

储能电容与光导开关的工作模式

吴明和^{1,2}, 郑晓明², 孙云卿¹, 崔海娟¹, 曾刚¹

(1. 电子科技大学物理电子学院 成都 610054;

2. School of Dentistry and Health Sciences, Charles Sturt University, NSW 2678 Australia)

【摘要】介绍了以光导开关为核心的高压纳秒电脉冲系统组成。半绝缘GaAs光导开关在初始偏置电场26.7 kV/cm条件下受到1 ns、光能20 μ J、波长1.064 nm激光照射。根据SRH模型和有限元法计算载流子浓度和光导开关时域电阻, 考虑Blumlein传输线等效电容电压的时域变化, 进行了输出脉冲的模拟计算。模拟和实验表明, 在Blumlein传输线放电电容很小(27.2 pF)的情况下, 电容放电的充分性导致光导开关的线性工作范围的上限至少可达到26.7 kV/cm。

关键词 倍压传输线; 连续性方程; 有限元法; 光导开关

中图分类号 TN204; TN304.2

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.02.014

Impact of Storage Capacitor on the Modes of PCSS

WU Ming-he^{1,2}, ZHENG Xiao-ming², SUN Yun-qing¹, CUI Hai-juan¹, and ZENG Gang¹

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. School of Dentistry and Health Sciences, Charles Sturt University, NSW 2678 Australia)

Abstract Pulsed power system on basis of photoconductive semiconductor switch (PCSS) is introduced. The output pulse is simulated according to shockley-read-hall model (SRHM), finite element method (FEM), and time-dependent voltage from the equivalent capacitance of Blumlein transmission line. PCSS made from semi-insulating GaAs (SI GaAs) is biased under high electric field 26.7 kV/cm and illuminated by laser at the wavelength of 1.064 micrometer for 1 nanosecond with 20 micro-joules. The agreement between the simulation result and the experimental result shows that in the condition of small capacitance of Blumlein transmission line (27.2 pF) PCSS can operate in linear mode in which the biased electrical field is at least up to 26.7 kV/cm.

Key words blumlein transmission line; continuity equation; finite element method; photoconductive semiconductor switch

半绝缘GaAs制成的光导开关(PCSS)可以工作在线性模式、Lock-on模式和雪崩模式。文献[1-4]对光导开关的线性模式范围进行讨论, 10 000皮法储能电容经过光导开关和负载放电, 导致光导开关的线性范围上限达到9 kV/cm, 而且光导开关的电压转换效率小于50%。对于3 mm光导开关, 如果光导开关工作在线性模式下, 脉冲功率系统的输出电压不超过1 kV。2006年以后, 本文课题组对脉冲功率系统进行了很大的改进。Blumlein传输线的设计、脉冲电源取代高压直流电源以及光电同步控制器的自制成功, 导致输出效率和输出电压提高, 8 kV输出电压施加在3 mm长的开关(偏置电场为26.7 kV/cm)上, 可输出峰值电压为5 kV的脉冲^[5]。按照文献[1]的研究, 光导开关应该工作在Lock-on模式下, 当开关的偏置电场超过25 kV/cm时, 认为光导开关处于雪崩模式^[5-6]。

本文重新审视在26.7 kV/cm的偏置电场下光导开关的工作模式。很小的Blumlein传输线等效电容(实测为27.2 pF)可能导致光导开关和负载迅速而充分地放电, 使导带的电子回到电子陷阱EL2中, 而不是跃迁到导带的卫星谷, 光导开关仍工作在线性范围内, 只不过由于小电容导致了线性范围的扩大。以SRH模型为出发点, 首先计算亚带隙激光产生的电子空穴浓度, 然后用有限元法计算光导开关的时域电阻, 还考虑Blumlein线等效电容的电压随时间而降低, 最后模拟示波器的输出。

