

·激光技术·

## 激光辐照对光导型探测器性能的影响

郑鑫, 江天, 程湘爱

(国防科学技术大学, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**对比研究了光导型探测器在激光辐照前后对信号的输出响应特性,发现在受到较高功率但低于永久损伤阈值的激光辐照之后,探测器系统对相同信号的输出响应有了较大程度的改变。分析表明:在使用较高功率密度激光对探测器进行处理后,探测器系统的散热性能有了改善。根据缺陷的退杂化模型对探测器预处理前后性能的改变进行了分析,对实验现象进行了解释。这可以为今后改进探测器的设计和制作工艺,提高探测系统抗激光辐照能力提供参考依据。

**关键词:**激光辐照;探测器;导热性能

中图分类号:TN249

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2011)04-0019-03

## Effect of Laser Irradiation on Performance of Photoconductive Detector

ZHENG Xin, JIANG Tian, CHENG Xiang-ai

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The response characteristics of the detector before and after the laser irradiation are compared. After the irradiation of a higher power but below the permanent damage threshold, for the response of the same signal outputs, the detection system changes greatly. The analysis shows that the detector is processed using the high density laser, the heat dissipation of the detection system is improved. The change of the detector performance before and after the pre-processing is analyzed and the experimental phenomena are explained. This work provides the reference for the design and processing technology of detector and the ability of anti-laser irradiation for the detection system.

**Key words:** laser irradiation; detector; heat conductivity

半导体光电探测器由于体积小,质量轻,响应速度快,灵敏度高,易于与其他半导体器件集成,是一种理想的探测器。作为光电系统的主要组成部分,光电探测器的应用范围越来越广泛,因此研究激光辐照探测器产生的各种效应具有重要意义。

光电探测器正常工作时,接受信号光后激发出可导电的光电子和空穴,改变了探测器的电学参数,从而产生相应的电信号。当用比正常信号光强得多的激光辐照探测器时,探测器吸收的光能量绝大部分转变为热能,并迅速沉积。当入射激光光强超过一定阈值后,沉积的能量可使光电探测器功能

材料的性能产生一定的变化,诸如光导型探测器的记忆效应<sup>[1]</sup>。光导型探测器在激光辐照前后探测率、性噪比和响应率的变化也开展了相应的研究<sup>[2]</sup>。研究光电探测器在激光辐照前后性能的变化,对探测器的基础研究和制造工艺的改善具有重要意义。

对比研究了光导型探测器在激光辐照前后对信号光的输出响应特性,发现采用较高功率激光对探测器进行辐照后,探测器的散热性能有了较大程度的改善。采用缺陷的退杂化模型对探测器性能变化进行了分析。

收稿日期:2011-06-26

作者简介:郑鑫(1986-),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用的研究;导师简介:程湘爱(1966-),女,教授,博士生导师,主要从事激光与物质相互作用研究。

## 1 实验

### 1.1 实验装置

实验所使用的探测器是光导型锑化铟(InSb)探测器。图1是探测器的分层结构示意图,InSb芯片用环氧胶粘于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 衬底上, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 用低温胶粘于杜瓦瓶冷头上。采用液氮制冷,工作温度约为77 K。激光均匀垂直辐照在探测器的光敏面上。由于探测器前端有冷屏结构(图1中未画出),背景辐射对实验的影响已经得到较好的消除。值得说明的是,为了清楚地说明探测器的结构,各个分层的尺寸并未严格按比例画出。

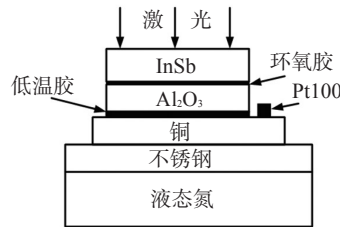


图1 探测器分层结构示意图

采用的辐照光源为 $10.6\ \mu\text{m}$ 连续 $\text{CO}_2$ 激光,光斑直径为5 mm,发散角为5 mrad,最大输出功率为50 W,激光器的输出功率可以通过调节其工作电流连续改变。实验中探测器工作在直流偏置下(直流偏压为5 V),与远大于探测器暗电阻( $3\ 190\ \Omega$ )的负载电阻( $R=30\ \text{k}\Omega$ )串联,采用恒流工作模式,实验装置如图2所示。探测器上的端电压变化作为输出信号,可以反映出探测器电阻的变化。采用DC耦合示波器监测探测器内阻的变化,用以判断探测器性能是否发生变化。

