

WO 2020/258640 A1

LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX,
MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL,
PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM,
AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG,
CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU,
IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT,
RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI,
CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

single or continuous nanosecond discharging pulses are generated according to the type of input driving pulses, and a peak voltage can be adjusted by means of the direct-current power supply (V1). The avalanche triode (T1) is used as a switching element in the power supply, the switching speed is high, the switching frequency is high, nanosecond pulse width pulses can be obtained, and the micro electric spark machining quality and the machining efficiency are effectively improved.

(57) 摘要: 一种基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源, 包括: 直流电源 (V1)、充电电路、放电电路、驱动脉冲输入电路和陡化波形电路, 其中, 充电电路包括: 第一限流电阻 (R1) 和二极管 (D1); 放电电路包括: 储能电容 (C1)、第一雪崩三极管 (T1) 和控制电阻 (R2); 驱动脉冲电路包括: 第二限流电阻 (R3) 和第三限流电阻 (R4); 陡化波形电路包括: 第二雪崩三极管 (T2); 驱动脉冲输入电路控制放电电路中雪崩三极管 (T1) 的通断, 根据输入的驱动脉冲的类型, 产生单个或者连续多个纳秒级放电脉冲, 峰值电压可通过直流电源 (V1) 调节。该电源采用雪崩三极管 (T1) 作为开关元件, 打开速度快, 开关频率高, 可以获得纳秒级脉宽脉冲, 有效提高微细电火花加工质量和加工效率。

基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源

5 相关申请的交叉引用

本申请要求清华大学于 2019 年 06 月 26 日提交的、发明名称为“基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源”的、中国专利申请号“201910559212.6”的优先权。

技术领域

10 本申请属于微细特种加工技术领域，特别涉及一种基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源。

背景技术

脉冲电源对微细电火花加工效率、加工精度、加工过程稳定性，以及工具电极损耗等
15 多个方面有着重要影响。一般情况下，在电火花加工中采用窄脉宽放电脉冲电源，能够获得更好的加工质量、更高的加工效率。并且，窄脉宽放电蚀除中气化蚀除比例更高，有利于获得更薄的重铸层，从而可减小甚至避免微裂纹和热影响层的表面损伤。因此，窄脉宽脉冲电源是提高电火花加工工艺效果的有效技术途径之一。

窄脉宽窄至纳秒级的脉冲电源是一个重要研究发展方向。为实现纳米尺度（纳米去除
20 分辨率）的更微细电火花加工，更微小单脉冲放电能量的纳米级窄脉宽脉冲电源是工艺研究和装备研发的前提。但限于电路结构和电子元件性能，目前纳秒级窄脉宽脉冲电源仍然难以实现。

现有的电火花加工用脉冲电源的电路结构主要分为两类：电子管或晶体管独立式和 RC
弛张式。电子管或晶体管独立式脉冲电源难以获得足够窄脉宽的脉冲，而常规 RC 弛张式
25 脉冲电源放电频率较慢，并且这两种电路都难以获得稳定可控的单脉冲放电。在这两种电路结构中，为了获得纳秒级窄脉宽，现有技术中都较多地采用开关频率高的功率管。然而受制于功率管的制造工艺和开关频率限制，使得电路的成本高昂，而且难以获得足够窄的脉宽。

特别是对于超窄脉宽电火花加工用脉冲电源（比如，脉宽<25ns），目前尚缺乏一种电
30 压可调、放电频率高、稳定性好并且脉宽达到纳秒级的脉冲电源。

发明内容

本申请旨在至少在一定程度上解决相关技术中的技术问题之一。

为此，本申请的目的在于提出一种基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，该电源采用雪崩三极管作为开关元件，打开速度快，开关频率高，可以获得纳秒级脉宽脉冲，可有效提高微细电火花加工质量和加工效率。

5 为达到上述目的，本申请实施例提出了一种基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，包括：直流电源、充电电路、放电电路、驱动脉冲输入电路和陡化波形电路。

所述充电电路包括：第一限流电阻 R1 和二极管 D1；

所述放电电路包括：储能电容 C1、第一雪崩三极管 T1 和控制电阻 R2；

所述驱动脉冲电路包括：第二限流电阻 R3 和第三限流电阻 R4；

10 所述陡化波形电路包括：第二雪崩三极管 T2；

其中，所述第一限流电阻 R1 一端与所述直流电源相连，另一端分别与所述储能电容 C1 和所述第一雪崩三极管 T1 的集电极相连；

所述二极管 D1 的正极分别与所述储能电容 C1、所述第二雪崩三极管 T2 的发射极和所述控制电阻 R2 相连，负极分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述储能电容 C1 一端分别与所述第一限流电阻 R1 和所述第一雪崩三极管 T1 的集电极相连，另一端分别与所述二极管 D1 的正极、所述第二雪崩三极管 T2 的发射极和所述控制电阻 R2 相连；

所述第一雪崩三极管 T1 的基极分别与所述第二限流电阻 R3 和所述第三限流电阻 R4 相连，集电极分别与所述第一限流电阻 R1 和所述储能电容 C1 相连，发射极分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述二极管 D1 的负极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述控制电阻 R2 一端分别与所述储能电容 C1、所述二极管 D1 的正极和所述第二雪崩三极管 T2 的发射极相连，另一端与所述第二雪崩三极管 T2 的基极相连；

