



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105281716 A

(43) 申请公布日 2016. 01. 27

(21) 申请号 201510582258. 1

(22) 申请日 2015. 09. 15

(71) 申请人 重庆大学

地址 400044 重庆市沙坪坝区沙正街 174 号

(72) 发明人 米彦 姚陈果 李成祥 万佳仑

唐雪峰 张晏源

(74) 专利代理机构 重庆大学专利中心 50201

代理人 王翔

(51) Int. Cl.

H03K 3/42(2006. 01)

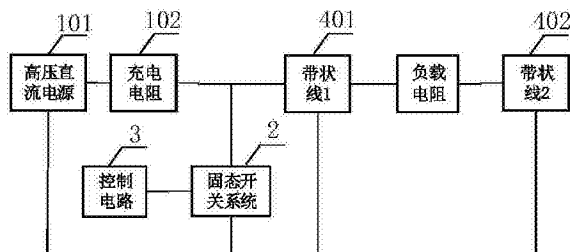
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器

(57) 摘要

本发明公开了一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器,包括电源系统、固态开关系统、控制电路和层叠 Blumlein 带状线。实质上是一种利用通信行业中常用的带状线形成波的折反射从而在匹配的负载上面产生脉冲电场。该发生器采用多级固态串联开关组作为系统开关,并通过控制 MOSFETs 的开断在带状线系统中形成脉冲方波,通过多级 Blumlein 带状线 PCB 板并联层叠可以在较小空间内实现系统输出阻抗模块化变化,在不同生物负载两端输出纳秒脉冲电压具有以下参数:幅值的可调范围从 0 伏到上千伏,脉宽 100ns,上升沿 30ns 以内,重复频率可高至几百甚至上千 Hz,而且通过并联层叠方式可以满足生物医学实验中多种负载的应用场合,可用于纳秒脉冲电场生物学效应的研究。



1. 一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器,其特征在于:包括电源系统(1)、固态开关系统(2)、控制电路(3)和层叠 Blumlein 带状线(4);

所述电源系统(1)包括高压直流电源(101)和充电电阻(102);

所述固态开关系统(2)包括:+15VDC/DC 隔离模块(201)、+15VDC/+5VDC 转换模块(202)、光纤接收器(203)、驱动芯片(204)和 MOSFETs 串联开关组(205);所述转换模块(202)将 15V 电压转换为 5V 电压;所述 MOSFETs 串联开关组(205)由两个 MOSFET 开关串联而成;

所述控制电路(3)包括信号发生器(301)、光纤驱动器(302)、光纤发射器(303)和 1 分 2 光纤分路器(304);

所述层叠 Blumlein 带状线(4)为多个 PCB 带状线板并联层叠而成;所述 PCB 带状线板包括第一层表层接地层,第二层带状线布线层,第三层接地层,第四层带状线布线层和第五层底层接地层,每层通过 FR-4 绝缘材料隔离;所述带状线包括第一带状线(401)和第二带状线(402),带状线为导体带,材质选用铜;第一带状线(401)包括第一层表层第一带状线接地层、第二层布线层第一带状线(401-2)和第三层第一带状线接地层、第四层布线层第一带状线(401-4)、第五层底层第一带状线接地层;第二带状线(402)包括第一层表层第二带状线接地层、第二层布线层第二带状线(402-2)、第三层接第二带状线地层、第四层布线层第二带状线(402-4)和第五层底层第二带状线接地层;第一、三、五层第一带状线接地层和第一、三、五层第二带状线接地层分别布置在所在层的左、右半平面,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离;第二层布线层第一带状线(401-2)和第二层布线层第二带状线(402-2)在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离;第四层布线层第一带状线(401-4)和第四层布线层第二带状线(402-4)在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离;

利用过孔连接将第二层布线层第一带状线(401-2)末端与第四层布线层第一带状线(401-4)末端串联连接,同时利用铜带布线将第四层布线层第一带状线(401-4)首端与第二层布线层第二带状线(402-2)首端串联,第二层布线层第二带状线(402-2)末端通过过孔与第四层布线层第二带状线(402-4)末端串联,第四层布线层第二带状线(402-4)首端悬空作为悬空端;第二层布线层第一带状线(401-2)的首端作为第一带状线(401)的接线端,利用过孔将第一带状线第一、三、五层接地层并联,此三层为负载一个接线端;利用过孔将第二带状线的第一、三、五层接地层并联,此三层为负载的另一个接线端;

所述高压直流电源(101)的正极通过导线与充电电阻(102)一端连接,充电电阻(102)的另一端包括两条并联支路,一条支路通过导线与固态开关系统(2)的 MOSFETs 串联开关组(205)的漏极连接,所述开关组(205)的地极 S 连接到高压直流电源(101)地极而形成一条回路;另一条支路与层叠 Blumlein 带状线(4)的第一带状线(401)导体带接线端连接;负载(5)一端连在第二带状线(402)的接地层,另一端串连在第一带状线(401)的接地层,同时通过导线将第一带状线(401)的接地层接回高压直流电源(101)的地形成回路;

所述信号发生器(301)的信号输出端与光纤驱动器(302)的输入端连接,信号发生器(301)加工产生的脉冲控制信号传输给光纤驱动器(302);光纤驱动器(302)的输出端与光纤发射器(303)的输入端连接,传输光纤发射器(303)根据光纤驱动器(302)输出的驱动信号进行电/光转换;光纤发射器(303)的输出端与光纤接收器(203)的输入端通过光纤

(304) 连接,实现光信号的传输;

