

InSb 红外双稳器件参数的优化设计

崔成武 龙爱群 孙德贵

(山东大学光学系)

摘要——本文用定态方程数值计算方法研究了 InSb 半导体双稳器件的参数优化设计问题。

一、定态方程和透射定态曲线

本文研究的双稳器件为 77K 的 InSb 薄片, 进行数值计算的基础是双稳定态方程^[1~4]:

$$\alpha = y[1 + F \sin^2(y + \delta)]. \quad (1)$$

这里,

$$\alpha = (2\pi n_2 L / \lambda) I_0 / A, \quad (2)$$

$$y = (2\pi n_2 L / \lambda) I_T / C \quad (3)$$

$$= (2\pi n_2 L / \lambda) (I_0 - I_R) / B, \quad (4)$$

$$A = \alpha L (1 - R_a)^2 / [(1 - R_F)(1 + R_B e^{-\alpha L})(1 - e^{-\alpha L})], \quad (5)$$

$$B = \alpha L (1 - R_a^2 / R_F) / [(1 + R_B e^{-\alpha L})(1 - e^{-\alpha L})], \quad (6)$$

$$C = \alpha L (1 - R_B) e^{-\alpha L} / [(1 + R_B e^{-\alpha L})(1 - e^{-\alpha L})], \quad (7)$$

$$F = 4R_a / [(1 - R_a)^2], \quad (8)$$

$$R_a = \sqrt{R_F R_B e^{-\alpha L}}. \quad (9)$$

以上各式中 I_0 、 I_T 和 I_R 分别为入射、透射和反射光强, α 为线性吸收系数, L 为 InSb 薄片厚度。 R_F 、 R_B 分别为薄片前表面和后表面的光强反射率, δ 为 InSb 薄片形成的 F-P 谐振腔的初失调, 它本应包括前后表面反射所引起的位相变化, 但本文中只简单地令 $\delta = 2\pi n_0 L / \lambda$ 。

77K InSb 材料的参数为: 线性吸收系数 $\alpha = 80 \text{ cm}^{-1}$; 线性部分折射率 $n_0 = 4$; 其非线性部分折射率为 $n_2 I$, 其中 I 为 InSb 内的光强, $n_2 = -3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{W}$, 垂直入射激光

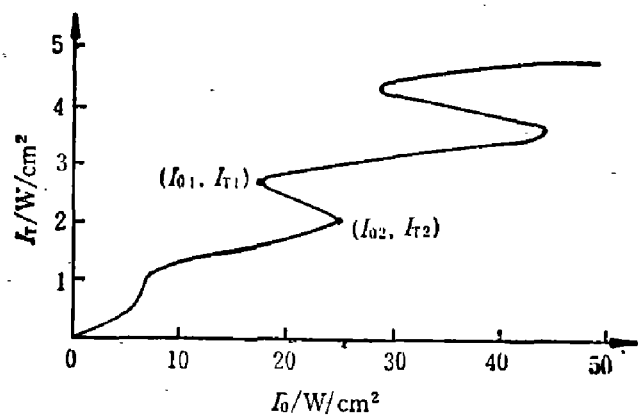


图1 $L=135 \mu\text{m}$ 、 $R_F=0.4$ 、 $R_B=0.5$ 时的透射定态曲线

Fig. 1 Transmissive steady state curve for $L=135 \mu\text{m}$, $R_F=0.4$, $R_B=0.5$.

波长 $\lambda = 5.277 \mu\text{m}$ 。

我们选择定态方程中 L 、 R_F 和 R_B 三个参数作为器件工艺中可以控制的参数、对不同的 L 、 R_F 和 R_B 值, 用计算机根据定态方程描绘出透射定态曲线和反射定态曲线。图 1 是典型的透射定态曲线。多数定态曲线在出现 S 形的双稳区之前, 先出现一个或几个台阶形, 即这些双稳系统具有光学微分放大和光学限幅的性能。并且, 一个器件一般都不止有一个 S 形双稳区, 而是随着输入光强 I_0 的增加接连出现几个 S 形。有时相邻两个 S 形双稳区的输入光强还可出现互相重叠现象, 即出现多稳态。