1 系统结构

纳秒脉冲功率系统组成包括小型化的高压电源、具有储能和脉冲形成的双重功能的Blumlein传输线、可调延时装置、可快速开启和关断的光导开

关、激光装置。脉冲源系统结构组成如图1所示。

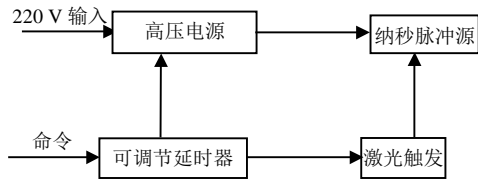


图1 系统框图

自制的高压电源的输出电压范围可调节(0~30 kV)。该高压电源用回扫变压器升压^[5,7],通过TTL电平给出初始触发信号,放大后触发回扫变压器,将回扫变压器存储的磁能转化成Blumlein传输线的电容能量。

系统中的Blumlein传输线有储能和低损耗传输两个作用^[8]。光导开关未导通之前,高压电源给光导开关加高压数十微秒,直到激光到来,以保护光导开关。在激光到来时,光导开关的导通导致脉冲传输到负载。

光导开关的关断时间与半绝缘砷化镓(SI GaAs)中场加强捕获截面有关。在高电场下(大于20 kV/cm),被激发的电子重新被半绝缘砷化镓中的中性EL2中心捕获。研究表明,在高场情况下,EL2对导带电子的捕获截面是低场时捕获截面的30倍甚至更高^[4,9],大大加速了光导开关的关断时间,使开关成为纳秒关断开关,但也带来了光导开关寿命有限的问题,所以对激光触发脉冲和给Blumlein传输线充电脉冲之间的时间延迟要进行合理设计。时间延迟太短,光导开关开通,但Blumlein传输线^[10]没有储能,没有纳秒脉冲输出;时间延迟太长,高压偏置的GaAs材料发热量大,导致开关的寿命非常有限。用可调节延时器将该时间延迟设置为微秒数量级,可以使光导开关次数达到百万次。

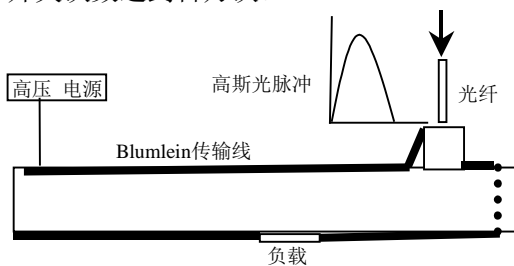


图2 脉冲系统组成

波长为1.064 μm 、持续时间仅为1 ns的激光使处于高电压偏置的光导开关产生纳秒上升沿的高压电脉冲输出。纳秒脉冲功率系统如图2所示。

3 模型与数值计算

与文献[4,11]相同,瞬态激光激励光电子和空

穴,利用SRH模型,求解电子(n)和空穴(p)随时间的变化。设 $\beta_{\text{DD-CB}}$ 表示EL2对电子的捕获系数, $\beta_{\text{DD-CB}}^{\text{th}}$ 为束缚电子热发射系数, B 为直接复合系数, n_{DD} 为EL2中束缚的电子浓度, $\beta_{\text{DD-VB}}$ 为EL2对空穴的捕获系数, $\beta_{\text{DD-VB}}^{\text{th}}$ 为价带电子热发射系数,EL2对1.064 nm激光的吸收系数^[12-13]为:

$$\alpha = N_{\text{DD0}}\sigma_{\text{pp}} + n_{\text{DD}}(\sigma_{\text{pn}} - \sigma_{\text{pp}}) \quad (1)$$

式中, σ_{pp} 为空穴对光的吸收截面; σ_{pn} 为束缚电子对光的吸收截面。根据载流子陷阱动力学方程^[11]有:

$$\frac{dn}{dt} = f \frac{I(t)}{h\nu} \alpha - \beta_{\text{DD-CB}} n (N_{\text{DD0}} - n_{\text{DD}}) + \beta_{\text{DD-CB}}^{\text{th}} n_{\text{DD}} - B(np - n_0^2) \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\beta_{\text{DD-VB}} n_{\text{DD}} p + \beta_{\text{DD-VB}}^{\text{th}} (N_{\text{DD0}} - n_{\text{DD}}) + \beta_{\text{DD-CB}} n (N_{\text{DD0}} - n_{\text{DD}}) - \beta_{\text{DD-CB}}^{\text{th}} n_{\text{DD}} \quad (3)$$

$$\frac{dp}{dt} = f \frac{I(t)}{h\nu} \alpha - \beta_{\text{DD-VB}} n_{\text{DD}} p + \beta_{\text{DD-VB}}^{\text{th}} (N_{\text{DD0}} - n_{\text{DD}}) - B(np - n_0^2) \quad (4)$$

