

高功率、长寿命 GaAs 光电导开关

杨宏春, 崔海娟, 孙云卿, 曾刚, 吴明和

电子科技大学物理电子学院, 成都 610054

E-mail: yhc690227@sina.com

2009-08-29 收稿, 2010-01-27 接受

国家自然科学基金(10804016)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室基金(YAK200501)资助项目

摘要 通过改进 GaAs 光导开关衬底材料研制工艺、机械结构设计、欧姆电极研制工艺、绝缘封装工艺和脉冲电源馈电方式, 研制了 3 mm 异面电极的 GaAs 光导开关. 在 56.12 μJ 光能激励、1 kHz 重频、15 kV 偏压、50 Ω 负载实验条件下, 测得光导开关使用寿命超过 3.6×10^6 次, 输出电脉冲峰值功率 2 MW、脉冲宽度 2 ns、触发动抖方均根值为 65 ps; 最高工作电场达到 100 kV/cm, 对应峰值功率达到 10 MW; 实验还给出了光导开关电压转换效率、触发动抖随偏压升高的测试结果; 考虑 GaAs 对 1064 nm 光吸收系数随电场的变化, 定量分析了光导开关电压转换效率随偏压变化的实验现象.

关键词

光导开关
高功率
长寿命
触发动抖
光吸收系数

自 1975 年 Auston^[1]发明光电导半导体光导开关(photoconductive semiconductor switches, 简称光导开关或 PCSS)以来, 由于光导开关具有功率密度高(MW 量级)、响应速度快(ps 量级)、触发动抖低(ps 量级)、抗电磁干扰能力强(良好的光电隔离)、体积小、易集成等优点^[2~4], 使之在大电流点火装置、拒止武器和高功率微波系统^[5,6]、精密时间同步、THz 技术、瞬态测试^[7~10]、冲激雷达、电磁干扰与攻击系统等领域有广泛的应用前景^[11,12]. 近年来, 利用光导开关产生高功率、窄脉冲、低触发动抖、较高重频的电脉冲的优点, 使得研制体积小、重量轻, 具有低截获概率、高分辨率、强的抗电磁干扰和反隐身能力, 集中近距离电磁干扰与中远距离目标探测于一体的光控阵列有源超宽带雷达成为可能, 20 世纪 90 年代以来, 各国都把这类光导开关实验研究作为热点课题, 并取得重要进展^[13~15].

目前, 国内外研制高功率的光导开关的普遍方法是: 采用高激励光能(1~10 mJ)去导通大缝隙(cm 量级)光导开关, 并在很小阻值(Ω 或亚 Ω 量级)的负载上获得高功率或大电流(10 MW, 1 kA 量级)、较宽脉宽(10^2 ns 量级)、较短使用寿命($10 \sim 10^2$ 次

量级)的电脉冲^[16,17]. 而针对较低激励光能(μJ 量级)去激励 mm 量级缝隙的光导开关, 并在通常微波电路负载(50 Ω)上产生高功率(MW 量级)、窄脉冲(ns 量级)、长使用寿命电脉冲的实验研究在国内还未见报道. Burger 等人采用 2.5 mm 缝宽的异面结构光导开关在激光二极管光激励, 在 75 Ω 负载、1 kHz 重频、20 kV 偏压实验条件下, 产生了脉宽 2 ns、峰值功率 4.8 MW、最长使用寿命 10^4 次的电脉冲^[18]; 并希望利用该结构的光导开关在 1 kHz 重频下的工作电场达到 100 kV/cm、使用寿命超过 10^6 次^[19].

用于冲激雷达、电磁干扰系统或高功率微波的光导开关研制的关键技术在于如何尽可能提高其使用寿命、工作电场, 降低其触发动抖、激励光能和器件几何尺寸, 并在常用微波电路负载上产生高功率的窄脉冲. 突破这些关键技术的可能途径包括: 改进衬底材料的参数, 使之在具备高电阻率的同时还具有高迁移率和良好的导热性; 改进器件的机械结构、绝缘封装工艺和欧姆电极研制工艺, 使高电场下器件内部场强均匀分布、丝状电流发生的空间位置具有随机性、欧姆电极的性能在高偏压及强电流下不退化, 以减小器件体积和引入微波电路时的寄生参数、

英文版见: Yang H C, Cui H J, Sun Y Q, et al. High power, longevity gallium arsenide photoconductive semiconductor switches. Chinese Sci Bull, 2010, 55: 1331—1337, doi: 10.1007/s11434-010-0134-2

降低触发抖动、提高器件的耐压能力和延长使用寿命;采用 Blumlein 倍压网络,以便在不提高单个光导开关峰值功率的前提下增大输出、输入电压比(以后称光导开关的电压转换效率)。

