

高温 CW 半导体激光器的阈值电流

王德煌

(北京大学物理系)

提要: 用载流子速率方程分析了高温 CW 半导体激光器(LD)阈值电流(I_{th})与温度(T)的关系。数值计算结果分别给出了与 T 有关的腔内损耗、双分子复合和俄歇过程以及载流子泄漏效应对 I_{th} 的贡献大小。

Threshold current for high temperature CW semiconductor lasers

Wang Dehuang

(Department of Physics, Peking University, Beijing)

Abstract: The relation between threshold current (I_{th}) and temperature (T) for high temperature CW semiconductor lasers(LDs) are analyzed by means of carrier rate equation. The contributions for T depending on the intra-cavity losses, bimolecular recombination and Auger process, and carrier leakage effect to I_{th} are given respectively in numerical calculation results.

一、引言

半导体激光器(LD)阈值电流(I_{th})与温度(T)的关系早已被人们注意和研究,至今有关报道颇多,但大都局限于讨论温度400K以下和只考虑某个物理过程中 T 与 I_{th} 的关系,没有详尽和恰当地分析和比较诸如腔内损耗、带间双分子复合和俄歇过程等因素对 I_{th} 的贡献,对载流子泄漏效应更没有引起足够的注意^[1]。本文用载流子速率方程分析了LD在高于室温(300K)CW激射时 I_{th} 与 T 的关系,分别考虑和综合估价上述四种物理过程与 T 的关系以及它们对 I_{th} 值的贡献大小。

二、基本分析

对给定有源层浓度和厚度、谐振腔长度和宽度的一个DHLD的 I_{th} 值一般由腔内损耗(包括吸收、散射和端面反射等损耗)、带间双分子复合过程、俄歇复合过程和载流子泄漏效应等四个物理过程所决定,用载流子速率方程表示有^[2~3]:

$$\frac{dn}{dt} = -An - Bn^2 - Cn^3 - Dn^{5.5} \quad (1)$$

其中 A 、 B 、 C 和 D 分别表示腔内损耗、带间双分子复合和俄歇复合过程以及载流子泄漏效应对载流子密度 n 的影响的特征系数。它

收稿日期:1987年5月11日。

们分别表征上述四个与 T 有关的物理过程。当 DHLD 达到阈值状态时,由 (1) 式稳态解求出阈值载流子密度 n_{th} , 因而 DHLD 的阈值电流满足以下关系式:

$$I_{th} = edwl(An_{th} + Bn_{th}^2 + Cn_{th}^3 + Dn_{th}^{5/3}) \quad (2)$$

其中 e 、 d 、 w 和 l 分别是电子电荷、有源层厚度、腔宽和腔长。 n_{th} 除与上述几种过程有关外, 还是能带有效态密度 n_i 的函数^[1]:

$$n_{th} = \frac{A}{B} + n_i + \frac{C}{B} n_i^2 \quad (3)$$

而 n_i 与 T 的关系一般遵循 $T^{3/2}$ 规律^[4]。现取下式^[1]:

$$n_i = n_{i0} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \quad (4)$$

其中 n_{i0} 是由有源层浓度决定的系数。综上所述, 我们可以认为温度对 I_{th} 值的影响这种复杂的物理现象可分别用腔内损耗、带间双分子复合、俄歇复合和载流子泄漏效应四种物理过程来分析讨论。

三、数值计算与讨论

我们通过典型数值计算来分析讨论上述四种与 T 有关的物理过程对 DHLD I_{th} 值的影响。一般不同器件的特征系数 A 、 B 、 C 和 D 的大小略有不同, 但实验结果发现其数量级均取一定值^[1~3]。我们选用文献[2]中 $T = 300\text{K}$ 时实验数据:

$$A(300) = 11 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$$

$$B(300) = 8.6 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$C(300) = 4.0 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$$

并以 300K 为计算起点, 外推得到以下关系式:

