



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114207631 A

(43) 申请公布日 2022.03.18

(21) 申请号 202080049104.5

(22) 申请日 2020.07.20

(30) 优先权数据

102019120716.9 2019.07.31 DE

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.01.04

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/EP2020/070485 2020.07.20

(87) PCT国际申请的公布数据

WO2021/018654 DE 2021.02.04

(71) 申请人 量子技术UG(极限)公司

地址 德国莱比锡

(72) 发明人 简·贝伦德·梅耶尔 罗杰·约翰

罗伯特·斯塔克

(74) 专利代理机构 北京信慧永光知识产权代理
有限责任公司 11290

代理人 曹正建 陈桂香

(51) Int.Cl.

G06N 10/20 (2022.01)

H01L 39/24 (2006.01)

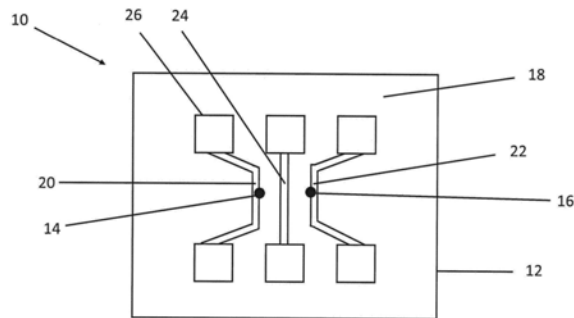
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

用于寻址量子位的方法和装置以及用于制造该装置的方法

(57) 摘要

本发明涉及用于寻址量子位(14、16)的方法、用于寻址量子位(14、16)的装置(10)和用于制造该装置(10)的方法。因此,能够以简单的方式对量子位(14、16)进行寻址,而不存在不同量子位(14、16)之间的串扰的风险。在此,可以对不同的量子位(14、16)单独地和共同地寻址。此外,还能够容易读出量子位(14、16)。



1. 一种用于在一组两个以上的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 中寻址至少一个量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的方法,

其特征在于, 要寻址的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 暴露于电磁场, 而所述一组量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 组中的至少一个其它量子位暴露于反向电磁场, 使得所述电磁场对所述其它量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 没有影响, 或者所述电磁场对所述其它量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的影响与对所述要寻址的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的影响不同。

2. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在於, 电磁近场被用作所述电磁场和所述反向电磁场, 其中, 优选地, 所述电磁近场为特别具有在微波范围和/或千赫兹范围内的频率的磁近场。

3. 根据权利要求1或2所述的方法, 其特征在於, 金刚石 (12、52) 中的色心被用作所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70), 所述色心优选为NV中心。

4. 根据前述任一项权利要求所述的方法, 其特征在於, 所述电磁场和所述反向电磁场由电磁源 (20、22; 74、76、78、86、88、90) 提供, 所述电磁源优选是导电结构, 特别是线路、金属化结构或导线 (20、22; 74、76、78、86、88、90), 其中, 所述导电结构 (20、22; 74、76、78、86、88、90) 的尺寸小于相邻的所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 之间的距离。

5. 根据前述任一项权利要求所述的方法, 其特征在於, 所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 由透明材料 (12; 52) 组成, 使得能够通过光辐射, 优选地通过激光辐射格式化所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70), 优选地同时格式化多个所述量子位, 特别是格式化所有的所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70)。

6. 一种用于在一组两个以上的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 中寻址至少一个量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的装置,

其特征在於, 所述装置包括用于产生电磁场的构件 (20、22; 74、76、78、86、88、90), 用于产生所述电磁场的所述构件被设计为使得要寻址的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 能够暴露于所述电磁场, 并且所述装置包括用于生成至少一个反向电磁场的构件 (20、22; 74、76、78、86、88、90), 用于生成所述至少一个反向电磁场的所述构件被设计为使得所述一组量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 中的至少一个其它量子位能够暴露于所述反向电磁场, 使得所述电磁场对所述其它量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 没有影响, 或者所述电磁场对所述其它量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的影响与对所述要寻址的量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 的影响不同。

7. 根据权利要求6所述的装置, 其特征在於, 所述装置被适配为用于执行根据权利要求1至4中任一项所述的方法。

8. 根据权利要求6或7所述的装置, 其特征在於, 所述装置包括用于产生所述电磁场和所述反向电磁场的电磁源 (20、22; 74、76、78、86、88、90), 所述电磁源优选为第一导电结构, 特别是线路、导线 (20、22; 74、76、78、86、88、90) 或金属化结构, 其中, 每个所述量子位 (14、16; 54、56、58、60、62、64、66、68、70) 被分配有至少一个所述电磁源。

9. 根据权利要求8所述的装置, 其特征在於, 多个所述电磁源 (20、22; 74、76、78、86、88、90) 被布置在一个层中,

其中,所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)与各自相关的所述电磁源的在垂直于所述层的方向上的距离最多为30nm,优选为最多20nm,特别是在0nm至10nm的范围内,且/或

其中,投射到所述层上的所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)与各自相关的所述电磁源(20、22;74、76、78、86、88、90)的距离最多为20nm,优选为最多10nm,特别是在0nm至5nm的范围内。

10. 根据权利要求8或9中任一项所述的装置,其特征在于,至少一个所述第一导电结构(20、22;74、76、78、86、88、90)能够可选地连接到电磁激发器和光电子检测器。

11. 根据权利要求8至10中任一项所述的装置,其特征在于,所述装置包括至少一个第二导电结构(24;94),所述第二导电结构优选为第二导电导线(24)、线路或金属化结构或电极(94),所述第二导电结构形成用于读出所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)的接地部,其中,所述第二导电结构(24)优选地被布置为与第一电磁源(20、22)相邻,特别是在层中相距最多40nm,优选为最多30nm,特别是在10nm至20nm范围内。

12. 根据权利要求8至11中任一项所述的装置,其特征在于,所述第一导电结构(20、22;74、76、78、86、88、90)和/或所述第二导电结构(24)的

i) 横截面具有小于50nm,优选地小于20nm,特别是在1nm至10nm的范围内的纵向尺寸,且/或

ii) 长度小于50nm,优选为小于30nm,特别是5nm至20nm。

13. 根据权利要求6至12中任一项所述的装置,其特征在于,所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)以一维、二维或三维的方式布置,且/或,

所述导电结构(20、22;74、76、78、86、88、90)以一维、二维或三维的方式布置,其中,所述装置优选地包括两个以上的层(80、92),导电结构(74、76、78、86、88、90)特别是彼此平行地布置在所述层中,其中,不同的所述层(80)的所述导电结构(74、76、78、86、88、90)不同地布置,其中,电绝缘体(82)优选地布置在两个所述层(80、92)之间。