所述驱动芯片(204)的电源端通过导线与隔离模块(201)的输出端连接,隔离模块(201)的电源输入端与15V电压线连接,隔离模块(201)为驱动芯片(204)供电;驱动芯片(204)的输出端与所述MOSFETs串联开关组(205)的栅极G连接,驱动芯片(204)为MOSFETs串联开关组(205)提供电流驱动;驱动芯片(204)的信号输入端与光纤接收器(203)的信号输出端连接,驱动芯片(204)接收来自光纤接收器(203)的电信号;所述光纤接收器(203)的电源输入端通过导线与转换模块(202)的输出端连接,转换模块(202)的电源端与15V电源线连接,转换模块(202)将15V电压转换为5V电压给光纤接收器(203)供电。

2. 根据权利要求1所述的一种基于层叠Blumlein带状线型高压纳秒脉冲发生器,其特征在于:

所述高压电源模块(101)将220V交流电转换为最高电压4kV的直流电,最大直流电流为60mA。

3. 根据权利要求1所述的一种基于层叠Blumlein带状线型高压纳秒脉冲发生器,其特征在于:

所述层叠Blumlein带状线(4)是一种自行设计的脉冲形成单元,同时在每块PCB板四周开孔,利用铜柱实现PCB板的并联层叠,达到改变传输线阻抗的目的;根据负载大小,利用铜柱将在偶数层PCB板的第一带状线(401)首端并联、第二带状线(402)导体的末端并联,以及在偶数层PCB板的第一带状线(401)和第二带状线(402)的接地各自并联。

## 一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及生物电磁技术领域,具体设计一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器。

### 背景技术

[0002] 脉冲电场生物学效应引起了国内外研究者的极大兴趣,根据微秒级脉冲电场强度的不同能够诱发生物细胞膜发生可逆、不可逆电穿孔。进一步地,当脉冲电场宽度达到 ns 级、电场强度达到 MV/m 级时,将会诱导产生明显有别于微秒脉冲电场的细胞生物学效应:细胞膜表面虽然没有发生明显的电穿孔现象,但细胞内部(如细胞核、线粒体等)出现一系列的功能性改变,同时诱导细胞凋亡。这种纳秒脉冲电场在无毒性化疗药物参与的情况下,能通过诱导凋亡使肿瘤组织缩小甚至消失,同时避免了炎症、溃疡和药物的副作用。为探究纳秒脉冲电场对细胞内电处理效应机理,需要设计相应的高压 ns 级方波脉冲发生器。

[0003] 生物学应用中常采用同轴线制作纳秒脉冲发生器,但是这一类型的纳秒脉冲发生器存在占用体积较大的弊端。以匹配生物细胞医学实验中  $10\ \Omega$  电转杯为例,为产生 100ns 脉宽的方波脉冲则需要 2 组同轴线并联组(每组由 10 根 10m 长度的  $50\ \Omega$  阻抗并联构成  $5\ \Omega$  阻抗并联组)构成 Blumlein 传输线系统,这样共计需要 200m 长度的  $50\ \Omega$  同轴线,显然纳秒脉冲发生器的体积将会极其巨大。

[0004] 虽然基于微带传输线的高压纳秒脉冲发生器有效满足了生物学实验中对于纳秒脉冲发生器小型化、紧凑型及便携式的要求,但微带传输线本身还有一些不足之处:①微带传输线导体带需要与空气接触,因此,Blumlein 型多层微带传输线层叠层数最多只能达到 2 层微带传输线串联;②微带传输线导体带之间的介质为空气,在导体带间电场畸变情况下容易发生沿面闪络;③在  $0\sim 4\text{GHz}$  频率范围内,电磁波在微带传输线中的传播模式为准 TEM 模式,造成微带传输线尺寸参数只能采取近似计算与实际情况有差别。此外,目前尚未提出针对生物学实验中不同负载( $10\ \Omega$  电转杯、 $20\ \Omega$  电转杯、 $50\ \Omega$  电转杯以及上百  $\Omega$  阻抗的动物组织)模块化阻抗匹配解决方案,大多针对每种不同负载制作了阻抗匹配的专用微带传输线,这显然不利于经济性考量。

### 发明内容

[0005] 本发明的目的是为解决上述困难,提供一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器,该装置通过对 Blumlein 带状线充电,通过开关引入电压波,产生波的折反射在负载两端形成电压差从而形成输出脉冲电压。该装置利用多层 PCB 带状线代替传统的同轴传输线并且设为空间层叠结构从而可以实现较小面积下的可层叠带状线设计,研制了具有紧凑型、便携式、轻量化的高压纳秒脉冲发生器,并通过多级 Blumlein 带状线空间层叠并联方式获取一系列输出阻抗以匹配生物学实验中不同负载,便于研究纳秒脉冲电场作用下的生物学效应。

[0006] 为实现本发明目的而采用的技术方案是这样的,一种基于并联层叠 Blumlein 带

状线型高压纳秒脉冲发生器,实质上是一种利用通信行业中常用的带状线形成波的折反射从而在匹配的负载上面产生脉冲电场,同时为了形成一个方波,通过多级 Blumlein 带状线空间层叠并联方式可以获取一系列输出阻抗以匹配生物学实验中不同负载。

[0007] 一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器,包括电源系统、固态开关系统、控制电路和层叠 Blumlein 带状线。

[0008] 所述电源系统,包括高压直流电源和充电电阻。

[0009] 所述固态开关系统包括: +15VDC/DC 隔离模块、+15VDC/+5VDC 转换模块、光纤接收器、驱动芯片和 MOSFETs 串联开关组。所述转换模块将 15V 电压转换为 5V 电压。所述 MOSFETs 串联开关组由两个 MOSFET 开关串联而成。

