

自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制方法及系统

本申请要求于 2023 年 03 月 10 日提交中国专利局、申请号为 202310246798.7、发明名称为“自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制方法及系统”的中国专利申请的优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及单光子探测器领域，尤其涉及一种单光子探测器制冷控制方法及系统，其能够自动适应环境温度变化和 TEC 性能劣化。

背景技术

在现有单光子探测器中，通常采用如下的 TEC（半导体制冷器）制冷控制流程，即：通过控制器控制 DAC 芯片给 TEC 专用驱动芯片提供控制电压，改变其输出电压大小及方向来实现 TEC 的制冷或制热，在控制过程中通过 ADC 芯片进行温度采集从而实现对单光子探测器的温度控制，如图 1 所示那样。其中，有的 TEC 专用驱动芯片可以通过外部电阻配置其温度控制目标值，再通过阻容值进行温度 PID 维稳控制，这样可以进一步简化 TEC 控制器外部的驱动电路，具有较高的集成度。

CN111258351A 号专利文献具体公开了一种单光子探测器 TEC 温度控制方案。在该控制方案中，DAC 芯片根据 DAC 数字信号控制值向温控电路输入电压 V_{DAC} ，温控电路中的电子元件对电压 V_{DAC} 分流后经电容组耦合，最终向 TEC 制冷器的两电压输入端加载调节 TEC 制冷器温度的电压 $V_{TEC_P/N}$ 。其中，通过选择不同的电源芯片或通过电阻自由组合后得到的电阻阻值实现电流或电压上限的调节；以及将 TEC 制冷器控制的单光子探测器模块的温度值、PID 参数值放在存储器中，并将 TEC 的温度控制算法嵌于主控单元中，因此无需 TEC 制冷驱动芯片，由此解决了 TEC 制冷芯片电压或电流输出不足、现有 TEC 制冷硬件平台参数一致性差的问题，实现了参数统一调配、硬件电路设计灵活、有效降低成本的目的。

然而，现有技术中未提及过要对 TEC 器件进行电压保护，而当 TEC 器件长期工作在额定工作电压附近时，其使用寿命会降低。此外，现有技术也未提及在环境温度与制冷目标温度之差超过 TEC 最大制冷温差时，如何实现制冷

- 2 -

控制的内容。而当环境温度过高或探测器内 TEC 性能出现劣化时，环境温度与制冷目标温度之差将超过 TEC 最大制冷温差，致使 TEC 无法将 APD（雪崩光电二极管）器件温度制冷到目标值，此时与温度相关的探测效率、暗计数率、后脉冲概率等指标都将出现波动，影响单光子探测器的整体性能。同时，在这种情况下，为了达到目标温度，TEC 器件会长时间工作在极限制冷工作状态下，长期如此会导致 TEC 器件的性能及可靠性降低。

发明内容

针对现有技术中存在的上述问题，本发明公开了一种自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制方法及系统，其通过限制 TEC 最大工作电压，实时监测 TEC 工作电压和制冷温度并根据监测结果自动调节目标温度和 APD 工作偏压，有效保证单光子探测器在出现工作环境温度过高或 TEC 性能劣化的情况时仍能稳定工作。同时，还允许环境温度恢复到正常温度范围时，TEC 的制冷目标温度可恢复至初始的制冷目标温度并同步调整 APD 的工作偏压，使单光子探测器的探测效率、暗计数率、后脉冲概率等性能指标将同步恢复至正常状态。由此，可以有效改善 TEC 及单光子探测器设备的使用寿命，并提高单光子探测器的环境适应性。

具体而言，本发明的第一方面涉及一种自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制方法，其预先设置用于 TEC 的工作电压上限值和指定最小电压；并且，