改进 GaAs LEC(liquid encapsulated czahralski)生长工艺,获得同时具有较高电阻率、迁移率和良好热稳定性的 GaAs 衬底材料;在反复实验研究的基础上,探索了 Pd/Ge/Ti/Pt/Au 金属系统的欧姆电极研制工艺,降低了欧姆电极的接触比电阻率,并使欧姆电极特性得到了改善;采用异面 Rogowski 电极结构、镀 SiO₂ 增透绝缘膜、脉冲电源馈电以及基于 Blumlein 倍压网络的光导开关研制方法,提高了光导开关的各主要性能指标。实验测试表明,3 mm 异面电极的 GaAs 光导开关,在 56.12 μJ 光能激励、1 kHz 重频、15 kV 偏压、50 Ω 负载工作条件下,其使用寿命超过 3.6×10⁶ 次,输出峰值功率 2 MW、脉冲宽度 2 ns、触发抖动方均根值为 65 ps 的电脉冲;在亚 mJ 光能激励下,最高耐压能力达到 100 kV/cm、输出峰值功率大于 10 MW、使用寿命 28 次;实验还给出了光导开关电压转换效率、触发抖动随偏压升高的测试结果;考虑 GaAs 对 1064 nm 光吸收系数随电压的变化,定量分析了光导开关电压转换效率随电压变化的实验现象。

1 光导开关实验研制

1.1 衬底 GaAs 材料研制

用于研制高功率、窄脉冲的 GaAs 衬底材料,需要既具有很高的暗态电阻率,以减小高压下光导开关断开时的漏电电流,提高光导开关的耐压能力;同时还需要增强材料的热稳定性、提高载流子的迁移率、缩短载流子的寿命,以达到光导开关快速响应、在强电流和高重频下材料参数不发生显著变化,并产生脉宽很窄的瞬态电脉冲。通过与中国科学院半导体研究所的合作,采用 GaAs 材料的新 LEC 生长工艺,获得了表 1 所示既具有较高电阻率,又有较高迁移率的 GaAs 材料。

表 1 实验用弱 n 型 GaAs 材料主要参数

电阻率 /Ω·cm	迁移率 /cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹	1064 nm 光吸收 系数/mm ⁻¹	位错密度 /cm ⁻³
1.25×10 ⁸	6.6×10 ³	0.45	4.5×10 ⁴

1.2 Pd/Ge/Ti/Pt/Au 欧姆电极研制

实验表明,目前国内研制光导开关普遍采用的 Ge/Ni/Au 标准欧姆电极系统,在强电流和温度升高时,容易发生横向和纵向扩散形成尖峰,使形貌不平整;电极金属与衬底基片的互扩散导致接触电阻增大,欧姆接触特性严重退化,甚至发生渗透损伤(图 1(a))。而采用 Pd/Ge/Ti/Pt/Au 欧姆电极系统,接触电阻下限可以达到 4.9×10⁻⁷ Ω·cm²;在 300℃,20 h 退火情况下,金属接触和 GaAs 之间的分界面非常陡峭平直,热稳定性能良好;在一般的退火情况下,金属层的相互作用很少,界面的形貌比较好,无尖峰,侧面为薄层状,横向同性,表面光滑。在室温实验条件下,该欧姆电极系统即便在高压击穿时,也不会发生标准欧姆电极系统的渗透损伤(图 1(b))。但该欧姆电极系统和 n-GaAs 的接触阻抗随着温度升高增加很快,不能很好地附着在 GaAs 表面;Pt 需要很大热量才会有合适的沉积率,而高温又会导致掩膜过程所用的光刻胶边缘移位或失去。值得进一步探索的研制工艺是如何控制黏附层金属 Pt 的厚度、沉积时温度上升与淬火时间以及高温维持的时间。

1.3 基于 Blumlein 形成线的光导开关研制

在表 1 所示参数、0.6 mm 厚的 GaAs 衬底基片上,采用 Pd/Ge/Ti/Pt/Au 欧姆电极研制工艺,研制了异面 Rogowski 电极结构的光导开关(图 2(a))。光导开关缝隙宽度 3 mm,电极尺寸 6 mm×3 mm;在光导开关电极所在表面上,均匀镀上 1820 Å 的 SiO₂ 绝缘增透膜(对 1064 nm 激励光脉冲);电极引线为厚度 1.5 μm、宽度 2.3 mm 的镀金银带,采用军用导电胶黏合固化电极引线与欧姆电极的方法研制。光导开关与外电路连接完成后,用 1 mm 厚的 705 硅橡胶封装光导开关各侧面(705 硅橡胶固化后每毫米吸收 5%左右,击穿电场超过 18 kV/mm)。采用 Rogowski 电极结构

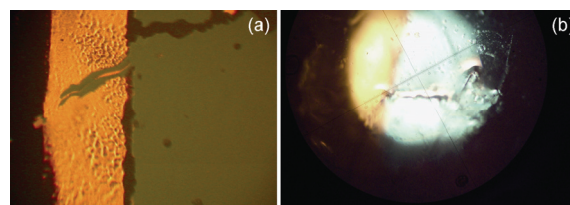


图 1 Pd/Ge/Ti/Pt/Au 与标准欧姆电极的渗透损毁比较

(a) 标准欧姆电极渗透损毁;(b) Pd/Ge/Ti/Pt/Au 无渗透损毁

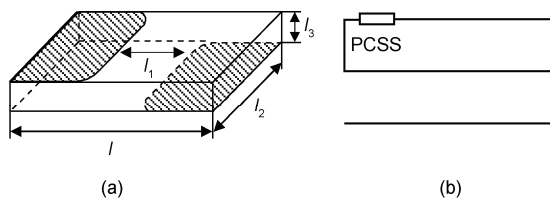


图2 基于 Blumlein 形成线的光导开关设计

(a) 异面 Rogowski 电极 PCSS; (b) 基于 Blumlein 的 PCSS

是为了在光导开关电极间的衬底材料中形成均匀电场,并有利于非线性光导开关丝状电流发生的空间位置具有随机性,从而大幅度提高器件的使用寿命.采用镀金银带和导电胶黏合的电极引线工艺,一方面是为了减小引线中的电流密度并使之尽可能均匀分布,另一方面是为了减小对导电金属层 Au 的损伤.