[0010] 所述控制电路包括信号发生器、光纤驱动器、光纤发射器和 1 分 2 光纤分路器。

[0011] 所述层叠 Blumlein 带状线为多个 PCB 带状线板并联层叠而成。所述 PCB 带状线板包括第一层表层接地层,第二层带状线布线层,第三层接地层,第四层带状线布线层和第五层底层,每层通过 FR-4 绝缘材料隔离。所述带状线包括第一带状线和第二带状线,带状线为导体带,材质为铜。第一带状线包括第一层表层第一带状线接地层、第二层布线层第一带状线和第三层第一带状线接地层、第四层布线层第一带状线、第五层底层第一带状线接地层。第二带状线包括第一层表层第二带状线接地层、第二层布线层第二带状线、第三层接第二带状线地层、第四层布线层第二带状线和第五层底层第二带状线接地层。第一、三、五层第一带状线接地层和第一、三、五层第二带状线接地层分别布置在左、右半平面,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。第二层布线层第一带状线和第二层布线层第二带状线在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。第四层布线层第一带状线和第四层布线层第二带状线在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。

[0012] 利用过孔连接将第二层布线层第一带状线末端与第四层布线层第一带状线末端串联连接,同时利用铜带布线将第四层布线层第一带状线首端与第二层布线层第二带状线首端串联,第二层布线层第二带状线末端通过过孔第四层布线层第二带状线末端串联,第四层布线层第二带状线首端悬空作为悬空端。第二层布线层第一带状线的首端作为第一带状线的接线端,利用过孔将第一带状线第一、三、五层接地层并联,将第二带状线的第一、三、五层接地层并联。

[0013] 所述高压直流电源的正极通过导线与充电电阻一端连接,充电电阻的另一端包括两条并联支路,一条支路通过导线与固态开关系统的 MOSFETs 串联开关组的漏极连接,所述开关组的地极 S 连接到高压直流电源地极而形成一条回路。另一条支路与层叠 Blumlein 带状线的第一带状线导体带接线端连接。负载一端连在第二带状线的接地层,另一端串连在第一带状线的地,同时通过导线将第一带状线的接地层接回高压直流电源的地形成回路。为了匹配不同的负载,需要根据负载大小利用铜柱将每块 PCB 板的第一带状线首端并联、第二带状线导体的末端并联,以及每块 PCB 板的第一带状线和第二带状线的接地各自并联。

[0014] 所述信号发生器的信号输出端与光纤驱动器的输入端连接,信号发生器加工产生的脉冲控制信号传输给光纤驱动器。光纤驱动器的输出端与光纤发射器的输入端连接,传输光纤发射器根据光纤驱动器输出的驱动信号进行电/光转换。光纤发射器的输出端与光

纤接收器的输入端通过光纤连接,实现光信号的传输。1分2光纤可以对2个MOSFET开关同时控制,从而提高同步性。

[0015] 所述驱动芯片的电源端通过导线与隔离模块的输出端连接,隔离模块的电源输入端与15V电压线连接,隔离模块为驱动芯片供电,同时隔离模块将电路板与供电电源隔离。驱动芯片的输出端与所述MOSFETs串联开关组的栅极G连接,驱动芯片给MOSFETs串联开关组提供高达30A的电流驱动。如图4所示,信号同时控制2个MOSFET开关,第一开关的输出端D极与第二开关的S级连在一起形成串联。驱动芯片的信号输入端与光纤接收器的信号输出端连接,光纤接收器接收控制光信号并转换为电信号输入到驱动芯片。所述光纤接收器的电源输入端通过导线与转换模块的输出端连接,转换模块的电源端与15V电源线连接,转换模块将15V电压转换为5V电压给光纤接收器供电。

[0016] MOSFETs串联开关组则主要用来将层叠Blumlein带状线的铜带接地,也就是形成波过程,因此MOSFETs串联开关组的漏极同样需要接在充电电阻之后,与Blumlein带状线PCB板的入口处相连,同时高压直流电源、Blumlein带状线和固态开关系统接地需要连在一起。

[0017] 进一步的,所述高压电源模块将220V交流电转换为最高电压4kV的直流电压,最大直流电流为60mA。

[0018] 进一步,所述层叠Blumlein带状线是一种自行设计的脉冲形成单元,同时在每块PCB板四周开孔,利用铜柱实现PCB板的并联层叠,达到改变传输线阻抗的目的,从而匹配不同的负载。

[0019] 本发明采用以上技术方案后,主要具有如下的有益效果:

[0020] 1、本发明采用的带状线同微带传输线一样具有平面化结构,能够取代常用的同轴线而有效减小纳秒脉冲发生器体积。此外,其特性阻抗可变范围较大,方便根据实际需要进行设计。

[0021] 2、本发明采用的带状线设计能够避免导体带之间出现沿面闪络情况,电磁波在带状线内的传播模式为更容易进行理论计算的TEM波。此外,由于微带传输线的导体带需要与空气接触,因此单级微带传输线可以利用的PCB层数有限(最多利用4层PCB进行走线以形成顶面和底面两层微带传输线),而理论上带状线则可以在加工条件允许的条件下利用更多层PCB布置导体带实现相同方波脉冲输出条件下成倍减小系统占用面积。

[0022] 3、本发明采用不同级数Blumlein带状线空间并联层叠方式,可以实现一系列输出阻抗以适配 $10\Omega$ 、 $20\Omega$ 以及 $50\Omega$ 电转杯,扩展了Blumlein带状线的通用性。

