

高增益双层组合 GaAs 光电导开关设计与实验研究^{*}

施 卫[†] 王馨梅 侯 磊 徐 鸣 刘 峥

(西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2008 年 5 月 11 日收到, 2008 年 6 月 6 日收到修改稿)

设计制备了一种由双层半绝缘 GaAs :EL2 晶体组成的新型超快光电导功率开关. 由于触发状态下双层 GaAs 晶体之间满足动态分压关系, 使该开关在强电场偏置下触发时, 双层 GaAs 晶体既能先后发生高增益过程, 又能相互抑制对方进入锁定状态, 开关输出为近似方波的双峰脉冲. 因此, 这种开关的工作方式既具有非线性模式特有的所需触发光能小、上升速度快等优点, 又具有线性模式特有的重复工作频率高、使用寿命长等优点. 偏压 6500 V 时用脉宽 8 ns、能量 3 mJ 的 1064 nm 激光触发, 输出电脉冲的上升沿为 13.2 ns, 下降沿为 54.6 ns, 脉宽为 148.4 ns, 第一个波峰高 885 V, 第二个波峰高 897 V. 随着外加偏置电压的提高, 上升时间基本不变, 脉宽和下降时间均略有减小, 双峰峰值均明显增大.

关键词: 光电半导体开关, 高增益, 锁定效应

PACC: 7240, 7220H, 7220J, 7280E

1. 引 言

超快脉冲激光器与半绝缘光电半导体(如 GaAs, InP, SiC 等)相结合形成的超快光电半导体功率开关器件^[1-2], 具有皮秒响应、GHz 的重复率、无触发晃动、高耐压、寄生电感电容小、光电隔离、结构灵活等特点, 使之在超高速电子学、脉冲功率技术、THz 技术^[3-4]等领域具有广阔的应用前景. 光电半导体开关有两种工作模式, 一种是线性模式, 即一个入射光子最多能激励一个电子-空穴对参与导电, 其重复工作频率高且使用寿命很长; 另一种是非线性模式, 即在满足一定的光能、电场阈值时, 一个入射光子能激励多个电子-空穴对参与导电(发生了载流子雪崩碰撞电离), 输出电脉冲出现明显的锁定现象^[5], 因此该模式也被称为高增益模式. 因为非线性模式比线性模式上升时间短、所需触发光能低, 使激光二极管阵列代替庞大昂贵的功率激光器成为可能^[6-7], 所以引起了研究人员的极大兴趣, 但是因为非线性模式下电流高度集中成丝^[5]并且锁定时间长达几到几十微秒, 所以重复工作频率很低, 且使用寿命很短^[8], 难以满足实际需求.

如果使光电导开关首先工作在线性模式, 然

后通过改变开关外部条件, 使之迅速停止高增益过程进入线性工作模式, 则其既具有非线性模式特有的所需光能小、上升速度快等优点, 又具有线性模式特有的重复频率高、使用寿命长等优点. 因此, 本文提出了一种新型光电导开关结构, 由双层 GaAs 晶体串联组合而成. 两层 GaAs 晶体之间由于动态分压而能互相抑制对方进入锁定状态, 因此在高于非线性触发光电阈值的条件下, 输出电脉冲不同于典型的非线性锁定波形, 而是近似为方波形状的双峰波形, 其脉宽仅是线性模式下输出脉冲的两倍.

2. 实 验

2.1. 双层组合开关实验

双层组合 GaAs 光电导开关设计如图 1 所示. 两个串联组合的 GaAs 晶体材料相同, 均为非故意掺杂半绝缘 GaAs :EL2^[9]材料, 其暗态电阻率 $\geq 5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$, 电子迁移率 $> 5500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. 两个晶体大小均为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 因此该开关有效电极间隙为 6 mm. 在晶体端面上制作了 Au/Ge/Ni 欧姆接触电极. 为了确保两个 GaAs 晶体之间的导电接触可靠, 在接触面上敷涂了 TK130-60 低温固化导电银胶.

^{*} 国家重点基础研究发展计划(973 计划)批准号: 2007CB310406 和国家自然科学基金(批准号: 50477011, 50837005)资助的课题.

[†] E-mail: swshi@mail.xaut.edu.cn

实验电路如图 2 所示,双层组合 GaAs 光电导开关经 60 dB 同轴衰减器(带宽 0—18 GHz)与 Lecroy-8600A 示波器(作为 50Ω 负载)串联,其传输线特性阻抗匹配.0.12 μF 的陶瓷电容器被高压直流偏置电源充电,提供电脉冲输出能量.触发光由 SGR-S/100 型 Nd:YAG 脉冲激光器产生,其波长为 1064 nm,脉宽为 8 ns,单次光脉冲能量为 3 mJ,在时间和空间上均为高斯分布.调节光斑位置,使约三分之一光斑 (≥ 1 mJ)覆盖在一个 GaAs 晶体上,约三分之二光斑 (≤ 2 mJ)覆盖在另一个 GaAs 晶体上.