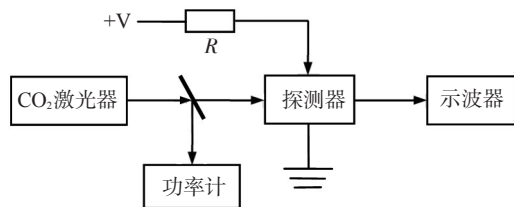


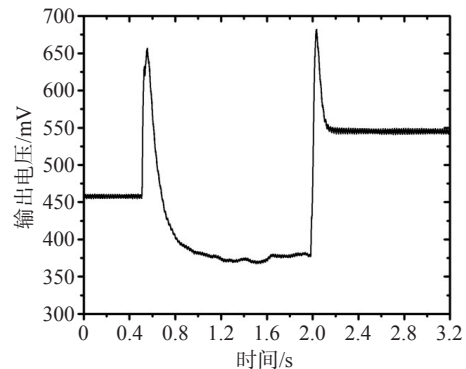
图2  $\text{CO}_2$ 激光器辐照 InSb 探测器实验装置示意图

### 1.2 实验结果

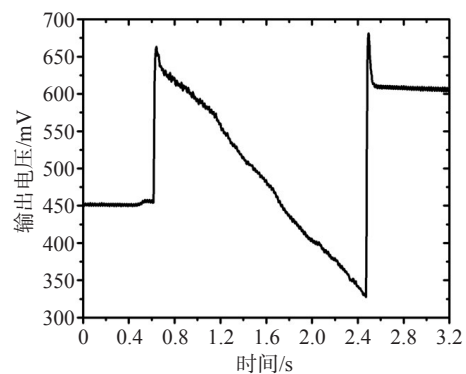
采用的探测器在实验前并未受过较高功率激光辐照。实验中,首先采用由低到高的不同功率密度 $\text{CO}_2$ 激光辐照 InSb 探测器,记为第一组实验。之后用 $200\ \text{W}/\text{cm}^2$ (低于探测器的永久损伤阈值)的较

高功率密度 $\text{CO}_2$ 激光对探测器进行辐照处理。不改变实验条件,一天后,采用与第一组实验相同顺序的功率密度对探测器进行辐照,得到了探测器在较高功率密度激光辐照处理前后的输出响应特性。

图3给出了探测器在较高功率密度激光辐照处理前后的2幅典型实验曲线。2次实验中,激光的输出功率均为 $140\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。从中可以看出,探测器在较高功率激光辐照处理前后性能有了显著变化。如图3a所示,处理前,探测器在激光辐照过程中的输出电压先是迅速上升,然后下降到一稳定值,对应于其中的0.4~2.0 s。然而,在处理后,探测器在激光辐照过程中的输出电压在经历了迅速上升之后,一直处于下降状态,并未达到一个稳定值。而且,下降的速度也远不如处理前迅速,如图3b所示。尽管适当延长了辐照时间(对应于其中的0.6~2.5 s),探测器的输出电压也并没有要达到稳定值的趋势。



(a) 较高功率密度激光辐照前



(b) 较高功率密度激光辐照后

图3 InSb 探测器在 $140\ \text{W}/\text{cm}^2$   $\text{CO}_2$ 激光辐照下的电压响应曲线

## 2 分析与讨论

$10.6\ \mu\text{m}$   $\text{CO}_2$ 激光的光子能量为0.12 eV,小于

InSb工作在77 K时的禁带宽度(0.228 eV)。InSb探测器对10.6 μm波段外激光的主要响应机制为自由载流子吸收。自由载流子吸收引起探测器工作材料的温升<sup>[3-5]</sup>。在温升过程中,存在一个转变温度 $T_0$ 。当探测器的温度 $T < T_0$ 时,本征激发还不显著,载流子主要由杂质电离提供,由于探测器具有较高的初始输出电压(约460 mV)且工作在77 K,可以认为杂质已经全部电离,这时载流子密度约等于掺杂浓度,基本不随温度变化,而迁移率随温度的升高下降,引起探测器的电导率减小,电阻增大,响应输出电压升高;当 $T > T_0$ 时,本征激发迅速增加,热激发电载流子浓度随温度的升高呈指数增长,大量本征载流子的产生远远超过了载流子迁移率降低对电阻的影响,电阻迅速减小,响应输出电压急剧下降。这对应于图3激光辐照过程中探测器输出电压先迅速上升,然后下降的规律。即认为探测器输出信号下降的过程是由探测器工作材料温升引起的本征载流子浓度增加引起的。半导体本征载流子的浓度 $n_i$ 可由式(1)给出<sup>[6]</sup>

$$n_i = \left[ \frac{2(2\pi k_0 T)^{3/2} (m_p^* m_n^*)^{3/4}}{h^3} \right] \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0 T}\right) \quad (1)$$

