

条形 GaAs 双异质结激光器的 低温反常特性*

戴守愚 齐上雪 李兆林
周佩珍 陶宏杰 王昌衡

(中国科学院物理研究所)

提 要

实验证明,温度下降,受激发射阈值电流下降,进入一个饱和区.这与 Hwang 在 300—10 K 间的观察结果一致.但尔后又继续上升.我们认为这起因于载流子的泄漏.当温度在 6—2.8 K 间阈值电流、结电压、动态电阻呈现规律性的结构.如果假设发生了电子-空穴凝聚,可用朗道相图作定性说明,但也可能起因于杂质能带.

一、引 言

自从 GaAs 激光器出现以来,由于应用前景广泛,人们已对它的特性作了大量的研究. Panish^[1]已作了很好的概括.对于它在极低温度下的工作情况, Pilkuhn^[2]和 Kressel^[2]对同质结和单异质结器件已进行了一些观察,但局限于少数几个点.对双异质结激光器,近年来, Hwang 等人^[3]在 10—300 K 间对阈值电流作了系统的观察.我们在 2.8—77 K 间,对质子轰击条形双异质结激光器也进行了观察.在阈值电流密度,结电压和动态电阻等测量中都看到了一些新现象.这些现象可能与 *p* 型 GaAs 活性区内自由激子和电子空穴凝聚等因素有关,也可能与杂质能带有关.

二、实 验 方 法

我们使用的条形 GaAs 双异质结激光器是用液相外延生长和质子轰击工艺制成的条形器件,液相外延的衬底为 *n* 型低阻 GaAs,生长初始温度为 830°C,降温速率为 0.75°C/min,过程完全自动控制,重复性良好.外延生长液组分见表 1. 质子轰击后,我们未进行退火处理.其他工艺流程可参看文献[4]. 器件条宽为 15 μm ,腔长约为 400 μm ;活性区为 *p* 型[掺 Si],厚度为 0.5 μm .

实验装置由两个玻璃杜瓦瓶组成.外杜瓦瓶灌满液氮,将内杜瓦瓶预冷,内杜瓦瓶内灌有液氮.两杜瓦瓶都留有条形窗口供观察用.实验用的 GaAs 激光器安装在内杜瓦瓶

* 1979 年 2 月 19 日收到.

表 1

组分 层次	Ga(g)	GaAs(mg)	Al(mg)	Si(mg)	Te(mg)	Ge(mg)
第一层	3	196	4.2		10	
第二层	3	202		20		
第三层	3	186	4.2			4.6
第四层	3	202				3.3

内,通过威尔逊密封,可以上下移动和左右旋转,利用上下的温度梯度来获得不同的温度,4.2K 以下的低温用减压法获得.温度测量,高温用铜-康铜热电偶,低温(77K 以下)用实心炭电阻温度计.为了保证温度测量的可靠性,每次都用 4.2K 的液氮温度进行核准.激光器的驱动电流,由晶体管稳压电源供给.它接一个由低速马达驱动的电位器,使注入电流在一定范围内连续可变,实现扫描.光输出用硅光电池在室温下监测.所有信息都用函数记录仪进行记录.

三、实验结果

实验用的 GaAs 激光器来源于同一工艺条件下生长的不同批号外延片,进行了多次实验观测,其实验结果如下:

1. 阈值电流 激光器的受激发射输出的 $P-I$ 曲线见图 1. 阈值电流以双切线的交点确定. 由于光输出的发散角较大,距离较远,我们未能准确地测定它的输出功率. 当温度从高温下降时,阈值电流密度随温度以指数函数关系下降. 在 77K 以下,不同器件在不同温度趋向“饱和”,这与 Hwang^[3] 的实验结果一致. 他们认为阈值电流在低温下趋向饱和,这种饱和趋势与活性区的掺杂浓度及材料为 n 型或 p 型有关,但是他们没有在 10K

