

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
H02N 11/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 00806421.0

[45] 授权公告日 2008 年 5 月 14 日

[11] 授权公告号 CN 100388613C

[22] 申请日 2000.4.19 [21] 申请号 00806421.0

[30] 优先权

[32] 1999.4.19 [33] GB [31] 9908912.0

[86] 国际申请 PCT/GB2000/001515 2000.4.19

[87] 国际公布 WO2000/064038 英 2000.10.26

[85] 进入国家阶段日期 2001.10.19

[73] 专利权人 雷米·奥瑟里·康沃尔

地址 英国伦敦

[72] 发明人 雷米·奥瑟里·康沃尔

[56] 参考文献

US5714829A 1998.2.3

审查员 薛 飞

[74] 专利代理机构 隆天国际知识产权代理有限公司

代理人 陈 红 潘培坤

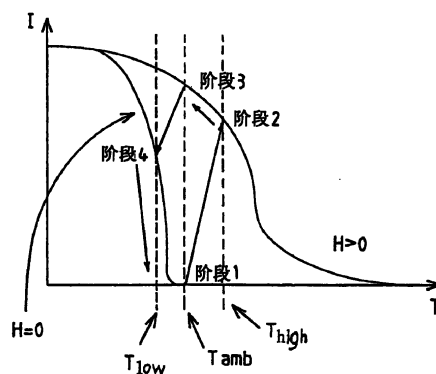
权利要求书 4 页 说明书 27 页 附图 13 页

[54] 发明名称

动态热循环和发电方法

[57] 摘要

一种用于执行动态热循环的设备，包括：具有铁磁相变温度的样品；在样品的铁磁相变温度以上磁化样品的装置；和把样品冷却到其铁磁相变温度以下的装置，其中在样品处于其铁磁相变温度以下时样品的退磁引起产生独立的磁通。还公开一种转换能量的方法，包括步骤：提供具有铁磁相变温度的样品；在样品处于其铁磁相变温度以上时磁化样品；在样品处于其铁磁相变温度以下时允许样品退磁，样品的退磁引起独立的磁通；以及将至少一些独立磁通转换为电流。还提供类似的铁电设备和类似的铁电方法。



1. 一种用于执行动态热循环的设备，包括：

呈现出暂时的剩磁的样品；

在小于循环期间的十分之一的时间周期内磁化样品的装置，该循环期间小于万分之一秒，其中：

样品的退磁引起独立磁通的产生。

2. 根据权利要求 1 所述的设备，其中样品在其退磁的第一部分期间冷却。

3. 根据权利要求 2 所述的设备，其中样品的温度在其退磁的第二部分期间升高。

4. 根据前面任一项权利要求所述的设备，其中还包括将至少一些独立磁通转换为电流的装置。

5. 根据前面 1-3 任一项权利要求所述的设备，其中样品具有第一导磁率，并且其中与样品相邻地提供一定数量的具有第二导磁率的材料，第一导磁率低于第二导磁率。

6. 根据权利要求 4 所述的设备，其中样品具有第一导磁率，并且其中与样品相邻地提供一定数量的具有第二导磁率的材料，第一导磁率低于第二导磁率。

7. 根据前面 1-3 任一项权利要求所述的设备，其中磁化样品的装置有电流。

8. 根据权利要求 4 所述的设备，其中磁化样品的装置有电流。

9. 根据权利要求 5 所述的设备，其中磁化样品的装置有电流。

10. 根据权利要求 6 所述的设备，其中磁化样品的装置有电流。

11. 根据权利要求 1-3 所述的设备，其中磁化样品的装置包括至少一

个旋转永磁体。

12. 根据权利要求 4 所述的设备, 其中磁化样品的装置包括至少一个旋转永磁体。

13. 根据权利要求 5 所述的设备, 其中磁化样品的装置包括至少一个旋转永磁体。

14. 根据权利要求 6 所述的设备, 其中磁化样品的装置包括至少一个旋转永磁体。

15. 一种转换能量的方法, 包括步骤:

提供呈现出暂时剩磁的样品;

磁化样品, 从而引起样品在小于循环期间的十分之一的周期中被磁化, 该循环期间小于万分之一秒;

允许样品退磁, 样品的退磁引起独立的磁通; 以及

将至少一些独立磁通转换为电流。

16. 根据权利要求 15 所述的方法, 其特征在于提供样品的步骤包括提供铁磁流体的步骤。

17. 根据权利要求 15 或 16 所述的方法, 其中提供样品的步骤包括提供具有第一导磁率的样品的步骤, 还包括与样品相邻地提供一定数量的具有第二导磁率的材料, 第一导磁率高于第二导磁率。

18. 根据权利要求 15 或 16 所述的方法, 其中至少一个旋转永磁体磁化该样品。

19. 根据权利要求 17 所述的方法, 其中至少一个旋转永磁体磁化该样品。

20. 根据权利要求 15 或 16 所述的方法, 其中可被操作而携带电流的载体磁化该样品。

21. 根据权利要求 17 所述的方法, 其中可被操作而携带电流的载体

磁化该样品。

22. 根据权利要求 15 或 16 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

23. 根据权利要求 17 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

24. 根据权利要求 18 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

25. 根据权利要求 19 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

26. 根据权利要求 20 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

27. 根据权利要求 21 所述的方法，其中磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

28. 根据权利要求 15 或 16 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

29. 根据权利要求 17 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

30. 根据权利要求 18 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

31. 根据权利要求 19 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

32. 根据权利要求 20 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

33. 根据权利要求 21 所述的方法，还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

34. 根据权利要求 22 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

35. 根据权利要求 23 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

36. 根据权利要求 24 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

37. 根据权利要求 25 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

38. 根据权利要求 26 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

39. 根据权利要求 27 所述的方法, 还包括循环其熔点接近于该样品的操作温度范围的包裹微囊材料以有助于热快速流动到样品的步骤。

40. 根据权利要求 15 所述的方法, 还包括发电的步骤。

动态热循环和发电方法

技术领域

本发明涉及使用接近其铁磁或铁电相变点的材料、电热效应和磁热效应或铁磁流体、铁电流体或非卡诺和卡诺有限动态热循环的液晶将热能转换为电能并制冷的方法与装置。

背景技术

需要用小移动部件将热直接转换为电，并且电可能是原动力最通用的表现形式。有多种通过热电偶、塞贝克和珀尔帖设备将热直接转换为电的方案和装置。这种使用磁热效应的设备的例子在美国专利 US 5714829 中公开。