25 所述第二限流电阻 R3 一端分别与所述第三限流电阻 R4 和所述第一雪崩三极管 T1 的基极相连，另一端分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述第三限流电阻 R4 一端分别与所述第二限流电阻 R3 和所述第一雪崩三极管 T1 的基极相连，另一端分别与所述直流电源、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

30 所述第二雪崩三极管 T2 的基极与所述控制电阻 R2 相连，发射极分别与所述储能电容 C1、所述二极管 D1 的正极和所述控制电阻 R2 相连，集电极分别与所述直流电源、所述第

三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极相连。

本申请实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，根据本申请实施例提出的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，充电电路对电路中的储能电容进行充电，放电电路利用储能电容中能量进行放电从而产生脉冲，驱动脉冲输入电路为放电电路提供驱动信号，陡化波形电路起到陡化脉冲下降沿的作用。采用雪崩三极管作为开关元件，打开速度快，开关频率高，可以获得纳秒级脉宽脉冲，可有效提高微细电火花加工质量和加工效率。该电源可根据驱动脉冲信号类型，产生单个或连续的纳秒级脉冲，单个脉冲可以用于微细电火花加工原理的研究，连续脉冲可以实际应用于微细电火花加工工艺及装备中。并且纳秒级脉冲电源结构小巧紧凑，易于集成于微细电火花加工装备中，成本低廉、稳定性高。

另外，根据本申请上述实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源还可以具有以下附加的技术特征：

进一步地，在本申请的一个实施例中，所述充电电路通过所述直流电源为所述储能电容 C1 充电。

进一步地，在本申请的一个实施例中，通过控制所述驱动脉冲输入电路输入的脉冲信号来控制所述放电电路中所述第一雪崩三极管 T1 的通断。

进一步地，在本申请的一个实施例中，所述驱动脉冲输入电路输入正脉冲信号时，所述放电电路中的所述第一雪崩三极管 T1 打开，所述放电电路输出端之间产生电压并具有脉冲上升沿，当所述放电电路中放电并有电流流过时，所述控制电阻 R2 产生电压差从而使所述陡化波形电路中的所述第二雪崩二极管 T2 打开，所述放电电路输出端短路，获得脉冲下降沿和窄脉宽。

进一步地，在本申请的一个实施例中，根据所述驱动脉冲输入电路输入脉冲的类型产生单个或者连续多个纳秒级放电脉冲。

进一步地，在本申请的一个实施例中，通过调节所述直流电源来调节所述纳秒级放电脉冲的峰值电压。

进一步地，在本申请的一个实施例中，所述陡化波形电路受所述放电电路反馈控制，在所述第二雪崩三极管 T2 的基极与集电极之间的工具电极和工件之间放电击穿后，所述陡化波形电路将工具电极和工件短路以陡化所述纳秒级放电脉冲的下降沿。

进一步地，在本申请的一个实施例中，将所述直流电源接入所述充电电路输入端，将驱动脉冲信号接入所述驱动脉冲输入电路输入端，将工具电极和工件接入所述第二雪崩三极管 T2 的基极和集电极之间，输入驱动信号后，工具电极和工件之间将产生单个或连续纳

秒级窄脉宽脉冲。

本申请附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，部分将从下面的描述中变得明显，或通过本申请的实践了解到。

5 附图说明

本申请上述的和/或附加的方面和优点从下面结合附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解，其中：

图 1 为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源电路图；

10 图 2 为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的原理意图；

图 3 为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的实物图；

15 图 4 为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的操作流程图；

图 5 为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的放电波形示意图。

具体实施方式

20 下面详细描述本申请的实施例，实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本申请，而不能理解为对本申请的限制。

下面参照附图描述根据本申请实施例提出的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源。

25 图1为根据本申请一个实施例的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源电路图。

如图1所示，该基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源包括以下步骤：直流电源、充电电路、放电电路、驱动脉冲输入电路和陡化波形电路。

其中，充电电路包括：第一限流电阻R1和二极管D1。

30 放电电路包括：储能电容C1、第一雪崩三极管T1和控制电阻R2。

驱动脉冲电路包括：第二限流电阻R3和第三限流电阻R4。

陡化波形电路包括：第二雪崩三极管T2。

充电电路通过直流电源对电路中的储能电容进行充电，放电电路利用储能电容中能量进行放电从而产生脉冲，驱动脉冲输入电路为放电电路提供驱动信号，陡化波形电路起到陡化脉冲下降沿的作用。

如图1所示，基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的连接关系为：第一限流电阻R1一端与直流电源相连，另一端分别与储能电容C1和第一雪崩三极管T1的集电极相连；

二极管D1的正极分别与储能电容C1、第二雪崩二极管T2的发射极和控制电阻R2相连，负极分别与直流电源、第三限流电阻R4、第二限流电阻R3、第一雪崩三极管T1的发射极和第二雪崩二极管T2的集电极相连；

储能电容C1一端分别与第一限流电阻R1和第一雪崩三极管T1的集电极相连，另一端分别与二极管D1的正极、第二雪崩二极管T2的发射极和控制电阻R2相连；

第一雪崩三极管T1的基极分别与第二限流电阻R3和第三限流电阻R4相连，集电极分别与第一限流电阻R1和储能电容C1相连，发射极分别与直流电源、第三限流电阻R4、第二限流电阻R3、二极管D1的负极和第二雪崩二极管T2的集电极相连；