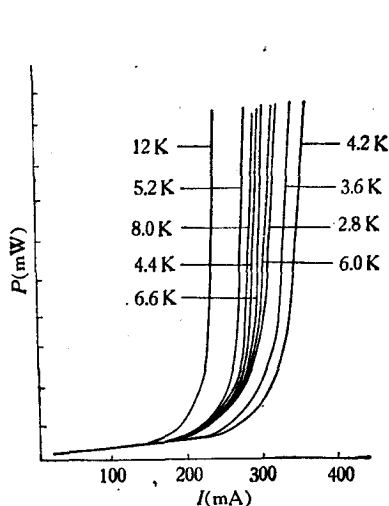


图 1 低温下激光器的输出功率 P 和注入电流 I 的关系曲线

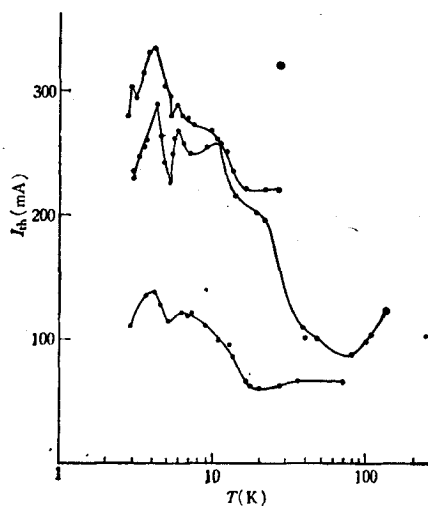


图 2 阈值电流 I_{th} (mA) 与温度 T (K) 的关系
上端的两条曲线为经老化后的器件曲线

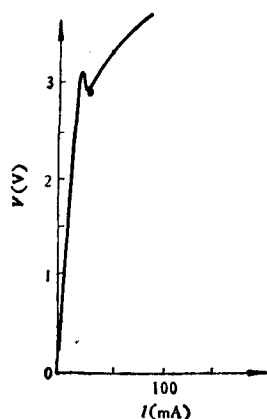


图3 6.8K时的 I - V 曲线
 V 按“·”处取数

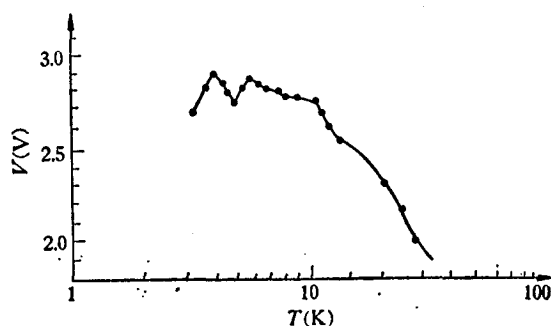


图4 结电压 V 与温度 $T(K)$ 的关系

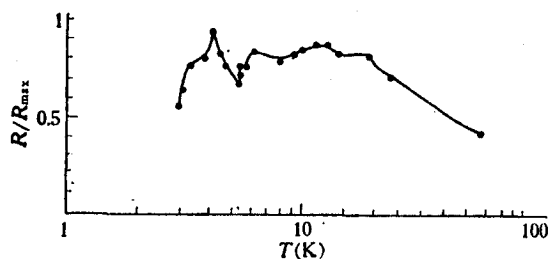


图5 动态电阻(R/R_{max})与温度的关系

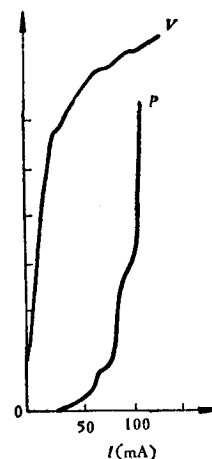


图6 温度为 3.6K 时, 结电压 V 和
输出功率 P 与电流 I 的关系曲线

以下的低温进行观测。而我们在 10K 以下的温度进行了观测实验表明, 当温度进一步下降时, “饱和”区过后, 阈值电流就会迅速增大, 并呈现规律性的结构 (图 2)。在 5.6 至 6K 间开始下降, 在 5.2K 处出现一个谷点, 然后又继续上升。在 3.5 至 4.2K 间 [个别器件为 3.5K] 达到极大值, 尔后又继续下降, 直到 2.8K。在 15K 以下, 这种阈值电流与环境温度的关系, 用 Hwang 等人的扩散长度模型是不能加以说明的, 其中所呈现的规律性结构, 可能与电子-空穴凝聚有关。