所有这些方案在两个储存器源与冷源之间运作，并且同样它们是卡诺有限循环。当应付诸如海洋热的低热焓储存器时，在这些设备中出现低效率的问题。

发明内容

本发明的一个目的是寻找提供减轻上述难题的动态热循环和方法。

因此，本发明的一方面提供一种用于执行动态热循环的设备，包括：具有铁磁相变温度的样品；在样品的铁磁相变温度以上磁化样品的装置；和把样品冷却到其铁磁相变温度以下的装置，其中在样品处于其铁磁相变温度以下时，样品的退磁引起产生独立的磁通。

有利地，与样品的磁化相关的磁热效应在其磁化期间加热样品。

优选地，在其磁化之前，样品处于初始环境温度。

简单地说，把样品冷却到其铁磁相变温度以下的温度的手段包括在样品与其周边环境之间至少局部热交换。

有利地，在其退磁期间将样品加热到环境温度。

优选地，把样品冷却到铁磁相变温度以下的温度的手段包括至少局部

地与样品的至少部分退磁相关的反向磁热效应。

简单地说，磁化样品的手段包括电流的流动。

或者，磁化样品的装置包括至少一个旋转永磁体。

或者，磁化样品的装置包括与样品相邻提供的伴随材料，在对该伴随材料执行预定作用时其呈现出相变，并且还包括对伴随材料执行作用的装置。

有利地，执行预定作用的装置包括将静电磁场施加于伴随材料的装置。

或者，执行预定作用的装置包括张紧伴随材料的装置。

有利地，伴随材料表现出的相变是二级相变。

本发明的另一方面提供一种用于执行动态热循环的设备，包括：呈现出暂时的剩磁的样品；在小于循环期间的十分之一的时间周期内磁化样品的装置，该循环期间小于万分之一秒，其中样品退磁引起独立磁通产生。

简单说，样品在其退磁的第一部分期间冷却。

有利地，样品的温度在其退磁的第二部分期间升高。

优选地，设备还包括将至少一些独立磁通转换为电流的装置。

简单说，样品具有第一导磁率，并且其中与样品相邻地提供一定数量的具有第二导磁率的材料，第一导磁率低于第二导磁率。

本发明的再一方面提供一种用于执行动态热循环的设备，包括：具有铁电相变温度的样品；在铁电相变温度以上的温度下极化样品中电偶极子的取向的装置；和把样品冷却到其铁电相变温度以下的装置，其中在样品在其去极化期间处于其铁磁相变温度以下时样品的去极化引起产生独立的电通量。

有利地，与样品的极化相关的电热效应在其极化期间加热样品。

优选地，样品在其极化之前处于其初始环境温度。

简单地说,把样品冷却到其铁电相变温度以下的温度的装置包括在样品与其周边环境之间至少局部热交换。

有利地,在其去极化期间将样品加热到周围温度。

优选地,把样品冷却到其铁电相变温度以下的温度的手段包括至少局部地与样品的部分去极化相关的反向电热效应。

本发明的又一方面提供一种用于执行动态热循环的设备,包括:呈现出暂时的剩电的样品;在小于循环期间的十分之一的周期内极化样品的装置,该循环期间小于万分之一秒,其中样品去极化引起独立电通量产生。

简单说,样品在其去极化的第一部分期间冷却。

有利地,样品的温度在其去极化的第二部分期间升高。

优选地,极化样品的手段包括电流的流动。

或者,极化样品的装置包括至少一个旋转永磁体。

简单说,设备还包括将至少一些独立电通量转换为电流的装置。

有利地,样品具有第一介电常数,并且与样品相邻地提供一定数量的具有第二介电常数的材料,第一介电常数低于第二介电常数。

本发明的又一方面提供一种转换能量的方法,包括步骤:提供具有铁磁转换温度的样品;在样品处于其铁磁转换温度以上时磁化样品;在样品处于其铁磁转换温度以下时允许样品退磁,样品的退磁引起独立的磁通;以及将至少一些独立磁通转换为电流。

有利地,该方法还包括在样品的高于其铁磁转换温度的区域中维持周围温度的步骤。

优选地,该方法还包括允许样品跟随其磁化冷却到周围温度的步骤。

本发明的另一方面提供一种转换能量的方法,包括步骤:提供呈现出暂时的剩磁的样品;磁化样品,从而引起样品在小于循环期间的十分之一

的时间周期中被磁化，该循环期间小于万分之一秒；允许样品退磁，样品的退磁引起独立的磁通；以及将至少一些独立磁通转换为电流。

简单说，提供样品的步骤包括步骤：提供铁电流体。

有利地，提供样品的步骤包括步骤：提供具有第一导磁率的样品，并且还和样品相邻地提供一定数量的具有第二导磁率的材料，第一导磁率高于第二导磁率。

优选地，至少一个旋转永磁体磁化样品。

有利地，可被操作而携带电流的载体磁化该样品。

简单说，磁化样品的步骤包括步骤：提供与样品相邻的伴随材料，在该伴随材料执行预定作用时其呈现出进一步的相变，以及提供对伴随材料执行作用的装置。

有利地，提供对伴随材料执行预定作用的装置的步骤包括提供将静电场施加于伴随材料的装置。

或者，提供对伴随材料执行预定作用的装置的步骤包括提供对伴随材料施加张紧力的装置。

有利地，磁化步骤和转换步骤通过可操作来磁化样品并将至少一些独立磁通转换为电流的单一装置执行。

本发明的再一方面提供一种转换能量的方法，包括步骤：提供具有铁电转换温度的样品；在样品处于铁电转换温度以上时极化样品中电偶极子的取向；在样品在其去极化期间处于其铁电转换温度以下时允许样品去极化，样品的去极化引起产生独立的电通量；将至少一些独立电通量转换为电流。

优选地，该方法还包括在样品的高于其铁电转换温度的区域中维持周围温度的步骤。

简单说，该方法还包括允许样品跟随其极化冷却到周围温度的步骤。

本发明的另一方面提供一种转换能量的方法，包括步骤：提供呈现出暂时的剩电的样品；在小于循环期间的十分之一的周期中极化样品中电偶极子的取向，该循环期间小于万分之一秒；允许样品去极化，样品的退磁引起独立的电通量；以及将至少一些独立电通量转换为电流。