为提高光导开关电压转换效率,设计了图 2(b)所示的基于 Blumlein 形成线的光导开关. Blumlein 形成线在这里同时起到了倍压、储能、截波(控制光导开关产生电脉冲宽度)、瞬态电脉冲传输以及与输出电路阻抗匹配等作用,便于瞬态电脉冲产生系统的小型化和与外部微波电路的连接. Blumlein 线的介质为聚四氟乙烯($\epsilon_r=2.2$),单片介质厚度 2 mm,长度 150 mm,宽度 11 mm,由此可得输出瞬态脉冲宽度理论值为 2 ns,输出阻抗 50 Ω ,电容 16 pF.

2 光导开关的实验测试

2.1 光导开关实验测试电路

光导开关输出电脉冲参数的实验测试电路如图 3 所示.延时精度为 0.5 μs 的自制光电同步控制仪首先输出 15 V 的 TTL 电平信号触发自制的激光器,激光器经约 (260 ± 0.5) μs 后输出脉宽 10 ns、单脉冲能量 0~20 mJ 可调、激光波长 1064 nm、重频 0~1 kHz 可调的单模激光脉冲.激光器输出光脉冲经光匀化器后变为空间均匀分布的光束,并耦合进入自制的 1 分 368 路自制集束光纤分束器,光纤输出激光单脉冲能量在数十到数百微焦范围内可调.利用光纤分束器中的一路激励光导开关;一路耦合进入光能计,用以测量激励光脉冲能量;再一路输入到光电探头,光电探头产生的电脉冲信号经衰减器输入 Lecroy 8600-A 示波器的一个通道,以便在测量光导开关触发抖动时,用作计时基准.

光电同步控制仪在输出触发激光器的 TTL 电平

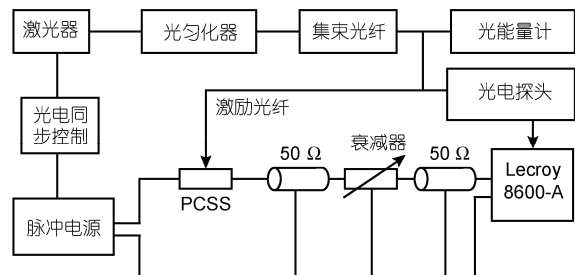


图3 光导开关输出电脉冲参数的实验测试电路

信号约 250 μs 后,再输出 5 V 的 TTL 电平信号触发小型化脉冲电源,并让脉冲电源给 Blumlein 形成线充电(充电时间 5 μs);调节光电同步控制仪输出 2 路 TTL 信号的时间差,使脉冲电源在给 Blumlein 形成线充电达到峰值约 2 μs 后,激光器产生的光脉冲到达并触发光导开关,使之产生高功率瞬态电脉冲.光导开关产生的电脉冲经同轴线、SMA 接头输入功率为 500 W、带宽为 7.9 GHz、衰减倍数分别为 60 和 40 dB 的两个自制宽带衰减器,最后输入至 Lecroy 8600-A 示波器.

2.2 光导开关峰值功率实验测试

在手动触发、激励光纤输出激光能量分别为 56.12 和 394.38 μJ 条件下,将光导开关偏压由 5 kV 逐次升高到 30 kV,测得缝宽为 3 mm 光导开关输出的典型电脉冲波形如图 4;输出-输入电压曲线如图 5(a),输出、输入电压比(简称电压转换效率 η)曲线如图 5(b).