二、参数 L 、 R_F 和 R_B 的优化设计

我们特别关注的是透射定态曲线中左边第一个 S 型双稳区, 因为产生这个双稳区所需要的输入光强最小。对这一 S 型双稳区, 我们将其左右两个拐点的坐标定为 (I_{01}, I_{T1}) 和 (I_{02}, I_{T2}) , 参看图 1。 I_{02} 为双稳器件的工作光强, $\Delta I_0 = I_{02} - I_{01}$ 为双稳区的开关(输入光强)范围, $\Delta I_T = I_{T1} - I_{T2}$ 为双稳区输出光强的变化幅度(也称调制幅度), 这些参量都可作为表征双稳器件性能优劣的指标。在研制透射型 InSb 双稳器件时, 通常选择适当的 L 、 R_F 和 R_B 值, 使得 I_{02} 较小, 同时使 ΔI_0 值适当, 而 ΔI_T 则应尽可能大。本文的目的是通过数值计算了解 I_{02} 、 ΔI_0 、 I_{T2} 与 ΔI_T 如何随 L 、 R_F 和 R_B 的变化而变化, 从而为优化设计 L 、 R_F 、 R_B 提供理论依据。

由于透射定态曲线在双稳区呈 S 形, S 形两个拐点上的切线方向与纵坐标轴平行, 因此, 拐点坐标应同时满足式(1)和 $\frac{dx}{dy} = 0$ 。 x 、 y 则由式(2)、(3)定义。由式(1)得:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dY} &= \frac{d}{dY} \{Y [1 + F \sin^2(Y + \delta)]\} \\ &= 1 + F \sin^2(Y + \delta) + 2FY \sin(Y + \delta) \cos(Y + \delta), \end{aligned}$$

令: $\frac{dX}{dY} = 0$, 则得

$$Y = -\frac{1 + F \sin^2(Y + \delta)}{2F \sin(Y + \delta) \cos(Y + \delta)},$$

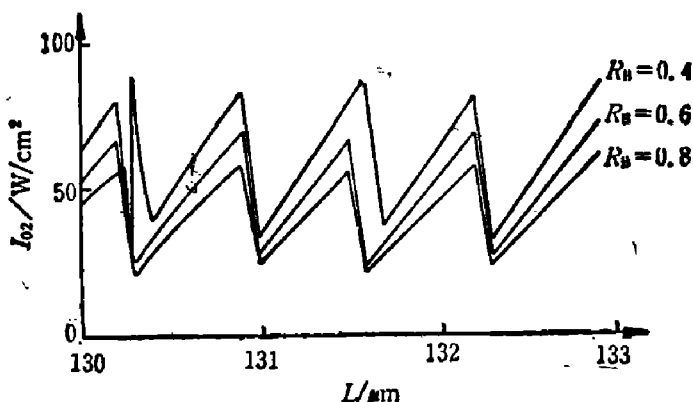


图 2 $R_F = 0.9$ 、 R_B 取不同值时 I_{02} 随 L 的变化曲线

Fig. 2 I_{02} vs L curves for $R_F = 0.9$ and different R_B 's.

再令:

$$Y + \delta = \psi, \quad (10)$$

得

$$Y = -\frac{1 + F \sin^2 \psi}{2F \sin \psi \cos \psi}. \quad (11)$$

对于给定的一组 L 、 R_F 和 R_B 值, 用计算机数值计算求解式(10)和式(11), 求得透射定态曲线中左边第一个 S 形双稳区的两个拐点的 y 值, 将求得的 y 值代入式(1)可得到相应的 x 坐标, 然后由式(2)或式(3)算出 I_{01} 、 I_{T1} 和 I_{02} 、 I_{T2} , 从而得到 ΔI_0 与 ΔI_T 。

图 2~5 分别给出了 I_{02} 、 ΔI_0 、 I_{T2} 及 ΔI_T 变化的典型曲线。可以看出, 这 4 个参数值均

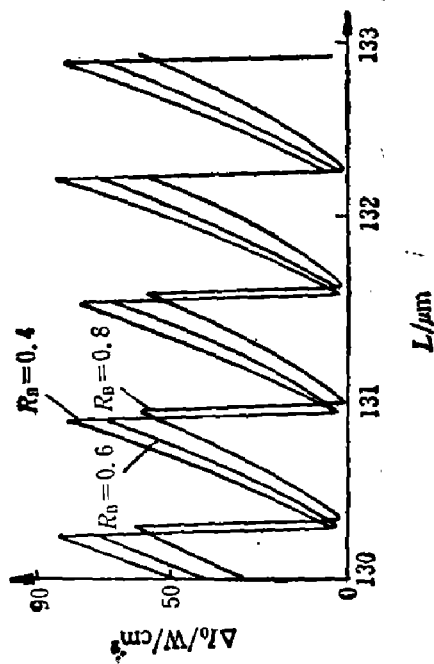


图3 $R_F=0.9$, R_B 取不同值时 ΔI_0 随 L 的变化曲线
Fig. 3 ΔI_0 vs L curves for $R_F=0.9$ and different R_B 's.

