

人造金刚石热沉的锁相列阵半导体 激光器热特性计算分析

林岳明 方祖捷

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 用镜象法求解金刚石薄膜和铜组成的热沉中的热传导方程, 计算了不同厚度金刚石薄膜对器件温升和各条间温差的影响。

关键词: 人造金刚石, 锁相列阵半导体激光器, 热沉

Study on thermal characteristics of semiconductor laser phase-locked arrays with artificial diamond heatsink

Lin Yueming, Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Abstract: In this paper, we find the solution of thermal conduction equation in the heatsink consisting of artificial diamond and copper by mirror image method, and the effects different of artificial diamond thickness on the temperature rise of devices and the temperature difference between the strips are calculated.

Key words: artificial diamond, semiconductor laser phase-locked array, heatsink

一、引言

受到人们日益重视的大功率半导体锁相列阵激光器, 同单条半导体激光器相比, 具有更为严重的热效应^[1] 它已成为限制输出功率、工作稳定性和使用寿命的重要因素, 不少学者对此已作了一些研究^[2~4]。降低器件热阻是提高器件抗热性的重要措施。早期 O. B. Swan 采用天然 II_a 类金刚石作热沉, 大大降低了半导体器件的热阻, 从而显著地改善了器件的性能, 可是由于价格昂贵, 天然金刚石作热沉的应用受到限制。近几年, CVD(化学蒸气沉积)法生长金刚石技术的迅速发展, 使得推广金刚石热沉的应用成为可能^[6,7]。本文采用镜像法求解金刚石薄膜和铜组成的热沉中的热传导方程, 获得不同金刚石薄膜厚度对器件温升和条间温差影响的结果。这些结果对我们实际使用国产人造金刚石薄膜, 具有很大的参考价值。

二、计算模型

一般情况下,激光器的发光区(PN结)贴近热沉键合,热沉比器件本身大得多。由于本文主要分析不同热沉结构的热特性,因此对问题作如下的近似和简化:

① 忽略除发光区外的其余热源(如串联电阻的焦耳热);

② 忽略器件向空间的热辐射,即器件通过热沉向空间散热;并忽略发光区侧向向热沉的热传导,即被认为是一维热流。那么发光区与热沉边界之间的温升 ΔT 可按下式计算:

$$\Delta T = q \sum_i d_i / K_i$$

式中 q 为热源功率密度, d_i 、 K_i 分别为各外延层和键合层的厚度和热导率;

③ 忽略金刚石薄膜与铜块之间焊接层的热阻。

根据假定②和③,我们可将所求解的热问题等效地扩展到求解半无穷大空间的热问题。如图 1 所示,也就是说归结为求解两层半无限大介质的三维热传导问题。

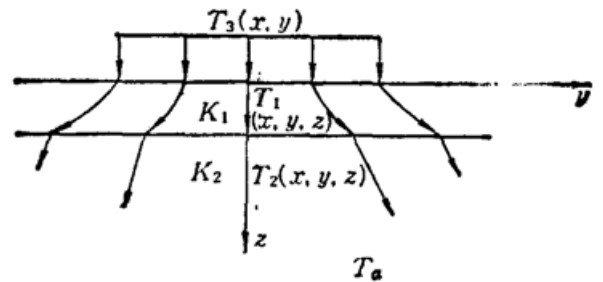


Fig. 1 Model of heat flow in a laser diode array

三、热传导方程解的推导

半无限大均匀介质的热传导问题可以严格求解,文献[8]给出了长方形热源引起的温度场的解析解。对于两层介质的情况,可以采用差分法数值计算求解,也可用 Laplace 变换方法求解。但这两种方法繁琐而且不直观。

尤其差分法,计算工作量大,精度差。本文用电动力学中静电场方程的镜像法来求解热传导方程,得出了简单明了的结果。

半无穷大两层介质问题可以再对称地扩展为三区间无穷大空间的问题,即热源在 $z=0$ 的平面上, $|z| \leq h$ 的一层介质夹在两个延伸到 $|z| = \infty$ 的另一种介质中间。如图 2 所示。