有利说，提供样品的步骤包括步骤：提供铁电流体。

优选地，提供样品的步骤包括步骤：提供具有第一介电常数的样品，并且还提供一定数量的与样品相邻的具有第二介电常数的材料，第一介电常数低于第二介电常数。

简单说，至少一个旋转永磁体极化样品。

或者，可被操作而携带电流的载体极化该样品。

有利地，极化步骤和转换步骤通过可操作来极化样品并将至少一些独立电通量转换为电流的单一装置执行

优选地，该方法还包括提供循环系统的步骤，该循环系统包括其熔点接近样品的操作温度范围的包裹微囊材料。

本发明的再一方面提供一种根据上述方法之一的发电方法。

本发明的又一方面提供一种根据上述方法之一的的方法，还包括使用该方法产生的热的步骤。

本发明的另一方面提供一种制冷方法，其动力通过上述方法之一提供。

本发明的另一方面提供可操作来执行上述方法之一的步骤的动态热循环。

为更容易理解本发明，参考附图举例描述其实施例。

附图说明

图 1 表示实施本发明的第一循环的磁化强度对温度的曲线；

图 2 表示实施本发明的第二循环的磁化强度对温度的曲线；

图 3 表示实施本发明的设备的简单布局；

图 4 表示实施本发明的另一设备的简单布局；

图 5 表示与实施本发明的设备一起使用的第一场产生设备的简单布局；

图 6 表示与实施本发明的设备一起使用的第二场产生设备的简单布局；

图 7 表示与实施本发明的设备一起使用的第三场产生设备的简单布局；

图 8 表示与实施本发明的设备一起使用的第四场产生设备的简单布局；

图 9 表示与实施本发明的设备一起使用的第五场产生设备的简单布局；

图 10 表示与实施本发明的设备一起使用的第六场产生设备的简单布局；

图 11 表示与实施本发明的设备一起使用的场消除电路的简单布局；

图 12 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第一布置；

图 13 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第二布置；

图 14 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第三布置；

图 15 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第四布置；

图 16A 与图 16B 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第五布置；

图 17 以与实施本发明的设备一起使用的样品表示高导磁率材料的第

六布置；

图 18 表示实施本发明的第三循环的磁化强度对温度的曲线；

图 19 表示实施本发明的第四循环的极化对温度的曲线；

图 20 表示实施本发明的第四循环的极化对温度的曲线；

图 21 表示与实施本发明的设备一起使用的静电场产生设备；

图 22 表示图 21 的静电场产生设备的变形；

图 23 表示扁长椭圆旋转的形状各向异性曲线；

图 24 分别表示在激励线圈和实施本发明的样品中的电流和电感的第二曲线；

图 25 分别表示在激励线圈和实施本发明的样品中的电流和电感的第二曲线；

图 26 表示实施本发明的样品的维斯（Weiss）方程的曲线图；

图 27 表示镍和铁的温升对温度的曲线图。

具体实施方式

首先转向图 1，表示出实施本发明的第一循环的磁化强度对温度的曲线。

第一循环使用具有磁热性能的材料，该材料是靠近其铁磁/永磁相变点的材料。

在第一循环开始之前，样品最初处于环境温度下，其在第一样品的铁磁相变点（即居里温度）以上。

在第一循环的第一阶段期间，突然向第一样品施加磁场。这通过在第一样品内对齐磁畴引起第一样品被磁化。此时，由于与磁化相关的磁热效应，第一样品的温度升高到环境温度以上。由于第一样品中磁畴的对齐或排序导致的熵局部下降而发生磁热效应，这通过热能增加来补偿，并且这个效应在附录 1 中具体说明。

一旦第一样品的磁化强度改变率下降到零，在第一循环的第一阶段期

间产生的热能因第一样品与周围（其被维持在周围温度）的热梯度而散发出去，这种冷却包括第一循环的第二步骤。当第一样品冷却时，跟随图中所示的曲线 $H>0$ ，磁化强度上升，该图中表示出在存在施加于第一样品的磁场的情况下由维斯方程 $\mu = Bs(h + \alpha \mu)$ 表示的磁化强度与温度之间的关系。

一旦样品冷却到周围温度，第一样品停止冷却并且系统达到稳定状态。在这一点上，通过突然断开施加的磁场开始第一循环的第三阶段。这引起第一样品的磁化强度降低。此时，第一样品的温度下降，这是由于上述在第一循环的第一步骤中描述的磁热效应的反向所导致的。当第一样品内的磁畴开始彼此不对齐并且变得随机取向时，第一样品内的有序度降低，第一样品内产生熵的增加。这个增加由第一样品中出现的热能来补偿。

图 1 所示的曲线 $H=0$ 描述了在不存在施加的磁场的情况下维斯方程（上面给出）表示的磁化强度与温度之间的关系。曲线 $H=0$ 形式上类似于上述曲线 $h>0$ ，但是曲线 $H=0$ 相对图曲线 $H>0$ 在图 1 的温度轴上向左移动。当第一样品的磁化强度和温度坐标系到达曲线 $H=0$ 时，第一样品的磁化强度和温度坐标系将跟随曲线 $H=0$ ，并且这标示出第一循环的第三阶段的末端。在第三阶段期间热能的降低把第一样品冷却到低于第一样品的居里温度的温度。当第一样品降低到其居里温度以下时，其被磁化。

第一循环的第四阶段包括根据零场维斯定律对第一样品退磁和加热，并且在第四阶段末尾，第一样品具有与第一阶段开始之前相同的磁化强度和温度坐标系，即具有零磁化强度并且处于周围温度。在第四阶段期间第一样品的退磁产生独立磁通。

独立通量的必要条件是持续外场。附录 1 包含表明在循环中附属通量总是导致零纯电功的证据。附录 1 还包含表明如果外场的转换速率低则独立通量可呈现为附属的证据。

附录 2 中的等式 A2.7 可再模型化来从等式 A3.1 增加附录 3 中带来的新的能量项. 但是, 必须考虑特定量, 使得作为每一单位体积的偶极矩的偶极矩 I 可被重塑, 该偶极矩等于螺线电流密度乘以横截面面积。

这样, 从 A3.3

$$I = BA \epsilon_0 c^2 \text{ 和 } BA = I / \epsilon_0 c^2$$

表达式 BA 替代 Φ 代入 A3.2 并且代入 A3.1 而导出:

$$\Delta U = \frac{n}{\epsilon_0^2 c^4} \frac{k}{R} IdI$$

然后将其代入等式 A2.7 而导出:

$$dU = TdS + HdI + \frac{n}{\epsilon_0^2 c^4} \frac{k}{R} IdI$$

等式 A2.7 中如附录 2 中所示例行处理得到:

$$(\Delta T)_S = - \frac{T}{c_H + \frac{n}{\epsilon_0^2 c^4} \frac{k}{R} T \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_H^2} \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_H \Delta H$$