实验测试发现: (1) 光导开关输出电脉冲宽度随

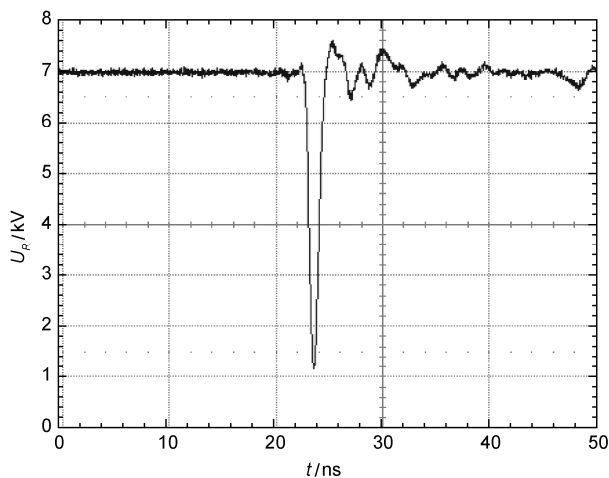


图4 光导开关输出电脉冲的典型波形

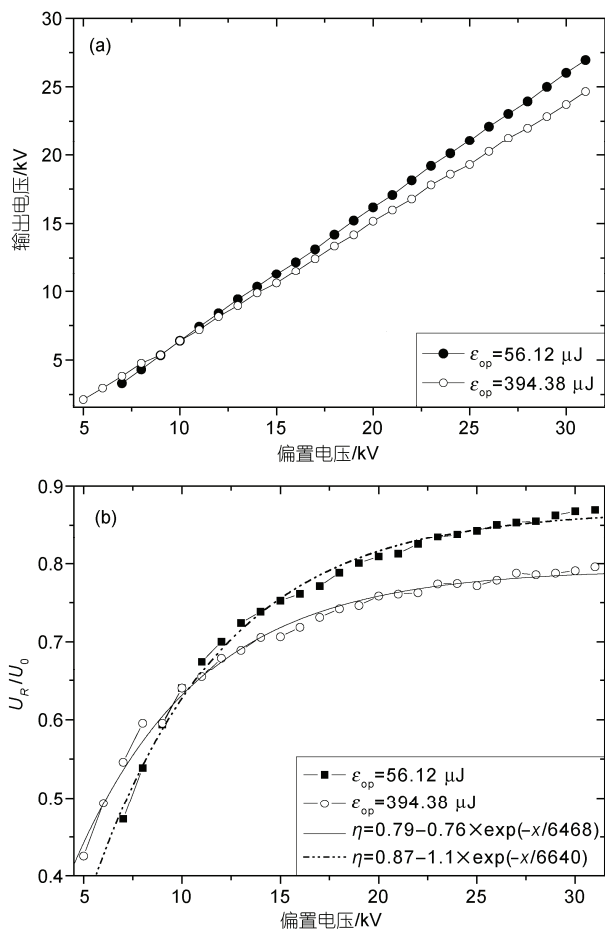


图5 光导开关输出电脉冲峰值电压实验测试

(a) 光导开关输出电压随偏压变化曲线; (b) 光导开关电压转换效率实验测试

随着偏置电压升高和激励光能的减小略有下降, 图4为光导开关在9 kV, 56.12 μJ 时测得的脉冲波形, 其脉宽为2.1 ns, 与设计的Blumlein设计的脉宽理论值较好符合; (2) 当偏压 $U_0=30$ kV、激励光能 $\epsilon_{op}=56.12 \mu J$ 时, 光导开关在50 Ω 负载上获得电脉冲峰值电压为 $U_R=26$ kV, 峰值功率 $P_R=13.5$ MW; 当 $U_0=30$ kV, $\epsilon_{op}=394.38 \mu J$ 时, $U_R=23.7$ kV, $P_R=11.2$ MW; (3) 当 $U_0=5$ kV, $\epsilon_{op}=394.38 \mu J$, 连续触发光导开关20次, 开关每次触发都能导通; 而如果把 ϵ_{op} 降至56.12 μJ , 开关每次都不能导通. 这再次说明光导开关由线性模式进入到非线性模式的阈值条件, 不仅应该包含电场阈值, 而且也包含光能阈值, 而不仅与偏置电场有关^[20]; (4) 图5(b)所示光导开关电压转换效率曲线表明, 电压转换效率 η 随偏压 U_0 增加呈指数规律增加, 并不是常数; 此外, 光导开关的电压转换效率并

不随光能的增大而增大, 随着偏压的升高, 较小的激励光能够获得更高的电压转换效率, 该实验测试结果还未见报道. 如果对图5(b)的实验测试结果作拟合, 发现它们均满足指数函数

$$\eta = \eta_0 - \exp(-U/a), \quad (1)$$

其中, η , η_0 分别表示电压转换效率和极限转换效率, a 为拟合常数.

2.3 光导开关使用寿命实验测试

影响高功率、窄脉冲光导开关使用寿命的因素很多, 包括: 大电流下欧姆电极性能的稳定性、衬底材料的热稳定性、电极结构是否能够使每次丝状电流在不同电极空间位置点随机放电、光导开关放电结束时是否仍有较大电流通过、每次大电流持续时间、光导开关被触发的频率等. 针对这些影响因素, 实验中改进了衬底材料参数、采用了稳定性较好的Pd/Ge/Ti/Pt/Au欧姆电极系统、设计了Rogowski电极结构以尽可能使丝状电流位置能随机产生、采用脉冲电源馈电及Blumlein形成线的馈电与电脉冲传输系统, 以达到控制强电流维持时间和增大输出峰值功率的目的. 在完成上述改进后, 对高功率光导开关寿命作实验测试.

在 $U_0=15$ kV, $\epsilon_{op}=56.12 \mu J$ 及1 kHz重频实验条件下, 光导开关连续工作1 h后, 仍能正常工作. 此时, 光导开关输出电脉冲峰值功率2 MW, 脉宽2 ns, 且工作性能稳定. 实验测试结果表明, 在偏置电场达到50 kV/cm情况下, 光导开关的使用寿命超过了 3.6×10^6 次, 比目前文献报道光导开关在20~30 kV/cm偏置电场和手动触发下^[21], 光导开关使用寿命只有数十次的结果相比, 有了显著提高, 并使高功率光导开关的实际应用研究成为可能.

