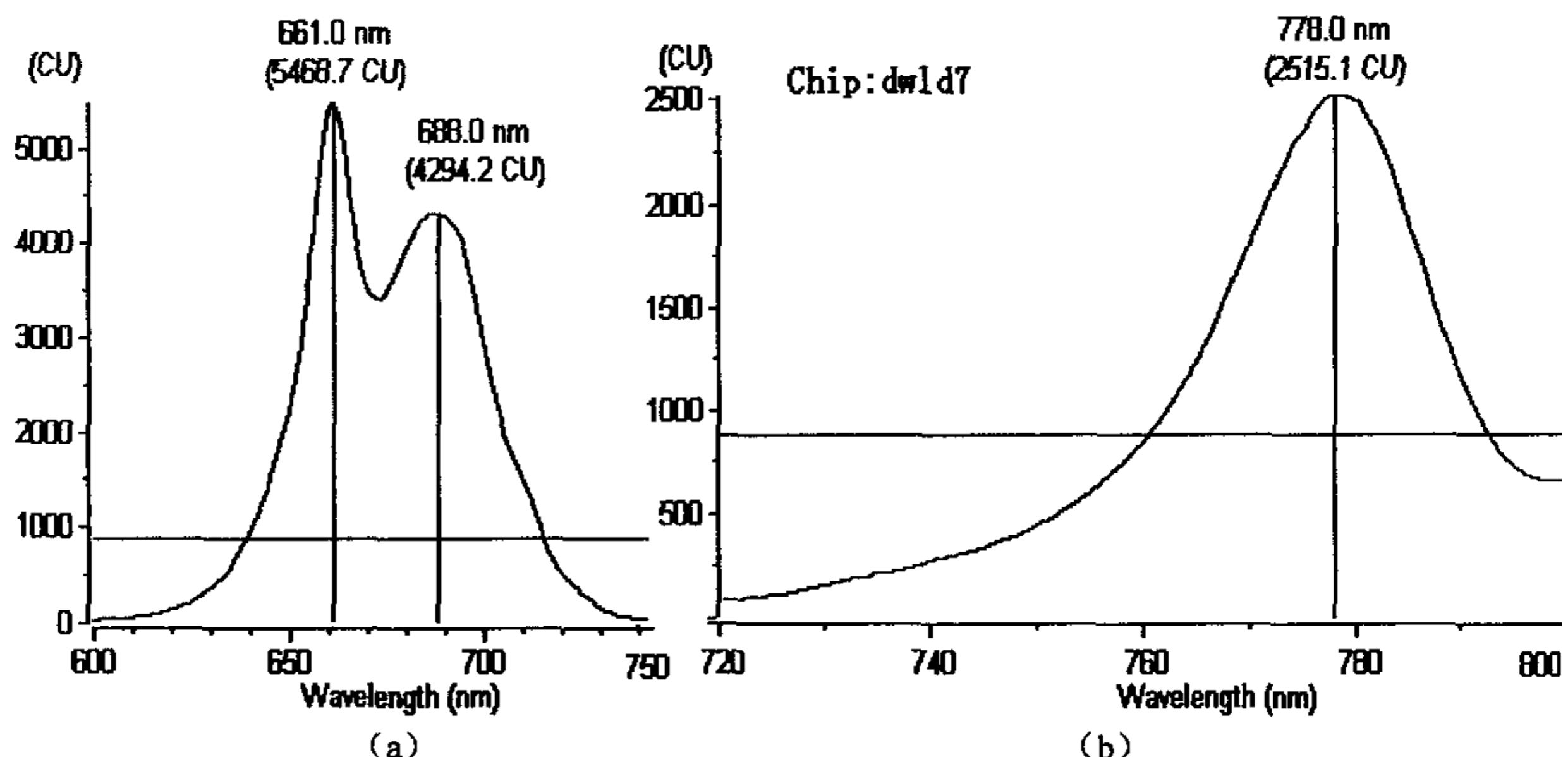


图 6-4 650—780nm 隧道级联结构的量子阱的 PL 谱测试结果。(a) 650nm (b) 780nm

Fig 6-4 Photoluminescence in quantum well of 650-780 dual-wavelength laser diodes.

(a) 650nm (b) 780nm

6.4 650-780nm 双波长激光器的特性

6.4.1 650-780nm 双波长同时激射激光器的特性

器件结构的外延生长结束后，与 950-990nm 双波长半导体激光器的制备工艺基本相同，制备了 650-780nm 间的双波长同时激射的半导体激光器的台面结构，p 面电极的条宽为 30μm。为了抑制电流的横向扩展，台面腐蚀经过隧道结后（约 3μm），继续向下腐蚀约 1μm。

图 6-5 是双波长器件在未镀膜时的光电特性测试结果。图(a)是采用测试波长为 690nm 时得到的 P-I-V，远场和光谱分布图，图(b)是采用测试波长为 780nm 时得到的 P-I-V，远场和光谱分布图。从图中可以看出，器件的阈值电流为 178mA。器件有两个激射波长分别为 699nm 和 795nm，相差 96nm，考虑到自由载流子和温度效应引起有源区禁带宽度的变窄，与 PL 谱的测试结果基本相一致。图 (a) 和 (b) 中的斜率效率的差别是由于测试仪器在计算光功率时与波长有关的参数设定，在用 650nm 波长测量的结果中输出功率比实际值大，而用 780nm 波长测量的输出功率比实际值小。器件的远场特性显示水平方向发散角为 8 度，垂直方向的发散角为 44 度，且垂直方向的远场为单瓣，表明两个有源区的波导并没有发生耦合，各自分别激射，且在垂直方向都为基模。由于测量是在 0.2% 占空比下进行的，造成远场图形曲线不

够光滑。

实际上，对双波长同时激射的 650—780nm 激光器在直流和不同占空比下，不同输出功率下的测试发现，在直流条件下，10mW 时可以测得两个激射波长，但在 20mW 时只能测得 790nm 的发射波长，说明 AlGaInP 激光器已经退化，这种退化有时是器件不激射，但结电压正常；但有时器件突然烧毁。造成直流下器件特性不好的原因是深腐蚀后，AlGaInP 器件的侧面完全暴露，大面积暴露带来的界面氧化和沾污是造成器件退化的直接原因。但此类器件有时 P—I 特性出现折线（如图 6—6 所示），这一方面可能是双波长器件的阈值不同造成某个器件激射延迟；或者是由于深腐蚀工艺和 AlGaInP 激光器本身的限制不好引起的。器件的远场显示仍为基模激射。