14. 一种用于制造根据权利要求6至13中任一项所述的装置的方法,其特征在于,在周围材料中产生两个以上的量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70),并且在所述周围材料上布置第一导电导线(20、22;74、76、78、86、88、90)。

15. 根据权利要求14所述的方法,其特征在于,还执行以下步骤中的至少一者:

- 选择金刚石层(12;52)作为所述周围材料,
- 用掺杂剂掺杂所述周围材料,所述掺杂剂优选为硫、磷或氧,
- 在所述掺杂之后执行第一回火步骤,
- 在产生所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)之后执行第二回火步骤,
- 铺设用于读出所述量子位(14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70)的第二导电导线(24)。

用于寻址量子位的方法和装置以及用于制造该装置的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及根据权利要求1的前序部分的用于寻址量子位的方法、根据权利要求6的前序部分的用于寻址量子位的装置以及根据权利要求14的前序部分的用于制造该装置的方法。

背景技术

[0002] 量子计算机提供了借助量子力学效应解决特殊问题的可能性。

[0003] 与商业上通用的计算机的不同之处在于在此使用了量子位(Qubits),该量子位相当于经典计算机中的位。

[0004] 对位的考虑表明它们只能有两种状态。这两个状态是0和1。相反,量子位不仅可以呈现状态0和1,还可以在一段时间(相干时间)内呈现0和1之间的中间状态。这种状态被称为叠加(Superposition)。

[0005] 因此,与当今计算机的经典位相比,量子位可以处理更多的信息,从而为具有前所未有的计算能力的计算机提供了潜力。特别是这种量子位的生产目前是科学界正在投入大量研究的一个主题。科学家们正在寻找产生量子位并根据量子定律将它们相互连接成计算单元的最佳方法。

[0006] 量子位目前可以通过不同的方法来实现。

[0007] 众所周知,超导量子位易于构造和扩展。以此方式已经使多达20个量子位纠缠。然而,只存在极短的T2时间(横向弛豫时间-自旋-自旋弛豫),并且必须确保冷却至4°K(-273°C),因此必须将计算机安装在为此专门提供的房间中,以确保冷却并尽可能防止振动、杂散电场和余热。

[0008] 通过离子阱的量子位易于控制并且具有极长的T2时间。已经使10至20个量子位以此方式进行纠缠。但它们不可扩展且技术上非常复杂。

[0009] 还研究了NMR量子计算机,其中纠缠了5个量子位。它们的特征在于编程非常简单,但它们是不可扩展的,而且背后的技术非常复杂。

[0010] 迄今为止,基于固态的量子位是规避上述缺点的唯一方法,因为使用基于固态的量子位操作的量子计算机可以在室温下运行。此外,它是可扩展的且与CMOS兼容,因此可以与迄今为止使用的半导体技术良好的连接。

[0011] 本发明以这种基于固态的量子位为基础。目前最有前途的基于固态的量子位的变体是使用金刚石中的氮空位中心(NV中心)。

[0012] 金刚石具有各种机械特性,例如,极高的硬度、导热性和抗反应性。近年来,研究已经可以成功地通过化学气相沉积(CVD)来生产金刚石。合成生产的优点在于可以制造出具有高同位素纯度和特定晶体缺陷的金刚石。因此,金刚石可以配备有特定于应用的光学和电子属性。现在可以确定的金刚石的这些属性对于量子力学是非常重要的,并在此存在很大的应用领域。

[0013] 可以在合成金刚石中创建NV中心的二维晶格。在此,氮原子的核自旋用作量子位;

通过NV中心的电子自旋进行读出和耦合,其中,耦合是通过磁偶极子相互作用来实现的;非均匀磁场能够在很多量子位上实现单独的量子门和并行门操作。然而,寻址单个门操作和读出单个量子位是一个特别的问题。

[0014] 局部寻址(将共振频率偏移至少一个线宽)通常可以通过使用磁场或不同方向的量子位来实现。必要的偏移取决于T2时间。在此的问题是,当应用共振偏移时,无法完全避免相邻量子位的影响(所谓的交叉或串扰)。

[0015] 一种替代方法是光学寻址,例如在US 9 317 473 B2中描述的。在此,寻址是通过光学方式完成的。为了使不同量子位(寄存器)之间没有串扰,它们必须间隔足够远(400nm至500nm)地布置。然而,对于这些距离,不会发生量子位的直接纠缠,因此必须通过光学不可寻址自旋的所谓的暗自旋链来调解纠缠。反之,如果距离足够小以至于可以进行直接纠缠,则寻址将通过近场显微镜(Spin-Resolft)进行。然而,间接纠缠包含功能风险,并且对每个单独的寄存器使用近场显微镜是非常复杂的。此外,两种情况都不能排除串扰。

发明内容

[0016] 因此,本发明的目的是能够以简单的方式寻址量子位而没有串扰的风险。特别是,还应能够容易地读取量子位。

[0017] 该目的通过根据权利要求1的本发明的方法、根据权利要求6的本发明的装置和根据权利要求14的本发明的用于制造该装置的方法来实现。有利的改进示例在从属权利要求和以下结合附图的说明中给出。

[0018] 本发明人认识到能够以令人惊讶的方式和方法实现该目的,即,通过电磁场进行量子位的寻址,而不需寻址的量子位通过适当的反向电磁场进行屏蔽。因此,可以非常精确且同时又容易地对一组两个以上的量子位中的每个单独的量子位进行寻址,即使它们为了直接纠缠的目的而彼此相对靠近地布置。

[0019] 根据本发明的用于在一组两个以上的量子位中寻址至少一个量子位的方法的特征在于,要寻址的量子位暴露于电磁场,而该组量子位中的至少一个其它量子位暴露于反向电磁场,使得电磁场对其它量子位没有影响(为了纯粹地屏蔽其它量子位),或使得电磁场对其它量子位的影响与对要寻址的量子位的影响不同(为了不同的寻址)。

[0020] 在本发明的上下文中,“寻址”不仅被理解为选择量子位以改变其状态,而且还意味着在量子门操作(也被称为Quantum Gate Operationen)的背景下其状态的实际改变。门操作可以是单门或双门或多门操作;后者通常取决于量子位的状态(例如,CNOT门)。因此,根据本发明的“用于寻址量子位的方法”更准确地说是“用于选择量子位和/或用于改变量子位的状态的方法”。

[0021] 因此,寻址是通过选择期望的量子位并对这些量子位执行量子门操作来完成的。同时,屏蔽其它量子位或调整反向场,使得它们自身的量子门操作得到优化。

[0022] 量子门操作基于例如量子位的自旋状态由于特定持续时间的时变磁场的影响而发生的变化。在此,设定脉冲形状,以实现具有低错误率的明确定义的状态。在纠缠的量子位的情况下,可以同时寻址多个量子位,以用于控制寄存器和纠错。通常,对于电子自旋系统,脉冲波形使用在500MHz至50GHz的频率范围内的载波频率,并且对于核自旋系统,脉冲波形使用在1kHz-100MHz的频率范围的载波频率。