这样, 由于在分母中额外的项与 c_H 相加导致在第一循环的阶段 4 上存在“虚拟热容”, 偶极子更难以在其周围的螺线管场中随机分布。考虑绝热循环中的纯电功:

$$\oint HdI = \int_0^{I_M} HdI + \int_{I_M}^0 HdI = 0$$

但是, 在动态热循环的第二积分中, 丧失对称性:

$$\int_0^{I_M} HdI + \int_{I_M}^0 H' dI < 0$$

对于与绝热情况相同的 ΔT , 热容因“虚拟热容”而改变。这样, ΔH 不相同, 因为热容上升, 其必须更高来维持均等。这在第二积分中用 H' 表示。尽管一共通过两个半热循环: 第一积分是在绝热磁热循环的第一半上输入的能量, 第二积分代表来自具有更高热容的更高磁化强度的样品的

循环的第二半。这可推理为因为在第一循环的第四阶段，磁热效应不必要“知道”或“记忆”在前面的阶段它被许可等温冷却到周围温度。动态热等式不保持它们经历的变化变“历史”。重要的是在循环开始和结束处的准确的差分、热动态恒等式 A2.7 的热动态坐标系，即：

$$\text{if } dU(T, H) = \delta Q + \delta W$$

$$\text{and } \oint dU = 0$$

$$\text{then if } \delta W < 0 \Rightarrow \delta Q > 0$$

第一样品返回其初始坐标系并且从而具有相同的内能。但是，第一样品做了功，必须吸收热。

图 3 表示样品 1、功率线圈 2、场发生设备 3、整流器 4、循环系统和热交换流体 5、泵 6 以及热交换器 7 的实际布置。样品 1 不必局限在功率线圈下面并且在本发明的一些实施例中可与热交换流体一起运动，但是在功率线圈 2 和场产生设备 3 下面转换功率。

图 4 表示用与样品紧密接触的热导管 8 取代的循环系统。功率产生线圈 2 通过适当电路可加倍，作为场产生设备 3（或激励线圈）。场产生设备通过旋转磁体可不产生电场。

激励/功率线圈 2 或包围样品 1 的场产生设备 3 以第一循环所示的方式控制，以在样品 1 中形成独立通量。第一循环每秒进行多次。一加热，这个独立通量丧失，并且功率传送到功率线圈 2、整流器 4 和负载。热能继续由循环系统 5, 6, 7 或 8 提供给样品。从而设备冷却其周围。

第一循环的电耗和增益在这里被模型化并且表示出随着循环的操作频率增加。计算电阻损耗、不完全恢复激励级（第一循环的阶段 1, 2 和 3）的场能量导致的损耗以及循环产生的功率。

为简单起见，假设电流恒定。无论如何，这将趋向于过高估计功率损耗。在激励阶段损失的功率 P_{I2R} 乘以 D （方波的通断周期的断续循环），

这与频率无关。从而：

$$P_{I^2R} = -DI^2R_{coil}$$

B_E 是施加于磁芯的磁场。场的能量是 $1/2 B_E^2 V$ ，其中 V 是磁芯体积。如果在场丧失时恢复反电动势，则一些能量可被恢复。 ξ 是浪费的能量的分数，如果循环每秒重复 F 次：

$$P_{field} = -\xi \epsilon_0 C^2 B_E^2 F V$$

从附录 3，由循环传递到电阻 R 的功率由下式给出：

$$\text{最小功率} = -\frac{n^2 k}{R} V^2 B^2 F^2 \quad \text{等式 A3.6}$$

R 是 $R_{coil} + R_{load}$ 。通过考虑串联 2 个电阻器并使用基本电路理论，在电阻器中散失的功率作为所散失功率的分数为 $R_x / (R_1 + R_2)$ ，其中 R_x 是电阻器 1 或 2。 B_M 是激励器停止后来自磁芯的场。因此

$$P_{loss} = -kn^2 V^2 B_M^2 F^2 \frac{R_{coil}}{(R_{coil} + R_{load})^2}$$

$$P_{gain} = +kn^2 V^2 B_M^2 F^2 \frac{R_{coil}}{(R_{coil} + R_{load})^2}$$

总功率是 $P_{I^2R} + P_{field} + P_{loss} + P_{gain}$ 的总和。如果为正，则有净功率产生。注意到产生的最小功率相对线性场损耗是 F 的平方。使得 R_{coil} 远小于 R_{load} 仅仅是工程问题。

图 2 表示实施本发明的第二循环的磁化强度与温度的曲线。在第二循环的第一阶段开始之前，第二样品具有零净磁化强度，并且处于环境温度下。第二样品由在对材料施加磁场并且随后移去磁场后具有暂时维持剩磁性能的材料构成，例如铁磁流体。

第二循环的第一阶段通过突然向第二样品施加磁场开始，这引起第二样品的磁化强度增加。与第一循环的第一阶段相比，由于初始温度远离第二样品的铁磁相变点，因此因第二样品被磁化，出现非常小的对应的温升。

通过突然从第二样品移去施加磁场来结束第二循环的第一阶段，这个事件是第二循环的第二阶段。

第二循环的第三阶段在从第二样品移去施加磁场后立刻开始。在第三阶段的第一部分期间，第二样品的温度开始下降，因为第二样品内的热能花费在应付其中的剩磁引起的磁场而在第二样品中重新随机布置磁畴的工作中。

在第三阶段的第一部分开始期间，当磁化强度最高时，第二样品在其第三阶段期间的温度降低初始最大。温度的下降伴随第二样品的磁化强度降低，因为其中的磁畴越来越彼此不对齐。

在一段短时间后，来自周围的热量加热样品，并且第三阶段的第二部分开始。同时，第二样品内的磁畴变得随机取向，并且这提供独立的磁通，作为磁畴对齐的丧失引起的磁场。在第三阶段末尾处，第二样品的磁化强度和温度坐标系与第二循环的第一阶段开始前的相等。与磁化强度降低一起的温升导致第二样品的磁化曲线为环状。对于第三阶段的第二部分期间产生的可估计的磁通，第一阶段最好发生在第二循环的 1/10（或更小）的期间内。

用于在第二循环的第一阶段期间产生场并在第二循环的第三阶段期间从独立磁通恢复功率的组件与第一循环中用于相应的任务的那些组件相同，并且对于熟悉本领域的技术人员而言，显然知道怎样实际应用第二循环。

