

文章编号: 1001-4322(2005)07-1008-05

激光辐照 InSb(PV) 型探测器的热损伤*

赵建君¹, 宋春荣¹, 张灵振¹, 牛燕雄²

(1. 军械工程学院 理化教研室, 河北 石家庄 050003; 2. 军械工程学院 光学教研室, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 在建立高斯型连续激光辐照 InSb(PV)型探测器物理模型的基础上,采用近似解析解的形式计算了圆柱形 InSb 靶板的 2 维温度场。通过数值分析得出了在激光辐照时,InSb(PV)型探测器的温升与时间的关系,并计算出相应的损伤阈值。研究表明,在强激光连续辐照下,半导体材料 InSb 会发生熔融损伤,且最早发生于迎光面的光斑中心,激光的功率密度越高,造成破坏所需要的时间越短;对于一定厚度胶层的 InSb(PV)型探测器,只有强度大于一定阈值的连续激光辐照才可能发生熔融损伤,越薄的胶层对应的损伤阈值越大。为了增加 InSb(PV)型探测器抗激光辐照能力,应该减小胶层厚度。采用该理论计算得到不同功率下的 InSb 熔融时间为 1.57 s 和 4.54 s,与实验得到的 2 s 和 4~5 s 基本吻合。

关键词: 热损伤; InSb(PV)型探测器; 高斯光束; 损伤阈值

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

光电探测器在受到强激光辐照时,由于吸收能量而温度升高,导致性能的暂时下降,严重的会形成永久性破坏^[1~13]。陆启生^[5~10]等人从实验和理论上分别讨论了连续激光辐照 InSb(PV)型探测器的破坏效应;蒋志平^[7]等建立的 1 维模型研究了 InSb(PV)型探测器温升计算以及胶层对破坏阈值的影响;强希文^[11~13]等讨论了半导体 InSb 材料的熔融破坏。但这些理论很少考虑到边界条件对温度分布和损伤阈值的影响,实验证明,InSb(PV)型探测器受到激光辐照时会出现 2 维的温度变化,而且易受周围环境的影响,所以,我们建立了更加接近实际的理论模型,在一定的近似条件下,得出符合实际情况的解析解,通过具体数值计算给出了损伤阈值与损伤时间的关系,特别是胶层厚度对损伤阈值和损伤时间的影响,并与相关的实验结果进行了对比。

1 理论模型

由于 InSb 晶体的禁带宽度窄,InSb(PV)型探测器一般在低温下工作,结构如图 1 所示。InSb(PV)型芯片用胶粘于装液氮的杜瓦瓶铜基座上,以保证达到热平衡时工作温度维持在约 77 K。

将 InSb(PV)型芯片看作厚度为 h ,半径为 b 的圆板模型,采用柱坐标,坐标原点在样品的激光入射表面中心, z 轴与激光照射方向一致。高斯型空间分布的连续激光束垂直照射到样品表面($z=0$)。从 $t=0$ 时刻激光开始照射样品,初始时样品温度均匀,记为 T_0 ,样品上表面、侧面绝热,下表面与胶层有热交换。

材料原子将吸收激光束能量,热运动加强,温度升高。但是,由于激光束能量分布的不均匀性,导致了材料内部的温升也是非均匀的。根据热传导理论,圆板形半导体 InSb 材料样品内部的温度场 $T(r, z, t)$ 满足热传导方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \eta I_0 e^{-r^2/a^2 - \beta z} \quad (1)$$

初始条件为

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

边界条件为

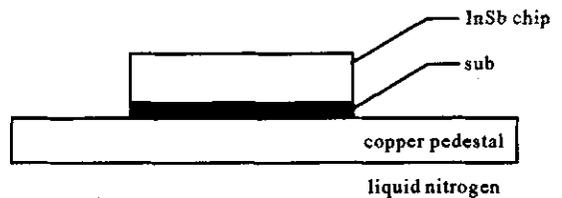


Fig. 1 Sketch map of InSb(PV) detector

图 1 InSb(PV)型探测器结构

* 收稿日期:2004-09-30; 修订日期:2005-03-21
作者简介:赵建君(1975—),男,硕士,讲师,从事光与物质的相互作用研究; E-mail:aynt@sohu.com。