[0023] 量子门操作的确切过程不是本发明的主题。它可以例如从M.Pfender等人的文章“Proteting a Diamond Quantum Memory by Charge State Control (通过电荷状态控制保护金刚石量子存储器)”, Nano Lett. 2017, 17, 10, 5931-5937中获得, 其相关内容在此全部并入本文。

[0024] 在此, 根据电磁源和量子位相对于该源的位置对电磁场和反向电磁场进行特别协调, 以分别实现量子位的期望的寻址或非寻址。

[0025] 由于麦克斯韦方程的线性, 每个单独的量子位都可以被不同地单独寻址。详细来说, 可以实现以下寻址类型:

[0026] -可以在特定时间点对每个量子位进行单独寻址, 而不寻址其它量子位;

[0027] -可以同时两个以上的量子位进行相同的寻址, 而不寻址其它量子位;

[0028] -可以同时两个以上的量子位进行不同的寻址, 而不寻址其它量子位;

[0029] -可以同时两个以上的量子位进行相同的寻址, 而同时对至少一个其它量子位进行不同的寻址, 并不寻址其余量子位;

[0030] -可以同时两个以上的量子位进行相同的寻址, 而同时对剩余的量子位进行不同的寻址;

[0031] -可以同时对所有量子位都进行不同的寻址。

[0032] 在此, 由于分别针对每个量子位相对于其它量子位的寻址专门调整反向电磁场, 因此量子位的寻址之间不存在串扰。

[0033] 因此, 每个量子位可以同时暴露于电磁场和反向电磁场, 其中, 通过电磁场和反向电磁场的叠加同时实现期望的量子门操作和屏蔽。在此, 电磁场本身不必精确地服务于一个量子位的量子门操作, 并且反向电磁场不必精确地服务于另一量子位的屏蔽, 但混合形式是可能的, 例如, 一个量子位的电磁场和另一量子位的反向电磁场可用于实现另一量子位的量子门操作。

[0034] 在一有利的改进示例中, 对电磁场和反向电磁场进行振幅调制, 其中, 在电磁场的调制和反向电磁场的调制之间存在时间上的变化。因此, 可以特别容易且有效地实施该方法。

[0035] 在一有利的改进示例中, 将电磁近场用作电磁场和反向电磁场, 其中, 优选地, 电磁近场是特别具有在微波范围和/或千赫兹范围内的频率的磁近场。电磁近场非常良好地耦合到相邻的量子位, 其中, 由于拉普拉斯方程, 在电磁近场的源附近出现最大的场增强(Feldüberhöhung)。这些近场独立于所使用的电磁场或反向电磁场的波长, 并且可以通过叠加而被局部放大或限制。千赫兹范围(在0kHz至1GHz范围)内的场可用于寻址核自旋, 而微波范围(在0GHz至50GHz范围, 优选在2.87GHz范围)内的场可用于寻址电子自旋。

[0036] 在一有利的改进示例中, 将金刚石中的色心(优选, NV中心)用作量子位。如DE 10 2019 117 423.6所示, 可以特别容易地并以高转化地生产这些色心, 其相关内容在此完全并入本文。

[0037] 在一有利的改进示例中, 为了提供电磁场和反向电磁源, 使用被分配给各个量子位的优选为导电结构的电磁源。因此, 可以特别容易地将电磁场和反向电磁场局部分配给每个单独的量子位。

[0038] 在一有利的改进示例中, 导电结构被提供为用于电磁场, 优选地用于电磁高频场

的线路 (Leitungen)、金属化结构 (Metallisierungen)、导线 (Drähte) 或类似物。为此, 导电结构特别应能够传输高频率。为此, 导电结构优选地具有比相邻量子位之间的距离更小的尺寸 (直径-长度可能更大)。因此, 可以特别容易且有效地实施该方法。

[0039] 在一优选实施例中, 将色心用作量子位, 其中, 电磁场和反向电磁场由如下的导电结构提供, 所述导电结构的尺寸小于相邻量子位之间的距离。因此使得能特别容易地对量子位进行寻址。

[0040] 在一个有利的改进示例中, 导电结构的数量与量子位的数量相同, 因此可以特别容易地进行寻址。

[0041] 然而, 导电结构的数量不必与量子位的数量相同, 因为来自不同导电结构的场可以叠加, 并也可以形成梯度场。为了使系统为欠定的, 可以在导电结构上产生额外的准静态电场, 并且例如通过斯塔克效应 (Starkeffekt) 或塞曼效应 (Zeemaneffekt) 实现寻址。这会导致定义的频移, 并使其它量子位对电磁场事实上不可见。在最简单的情况下, 将定义的偏压 (例如, 10V) 施加到线路, 并且电压仅在交叉点处才会相加 (20V), 并导致电磁场的调谐频率。因此, 例如也可以在两个或三个量子位上同时执行量子门操作。然后, 可以通过多个在时间上分离的脉冲序列来校正由于与偏压变化相关的脉冲而出现的误差。

[0042] 因此, 一个例如由 9 个量子位组成的场可以通过存在于两个层中的 6 条第一导电导线进行寻址, 这 9 个量子位在层中以正交的 3×3 的网格布置, 其中, 每个层具有 3 条相互平行布置的第一导电导线; 一个层的导线与另一层的导线正交, 并且各个导线相互电绝缘地布置。

[0043] 优选地, 导线分别以平行于一排量子位的方式延伸。一般来说, 由 $X \times Y$ 个量子位组成的网格可以分别通过至少 X 条线路或 Y 条线路的至少两个层进行寻址。在此, 网格和导线不一定正交地布置, 它们也可以倾斜地布置。在这种情况下, 寻址例如通过电场利用斯塔克效应实现, 或通过半静态磁场利用塞曼效应实现。在这两种情况下, 量子位的共振频率都会发生变化, 这又导致了选择效应 (Auswahleffekt)。

[0044] 另一方面, 在三维正交或倾斜排列的量子位 ($X \times Y \times Z$) 的情况下, 寻址可以通过至少 X 个、 Y 个和 Z 个导线的至少三个相互正交或倾斜的层来进行。在此, 导线也优选地以平行于一排量子位的方式延伸。

[0045] 原则上, 如果对于每个量子位都存在单独的导电结构 (例如, 导线、线路或金属化结构) 就足够了。然而, 通过将量子位布置在 2 维或 3 维的网格中, 可以减少所需的导电结构的数量。在此, 各个导电结构必须在每种情况下都相互电绝缘地布置, 这例如可以通过在各个导电结构之间的层内的绝缘材料和具有导电结构的不同层之间的绝缘层来实现。