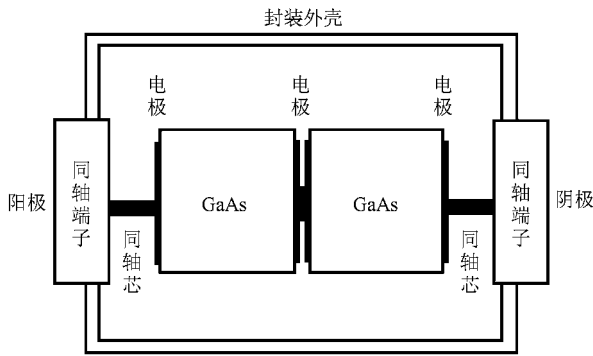


图 1 双层组合 GaAs 光电导开关的结构示意图

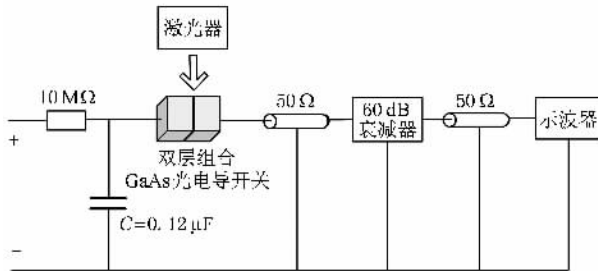


图 2 双层组合 GaAs 光电导开关电路示意图

当外加直流偏置电压为 2500 V 时,光电导开关工作在线性模式,输出电脉冲的波形如图 3 所示.因为存在寄生电容,所以线性波形上出现一些不规则的振荡.

触发光脉冲能量不变,当外加直流偏置电压超过 3800 V 时,这对应于 GaAs 晶体上的偏置电场强度大于 6333 V/cm,是典型的非线性触发条件,但输出电脉冲并不表现出明显的锁定现象(典型的非线性模式),而是输出近似方波的双峰脉冲.图 4 记录了偏置电压为 6500 V 时的输出电脉冲波形,其脉冲宽度(半高全宽)仅为 148.4 ns,显然不具有非线性模式的锁定效应(lock-on effect).该双峰脉冲的波形

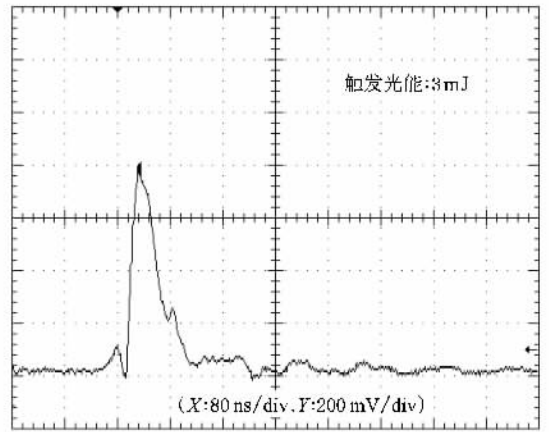


图 3 偏置电压为 2500 V 时双层组合 GaAs 光电导开关的电脉冲波形

近似一个方波,平均功率约为 13 kW,脉冲上升时间为 13.2 ns,下降时间为 54.6 ns,第一个波峰为 885 V,第二个波峰为 897 V.

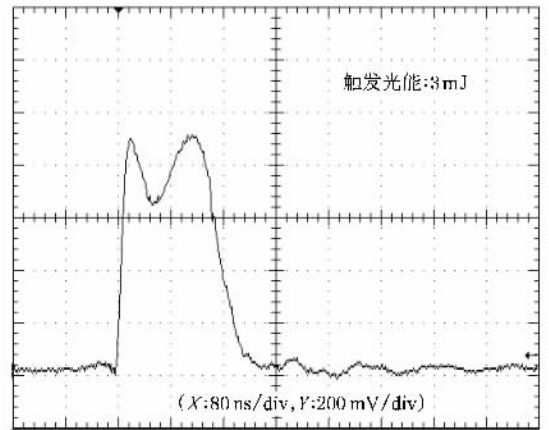


图 4 偏置电压为 6500 V 时双层组合 GaAs 光电导开关的电脉冲波形

图 5 给出双峰波形随偏置电压的变化规律:触发能量不变,随着电压的提高,脉宽和下降时间均略有减小,上升时间基本不变,双峰的峰值均明显增大.图 6 给出双峰波形随触发光能的变化规律:偏置电压不变,随着触发光脉冲能量的提高,双峰波形的脉宽明显减小,第一峰的峰值明显变大,第二峰的峰值略有减小.