控制电阻R2一端分别与储能电容C1、二极管D1的正极和第二雪崩二极管T2的发射极相连，另一端与第二雪崩二极管T2的基极相连；

第二限流电阻R3一端分别与第三限流电阻R4和第一雪崩三极管T1的基极相连，另一端分别与直流电源、第三限流电阻R4、第一雪崩三极管T1的发射极、二极管D1的负极和第二雪崩二极管T2的集电极相连；

第三限流电阻R4一端分别与第二限流电阻R3和第一雪崩三极管T1的基极相连，另一端分别与直流电源、第二限流电阻R3、第一雪崩三极管T1的发射极、二极管D1的负极和第二雪崩二极管T2的集电极相连；

第二雪崩三极管T2的基极与控制电阻R2相连，发射极分别与储能电容C1、二极管D1的正极和控制电阻R2相连，集电极分别与直流电源、第三限流电阻R4、第二限流电阻R3、第一雪崩三极管T1的发射极、二极管D1的负极相连。

可以理解的是，第一雪崩三极管T1的发射极与放电电路的正输出端口电连接，控制电阻R2的一端和储能电容C1另一端电连接，控制电阻R2的另一端与放电电路的负输出端口电连接。第二雪崩三极管T2的集电极与放电电路的正输出端口电连接，第二雪崩三极管T2的基极与负输出端口电连接，第二雪崩三极管T2的发射极与控制电阻R2的另一端电连接。

进一步地，如图2所示，充电电路对电路中的储能电容充电。放电电路使用雪崩三极管作为开关元件以获得较陡的脉冲上升沿，并外接工具电极和工件。驱动脉冲输入

电路控制放电电路中雪崩三极管的通断。陡化波形电路受放电电路反馈控制，当电极与工件之间放电击穿后，陡化电路将工具电极与工件短路从而陡化脉冲下降沿。根据输入的驱动脉冲的类型，能够产生单个或者连续多个纳秒级放电脉冲，峰值电压可通过直流电源调节。

5 进一步地，在本申请的一个实施例中，驱动脉冲输入电路输入正脉冲信号时，放电电路中的第一雪崩三极管T1打开，放电电路输出端之间产生电压并具有脉冲上升沿，当放电电路中放电并有电流流过时，控制电阻R2产生电压差从而使陡化波形电路中的第二雪崩二极管T2打开，放电电路输出端短路，获得脉冲下降沿和窄脉宽。

具体地，本申请的电源利用雪崩三极管超快的开关速度获得短上升沿和短下降沿，
10 从而获得纳秒级超窄脉宽脉冲。充电电路对储能电容充电，驱动脉冲输入电路输入正脉冲信号时，放电电路中雪崩管打开，使得放电电路输出端间产生电压并具有较陡的脉冲上升沿，当放电电路发生发电而有一定电流流过，控制电阻将有一定的电压差从而引起陡化波形电路中雪崩管的打开，因此放电电路输出端短路，获得较陡的脉冲下降沿和较窄的脉宽。

15 进一步地，在本申请的一个实施例中，通过控制驱动脉冲输入电路输入的脉冲信号来控制放电电路中第一雪崩三极管T1的通断。

进一步地，在本申请的一个实施例中，根据驱动脉冲输入电路输入脉冲的类型产生单个或者连续多个纳秒级放电脉冲。

进一步地，在本申请的一个实施例中，通过调节直流电源来调节纳秒级放电脉冲
20 的峰值电压。

进一步地，在本申请的一个实施例中，陡化波形电路受放电电路反馈控制，在第二雪崩三极管T2的基极与集电极之间的工具电极和工件之间放电击穿后，陡化波形电路将工具电极和工件短路以陡化纳秒级放电脉冲的下降沿。

进一步地，在本申请的一个实施例中，将直流电源接入充电电路输入端，将驱动
25 脉冲信号接入驱动脉冲输入电路输入端，将工具电极和工件接入第二雪崩三极管T2的基极和集电极之间，输入驱动信号后，工具电极和工件之间将产生单个或连续纳秒级窄脉宽脉冲。

具体地，上述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的具体操作步骤为：（1）将直流电源接入充电电路输入端；（2）将驱动脉冲信号接入驱动脉冲输
30 入电路输入端；（3）将工具电极和工件接入放电电路输出端；（4）输入驱动脉冲信号，工具电极和工件间将产生单个或连续纳秒级窄脉宽脉冲。

需要说明的是，放电电路中的储能电容C1的容量较小，可以保证充电和放电速度

快，放电脉宽也比较窄。

充电电路中使用的二极管D1保证储能电容C1可正常充电，且能保证充电过程中工具电极与工件间不放电，放电过程中工具电极和工件间正常放电。

5 放电电路和陡化脉冲电路使用的雪崩三极管打开速度极快，可以保证脉冲上升沿和下降沿均比较短。

如图3和图4所示，图3展示了基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的实物图，图4展示了基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源的具体操作方法，首先，（1）将直流电源接入充电电路输入端，直流电源的输入范围在7V-150V；（2）将驱动脉冲信号源接入驱动脉冲输入电路输入端，调节驱动脉冲信号源的参数，驱动脉冲信号幅值为5-10V，频率1KHz-100MHz均可；（3）将工具电极和工件接入放电电路输出端；（4）各个元器件的参数示例范围为：第一限流电阻（R1）：10欧姆-1000欧姆，控制电阻（R2）：2欧姆-50欧姆，第二限流电阻（R3）：10欧姆-200欧姆，第三限流电阻（R4）：10欧姆-200欧姆，储能电容（C1）：3pF-1000pF，雪崩三极管（T1）和雪崩三极管（T2）：有雪崩特性的三极管，如型号MCH3245和MMBT2222；（5）
10 输入连续驱动脉冲信号，工具电极和工件间将产生连续窄脉宽脉冲；若输入控制脉冲为单个上升沿，工具电极和工件间将产生单个窄脉宽脉冲。