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=h} = \alpha(T - T_s) \quad (3)$$

式中: T 为半导体 InSb 材料的温度; ρ 为材料的密度, 作为常数处理; λ 为导热系数; c_p 为比定压热容; η 为表面吸收率; β 为吸收系数; α 为表面传热系数; T_s 为与 InSb 材料接触胶层的表面温度; a 为高斯光斑半径; I_0 为高斯光斑中心处的光强。

为了能够得到 InSb 材料样品内部的温度场 $T(r, z, t)$ 的解析表达形式, 需要作出一些必要的近似。

设温度 T 由两部分组成: $T = T_1 + T_2$, 其中, T_1 满足热传导方程(1)、初始条件(2)和绝热边界条件, 相应的, T_2 满足热传导方程(1)的齐次方程。初始条件为

$$T \Big|_{t=0} = 0 \quad (4)$$

边界条件需要对式(3)进行一定的变形。由于胶层很薄, 而且 $T_1 \gg T_2$, 边界条件可以近似改写为

$$\frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T_2}{\partial r} \Big|_{r=b} = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad -\lambda_s \frac{\partial T_2}{\partial z} \Big|_{z=h} = -\lambda_s \frac{T_1 - T_0}{\Delta} \quad (5)$$

式中: λ_s 为胶层导热系数; Δ 为胶层厚度。

利用冲量定理和抛物位势理论, 对 T_1 和 T_2 分别进行解析求解, 得到

$$T = T_0 + \frac{\eta I_0}{\rho c_p} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \omega_m(b) R_n(z) S_{nm}(t) J_0\left(\frac{\mu_m r}{b}\right) + \sum_{m=0}^{\infty} \omega_m(b) S_{m0}(t) J_0\left(\frac{\mu_m r}{b}\right) z + \frac{a^2}{b^2} (1 - e^{-b^2/a^2}) t + \frac{1}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^t \frac{\omega_1(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{z^2}{4D(t-\tau)}} d\tau + \int_0^t \frac{\omega_2(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{(z-h)^2}{4D(t-\tau)}} d\tau \right] \quad (6)$$

式中: μ_m 是第一类一阶 Bessel 函数的根, $m=0, 1, 2, 3, \dots$; $D = \lambda/\rho c_p$, 是热扩散率; $R_n(z) = (-\beta z)^n/n!$ 。

$$\omega_m(b) = \frac{2}{b^2 J_0(\mu_m)} \begin{cases} \frac{a^2}{2} (1 - e^{-b^2/a^2}), & m = 0 \\ \left(\frac{b}{\mu_m}\right)^2 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^i \frac{(-2)^j \left(-\frac{b^2}{\mu_m^2}\right)^i \mu_m^{2i+1-j} J_{j+1}(\mu_m)}{(i-j)!}, & m \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{nm}(t) = \frac{1 - e^{-D[(\frac{\mu_m}{b})^2 + (\frac{n\pi}{h})^2]t}}{Dt[(\frac{\mu_m}{b})^2 + (\frac{n\pi}{h})^2]} \quad (8)$$

$$\omega_1(\tau) = \frac{\lambda_s \sqrt{D}}{\lambda \Delta} \int_0^\tau \frac{2D}{(\tau - \tau_s)} \frac{a^2}{b^2} (1 - e^{-b^2/a^2}) \tau_s e^{-\frac{h^2}{4D(\tau - \tau_s)}} d\tau_s \quad (9)$$

$$\omega_2(\tau) = -\frac{\lambda_s}{\lambda \Delta} \frac{2Da^2}{b^2} (1 - e^{-b^2/a^2}) \tau \quad (10)$$

2 数值计算结果及讨论

2.1 温度场分布

半导体 InSb 材料的物性参量见表 1。为与实验结果相比较, 取材料的结构参量为: 半径 $b = 0.152$ cm, 厚度 $h = 0.1$ cm。CO₂ 激光器输出的连续激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$, 功率 $P = 9.4$ W; 高斯光斑半径 $a = 0.2$ cm, 中心光强 $I_0 = 195.7$ W · cm⁻², 表面吸收率取 $\eta = 0.65$ 。取材料初始温度 $T_0 = 77$ K。对于胶层, 我们选用环氧树脂, 其热导率 $\lambda_s = 0.002$ W · cm⁻¹ · K⁻¹, 取厚度 $\Delta = 0.1$ cm。