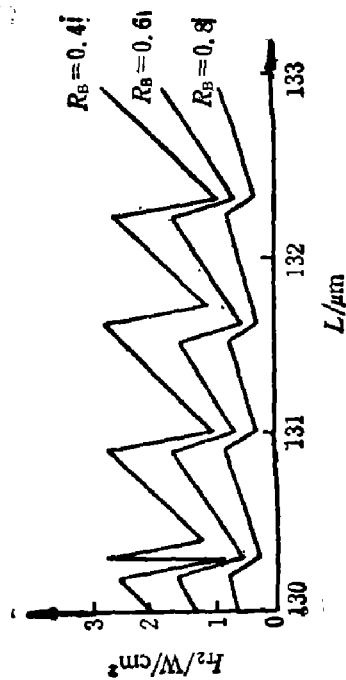


图4 $R_F=0.9$, R_B 取不同值时 I_{T_2} 随 L 的变化曲线
Fig. 4 I_{T_2} vs L curves for $R_F=0.9$ and different R_B 's.

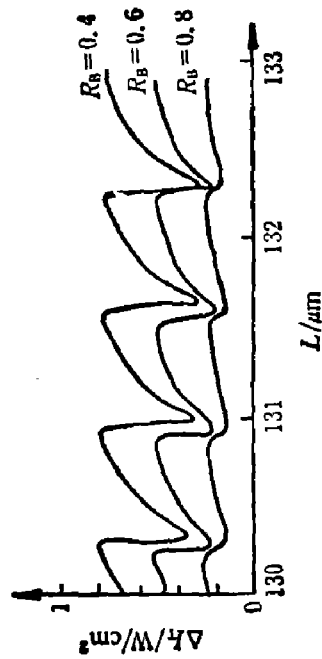


图5 $R_F=0.9$, R_B 取不同值时 ΔI_T 随 L 的变化曲线
Fig. 5 ΔI_T vs L curves for $R_F=0.9$ and different R_B 's.

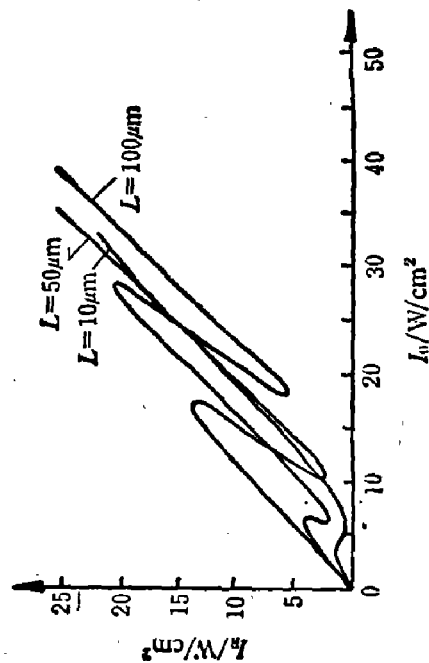


图6 $R_F=0.4$, $R_B=0.5$, L 取不同值时的反射定态曲线
Fig. 6 Reflective steady state curves for $R_F=0.4$, $R_B=0.5$ and different L 's.

随 L 作周期变化, 周期不到 $1\mu\text{m}$ 。因此, 欲控制器件的工作光强 I_{02} 、开关范围 ΔI_0 及输出光强的调制幅度 ΔI_T 等参量, 必须将器件厚度的精确度控制在 $1\mu\text{m}$ 以内, 否则器件的 I_{02} 、 ΔI_0 等指标将是该器件各部分厚度所对应值的平均值。不同器件的厚度如果在微米数量级上参差不齐, 它们的工作参数也将参差不齐。

表 1 列出了对应于不同的 R_F 和 R_B , L 在微米量级上的变化所对应的 ΔI_0 最大范围 $\Delta I_{0\text{max}}$ 及 ΔI_T 最大和最小范围 $\Delta I_{T\text{max}}$ 、 $\Delta I_{T\text{min}}$ 。表 2 列出了当 $L=130\mu\text{m}$ 时, 不同的 R_F 、 R_B 值所对应的 I_{02} 、 ΔI_0 、 I_{T2} 、 ΔI_T 值。

表 1 对于不同的 R_F 和 R_B , L 的变化所对应的 $\Delta I_{0\text{max}}$ 、 $\Delta I_{T\text{max}}$ 及 $\Delta I_{T\text{min}}$ 值*

Table 1 $\Delta I_{0\text{max}}$ 、 $\Delta I_{T\text{max}}$ and $\Delta I_{T\text{min}}$ values corresponding to variation of L for different R_F and R_B .