[0046] 电磁源或导电结构可用于同时读出量子位, 为此, 例如通过光脉冲在要被读取的量子位中产生光电子, 并通过电磁源或导电结构进行检测。为此, 应提供至少一个额外的接地部。这种接地部可以例如作为薄层的背面接触部存在, 其中, 量子位位于薄层中, 或者存在一个或多个接地的其它导电结构。

[0047] 用于读出的确切程序不是本发明的主题。它可以例如在 P. Siyushev 等人的文章 “Photoelectrical Imaging and Coherent spin-state readout of singlenitrogen-vacancy centres in diamond (金刚石中的单氮空位中心的光电成像和相干自旋态读出)”, Science, 363, 6428, 728-731 中获得, 其相关内容在此全部并入本文。

[0048] 在一有利的改进示例中,量子位由透明材料组成,使得量子位可以通过光辐射,优选地通过激光辐射进行格式化,优选地同时格式化多个量子位,特别是同时格式化所有量子位,如也例如在P.Siyushev等人的文章“Photoelectrical Imaging and Coherent spin-state readout of singlenitrogen-vacancy centres in diamond(金刚石中的单氮空位中心的光电成像和相干自旋态读出)”,Science,363,6428,728-731中所述的,其相关内容在此全部并入本文。如果将导电结构用作电磁源,则这些导电结构应尽可能透明地形成,以避免遮挡辐射。例如,它可以是由诸如ITO(氧化铟锡)等金属氧化物制成的线路或导线。在不透明的导电结构的情况下,可以将导电结构的尺寸确定为使得辐射可以通过衍射到达相应的量子位。

[0049] 要求独立保护的是根据本发明的用于在一组两个以上的量子位中寻址至少一个量子位的装置,其特征在于,该装置具有用于产生电磁场的构件,其被设计成为使得要寻址的量子位能够暴露于电磁场,并且该装置具有用于产生至少一个反向电磁场的构件,其被设计为使得所述一组量子位中的至少一个其它量子位能够暴露于反向电磁场,使得要寻址的量子位的电磁场对所述其它量子位没有影响,或者电磁场对所述其它量子位的影响与对要寻址的量子位的影响不同。

[0050] 在一有利的改进示例中,该装置适合于执行根据本发明的方法。

[0051] 在一有利的改进示例中,该装置具有第一电磁源,优选为第一导电结构,特别是线路、导线、金属化结构和类似物,以用于产生电磁场和反向电磁场,其中,每个量子位都被分配有至少一个优选为第一导电结构的电磁源。因此可以特别容易地将电磁场和反向电磁场分配给各个量子位。

[0052] 在一有利的改进示例中,多个特别是导线形式的优选为第一导电结构的第一电磁源被布置在一个层中,其中,量子位与各自相关的电磁源的在垂直于该层的方向上的距离最多为30nm,优选为最多20nm,特别是在0nm至10nm的范围内。因此,可以特别容易地产生电磁近场,该电磁近场非常强地耦合到相邻的量子位,其中,由于拉普拉斯方程,存在最大的场增强。这些近场独立于所使用的电磁场或反向电磁场的波长,并且可以通过叠加来进行局部加强或限制。

[0053] 在一有利的改进示例中,至少一个第一导电结构可以可选地连接到电磁激发器或光电子检测器。因此,导电结构既可用于寻址又可用于读出。

[0054] 在一有利的改进示例中,多个特别是导线形式的优选为第一导电结构的第一电磁源被布置在一个层中,其中,投射到该层上的量子位与各自相关的第一电磁源的距离最多为20nm,优选为最多10nm,特别是在0nm至5nm的范围内。因此也使得能特别容易地产生电磁近场,该电磁近场非常强地耦合到相邻的量子位,其中,由于拉普拉斯方程,存在最大的场增强。这些近场独立于所使用的电磁场或反向电磁场的波长,并且可以通过叠加来进行局部加强或限制。

[0055] 在一有利的改进示例中,该装置具有至少一个第二导电结构,优选为第二导电导线、线路或金属化结构或电极,所述第二导电结构形成用于读出量子位的接地部,其中,第二导电结构优选地与第一电磁源相邻地布置,特别是在一个层中相距最多40nm,优选为最多30nm,特别是在10nm至20nm的范围内。

[0056] 在一有利的改进示例中,该装置具有至少一个第二导电结构作为相对薄的层的背

面接触部,其中,建议金刚石的层厚最多为100nm,优选为最多80nm,特别是最多60nm。因此能特别有效地读出。

[0057] 在一有利的改进示例中,第一导电导线和/或第二导电导线的i)横截面具有小于50nm,优选地小于20nm,特别是在1nm至10nm的范围内的纵向尺寸,且/或ii)长度小于50nm,优选地小于30nm,特别是5nm至20nm。因此能够特别好地产生电磁近场。

[0058] 在一个有利的改进示例中,量子位以一维、二维或三维的方式布置。因此使得大量量子位特别良好地相互交错,并且仍然可以对它们进行彼此独立地寻址。

[0059] 在一有利的改进示例中,导电结构以一维、二维或三维的方式布置,其中,优选地存在两个以上的层,导电导线特别是彼此平行地布置在这些层中,其中,不同层的导电结构被不同地布置,其中,电绝缘体优选地布置在两个层之间。因此可以容易地对量子位进行寻址并再次读出。优选地,不同层的导电结构彼此倾斜地布置,优选为彼此正交地布置,因为随后可以产生具有椭圆或圆极化的电磁场,从而产生三态粒子(双量子跃迁,参见F.Dolde等人的文章“Room temperature entanglement between distant single spins in diamond(金刚石中远距离单自旋之间的室温纠缠)”,Nature Physics,9,139-143(2013))。

[0060] 在一优选实施例中,量子位是色心,其中,用于产生电磁场和反向电磁场的构件包括具有比相邻量子位之间的距离更小的尺寸的导电结构。因此能特别容易地对量子位进行寻址。

[0061] 此外,要求独立保护的是根据本发明的用于制造本发明的装置的方法,其特征在于,在周围材料中产生两个以上的量子位并在周围材料上布置第一导电结构。

[0062] 在一有利的改进示例中,还执行了至少一个以下步骤:

[0063] -选择金刚石层(作为块状材料或作为基板上的层)作为周围材料,

[0064] -使用掺杂剂(优选为用硫、磷或氧)掺杂周围材料,

[0065] -在掺杂之后执行第一回火步骤,

[0066] -在产生量子位之后执行第二回火步骤,

[0067] -铺设用于读出量子位的第二导电结构。

[0068] 有关量子位产生的更多详细信息,可以在DE 10 2019 117 423.6中获得。

[0069] 诸如线路、导线和金属化结构等导电结构可以使用各种方法制造。一方面,可以进行印刷。然后可以穿过模板进行涂覆。此外,也可以例如使用AFM探针直接写入导线,如I.W.Rangelow等人的文章“Atomic force microscope integrated with a scanning electron microscope for correlative nanofabrication and microscopy(用于相关纳米加工和显微镜的集成了扫描电子显微镜的原子力显微镜)”,J.Vac.Sei.Technol B 36(6),2018年11月/12月所述。