2.2. 单层开关对照实验

仅用一个 GaAs 晶体(参数同上)作为光电导开关进行对照实验.在脉宽 8 ns、能量 3 mJ、波长 1064 nm 的激光脉冲触发下,外加偏置电压大于 1900 V 时出现典型的非线性锁定波形,如图 7 所示.经多次实验证明,输出电脉冲的锁定时间大于 2 μs.该对照

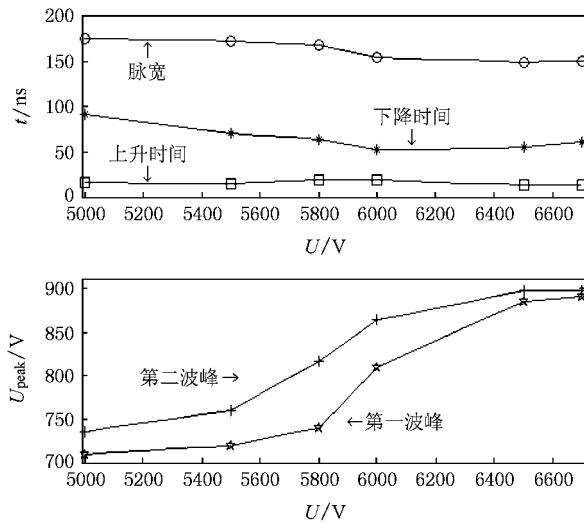


图 5 触发光为 3 mJ 时双层组合 GaAs 光电导开关双峰波形随偏压变化的规律

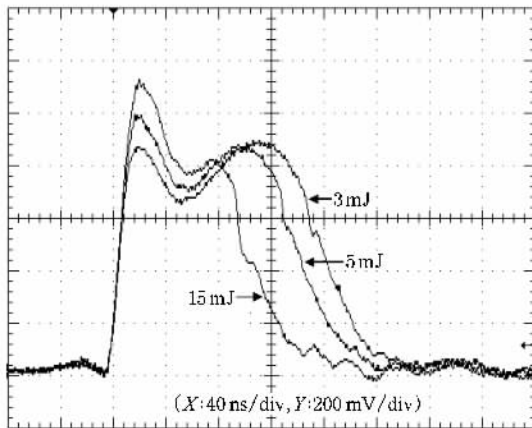


图 6 偏压为 6700 V 时双层组合 GaAs 光电导开关的电脉冲波形

实验说明单层 GaAs :EL2 晶体制作的光电导开关只能工作在线性或者非线性模式下,其非线性电场阈值约为 $1900 \text{ V}/3 \text{ mm} = 6333 \text{ V}/\text{cm}$,这个电场阈值与双层组合 GaAs 光电导开关出现双峰波形的阈值相等。

3. 分 析

在双层组合 GaAs 光电导开关实验中,两个 GaAs 晶体的暗态电阻相同,所以两个 GaAs 晶体在暗态时分压相等.用波长为 1064 nm 的激光脉冲照射 GaAs 半导体材料时,因双光子吸收^[9]产生内光电效应,在 GaAs 内生成大量的非平衡电子-空穴对,

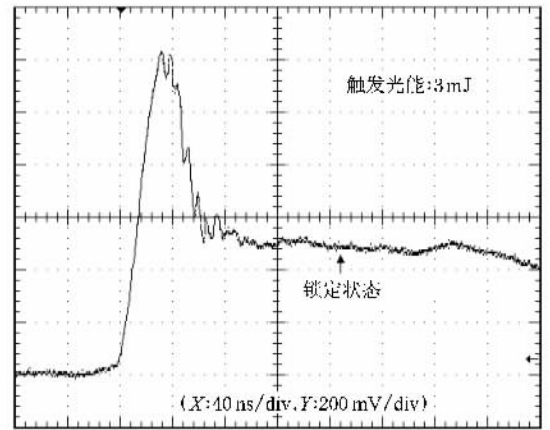


图 7 偏压为 2000 V 时单层 GaAs 光电导开关的电脉冲波形

改变了开关的电导率.如果触发时偏置电场强度小于非线性工作模式的阈值,则这两个晶体都工作在线性模式,所以输出波形如图 3 所示。

如果触发时偏置电场强度大于非线性阈值,因为两个晶体之间是动态分压关系,所以能互相抑制对方的雪崩倍增过程,避免了电流锁定现象,具体分析如下:

