

文章编号:1001-893X(2010)05-0068-04

一种快速离子化波开关及其在高压脉冲源中的应用^{*}

梁勤金,石小燕,曹晓阳

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:讨论了一种先进的基于快速离子化波组件漂移阶跃恢复二极管(DSRD)的开关特性、工作原理及其在高压纳秒脉冲源中的应用。提出一种新方法解决了传统高压纳秒脉冲源设计难以突破的高功率、高重复频率工作问题,实现了高压纳秒源的全固态、高重复、高压、高可靠、长寿命工作。

关键词:高重复高压纳秒脉冲源;全固态;DSRD 高压纳秒半导体开关

中图分类号:TN99 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2010.05.015

A Fast Ionization Wave Switch and its Application in High Voltage Pulser

LIANG Qin-jin, SHI Xiao-yan, CAO Xiao-yang

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: This paper discusses the switching property, working principle and characters of an advanced all solid-state, fast ionization wave DSRD (Drift Step Recovery Device) and its application in high voltage ns(nanosecond) pulser. A new design method is presented to solve the hard problems in conventional high voltage ns pulser, such as high power and high pulse repeat frequency (PRF) problem. An all solid-state, high PRF, high stability (low jitter), long life and high voltage ns pulser is developed using this method.

Key words: high PRF and high voltage ns pulser; all solid-state; DSRD high voltage ns semiconductor switch

1 引言

高功率小型化全固态高重复高压纳秒脉冲源在军用民用领域具有广泛的前景,例如,超宽带(UWB)雷达、超宽带通信、电磁压制干扰、激光制导引信、加速器物理、等离子体化学、烟气除尘、臭气控制、微生物钝化处理、材料表面处理、高压电力传输与开关控制等^[1-2]。

高压纳秒脉冲源早期使用的开关,如火花隙气态开关、磁开关、闸流管等,其特点是功率容量大、重复频率低、开关速度慢、稳定性差,难以满足体积小、重量轻、全固态、重复频率高、开关速度快、稳定性高的要求。SOS(Semiconductor Opening Switch)开关虽然

固态化,功率容量中等,但开关速度慢,重复频率低,难以满足小型超宽带脉冲源对快脉冲前沿、高功率容量、高重复频率要求。阶跃快恢复二极管、雪崩管虽然具有开关速度快、工作频率高、体积小、重量轻的优点,但受器件工艺限制,高功率容量和寿命都受限。以上几类开关既无法混合使用,使用时又无法互相取长补短。国内外许多研究机构和公司一直试图通过各种技术手段解决这一问题,例如采用光导开关等,也因其高电压大电流工作下工作寿命短、重复频率低,使用受到局限,虽然这些技术有所发展,但都没有达到所期望的结果。

本文结合该领域的最新研究成果和技术,即采用俄罗斯 Igor F. Grekhov 和 Alexei Kardo-Sysoevs 科

^{*} 收稿日期:2010-02-04;修回日期:2010-03-16

学家在圣彼得堡约飞研究所(St. Petersburg of Russia Ioffe Institute)提出的基于快速离化波组件漂移阶跃恢复二极管(Drift Step Recovery Diodes, DSRD)开关产生高压高重频纳秒脉冲新方法^[3],给出了一个应用实例。该方法与传统的高压脉冲源 MARX 方法相比,具有较大技术突破和创新。用该方法和技术设计的全固态高重频高压纳秒脉冲源具有全固态、高功率、高压、高重频、体积小、重量轻、长寿命、高可靠等特点。1999 年以后美国空军实验室也用此方法来代替光导开关研究高功率高压超宽带纳秒脉冲产生。

2 DSRD 技术参数及工作原理

2.1 DSRD 技术参数

DSRD 的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 DSRD 技术参数 Table 1 DSRD technical specifications	
名称	主要技术参数
开关导通时间/ps	100 ~ 500
工作电压范围 (不同类型 DSRD)/kV	0.1 ~ 10
最大工作电流/kA	10
重复频率/MHz	0.1 ~ 1
外形尺寸/mm	直径 5 ~ 20, 厚 2 ~ 3