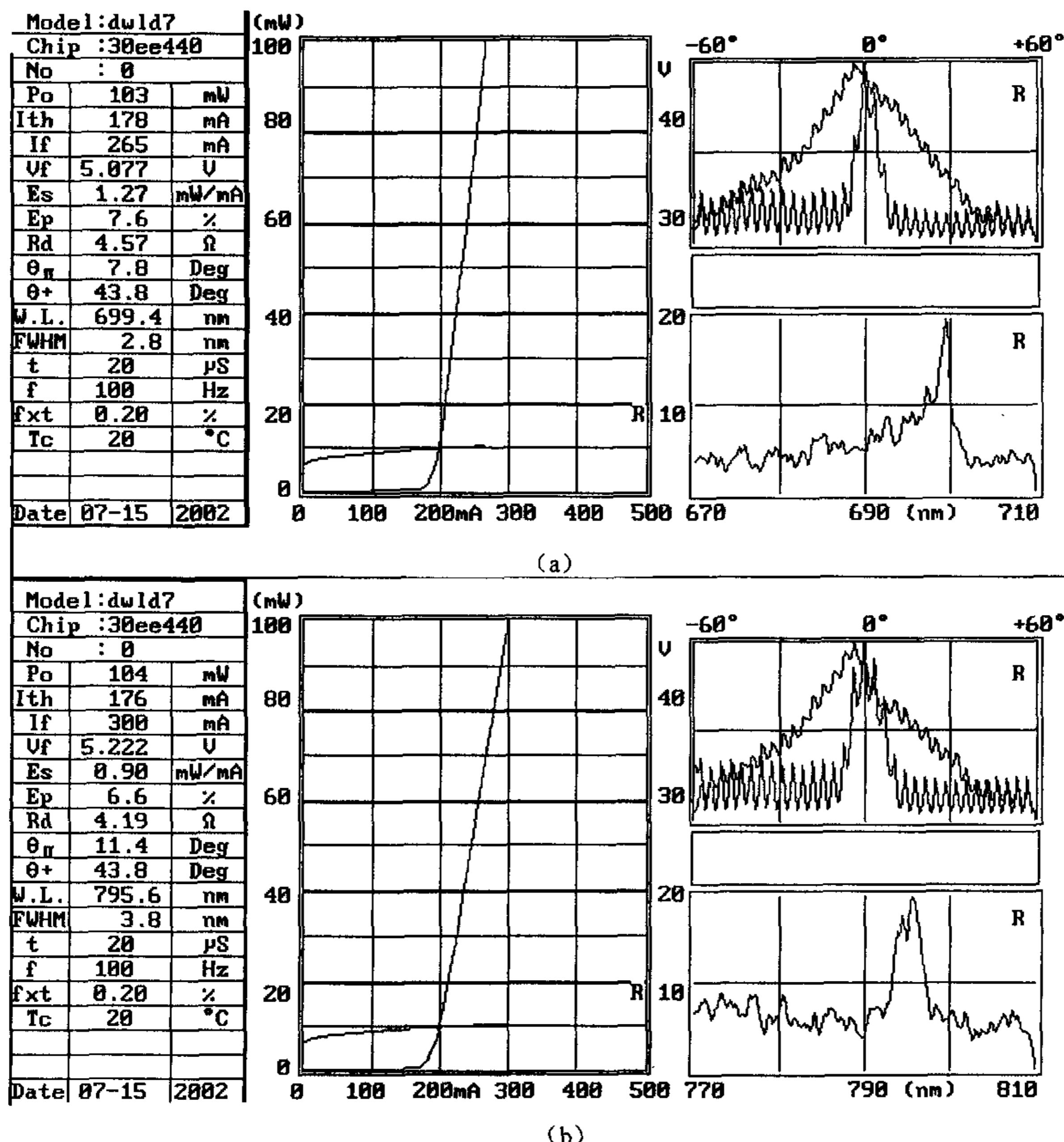


图 6-5 双波长激光器的光电特性测试结果 (100mW)。(a) 650nm (b) 780nm

Fig.6-5 P-I-V, FFP and spectrum of dual-wavelength laser diode (100mW). (a) 650nm (b)780nm

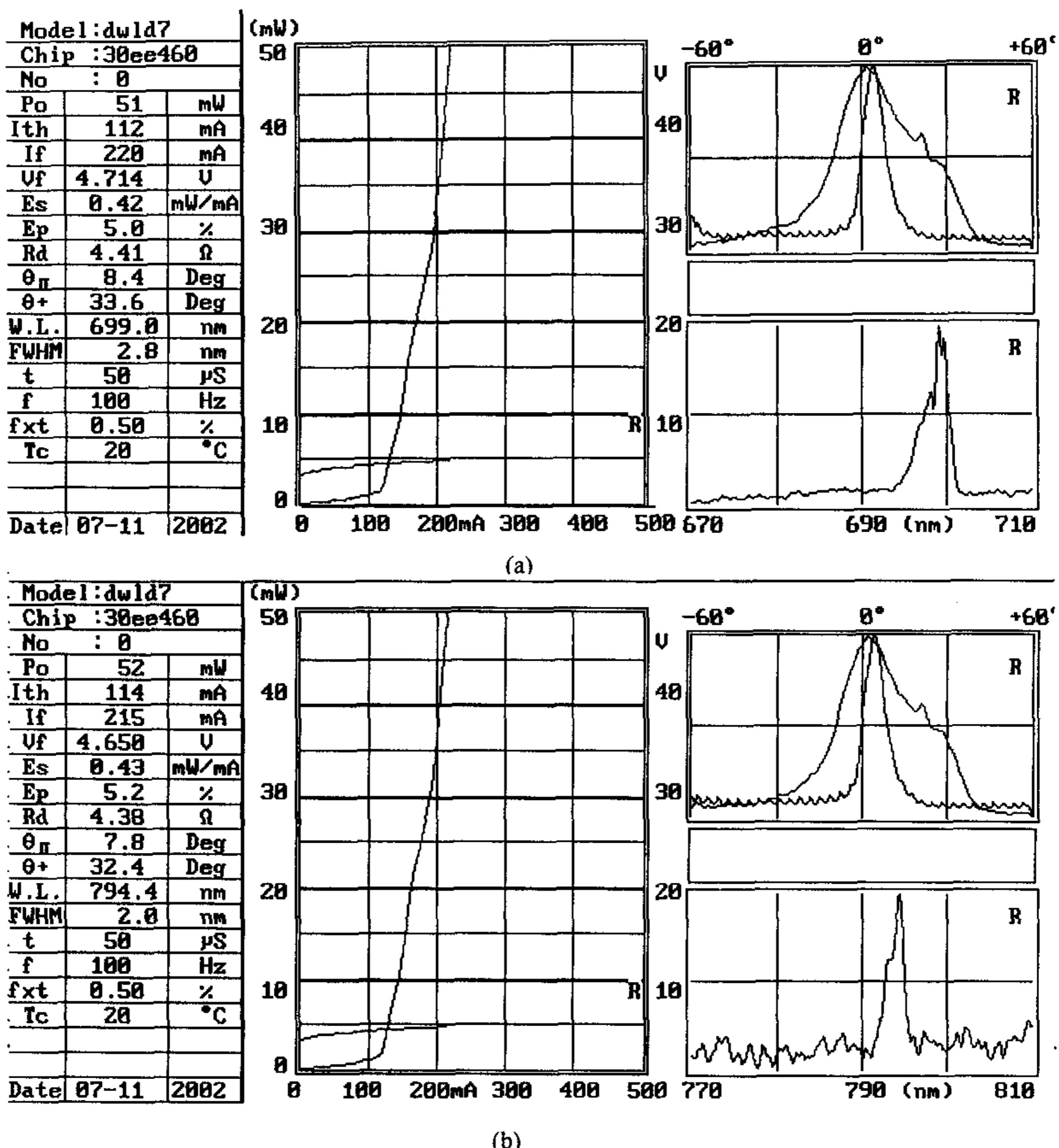


图 6-6 650—780 双波长激光器的光电特性测试结果 (50mW)。(a) 650nm (b) 780nm

Fig.6-6 P-I-V, FFP and spectrum of dual-wavelength laser diode (50mW). (a) 650nm (b) 780nm

从上述结果可以看出，从试验上我们成功制备了双波长同时激射的 650—780nm 激光器，但器件的特性并非像 950—990nm 双波长激光器那样性能好而稳定。原因是 AlGaInP 激光器和 AlGaAs 激光器的波导限制和载流子限制相对困难，阈值电流密度相差较大。因此造成在微腐蚀时，由于电流扩展等原因，在 AlGaAs 激光器还未激射时，AlGaInP 激光器已经烧毁。但深腐蚀脊型波导结构除了工艺难度增大外（腐蚀深度约 4μm），较深的腐蚀台面给器件的可靠性和稳定性带来隐患。因此，要想得到性能良好的器件，一方面要继续优化设计 AlGaInP 激光器和 AlGaAs 激光器的结构，进一步降低 AlGaAs 激光器的阈值电流密度。另一方面在隧道级联结构的设计方面要考虑降低 AlGaAs 中的 Al 组分。