[0023] 4、本发明中利用MOSFETs开关组能够实现快速的脉冲上升沿,因此能够较为容易地产生50ns脉宽的电压波,同时工作频率相对于火花开关也大大提高,根据直流电源功率的大小能够计算出不同的工作频率,容易达到上千赫兹。

## 附图说明

[0024] 本发明的装置可以通过附图给出的非限定性实施例进一步说明。

[0025] 图1为本发明的原理框图;

[0026] 图2为本发明的电路原理图;

[0027] 图3为本发明的固态开关系统原理图图;

[0028] 图 4 为本发明的 MOSFET 串联开关组示意图；

[0029] 图 5 为本发明的控制信号原理图；

[0030] 图 6 为实例 1 的 Blumlein 带状线导体带分布示意图；

[0031] 图 7 为实例 1 的 Blumlein 带状线负载接线示意图；

[0032] 图 8 为实例 1 的 Blumlein 带状线的截面示意图；

[0033] 图 9 为实例 1 的 Blumlein 带状线 PCB 板层叠示意图；

[0034] 图中：101 为高压直流电源，102 为充电电阻，2 为固态开关系统，201 为 +15VDC/DC 隔离模块，202 为 +15VDC/+5VDC 转换模块，203 为光纤接收器，204 为驱动芯片，205 为 MOSFETs 串联开关组，3 为控制信号系统，301 为信号发生器，302 为光纤驱动器，303 为光纤发射器，304 为 1 分 2 光纤分路器，401 为第一 Blumlein 带状线，402 为第二 Blumlein 带状线，5 为负载。

### 具体实施方式

[0035] 下面结合实施例对本发明作进一步说明，但不应该理解为本发明上述主题范围仅限于下述实施例。在不脱离本发明上述技术思想的情况下，根据本领域普通技术知识和惯用手段，做出各种替换和变更，均应包括在本发明的保护范围内。

[0036] 如图 1～9 所示，一种基于层叠 Blumlein 带状线型高压纳秒脉冲发生器，主要包括电源系统 1、固态开关系统 2、控制电路 3、Blumlein 带状线 4。

[0037] 所述的电源系统，包括高压直流电源 101、充电电阻 102。所述的高压直流电源 101 为市购模块，其输出的最高电压幅值 4kV、最大电流幅值 60mA 直流电。所述充电电阻 102 为市购元件，其阻值为 31k $\Omega$ ，额定功率为 100W，用于限制高压电源模 101 的充电电流幅值。所述高压电源模块 101 的正极通过导线与充电电阻 102 的一端连接，充电电阻 102 的另一端通过导线与 Blumlein 带状线 4 的接线端和 MOSFETs 串联开关组 205 的漏极相连，Blumlein 带状线 4 的第一带状线 401 接地层和 MOSFETs 串联开关组 205 的地极利用导线与高压电源模块 101 的接地极连接，形成两条并联回路。

[0038] 所述开关组 2 主要包括 +15VDC/DC 隔离模块 201，+15VDC/+5VDC 转换模块 202，光纤接收器 203，型号为 IXYS 公司的 IXRFD630 的驱动芯片 204 和 IXYS 公司生产的 DE475-102N21A 型 MOSFETs 开关 205。

[0039] 如图 3 所示，所述驱动芯片 204 的电源端通过导线与隔离模块 201 的输出端连接，隔离模块 201 的电源输入端与 15V 电压线连接，隔离模块 201 为驱动芯片 204 供电。驱动芯片 204 的输出端与所述 MOSFETs 串联开关组 205 的栅极 G 连接，驱动芯片 204 为 MOSFETs 串联开关组 205 提供高达 30A 的电流驱动。驱动芯片 204 的信号输入端与光纤接收器 203 的信号输出端连接，驱动芯片 204 接收来自光纤接收器 203 的电信号。所述光纤接收器 203 的电源输入端通过导线与转换模块 202 的输出端连接，转换模块 202 的电源端与 15V 电源线连接，转换模块 202 将 15V 电压转换为 5V 电压给光纤接收器 203 供电。

[0040] 如图 5 所示，所述控制电路 3 包括型号为 AFG3000C 的信号发生器 301、型号为 DS75451 的光纤驱动器 302、型号为 HFBR1522 的光纤发射器 303 和光纤。所述信号发生器 301 的信号输出端与光纤驱动器 302 的输入端连接，信号发生器 301 加工产生的 TTL 方波脉冲控制信号传输给光纤驱动器 302。光纤驱动器 302 的输出端与光纤发射器 303 的输入端

连接,传输光纤发射器 303 根据光纤驱动器 302 输出的驱动信号进行电 / 光转换。光纤发射器 303 的输出端与光纤接收器 203 的输入端通过光纤 304 连接,实现光信号的传输。