$$A(T) = A(300) + 8.68 \times 10^{-2}(T - 300) \quad (5)$$

$$B(T) = B(300) \times \left(\frac{300}{T} \right)^{3/2} \quad (6)$$

$$C(T) = C(300) + 4.0 \times 10^{-2}(T - 300) \quad (7)$$

特征系数 D 值在 $2.0 \times 10^{-75} \sim 1.0 \times 10^{-74} \text{ cm}^{13.5} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间^[2]。现取 $D = 1.0 \times 10^{-74} \text{ cm}^{13.5} \cdot \text{s}^{-1}$ 。(4) 式中系数 n_{i0} 主要由有源层浓度决定, 我们分别取 $0.995 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $0.995 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 表示有源层浓度高低两种情形。此外, 有源层厚度 d 与阈值电流密度有一定关系^[5], 实验发现 $d \sim 0.1 \mu\text{m}$ 附近阈值电流密度最小, 故取 $d = 0.1 \mu\text{m}$, 而 DHLD 腔的长和宽分别取 $l = 200 \mu\text{m}$ 和 $w = 5 \mu\text{m}$ 。图 1、2 分别给出腔内损耗 (A)、带间双分子复合 (B)、俄歇复合 (C) 和载流子泄漏效应 (D) 等四种物理过程分别对 I_{th} 与 T 的关系的影响。为了更清楚地比较, 表 1 中分别列出有源层有两种不同浓度时上述四种物理过程在 $T = 300$ 、400 和 500K 处对 LD 的 I_{th} 值贡献大小。

腔内损耗和带间双分子复合过程在不同温度下对 I_{th} 值的贡献可以从图 1 中 A 和 B 曲线以及表 1 中数字所示。当有源层浓度较低时 (即 $n_{i0} = 0.995 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 腔内损耗 (A') 和带间双分子复合过程 (B') 对 I_{th} 值影

表 1

	$T(\text{K})$	$n_{i0} (\times 10^{16} \text{ cm}^{-3})$	腔内损耗	带间双分子复合	俄歇复合	载流子泄漏效应
$I_{th} (\text{mA})$	300	0.995	2.25	2.25	1.34	0.62
		99.5	4.81	10.29	13.09	40.46
	400	0.995	11.12	11.12	56.14	16.39×10^1
		99.5	26.54	63.36	76.39×10^1	19.64×10^3
	500	0.995	32.20	32.20	68.58×10^1	76.64×10^2
		99.5	94.64	27.82×10^1	17.42×10^3	28.83×10^5

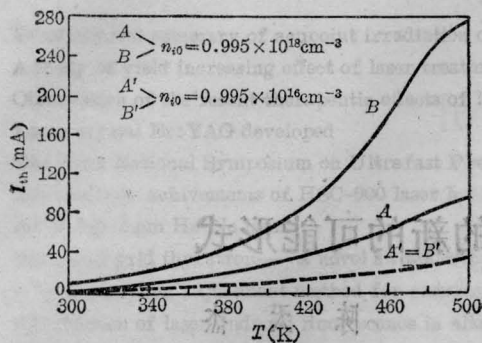


图1 腔内损耗(A和A')或带间双分子复合(B和B')单独存在时计算 I_{th} 值随 T 变化关系

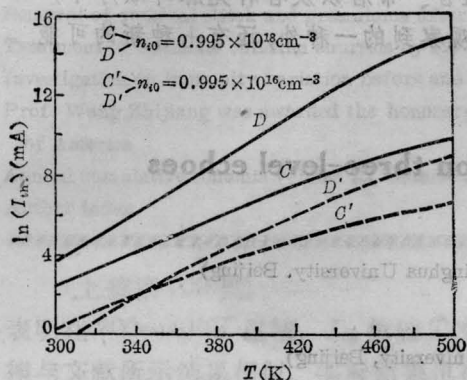


图2 俄歇复合过程(C或C')或载流子泄漏效应(D和D')单独存在时计算 I_{th} 值随 T 变化关系

响相同而且 I_{th} 随 T 变化很缓慢,当 T 从300K升高到500K时 I_{th} 值仅增加30mA。但是有源层浓度较高时($n_{10}=0.995 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),腔内损耗比带间双分子复合过程对 I_{th} 值贡献小。随着 T 增加两者贡献差别越大,图1中B线表明由于带间双分子复合过程的存在使得 I_{th} 值随 T 陡峭地增加(见表1)。

俄歇复合过程(C)和载流子泄漏效应(D)对 I_{th} 值贡献以及它们单独存在时 I_{th} 值随 T 增加而变化的规律如图2中C、C'和D、D'曲线所示,典型数字也列在表1中。我们的结果表明具有低浓度有源层的LD,室温(300K)时C和D过程对 I_{th} 影响不大。但具有较高浓度有源层的LD,室温时的 I_{th} 值中C和D过程的贡献都较大,其中D所特征的载流子泄漏效应贡献最大。无论有源层

浓度高或低,俄歇复合和载流子泄漏效应单独存在时 I_{th} 值随 T 增加都急剧地升高(如图2中C、C'和D、D'曲线所示)。这说明当温度高于350K时,俄歇复合过程和载流子泄漏效应都是主要影响 I_{th} 值的因素,而以后者更为重要,特别是有源层浓度较高时更加如此。因此,我们认为高温CW半导体激光器器件的最高激励温度(T_{max})主要由载流子泄漏效应决定,其次才是俄歇复合过程的影响,而内腔损耗的影响是微不足道的。