[0070] 在一优选实施例中,量子位的产生可以包括外来原子的注入,这对应于S.Pezzagna等人的出版物“Nanoscale Engineering and Optical Addressing of Single Spins in Diamond(金刚石中单自旋的纳米工程和光学寻址)”,Small 2010,6,No.19,2117-2121中所述的使用AFM探针的方法,因为因此可以非常精确地定位量子位。

[0071] 在一优选实施例中,生产色心作为量子位,并生产导电结构使得它们具有比相邻量子位之间的距离更小的尺寸。因此能更容易地对量子位进行寻址。

附图说明

[0072] 本发明的特征和其它优点将在以下结合附图对优选的示例性实施例的说明中变得显而易见。在此,附图纯示意性地示出了如下内容:

[0073] 图1以俯视图示出了根据本发明的装置的第一优选实施例;

[0074] 图2以侧剖视图示出了根据图1的本发明的装置;

[0075] 图3以俯视图示出了根据本发明的装置的第一优选实施例;以及

[0076] 图4以侧剖视图示出了根据图3的本发明的装置。

具体实施方式

[0077] 在图1和图2中,更详细地示出了根据本发明的装置10的第一优选实施例。

[0078] 可以看出,装置10具有金刚石块体材料12,在金刚石块体材料中,两个量子位14、16被布置在金刚石材料12的表面18下方约10nm的深度处。

[0079] 由ITO(铟锡氧化物)制成的第一导电导线20、22被布置在两个量子位14、16的正上方。还存在由钨形成的第二导电导线24。为了进行接触,这些导线20、22、24分别具有相应的接触区域26,电连接端子(未示出)可以分别连接到这些接触区域。

[0080] 用于寻址和读出两个量子位14、16的两条第一导线20、22具有大约20nm至30nm的间距,该间距因此也对应于两个量子位14、16之间的间距。因此,这些量子位14、16很容易发生纠缠。

[0081] 形成用于读出量子位14、16的接地部的第二导线24被布置在两条第一导线20、22之间的中心位置,并因此与这些第一导线20、22的间距为10nm至15nm。所有导线20、22、24在表面18上彼此平面平行地布置。它们在接触面26之间的直线区域(参见图2)中具有5nm至30nm的长度,优选地具有20nm的长度,并且具有1nm至10nm的高度和宽度,优选地具有5nm的高度和宽度。

[0082] 现在,装置10的工作原理是通过穿过表面18的适合的激光脉冲同时格式化量子位14、16,该激光脉冲容易通过由ITO制成的透明导线20、22到达量子位14、16。在此,由于激光脉冲而发生自旋极化,并且所有量子位14、16进入基态。这提供了定义的且已知的初始状态(格式化)。

[0083] 替代地,导线20、22也可以例如由银或金形成,在这种情况下,由于导线20、22的尺寸非常窄,激光脉冲在这些导线20、22周围发生衍射,因此激光脉冲随后也到达量子位14、16以进行格式化。

[0084] 然后可以单独或共同地寻址量子位14、16。为此,将在千赫兹范围内的适合的高频电流施加到相应导线20、22的接触部26,以用于寻址量子位14、16的核自旋。在导线20、22中流动的电流分别感应出作用于相应量子位14、16的磁场。

[0085] 在此,在紧邻导线20、22的周围处形成了近磁场,由于拉普拉斯方程,该近磁场在分别相邻布置的量子位14、16的区域中升高,并因此特别好地影响这些量子位14、16的核自旋。

[0086] 因此,将适当的近磁场提供给每个量子位14、16,借此对其进行寻址。同时,分别向其它量子位16、14提供反磁场,该反磁场补偿了分别在其它量子位16、14的位置处用于寻址量子位14、16的近磁场的磁场分量,因此不能会发生串扰。

[0087] 因此,不仅可以同时不同地或相同地寻址两个量子位14、16,而且还可以独立于对另一量子位14、16的寻址而只进行单个量子位14、16的寻址。

[0088] 为了读出量子位14、16,例如可以再次进行适合的均匀激光辐射,从而在两个量子位14、16中产生光电子,然后通过分别关联的第一导线20、22截取该光电子并进行测量,而第二导线24用作接地部。为此,存在转换开关,以便导线20、22可以一次用于格式化(即,供应电流),并且一次用于读出(即,测量电流)。

[0089] 替代地,也可以通过适合的照明装置将适合的激光脉冲分别馈送到每个量子位14、16,从而可以单独读出量子位14、16。

[0090] 装置10的制造例如可以根据以下步骤进行:根据DE 10 2019 117423.6,通过掺杂金刚石12以及随后的第一和第二回火步骤来制造量子位14、16,其中,将接触第二导线24并屏蔽和接触第一导线20、22的步骤适当地集成到该制造方法中。

[0091] 更准确地说,用硫或另一种适合的掺杂剂对金刚石12进行掺杂并在大约1000°C下进行第一回火步骤。然后,例如通过可移除的掩模,将由钨制成的第二导线24与相应的接触面26一起气相沉积在金刚石12的表面18上。

[0092] 然后,将由玻璃或碳化硅制成的接触掩模(为清楚起见未在图1中示出)布置在金刚石12的设置第二导线24并具有两个开口的表面18上,这两个开口具有第一导线20、22的形状,并且它们被布置在距第二导线24的期望的距离处。

[0093] 相应的掩模制造方法是本领域技术人员所熟悉的,因此不必对其进行更详细的讨论。

[0094] 通过该掩模进行氮注入以产生量子位14、16。因此,也精确地预定了在随后形成的第一导线20、22下方的量子位14、16的位置。

[0095] 在大约800°C的第二回火步骤之后,通过掩模一起气相沉积由ITO制成的第一导线20、22以及相应的接触面26,从而完成装置10。

[0096] 在图3和图4中,更详细地示出了根据本发明的装置50的第二优选实施例。

[0097] 在图3和图4中可以看出,装置50具有金刚石层材料52,在金刚石层材料中,9个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70被布置在金刚石材料52的表面72下方约10nm的深度处。

[0098] 在9个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70的正上方,由ITO制成的三个第一导电导线74、76、78被布置在第一层80中。这些第一导线74、76、78被绝缘层82覆盖,该绝缘层82可以例如由氧化物形成,特别是由SiO₂形成。在绝缘层82的表面84上,另外三个第一导电导线86、88、90被布置在第二层92中。

