

表面复合对 HgCdTe 光导器件的影响

胡燮荣 刘兆鹏 刘雪兰 尹红 王诚庆

(山东大学光学系)

摘要——本文用我们曾导出的探测率 D_λ^* 公式计算了表面复合对 HgCdTe 光导器件的影响。计算结果表明：对 77 K、8~14 μm 和 300 K、3~5 μm HgCdTe 光导器件，表面复合速度应降到 10^3 cm/s 以下，否则， D_λ^* 将明显下降。随表面复合速度的增加， D_λ^* 下降，而最佳厚度增大。本文计算得到了这三者之间的关系。

一、引言

表面复合对光导器件性能的影响大于对光伏器件的影响^{[1],[2]}，我们曾计算了表面复合对 InSb 光导器件性能的影响^[3]，Kinch^[4] 和汤定元^[5] 都指出，对于 HgCdTe 光导器件，表面复合速度应低于 10^3 cm/s ，否则，器件性能将受到很大影响。

此外，参考文献[3]和[5]的计算均表明，当表面复合速度增大时，不仅探测率 D_λ^* 下降，而且，其最佳厚度也增大。

为了解表面复合对 HgCdTe 光导器件性能影响的程度，了解在不同表面复合速度值时如何选取器件厚度，我们进行了计算。

二、基本公式

参考文献[6]曾导出了本征光电导器件的较普遍的 D_λ^* 公式，推导中取消了无限吸收的限制，考虑了表面复合的影响，并计及了热噪声及产生-复合噪声。所得 D_λ^* 公式如下：

$$D_\lambda^* = \frac{\mathcal{R}_\lambda}{V_N} \sqrt{hw\Delta f} = \frac{e\eta(1-r)\mu_e\left(1+\frac{1}{b}\right)\rho_0\tau_{PC}\mathcal{E}}{h\nu d\left(4kT\frac{1}{P_D} + G^2\frac{1}{d}\right)^{1/2}(L^2\alpha^2-1)}, \quad (1)$$

式中

$$\mathcal{R}_\lambda = \frac{e\eta(1-r)\mu_e\left(1+\frac{1}{b}\right)\tau_{PC}\rho_0\mathcal{E}E_0}{h\nu dw(L^2\alpha^2-1)}, \quad (2)$$

$$V_N = (V_J^2 + V_{g-r}^2)^{1/2}, \quad (3)$$

$$\mathcal{E} = L^2\alpha^2[\psi_1(d)(e^{d/L}-1) + \psi_2(d)(e^{-d/L}-1)] + (e^{-\alpha d}-1), \quad (4)$$

$$\psi_1(d) = \frac{\left(1 + \frac{s_1 \tau_n}{L^2 \alpha}\right) \left(1 - \frac{s_2 \tau_n}{L}\right) e^{-d/L} - \left(1 - \frac{s_2 \tau_n}{L^2 \alpha}\right) \left(1 + \frac{s_1 \tau_n}{L}\right) e^{-\alpha d}}{2 \left[\left(1 + \frac{s_1 s_2 \tau_n^2}{L^2}\right) \sinh \frac{d}{L} + \left(\frac{s_1 \tau_n}{L} + \frac{s_2 \tau_n}{L}\right) \cosh \frac{d}{L} \right]}, \quad (5)$$

$$\psi_2(d) = \frac{\left(1 - \frac{s_2 \tau_n}{L^2 \alpha}\right) \left(1 - \frac{s_1 \tau_n}{L}\right) e^{-\alpha d} - \left(1 + \frac{s_1 \tau_n}{L^2 \alpha}\right) \left(1 + \frac{s_2 \tau_n}{L}\right) e^{d/L}}{2 \left[\left(1 + \frac{s_1 s_2 \tau_n^2}{L^2}\right) \sinh \frac{d}{L} + \left(\frac{s_1 \tau_n}{L} + \frac{s_2 \tau_n}{L}\right) \cosh \frac{d}{L} \right]}. \quad (6)$$