在 TEC 在指定时间内未制冷到目标温度或者在目标温度下的工作电压高于工作电压上限值时，升高目标温度和 APD 偏压；以及，

在 TEC 在目标温度下的工作电压低于指定最小电压时，降低 APD 偏压和目标温度。

优选地，工作电压上限值可以设为 TEC 额定工作电压的 70%。

进一步地，本发明的单光子探测器制冷控制方法可以包括初始化步骤、自适应升温步骤、指定最大电压监测步骤、指定最小电压监测步骤、自适应降温步骤和制冷温度监测步骤；

初始化步骤用于在上电时将目标温度和 APD 偏压配置为初始目标温度和初始 APD 偏压；判断 TEC 在指定时间内是否制冷到目标温度，并在指定时间内

-3-

制冷到目标温度时判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，其中，指定最大电压被设置成小于工作电压上限值，且如果TEC在指定时间内未制冷到目标温度或者在目标温度下的工作电压高于指定最大电压，则执行自适应升温步骤，否则继续判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压；

自适应升温步骤用于以升温的方式更新目标温度，并制冷到目标温度后升高APD偏压，再执行指定最大电压监测步骤；

指定最大电压监测步骤用于判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，若是则执行自适应升温步骤，否则执行指定最小电压监测步骤；

指定最小电压监测步骤用于判断TEC在目标温度下的工作电压是否低于指定最小电压，若是则执行自适应降温步骤；

自适应降温步骤用于以降温的方式更新目标温度，并在降低APD偏压后制冷到目标温度，再执行制冷温度监测步骤；

制冷温度监测步骤用于判断TEC在指定时间内是否制冷到目标温度，若否，则执行自适应升温步骤。

更进一步地，初始化步骤中还标志配置初始值；并且，

当在指定最小电压监测步骤中判断TEC在目标温度下的工作电压不低于指定最小电压时，判断标志是否为初始值，若是则执行让步工作电压监测步骤，否则执行指定最大电压监测步骤；

让步工作电压监测步骤用于判断TEC在目标温度下的工作电压是否低于让步工作电压，若TEC在目标温度下的工作电压不低于让步工作电压，则执行指定最大电压监测步骤，否则将标志配置为其他值，并执行自适应降温步骤，且当TEC在指定时间内制冷到目标温度时将标志恢复为初始值；

其中，让步工作电压为指定最小电压与预设的电压冗余值之和。

更进一步地，本发明的单光子探测器制冷控制方法还包括在制冷温度监测步骤中判断TEC在指定时间内制冷到目标温度时，判断目标温度是否等于初始目标温度的步骤，其中：

若是，则判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，且在TEC在目标温度下的工作电压高于指定最大电压时执行自适应升温步骤，否则

-4-

继续判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压；

若否，则执行指定最大电压监测步骤。

进一步地，本发明的单光子探测器制冷控制方法还包括在目标温度不同于初始目标温度时进行异常提示的步骤。

- 5 进一步地，TEC在目标温度下的工作电压是在温度稳定达到目标温度时确定的。

进一步地，利用APD雪崩击穿电压与温度的系数因子 a ，根据目标温度的调节量计算APD偏压的调节量，以保持APD偏压与雪崩击穿电压的差值不变。

- 10 本发明的第二方面涉及一种自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制系统，其包括温度传感模块、控制模块和TEC；

TEC被设置用于对APD进行制冷；

温度传感模块被设置用于获取TEC的实时制冷温度，并上传给控制模块；

控制模块被设置用于根据上述单光子探测器制冷控制方法，控制用于TEC的目标温度及作用于APD上的APD偏压。

- 15 进一步地，温度传感模块包括TEC温度采集单元和ADC单元；

TEC温度采集单元被设置用于采集TEC的实时制冷温度，并输出模拟温度值；

ADC单元被设置用于将模拟温度值转换为温度采集数字信号，并上传给控制模块。

- 20 进一步地，控制模块包括存储单元、控制单元、DAC单元、APD偏压单元和DC/DC电源；

存储单元中存储有初始目标温度和初始APD偏压；

控制单元被设置用于根据上述单光子探测器制冷控制方法确定目标温度和APD偏压，并根据目标温度和TEC的实时制冷温度生成TEC工作电压数字控制信号，根据APD偏压生成APD偏压数字控制信号；