在 $U_0=30$ kV, $\epsilon_{op}=394.38 \mu J$ 及手动触发条件下, 测得光导开关的正常工作次数28次, 和文献报道结果相比, 使用寿命并没有明显改善, 但此时光导开关的工作电场已从文献中30~50 kV/cm提高到了100 kV/cm. 对损毁光导开关欧姆电极的扫描分析表明, 在强电流下, Pd/Ge/Ti/Pt/Au电极系统金属层发生了扩散和合金化反应, 可能与Pt金属未能很好沉积并导致欧姆接触性能迅速退化有关.

一般文献认为, 不同工艺生长的GaAs材料, 其实际击穿电场通常介于200~400 kV/cm之间. 因此,

探索在击穿电场附近的欧姆电极工艺必然是提高功率、窄脉冲光导开关的关键和难点技术,需要长时间探索.

2.4 光导开关触发动抖实验测试

用于高功率、阵列瞬态电磁脉冲源的光导开关,必须具有很小的触发动抖,以实现阵列瞬态电磁脉冲场分量的空间合成与波束扫描控制^[22].但通常认为,处于 lock-on 模式的高功率 GaAs 光导开关,其触发动抖至少在纳秒量级,很难控制其触发动抖.为此,采用图 3 所示实验测试电路,对不同偏压下光导开关输出电脉冲的触发时间抖进行了系统的实验测试.

实验过程中,激励光能固定为 56.12 μJ ;当偏压小于 15 kV 时,测试了光导开关分别在 1 kHz 和手动触发两种情形下的触发动抖;当偏压高于 15 kV 时,实验数据是在手动触发下得到的;手动触发下,每个偏压下光导开关被触发 50 次;实验数据采用两种方法获得:手动触发时,将光导开关和光电探头产生的电脉冲经衰减器后,同时输入示波器的两个测试通道,以光电探头产生电脉冲波形的峰值时间为基准,记录光导开关产生电脉冲峰值与基准时间的时间差,这个时间差减去光导开关的响应延迟时间(取 50 次时间差的平均值),就是该偏压下各次光导开关的触发动抖时间,50 次触发动抖时间的方均根值,被认为是该偏压下光导开关的触发动抖时间;在激光器以 1 kHz 自动触发条件下,通过记录光导开关在一段时间内产生 (1 s 左右)产生电脉冲的波形数据,将记录数据输入编制程序计算得到各次电脉冲峰值的时间差,将这个时间差减去触发周期时间 T ,就可以得到自动触发下光导开关各次触发的触发动抖时间.实验测试表明,自动触发的抖动时间比手动触发的抖动时间要短.

图 6 给出手动触发下,光导开关在不同偏压下的触发动抖时间的实验测试结果.实验测试结果表明,随着偏置电压的升高,光导开关的触发动抖时间迅速降低,对 3 mm 异面 GaAs 光导开关而言,当偏压升至 15 kV 时,触发动抖时间降至 65 ps.考虑到光导开关输出电脉冲为 2 ns 的高斯脉冲(如图 4),如果在此条件下用阵列光导开关作瞬态电磁脉冲源,就可以很好实现阵列电磁脉冲源的场分量相长叠加(实验结果另文发表),这就为高功率、瞬态光导开关的实际应用奠定了实验基础.

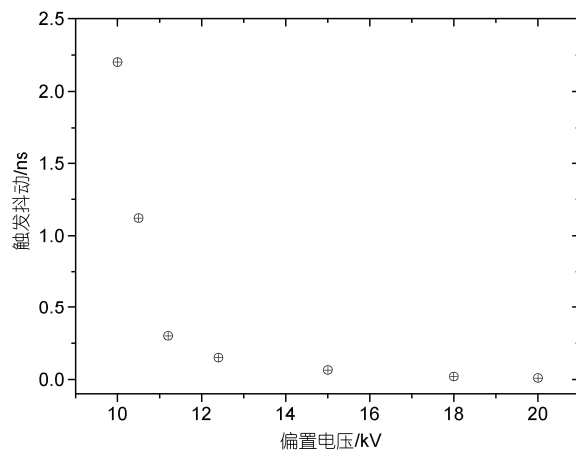


图 6 光导开关输出电脉冲的触发动抖测试

3 电压转换效率的定量分析

文献[20]的实验测试结果表明,在相同实验条件下,当光导开关由线性模式进入非线性工作模式时,其电压转换效率要发生陡变.至今,为解释这一实验现象,已经有很多理论模型,其中,比较典型的模型有两类,其一是认为在 GaAs 禁带中,存在一个非直接带隙的 EL2 能级,并由此解释 GaAs 对 1064 nm 的光吸收和一系列非线性实验现象^[23];其二是认为由于 GaAs 衬底材料的负微分效应,使光导开关在高偏置电场下形成高场畴,畴内高电场使光生载流子发生雪崩效应,进而使电压转换效率发生突变.这两种模型都存在一定局限:对前者,既然 EL2 能级是非直接带隙能级,原则上电子就不能在价带、EL2 能级及导带之间发生大几率跃迁,如果认为通过吸收激子载流子可以发生跃迁,那么应该有 GaAs 对 1064 nm 激光的吸收系数很高的结论,但实验测试结果与此不符,此外,用 EL2 能级解释非线性实验现象的文献,目前存在很大争议.对后者,还不能通过畴内场强的计算,给出载流子倍增效应发生的机理.为此,在以下对非线性模式下光导开关电压转换效率的定量分析中,提出如下观点: (1) GaAs 对 1064 nm 的光吸收与载流子在导带和价带中直接跃迁相对应,与 EL2 能级无关;且吸收机理是由隧道效应造成的; (2) 在小储能电容、大电流放电情形下, GaAs 衬底材料中不形成稳定的高场畴,大电流或高电压转换效率是由于高偏置电场下,光吸收系数剧烈增加造成的.