在以上等式中, \mathcal{R}_λ 为响应率, V_N 为器件噪声, e 为电子电量, η 为量子效率, r 为反射系数, μ_s 为电子迁移率, b 为电子迁移率 μ_s 及空穴迁移率 μ_n 之比, ρ_0 为电阻率, h 为普朗克常数, ν 为信号光频率, T 为绝对温度, P_D 为单位面积耗散功率, α 为吸收系数, l 、 w 、 d 分别为器件的长宽厚, Δf 为带宽, s_1 及 s_2 分别为前后表面的表面复合速度, τ_n 为电子寿命, V_J 为热噪声, V_{g-r} 为产生-复合噪声, G 与产生-复合噪声有关, L 为双极扩散长度。 L 的表式

$$L = (D_e \tau_{PEM})^{1/2} \left(\frac{1+c}{1+bc} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

τ_{PC} 及 τ_{PEM} 分别为光电导及光电磁响应时间, 即

$$\tau_{PC} = \frac{\tau_n + (\tau_p/b)}{1 + (1/b)}, \quad (8)$$

$$\tau_{PEM} = \frac{\tau_n + C\tau_p}{1+c}. \quad (9)$$

在式(7)~(9)中, τ_p 为空穴寿命, D_e 为电子扩散系数, C 为无光照时电子浓度 n_0 与空穴浓度 p_0 之比。

参考文献[4]及[7]都曾指出, 对于 HgO₂Te 材料, $b \gg 1$, 而且, 对本文所述及的近本征材料, 上述两篇文献均指出, $\tau_n = \tau_p$, 因此, 对这类 HgO₂Te 材料, 由式(7)、(8)及(9)可得

$$\tau_{PC} = \tau_{PEM} = \tau_n = \tau, \quad (10)$$

$$L = (D_e \tau)^{1/2} \left(\frac{1+c}{1+bc} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

关于电阻率 ρ_0 , 其公式为

$$\rho_0 = \frac{1}{e \mu_s \left(n + \frac{p}{b} \right)}. \quad (12)$$

对 $\tau_n = \tau_p$ 的近本征材料, 其产生-复合噪声为^{[8], [9]}

$$V_{g-r} = \frac{2V_0}{(lwd)^{1/2}} \frac{(b+1)}{(bn+p)} \left(\frac{np}{n+p} \right)^{1/2} \tau^{1/2} (\Delta f)^{1/2} \quad (13)$$

因而

$$G = \frac{2(b+1)}{(bn+p)} \left(\frac{np}{n+p} \right)^{1/2} \tau^{1/2}. \quad (14)$$

在式(12)~(14)中, n 及 p 应计及背景辐射的激发, 即

$$n = n_0 + n_\phi, \quad (15)$$

$$p = p_0 + n_\phi, \quad (16)$$

n_ϕ 为背景激发的载流子浓度。热噪声为

$$V_J = (4kTR\Delta f)^{1/2} = \left(4kT \frac{V_0^2}{P_D l w} \Delta f \right)^{1/2}, \quad (17)$$

R 为器件电阻, V_0 为偏压。

三、计算结果

本文应用以上公式对 77 K 工作的 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ $\text{Hg}_{0.80}\text{Cd}_{0.20}\text{Te}$ 光导器件及室温工作的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ $\text{Hg}_{0.74}\text{Cd}_{0.26}\text{Te}$ 光导器件作了具体计算。

我们取 $\alpha = 1 \times 10^3\ \text{cm}^{-1}$ [10], [11], [4], 并由参考文献 [7] 的介电常数值, 取 $r = 0.36$ 。此外, 在计算中, 我们取 $\eta = 1$, $\Delta f = 1\ \text{Hz}$, 并令 $s_1 = s_2 = s$ 。下面分别就上述两种器件进行讨论。

1. 77 K 工作的 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ $\text{Hg}_{0.80}\text{Cd}_{0.20}\text{Te}$ 光导器件