表 1 半导体材料 InSb 的物性参量

Table 1 Physical parameters of InSb

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\lambda / (\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$c_p / (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	β / cm^{-1}	$T_{\text{melt}} / \text{K}$
5.78	0.36	0.097	22.53	798

图 2 给出了高斯光束照射 InSb(PV)型探测器时, 半导体材料 InSb 内部在 $t = 3$ s 时温升的 2 维分布情况。由图中可以看出: 在激光入射表面中心处 ($r = 0, z = 0$), 温度最高, 如果超过材料的熔点, 材料就会发生熔融破坏, 这种破坏是由中心开始的, 但是整体温差并不大, 其中在 r 平面不超过 1 K, z 轴不超过 5 K。分析其原因是由于高斯光束的能量分布特点是中心强度最大, 所以在 r 平面的光斑中心温升最快; InSb 材料的吸收系数 β 较

大,激光能量在介质内部随着深度的增加很快衰减,而且底面存在的散热因素导致能量损失,所以迎光面光斑中心温度上升最快。但是,InSb 的导热系数较大,传热较快,而且芯片整体的温差较小,所以不会因为热应力而发生解理,而是发生熔融损伤。图 3 给出了在考虑胶层散热(实线)和绝热边界条件(虚线)下表面中心温度与时间的关系曲线,可以看出:随着时间的增加,温度基本呈直线上升,而且考虑胶层的散热,其升温要比绝热边界条件情况下慢。这是由于随着辐照时间的增加,材料累积的能量增加,最终达到破坏所需限度,发生熔融损伤;由于 InSb(PV)型探测器的底面有能量向外传递,导致胶层散热能量累积速度比绝热边界条件进行得慢,相应的升温也缓慢。

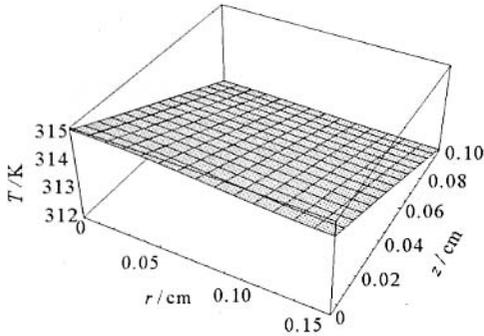


Fig. 2 Temperature rise distribution in InSb by Gaussian beam at $t=3\text{ s}$
图 2 $t=3\text{ s}$ 时的 2 维升温

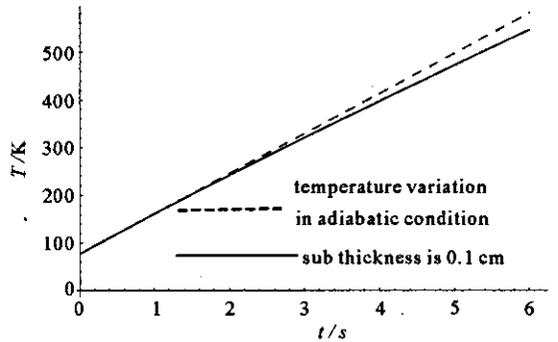


Fig. 3 Relation between temperature of surface center and time
图 3 表面中心温度与时间关系

2.2 激光损伤阈值

连续激光照射半导体材料 InSb 时,损伤形态表现为超过材料的熔点 T_{melt} 而形成熔融损伤。由前面的分析可以看出,温度的最大值出现在材料表面的光斑中心($r=0, z=0$)。若已知 T_{melt} , 就可以求出相应的熔融损伤功率密度 I_{th} 。

$$I_{\text{th}} = \frac{(T_{\text{melt}} - T_0)\rho c_p}{\eta} \left[\sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \omega_m(b) R_n(z) S_{m_n}(t) J_0\left(\frac{\mu_m r}{b}\right) + \sum_{m=0}^{\infty} \omega_m(b) S_{m_0}(t) J_0\left(\frac{\mu_m r}{b}\right) z + \frac{a^2}{b^2} (1 - e^{-b^2/a^2}) t + \frac{1}{2\sqrt{\pi D}} \int_0^t \frac{\omega_1(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{z^2}{4D(t-\tau)}} d\tau + \int_0^t \frac{\omega_2(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{(z-j)^2}{4D(t-\tau)}} d\tau \right]^{-1} \quad (11)$$