2.2 DSRD 工作原理

DSRD 是 1998 年俄罗斯 I. V. Grekhov 教授等发明的、基于新的等离子体离化波高压纳秒开关器件。I. V. Grekhov 教授等在研究类似硅 PIN 二极管结构时,意外发现该结构在反向高压下会产生等离子体离化波现象,进一步深入研究,发明了离化波理论,设计了多层 PN 结构的半导体器件模型结构,并对该结构参数进行模拟计算和实验研究。该等离子效应离化波理论的高压半导体开关工作原理与传统的高压开关不同:首先,它具有复杂的多层 PN 结结构,其结构不同对高压半导体开关性能有较大影响;其次,多层 PN 结结构的每层掺杂浓度不同,也影响高压半导体开关性能。该高压开关主要依靠体内 PN 结的自动恢复来切断电流的,在电流切断瞬间,开关体内的等离子体完全消失。

根据 I. V. Grekhov 教授等对类似硅 PIN 二极管

结构中发明的离化波理论研究,DSRD 开关通/断工作原理如图 1 所示。

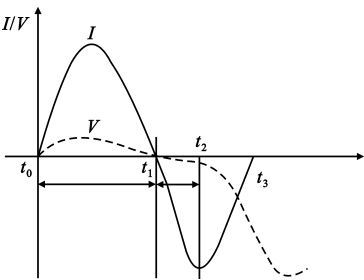


图 1 DSRD 开关工作原理图
Fig.1 Working principle of DSRD switch

在 t_1 时间段内,流过开关的正向电流将电子 - 空隙等离子体注入开关的每层结构,随后,在 t_2 时间段内,由于电流方向逆转,开关体内的等离子体逐渐被消除。在 t_2 时间段的初始时间内,由于等离子体还没有完全被消除,开关仍处于高电导率阶段,因而其压降很小(如图 1 中虚线所示)。在 t_3 时刻,开关体内的 PN 结恢复反向阻断特性,其空间电荷区的电压迅速升高,流过开关电流被切断,开关的电压迅速增大。

基于一种新型等离子体离化效应高压全固态纳秒开关特性,完成了一种 DSRD 核心开关器件研制,要求其在高功率条件下使用:脉冲电压 10 kV;脉冲电流 100 mA;开关导通时间短(前沿 $T_r < 1\,000\text{ ps}$);体积小($\phi 5 \times 3.5\text{ mm}$)。

DSRD 开关性能如下:

- (1)该高压开关器件具有特殊四层两端 n - p - n - p 结构和特殊参杂浓度;
- (2)峰值功率达几十到几百兆瓦;
- (3)开关开启时间为 100 ~ 1 000 ps,且不依赖于加在它上的工作电压和流过它的电流;
- (4)工作电流超过 10 kA 时,电流上升率超过 100 kA/ms。在 50 Ω 负载下,工作电流为 500 A 时,在 0.2 ns 的上升时间内,电流上升率达到 2 500 kA/ms。

下面给出一个设计举例。DSRD 主要技术参数:直流工作电压为 10 kV/100 mA,正向开启电压为 300 V/1 kA,脉冲电流为 1 kA,脉冲宽度为 1 ns,管子开关导通时间前沿 $T_r < 300\text{ ps}$,管子的电压上升速率大于 10^{10} V/s ,圆片结构为 $\phi 5 \times 3.5\text{ mm}$,封装形式为留出输入、输出焊接点。

一种新型等离子体离化效应高压全固态纳秒开关如图 2 所示。

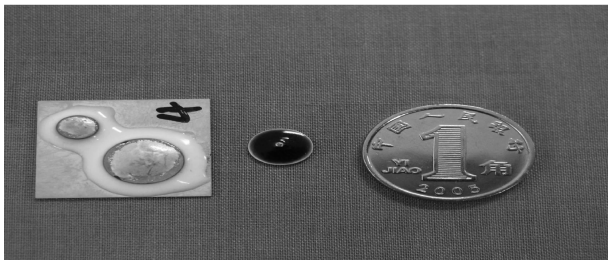


图2 一种快速离化波高压半导体纳秒开关(DSRD)
Fig.2 A fast ionization wave high voltage semiconductor switch (DSRD)