可以认为,在探测器输出信号下降的过程中,输出信号的变化可以间接反映出探测器工作材料温度的变化。

由于2次实验激光的输出功率是相同的,而且激光直接辐照在InSb材料上,可以认为,2次实验中,激光对InSb材料的加热速率是相同的。由探测器的输出电压曲线可以推断,探测器材料在2次实验中的温度变化过程是不同的。

激光束垂直入射物体表面时,描述物体内部温度场分布的热传导方程<sup>[1]</sup>为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (I - R)\alpha I_0 e^{-\alpha x} - Q \quad (2)$$

其中, $\rho$ 、 $c$ 、 $\alpha$ 和 $R$ 分别为材料的密度、热容、吸收系数和对激光的反射率; $I_0$ 是入射激光的功率密度; $\nabla$ 是梯度算子; $Q$ 是由于液氮制冷引起的热能量流失。在文中的实验条件下,可以认为 $\rho$ 、 $\alpha$ 和 $R$ 是与温度无关的常数, $I_0$ 恒定,这样式(2)等号右端的第二项即为恒定值。一般器件受光照的一端由于辐射散热有限,可设为绝热边界条件。2次实验条件下受光面的边界条件完全一致。制冷端的边界条件已经包含于 $Q$ 项。

通过对方程(2)的分析可以发现,能够造成2次实验探测器工作材料温度变化过程不同的参数只有材料的热容 $c$ 和 $Q$ 项。

研究表明,空位、间隙原子等类别的缺陷能够引起晶体比热容的“反常”<sup>[7]</sup>。含有 $n$ 个空位的晶体,其热力学能 $U$ 比完整晶体的热力学能大 $nu$ (其中, $u$ 是一个空位缺陷带来的热力学能增量),考虑了空位缺陷影响的晶体比热容可以表示为<sup>[7]</sup>

$$c_v = \left[ \frac{\partial(U_f + U_v)}{\partial T} \right]_v + \left[ \frac{\partial(nu)}{\partial T} \right]_v \quad (3)$$

式中, $U_f$ 是晶格结合能; $U_v$ 是晶格振动能。第一项代表理想晶体的定容比热容,第二项代表空位缺陷引起的附加比热容。实际应用中,就是通过测量比热容的反常变化测得空位的浓度。

缺陷的退杂化模型<sup>[8]</sup>认为晶体中缺陷处电子是局域的,能级处在带隙内,最初处于 $sp^3$ 杂化态。在光作用下激发一个电子到非局域态,使缺陷周围的一个悬空键原子处于 $(sp^2)^+$ 离化态,在带隙内留下一个空位。这样在经过较高功率密度激光辐照处理后,探测器材料内部的空位数增多,引起探测器工作材料比热的增大,导致了探测器在激光辐照过程中温度的升高速度不如处理前迅速。

经过上面的分析后,将图3的实验现象分成3段进行解释。在激光开启前,2种探测器的初始输出电压略有不同。这是由于在经过较高密度激光辐照后,探测器的暗电阻有所增大<sup>[2]</sup>。根据分压公式,很容易得出处理后的探测器的输出电压低于处理前,这是和实验现象吻合的。在激光辐照过程中,探测器工作材料由于吸收激光能量而温度升高,但是经过处理的探测器材料的比热增大,根据热传导方程,其升温的速率低于处理前,因而导致电压下降的速度不如处理前迅速。激光关闭后,探测器进入降温过程,同样由于比热的增大,其降温的速度仍然不及处理前迅速,表现为其趋于稳定的输出电压值高于处理前。值得说明的是,这里所说的趋于稳定的电压并不是探测器最终完成降温后的输出电压。长时间观测表明,探测器的输出电压一直在以较小的幅度减小。文中为了更加清楚地说明辐照过程中的现象,只给出了前3.2 s的实验曲线。实际上,2种情况下探测器的输出电压都最终要降回到初始电压值。

(下转第72页)