- 25 DAC单元被设置用于将TEC工作电压数字控制信号转换为TEC工作电压模拟控制信号，将APD偏压数字控制信号转换为APD偏压模拟控制信号；

DC/DC电源被设置用于根据TEC工作电压模拟控制信号，为TEC提供工作电压；

APD偏压单元被设置用于根据APD偏压模拟控制信号，向APD提供偏压。

更进一步地，存储单元中还存储有PID参数；并且，控制单元还被设置成利用PID算法，根据目标温度和TEC的实时制冷温度，生成TEC工作电压数字控制信号。

- 5 更进一步地，借助电阻网络将DC/DC电源的最大输出电压配置为用于TEC的工作电压上限值；以及/或者，TEC工作电压数字控制信号为DAC code值的形式。

附图说明

下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步详细的说明。

- 10 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需使用的附图作简单地介绍，显而易见，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图来获得其他的附图。

图1示意性地示出了现有技术中用于单光子探测器的TEC制冷控制方案；

- 15 图2示出了根据本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制系统的一种示例；

图3示出了根据本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制方法的一种示例；

- 20 图4示出了根据本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制方法中，温度异常信号的处理流程图。

具体实施方式

在下文中，本发明的示例性实施例将参照附图来详细描述。下面的实施例以举例的方式提供，以便充分传达本发明的精神给本发明所属领域的技术人员。因此，本发明不限于本文公开的实施例。

- 25 图2示出了根据本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制系统的一种示例。

本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制系统可以包括TEC、温度传感模块和控制模块。

本领域技术人员知晓，在单光子探测器中，APD为其核心光电器件，工作

-6-

在反向偏压高于雪崩击穿电压的盖革模式下，通常需要TEC为其提供制冷以抑制暗计数。其中，TEC可以是利用半导体材料的珀尔贴效应制成的半导体制冷器。

为实现制冷控制，需要借助温度传感模块来获取TEC的实时制冷温度，并
5 上传给控制模块以实施相应的制冷控制。

如图2所示，温度传感模块可以包括TEC温度采集单元和ADC单元，其中，TEC温度采集单元采集TEC的实时制冷温度并输出模拟温度值，ADC单元再将模拟温度值转换为温度采集数字信号并上传给控制模块。

作为示例，TEC温度采集单元可以借助热敏电阻，以电阻分压的方式采集
10 APD处的实时温度，即TEC的实时制冷温度。

作为示例，ADC单元可以借助ADC芯片来实现。

在本发明中，控制模块除了控制在TEC上实现其目标（制冷）温度以及控制向APD施加相应工作偏压之外，还能够根据环境温度变化和TEC性能劣化情况，自适应地调整TEC的目标温度和APD偏压，以使TEC不会长时间地工作在
15 满负荷状态，同时在环境温度变化（过高）或者TEC性能出现劣化时保持单光子探测器性能稳定。

如图2所示，控制模块可以包括存储单元、控制单元、DAC单元、APD偏压单元和DC/DC电源。其中，存储单元和控制单元可以分别以存储器和控制器的形式实现，DAC单元、APD偏压单元和DC/DC电源可以以芯片形式实现。

在本发明中，可以例如获取出厂配置的APD制冷温度和APD工作偏压，作
20 为TEC的初始目标温度和初始APD偏压预先存储在存储单元中。此外，在期望借助PID算法完成在TEC上实现其目标温度的控制过程时，还可以在存储单元中预先存储相应的PID参数。

因此，在设备上电时，控制单元可以从存储单元中读取初始目标温度和初
25 始APD偏压作为当前（实时）的目标温度和APD偏压，并读取PID参数以用于后续的PID控制过程。