6.4.2 650~780nm 分别独立激射激光器的特性

与第三章中集成激光器的结构一样，我们制备了集成 650~780nm 激光器。器件的制备过程为：首先生长 200nm 的 SiO_2 作保护层，光刻出台下的区域，然后进行腐蚀，首先用 $\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 4 : 1 : 1$ 的溶液腐蚀掉 p 型限制层，接着用 $\text{HCl} : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 = 3 : 1 : 1$ 腐蚀 AlGaInP 和 GaInP 材料，腐蚀停止在 GaAs 隧道结上。接着腐蚀掉表面的 SiO_2 ，光刻电流限制区双沟条形，腐蚀（先腐蚀 AlGaInP 激光器的双沟，再腐蚀 AlGaAs 激光器的双沟），接着生长 SiO_2 ，光刻电极条形。溅射 Ti/Au 金属电极，反刻引线。然后是背面减薄，解理封装出集成结构的管芯。

(a) 台上 650nm 激光器的特性

图 6-7 是台上 650nm 激光器的测试结果。器件的发射波长为 700nm，半宽为 2.4nm。阈值电流为 168mA，输出功率 50mW，远场测试显示垂直发散角 39.6 度，平行发散角 8.4 度。器件的斜率效率为 0.27W/A。从图中的结果可以看出器件有良好的光学特性，它的光谱，远场分布均可与单个激光器相比。但不足的是器件的串连电阻较高，这是由于器件的电极作在隧道结上，接触电阻较大，另外还有相当距离的横向串连电阻。

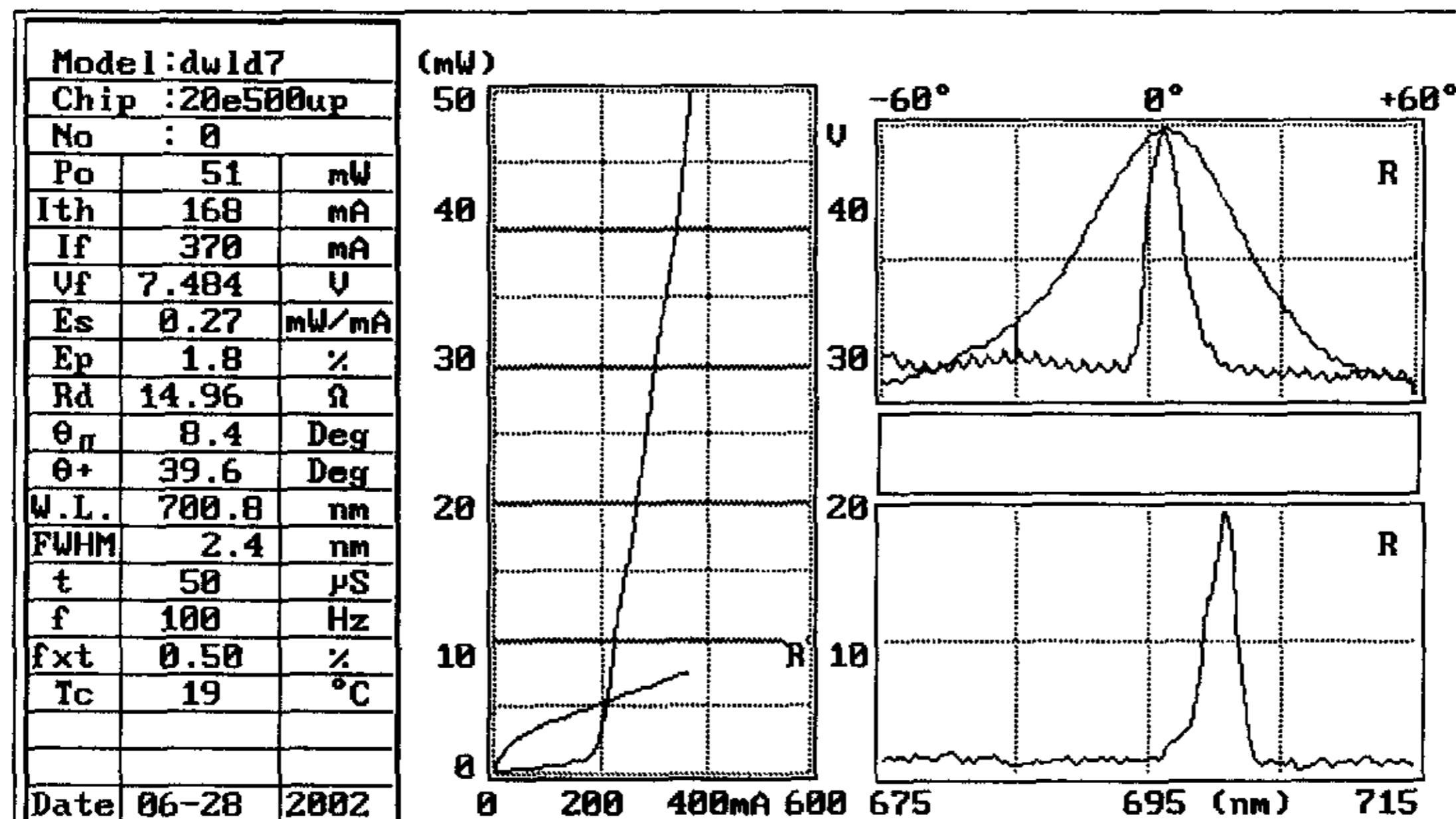


图 6-7 650 激光器独立工作输出 50mW 功率时的光电特性测试结果。
Fig.6-7 P-I-V, FFP and Spectrum of LD1 (650nm) at 50mW output power.

图 6-8 是输出功率为 100mW 时 650nm 器件的特性。从图中可以看出，高功率下器件的光学特性仍然保持良好。实际上此类器件在直流下仍可稳定地输出 10mW 功率。从输出功率和阈值特性，以及光谱和远场分布来看，集成激光器的特性基本可以与第五章报道的单波长激光器 V04, V08 的结果相比。不如单波长激光器的地方是串连电阻高，斜率效率低。实际上台上激光器的结构与 V08 器件的

结构基本一致，那么造成器件斜率效率较低的原因，除了氧化物双沟条形带来的差别外，另一个可能的原因是由于深腐蚀带来的有源区侧表面的氧化引起注入效率下降造成的。因此对于集成器件来说，除了要进一步优化器件结构外，AlGaInP 结构侧向深腐蚀后的台面保护成为器件特性和稳定性关键。