式中, f 为 $l_3=0.6$ mm厚度的SI GaAs吸收光的百分比^[14-15]:

$$f = 1 - R - \frac{\text{Re}^{-2\alpha l_3} T_{\text{op}}^2}{1 - R^2 e^{-2\alpha l_3}} - \frac{e^{-2\alpha l_3} T_{\text{op}}^2}{1 - R^2 e^{-2\alpha l_3}} \quad (5)$$

其中, R 和 T_{op} 代表GaAs的反射和透射系数分别为:

$$R = [(n_{r1} - n_{r0}) / (n_{r1} + n_{r0})]^2 \quad (6)$$

$$T_{\text{op}} = n_{r1} / n_{r0} [2n_{r0} / (n_{r1} + n_{r0})]^2 \quad (7)$$

式中, n_{r0} 为空气的折射率; n_{r1} 为GaAs的折射率。

空间非均匀光的表达式^[15]为:

$$I(x, y, t) = \frac{2E_{\text{op}}}{\pi^{3/2} \sigma_r^2 \sigma_t} \times \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{\sigma_r^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{\sigma_t^2}\right] \quad (8)$$

将上述诸方程差分后,可得到电子 $n(i,j)$ 和空穴 $p(i,j)$ 的浓度。

考虑到光照的非均匀性,利用有限元法计算光导开关的时域电阻^[4],一个微元的电导为:

$$G_{\text{SRHM}}(i, j) = [n(i, j)u + p(i, j)\mu_p] \frac{\Delta x l_3}{\Delta y} \quad (9)$$

沿着电场方向的电阻为串联,则有:

$$R(i) = \sum_{j=1}^{j_{\text{max}}} R(i, j) \quad (10)$$

在垂直于电场方向(宽度方向)电导串联,可得到光导开关的电导为:

$$G_{PCSS} = \sum_{i=1}^{i_{num}} G(i) \quad (11)$$

光导开关的时域电阻为:

$$R_{PCSS}(k) = 1/G_{PCSS}(k) \quad (12)$$

考虑到Blumlein等效电容的电压随时间而变化, 可得到电容器的电压 U 的差分方程。实验可测的是示波器的电压 U_{os} , 用脉冲测试棒可测得PCSS两端的电场为:

$$U_{os}(k) = \frac{R_{os}G_{PCSS}(k)}{1 + R_{os}G_{PCSS}(k)}U(k) \quad (13)$$

$$E_{PCSS}(k) = \frac{U(k)}{[1 + R_{os}G_{PCSS}(k)]l_1} \quad (14)$$

式中, l_1 为PCSS沿着电场方向的长度。

数值计算用的参数如表1所示。

表1 数值计算中运用的参数

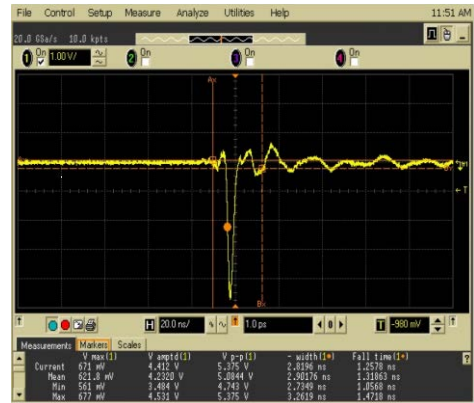
N_{DD0}/cm^{-3}	1.56×10^{16}	n_{DD0}/cm^3	1.25×10^{16}
n_0/cm^{-3}	1.03×10^7	E_{DD}/eV	0.69
$\rho/\Omega \cdot \text{cm}$	8.14×10^7	$\mu_p/\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$	400
$\mu/\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$	6×10^3	σ_p^0/cm^2	2.7×10^{-18}
a/cm	4	E_F/eV	0.72
λ/nm	1 064	C_1/pF	27.2
l_1/mm	3	V_{in}/kV	8
l_2/mm	9.2	σ_{pn}/cm^2	9.07×10^{-17}
l_3/mm	0.6	$B/\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	10^{-10}
σ_r/mm	2	$E_{op}/\mu\text{J}$	20
σ_t/ns	1	R	0.3
σ_n^0/cm^2	1.23×10^{-14}	σ_{pp}/cm^2	3.2×10^7