[0041] 所述层叠 Blumlein 带状线 4 为多个 PCB 带状线板并联层叠而成。所述 PCB 带状线板包括第一层表层走线层,第二层带状线布线层,第三层接地层,第四层带状线布线层和第五层底层,每层通过 FR-4 绝缘材料隔离。如图 8 所示,第一层表层走线层、第二层带状线布线层和第三层接地层构成第一层带状线,第三层接地层、第四层带状线布线层和第五层底层构成第二层带状线。如图 6 所示,所述带状线包括第一带状线 401 和第二带状线 402,带状线为导体带,材质为铜。第一带状线 401 包括第一层表层第一带状线接地层、第二层布线层第一带状线 401-2、第三层第一带状线接地层和第四层布线层第一带状线 401-4、第五层底层第一带状线接地层。第二带状线 402 包括第一层表层第二带状线接地层、第二层布线层第二带状线 402-2、第三层接第二带状线地层和第四层布线层第二带状线 402-4 第五层底层第二带状线接地层。第一、三、五层第一带状线接地层和第一、三、五层第二带状线接地层分别布置在左、右半平面,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。第二层布线层第一带状线 401-2 和第二层布线层第二带状线 402-2 在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。第四层布线层第一带状线 401-4 和第四层布线层第二带状线 402-4 在所在层的左、右半平面成“S”蜿蜒型布置内,中间通过 FR-4 绝缘材料隔离。

[0042] 如图 9 所示,所述 PCB 带状线板四周开孔,利用铜柱将带状线并联,同时接地层并联;

[0043] 所述层叠 Blumlein 带状线 4 为多个个 PCB 带状线板并联层叠而成,所述带状线包括第一传输线 401 和第二传输线 402,通过 PCB 带状线板并联层叠的数量来匹配不同的负载。用保角变换法得到的如下有限厚度导体带带状线特性阻抗  $Z_0$  近似求解公式为 ( $w/(b-t) < 10$  时,精度优于 0.5%) :

$$[0044] \quad Z_0 = \frac{30}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left\{ 1 + \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{m} \left[ \frac{8}{\pi} \cdot \frac{1}{m} + \sqrt{\left( \frac{8}{m} \cdot \frac{1}{m} \right)^2 + 6.27} \right] \right\} \quad (1)$$

$$[0045] \quad m = \frac{w}{b-t} + \frac{\Delta w}{b-t} \quad (2)$$

$$[0046] \quad \frac{\Delta w}{b-t} = \frac{x}{\pi(1-x)} \left\{ 1 - 0.5 \ln \left[ \left( \frac{x}{2-x} \right)^2 + \left( \frac{0.0796x}{w/b+1.1x} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$[0047] \quad n = \frac{2}{1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{x}{1-x}}, x = \frac{t}{b} \quad (4)$$

[0048] 公式 1 ~ 4 中,  $\epsilon_r$  为介质材料相对介电常数;如图 8 所示,  $t$  为导体带厚度;  $w$  为图 8 中所示第 2 层和第 4 层的导体带宽度。已知的条件一般为带状线特性阻抗  $Z_0$ 、选用的介质材料相对介电常数  $\epsilon_r$  以及导体铜带厚  $t$  等,因此需要如下公式求得  $w/b$  之值:



$$[0049] \quad \frac{w}{b} = \frac{w_e}{b} - \frac{\Delta w}{b} \quad (5)$$

$$[0050] \quad \frac{w_e}{b} = \frac{8(1-t/b) \cdot \sqrt{e^4 + 0.568}}{\pi e^4 - 1} \quad (6)$$

$$[0051] \quad \frac{\Delta w}{b} = \frac{t/b}{\pi} \left\{ 1 - 0.5 \ln \left[ \left( \frac{t/b}{2-t/b} \right)^2 + \left( \frac{0.0796t/b}{w_e/b - 0.26t/b} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

$$[0052] \quad m = \frac{2}{1 + \frac{2t/b}{31-t/b}}, A = \frac{Z_0 \cdot \sqrt{\epsilon_r}}{30} \quad (8)$$

[0053] 公式 5 ~ 8 中 :  $Z_0$  为所需要的带状线特性阻抗 ;  $\epsilon_r$  为所选用的介质基板材料的相对介电常数。

[0054] 此外, 带状线相速度为

$$[0055] \quad v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (9)$$

[0056] 则带状线长度为

$$[0057] \quad L = \frac{\tau}{2} v_p = \frac{\tau}{2} \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

[0058] 公式 9 和 10 中 :  $c$  为光速,  $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$  ;  $\tau/2$  为电磁波通过单根带状线所需时间, 即 Blumlein 型带状线产生方波的  $1/2$  脉宽。选择 FR4 (相对介电常数 :  $\epsilon_r = 4.4$ ) 作为带状线的介质基板材料, 芯板厚度选为  $b = 1.2 \text{mm}$ , 铜厚  $t = 0.5 \text{oz}$ 。最后根据得到带状线各尺寸参数如表 1 所示 :

[0059]

带状线	$Z_0/\Omega$	$b/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$L/\text{m}$
SPL-1	50	1.13	0.965	7.0
SPL-2	50	1.13	0.965	7.0

[0060] 表 1

[0061] 带状线导体带长度达到  $L = 7.0 \text{m}$ , 为尽量减小其面积需要采用前述蜿蜒结构将其

在空间内层叠串联。本文所设计的 5 层带状线如图 8 所示, Toplayer 层、Strip1 层以及 GND1 层构成第一层带状线, 而 GND1 层、Strip2 层和 Bottom Layer 层构成第二层带状线。此外, Toplayer 层、GND1 层和 Bottom Layer 层通过左侧过孔连接形成接地层, 而 Strip1 层和 Strip2 层为带状线导体带所在层, 这两层分布的导体带如图 6 所示为将这两层内分布的导体带串联连接, 在 Strip1 层导体带结束端通过图 8 中右侧过孔串接到 Strip2 层导体带初始端口实现串联连接。由图 6 可知, Blumlein 型带状线分为左、右两组带状线, 仅通过 Strip2 层的导体带连接。最终, 得到的 5 层带状线具体尺寸为:

[0062] 长 × 宽 × 厚 = 300 (mm) × 260 (mm) × 4.72 (mm)