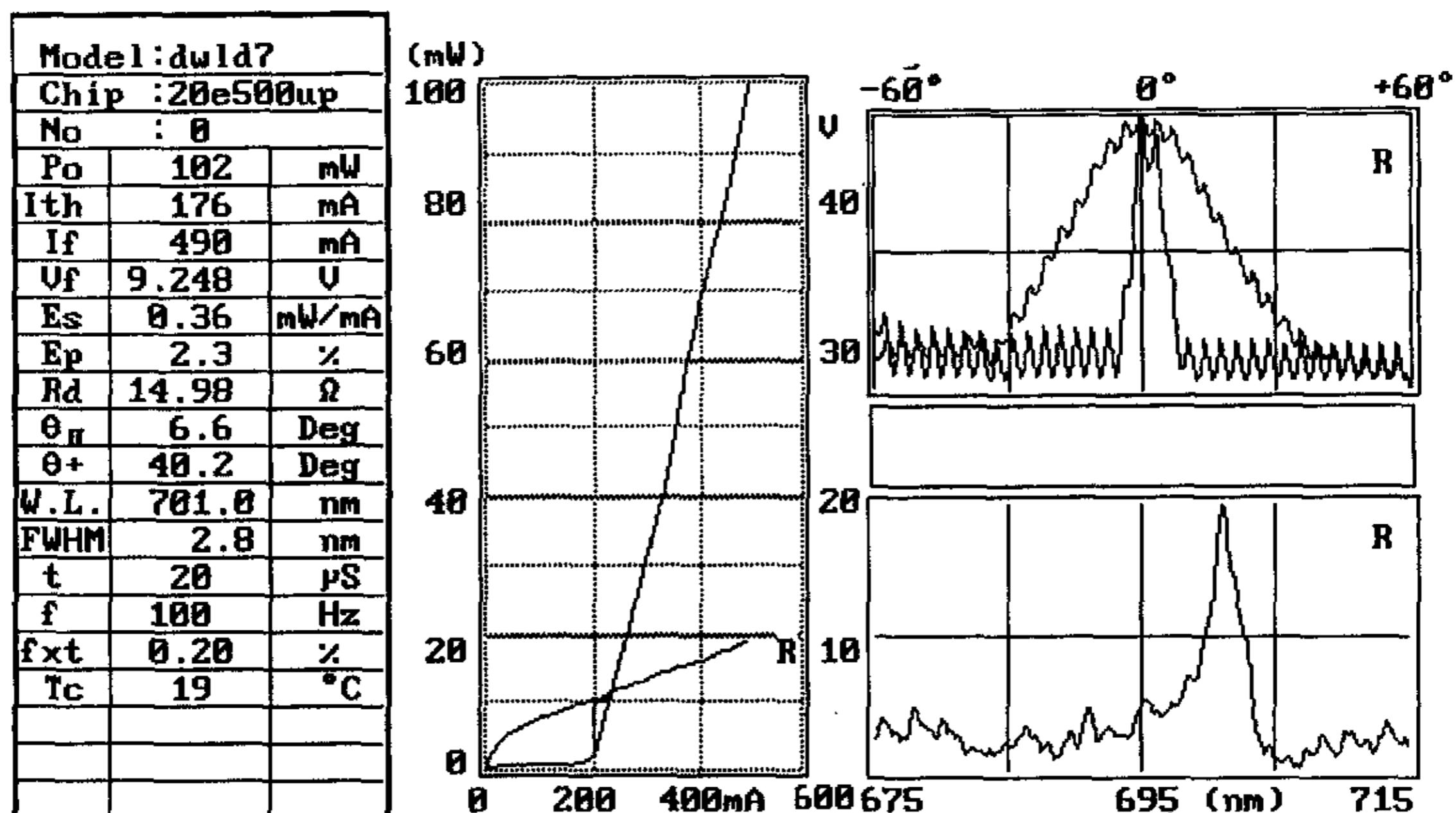


图 6-8 650 激光器独立工作输出 100mW 功率时的光电特性测试结果。

Fig.6-8 P-I-V, FFP and Spectrum of LD1 (650nm) at 100mW output power.

(b) 台下 780nm 激光器的特性

图 6-9 是台下 780nm 激光器的光电特性。器件的激射波长为 794nm，半宽为 2.2nm。器件的阈值电流为 181mA，与 650nm 激光器的阈值(约 180mA)相比，显然 AlGaAs 激光器的阈值电流密度偏高，原因是双沟腐蚀深度不够深和材料结构不好，由于限制层高 Al 组分可能导致材料质量下降。如果不进行深腐蚀工艺，由于隧道结和限制层的电流扩展，很难得到两个激光器同时激射。器件的斜率效率为 0.86W/A。器件的串联电阻为 2.29 欧姆，这部分串联电阻主要来自隧道结的串联电阻和隧道结形成的欧姆接触电阻。从结果来看，780nm 激光器的远场垂直发散角 51 度，平行发散角 6.6 度。显然器件的垂直发散角比理论计算的结果要大的多，这可能是由于限制层 ($\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$) 的 Al 组分较高，生长时材料容易出现缺陷如深能级等杂质，导致限制层不如预计的结果，损耗可能也较大。图 6-10 是 780nm 激光器输出 200mW 功率时的光电特性。780nm 激光器在直流条件下也可稳定输出 50mW 的光功率。

从上面的结果可以看出，新型隧道级联 650—780nm 激光器成功实现了 650、780nm 独立激射和 650—780nm 同时激射的器件性能。从理论和试验上证实隧道级联结构可以成功的把不同材料和不同波长的有源区级联起来，实现多波长激射。但器件的性能离实际应用还有很大差距，器件的结构设计和工艺都需进一步优化。

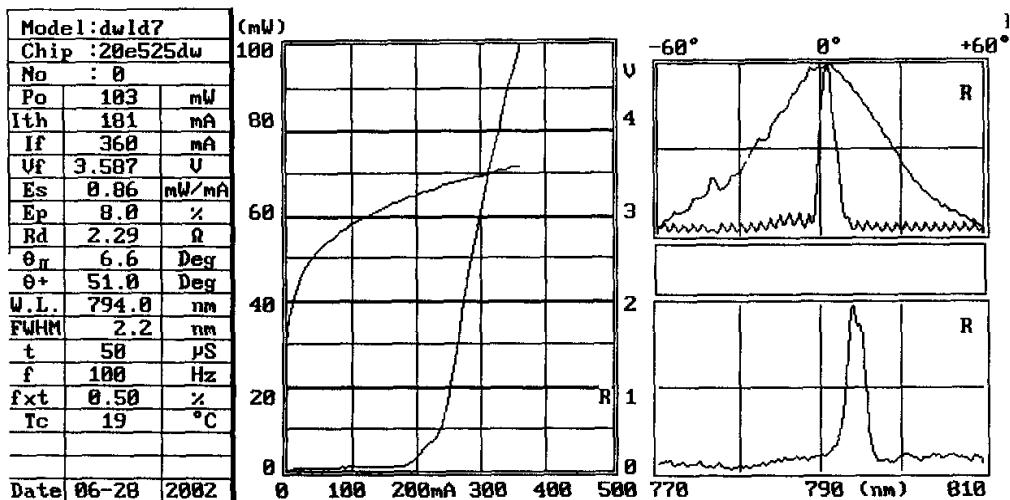


图 6-9 780 激光器独立工作输出 100mW 功率时的光电特性测试结果。

Fig.6-9 P-I-V, FFP and Spectrum of LD1 (780nm) at 100mW output power.

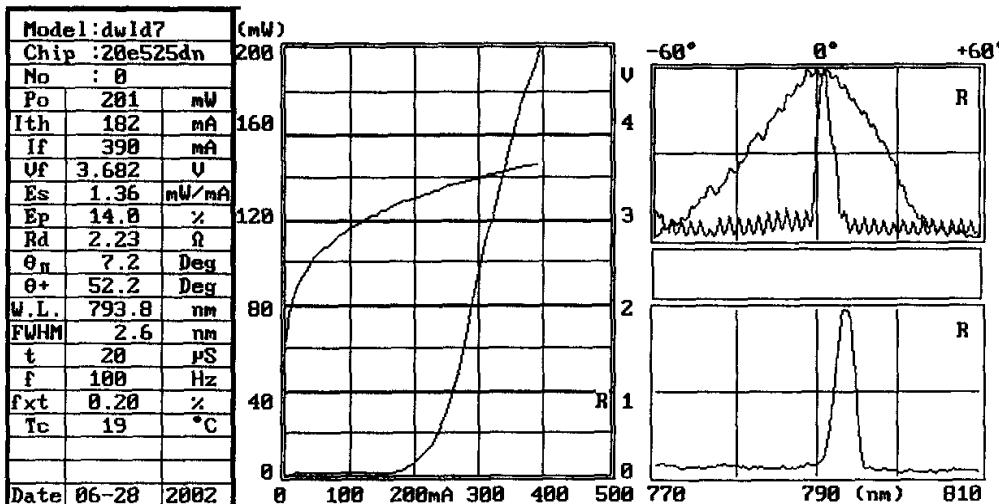


图 6-10 780 激光器独立工作输出 200mW 功率时的光电特性测试结果。

Fig.6-10 P-I-V, FFP and Spectrum of LD1 (780nm) at 200mW output power.