当控制单元获取当前的目标温度，并根据ADC单元上报的温度采集数字信号获知TEC的实时制冷温度时，则可以根据当前的目标温度和实时制冷温度，利用相应的PID算法生成TEC工作电压数字控制信号，并下发至DAC单元。

-7-

DAC单元可以根据接收到的TEC工作电压数字控制信号，控制DC/DC电源向TEC输出相应的工作电压，最终使TEC的实时制冷温度稳定达到目标温度，由此实现关于当前目标温度的控制过程。

作为示例，控制单元输出的TEC工作电压数字控制信号可以为DAC代码值（code值）的形式，其中，不同的DAC代码值对应于不同的TEC工作电压。因此，当TEC的实时制冷温度稳定到达目标温度时，经控制单元中PID算法调节的TEC工作电压也相应为稳定值，即，控制单元输出的DAC代码值也为稳定值（或在很小范围内波动）。因此，控制单元可以根据此时的DAC代码值计算当前的TEC工作电压，从而判断当前的TEC制冷功率（工作状态）。

例如，DAC代码值范围为0-65535，代码值越小则对应着DC/DC电源要向TEC输出越高的TEC工作电压。在使用出厂标定的配置参数，且制冷温度和TEC工作状态均稳定的正常情况下，与目标温度（即初始目标温度）对应的DAC代码值应为20000。随着TEC使用时间增加，其性能可能出现劣化，因此，在其他条件不变的情况下，稳定制冷到相同目标温度时对应的DAC代码值将下降（例如为10000），即意味着需要TEC工作在更高的工作电压下；或者，随着工作环境温度升高，TEC的制冷温差增大，其需要提升制冷功率才能稳定制冷到相同目标温度，此时稳定制冷到相同目标温度时对应的DAC代码值也将出现下降（例如为10000），同样意味着需要TEC工作在更高的工作电压下。因此，在本发明中，可以方便地利用DAC代码值实现环境温度变化和TEC性能劣化的监测，例如可以在DAC代码值低于某个设定值时判断出现异常，并根据需要上报上位机异常状态或由硬件指示灯提示异常。

如前所述，本发明的控制单元还需要根据环境温度变化和TEC性能劣化情况，自适应地调整TEC的目标温度和APD偏压，以使TEC不会长时间地工作在满负荷状态，同时在环境温度变化（过高）或者TEC性能出现劣化时保持单光子探测器性能稳定。

为此，可以预先设置一个TEC的工作电压上限值，以避免其长期处于满负荷状态下。因此，控制单元可以在TEC在指定时间内未制冷到目标温度或者在目标温度下的工作电压高于工作电压上限值时升高目标温度，在TEC在目标温度下的工作电压低于指定最小电压时降低目标温度的方式，自适应地根据环

境温度变化和TEC性能劣化情况调整TEC的目标温度。

作为示例，可以借助电阻网络，以硬件的形式将用于为TEC提供工作电压的DC/DC电源的最大输出电压限制为该工作电压上限值。其中，TEC的工作电压上限值可以优选设为其额定工作电压的70%。

5 进一步地，为了同时还能够保证单光子探测器性能稳定，控制单元在调整目标温度的同时，还可以根据APD雪崩击穿电压与温度之间的线性关系，计算与调整后的目标温度相对应的APD偏压，以例如保持作用于APD上的偏压与当前雪崩击穿电压之间的差值不变。

假设控制单元以步进值 T_{level} 调节目标温度， T_{target_1} 为当前的目标温度，
10 T_{real} 为TEC的实时制冷温度， V_{bias_1} 为与当前目标温度对应的APD偏压， a 为雪崩击穿电压-温度系数因子。

控制单元在判断需要升高当前目标温度时，可以计算得到调节后的目标温度 $T_{target_change} = \left(\frac{T_{real}}{T_{level}} + 1 \right) * T_{level}$ ，其中， $\frac{T_{real}}{T_{level}}$ 为向下取整值。