2.3 DSRD 超快速物理特性

当一外加正向电流作用在 DSRD 的 PN 结上,其等离子体泵浦开始,载流子扩散区域(Diffuse Region, DR)出现在 PN 结附近,该区域宽度为

$$W_d = D\tau \tag{1}$$

式中, D 为扩散系数, τ 为等离子体泵浦脉冲宽度。来自扩散区域 DR 的漂荷载流子进入 n 层, 其饱和载流子速率 V_{SCR} 为

$$V_{SCR} = \frac{j}{qN_d} \tag{2}$$

式中, j 为空间电荷区(SCR)扩展达到的最大雪崩电流密度, q 为电子电荷, N_d 为 N 层涂料参杂浓度。

当电流变化方向以相反方向泵浦时其载流子速率仍由式(2)决定。当等离子体泵浦 PN 结空间电荷区 SCR, 空间电荷区 SCR 扩展, SCR 上电压增加。SCR 上电压(雪崩电压)上升速率 du/dt 理论最大值为

$$\frac{du}{dt} = \frac{qN_dW_{SCR}V_{SCR}}{2\epsilon_r} \tag{3}$$

式中, W_{SCR} 为 SCR 宽度, V_{SCR} 为载流子速率, ϵ_r 为相对介电常数。从式(2)、式(3)可以看出, DSRD 上 PN 结发生快速延迟雪崩, 高密度的雪崩倍增电流密度(j)出现在空间电荷区(SCR), 致使 SCR 场强增加及扩展边缘, 其 PN 结上产生了快速上升电压 du/dt 。

2.4 DSRD 的超快开关特性

当 DSRD 的 PN 结等离子体泵浦空间电荷区(SCR)时, 其开启时间 t_{on} 称作飞跃时间或者叫做开关时间, 可以表示为

$$t_{on} = \frac{W_{SCR}}{V_{SCR}} \tag{4}$$

式(4)表明: DSRD 的开关时间 t_{on} 与 W_{SCR} 成正比, 而 W_{SCR} 与 DSRD 上的雪崩模块电压成正比。当 W_{SCR} 越宽, 即能产生并承受更高电压时, t_{on} 所需更

多开启时间。当雪崩产生载流子速率 V_{SCR} 足够高, t_{on} 所需更多开启时间主要与 V_{SCR} 有关, W_{SCR} 退居起次要作用。

3 DSRD 应用实例

一种基于快速离化波高压半导体开关的全固态高重频高压纳秒脉冲源如图 3 所示。

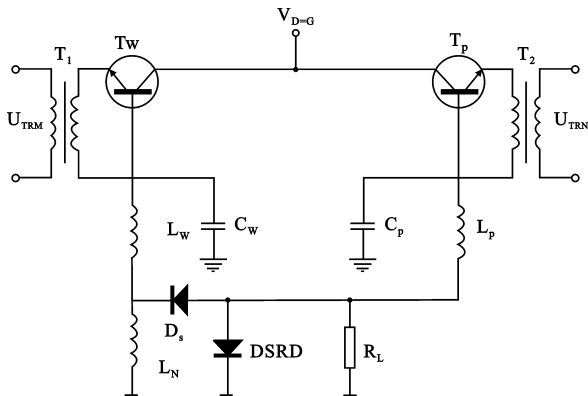


图3 全固态高重频高压纳秒脉冲源电路
Fig.3 Circuit of all solid-state high PRF high voltage ns pulser

图 3 所示电路在外触发脉冲期间, 开关管 T_W 、 T_P 导通给贮能电容 C_W 、 C_P 充电, C_W 、 C_P 、 L_W 、 L_P 、 L_N 中贮存能量, 完成高功率超宽带脉冲产生所要求的能量贮存。由于隔离二极管 D_S 的隔离作用, 开关管 T_W 给 C_W 、 L_W 、 L_N 的充电电流仅仅通过电感 L_W 、 L_N 。开关管 T_P 给 C_P 、 L_P 、DSRD 的充电电流在外触发脉冲使开关 T_P 导通期间, DSRD 上的电流持续增加, 即 DSRD 完成等离子体泵浦过程。当开关管 T_W 、 T_P 断开, L_W 、 L_P 中电流 i_W 、 i_P 改变方向, 开始在 DSRD 的靠近 PN 结参杂浓缩区抽取电子 - 空穴等离子体载流子, 直到 DSRD 截止断开为止, 此时贮存在 C_W 、 L_W 、 L_N 中能量快速转移到负载 R_L 上, 并在负载 R_L 上产生高压超宽带脉冲 (U_{TRM} 、 U_{TRN} 为外触发脉冲, T_W 、 T_P 为作开关用的开关, C_W 、 C_P 为贮能电容, T_1 、 T_2 为输入隔离变压器, C_W 、 L_W 、 L_N 为贮能电感, D_S 为隔离二极管, DSRD 为快速离化波开关二极管, R_L 为负载)。