[0063] 高压直流电源 101 的正极通过导线与充电电阻 102 一端连接, 充电电阻 102 的另一端包括两条并联支路, 一条支路通过导线与固态开关系统 2 的 MOSFETs 串联开关组 205 的漏极连接, 所述开关组 205 的地极 S 连接到高压直流电源 101 地极而形成一条回路。另一条支路, 充电电阻 102 与第一带状线 401 铜带的接线端连接, 铜带另一端与第二带状线 402 铜带串联, 第二带状线 402 铜带另一端悬空作为悬空端。如图 7 所示, 负载 5 一端连在第二带状线 402 的接地, 另一端串连在第一带状线 401 的地, 同时通过导线将第一带状线 401 的地接回高压直流电源 101 的地形成回路。

[0064] 为了在较小空间内实现串联层叠结构, 如图 9 所示, 第一块 PCB 板与第二块 PCB 板之间根据具体电路通过铜柱进行连接以达到并联的目的, 通过改变总的并联带状线的长度以达到匹配不同负载的目的。

[0065] 以上这些实施例应理解为仅用于说明本发明而不用于限制本发明的保护范围。在阅读了本发明的记载的内容之后, 技术人员可以对本发明作各种改动或修改, 这些等效变化和修饰同样落入本发明权利要求所限定的范围。