下面列出的是在第一和第二循环中可能遇到的一些技术问题，并表示其解决方案：

问题	解决方案
低导磁率的样品 1 意味要求更大的激励磁场，因此在激励电流上花费更多能量	使用非常接近样品 1 的高导磁率材料 13

样品 1 具有小的磁化强度	同上
很小的温度差分	● 增加样品表面面积 ● 使用薄膜和/或小粒子 ● 具有与工作物质紧密接触的循环液 5 或热导管 8
每一循环增大能量增益	● 每秒循环数千次 ● 低电阻导线 ● 使用低压降二极管，例如肖特基或反向二极管 ● 高通量泄漏，例如环状 ● 低损耗高导磁率材料 ● 通过薄部分把涡流损耗降低到最小
激励场中消耗大能量	● 通过“逆变器”电路补偿激励场能量 ● 热源电流源驱动激励线圈 2 加热换热器 7 或 ● 调谐的 LC 电路
设备具有大电感，我们不能用电压源快速切换或不能允许激励场迅速丧失	● 使用升压变压器驱动激励线圈 ● 使用较低的自耦变压器抽头将低电感的激励器/功率线圈 2 置于循环的功率传递相或 ● 把大电感旁路到激励线圈或 ● 用电流源切换激励场
不绝对地仅响应于第一循环的差分变化（图 1），否则高导磁率材料将饱和（设备将具有跨越它的温降）	● 使用热导管 8 来确保从设备一端到另一端的温度相同 ● 使用场消除电路和/或 ● 使用具有“静带”的高导磁率材料
铁电流体弛豫时间太快	● 增大磁芯尺寸或 ● 增大流体的半径 ● 增大载体流体的粘度

通过可全部集成到一个设备中的例子将问题分解为子系统：

- 场发生，激励器/功率输出子系统
- 场消除电路
- 热交换/循环系统
- 材料和用高导磁率材料增大的场
- 铁磁流体的粘度改变
- 热电池
- 非磁场激励模式
- 铁电和铁电流体模式

场发生，激励器/功率输出子系统

转向图 3，场产生设备 3 可以是电或机械的，可能的机械模式是在定子装置（如图 5 所示）中的旋转磁体（最后由设备产生的功率供电）。磁体 9 与磁极 10 对齐时，将最大通量传递到样品 1。如附录 1 所示，与周期相比，这个通量必须具有相对尖锐的上升和下降时间，这通过设计尖锐的磁极来实现。

图 6 和图 7 表示用调谐电路（如图 6 所示）和电流源（如图 7 所示）产生的电场的简图，场产生设备 3（如图 3 所示）与功率产生线圈 2 组合。

图 6 所示的电路 11 产生大的正弦场并且向负载传递独立磁通消耗的功率。为实现激励场的尖锐的上升和下降时间，接近样品 1 处使用高导磁率材料 13。

电路 12（图 6 所示）是场消除电路，其确保暴露到工作物质的场在零与正的净通量之间变化。图 7 所示电路通过用电流源 14 驱动本质上高电感的设备来实现尖锐的上升和下降时间。为补偿电流源中的散失损耗，应将其连接于热交换器 7。

图 8 表示建立激励场的强力方法。子电路 15 由连接于低电阻电路中

的功率/场发生线圈 2, 3 的下部匝的非常大的电容构成。电感低, 允许电流并且从而允许场快速建立。更高的抽头经二极管将场能量和功率从独立通量损耗返回到电容器和负载。

图 9 表示使用低电流产生激励场的更好的模式。缠绕更多匝, 使得电感增加, 但是把升压变压器用于把电感从初级侧降低 L/n^2 。确保在场损耗上通过经用于场的附属部件的转换器 A (B 打开) 并且然后使用用于独立通量的转换器 B (A 打开), 仅用几匝分接激励/功率发生线圈而实现低的时间常数。对此可使用分立的线圈, 该线圈实际上是围绕设备缠绕几次的柱状薄片, 以得到良好的通量连接和感应电压。二极管是下跳开型, 如肖特基二极管、反向二极管或带有适当的切换以确保整流作用的场效应晶体管。

可作精心设计以大于 99% 的效率缠绕高频升压变压器。更大的场能量补偿设备, 得到更紧凑的设备。在产生的功率上在理论部分中在 P_{field} 项与最小功率表达式之间建立平衡。典型的工作频率是 10-500KHz。通过转换电子元件来设置更高的界限, 并且设备的一般的体积超出 10 升。设备的大电感 (在亨利数量级) 可通过多级变压器来降低, 以处于微亨的数量级, 并且从而允许经电压源快速转换。例如, 以 1: 10 制造的三级 1: 1000 变压器将阻抗降低 10^6 。以环形形式 (高通量连接) 使用铁氧体磁芯、在磁芯中使用低通量密度、使用低导线损耗和分布式/巢状低电容绕组从而绕组通过间隔物彼此隔离的精细设计能够构成该变压器。

产生快速改变的激励场的另一模式 (图 10 所示) 是将在大电感 17 (在 19 的左边) 中已经建立的电流切换器 19 (转换器 18 打开) 到更小电感的场线圈 2, 3 (19 的右侧)。对于变压器来说, 大电感应具有良好的高频性能和前面讨论的方法。当独立通量丧失转换器 18 闭合并且 19 到左边时, 场能量和独立通量功传送到电路的剩余部分。

如果未明确表示, 向降低时间常数的场损失上低电感的激励/功率发

生线圈 2, 3 的转换被应用于场发生电路的所有表现形式中。

场消除电路

转向图 11, 这个过程可应用于第一循环。如所理解的那样, 当高导磁率材料用于增大来自工作物质的场时, 循环实际上响应于第一循环上第四阶段中磁化强度的改变, 而不是响应于绝对磁化强度。图 1 表示在样品 1 的居里温度处或以上返回第一阶段。为允许在居里温度以下工作并且从而有更宽的温度范围, 我们必须不允许这种“基本剩磁”饱和高导磁率材料。而且, 设备以工作物质处于不同磁化强度而从头到尾在其两端具有温差。对此的解决方案是使用具有极高导热性的热导管 8 (图 4 所示) 降低该温差。

与基本剩磁相反的微弱场对高导磁率材料提供“零电平”。有两种方法来提供该场: 再利用场/功率线圈 2, 3 以及向其增加偏置电流电路 12, 或者缠绕附加线圈。

有两种对场消除装置产生控制信号的方法: 用霍尔传感器测量场或检测功率输出, 并且当其降低时增大相反场。两个信号都被低通滤波。图 11 表示一般方案, 传感器用场消除装置被输入到紧耦合的负反馈环路。图 11 还表示经设备缠绕在热交换流体 5 的流动检测中具有场强逐渐增大的消除线圈 14 的可能性。这许可设备两端有温差, 其中与液流输入侧 (较暖的一侧) 相比, 在液流输出侧 (冷侧) 有更高的基本磁化强度。