2. 电阻与结电压 GaAs 双异质结激光器结电压与动态电阻可从 I - V 特性曲线 (图 3) 得到。结电压与动态电阻的温度关系类似于阈值电流与温度的关系 (图 4 和图 5), 但变化比较缓慢。5.2K 处有一谷点, 3.8 至 4.2K 有一极大值, 以后继续下降。此外, 在 14 至 4.5K 间, 高电压低电流处, 可以看到负阻现象, 它在 6.8K 处最为显著 (图 3)。这种负阻现象, 我们认为起因于出现了反型层, 构成碰撞雪崩击穿。在 6.8 至 3.1K 间, 在受激发射时, 可以看到电压下陷 (图 6)。而在扭折区内, 这种下陷却消失了。这与 Paoli^[5] 所观察到的受激发射时结电压呈现饱和的结果不同。可能因为我们的实验是在极低温度下进行的, 热扰

动达到极小,更能显示过程的实质. 在极低温度下,同样存在发光丝在空间的扭折和漂移现象,第一个扭折区和第二个扭折区的电流 I_{n1} 、 I_{n2} 和阈值电流 I_{th} 的关系见图 7,与在 77 至 300K 下的关系相类似. 对此,我们已作了详细探讨^[6].

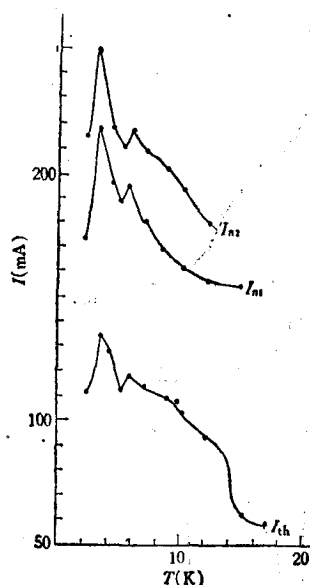


图 7 扭折区出现的电流 I_n 与阈值电流 I_{th} 的温度关系
 I_{n1} 为第一个扭折区电流;
 I_{n2} 为第二个扭折区电流

电阻与温度的关系(见图 5),与 Kawaji 等人在 4—2K 间对 InAs 块状样品的观察大体一致. 他们认为这是表面超导现象,并预言 GaAs 有类似现象^[16]. 但是我们的实验完全是一个体内效应,即使考虑到外延层间存在的界面,也无法用表面超导效应来进行解释.

四、讨 论

在极低温度下,双异质结激光器的阈值电流,随温度下降而迅速上升的趋势,可以认为类似于高温下所观察到的阈值电流的反常增大. Hayashi^[7] 将高温下的这种增大归咎于载流子的泄漏. 在我们的情况下,根据 300K 受激发射的波长估计,活性区 Al 含量为 $x = 0.07$ (这是外延生长过程中母液混合造成的),限制层 $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ 内 Al 含量为 $y = 0.30$. 由于 Al 含量的差异,禁带宽度的温度系数 $\partial E_g / \partial T$ 也就不同. $x = 0.07$ 时, $\partial E_g / \partial T = -0.51 \times 10^{-4} \text{eV/K}$, $y = 0.30$ 时, $\partial E_g / \partial T = -4.0 \times 10^{-4} \text{eV/K}$ ^[8]. 在 77—4.2K 间,这种过程还会加剧,根据我们测得的受激发射波长估计, $x = 0.07$ 时, $\partial E_g / \partial T = -13 \times 10^{-4} \text{eV/K}$. 这样一来,随着温度的下降,限制势垒高度变低,折射指数差减少,就会导致光限制与载流子限制变坏. 另一方面,在 30 至 6K 间,电阻大致保持为常数,若认为载流子浓度变化不大,载流子迁移率可近似看成为常数,现载流子寿命在低温下变化不大^[14]. 由此可以推出,载流子的扩散长度不会有很大减少. 在活性区厚度 $d \leq 0.5 \mu\text{m}$ 的条件下,限制势垒的变低,势必导致载流子的泄漏;折射指数差的变小,势必导致光损耗增加. 这两个因素在低温下必然导致阈值电流的上升. 此外,在低温下,结电压与温度的关系可归因于禁带宽度与温度的关系. 而电阻与温度的关系,则是由于杂质散射的结果.