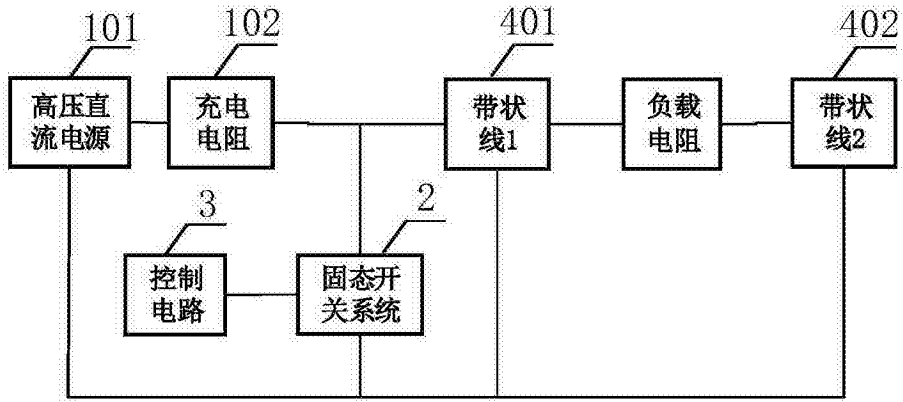


图 1

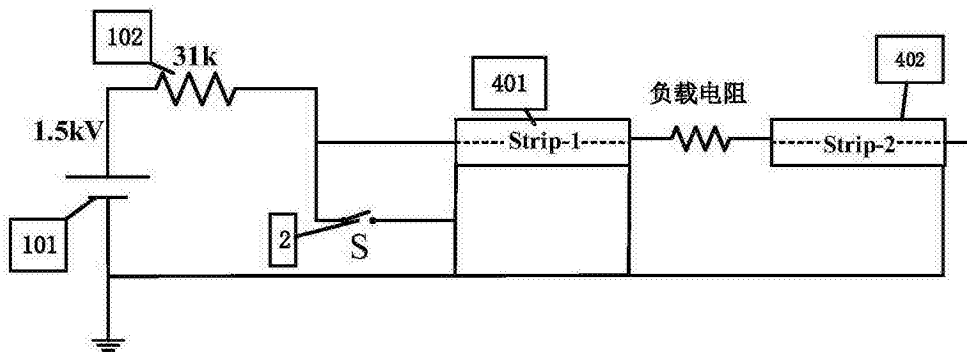


图 2

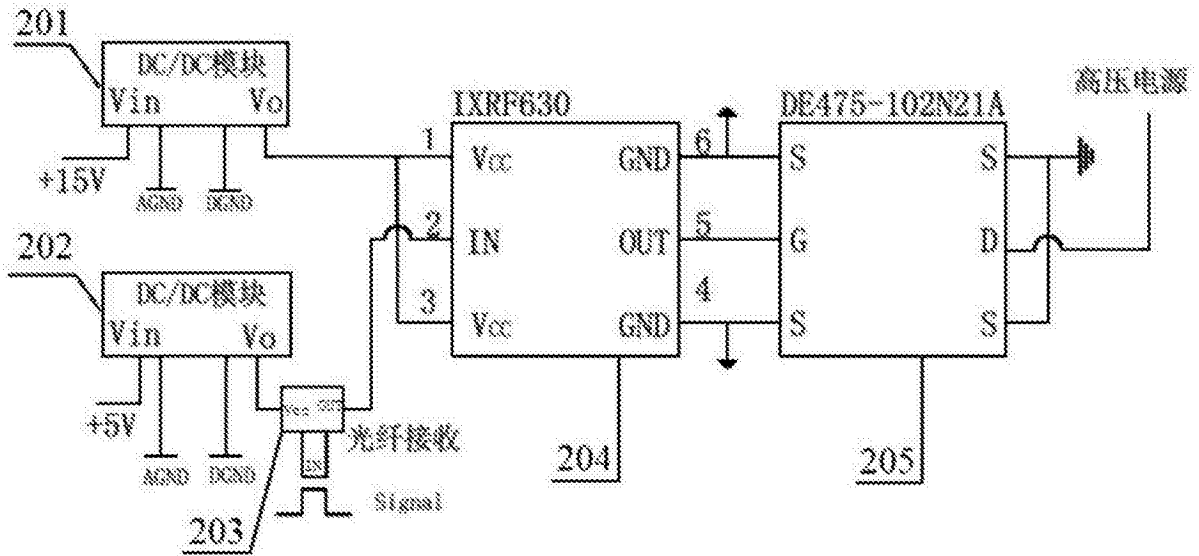


图 3

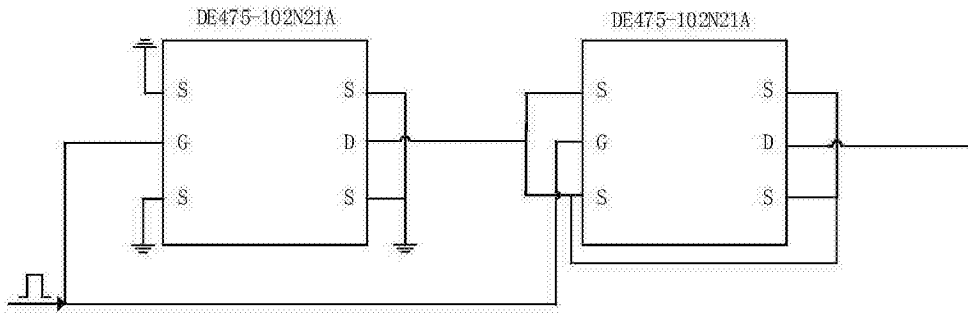


图 4

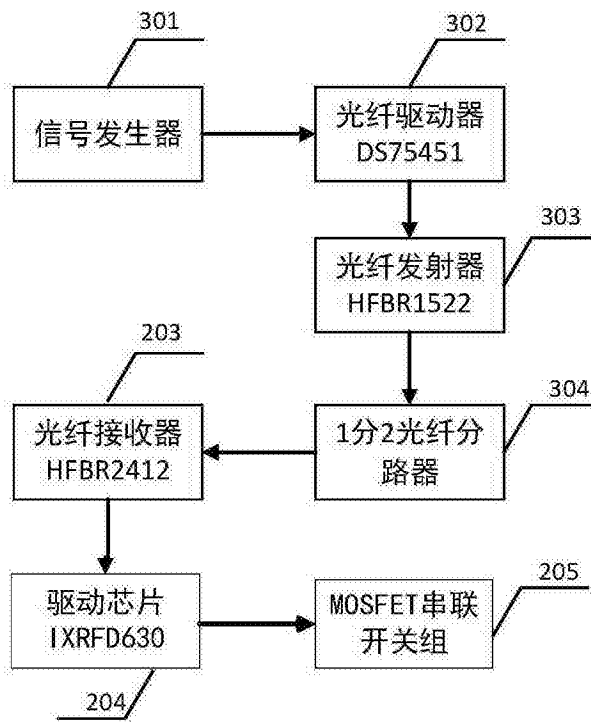