6.5 新型隧道级联 650–780nm 双波长激光器的进一步发展

由于新型隧道级联双波长 650–780nm 激光器的目标是用于 DVD 系统的光学头，有许多值得进一步研究的方面。

(1) 650nm 激光器结构的进一步优化

650nm 激光器的优化首先是以前提到的缩短波长的工作。其次是进一步降低

器件的阈值电流密度，主要通过二次外延的方法增加电 n 型电流阻挡层^[9]（如图 6-11 (a) 所示）的实折射率导引自对准(RISA)结构。RISA 结构需要二次外延，第一次生长 n-AlGaInP 包层、本征有源区、p-AlGaInP 光限制层、n-AlInP 电流阻挡层，将 n-AlInP 电流阻挡层的中间部分腐蚀掉，清洗后进行第二次外延，生长 p-AlGaInP 包层和高掺杂 GaAs 接触层。n-AlInP 电流阻挡层与其下层的 p-AlGaInP 光限制层形成反向 p-n 结，使电流只能从电流阻挡层中间通过，有效地限制了电流的侧向扩展，从而降低器件的阈值电流。由于 n-AlInP 电流阻挡层具有较低的折射率，因此器件侧向将形成强实数折射率导引，使激光器能够获得较好的光学特性。基本对称的横向与侧向的波导效应可以实现较小的像散，小像散是 DVD 用激光器的基本要求之一。

也可以通过在波导层和限制层间嵌入多量子垒^[10]（图 6-11(b) 所示）^[10]的方法，来降低载流子的泄漏电流。这主要是靠电子在量子垒中的量子微扰得到较好的电子限制，在波导层和限制层间建立一个较大的势垒最终抑制载流子泄漏。针对隧道级联结构，如果追求一次外延的特点，我们可以考虑采用多量子垒的结构。这样仍然可以一次完成材料的生长。但量子垒结构并非一个简单的结构，需要优化量子垒中的垒厚和阱厚，势垒高度，材料等，要先进行大量的材料试验后才能得到较好的器件结果。

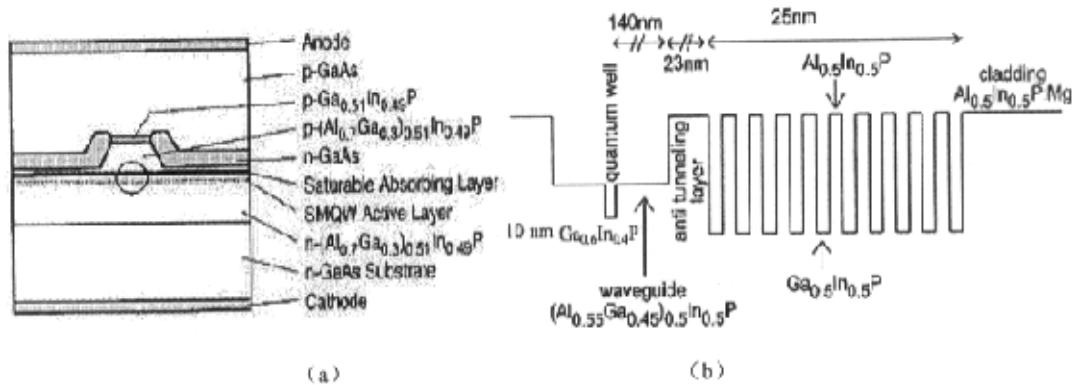


图 6-11 (a) n 型阻挡层结构示意图 (b) 多量子垒结构示意图

Fig. 6-11 (a) structure with n blocking layer (b) Structure with multiquantum barrier.

(2) 780nm 激光器结构的进一步优化

实际上我们制备的 780nm 激光器也需要进一步优化。由于我们根据课题的进度，从经费和时间上都要求尽快验证隧道级联结构的可行性。目标达到后就要求我们作出真正可以有应用价值的器件。那么我们制备的 780nm 激光器的阈值电流密度较高，原因是采用了 Al 组分为 0.8 的 AlGaAs 材料作为波导限制层材料，由于 Al 组分较高，给生长带来困难，阈值高的原因可能是器件界面存在较多界面态和缺陷导致吸收和损耗增大。我们尝试过采用 Al 组分为 0.5 的 AlGaAs 做波导限制层，但发现经隧道级联后只有 780nm 的器件激射，最后分析认为是 AlGaAs 限制层的带阶不足以限制 AlGaInP 材料中的载流子，因此载流子未发生复合发光便直接随穿入 AlGaAs 量子阱中。AlGaAs 激光器也可以像 AlGaInP 激光器一样，引入 n 型电流阻挡层。因此 780nm 激光器的结构改进需要考虑采用其它与之匹配的载流子限制更好的材料作限制层，或者采用 AlGaAs 以外的材料作量子阱材料，

如 InGaAsP 材料^[1]。

(3) 隧道结的优化

隧道结的优化我们已经做了一些试验。如为了减小隧道结对光的吸收采用 AlGaAs 材料作隧道结，可以降低吸收。但 AlGaAs 隧道结会增加结压降，同时 AlGaAs 由于掺杂浓度不易做高，因此难以形成良好的欧姆接触。

因此，多于双波长同时激射的应用，可以采用 AlGaAs 隧道结。对于集成双波长激光器，各个器件要分别独立工作，则最好仍然采用 GaAs 隧道结。

(4) 整体结构的优化

双波长 650—780nm 激光器的结构可以根据上面单个激光器的优化结构，生长如图 6-12 所示的多次外延器件。首先在 GaAs 衬底上外延生长 AlGaAs 激光器的有源区和限制层以及 n 型电流限制层，然后通过光刻刻出条形结构，接着二次外延生长 p 型限制层和隧道结以及 GaInP 多量子阱有源区，p 型限制层以及 n 型电流阻挡层；光刻腐蚀出 AlGaInP 激光器的条形，三次外延生长 p 型限制层和接触层。这种结构的好处是：一是可以得到较好的光学限制和在流子限制，即可以得到较低的阈值电流和较好的光场分布，二是由于 AlGaAs 激光器的 n 型电流阻挡层的存在，隧道结对电流的扩展可以忽略，有利于 AlGaAs 激光器的激射。它的缺点是需要三次外延，成本相对较高，工艺复杂，光刻腐蚀后的外延难度较大。

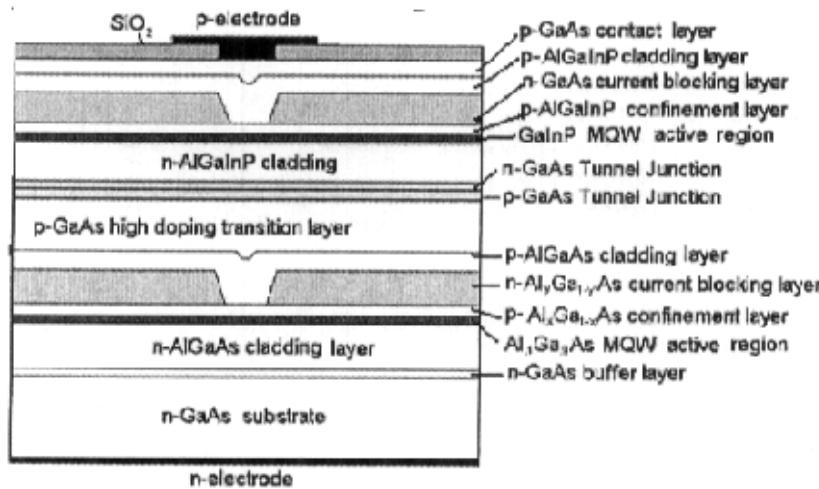


图 6-12 采用 n 型电流阻挡层的双波长 650—780nm 激光器的结构示意图

Fig6-12 Structure of 650-780nm dual-wavelength laser diodes with structure with n blocking layer