随后，控制单元还将相应计算得到与调节后的目标温度 T_{target_change} 相对
15 应的APD偏压 $V_{bias_change} = V_{bias_1} + a * \Delta T_{target}$ ，其中，
 $\Delta T_{target} = T_{target_change} - T_{target_1}$ 。

因此，控制单元可以利用PID算法控制TEC稳定实现目标温度 T_{target_change} ，并在实现目标温度 T_{target_change} 之后控制APD偏压单元在APD上施加APD偏压
20 V_{bias_change} 。

类似地，控制单元在判断需要降低当前目标温度时，可以计算得到调节后的目标温度 $T_{target_change} = T_{target_1} - T_{level}$ 。

随后，控制单元还将相应计算与调节后的目标温度 T_{target_change} 相对应的APD偏压 $V_{bias_change} = V_{bias_1} - a * T_{level}$ 。

此时，不同于升温过程，控制单元将先控制APD偏压单元在APD上施加
25 APD偏压 V_{bias_change} ，再用PID算法控制TEC稳定实现目标温度 T_{target_change} ，从而在自适应降温的同时，对APD器件提供必要的保护。

为更好地理解本发明（尤其是控制单元）的工作原理，下面将结合图3-4，详细描述本发明的自适应温度及TEC性能变化的单光子探测器制冷控制方法。

如图3所示，本发明的单光子探测器制冷控制方法可以包括初始化步骤、

自适应升温步骤、指定最大电压监测步骤、指定最小电压监测步骤、自适应降温步骤和制冷温度监测步骤。

在初始化步骤（其例如在上电时启动）中，控制单元可以从存储单元中读取初始目标温度 T_{initial} 和初始APD偏压 V_{bias} ，并将这些初始值配置为当前的目标温度和APD偏压。此外，还可以为标志P配置初始值（例如 $P=0$ ）。

因此，控制单元可以利用PID算法控制TEC到达目标温度，并判断TEC在指定时间内是否制冷到目标温度。

如果在指定时间内制冷到目标温度，则可以进一步判断TEC在稳定到达目标温度时的工作电压是否高于指定最大电压。其中，可以将指定最大电压设置为略小于TEC工作电压上限值，这将有利于更稳定地实现所需要的制冷状态。

如果在指定时间内未制冷到目标温度或TEC在目标温度下的工作电压高于指定最大电压，则可以借助自适应升温步骤来升高目标温度，以减轻TEC的制冷压力并保持单光子探测器工作稳定。

如果在指定时间内制冷到目标温度且TEC在目标温度下的工作电压不高于指定最大电压，则可以保持TEC的当前工作状态，并循环判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，以持续监控环境温度变化和/或TEC性能劣化情况的发生。

在自适应升温步骤中，控制单元可以例如根据步进值 T_{level} 提高目标温度以对其进行更新，并计算相应的APD偏压，例如计算得到上文所述的

$T_{\text{target_change}} = \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T_{\text{level}}} + 1 \right) * T_{\text{level}}$ 和 $V_{\text{bias_change}} = V_{\text{bias_1}} \div a * \Delta T_{\text{target}}$ ；并在（例如利

用PID算法）控制TEC制冷到更新的目标温度之后，控制APD偏压单元向APD施加相应的APD偏压。随后，控制单元将开始执行指定最大电压监测步骤。

在指定最大电压监测步骤中，控制单元可以判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，若是则执行自适应升温步骤以进一步升高目标温度，否则可以执行指定最小电压监测步骤。