图 5

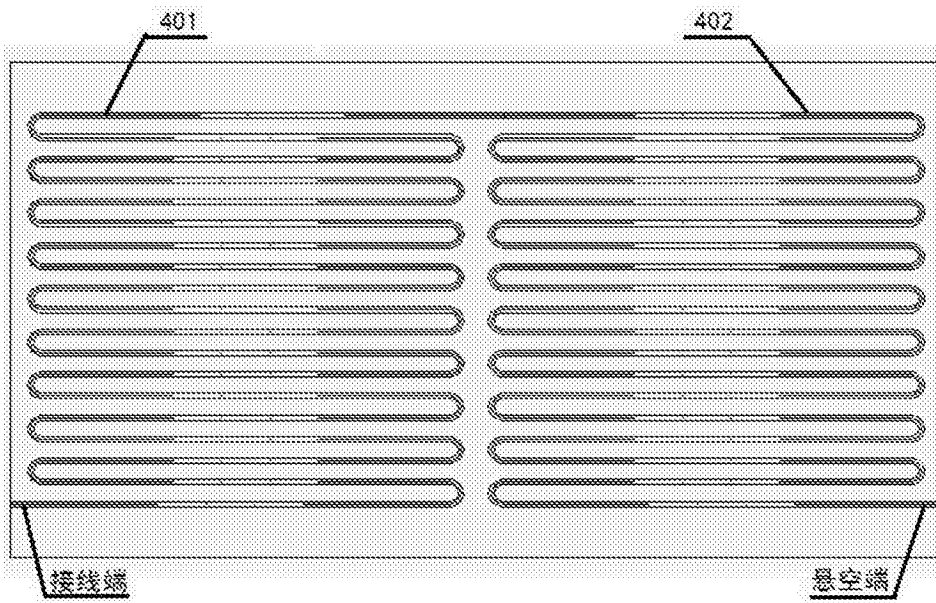


图 6

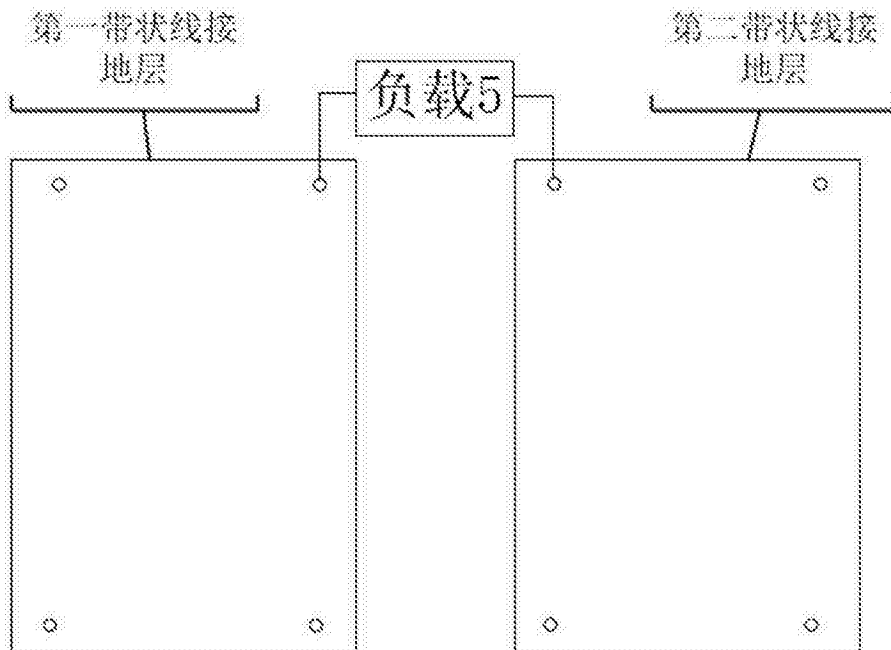


图 7

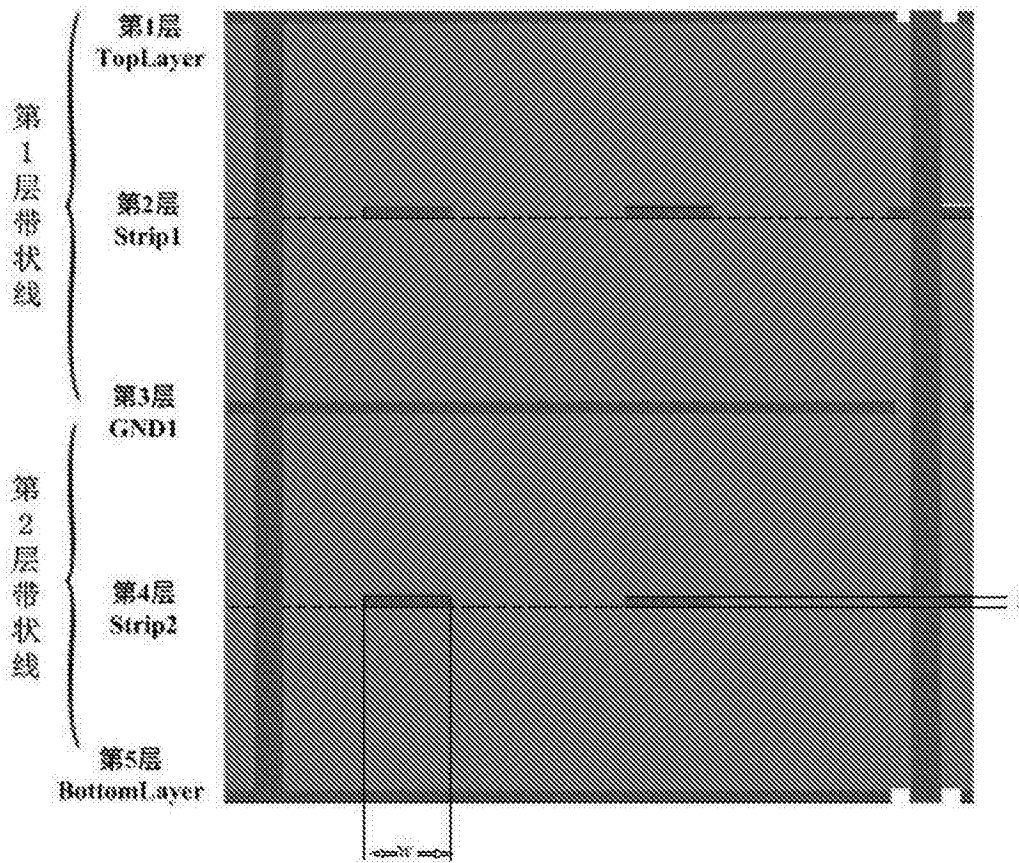


图 8

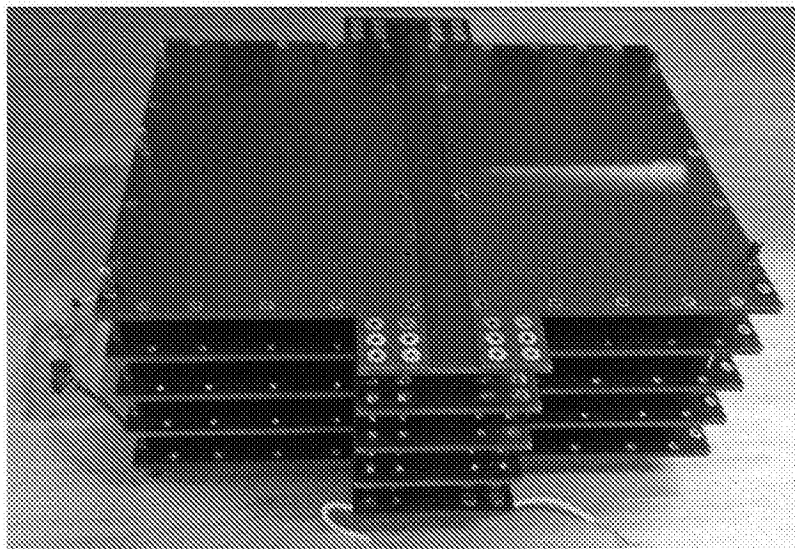


图 9