图 4 给出了绝热边界条件下(虚线)和胶层厚度为 0.05 cm 时(实线)熔融损伤功率密度 I_{th} 与时间的关系曲线,图 5 给出了不同胶层厚度(0.1 cm, 0.01 cm)时熔融损伤功率密度 I_{th} 与时间的关系曲线。由两图中可以看出:辐照时间越长,相应的熔融损伤功率密度 I_{th} 越小;同样功率的激光辐照时,在绝热边界条件下发生熔融损伤所需时间短;胶层厚度对熔融损伤功率密度阈值也是不可忽略的,胶层越薄,相同时间对应的熔融损伤功率密度阈值越高;对于一定厚度胶层的 InSb(PV)型探测器,只有强度大于一定阈值的连续激光的辐照才可能发生熔融损伤,胶层越薄其对应的阈值越大。

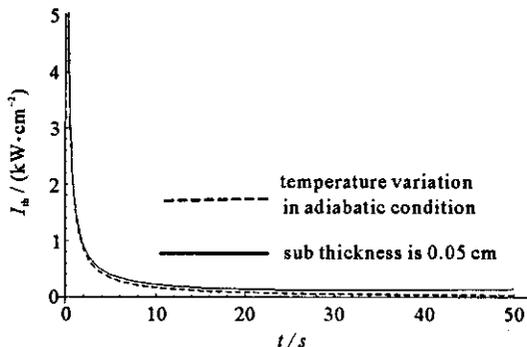


Fig. 4 Relation between I_{th} and time with different condition
图 4 不同条件下 I_{th} 与辐照时间关系

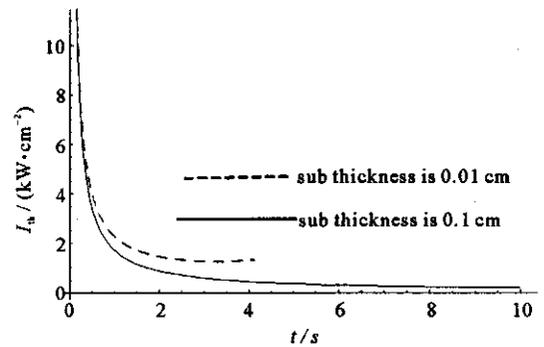


Fig. 5 Relation between I_{th} and time with different sub thickness
图 5 不同胶层厚度下 I_{th} 与辐照时间关系

上述现象的原因在于:要达到发生熔点时,需要积聚一定的能量,激光的功率密度越大,所需时间越短;积聚相同的能量时,在相同功率的激光辐照下,绝热边界条件下发生熔融损伤所需时间要比考虑到底面的散热导

致能量流失的时间短;由于胶层的热导率远小于 InSb 材料,对热传导起了热瓶颈的作用,胶层越厚,瓶颈效应越明显。薄胶层在底面散热所导致的能量损失速度快于厚胶层;不同胶层散热速度不同,对于熔融损伤功率密度 I_{th} 的影响也不同;在功率密度很高(大于 $2 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$)时,由于发生熔融损伤需要的时间很短(1 s 以内),底面的散热量相对较小,胶层厚度影响可以忽略不计;当在功率密度较低(小于 $1 \text{ kW} \cdot \text{cm}^{-2}$)时,发生熔融损伤需要的时间较长(大于 3 s),这时就必须考虑胶层厚度的影响,即胶层越薄,底面的散热效果越明显,相同时间对应的熔融损伤功率密度阈值越高;同时,对应一定的胶层厚度,当激光的功率密度小于某一数值,在材料还没有达到熔点时就会出现吸收能量速度与散热速度相等而不再出现温度的继续升高,从而也不会发生熔融损伤。在特定条件下($a=0.2 \text{ cm}$, $b=0.152 \text{ cm}$, $h=0.1 \text{ cm}$, $\lambda_s=0.002 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),对于使 InSb(PV)型探测器发生熔融损伤的连续激光强度最小阈值 I_{min} 与胶层厚度 Δ 的拟合关系为

$$I_{min}/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) = -813.77 + 768.026e^{0.01/(\Delta/\text{cm})} \quad (12)$$