对该器件, 由参考文献 [4] 的数据及 [11] 的图 9 得 $n_0 = 3 \times 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$, 参考文献 [4]、[12]、[13]、[14] 均报道 μ_e 约为 $10^5\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 我们取 [4] 给出的值, 即 $\mu_e = 1.5 \times 10^5\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, [4] 及 [15] 列出的 μ_h 分别为 $600\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 及 $500\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 我们取 $600\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 其余各参量的数值, 我们也均取参考文献 [4] 中的值, $n_0 = 4 \times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$, 2π 视场 300 K 背景的 $n_0 = 1.15 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$, $P_D = 10\ \text{W}/\text{cm}^2$, $\tau_n = \tau_p = \tau = 1.35 \times 10^{-6}\ \text{s}$ 。此外, 我们取 $l = w = 0.01\ \text{cm}$, 截止波长 $\lambda_0 = 12.4\ \mu\text{m}$ 。将以上数据代入前面所列公式计算, 可得 \mathcal{R}_λ , V_J , V_{g-r} , V_N , D_λ^* 随 s 及 d 变化的规律, 我们将计算所得数据示于图 1、2 中。

图 1 中的四条曲线, 其 s 值所对应的值分别为 0, 300, 500, $10^3\ \text{cm}/\text{s}$, 该图说明, 探测率 D_λ^* 随表面复合速度 s 的增大而明显下降, 当 s 由 0 增至 $10^3\ \text{cm}/\text{s}$ 时, D_λ^* 的最大值也将下降到 50% 以下; 图 1 还表明, 对不同的 s 值应取不同的厚度 d 才能使 D_λ^* 最大。当 $s \neq 0$ 时, d 应取 $12\ \mu\text{m}$, 这与参考文献 [5] 的结果一致; 当 $s = 500\ \text{cm}/\text{s}$ 时, d 应取 $28\ \mu\text{m}$; 当 s 大至 $10^3\ \text{cm}/\text{s}$ 时, d 应取 $37\ \mu\text{m}$ 。

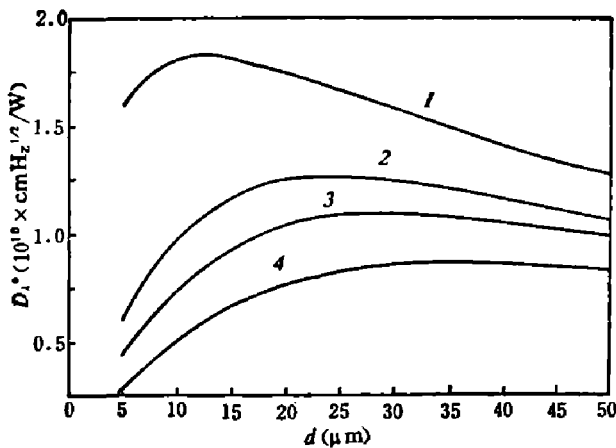


图 1 77 K、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ HgCdTe 光导探测器的探测率 D_λ^* 与器件厚度 d 的关系

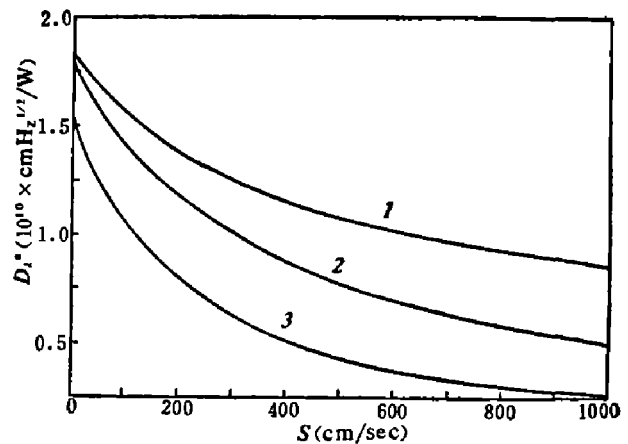


图 2 77 K、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ HgCdTe 光导探测器的探测率 D_λ^* 与表面复合速度 s 的关系

图 2 为 D_λ^* 随 s 的变化曲线, 曲线 1 对应于不同 s 下均取最佳厚度, 曲线 2 对应于固定器件厚度为 $10\ \mu\text{m}$, 曲线 3 对应于固定器件厚度为 $5\ \mu\text{m}$ 。这三条曲线表明, 器件厚度愈小, 随着 s 的增加, D_λ^* 下降愈快。若器件厚度为 $5\ \mu\text{m}$, 则 s 由 0 增至 $10^3\ \text{cm}/\text{s}$ 时, D_λ^* 将下降 84%; 当 $d = 10\ \mu\text{m}$ 时, 在相同的 s 变化范围内, D_λ^* 下降 72%; 而当我们均取最佳厚度时, 同样的 s 变化范围, D_λ^* 只下降 53% 左右。