如图5所示，通过上述操作，得到了一个幅值15.4V、脉宽中值10ns的单个窄脉宽脉冲放电。

根据本申请实施例提出的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，充电电路对电路中的储能电容进行充电，放电电路利用储能电容中能量进行放电从而产生脉冲，驱动脉冲输入电路为放电电路提供驱动信号，陡化波形电路起到陡化脉冲下降沿的作用。采用雪崩三极管作为开关元件，打开速度快，开关频率高，可以获得纳秒级脉宽脉冲，可有效提高微细电火花加工质量和加工效率。该电源可根据驱动脉冲信号类型，产生单个或连续的纳秒级脉冲，单个脉冲可以用于微细电火花加工原理的研究，连续脉冲可以实际应用于微细电火花加工工艺及装备中。并且纳秒级脉冲电源
20 结构小巧紧凑，易于集成于微细电火花加工装备中，成本低廉、稳定性高。

在本申请的描述中，需要理解的是，术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”、“轴向”、“径向”、“周向”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本申请和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或
30 元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本申请的限制。

此外，术语“第一”、“第二”仅用于描述目的，而不能理解为指示或暗示相对重要性或者

隐含指明所指示的技术特征的数量。由此，限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中，“多个”的含义是至少两个，例如两个，三个等，除非另有明确具体的限定。

5 在本申请中，除非另有明确的规定和限定，术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系，除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

10 在本申请中，除非另有明确的规定和限定，第一特征在第二特征“上”或“下”可以是第一和第二特征直接接触，或第一和第二特征通过中间媒介间接接触。而且，第一特征在第二特征“之上”、“上方”和“上面”可是第一特征在第二特征正上方或斜上方，或仅仅表示第一特征水平高度高于第二特征。第一特征在第二特征“之下”、“下方”和“下面”可以是第一特征在第二特征正下方或斜下方，或仅仅表示第一特征水平高度小于第二特征。

15 在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本申请的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

20

尽管上面已经示出和描述了本申请的实施例，可以理解的是，上述实施例是示例性的，不能理解为对本申请的限制，本领域的普通技术人员在本申请的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

25

权利要求书

1、一种基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，包括：直流电源、充电电路、放电电路、驱动脉冲输入电路和陡化波形电路；

5 所述充电电路包括：第一限流电阻 R1 和二极管 D1；

所述放电电路包括：储能电容 C1、第一雪崩三极管 T1 和控制电阻 R2；

所述驱动脉冲电路包括：第二限流电阻 R3 和第三限流电阻 R4；

所述陡化波形电路包括：第二雪崩三极管 T2；

其中，所述第一限流电阻 R1 一端与所述直流电源相连，另一端分别与所述储能电容
10 C1 和所述第一雪崩三极管 T1 的集电极相连；

所述二极管 D1 的正极分别与所述储能电容 C1、所述第二雪崩三极管 T2 的发射极和所述控制电阻 R2 相连，负极分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述储能电容 C1 一端分别与所述第一限流电阻 R1 和所述第一雪崩三极管 T1 的集电
15 极相连，另一端分别与所述二极管 D1 的正极、所述第二雪崩三极管 T2 的发射极和所述控制电阻 R2 相连；

所述第一雪崩三极管 T1 的基极分别与所述第二限流电阻 R3 和所述第三限流电阻 R4 相连，集电极分别与所述第一限流电阻 R1 和所述储能电容 C1 相连，发射极分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述二极管 D1 的负极和所述第二
20 雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述控制电阻 R2 一端分别与所述储能电容 C1、所述二极管 D1 的正极和所述第二雪崩三极管 T2 的发射极相连，另一端与所述第二雪崩三极管 T2 的基极相连；

所述第二限流电阻 R3 一端分别与所述第三限流电阻 R4 和所述第一雪崩三极管 T1 的基极相连，另一端分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；
25

所述第三限流电阻 R4 一端分别与所述第二限流电阻 R3 和所述第一雪崩三极管 T1 的基极相连，另一端分别与所述直流电源、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极和所述第二雪崩三极管 T2 的集电极相连；

所述第二雪崩三极管 T2 的基极与所述控制电阻 R2 相连，发射极分别与所述储能电容
30 C1、所述二极管 D1 的正极和所述控制电阻 R2 相连，集电极分别与所述直流电源、所述第三限流电阻 R4、所述第二限流电阻 R3、所述第一雪崩三极管 T1 的发射极、所述二极管 D1 的负极相连。

2、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，所述充电电路通过所述直流电源为所述储能电容C1充电。

3、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，通过控制所述驱动脉冲输入电路输入的脉冲信号来控制所述放电电路中所述第一雪崩三极管T1的通断。