在指定最小电压监测步骤中，控制单元可以判断TEC在目标温度下的工作电压是否低于指定最小电压，若是则执行自适应降温步骤以降低目标温度。

在自适应降温步骤中,控制单元同样可以例如根据步进值 T_{level} 降低目标温度以对其进行更新,并计算相应的APD偏压,例如计算得到上文所述的 $T_{target_change} = T_{target_1} - T_{level}$ 和 $V_{bias_change} = V_{bias_1} - a * T_{level}$ 。不同于升温过程,控制单元在计算得到降低的目标温度及其相应的APD偏压之后,将首先控制APD偏压单元在APD上施加更新的APD偏压,再(例如利用PID算法)控制TEC制冷到更新的目标温度,从而在降温过程中为APD器件提供保护,避免引发APD因过压过大而被击穿的风险。

如果在指定最小电压监测步骤中,判断TEC在目标温度下的工作电压不低于指定最小电压时,控制单元则可以判断标志P是否为初始值(例如,可以通过判断P是否为非初始值0的其他值1来实现)。如果标志P为其他值(例如 $P=1$),则执行指定最大电压监测步骤。

如果标志P为初始值($P=0$),则启动让步工作电压监测步骤,判断TEC在目标温度下的工作电压是否低于让步工作电压。

如果TEC在目标温度下的工作电压不低于让步工作电压,则执行指定最大电压监测步骤,否则将标志P配置为其他值($P=1$),并执行自适应降温步骤,且在TEC在指定时间内制冷到目标温度(其由自适应降温步骤计算得到)时,将标志P恢复为初始值($P=0$)。

在本发明中,由于指定最小电压被设置成使任何工作电压低于指定最小电压的TEC均允许进一步降低其目标温度,而TEC器件不可避免地存在个体差异,部分TEC器件即使在其工作电压不低于指定最小电压时也可能允许进一步降低目标温度。因此,本发明提出在指定最小电压的基础上加上一定的冗余电压以形成让步工作电压,作为最后的降温判断电压值。由此,借助让步工作电压监测步骤,在TEC工作电压低于让步工作电压但不低于指定最小电压时进行一次降温尝试,如果降温成功则将标志P恢复为初始值($P=0$),并在下一次出现相同情形时执行相同操作;如果降温失败则将标志P保持为其他值($P=1$),在下一次出现相同情形时跳过该判断,使得本发明的方法系统能够以最小的计算资源,识别出不同批次TEC器件之间的差异性,使TEC器件的制冷性能在合理范围内得到最大化利用。

在借助自适应降温步骤完成目标温度降低操作之后,控制单元可以执行制

冷温度监测步骤,判断在指定时间内是否制冷到目标温度,并在TEC在指定时间内制冷到目标温度时将标志P恢复为初始值($P=0$),否则借助自适应升温步骤来执行升温操作。

继续参见图3,在借助自适应降温步骤完成降温操作之后,控制单元还可以执行判断目标温度是否等于初始目标温度的步骤。

如果判断目标温度等于初始目标温度,控制单元则会继续判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压,且在TEC在目标温度下的工作电压高于指定最大电压时执行自适应升温步骤,否则继续判断TEC在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压。

如果判断目标温度不等于初始目标温度,则执行指定最大电压监测步骤,继续降温判断步骤。

如此,控制单元通过在运行期间持续执行上述控制流程,可以在环境温度变化和TEC性能劣化的情况下自适应调节(制冷)目标温度和APD偏压,保持探测器工作状态稳定。

如图4所示,控制单元还可以在检测到目标温度不同于存储单元中存储的(初始)目标温度时,拉高温度异常信号Error,提示使用者注意保持适合器件工作的环境温度或者检查TEC器件工作状态,进行异常提示。

进一步地,本领域技术人员容易理解,在获取TEC工作电压时,应先在一定时间内判断TEC工作电压是否已经稳定(因为在PID参数设置不当时,TEC工作电压可能会出现长时间的持续震荡),以避免采样到未稳定时的工作电压进行判断,保证制冷控制方法的精确实施。