一种全固态高重频高压纳秒脉冲源主要技术指标为: 输出功率为 100 kW; 脉冲宽度为 1 ns; 重复频率为 300 kHz; 抖动小于 50 ps; 尺寸为 300 mm × 300 mm × 100 mm。图 4 为全固态高重频高压纳秒脉冲源输出电压波形。

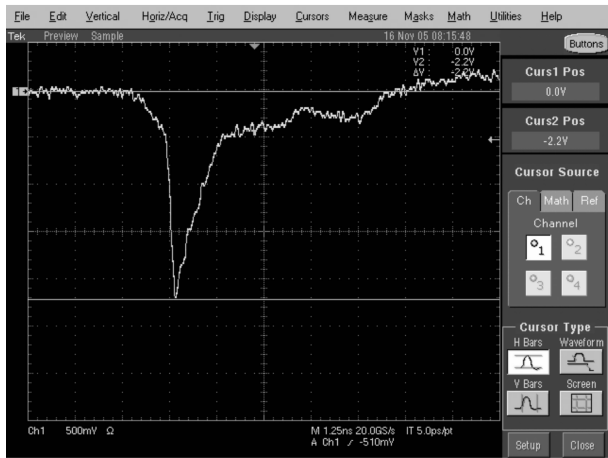


图 4 全固态高重频高压纳秒脉冲源输出电压波形
Fig.4 Output voltage wave form of all solid-state
high PRF high voltage ns pulser

4 结 论

本文利用近年来国内外新开发的一种先进的全固态、高压、高功率半导体开关技术,针对传统非固态高压开关的缺点,研究了一种先进快速离化波 DSRD 的开关特性及工作原理,结合全固态高重频高压纳秒脉冲源设计要求及其全固态、高功率输出、高电压、高重频、体积小、重量轻等特点,提出了一种先进全固态高重频高压纳秒脉冲源电路设计实现方法。该设计方法与传统的 MARX 方法相比,其高压纳秒脉冲源综合技术指标有较大提高,并且该研究方法与研究方向具有较大的发展潜力和应用前景。

参考文献:

[1] Fontana R J. Recent System Application of Short-pulse UWB Technology [J]. IEEE Microwave Theory and Technology, 2004,52(9):2087 – 2096.

[2] Sergey V, Zaoulin. High Repletion Frequency Picosecond Pulse Generation [C]//IEEE Conference Record of Power Modulator Symposium. [s.l.]:IEEE,2002:403 – 405.

[3] Igor V Grekhov. Physical Basis for High Power Semiconductor Nanosecond and Subnanosecond Switches [J]. High-Voltage Engineering, 1998(11): 1318 – 1320.

作者简介:

梁勤金(1963 –),男,四川蓬溪人,研究员,主要研究方向为高功率微波技术及应用;

LIANG Qin-jin(male) was born in Pengxi, Sichuan Province, in 1963. He is now a senior engineer of professor. His research concerns high power microwave technology and its applications.

Email: liangqinjin@yahoo.com.cn

石小燕(1971 –),女,四川成都人,工程师,主要研究方向为高功率微波技术及应用;

SHI Xiao-yan(female) was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1971. She is now an engineer. Her research concerns high power microwave technology and its applications.

曹晓阳(1983 –),男,陕西西安人,助理工程师,主要研究方向为高功率微波技术及应用。

CAO Xiao-yang(male) was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1971. He is now an assistant engineer. His research concerns high power microwave technology and its applications.