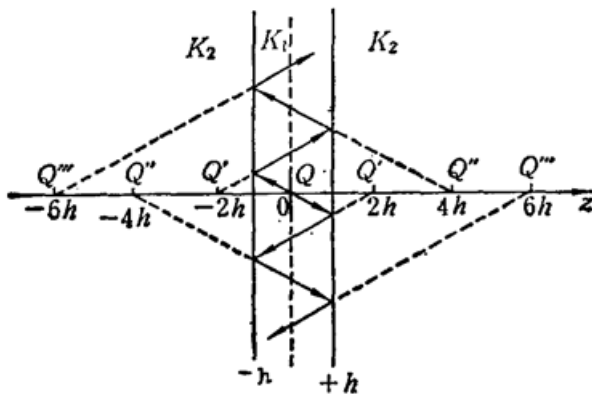


Fig. 2 Scheme of mirror image method

热传导方程及边界条件为:

$$\begin{cases} \nabla^2 T = -\frac{Q}{K} \\ T_1 = T_2 & z = \pm h \\ K_1 \left(\frac{\partial T}{\partial z_1} \right) = K_2 \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_2 & z = \pm h \\ T = T_a & r \rightarrow \infty \end{cases} \quad (1)$$

首先用镜像法求解点热源 $Q\delta(x, y, z)$ 引起的温度场。

$$T(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi K_1 \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + \frac{Q}{4\pi K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z - 2nh)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + (z + 2nh)^2}} \right], \quad -h < z < h \quad (2)$$

对 $-l < x < l$, $-m < y < m$ 热流密度 q 的矩形热源则有:

$$T(x, y, z) = \frac{q}{4\pi K_1} \int_{-l}^l dx' \int_{-m}^m \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2}} dy' + \frac{q}{4\pi K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^n \times \int_{-l}^l dx' \int_{-m}^m \left[\frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-nh)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+2nh)^2}} \right] dy' \quad (3)$$

对于我们所关心的热界面即 $z=0$ 平面上的温度分布, 可以对(3)式积分得到。其中利用积分式:

$$\iint \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} dx dy = |y| \operatorname{sh}^{-1} \frac{x}{y} + |x| \operatorname{sh}^{-1} \frac{y}{x} = F_1(x, y)$$

和

$$\iint \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + a^2}} dx dy = y \operatorname{sh}^{-1} \frac{x}{\sqrt{y^2 + a^2}} + x \operatorname{sh}^{-1} \frac{y}{\sqrt{x^2 + a^2}} - \frac{ax}{|x|} \tan^{-1} \frac{y|x|}{a} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + a^2}} = F_2(x, y)$$

$$T(x, y, 0) = \frac{q}{4\pi K_1} F_1 + \frac{q}{2\pi K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^n F_2 \quad (4)$$

其中: $F_i = F_i(x+l, y+m) - F_i(x-l, y+m) - F_i(x+l, y-m) + F_i(x-l, y-m)$,
 $i=1, 2$

所以对于由 N 个条形激光器构成的列阵可得:

$$T(x, y, 0) = \frac{q}{2\pi K_1} \sum_{\nu=-N_1}^{N_2} F_1 + \frac{q}{\pi K_1} \sum_{\nu=-N_1}^{N_2} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^n F_2 \quad (5)$$

式中 $F_i = F_i\left(x+L, y+\frac{W}{2}-\nu a\right) - F_i\left(x-L, y+\frac{W}{2}-\nu a\right) - F_i\left(x+L, y-\frac{W}{2}+\nu a\right) + F_i\left(x-L, y-\frac{W}{2}+\nu a\right)$ $i=1, 2$

L 为腔长, W 为条宽, a 为条间距, $N = N_1 + N_2 + 1$

四、计算结果及讨论

式(5)给出了列阵器件在热沉界面上的温度分布。这是一个由初等函数构成的级数形式, 很容易作数值计算, 也容易控制计算精度。数值计算所选用的参数为: 腔长 $L=300 \mu\text{m}$, 条宽 $W=4 \mu\text{m}$, 条间距 $a=8 \mu\text{m}$ 。条数 $N=10$ 。金刚石薄膜是一种多晶薄膜, 其热导率应低于单晶 II_a 型金刚石, 取 $K_1=10 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$, 铜热导率 $K_2=4 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ 。器件工作状态取在阈值附近, 电流密度 $J_{\text{th}}=1.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$, 由于我们关心的问题是金刚石薄膜厚度对列阵器件温升