4 数值计算结果与讨论

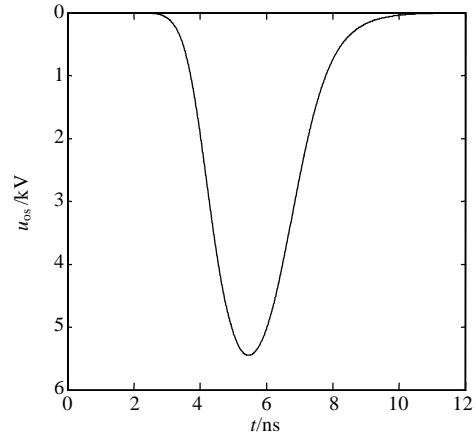
在3 mm的开关加偏置电压8 kV时, 测试结果如图3a所示, 数值计算结果如图3b所示。图中显示的电脉冲输出幅度均约为5 kV, 脉冲宽度约为3 ns。数值计算的负载(示波器)输出(见图3b)和实验测试结果(见图3a)吻合得很好。在数值计算过程中, 假设光导开关工作在线性范围内。在Blumlein等效电容很小的情况下, PCSS确实可以在初始电场大于9 kV/cm的情况下仍然工作在线性模式, 即PCSS的线性工作范围至少可扩展到26.7 kV/cm。

Blumlein传输线的电容对PCSS的工作模式的影响不可忽视。当Blumlein传输线电容较大时, 如图4中虚线所示, $C_2=64.4$ pF。经过光导开关和负载的放电, 电容仍然具有很高的电场(大于5 kV/cm), 导致PCSS在光脉冲后两端电压高于3.5 kV/cm, 光导开关可能进入Lock-on模式或者雪崩模式。经过光照后PCSS两端的电场仍然长时间(大于导带电子的寿命2 nm)高于耿氏振荡的阈值电场^[16]。由于负微分电导

(NDC)的作用, 光导开关可能进入Lock-on模式或者雪崩模式。相反, 如果当电容较小时, 如图4中实线所示, $C_1=27.2$ pF。经过光导开关和负载的放电, PCSS的电场小于3.5 kV/cm, 光导开关可能在线性模式下工作。由于开关在线性模式工作, 开关的寿命延长(约为 3×10^6 次)、输出脉冲的抖动很小(65 ps), 而且输出电压高(大于5 kV), 整个脉冲功率系统实现了课题组一直追求的目标。



a. 示波器显示电压



b. 数值计算示意图

图3 示波器电压

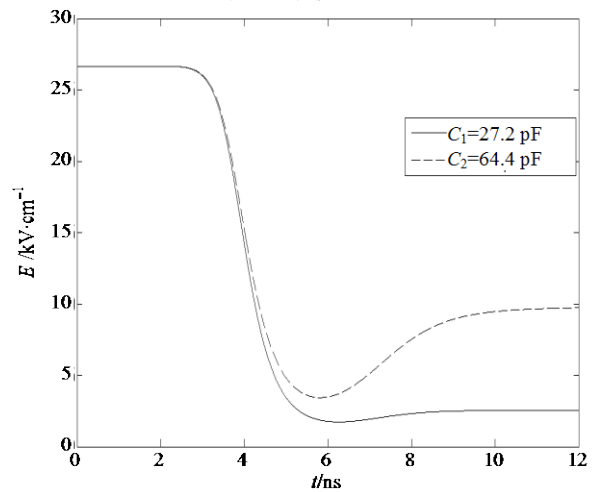


图4 两种电容下光导开关电场随时间的变化

5 结 论

电容较小时,即使PCSS偏置电场高至26.7 kV/cm,充分的光照导致电容充分放电,PCSS工作在线性模式。经过光照后,PCSS两端的电场仍然长时间高于耿氏振荡的阈值电场,光导开关可能进入Lock-on模式或者雪崩模式,可说明与验证Lock-on模式和负微分电导(NDC)作用的相关性,这正是下一步工作研究的核心。