另一种可以采用的方式是采用多量子垒和电流阻挡层相结合的方式，如图 6-13 所示。这种结构的 AlGaInP 材料的限制层和限制层间生长多量子垒，总共需要两次外延生长，仍然可以得到性能良好的器件。当然这些结构有待进一步的试验验证。

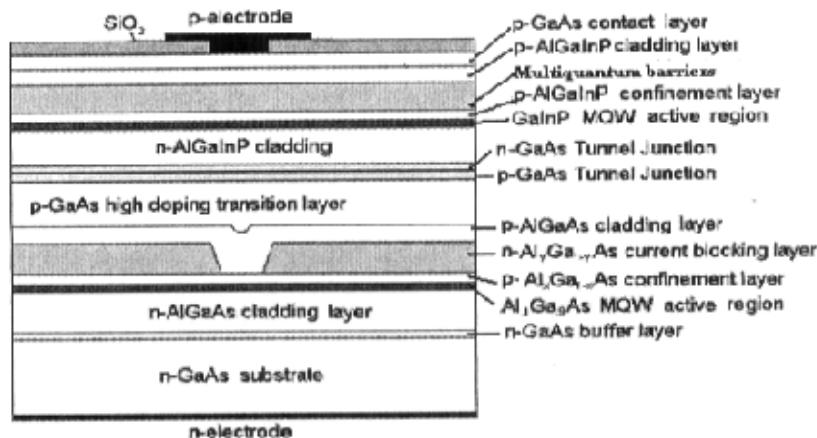
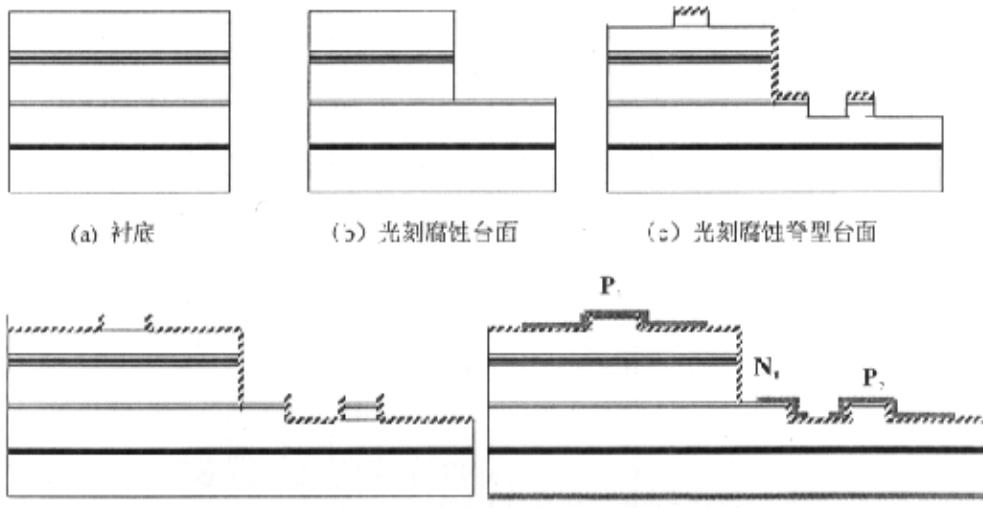


图 6-13 采用 n 型电流阻挡层和多量子垒的双波长 650—780nm 激光器的结构示意图
 Fig 6-13 Structure of 650-780nm dual-wavelength laser diodes with structure with n blocking layer in AlGaAs laser and multiquantum barriers in AlGaInP laser.

(5) 集成器件横向结构设计和工艺优化

由于时间和经费限制，我们设计的 $20\mu\text{m}$ 双沟氧化物条形结构双波长激光器的版图结构开始只是为了制备 $950-990\text{nm}$ 双波长激光器。显然 $20\mu\text{m}$ 条形对于 650nm 和 780nm 激光器来说条宽太宽。通常 $650-780\text{nm}$ 激光器普遍采用 $2-5\mu\text{m}$ 的条形结构，因此氧化物条形也不合适。因此可以考虑窄条形脊型微腐蚀或深腐蚀结构。工艺过程和器件结构如图 6-14 所示。第一步仍然是在外延片上光刻和



(d) 光刻金属接触窗口、蒸 Ti/Au, (e) 反刻电极, 背面减薄, 蒸 AuGeNi

图 6-14 脊型微腐蚀双波长激光器的工艺过程图

Fig 6-14 The Process of ridge stripe 650-780nm dual-wavelength laser diodes

腐蚀上下台面结构，腐蚀停止在隧道结上，台面可以用胶或 SiO_2 保护。接着生长 SiO_2 层，光刻窄条形结构，条形和台下 n1 接触用 SiO_2 保护，其它地方进行腐蚀；腐蚀完后再生长一层 SiO_2 ，反刻接触窗口，蒸发金属，反刻金属电极。

器件的条形可以为 $3\text{--}5\mu\text{m}$ 。AlGaAs 激光器和 AlGaInP 激光器可以根据不同的使用要求和结构，设计不同的尺寸。由于上下有源区材料不同因此微腐蚀时要分别腐蚀台上和台下激光器的条形，腐蚀深度的控制也很重要。

总之，双波长 650—780nm 隧道级联激光器还是一个较新的研究课题，需要在不断地研究和改进中得到进一步的完善和优化，特别是其热特性、可靠性的进一步研究，使其最终能得到应用。

本章小结

本章通过对 650nm、780nm 激光器波导结构的计算和分析，设计和生长了可见光波段 650—780nm 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 1.27W/A 。器件有两个激射波长，分别为 699nm 和 795nm，相差 96nm。器件远场的水平发散角为 8 度，垂直发散角为 44 度。同时对器件进行四端集成双波长器件的研制，发现器件可以分别工作在 650nm、780nm 和 650+780nm 三种状态。器件作为单波长 650nm 和 780nm 激光器可以输出 100mW 和 200mW 的功率。集成器件的输出功率、光谱和远场特性基本可以与单波长激光器相比，但器件的串连电阻较高，有待进一步优化。

参考文献

- [1] Tien-chang Lu, I Richard Fu, H. M. Shieh, J. J. Huang and S. C. Wang, Appl. Phys. Lett., 2001, 78(7) :853-855
- [2] W. T. Tsang, Appl. Phys. Lett., 1980, 36(6) :441-443
- [3] D. B. Bour, D. W. Treat, K. J. Beenink and R. L. Thornton, Electronics Letters, 1993, 29(21) :1855-1856
- [4] I. Ozden, E. Makarona and A. V. Nurmikko, T. Takeuchi, M. Krames, Appl. phys. Lett., 2001, 79(16) :2532-2534
- [5] J. S. Major Jun, D. F. Welch, W. E. Plano and D. Scifres, Electronics Letters, 1992, 28(4) :391-393
- [6] J. P. Van der Ziel and W. T. Tsang, Appl. Phys. Lett., 1982, 41(6) :499-501
- [7] J. Ch. Garcia, E. Rosencher, Ph. Collot, N. Laurent, J. L. Guyaux, B. Vinter and J. Nale, Appl. Phys. Lett., 1997, 71(26) :3752-3754
- [8] R. G. Waters, M. A. Emanuel and R. J. Dalby, J. Appl. Phys. 66(2), 1989, 66(2) : 961-963
- [9] Toshikazu Onishi, Hideto Adachi, Isao Kidoguchi, Masaya Manoh, IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(10) :1368-1370
- [10] P. Raisch, R. Winterhoff, W. Wagner, m. Kessler, H. Schweizer, T. Riedl, R. Wirth, Appl. Phys. Lett., 1999, 74(15) :2158-2160