热交换/循环系统

图 3 和 4 表示与样品 1 紧密接触的循环流体 5 浴或热导管 8。流体 5 是惰性的并且具有良好的热容量和传输特性。这种流体的一个例子是 Dow Corning 制造的低百分数的 200/IcS 聚二甲基二氧烷硅流体, 工作物质应对水起反应。如果样品未局限在线圈下面, 其可在流体中悬置。下面一部分覆盖这一点 (作为一个方法) 并且铁电流体是与流体 5 一起的工作物质

的一种表现形式。

为确保快速加热流体，必须使工作物质具有大的表面积，这一点在下面说明。流体 5 有助于通过具有局部热源将热快速流动到样品 1。可在靠近工作物质的工作点的其熔点处把材料包裹微囊，使得有局部的热储存器。通过普通方法可把脂肪和媒质加权烷类包裹囊。

许可高热量流动的另一方法是使用具有大于铜数千倍的导热性的热导管。与工作物质紧密接触的大面积的细小热导管可布置为高导磁率场增大材料的一部分，并且在下面一部分中将涉及到。高导磁率材料可铸成细管，其内部是热导管，外表面与工作物质接触。如果设备的工作温度被保持低于周围温度，则热交换器设计很少需要。

材料和高导磁率材料增大的场

带有高磁熵和第一循环的适当温度范围的适当材料是 Gd(居里点 16°C)、Cu-Ni 合金 ($20-50^{\circ}\text{C}$, 分别是 28-34%Cu, 一般是 1-2Fe%) 或其居里点根据应用的极端情况而更高或更低的材料。熟悉本领域的技术人员将认识到很多适当材料。这种材料通过将磁化易轴对齐(通过拉伸)而形成具有高各向异性或高形状各向异性。适合于第二循环的材料是 Fe、Co 或铁氧体基铁磁流体。粒子各向异性越高铁磁流体维持的电感越大。因此 Co 和铁氧体铁磁流体产生高电感。改变铁磁流体粒子的形状来增大形状各向异性也是有帮助的。

高导磁率材料实现两个功能：集中激励磁场和增大工作物质的磁化强度(尤其是第一循环)。在前者的情况下，集中的更多的通量意味着更小的通量浪费在不靠近样品的空间中。最终我们要恢复场能来具有紧凑设备，并且在不产生能量的非样品材料周围浪费激励场也无关紧要。在后者的情况下，增大受到样品的各向异性常数限制。高导磁率材料的场能不应超出样品的当量“各向异性场能”，否则，它将分解磁畴而降低静磁能。

一般的各向异性场具有 10kA/m 的数量级，将高导磁率体积限制到工作物质的体积的大约 10 倍。各向异性场可通过“样品各向异性场”并通过使得工作物质长且细来加强。但是这种长形材料的当量偶极子表示具有远离开偶极子，从而很少使场从边缘进入高导磁率材料，那么我们必须使用更高导磁率材料。相关的设计标准在下面表示：

典型的晶体 (k1) 各向异性/(kA/m)：Gd 50, CuNi 合金 30, Co 60 (铁磁流体)

形状各向异性场 H_c 有下式给出：

$$H_c = (D_z - D_x) M_s$$

其中， M_s 是饱和磁化强度，退磁因子如图 23 所示。图 23 表示扁平椭圆旋转中形状各向异性，作为轴比 a/b 的函数表示出两个主要退磁因子之差 $D_z - D_x$ 的变化。

在使用磁热材料的第一循环中形状各向异性被视为作用不大，因为磁化强度无论如何都很低，主要依赖 k_1 各向异性。产生大磁化强度的铁电流体不作考虑。

下面的偶极子方程中：

$$B_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2p_m}{r^3} \cos\theta$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_m}{r^3} \sin\theta$$

$$p_m = m l$$

表示出场的角向和径向分量。磁偶极矩是极强度与其分开距离的乘积。

图 12-17 以样品 1 表示高导磁率材料 13 的各种布置。材料 13 具有小横截面，以便具有低涡流损耗。适当的材料包括 Fe、Ni、Ni-Fe 高导磁率合金、铁氧体、vitrovac (西门子公司)。各种情况在下面说明。

图 12 表示可两次重叠作为热导管的小管的布置。可使用无电极淀积来

在尼龙导线上淀积铁或镍。导线可被加热来脱掉尼龙，留下高导磁率管 12。对于适合于第一循环使用的材料，通过后面跟着粘结处理的进一步无电极淀积、电镀、蒸汽淀积、喷雾或静电淀积来进行工作物质 1 的再淀积。

图 13 表示作为具有本体和支架的并可通过刚才描述的淀积方法淀积工作物质（对于第一循环，铁磁流体将流入其结构中）的松散“羊毛”模型或织机高导磁率材料的布置。热交换流体 5（如图 3 所示）容易通过该结构。导线织机形式通过用工作物质（如果是延展性的，则为 Cu-Ni, Gd）包覆铁或镍棒，然后拉伸易于制备。

图 14 表示作为松散螺旋的高导磁率材料的布置，这个结构易于将工作物质热压其上。

图 15 表示另一三明治结构的高导磁率材料，其中有孔 20，使得热交换流体 5 流过或热导管 8 通过（如图 3 或 4 所示）。

图 16A 与图 16B 表示作为工作物质 1 或 13 的 1 上的高导磁率材料 13 的细长实体 21 的布置。对于第二循环，刚好有材料 13。这些实体在分散时随着热交换流体 5 的流动自行对齐，并且使得在预计的方向上产生最大场。激励场的偶然的长脉冲串也有助于对齐实体。制造方法包括无电极淀积、电镀、导线上蒸汽淀积、在导线上包覆并拉伸、喷雾或静电淀积，生长然后化学处理（Cu-Ni 合金包围 Ni 导线），以及通过热处理或其他处理纯净相（例如 Cu-Ni 合金中的 Ni）析出。

图 17 表示在用图 15 所示的循环孔 20 钻出的实线框中对齐的图 16A 与图 16B 的细长实体 21 的布置。实体周围生长非磁性非导电材料 22，以防止通量闭合和涡流损耗。材料 22 通过这里讨论的方法生长。大量实体可被压实或烧结或进行化学粘结，以形成块。

要被破坏的独立通量的弛豫时间是第一循环的铁磁流体（下面讨论）的一个特性，材料尺寸由傅立叶热扩散方程控制。将粒子返回到其周围温

度的时间由简单一维傅立叶定律模型化并且为得到近似尺寸,经验性得到剩余部分。

这样:

$$mc\Delta\theta = kA \frac{dT}{dx} t_r$$

其中:

m 是质量;

C 是特定热容量;