R_B	$R_F=0.3$			$R_F=0.5$			$R_F=0.9$		
	$\Delta I_{0\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{min}}$	$\Delta I_{0\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{min}}$	$\Delta I_{0\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{max}}$	$\Delta I_{T\text{min}}$
0.4	5.0	0.76	0.26	11.0	0.76	0.30	82.0	0.80	0.34
0.6	4.5	0.48	0.20	9.0	0.46	0.18	79.0	0.52	0.24
0.8	4.0	0.26	0.10	8.0	0.24	0.14	60.0	0.26	0.16

* 各参数均以 W/cm^2 为单位。

表 2 $L=130\mu\text{m}$ 时不同的 R_F 、 R_B 所对应的 I_{02} 、 ΔI_0 、 I_{T2} 、 ΔI_T 的值*

Table 2 I_{02} 、 ΔI_0 、 I_{T2} and ΔI_T values corresponding to different R_F and R_B for $L=130\mu\text{m}$.

R_B	$R_F=0.3$				$R_F=0.5$				$R_F=0.9$			
	I_{02}	ΔI_0	I_{T2}	ΔI_T	I_{02}	ΔI_0	I_{T2}	ΔI_T	I_{02}	ΔI_0	I_{T2}	ΔI_T
0.4	12.0	3.0	2.0	0.48	16.0	5.0	2.2	0.56	62.5	48.0	2.0	0.70
0.6	11.0	2.5	1.3	0.36	14.0	4.0	1.4	0.40	50.0	40.0	1.3	0.48
0.8	10.0	2.0	0.6	0.20	12.0	3.0	0.6	0.20	45.0	30.0	0.6	0.24

* 各参数均以 W/cm^2 为单位。

从表 1、表 2 以及图 2~5 可得出以下几点结论: (1) R_F 值不变, 增加 R_B 能使 I_{02} 相对下降。适当降低器件前表面反射率 R_F 并适当提高后表面反射率 R_B , 能使器件的工作光强 I_{02} 变小。(2) 开关范围随 R_F 与 R_B 而异, 主要取决于 R_F , 当 R_F 小到 0.3 时, 最大开关范围 $\Delta I_{0\text{max}}$ 只有几个 W/cm^2 ; 当 $R_F=0.9$ 时, 最大开关范围 $\Delta I_{0\text{max}}$ 可达 $80\text{W}/\text{cm}^2$ 。(3) 输出光强 I_{T2} 受 R_F 的影响并不大, R_B 增加使 I_{T2} 相应地减小。(4) R_F 对 ΔI_T 的影响不大, R_B 增加时 ΔI_T 减小, ΔI_T 最大可达 $0.8\text{W}/\text{cm}^2$, 最小时只有 $0.2\text{W}/\text{cm}^2$ 。

三、反射型 InSb 红外双稳器件的定态曲线

图 6 为根据式 (1)、(2)、(4) 算得的反射型 InSb 双稳器件的定态曲线。对反射型双稳曲线请参看参考文献 [3]。

致谢——本文工作是在陈继述、丁兰英两位老师指导下完成的, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Miller D. A. B, *IEEE. J. Quantum Electron.*, **QE-17**(1981), 312.
- [2] Wherrett B. S. *IEEE. J. Quantum Electron.*, **QE-20**(1984), 646.
- [3] Miller A., Parry G. and Daley R., *IEEE. Quantum Electron.*, **QE-20**(1984), 710.
- [4] 陈继述, 1985年中国光学学会年会论文摘要汇编, p. 192.

OPTIMAL DESIGN OF PARAMETERS OF InSb INFRARED BISTABLE DEVICES

CUI CHENGWU, LONG AIQUN, SUN DEGUI

(*Department of Optics, Shandong University*)

ABSTRACT

Using steady state equation, the problem of optimal design of parameters of InSb infrared bistable devices is studied with digital calculation method.