第七章 半导体光电材料测试和激光器可靠性实验

半导体光电材料多采用外延生长的方法获得，材料外延质量的好坏直接决定器件的性能。因此检验材料的特性便显得非常重要。这里的测试是指半导体光电材料的三大主要的和基本的检测手段：光荧光谱仪、x射线衍射仪和霍尔测试系统。上述检测手段外延材料生长仪器MOCVD的必备设备，只有通过上述仪器的测量，才能验证结构设计和实际生长结构的差别，确保得到高质量的材料。

光荧光谱仪是一种用于检验半导体外延材料的光学特性和均匀性必备的设备。它能够直观的提供材料组分、峰值波长、荧光强度、半宽等特性在整个片子上的分布。它还能给出DBR和VCSEL结构的反射谱。PL扫描系统是目前国际上光电材料、器件研究和生产必备的监测设备。霍耳测试系统是用来检测材料的电学特性的，包括迁移率、电阻率和掺杂浓度。在每次MOCVD系统更换源后，都需要校准本底材料的浓度和迁移率。光电子器件无非是通过电注入使材料产生光信号（如激光器，发光管），或通过光注入产生电信号（如探测器，传感器）。因此测量材料的电学特性对光电子器件的材料检测也是基本和必要的。X射线衍射仪是用来检测外延材料质量的设备，包括材料的晶格常数、适配度、结构、厚度、组分等。MOCVD设备生长出来的结构是否达到设计的要求，以及应该如何调整，必须依据x射线的测试数据。实际上，在确定某些特定的参数时，需要上述设备测试的综合参数，如确定生长的多元化合物的组分，即需要x射线衍射得到的数据，又需要PL谱测试得到的数据，综合计算得到的结果更精确。

半导体激光器的寿命和可靠性是器件产业化的一个重要指标，可以说寿命直接决定了一种器件是否可以应用。本文提出了组建半导体激光器可靠性评价的系统模型，并采用部分霍耳测试系统中的恒流恒压源表系统和程控开关，对980nm小功率激光器进行了可靠性试验。

本章主要介绍由作者负责组建和引进的光荧光谱系统、霍耳测试系统和可靠性试验系统的组建，软件编制和试验结果。

7.1 光荧光谱扫描系统

光荧光谱检测是制备半导体光电器件的必备设备。我们选购的是 Philip 公司的 PLM-100 光荧光谱扫描系统，系统由激光器光源，白光光源，探测器系统，室温和低温样品架系统及电脑和随机软件组成。不同的激光器光源和探测器，决定不同的系统技术指标。我们配置的系统的技术指标为：波长测试范围为 550nm—1700nm、光谱分辨率为 0.01nm、空间分辨率为 1um、配有低温测试系统和白光反射谱系统^[1]。

7.1.1 光谱扫描测试

PLM-100光荧光谱扫描系统可以测出室温下半导体光电材料的光谱特性。图7-1是室温下980nm激光器结构的光谱扫描结果，从图中可以看出峰值波长、半宽、峰值强度在整个芯片上的分布和平均值。如峰值波长的平均值为966.23nm，光谱强度四分之一的平均波长为977.64nm。峰值强度为1451.7，偏差为正负146。平均半宽为29.06nm，偏差为1.31nm。从结果可以看出器件的均匀性尚可。从图中的峰值波长和四分之一波长的扫描图可以看出波长在片子上的分布与芯片外延时的旋转方向有关。芯片的扫描结果给出了不同区域器件结构特性，从而为器件的制备和最终的结果讨论提供了重要

的依据和参考。实际上PL谱的峰值波长与激光二极管的激光发射谱峰值波长一般相差10nm左右。这一方面是由于电致激光管本身由于热效应引起的带隙收缩导致波长红移，另一方面是载流子注入引起的。

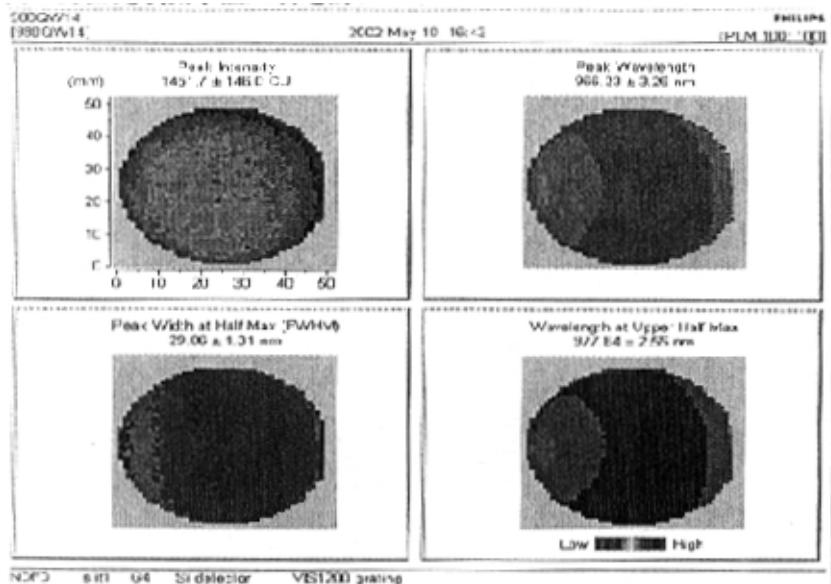


图 7-1 980nm 激光器结构的光谱扫描结果

Fig. 7-1 PL Mapping results of 980nm laser diode structure.

7. 1. 2 低温光谱扫描测试

PL-100 光谱扫描系统的低温功能是用低温样品架替代室温样品架，并通液氮达到低温 80K 的温度。其基本功能与室温完全一样，既可以给出低温下材料的峰值波长、半宽、峰值强度在整个芯片上的分布和平均值，也可以给出任意点的光谱分布。图 7-2 (a) 和 (b) 分别是同一芯片上的同一点在室温和低温 80K 下的 PL 谱线图。从图中可以看出，室温时的峰值波长为 973.4nm，半宽为 28.9nm，上四分之一波长为 985.4；在低温 80K 时对同一点进行测试，发现其峰值波长为 918.5nm，半宽为 13.0nm，上四分之一波长为 924.8nm。峰值波长从室温 300K 到低温 80K 的蓝移为 54.9nm；上四分之一波长的蓝移为 60.6nm。

根据 GaAs/AlGaAs 量子阱与温度的关系(4-8)式，可以从理论上算出 GaAs/AlGaAs 量子阱在发射波长为 980nm 时波长随温度的漂移为 0.275nm/K，波长从室温（300K）到低温（80K）的波长蓝移为 60.5nm。从试验结果看，上四分之一波长的蓝移值与理论计算结果非常接近。实际上室温下测得的上四分之一光谱波长也比较接近电致激光器光谱的测量结果。

7. 1. 3 白光反射谱扫描测试

PLM-100 光谱测试系统的另一重要的功能是它的白光反射谱测试功能。这一功能主要用于反射膜的反射率测试和垂直腔面发射激光器结构的测试。图 7-3 是 980nmVCSEL 的反射率光谱扫描分布图。从图中可以看出腔发射波长为 980nm。同时扫描的结果可以看出发射波长在整个片子上的分布情况。这一功能对于垂直腔激光器的研究帮助很大。