4、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，所述驱动脉冲输入电路输入正脉冲信号时，所述放电电路中的所述第一雪崩三极管T1打开，所述放电电路输出端之间产生电压并具有脉冲上升沿，当所述放电电路中放电并有电流流过时，所述控制电阻R2产生电压差从而使所述陡化波形电路中的所述第二雪崩二极
10 极管T2打开，所述放电电路输出端短路，获得脉冲下降沿和窄脉宽。

5、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，根据所述驱动脉冲输入电路输入脉冲的类型产生单个或者连续多个纳秒级放电脉冲。

6、根据权利要求5所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征在于，通过调节所述直流电源来调节所述纳秒级放电脉冲的峰值电压。

7、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征
15 在于，所述陡化波形电路受所述放电电路反馈控制，在所述第二雪崩三极管T2的基极与集电极之间的工具电极和工件之间放电击穿后，所述陡化波形电路将工具电极和工件短路以陡化所述纳秒级放电脉冲的下降沿。

8、根据权利要求1所述的基于雪崩三极管的微细电火花加工用纳秒脉冲电源，其特征
20 在于，将所述直流电源接入所述充电电路输入端，将驱动脉冲信号接入所述驱动脉冲输入电路输入端，将工具电极和工件接入所述第二雪崩三极管T2的基极和集电极之间，输入驱动信号后，工具电极和工件之间将产生单个或连续纳秒级窄脉宽脉冲。