[0099] 第一层80中的导线74、76、78彼此平面平行地对齐,并且第二层92中的导线86、88、90彼此平面平行地对齐。第一层80的导线74、76、78与第二层92的导线86、88、90垂直对齐,并且所有导线相互电绝缘。为简化图示,在此未示出相应的接触面。这些第一导电导线74、76、78、86、88、90也具有1nm至10nm的范围内的高度和宽度,优选地具有5nm的高度和宽度。导线74、76、78、86、88、90的直线部分的长度分别延伸为超出外部量子位54、56、58、60、64、66、68、70大约5nm至10nm。

[0100] 这些第一导电导线74、76、78、86、88、90用于寻址和读出量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70,并在相应的层80、92中具有大约20nm至30nm的间距,该间距因此对应于布置在导线74、76、78、86、88、90(参见图4)的虚拟交叉点正下方的量子位54、56、58、60、62、64、

66、68、70的间距。由于20nm至30nm的距离，量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70很容易发生纠缠。

[0101] 代替(如在根据图1和2的装置10中的)一条或多条第二导电导线，在此存在一个例如由钨制成的公共的背面接触部94，其位于金刚石层52和基板96之间。该背面接触部94用作读出各个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70的公共接地部。

[0102] 装置50现在通过以下方式运行：通过穿过表面84的适合的激光脉冲同时对量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70进行格式化，该激光脉冲很容易通过由ITO制成的透明导线74、76、78、86、88、90到达量子位14、16。

[0103] 现在可以通过为每个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70分别分配两条第一导线74、76、78、86、88、90来寻址单个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70，因此通过在分别交叉的第一导线74、76、78、86、88、90上的不同适合的信号，每个单独的量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70可以通过单独形成的近磁场而被单独地寻址。更准确地说，量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70在层80、92上的投影位于第一导线74、76、78、86、88、90的交点附近，使得施加在交叉的导线74、76、78、86、88、90中的高频磁场相互叠加，从而为每个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70建立单独的近磁场。通过在这些单独的近场中的单独适配的反磁场，在此消除或充分降低相应剩余量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70的近磁场的影响。

[0104] 因此，交叉的导线74、76、78、86、88、90可以为每个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70产生椭圆或圆极化的近磁场，从而可以产生量子(Qutrit)状态。

[0105] 例如，为了读出量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70，使用了适合的激光脉冲，其中，将第一导线74、76、78、86、88、90从电流供应切换到电流测量，并将背面接触部用作产生的光电子的接地部。通过组合第一导线74、76、78、86、88、90的各个测量信号，每个量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70可以具有其特定的测量信号。

[0106] 装置50的制造可以例如根据以下步骤进行：根据DE 10 2019 117 423.6，通过掺杂金刚石层材料52以及随后的第一和第二回火步骤来制造量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70，其中，将接触背面接触部94和接触第一导线74、76、78、86、88、90的步骤适当地集成到该制造方法中。

[0107] 更准确地说，在此通过沉积(例如，溅射)在合适的基板材料96上产生由钨制成的背面接触部94，并且例如通过气相沉积在其上布置金刚石层52。根据DE 10 2019 117 423.6，该金刚石层52掺杂有硫或另一掺杂剂，并在大约1000℃下进行第一回火步骤。

[0108] 然后注入氮以产生量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70，其中，用AFM探针注入氮，以用于精确定位量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70。这种方法例如基本上在S.Pezzagna等人的文章“Nanoscale Engineering and Optical Addressing of Single Spins in Diamond(金刚石中单自旋的纳米工程和光学寻址)”，Small 2010,6,19,2117-2121中进行了描述。为了定向，石墨标记或金属线形式的辅助标记可被布置在将设置有量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70的表面区域之外。

[0109] 在大约800℃的第二回火步骤之后，通过AFM探针在金刚石材料52的表面72上画出层80的例如由银制成的第一导线74、76、78，并产生相应的接触面(未示出)。然后，将适合的例如由SiO₂制成的电绝缘层82布置在金刚石材料52的表面72上，因此覆盖第一导线74、76、

78。最后,第二层92的第一导线86、88、90也通过用AFM探针绘制而布置在绝缘层82的表面84上。

[0110] 在此,使用AFM探针画线可以根据I.W.Rangelow等人的出版物“Atomic force microscope integrated with a scanning electron microscope for correlative nanofabrication and microscopy (用于相关纳米加工和显微镜的集成了扫描电子显微镜的原子力显微镜)”,J.Vac.Sci.Technol B 36(6),2018年11月/12月中基本上说明的方法进行。此外,还可以使用标记或辅助线进行定向。

[0111] 作为使用AFM探针画线的替代方案,还可以使用基于掩模的方法来产生第一导线74、76、78、86、88、90,其中,优选地每次去除这些掩模以确保导线74、76、78、86、88、90和各自相关的量子位54、56、58、60、62、64、66、68、70之间的距离尽可能小。

[0112] 从上述说明中可以清楚地看出,本发明能够以简单的方式和方法寻址量子位14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70,而不存在不同量子位14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70之间的串扰风险。在此,对于不同的量子位14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70,可以单独地或共同地进行寻址。此外,还可以容易读出量子位14、16;54、56、58、60、62、64、66、68、70。

[0113] 除非另有说明,本发明的所有特征可以相互自由组合。此外,除非另有说明,附图说明中描述的特征可以与其它特征自由组合作为本发明的特征。在此,未明确规定将示例性实施例的单个特征限制为与示例性实施例的其它特征的组合。此外,装置的物体特征也可以进行变形并作为方法特征使用,而方法特征也可以进行变形并作为装置的物体特征使用。因此,自动公开了这种变形。