在温度 6—2.8K 间所呈现的规律性结构,可能起因于激光与物质的相互作用. 在现在情况下,发光丝直径约为 $4 \mu\text{m}$,输出功率约为 10mW,折合能量密度约为 10^5W/cm^2 . 在这样低温和这样强光作用下,是能产生电子-空穴等离子体的^[9,10]. 在 Ge, Si 晶体内,载流子注入也可以产生电子-空穴液滴^[11], GaP 在强光作用下已观察到电子-空穴液滴^[12]. 当电子空穴构成低温高密度等离子体或电子-空穴液滴时,它们间的交换与相关作用,将使禁带宽度变窄^[10,12]. 同时电阻下降,电导增大,也会导致受激发射阈值电流下降. 在我们的实验中,有大电流 (1000A/cm^2) 注入和强光 ($\sim 10^5 \text{W/cm}^2$) 激励. 根据我们用干涉滤光片,在 4.2K 下,对输出光所作的测量,除 $7720 \text{\AA}$ 处的受激发射峰外,在 $8210 \text{\AA}$ 处还有一荧光峰 (见图 8). 这一荧光峰与 Hildobrand^[9] 等人在 4.2K 下强光激励所产生的荧光峰重合. 他们认为这是电子-空穴等离子体内电子-空穴复合所产生的荧光,由此可以认为,

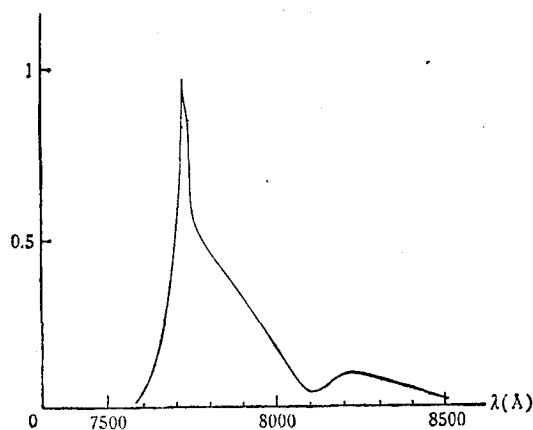


图8 在4.2K温度下用干涉滤光片测得的光强谱分布7720 Å为受激发射峰,它的带宽远大于实际带宽(~ 1 Å); 8210 Å处为一强荧光峰,它与 Hildobrand^[9]所观察的电子-空穴等离子体峰和自由激子峰重合

在我们的器件内,可能发生了电子-空穴等离子体或凝聚的过程。如果发生了这一过程,可以用朗道的相图(见图9)^[13]定性地说6K以下所呈现的规律性结构。假定我们的过程是按 aE 线进行, ab 段为低密度气相区,它呈现一般的物理特性。 b 点相应于5.8—6K, bc 为气液共存区,这时出现电子-空穴凝聚,它使禁带宽度变窄,电导增大,阈值电流下降。 c 点相应为5.2K,它重返气相区。 d 点相应为3.5—4.2K,它又重新进入气液共存区,并进一步进入液相区。这样在极窄的温度范围内呈现有规律性的结构,它们的内在原因由于电子能态的变化。