(1) 光吸收系数随偏置电场的变化.如图 7,如果在 GaAs 基片上沿 x 方向施加偏置电场 ξ ,则 GaAs

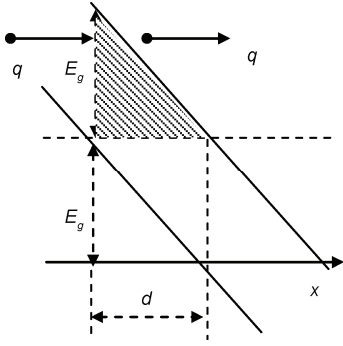


图7 Franz-Keldysh 效应

能带将发生倾斜,使得价带电子能量在 $\varepsilon_e < E_g$ 的情况下,可通过隧道效应穿越图中的三角形势垒到达导带实现导电.三角形势垒宽度 d 为

$$d = \frac{E_g - \hbar\omega}{q\xi} \equiv \frac{E}{q\xi}. \quad (2)$$

电子在三角形势垒中的势函数为

$$U(x) = -qx\xi, \quad (3)$$

其中, q 为电子电量的绝对值.

将(3)式代入定态薛定谔方程,可得

$$-\frac{\hbar^2}{2m_n^*} \frac{d^2\phi}{dx^2} - qx\xi\phi = E\phi, \quad (4)$$

其中 m_n^* 为电子的有效质量,令

$$\beta = \left(\frac{\hbar^2}{2m_n^* q\xi} \right)^{1/3}, \quad y = -\left(x + \frac{E}{q\xi} \right) \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (5)$$

(4)式的近似解为

$$\phi = y^{-1/4} \exp\left(-\frac{2}{3}y^{3/2}\right). \quad (6)$$

按量子力学观点,电子实现势垒贯穿的几率应正比于波函数模的平方,于是,吸收系数 α 应为

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[-\frac{4\sqrt{2m_n^*}(E_g - \hbar\omega)^{3/2}}{3\hbar q\xi}\right]. \quad (7)$$

如果取文献测试的实验数据: $\alpha_0 \approx 10^4 \text{ cm}^{-1}$,那么,根据(7)式可得到图8所示GaAs吸收系数随电场变化的函数曲线.实验测试结果表明,当偏置电场达到 10 kV/cm 时,吸收系数开始发生显著变化.对 3 mm 光导开关而言,当偏压 $>3 \text{ kV}$ 时,即便减小激励光能,

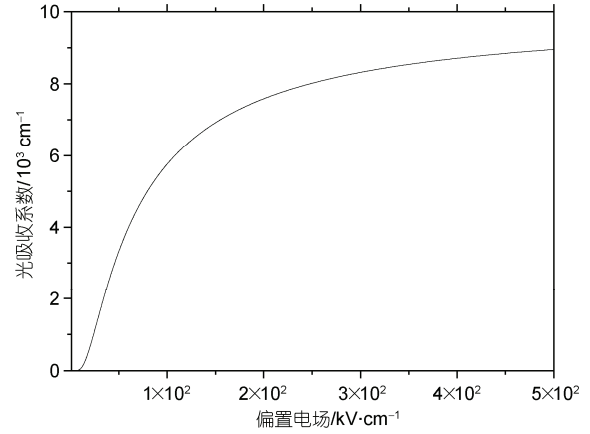


图8 GaAs 对 1064 nm 光吸收系数随偏置电场的变化

也有可能在衬底基片中产生很高的光生载流子浓度,从而导致电压转换效率显著改变;但由于此时吸收系数刚开始发生改变,因而衬底基片中载流子浓度还可以近似看作与激励光能成正比,这就解释了上文中在不太高的偏压下,用较大的激励光能可以高几率导通非线性光导开关的原因.进一步地,如果以文献[24]所给的饱和光生载流子浓度为标准,可以计算出点触发下非线性光导开关的最小导通光能为 $1.14 \mu\text{J}^{[25]}$,这与文献报道的 10^2 nJ 量级相近.

(2) 光导开关导通电阻.考虑半导体材料光吸收的朗伯实验定律

$$I_{\text{op}}(z) = I_{\text{op}}(0) \exp(-\alpha z), \quad (8)$$

其中, $I_{\text{op}}(0)$ 为入射到材料表面处激励光脉冲光强.