综上可知,在本发明所提出的自适应环境温度变化和TEC性能劣化的单光子探测器TEC制冷控制方法及系统中,通过限制TEC最大工作电压(例如在硬件上通过电阻网络配置TEC电源最大输出电压为TEC额定工作电压的70%),实时监测TEC工作电压和制冷温度,并根据监测结果自动调节TEC的目标温度和APD的工作偏压(例如,在环境温度过高或TEC性能出现劣化时,升高TEC的制冷目标温度并调整APD工作偏压),保证制冷温度变化时APD的工作过压(即APD偏压与雪崩击穿电压的差值)不变,使得单光子探测器保持稳定的探测效率,仅部分牺牲探测器的暗计数性能,同时优化后脉冲指标,保证单光子探测

器在出现工作环境温度过高或TEC性能劣化的情况时仍能稳定工作。而当环境温度恢复到正常温度范围时，可以自动地将TEC的（制冷）目标温度恢复至存储器（例如Flash）中存储的原制冷目标温度（即初始目标温度），并同步调整APD的工作偏压，使单光子探测器的探测效率、暗计数率、后脉冲概率等性能指标同步恢复至正常状态。由此，可以保护TEC器件，提高TEC器件及单光子探测器设备的使用寿命，改善单光子探测器的环境适应性，使得单光子探测器在环境温度过高或者TEC性能出现劣化的极端条件下仅牺牲部分暗计数指标就能保持稳定运行。

尽管前面结合附图通过具体实施例对本发明进行了说明，但是，本领域技术人员容易认识到，上述实施例仅仅是示例性的，用于说明本发明的原理，其并不会对本发明的范围造成限制，本领域技术人员可以对上述实施例进行各种组合、修改和等同替换，而不脱离本发明的精神和范围。

权 利 要 求

1、一种自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制方法，其预先设置用于 TEC 的工作电压上限值和指定最小电压；并且，

5 在 TEC 在指定时间内未制冷到目标温度或者在目标温度下的工作电压高于工作电压上限值时，升高目标温度和 APD 偏压；以及，

 在 TEC 在目标温度下的工作电压低于指定最小电压时，降低 APD 偏压和目标温度。

2、如权利要求 1 所述的单光子探测器制冷控制方法，其中，工作电压上限值为 TEC 额定工作电压的 70%。

3、如权利要求 1 所述的单光子探测器制冷控制方法，其包括初始化步骤、自适应升温步骤、指定最大电压监测步骤、指定最小电压监测步骤、自适应降温步骤和制冷温度监测步骤；

 初始化步骤用于在上电时将目标温度和 APD 偏压配置为初始目标温度和初始 APD 偏压；判断 TEC 在指定时间内是否制冷到目标温度，并在指定时间内制冷到目标温度时判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，其中，指定最大电压被设置成小于工作电压上限值，且如果 TEC 在指定时间内未制冷到目标温度或者在目标温度下的工作电压高于指定最大电压，则执行自适应升温步骤，否则继续判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压；

 自适应升温步骤用于以升温的方式更新目标温度，并制冷到目标温度后升高 APD 偏压，再执行指定最大电压监测步骤；

 指定最大电压监测步骤用于判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，若是则执行自适应升温步骤，否则执行指定最小电压监测步骤；

25 指定最小电压监测步骤用于判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否低于指定最小电压，若是则执行自适应降温步骤；

 自适应降温步骤用于以降温的方式更新目标温度，并在降低 APD 偏压后制冷到目标温度，再执行制冷温度监测步骤；

 制冷温度监测步骤用于判断 TEC 在指定时间内是否制冷到目标温度，若

否，则执行自适应升温步骤。

4、如权利要求3所述的单光子探测器制冷控制方法，其中，初始化步骤中还标志配置初始值；并且，

5 当在指定最小电压监测步骤中判断 TEC 在目标温度下的工作电压不低于指定最小电压时，判断标志是否为初始值，若是则执行让步工作电压监测步骤，否则执行指定最大电压监测步骤；