对于不同的 InSb(PV)型探测器,改变程序中相应的值,可以得到相应的最小阈值 I_{min} 。图 6 给出了拟合关系(实线)和计算得到的(三角)最小阈值 I_{min} 的比较。

2.3 与实验结果的对比分析

半导体材料 InSb 的结构参量为:半径 $b=0.152 \text{ cm}$,厚度 $h=0.1 \text{ cm}$ 。胶层厚度 $\Delta=0.1 \text{ cm}$,材料初始温度 $T_0=77 \text{ K}$ 。 CO_2 激光器输出连续激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$,功率 $P=37.4 \text{ W}$,光斑面积为 12 mm^2 ,材料表面吸收率取 $\eta=0.65$ 。文献[7]给出了连续激光照射 InSb(PV)型探测器实验结果为 2 s,而我们的理论计算得到的时间为 1.57 s,与实验结论基本吻合。如果激光的功率为 $P=8.64 \text{ W}$,文献[6]给出了连续激光照射 InSb 实验结果为 4~5 s,而我们的理论计算得到的时间为 4.54 s,与实验结论基本吻合。

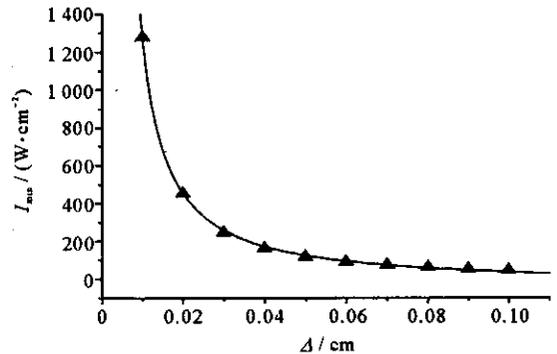


Fig. 6 Relation between I_{min} and sub thickness Δ

图 6 I_{min} 与胶层厚度 Δ 关系

3 结 论

通过建立激光辐照 InSb(PV)型探测器物理模型,得到了高斯型连续激光照射圆柱形靶材的 2 维温度场分布的解析解的形式。通过数值拟合,确定了半导体材料 InSb 的温升与时间的关系,并计算出相应的材料损伤阈值。研究表明,在强激光连续辐照下,InSb(PV)型探测器的半导体材料 InSb 会发生熔融损伤,且最早发生于迎光面;激光的功率密度越高,造成破坏所需要的时间越短。计算结果同时表明,胶层厚度会对损伤阈值产生极大的影响;对于一定厚度胶层的 InSb(PV)型探测器,只有强度大于一定阈值的连续激光辐照才能发生熔融损伤,胶层越薄对应的损伤阈值越大。为了提高激光破坏阈值,增加 InSb(PV)型探测器的激光对抗能力,应该减小胶层厚度。采用该理论计算得不同功率下的 InSb 熔融时间为 1.57 s 和 4.54 s,与实验得到的 2 s 和 4~5 s 基本吻合。

激光辐照 InSb(PV)型探测器物理模型同样适用于同类激光损伤效应研究及评估,为激光对抗和激光加固提供了理论参考。

参考文献:

- [1] Shen Z H, Zhang S Y, Lu J, et al. Mathematical modeling of laser induced heating and melting in solids[J]. *Optic and Laser Technology*, 2001, **33**:533—537.
- [2] Felter T E, Hrubesh L, Kubota A, et al. Laser damage probability studies of fused silica modified by MeV ion implantation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2003, **27**:72—79.
- [3] Ngoi B K A, Venkatakrishnan K, Lim E N L, et al. Effect of energy above laser-induced damage threshold in the micromachining of silicon by femtosecond pulse laser[J]. *Optic and Lasers in Engineering*, 2001, **35**:361—369.
- [4] 段晓峰, 牛燕雄, 张雏. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. 光学学报, 2004, **24**(8):1057—1061. (Duan X F, Niu Y X, Zhang C. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1057—1061)
- [5] 陈金宝, 陆启生, 钟海荣, 等. 连续波氧碘激光对光伏型碲化镉探测器的破坏阈值[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2):221—224. (Chen J