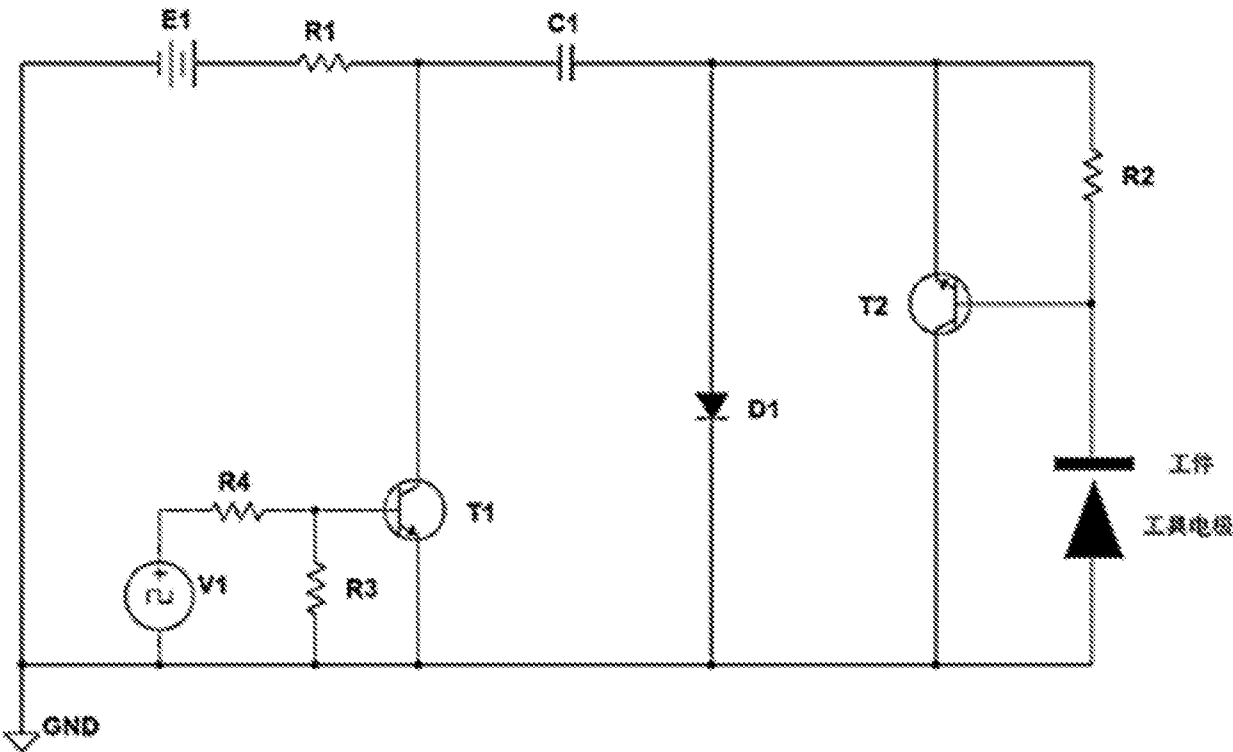


图 1

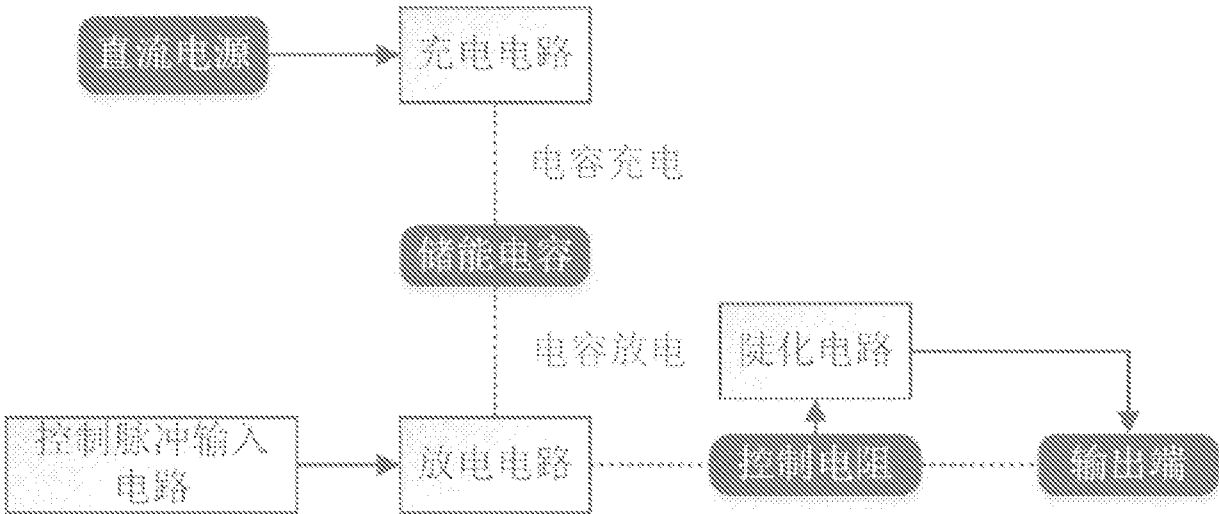


图 2

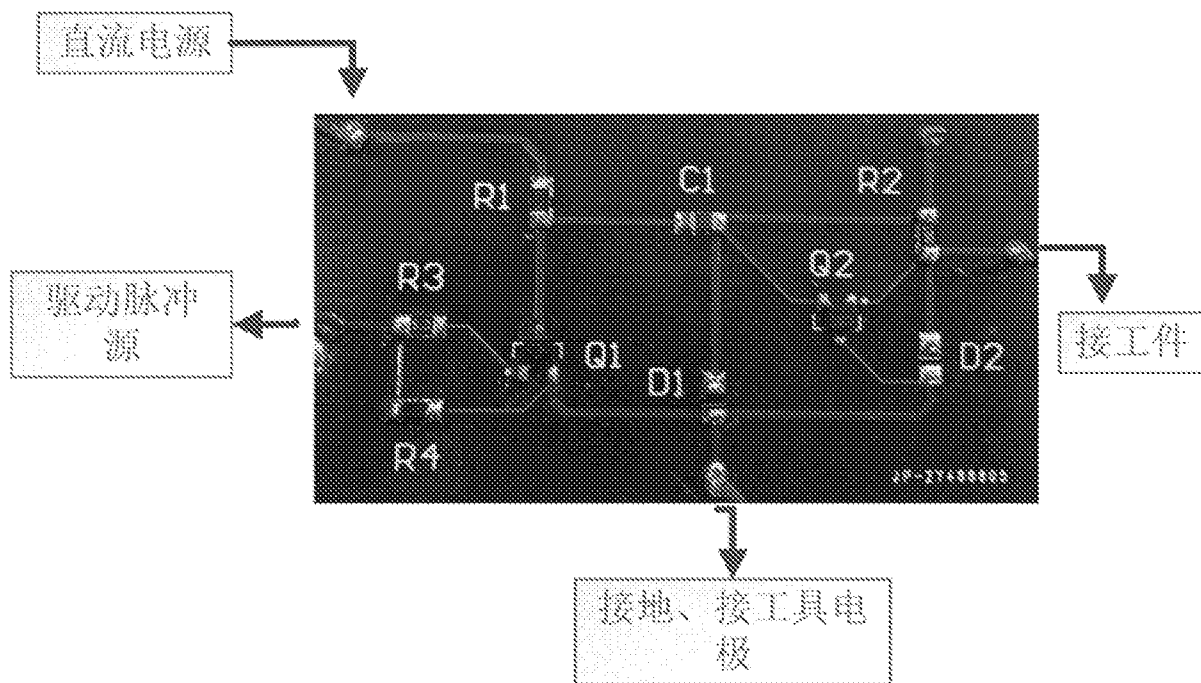


图 3

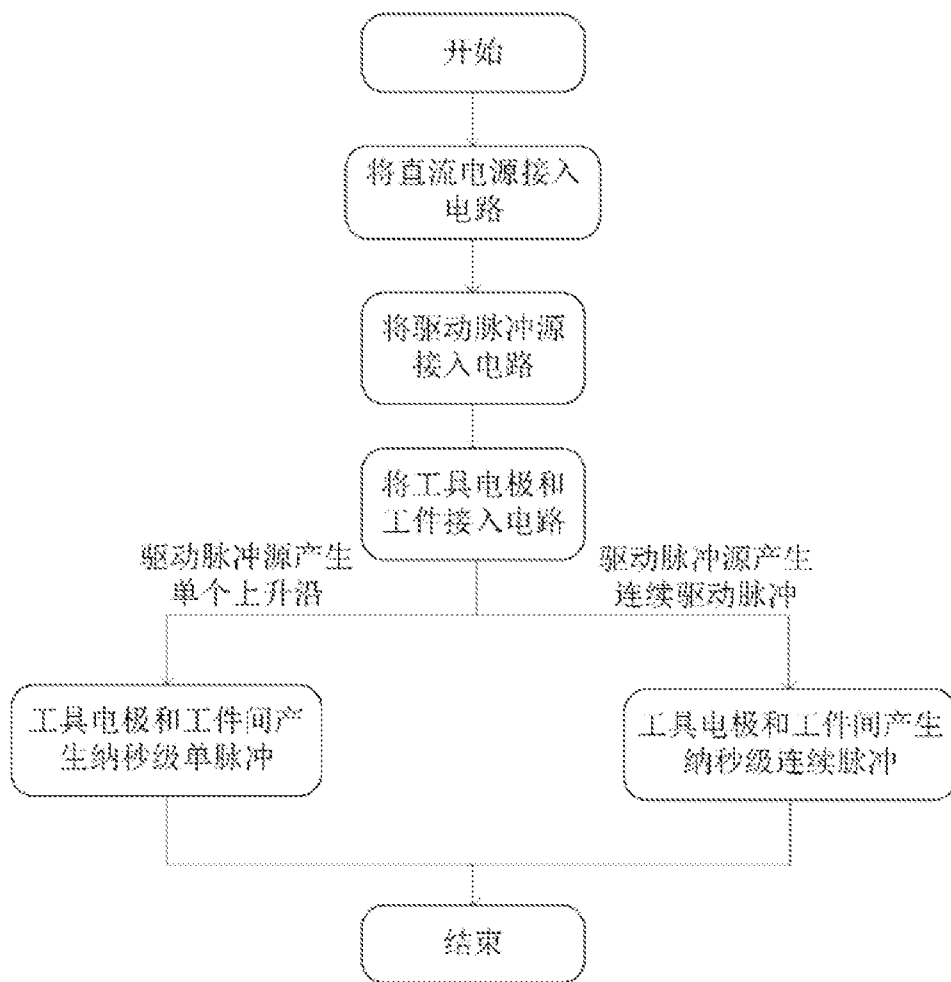


图 4

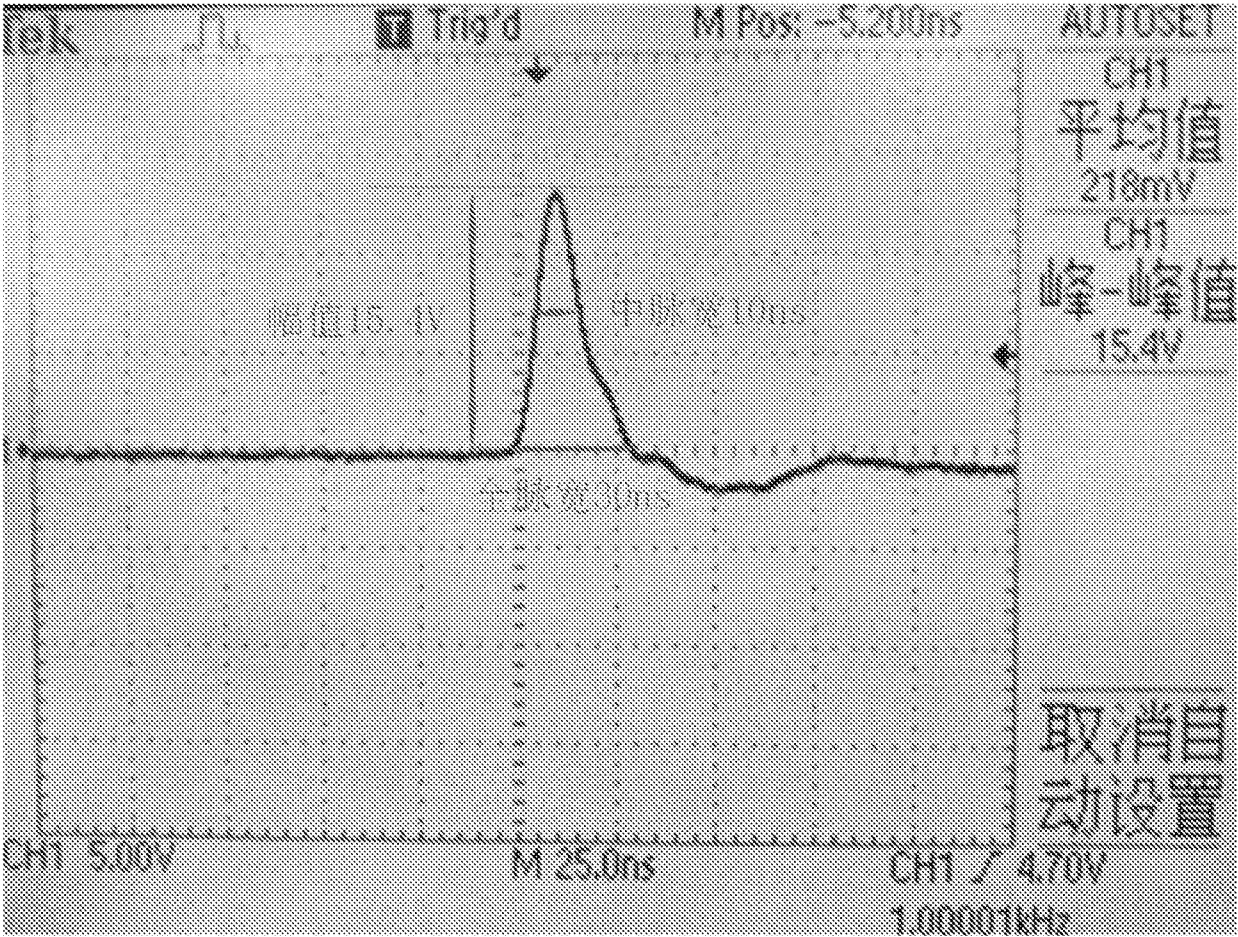


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/115752

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H03K 3/335(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H03K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: 雪崩, 管, 充电, 放电, 上升沿, 前沿, 下降沿, 后沿, 脉冲电源, 纳秒, avalanche, transistor, nanosecond, pulse, power, charge, discharge, rising, advancing, edge, falling, negative