参 考 文 献

- [1] RUAN C, ZHAO W, ZHU S L, et al. Characterization of photoconductive semiconductor switches under nonlinear mode condition[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(1): 56-59.
- [2] KENNEY S, ALLEN R J, LUDWIG S, et al. The temporal development of instabilities in low light activated GaAs switches[C]//*Proceedings of the 20th Power Modulator Symposium*. Myrtle Beach, USA: [s.n.], 1992: 320-323.
- [3] 施卫, 梁振宪. 高倍增超快高压GaAs光电开关触发瞬态特性研究[J]. *电子学报*, 2000, 28(2): 20-23.
SHI Wei, LIANG Zhen-xian. Analysis and characteristic of high-gain ultra-fast gaas photoconductive switches[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(2): 20-23.
- [4] WU M H, ZHENG X M, RUAN C X, et al. Photo-resistances of semi-insulating GaAs photoconductive switch illuminated by 1.064 micro-meter laser pulse[J]. *J Appl Phys*, 2009, 106(023101-1): 1-6.
- [5] 陈立万, 吴明和. 一种新型高功率电脉冲产生系统[J]. *高电压技术*, 2008, 34(5): 1057-1061.
CHEN Li-wan, WU Ming-he. New high power electric pulse generation system[J]. *High Voltage Engineering*, 2008, 34(5): 1057-1061.
- [6] OICLES J A, GRANT J R, HEMAN M H. Realizing the potential of photoconductive switching for HPM application[C]//*SPIE*. [S.l.]: [s.n.], 1995: 225-236.
- [7] 吴明和, 阮成礼, 杨宏春, 等. 用回扫变压器赋能的光导开关功率辐射系统[J]. *高电压技术*, 2007, 33(9): 143-145.
WU Ming-he, RUAN Cheng-li, YANG Hong-chun, et al. High-power radiation system with pcss acting as the photoconductive switch and a scanning-back charging transformer[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(9): 143-145.
- [8] FORREST J A, BAUM C E, PRATHER W D, et al. Ultra-wideband transmitter research[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1998, 26(3): 860-872.
- [9] PIAZZA F, CHRISTIANEN P C M, MAAN J C. Electric field dependent EL2 capture coefficient in semi-insulating GaAs obtained from propagation high field domains[J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(13): 1909-1911.
- [10] 石顺祥, 鲍吉龙, 王永昌, 等. 新型高效率微带型光导开关脉冲产生器输出特性的研究[J]. *光学学报*, 1994, 14(3): 313-317.
SHI Shun-xiang, BAO Jie-long, WANG Yong-chang, et al. A research of temporal behaviour for a new high-efficiency photoconductive switch pulse generator[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(3): 313-317.
- [11] ORTIZ V, NAGLE J, LAMPIN J F, et al. Low temperature grown GaAs: modeling of transient reflectivity experimerns[J]. *J Appl Phys*, 2007, 102(043515): 1-9.
- [12] SILVERBERTG P, OMLING P, SAMUELSON L. Hole photo-ionization cross sections of EL2 in GaAs[J]. *Appl Phys Lett*, 1988, 52(20): 1689-1691.
- [13] BRIERLEY S K, LEHR D S. Full-wafer mapping of total and ionized EL2 concentration in semi-insulating GaAs using infrared absorption[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, 55(23): 2426-2428.
- [14] PARTAIN L, DAY D, POWELL R. Metastable impact ionization of traps model for lock-on in GaAs photoconductive switches[J]. *J Appl Phys*, 1993, 74(1): 335-340.
- [15] 杨宏春. 基于光导开关的高功率微波系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
YANG Hong-chun. Research on high power microwave system based on PCSS[D]. Chengdu: University of Electronics Science and Technology of China, 2008.
- [16] MAZZOLA M S, SCHOENBACH K H, LAKDAWALA V K, et al. GaAs photoconductive closing switches with high dark resistance and microsecond conductivity decay[J]. *Appl Phys Lett*, 1989, 54(8): 742-744.

编辑 黄 莘