[0114] 附图标记列表

[0115] 10 根据本发明的装置的第一优选实施例

[0116] 12 金刚石块体材料

[0117] 14、16 量子位

[0118] 18 金刚石材料12的表面

[0119] 20、22 由ITO(氧化铟锡)制成的第一导电导线

[0120] 24 由钨制成的第二导电导线

[0121] 26 导线20、22、24的接触面

[0122] 50 根据本发明的装置的第二优选实施例

[0123] 52 金刚石层材料

[0124] 54、56、58 量子位

[0125] 60、62、64 量子位

[0126] 66、68、70 量子位

[0127] 72 金刚石材料52的表面

[0128] 74、76、78 由ITO(氧化铟锡)制成的第一导电导线

[0129] 80 其中布置有导线74、76、78的第一层

[0130] 82 绝缘层

[0131] 84 绝缘层82的表面

[0132] 86、88、90 由ITO(氧化铟锡)制成的第一导电导线

- [0133] 92 其中布置有导线86、88、90的第二层
- [0134] 94 由钨制成的背面接触部
- [0135] 96 基板

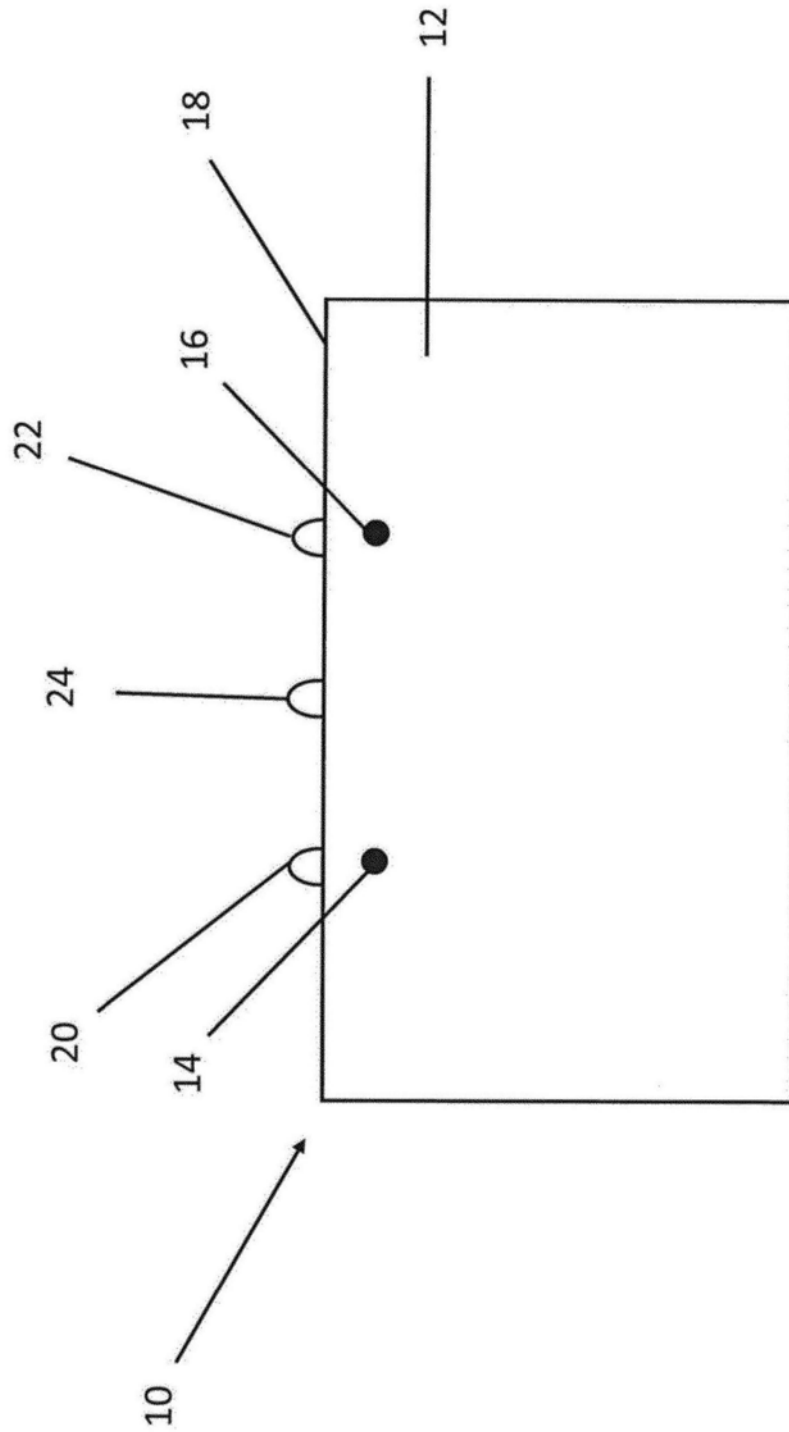


图1

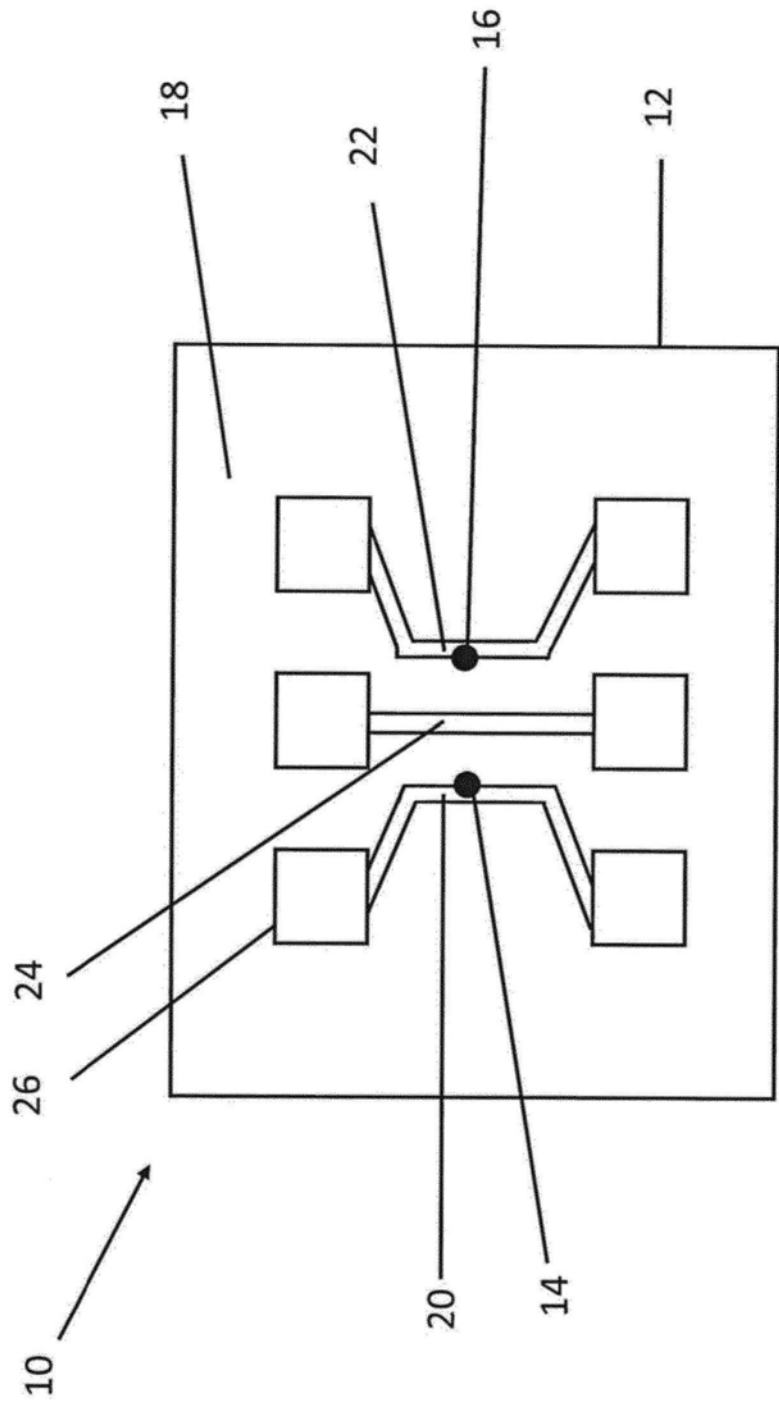


图2

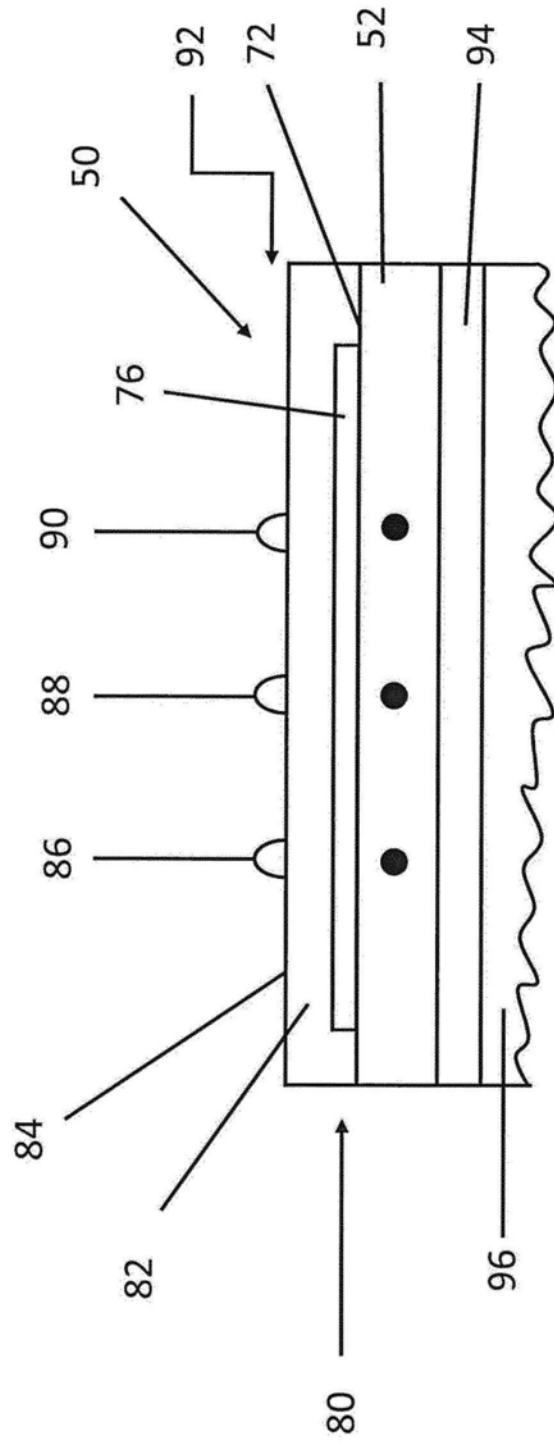


图3

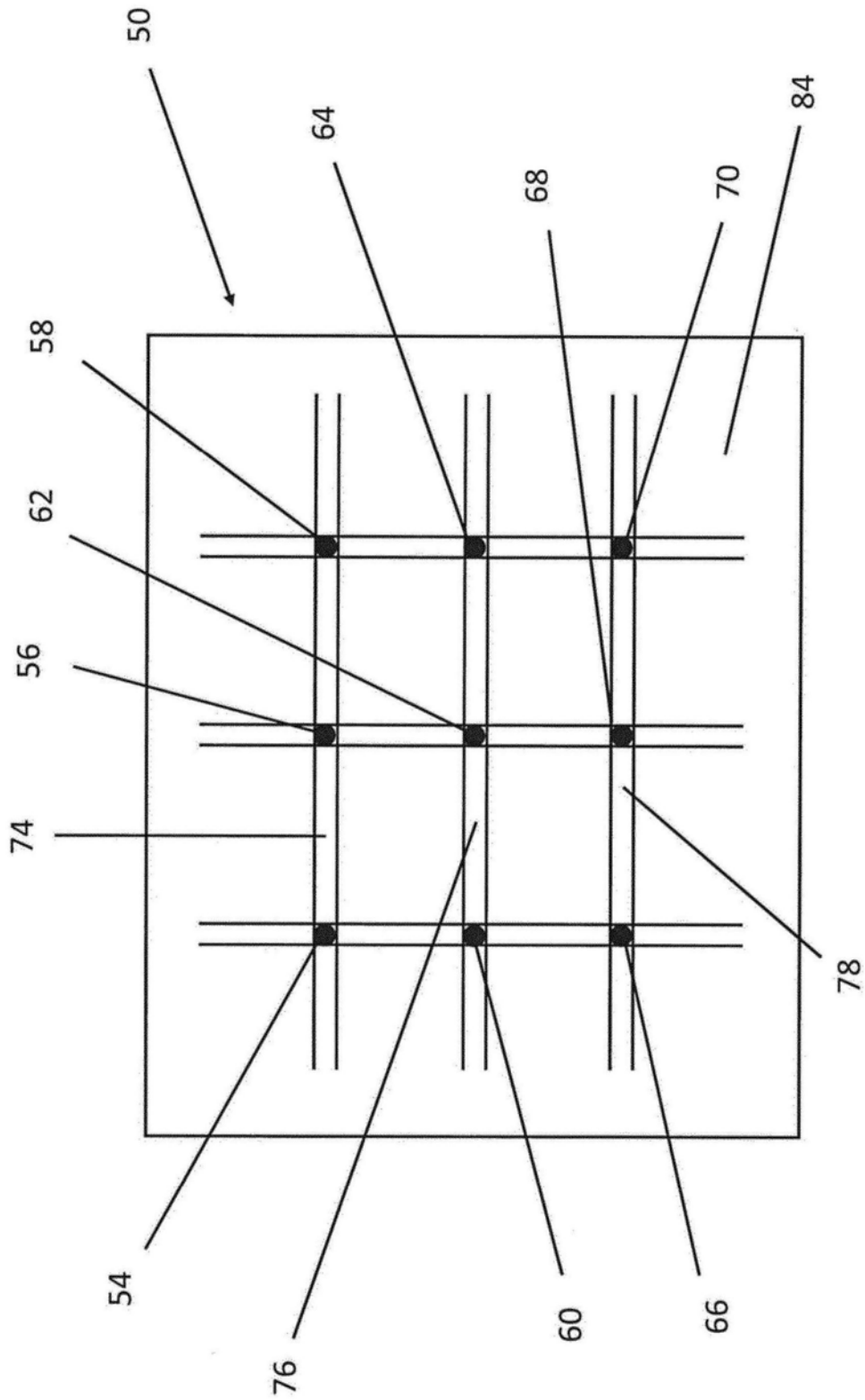


图4