为了比较AlGaAs和InGaAsP这两种典型DHL D的 I_{th} 值随 T 的变化规律,我们用同样参数进行计算分析,其结果如图3和4所示曲线。图3和4中还分别用黑点(·)标出取自文献的一些实验结果。我们的结果

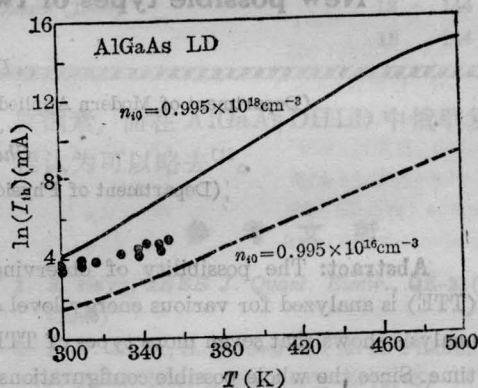


图3 AlGaAs DHL D的 I_{th} 计算值随 T 的变化关系

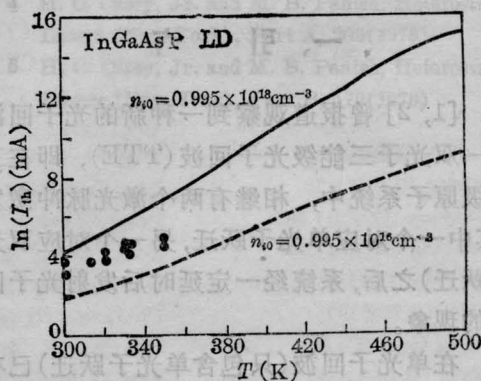


图4 InGaAsP DHL D的 I_{th} 计算值随 T 的变化关系

(下转第763页)

	No.	Cum. No.	Page
Brief clinical summary of acupoint irradiation of infant enuresis with He-Ne laser	5	137	329
A study of yield increasing effect of laser treatment on cucumber seeds	5	137	320
Observation of the recent therapeutic effects of laser on musculus pirogormis	6	138	325
Laser crystal Er:YAG developed	6	138	364
The First National Symposium on Ultrafast Phenomena held in Guangzhou	6	138	382
Intermediate achievements of HSC-900 laser holographic speckle camera etc expertised in Xian	8	140	501
A CW 543.5 nm He-Ne laser	8	140	512
Grounded grid thyratron—a novel switch component for laser power supply	8	140	512
A high precision adjustment method for resonant reflectors	9	141	571
Observation of laser-induced fluorescence in alkaloid Chinese herbal medicines	9	141	572
Obtaining laser light from Er ³⁺ doped glass	9	141	573
Hu Gangfu, Rae Yutai, Ye Qisun and Wu Youxun awards for physics sponsored by Chinese Physical Society	9	141	574
The 9th National Conference on Laser held in Harbin	9	141	574
Removal of residual stitch and granuloma after tracheobronchial operation by laser light	12	144	743
Treatment of obstinate children enuresis by He-Ne laser irradiation on acupoints	12	144	743
Investigation on immunity variation before and after enuresis treated by He-Ne laser light	12	144	743
Prof. Wang Zhijiang was awarded the honorary title of fellow by the Optical Society of America	12	144	750
Annual cumulative contents volume 15, Chinese Journal of Lasers (1988)	12	144	751
Author index	12	144	764

(上接第 709 页)

表明在 300~400K 区域, I_{th} 值随 T 变化规律与文献所示结果相似, 实验结果也在我们所得典型曲线之间。在 $T > 400K$ 的区域, 无论 AlGaAs DHLD 还是 InGaAsP DHLD, I_{th} 值随 T 变化规律都相同, 都急剧地陡峭上升, 因为此时载流子泄漏效应是决定 I_{th} 值的最主要因素。从我们的结果也可以说明, 目前 AlGaAs DHLD 的最高 CW 激光温度略高于 InGaAs PDHLD 的值, 其原因是 T 均在 400K 以下, 此温度区间对 InGaAsP DHLD 俄歇复合过程仍是影响 I_{th} 值的较重

要因素, 而在 AlGaAs DHLD 中俄歇复合过程认为可以略去^[1]。

参 考 文 献

- 1 A. Hayg, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**(6), 716 (1985)
- 2 A. P. Mozer, S. Hausser and M. H. Pilkuhn, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**(6), 719 (1985)
- 3 L. M. Dolginov *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**(6), 646 (1985)
- 4 H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers* (New York), Part A, 203 (1978)
- 5 H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers* (New York), Part B, 179 (1978)