我们对 D_λ^* 的计算结果与许多作者报道的结果相符, 应取的器件厚度与参考文献 [12] 及 [14] 报道的结果也大致相符。

2. 室温工作的 $3\sim 5\mu\text{m Hg}_{0.74}\text{Cd}_{0.26}\text{Te}$ 光导器件

对该器件, 我们由参考文献 [16]、[17]、[18] 的数据, 取 $n=p=n_i=8\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, 由 [16] 及 [18] 取 $\mu_e=1\times 10^4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 由参考文献 [11] 对 $x=0.26$ 所列的 b 值范围, 取 $b=100$, 由 [16] 取 $\tau=1\times 10^{-6}\text{s}$, 并由 [16] 图 2 的最佳偏流及器件的其它参量算得 P_D 约 $0.5\text{W}/\text{cm}^2$ 。此外, 我们取 l 及 w 均为 0.05cm , $\lambda_0=5\mu\text{m}$ 。计算结果分别示于图 3, 4 中。

图 3 中的四条曲线所对应的 s 值分别为 $0, 300, 500, 10^3\text{cm}/\text{s}$, 该图表明, D_λ^* 随 s 的增大而减小, 当 s 由 0 增至 $10^3\text{cm}/\text{s}$ 时, D_λ^* 的极大值下降约 50% 。对该器件, 当 $s=0$ 时, d 应取 $11\mu\text{m}$; 当 $s=500\text{cm}/\text{s}$ 时, d 应取 $21\mu\text{m}$; 当 s 增至 $10^3\text{cm}/\text{s}$ 时, 则 d 应取 $26\mu\text{m}$ 。

图 4 中也画出了三条曲线, 与图 2 一样, 曲线 1 对应于不同 s 下均取最佳厚度, 曲线 2 对应于固定厚度为 $10\mu\text{m}$, 曲线 3 对应于固定厚度为 $5\mu\text{m}$, 其讨论与图 2 类似, 不再重复。

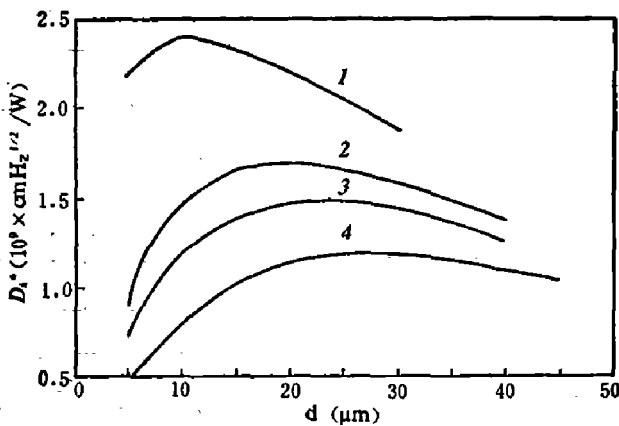


图 3 室温 $3\sim 5\mu\text{m HgCdTe}$ 光导探测器的探测率 D_λ^* 与器件厚度 d 的关系

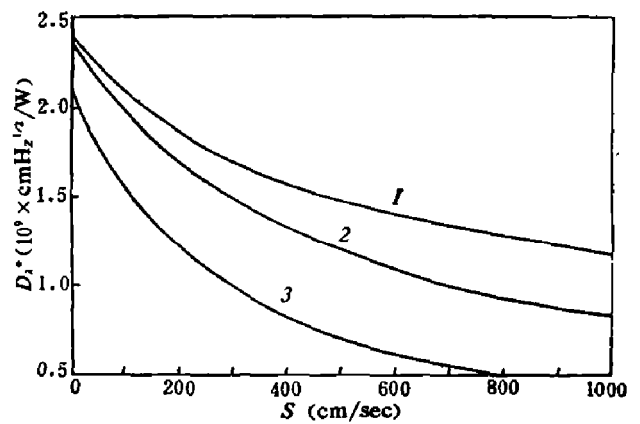


图 4 室温 $3\sim 5\mu\text{m HgCdTe}$ 光导探测器的探测率 D_λ^* 与表面复合速度 s 的关系

将本文计算结果与参考文献 [3] 中结果相比可知, 室温 $3\sim 5\mu\text{m HgCdTe}$ 光导器件的 D_λ^* 比室温 $3\sim 5\mu\text{m InSb}$ 光导器件高, 在相同的 $s=10^3\text{cm}/\text{s}$ 条件下, HgCdTe 器件比 InSb 器件的 D_λ^* 约高一倍左右。