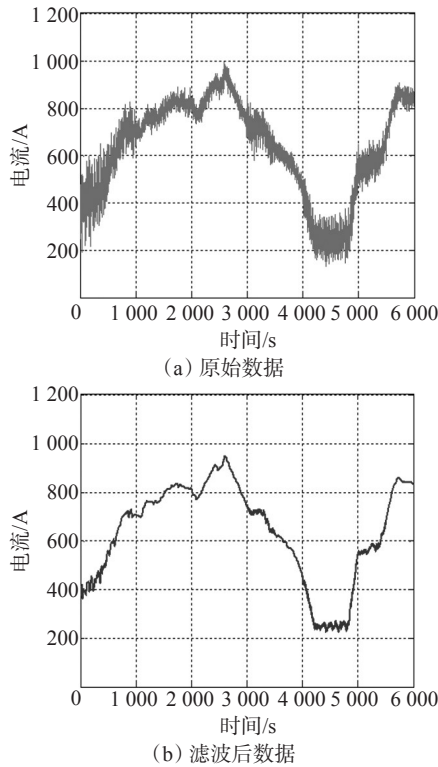


图3 杂散电流数据曲线对比

## 4 结论

通过分析基于光纤传感的地铁杂散电流监测

(上接第21页)

## 3 结论

光导型探测器在受到较高功率但低于永久损伤阈值的激光辐照之后,对相同信号的输出响应特性有了较大程度的改变。分析认为:探测器材料中的缺陷在较高功率密度激光辐照下退杂化,形成的空位引起了探测器工作材料的比热容增加,降低了探测器工作材料在波段外激光辐照下温度升高的速率。

探测器在较高功率密度激光辐照处理前后的探测率、响应率、信噪比等参数没有进行相应的测量,因此无法预估探测器整体性能是否得到改善。但是,采用适当的方法对探测器工作材料进行退杂化处理能够降低探测器工作材料在高功率密度激光辐照下的升温速率,有助于提高探测器系统抗强激光辐照的能力。

系统所采集到的数据,得出光纤电流传感系统的噪声主要包括3个方面:传感光路系统的噪声、光电转换部分的噪声、信号采集电路的噪声。利用小波阈值去噪方法对杂散电流数据进行处理,结果表明,小波阈值去噪方法能很好地滤除信号中存在的绝大部分噪声。

## 参考文献

- [1] 张若岚. 电路系统中的噪声问题研究[J]. 电讯技术, 2001(2):62-65.
- [2] 靳孝峰,张琦. 电子电路中的噪声及其抑制措施[J]. 焦作大学学报,2001(4):57-59.
- [3] 吕菁华,袁杰. 电路元件引起的电路噪声[J]. 高师理科学刊,2001,21(3):31-33.
- [4] 尹喜超. 基于小波变换的信号消噪[D]. 北京:华北电力大学,2004.
- [5] 崔华. 小波分析及其在信号处理中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2005.
- [6] 李士心,刘鲁源. 基于小波阈值去噪方法的研究[J]. 仪器仪表学报,2006,23(3):478-479.
- [7] 董永生. 小波变换与阈值函数在数字信号去噪中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2005.
- [8] 王丽秀. 基于小波变换的光纤传感器信号消噪技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2003.

## 参考文献

- [1] 孙承伟,陆启生,范正修,等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社,2002:2-3.
- [2] 朱克学,张贇,李向阳,等. 激光辐照对HgCdTe长波光导型探测器性能的影响[J]. 激光与红外,2001,31(4):234-235.
- [3] 李修乾,程湘爱,王睿,等. 波段外CW CO<sub>2</sub>激光辐照HgCdTe探测器热效应研究[J]. 中国激光,2003,30(12):1070-1074.
- [4] 李莉,陆启生. 光导型HgCdTe光电探测器对双波段组合激光辐照动态响应的数值模拟[J]. 光学学报,2008,28(10):1953-1957.
- [5] 马丽芹,陆启生. 波段外激光辐照PC型探测器的反常响应机制[J]. 强激光与粒子束,2006,18(2):201-204.
- [6] 刘恩科,朱秉升,罗晋生. 半导体物理学[M]. 北京:电子工业出版社,2009:76.
- [7] 刘培生. 晶体点缺陷基础[M]. 北京:科学出版社,2010:172-174.
- [8] 陆启生,蒋志平,刘泽金,等. PC型HgCdTe探测器的记忆效应[J]. 红外与毫米波学报,1998,17(4):317-320.