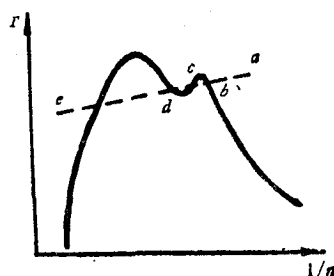


图9 电子-空穴凝聚可能存在的相图^[13]
T为温度; n 为电子-空穴浓度,如假定我们的过程是沿 ac 线进行,温度的对应点为
 b : 6K; c : 5.2K; d : 4.2K

另一方面,我们的器件是高掺杂的,杂质能带对他们的影响是不可忽视的。对此尚需进一步工作。

最后我们谨向于涿、赖武彦同志表示感谢。他们提供了非常有益的帮助。

参 考 文 献

- [1] M. B. Panish, *Proc. IEEE*, **64**(1976), 1512.
- [2] M. Pilkuhn, H. Ruppert and S. Blum, *Solid State Electron*, **7**(1964), 908; H. Kressel, H. F. Leckwood and H. Nelson, *IEEE J. Q. E.*, **QE-6**(1970), 278.
- [3] C. J. Hwang, N. B. Potel, N. A. Sociolotti, E. C. Prince and P. J. Bull, *J. Appl. Phys.*, **49**(1978), 29.
- [4] 中国科学院物理研究所半导体激光器组、高能物理研究所一室应用组, *科学通报*, **20**(1975), 559.
- [5] T. L. Paoli, *IEEE J. Q. E.*, **QE-12**(1976), 770.
- [6] 周佩珍、李兆林、齐上雪、戴守愚, *物理*, **8**(1979), 390.
- [7] J. Hayashi, M. B. Panish and F. K. Reinkart, *J. Appl. Phys.*, **42**(1971), 1929.
- [8] S. M. Ku and J. F. Black, *J. Appl. Phys.*, **31**(1966), 3733.
- [9] C. Hildobrand, B. O. Faltermeyer, M. M. Pilkuhn, *Solid State Commun.*, **19**(1976), 841.
- [10] E. Gobel, K. L. Shaklee and R. Epworth, *Solid State Commun.*, **26**(1978), 221.

- [11] R. B. Hammand, V. Marrelle, R. N. Silver, T. C. Mayer, *Solid State Commun.*, **15**(1974), 251.
- [12] C. J. Hwang, *Phys. Rev.*, **B2**(1970), 4117.
- [13] T. M. Rice, "In Proc. of the Twelfth Conf. on the Physics of Semiconductors", Cambridge Mass., (1974), Ed. by M. M. Pilkuhn, p. 504.
- [14] H. M. Колчава, Д. Н. Наследев, *Ф. Т. Т.*, **8**(1966), 1097.
- [15] D. Binberg, M. Skolnick and L. M. Sander, *Solid State Commun.*, **27**(1978), 949.
- [16] 川路、绅治, 固体物理 (*Solid State Phys.*), **12**(1977), 301.

ANOMALOUS BEHAVIER OF STRIPED GaAs DH LASERS AT LOW TEMPERATURE

DAI SHOU-YU QI SHANG-XUE LI ZHAO-LIN
ZHOU PEI-ZHEN TAO HONG-JIE WANG CHANG-HENG
(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

It is shown in our experiments that the threshold current of the lasers decreases with the lowering of temperature, and finally enters saturation region. This is essentially consistent with Hwang's result in the range of 300—10 K. But further lowering in temperature will increase the threshold current of the lasers. We suppose that this increasement is caused by the leakage of carriers. When the temperature is in the range of 2.8—6 K, the threshold current, the voltage at the junction and the dynamic electric resistance all exhibit regular structures. If the electron-hole liquid has been generated in this process, it may be explained qualitatively by Landau's phase diagram. However, we also can not exclude the possibility that this structure is due to the impurity energy band, which could play an important role in the above mentioned process.