四、结 论

我们的计算表明:

对 77K 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 及室温、 $3\sim 5\mu\text{m HgCdTe}$ 光导器件, 表面复合速度应降到 $10^3\text{cm}/\text{s}$ 以下, 否则, D_λ^* 将明显下降。这与参考文献 [1]、[4] 中指出的数据一致。

在厚度 $d>5\mu\text{m}$, 表面复合速度 $s<10^3\text{cm}/\text{s}$ 范围内, 虽然随 d 的减小, 响应率 \mathcal{R}_λ 增加, 但由于噪声 V_N 也随之增加, 因而 D_λ^* 将由上述两者的变化快慢所决定。不同的 s 值, 其最佳厚度不同。

若表面复合速度较大, 则必须取较大的器件厚度, 否则, D_λ^* 下降更甚。

对 77K 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的 HgCdTe 光导器件, 当处于 2π 视场、 300K 的背景下, 则其电阻率及产生-复合噪声主要由背景激发的 n_0 所决定, 因而对该器件, 采用冷屏蔽、小视场, D_λ^* 将明显提高。

在我们计算中, 已计及反射损失, 若采取增透技术, D_λ^* 将提高。对 77K 、 $8\sim 14\mu\text{m}$ 的器

件,在采取了增透技术,并使表面复合速度降到 300 cm/s 以下时,我们的计算数据表明,器件性能将接近背景限。

参 考 文 献

- [1] 汤定元,红外物理与技术, (1976), 4—5: 53.
- [2] 胡燮荣,山东大学学报(自然科学版), (1980), 4: 64.
- [3] 胡燮荣,山东大学学报(自然科学版), (1979), 1: 108.
- [4] Kinch M. A. et al; *Infrared phys.* **15**(1975), 111
- [5] 胡燮荣,山东大学学报(自然科学版), (1975), 1: 50.
- [6] 胡燮荣,电子学报, (1981), 2: 49
- [7] Long D., Schmit J. L., *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 5, New York: Academic press 1970.
- [8] Van Vliet K. M. *Appl. opt.* **6**(1967), 1145.
- [9] Van Der Ziel A., *Noise: Sources, Characterization, Measurement*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, N. J, 1970.
- [10] Kruse P. W. et. al; *Proc. 3rd Intern Conf. Photocond.* 1969, 223.
- [11] 汤定元,红外物理与技术, (1974), 6: 345.
- [12] 徐国森,红外物理与技术, (1980), 2: 12.
- [13] 陈记安,杨焕文,激光与红外, (1980), 5: 1.
- [14] 罗元海,赵乐敏,激光与红外, (1981), 5: 25.
- [15] A. Kalodny et al; *Infrared phys.* **22** (1982) 1: 9.
- [16] 徐国森,红外物理与技术, (1974), 1: 1.
- [17] 徐国琴等,红外物理与技术, (1976), 4—5: 46.
- [18] 谢茂碧等,激光与红外, (1981), 5: 18.

THE EFFECTS OF SURFACE RECOMBINATION ON HgCdTe PHOTOCON

HU XIERONG, LIU ZHAOPENG, LIU XUELAN, YIN HONG, WANG CHENGQING.

(Department of Optics, Shandong University)

ABSTRACT

In this paper the effects of surface recombination on HgCdTe photocon are calculated by using the formula of detectivity D_{λ}^* , which the authors obtained previously.

Our results show that it is necessary to reduce the surface recombination velocity down to 10^3 cm/s for both 77 K, $8\sim 14\ \mu\text{m}$ and 300K, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ HgCdTe photocon. Otherwise the D_{λ}^* will be decreased significantly. It is also shown that as the surface recombination increases, the detectivity will decrease and the optimum thickness will increase. The relation between them is obtained in this paper.