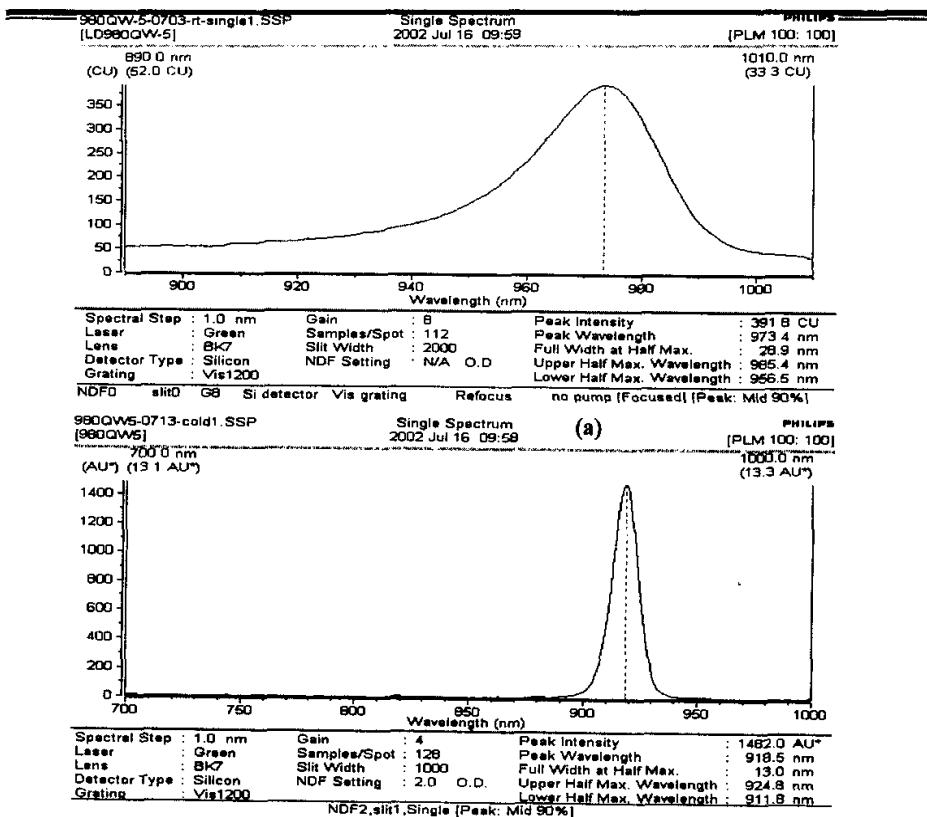


图 7-2 980nm 激光器的光荧光谱。(a) 室温 (b) 低温 80K
Fig 7-2 The PL graph of 980nm laser diodes. (a) 300K (b) 80K

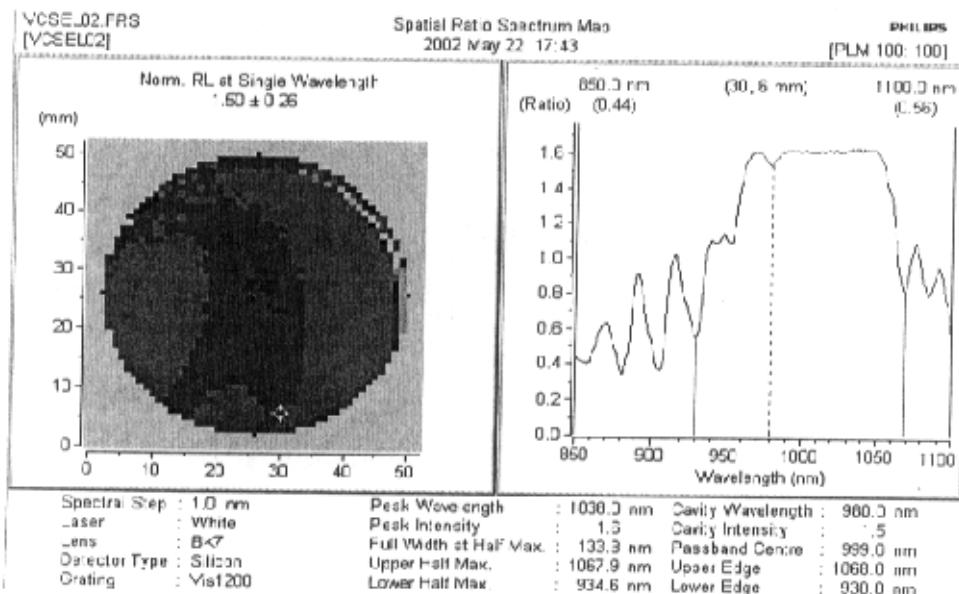


图 7-3 VCSEL 的空间光谱反射率扫描图。
Fig 7-3 The Spatial Ratio Spectrum Map of VCSEL

7.2 霍尔效应测试系统

根据霍尔测试原理，我们组建了一套高精度全自动霍尔测试系统（如图 7-4 所示）。系统的进口仪器主要包括：keithley 2400 源表、2010 万用表、6514 小电流表、7001 程控开关、7065 霍尔测试卡，GPIB 卡和 TestPoint 软件。国产部分包括：提供磁场的电磁铁、给磁铁驱动的电源、恒温和变温样品架、控制温度的温控器^[2]。该系统不仅可对高、低阻半导体材料进行测试，还可进行室温和低温定点测试以及进行从 80K 至 400K 的变温测试。

从图 7-4 可以看出仪器的线路连接关系。首先是插有 GPIB 卡的计算机通过 IEE488 总线把 KEITHLEY 的仪器与电脑连接起来；通过计算机的 RS232 接口和 A/D、D/A 板来控制磁铁电源和温控器工作。KEITHLEY 仪器之间的相互连接是通过 7065 霍尔卡来完成的，每台仪器的测试端或驱动端分别接在霍尔卡的不同接线柱上。样品通过样品架连接到霍尔卡与驱动和测试仪器相连接。温度控制通过温控器与样品架连接在一起，变温工作时样品架需要抽真空，因此样品架还与一机械泵相连。

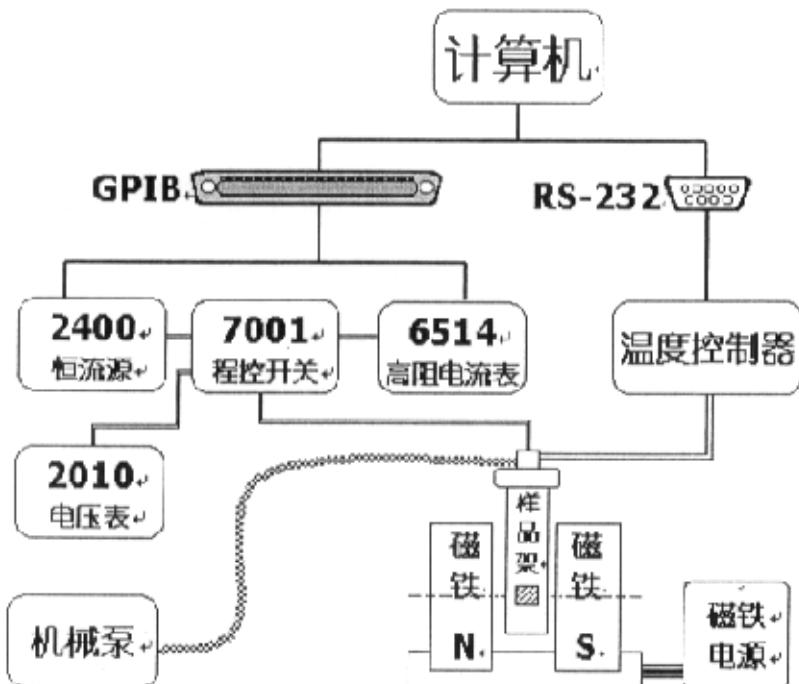


图 7-4 霍尔测试系统连接示意图。

Fig 7-4 The sketch map of Hall measurement system

7.2.1 霍尔效应测试原理

在测试系统中，首先要制备良好的欧姆接触电阻的样品（可用矩形样品，正方形或任意形状的样品）。本文均以正方形样品为例，对样品的具体要求如下：