$\Delta \theta$ 是温差;

k 是热导率;

A 是热交换面积;

dt/dx 是温度的空间变化率;

t_r 是处理占用的时间。

把粒子模型化为半径 r、长 h 的长圆柱。对于 $h \gg r$, 则体积对面积的比率是 $r/2$ 。设 ρ 为材料密度。则:

$$t_r = \frac{\rho r c \Delta \theta}{2k \frac{dT}{dx}}$$

一般平均数字进行取代, 将给出 t_r 的“大约”数字。对于 $10 \mu m$ 数量级的尺寸达到大约 $10 \mu s$ 的数字。

铁磁流体的粘度改变

在第二循环中铁磁流体用作样品。如附录 1 所解释, 如果设备有一净能量增益, 则来自样品的电感必须是独立的。电转换的转换速率受限, 用功率电子元件, 则具有通常的 1MHz 的上限。因此铁磁流体的剩磁弛豫时间必须是 $10 \mu s$ 或更多。为改变的铁磁流体具有 100 微微秒或更快的数量级的弛豫时间。这通过下面的 3 个方法将响应降低几个数量级来实现: 增大磁芯尺寸、通过改变表面活性剂的大小来增大流体动半径或添加粘性增

强剂。然后执行处理来去除弛豫时间的大部分传播，并且保持在预计的弛豫时间的相对窄的窗口中。

热电池

参考图 3 和 4，将热交换器与高热容量和温度的系统相接来形成热电池。这个系统可以是存储箱或提供混合操作从而燃烧燃料来发电的小炉子。从而，可制造“应要求的单元”，其中用低速率的热传输从源向设备作箱“涓流充电”允许更大热流。

非磁性场激励模式

图 18 表示作为第一循环的变形的第三循环，其中静电场与当以某方式施加应力时进行二级相变的伴随材料（是液晶或类似材料）联合使用。另一例子是进行机械拉伸的长链聚合物材料。

第三循环中的热循环方式是向伴随材料施加应力（场、拉伸等），使得在第三循环的第一阶段期间通过二级相变加热。然后伴随材料在有场存在的情况下冷却到周围温度，这个冷却包括第三循环的第二阶段。然后在第三循环的第三阶段断开场，因反向处理使得伴随材料降低到周围温度以下，通过该处理二级相变期间加热。最终，在第三循环的第四阶段期间，伴随材料返回其原始温度。以这种方式，伴随材料循环第三样品。

在第三循环的第四阶段期间，产生独立通量，该通量随着温度上升到周围温度而被破坏。应用前面所有的布置材料（高表面积、通过高导磁率材料增大的场、热传输和循环方法）的方法。

图 21 表示一种布置，使得可循环静电场产生设备（3）（其板之间带有伴随材料、工作物质和热交换流体（5）或热导管 8 的电容器）。一闭合开关 25（其他都打开），大电容器 23 把场产生设备 3 的较小电容增大到相同电压。激励场经开关 26 被放电到电容器网络 24 中。然后电容器网络 24 经开关 27 被放电回到大电容器 23 来重新开始循环。通过这个方法，

场能被补偿。第三样品的磁化强度改变通过图 3 和 4 所示的功率线圈 2 检测到。图 22 表示电容器网络 24 能够将大部分电荷返回大电容器 23 的布置和装置。当场产生设备 3 放电到 24，所有开关 27 闭合，并且开关 26 被切换到底座，使得电容器 25 并联。一放电回到大电容器 23，开关 27 被打开并且开关 26 被切换，使得电容器 25 串联。超出 10KV/m 的并且上述循环频率的场足以极化伴随材料并且确保设备操作。

图 19 和 20 所示的第四和第五循环是第一和第二循环的静电模拟。很快通过对第一和第二循环的磁化的模拟理解到极化如何随着温度和施加的场而改变。

在第四循环的第一阶段期间，初始具有零净极化并且处于周围温度（在其铁电转变温度以上）的第四样品通过应用外部电场而被改变。因为热电效应（类似于这里作了具体描述的磁热效应），第四样品在第一阶段期间加热到周围温度以上的温度。

一旦第四样品的极化改变率降低到零，第四样品因为与包围其的周围环境进行热交换而冷却到周围温度。这个冷却包括第四循环的第二阶段。第四样品的极化随着其冷却而增大，遵从相对第一循环在上面说明的“有场”的维斯定律（以 $E>0$ 表示）的电平衡。

一旦第四样品达到周围温度，电场被断开，并且第四样品开始去极化，其温度因反向的电热效应而在去极化期间降低。该处理包括第四循环的第三阶段，并且第三阶段在第四样品的极化和温度坐标系达到以“零场”维斯定律（以 $E=0$ 表示）的电平衡代表的曲线时结束。在第三阶段末尾处，第四样品处于其铁电转变温度之下。

然后第四样品完全去极化，随之，加热到周围温度。这个完全去极化引起独立电通量。

转向第五循环，其类似于第二循环，呈现出暂时剩电的第五样品在开

始第五循环之前处于初始温度。第五循环的第一阶段通过突然向第五样品施加外部电场开始。一旦第五样品被极化，这该极化发生在第五循环的整个期间的十分之一内，电场断开，这个事件是第五循环的第二阶段。

第五样品在第五循环的第三阶段期间去极化，其非常类似于上述第二循环的第三阶段。考虑第五样品时思想上认识到的差别是：正是第五样品内的电偶极子而不是磁畴被对齐并且随后被随机分布。

第四循环的第四阶段和第五循环的第三阶段的变化电场引起磁场直角改变到电场。变化的磁场由与电场成直角设置的功率产生线圈检测到，以把功率传递到负载。一种合适的材料是钛酸钡 (BaTiO_3)。应用前面所有的材料布置方法（高表面积，热传输和循环方法）。第四循环随着刚好维持在第四循环中使用的样品的铁电相变点以上的周围温度产生，并且熟悉本领域的技术人员显然理解第一和第二循环的操作可分别用于第四和第五循环，以加深对其理解。

在本说明书中，“包括”意味着“包括或由…构成”，并且“包括…的”意味着“包括或由…构成”。

前面的说明或下面的权利要求或附图中公开的特征以其特定的形式或根据执行公开的功能的装置或达到公开的结果的方法或处理来表达，合适的话，可独立地或组合这些特征来使用，以按各种形式实现本发明。

附录 1—附属通量总是在循环中导致零纯电功的证据

考虑电感作为某电路元件，循环的净能量由下式给出：

$$\int_{\tau} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{i} = - \int_{\tau} \frac{d\phi}{dt} \cdot d\mathbf{i} \quad \text{等式 A1.1}$$