让步工作电压监测步骤用于判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否低于让步工作电压，若 TEC 在目标温度下的工作电压不低于让步工作电压，则执行指定最大电压监测步骤，否则将标志配置为其他值，并执行自适应降温步骤，
10 且当 TEC 在指定时间内制冷到目标温度时将标志恢复为初始值；

其中，让步工作电压为指定最小电压与预设的电压冗余值之和。

5、如权利要求3或4所述的单光子探测器制冷控制方法，其还包括在制冷温度监测步骤中判断 TEC 在指定时间内制冷到目标温度时，判断目标温度是否等于初始目标温度的步骤，其中：

15 若是，则判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压，且在 TEC 在目标温度下的工作电压高于指定最大电压时执行自适应升温步骤，否则继续判断 TEC 在目标温度下的工作电压是否高于指定最大电压；

若否，则执行指定最大电压监测步骤。

6、如权利要求1所述的单光子探测器制冷控制方法，其还包括在目标温度
20 度不同于初始目标温度时进行异常提示的步骤。

7、如权利要求1所述的单光子探测器制冷控制方法，其中，TEC 在目标温度下的工作电压是在温度稳定达到目标温度时确定的。

8、如权利要求1所述的单光子探测器制冷控制方法，其中，利用 APD 雪崩击穿电压与温度的系数因子 a ，根据目标温度的调节量计算 APD 偏压的调节量，以保持 APD 偏压与雪崩击穿电压的差值不变。
25

9、一种自适应温度及 TEC 性能变化的单光子探测器制冷控制系统，其包括温度传感模块、控制模块和 TEC；

TEC 被设置用于对 APD 进行制冷；

温度传感模块被设置用于获取 TEC 的实时制冷温度，并上传给控制模块；

控制模块被设置用于根据权利要求 1-8 中任一项所述的单光子探测器制冷控制方法，控制用于 TEC 的目标温度及作用于 APD 上的 APD 偏压。

10、如权利要求 9 所述的单光子探测器制冷控制系统，其中，温度传感模块包括 TEC 温度采集单元和 ADC 单元；

5 TEC 温度采集单元被设置用于采集 TEC 的实时制冷温度，并输出模拟温度值；

ADC 单元被设置用于将模拟温度值转换为温度采集数字信号，并上传给控制模块。

11、如权利要求 9 所述的单光子探测器制冷控制系统，其中，控制模块包
10 括存储单元、控制单元、DAC 单元、APD 偏压单元和 DC/DC 电源；

存储单元中存储有初始目标温度和初始 APD 偏压；

控制单元被设置用于根据权利要求 1-8 中任一项所述的单光子探测器制冷控制方法确定目标温度和 APD 偏压，并根据目标温度和 TEC 的实时制冷温度生成 TEC 工作电压数字控制信号，根据 APD 偏压生成 APD 偏压数字控制信
15 号；

DAC 单元被设置用于将 TEC 工作电压数字控制信号转换为 TEC 工作电压模拟控制信号，将 APD 偏压数字控制信号转换为 APD 偏压模拟控制信号；

DC/DC 电源被设置用于根据 TEC 工作电压模拟控制信号，为 TEC 提供工作电压；

20 APD 偏压单元被设置用于根据 APD 偏压模拟控制信号，向 APD 提供偏压。

12、如权利要求 11 所述的单光子探测器制冷控制系统，其中，存储单元中还存储有 PID 参数；并且，

控制单元还被设置成利用 PID 算法，根据目标温度和 TEC 的实时制冷温
25 度，生成 TEC 工作电压数字控制信号。

13、如权利要求 11 所述的单光子探测器制冷控制系统，其中：

借助电阻网络将 DC/DC 电源的最大输出电压配置为用于 TEC 的工作电压上限值；以及/或者，

TEC 工作电压数字控制信号为 DAC code 值的形式。