GaAs 内部距光照面 z 处光生载流子浓度为

$$n_{\text{op}}(z) = -\frac{dI_{\text{op}}(z)}{h\nu \cdot dz} = \frac{\alpha I_{\text{op}}(0) \exp(-\alpha z)}{h\nu}. \quad (9)$$

如图2,依据(8),(10)式,沿 l_3 方向,厚度介于 $z \sim z+dz$ 薄层的导通电阻为

$$dR_p = \frac{l_1 h\nu}{q\mu l_2 I_{\text{op}}(0) \alpha \exp(-\alpha z) dz}. \quad (10)$$

如将光导开关的导通电阻看作为若干 dR_p 并联,对(11)式积分可得

$$R_p = \frac{\kappa_1}{1 - \exp(-\alpha l_3)}, \quad (11)$$

其中

$$\kappa_1 = \frac{l_1 h\nu}{q\mu l_2 I_{\text{op}}(0)}. \quad (12)$$

(3) 基于 Blumlein 传输线的电压转换效率. 由微波传输理论, 可得基于 Blumlein 传输线电路在有阻开关(即光导开关导通电阻不为零)条件下的电压转换效率计算公式为

$$\eta = \frac{z_0}{R_p + z_0}, \quad (13)$$

其中, z_0 表示 Blumlein 传输线的输出阻抗($z_0=50 \Omega$).

当 $R_p \ll z_0$ 时, 将(11)和(12)式作级数展开, 取一级近似, 联立求解(7)式、(11)~(13)式可得

$$\eta = 1 - \frac{1}{z_0} R_p = \left(1 - \frac{\kappa_1}{z_0}\right) - \frac{\kappa_1}{z_0} \exp(-\alpha l_3). \quad (14)$$

比较(1)和(14)式, 发现它们具有相同的函数形式, 这就证明了光导开关电压转换效率与偏置电场成指数函数的变化关系.

需要注意的是, 上述分析过程只是一个原则上的推导, 它还至少存在如下不足: (1) 假设了高偏置

电场下载流子迁移率为常数((11)式的推导), 事实上, 文献[24]指出, 迁移率不仅与电场有关, 还与载流子浓度有关, 且可以变化十分显著; (2) 在高光能激励下, 原则上也应该存在类似文献[24]分析的饱和光生载流子浓度的限制问题; (3) 上述分析过程没有考虑载流子扩散、复合等影响.

4 结论

针对高功率、窄脉冲光导开关的应用前景需求, 通过对 GaAs 衬底材料生长工艺、光导开关的机械结构、欧姆电极、绝缘封装工艺的系统实验研究, 研制出了可在常用微波电路负载上输出较高峰值功率、长寿命的光导开关; 并对光导开关的峰值功率、使用寿命、触发动抖等关键参数作了比较系统的实验测试; 考虑 GaAs 对 1064 nm 光吸收系数随电压的变化, 定量分析了光导开关电压转换效率随电压变化的实验现象. 实验测试结果表明, 所研制的光导开关已初步具有了实际应用的可能性.

参考文献

- 1 Auston D H. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon. *Appl Phys Lett*, 1975, 26: 101—103
- 2 袁建强, 谢卫平, 周良骥, 等. 光导开关研究进展及其在脉冲功率技术中的应用. *强激光与粒子束*, 2008, 20: 171—176
- 3 Dogan S, Teke A, Huang D, et al. 4H-SiC photoconductive switching devices for use in high-power applications. *Appl Phys Lett*, 2003, 82: 3107—3109
- 4 Lin G R, Pan C L. Picosecond responses of low-dosage arsenic-ion-implanted GaAs photoconductors. *Appl Phys Lett*, 1997, 71: 2901—2903
- 5 Shi W, Tian L Q, Liu Z, et al. 30 kV and 3 kA semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 1—3
- 6 Nunnally W C, Hammond R B. 80-MW photoconductor power switch. *Appl Phys Lett*, 1984, 44: 980—982
- 7 Wang Z, Pietz M, Walowski J, et al. Spin dynamics triggered by subterahertz magnetic field pulses. *J Appl Phys*, 2005, 103: 1—4
- 8 Paul M F, Charles W K, Wu C J, et al. Femtosecond response of electrooptic poled polymers. *Appl Phys Lett*, 1991, 59: 2651—2653
- 9 Tan K H, Yoon S F, Tripon-Canseliet C, et al. GaNAsSb material for ultrafast microwave photoconductive switching application. *Appl Phys Lett*, 2009, 93: 063509
- 10 Krökel D, Grischkowsky D, Ketchen M B. Subpicosecond electrical pulse generation using photoconductive switches with long carrier lifetimes. *Appl Phys Lett*, 1989, 54: 1046—1047
- 11 Guillermo M L, Helgeson W D, McLaughlin D L, et al. Triggering GaAs lock-on switches with laser diode arrays. *IEEE T Electron Dev*, 1991, 38: 692—695
- 12 Funk E E, Lee C H. Free-space power combining and beam steering of ultra-wideband radiation using an array of laser-triggered antennas. *IEEE T Micro Theory*, 1996, 44: 2039—2044
- 13 严成锋, 施尔畏, 陈之战, 等. 超快大功率 SiC 光导开关的研究. *无机材料学报*, 2008, 23: 425—428
- 14 Islam N E, Schamiloglu E, Fleddermann C B. Characterization of a semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch for ultra-wide band high power microwave applications. *Appl Phys Lett*, 1998, 73: 1998—1990
- 15 Islam N E, Schamiloglu E, Schoenberg J S H, et al. Compensation mechanisms and the response of high resistivity GaAs photoconductive switches during high-power applications. *IEEE T Plasma Sci*, 2000, 28: 1512—1519
- 16 Malcolm B. Some future directions for repetitive pulsed power. *IEEE T Plasma Sci*, 2002, 30: 262—266
- 17 Loubriel G M, Zutavern F J, Alan M, et al. Longevity of optically activated, high gain GaAs photoconductive semiconductor switches.