- B, Lu Q S, Zhong H R, et al. Damage threshold of CW coil to InSb(PV) detector. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2): 221—224)
- [6] 陈金宝, 陆启生, 舒柏宏, 等. CW CO₂ 激光对 PV 型 InSb 探测器的破坏效应[J]. 激光技术, 2002, **26**(1):47—49. (Chen J B, Lu Q S, Shu B H, et al. Damage effect of CW CO₂ laser on PV type InSb detector. *Laser Technology*, 2002, **26**(1):47—49)
- [7] 蒋志平, 陆启生, 刘泽金. 激光辐照 InSb(PV) 型探测器的温升计算[J]. 强激光与粒子束, 1990, **2**(2):247—251. (Jiang Z P, Lu Q S, Liu Z J. Calculation of temperature raise in InSb(PV) detector illuminated by laser beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 1990, **2**(2): 247—251)
- [8] 陆启生, 舒柏宏, 蒋志平, 等. 激光辐照 InSb 晶体表面产生的龟裂[J]. 强激光与粒子束, 1999, **11**(2):201—204. (Lu Q S, Shu B H, Jiang Z P, et al. The crack on InSb crystal surface under laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(2):201—204)
- [9] 曾交龙, 陆启生, 舒柏宏, 等. 1.06 μm 连续与脉冲激光对 GaAs 材料的联合破坏效应[J]. 强激光与粒子束, 1998, **10**(2):217—220. (Zeng J L, Lu Q S, Shu B H, et al. Combined damage effect of GaAs irradiated by 1.06 μm CW and pulse laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(2):217—220)
- [10] 舒柏宏, 侯静, 陆启生, 等. 砷化镓材料与激光相互作用的实验研究[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(1):40—42. (Shu B H, Hou J, Lu Q S, et al. Experimental study of the interaction between laser and GaAs. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(1):40—42)
- [11] 强希文, 刘峰, 张建泉, 等. 连续波激光辐照半导体 InSb 材料的熔融破坏[J]. 中国激光, 2000, **27**(4):372—376. (Qiang X W, Liu F, Zhang J Q, et al. An numerical simulation of the melt-threshold of InSb induced by CW laser beams. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(4):372—376)
- [12] 强希文, 刘峰, 张建泉. 红外激光辐照探测器材料温升的计算[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(3):46—50. (Qiang X W, Liu F, Zhang J Q. Numerical simulations of temperature rise on detector material irradiated by IR laser beam. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(3):46—50)
- [13] 强希文, 刘峰, 张建泉, 等. 强激光辐照探测器材料力学效应的解析研究[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(6):47—51. (Qiang X W, Liu F, Zhang J Q, et al. Analytical investigation on mechanical effects of detector materials induced by laser. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(6):47—51)

Thermal damage in InSb(PV) detector induced by CW laser

ZHAO Jian-jun¹, SONG Chun-rong¹, ZHANG Ling-zhen¹, NIU Yan-xiong²

(1. Section of Physics-Chemistry, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Section of Optics, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A physical model of InSb(PV) detector irradiated by CW laser was established. The distribution of temperature was studied by Gaussian beam with 2-D thermal model. The relationship between the temperature transformation and irradiation time was obtained. By numerical method, it was found that the damage of InSb material irradiated by CW laser was melt, and it took place firstly at the center of the laser-facing surface. The higher the laser power was, the less damage time was needed. With the same laser power density, thinner sub needed less irradiation time. For a definite sub, the damage threshold of laser was higher than a certain I_{\min} . Whereas I_{\min} was higher for thinner sub. To improve the anti-irradiation ability, it was necessary to diminish the thickness of sub. Additionally, the calculation times of melt damage by 10.6 μm laser irradiation of different power were 1.57 s and 4.54 s, corresponding to the experimental data of 2 s and 4~5 s.

Key words: Thermal damage; InSb(PV) detector; Gaussian beam; Damage threshold