及侧向温度分布的影响,在计算中取 $x=0$ 。

图 3 为以不同金刚石薄膜厚度为参数的侧向温度分布曲线。可以看到用金刚石薄膜作为热扩散层降低了器件的温升,也降低了条区与条间区之间的温差。图 4 为中央条温升随金刚石薄膜厚度的变化的情况。可以看到薄膜厚度要达到约 $50 \mu\text{m}$ 以上可获得较佳的散热效果,此时温升可由 6.9°C 降低到 5.9°C ,已比较接近于当薄膜厚度趋向无穷时的最大温升降低量 5.3°C 。在采用 $50 \mu\text{m}$ 金刚石薄膜后在中心处条区与条间区的温差可由 0.1°C 降低到 0.04°C ,中心条与边缘条的温差也由 0.33°C 降到 0.14°C 。

以上计算结果表明,用近几年正在发展的人造金刚石薄膜作为锁相阵列半导体激光器的热沉,是有前途的。本文的结果可为实际热沉结构参数的设计提供依据。也可为器件物理特性的研究分析提供帮助。

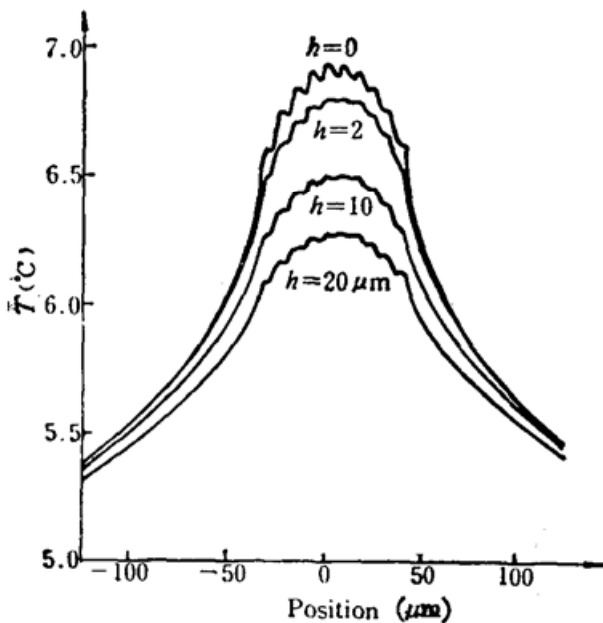


Fig. 3 Lateral temperature-rise distribution with different diamond thickness

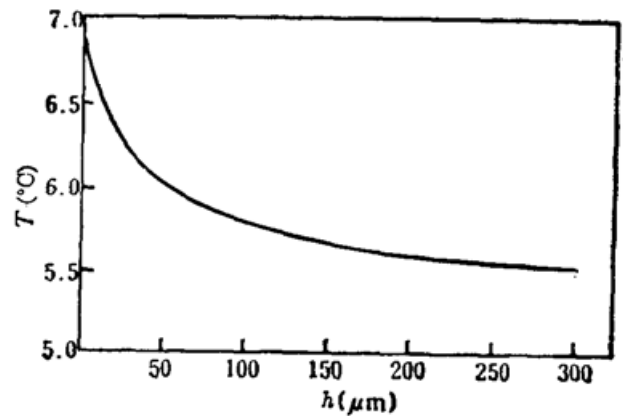


Fig. 4 Relationship between the temperature rise at the centre of 10-strip laser array and the film thickness

参 考 文 献

- 1 W. Nakwaski, *Sov. J. Quant. Electr.*, **14**, 266 (1984)
- 2 E. M. Garmire *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-20**, 1277 (1984)
- 3 M. T. Tavis *et al.*, *Electr. Lett.*, **20**, 689 (1984)
- 4 W. Nakwaski, *Electr. Lett.*, **22**, 1169 (1986)
- 5 C. B. Swan, *Proc. IEEE*, **55**, 1617 (1967)
- 6 Josephus A. M. Peters, U. S. Patent 4800002 filed Mar. 21, 1988 and granted Jan. 24, 1989
- 7 船本宏幸と鈴木美彦, 特開昭63~224048 (1987)
- 8 H. S. Carslaw *et al.*, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. (Oxford U. P., London, 1959), Chap. 5