1) 触发光照射面积大的那个 GaAs 晶体(为便于描述称之为晶体 A,则另一个称之为晶体 B)会先进入高增益的非线性工作模式,即发生了载流子雪崩倍增过程.但是因为载流子雪崩倍增会使晶体 A 的电阻率远小于晶体 B,所以与此同时晶体 A 的分压立即下降,达不到维持雪崩倍增所必须的电场阈值,因此晶体 A 被迫结束高增益过程,进入线性工作模式,非平衡载流子不再倍增,而是通过复合或电极吸收而逐渐减少,晶体 A 的电阻率逐渐恢复.这个过程对应于双峰波形(见图 4)中的第一个波峰。

2) 因为两个晶体之间是动态分压关系,所以晶体 A 的分压下降的同时,晶体 B 的分压随之上升,大大促进了晶体 B 内由光生载流子引发的雪崩倍增过程,载流子的高增益使晶体 B 电阻率迅速下降.而此时晶体 A 的电阻率已经逐渐恢复,所以晶体 B 的分压迅速下降,达不到维持雪崩倍增所必须的电场阈值,所以晶体 B 被迫结束高增益过程,进入线性工作模式.这个过程对应于双峰波形(见图 4)中的第二个波峰。

3) 虽然晶体 B 在发生雪崩倍增过程时分压迅速下降,使晶体 A 上偏置电场又一次升高,但是晶体 A 内非平衡载流子经过几十纳秒的复合、扩散和电极吸收后,浓度已达不到非线性阈值,所以晶体 A

不再进入高增益状态. 因此, 晶体 A 和晶体 B 迅速恢复其半绝缘性, 对外表现为一个快速的下降沿 (50—90ns).

4. 结 论

本文所提出的新型光电半导体开关结构, 由双层 GaAs 晶体串联组合而成, 两层 GaAs 之间由于动

态分压而能互相抑制对方进入锁定状态. 实验表明, 在触发光能和偏置电场都大于非线性阈值条件时, 该开关输出近似方波的超短功率脉冲, 其脉宽仅是线性模式下输出脉冲的两倍, 上升沿优于线性模式, 下降时间与线性模式为同一数量级. 因此, 这种工作方式既具有非线性模式特有的所需触发光能小、上升沿速度快等优点, 又具有线性模式特有的重复工作频率高、使用寿命长等优点.

-
- [1] Islam N E , Schamiloglu E , Fleddermann C B 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 1988
- [2] Dogan S , Teke A , Huang D *et al* 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3107
- [3] Wang S H , Zhang C L , Zhang X C *et al* 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 120 (in Chinese) [王少宏、张存林、张希成等 2003 物理学报 **52** 120]
- [4] Jia W L , Ji W L , Shi W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2042 (in Chinese) [贾婉丽、纪卫莉、施 卫 2007 物理学报 **56** 2042]
- [5] Kambour K , Kang S , Myles C W *et al* 2000 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 1497
- [6] Loubriel G , Zutavern F , O'Malley M *et al* 1995 *Proc. SPIE* **2343** 21
- [7] Shi W , Dai H , Sun X 2003 *Chin. Opt. Lett.* **1** 553
- [8] Loubriel G , Zutavern F , Mar A *et al* 1998 *IEEE Tran. Plasma Sci.* **26** 1393
- [9] Shi W , Dai H , Zhang X 2005 *Chinese Journal of Semiconductors* **26** 460

Design and performanec of a high-gain double-layer GaAs photoconductive switch *

Shi Wei[†] Wang Xin-Mei Hou Lei Xu Ming Liu Zheng

(Department of Applied Physics , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 ,China)

(Received 11 May 2008 ; revised manuscript received 6 June 2008)

Abstract

A new kind of ultra-fast power photoconductive semiconductor switch with double-layer semi-insulating GaAs :EL2 is designed and prepared. Because the distribution of voltage between the triggered double GaAs layers is dynamic , when biased at a high electric field , the double layers go into the high-gain state one after the other but prevent each other from entering the Lock-on state , so the output electric pulse has double peaks and looks like a rectangular wave. This working mode not only has the strong points of the nonlinear mode , such as the required laser energy is far less and the rise time is shorter than that of the linear mode , but also has the merits of the linear mode , such as the repetition frequency is higher and the life is far longer than that of the nonlinear mode. Biased at 6500 V and triggered by an 8 ns , 3 mJ and 1064 nm laser pulse , the rise time of the output electric pulse is 13.2 ns , the fall time is 54.6 ns , the full width at half maximum is 148.4 ns , the first peak is 885 V and the second peak is 897 V. With the bias voltage increasing , the rise time nearly keeps a constant , the width and fall time decrease slightly and the double peaks increase obviously.

Keywords : photoconductive semiconductor switch , high-gain , lock-on effect

PACC : 7240 , 7220H , 7220J , 7280E

* Project supported by the National Basic Research Program of China(Grant No. 2007CB310406)and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50477011 , 50837005).

[†] E-mail : swshi@mail.xaut.edu.cn