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 110247644 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 17 September 2019 (2019-09-17) claims 1-8	1-8
A	CN 204068898 U (WANG, Yibing et al.) 31 December 2014 (2014-12-31) description, paragraphs 0013-0018, and figure 2	1-8
A	CN 104941064 A (SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY et al.) 30 September 2015 (2015-09-30) entire document	1-8
A	CN 204885822 U (PREMIER OPTO-ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD.) 16 December 2015 (2015-12-16) entire document	1-8
A	JP 2014045909 A (FUSION TECHS CORP.) 17 March 2014 (2014-03-17) entire document	1-8
A	李朝将 等 (LI, Chaojiang et al.). "气膜冷却孔电火花加工参数优化及重熔层厚度测量实验 (Process Parameters Optimization of Film Cooling Holes and Measurement Experiment of Recast Layer Thickness in EDM)" 电加工与模具 (<i>Electromachining & Mould</i>), No. no. 02, 20 April 2016 (2016-04-20),	1-8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

11 March 2020

Date of mailing of the international search report

26 March 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/115752

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	110247644	A	17 September 2019	None	
CN	204068898	U	31 December 2014	None	
CN	104941064	A	30 September 2015	None	
CN	204885822	U	16 December 2015	None	
JP	2014045909	A	17 March 2014	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/115752

A. 主题的分类 H03K 3/335 (2006.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类																							
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) H03K 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNKI, CNPAT, WPI, EP0D0C: 雪崩, 管, 充电, 放电, 上升沿, 前沿, 下降沿, 后沿, 脉冲电源, 纳秒, avalanche, transistor, nanosecond, pulse, power, charge, discharge, rising, advancing, edge, falling, negative																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 110247644 A (清华大学) 2019年 9月 17日 (2019 - 09 - 17) 权利要求1-8</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 204068898 U (王轶冰 等) 2014年 12月 31日 (2014 - 12 - 31) 说明书第0013-0018段及附图2</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 104941064 A (华南理工大学 等) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 204885822 U (深圳市迅捷光通科技有限公司) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>JP 2014045909 A (FUSION TECHS CORP.) 2014年 3月 17日 (2014 - 03 - 17) 全文</td> <td>1-8</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>李朝将 等. "气膜冷却孔电火花加工参数优化及重熔层厚度测量实验" 电加工与模具, 第02期, 2016年 4月 20日 (2016 - 04 - 20),</td> <td>1-8</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 110247644 A (清华大学) 2019年 9月 17日 (2019 - 09 - 17) 权利要求1-8	1-8	A	CN 204068898 U (王轶冰 等) 2014年 12月 31日 (2014 - 12 - 31) 说明书第0013-0018段及附图2	1-8	A	CN 104941064 A (华南理工大学 等) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文	1-8	A	CN 204885822 U (深圳市迅捷光通科技有限公司) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 全文	1-8	A	JP 2014045909 A (FUSION TECHS CORP.) 2014年 3月 17日 (2014 - 03 - 17) 全文	1-8	A	李朝将 等. "气膜冷却孔电火花加工参数优化及重熔层厚度测量实验" 电加工与模具, 第02期, 2016年 4月 20日 (2016 - 04 - 20),	1-8
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 110247644 A (清华大学) 2019年 9月 17日 (2019 - 09 - 17) 权利要求1-8	1-8																					
A	CN 204068898 U (王轶冰 等) 2014年 12月 31日 (2014 - 12 - 31) 说明书第0013-0018段及附图2	1-8																					
A	CN 104941064 A (华南理工大学 等) 2015年 9月 30日 (2015 - 09 - 30) 全文	1-8																					
A	CN 204885822 U (深圳市迅捷光通科技有限公司) 2015年 12月 16日 (2015 - 12 - 16) 全文	1-8																					
A	JP 2014045909 A (FUSION TECHS CORP.) 2014年 3月 17日 (2014 - 03 - 17) 全文	1-8																					
A	李朝将 等. "气膜冷却孔电火花加工参数优化及重熔层厚度测量实验" 电加工与模具, 第02期, 2016年 4月 20日 (2016 - 04 - 20),	1-8																					
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
<table border="0"> <tr> <td> * 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 </td> <td> "T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件 </td> </tr> </table>			* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																			
* 引用文件的具体类型: "A" 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 "E" 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 "L" 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) "O" 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 "P" 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件	"T" 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 "X" 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 "Y" 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 "&" 同族专利的文件																						
国际检索实际完成的日期 2020年 3月 11日		国际检索报告邮寄日期 2020年 3月 26日																					
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 (ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		授权官员 孙长欣 电话号码 86-(10)-53961451																					

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/115752

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	110247644	A	2019年 9月 17日	无	
CN	204068898	U	2014年 12月 31日	无	
CN	104941064	A	2015年 9月 30日	无	
CN	204885822	U	2015年 12月 16日	无	
JP	2014045909	A	2014年 3月 17日	无	