- IEEE T Plasma Sci, 1998, 26: 1393—1402
- 18 Rahul G, David S G, Kapil K, et al. Radio-frequency heating of GaAs and SiC photoconductive switch for high-power applications. IEEE T Plasma Sci, 2006, 34: 1697—1701
 - 19 Mar A, Louberiel G M, Zutarvern F J, et al. Doped contacts for high-longevity optically activated, high gain GaAs photoconductive semiconductor switches. IEEE T Plasma Sci, 2000, 28: 1507—1511
 - 20 Ruan C, Zhao W, Zhu S L, et al. Characterization of photoconductive semiconductor switch under nonlinear mode condition. Micro Opt Techn Lett, 2009, 51: 56—59
 - 21 袁建强, 刘宏伟, 刘金锋, 等. 50 kV 半绝缘 GaAs 光导开关. 强激光与粒子束, 2009, 21: 783—786
 - 22 孙庆玲, 杨宏春, 阮成礼. 瞬态阵列电磁脉冲同相合成特性研究. 微波学报, 2009, 51: 5—7
 - 23 Wu M H, Zheng X M, Ruan C L, et al. Photoresistances of semiinsulating GaAs photoconductive switch illuminated by 1.064 μ m laser pulse. J Appl Phys, 2009, 106: 1—6
 - 24 杨宏春, 阮成礼, 张克迪, 等. 线性 GaAs 光电导开关的饱和参数研究. 科学通报, 2008, 53: 1516—1522
 - 25 杨宏春. 基于光导开关的高功率微波系统研究. 博士学位论文, 成都: 电子科技大学, 2008

(上接 1638 页)

高原隆升的时间和机制. 中国科学院地球环境研究所刘晓东研究员详细介绍了运用数值模拟手段研究高原形成与亚洲季风形成的关系, 并展望了这一领域未来的重要研究方向和关键科学问题. 中国科学院地质与地球物理研究所吕厚远研究员介绍了运用植物孢粉来研究古高度的新方法. 通过对不同地区大量样本的分析发现, 该方法具有获得较高精度的古高度数据的潜力. 与会代表对青藏高原古高度研究表现出了浓厚的兴趣, 并就如何开辟新的研究方法和更好地理解高原隆升机制展开了热烈讨论. 部分学者还就如何从青藏高原周边地区地质记录研究高原古高度提出了建议, 为我国今后更好地开展该领域的研究提供了基础.

大陆岩石圈再造专题由郑永飞教授召集, 包含 5 个报告. 大陆内部造山带的形成和演化及其资源、灾害和环境效应是地球科学研究的核⼼问题, 也是解决板块构造“登⼭”的关键所在. 日本东北大学赵大鹏教授根据地震层析成像研究成果, 勾画了中国东部大陆岩石圈和上地幔结构, 为理解华北克拉通破坏、华南大陆再造、印度板块对欧亚板块俯冲效应等科学问题提供了重要的地球物理证据. 澳大利亚科廷大学李正祥教授进一步解释了他先前提出的关于太平洋板块在华南陆块之下平俯冲对华南中生代岩浆岩时间-空间分布影响的模型及其新的修改. 中国科学院地质与地球物理研究所王清晨研究员报告了关于大陆复活与再造的构造地质学研究实例, 中国科学院地质与地球物理研究所李献华研究员报告了大陆形成与再造的地球化学研究原理和实例, 中国科学技术大学郑永飞教授就华南大陆

再造研究的历史和现状进行分析. 这些报告提出了许多深层次的科学问题, 例如: 华南大陆在显生宙经历的多次陆内变形各自有何特征? 为什么华南中生代时会形成宽逾 1000 公里的面状构造变形? 华南大陆岩石圈的整体深部结构究竟有何特征? 其中哪些继承了前寒武纪的面貌? 哪些是显生宙再造的产物? 华南大陆地壳在显生宙有没有生长? 华南大陆岩石圈在显生宙是如何发生再造的? 华南大陆中生代大规模岩浆作用的原因是什么? 回答这些问题无疑具有重要的全球性地球动力学意义, 为国际固体地球科学发展做出贡献. 与会专家就大陆岩石圈的结构和成分进行了热烈讨论, 认为元古代形成的华南大陆提供了一个大陆形成后不断遭受岩浆和构造改造的大陆再造实例, 华南大陆再造的规模和复杂程度堪称全球第一, 因此华南大陆再造将有望成为又一引起国际地学界广泛关注的重大科学问题, 研究华南大陆再造将开启探索大陆地质奥秘的又一窗口.

与会学者普遍认为, 加强地球深部和表层过程相互作用的研究, 加强过去环境与现代环境研究的结合, 加强观察记录与数值模拟的结合, 对提高地球科学的认识水平具有重要意义. 此外, 不同学科领域专家在一起进行报告和讨论, 有利于拓宽学术视野, 增进学科交叉, 对于提高中青年科学家的综合素质也具有重要意义.

郑永飞^①, 郭正堂^②, 柴育成^③

(^① 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

^② 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

^③ 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)