RHS 可以被分量积分：

$$\int_0^T i(t) \frac{d\phi(t)}{dt} dt = \left[i(t)\phi(t) - \int \phi(t) \frac{di(t)}{dt} dt \right]_0^T = i(T)\phi(T) - i(0)\phi(0) - F(\phi(T), i(T)) + F(\phi(0), i(0))$$

等式 A1.2

由于 $i(0)=i(T)$ 并且 $\phi(0)=\phi(T)$ ，第一个两项抵消，设：

$$i(t)=g(\phi(t)) \quad \text{等式 A1.3}$$

即附属通量，则等式 A2.2 的第二积分在应用链式法则(chain rule)后再次可通过分量积分：

$$\int \phi(t) \frac{di(t)}{dt} dt = \int \phi(t) \frac{dg(\phi(t))}{d\phi(t)} \frac{d\phi(t)}{dt} dt \quad \text{等式 A1.4}$$

这样，

$$\int_0^T \phi(t) \frac{dg(\phi(t))}{d\phi(t)} d\phi(t) = \left[\phi(t)g(\phi(t)) - \int g(\phi(t)) \cdot l \cdot d\phi(t) \right]_0^T = G(\phi(0)) - G(\phi(T)) = 0$$

等式 A1.5

RHS 的第一项因通量与循环的开始和末尾处相同而抵消。RHS 上的被积函数由于同样原因抵消。

Q. E. D.

如果转换率低，独立通量如何变为附属通量

考虑图 3 和 4 所示的激励电路。转向图 24，在时间轴上表示为相同刻度的是激励线圈的电流（I），以及样品的电感（B）。表示出无限转换的电流，并且因此，向断开点的右侧衰减的电感是独立的。但是，如果电子组件慢，图 25 所示的情况占优，其中 B 场部分不是独立的并且因此在超出其输入时不能做功。

附录 2：磁热效应、铁磁和顺磁的背景

铁磁材料的特征在于几个性能：大于 1 个单位的相对导磁率，自发磁化，相对入射场描绘电感—从而磁畴时磁滞并且所谓的居里点温度以上材料仅仅是顺磁。正是这个向顺磁状态的相变用于将热转变为电。但是，首先，讨论自发磁化如何随温度改变。在铁磁材料的一个磁畴内，通过维斯方程 A2.1 很好地将饱和磁化模型化。方程 A2.2 是布里渊函数。方程 A2.3

是方程 A2.1 预测的平均自旋对全部自旋的比率。H 是施加的场， α 是与样品原子之间的交换作用相关的所谓的“分子场”。

$$\mu = Bs(h + \alpha\mu) \quad \text{等式 A2.1}$$

$$Bs = \frac{2S+1}{S} \coth\left(\frac{2S+1}{S}x\right) - \frac{1}{2S} \coth\left(\frac{x}{2S}\right) \quad \text{等式 A2.2}$$

$$\mu = \frac{\langle S_z \rangle}{S} \quad \text{等式 A2.3}$$

$$h = \frac{g\mu_B SH}{k_B T} \quad \text{等式 A2.4}$$

$$\alpha(T) = \frac{2S^2}{K_B T} pJ \quad \text{等式 A2.5}$$

μ_B 是“玻尔磁控管”

$$\mu_B = \frac{|e|\hbar}{2m_e c} \quad \text{等式 A2.6}$$

其中：

g 是“朗德”或“光谱分割”因子；

e 是电荷量；

h 是除以 2π 的普朗克常数；

m_e 是电子质量；

c 是光速；

k_B 是玻尔兹曼常数 ‘

ρ 是晶格中最邻近的数目原子数；

J 是交换能量积分。

图 26 表示带有对它在零开氏度、开氏温度和相对居里温度 T_c 标准化的 T 得到的最大值标准化的 μ 的第一方程 ($h \rightarrow 0$) 的曲线。它表明自发磁化如何快速降低至接近居里点。

磁热效应

如果铁磁样品绝热暴露于磁场，其温度将升高，当去除场时，它将降回到原始温度。可如下进行模型化：

$$dU = TdS + HdI \quad \text{等式 A2.7}$$

其中 H 是磁场、I 是磁化强度。如果 S 和 H 作为独立变量，进行二次微分如下：

$$\frac{\partial^2 U}{\partial H \partial S} = \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S = - \left(\frac{\partial I}{\partial S} \right)_H = - \left(\frac{\partial T}{\partial S} \right)_H \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_H \quad \text{等式 A2.8}$$

通过定义，恒定场强下的热容量为：

$$c_H = \left(\frac{\delta Q}{\delta T} \right)_H = T \left(\frac{\delta S}{\delta T} \right)_H \quad \text{等式 A2.9}$$

与前面的等式组合：

$$c_H = -T \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_S \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_H$$

或

$$(\Delta T)_S = - \frac{T}{c_H} \left(\frac{\partial I}{\partial T} \right)_H \Delta H \quad \text{等式 A2.10}$$

如下面两个曲线所示，磁化强度的变化在居里点附近最大。图 27 中画出的是镍、铁的温升对样品温度（都是℃）的曲线。表示出的磁场（H）以奥斯特（Os）测量。

这些温度改变很小，但显然每秒钟重复数千次循环并且很多热量被转换为电能。

附录 3-场丧失的能源以及产生的电能强度

考虑线圈和电阻负载。经过线圈的是改变并启动流过负载 R 的电流 i 的独立通量 Φ 。这种布置可被模型化为通量是由电流 i 引起的磁场中的偶极子，该电流自身通过通量改变引起。磁芯能量的改变产生的通量为：

$$\Delta U_{core} = -\mu \cdot B \quad \text{等式 A3.1}$$

这里，如果通量从平行于螺线管轴改变到与其垂直，磁芯损耗能量。
改变的通量在螺线管中感应电流，导致 B 的表达式：

$$B = -\frac{n}{\epsilon_0 c^2} \frac{k}{R} nL \frac{d\phi}{dt} \quad \text{等式 A3.2}$$

其中：

n 是每单位长度的匝数；

L 是线圈长度；

k 是耦合系数 $1 \geq k \geq 0$ 。

磁芯也可被模型化为螺线管，恰好重叠在横截面面积 A、体积 V 的另一螺线管上。从第一定律论据（argument）看，来自这个螺线管的磁场必须恰好等于 B（上面）。

通过螺线管的电流密度为：

$$j = B \epsilon_0 c^2 \quad \text{等式 A3.3}$$

因此磁矩为：

$$\mu = \int_0^L j \cdot A dl = jV \quad \text{等式 A3.4}$$

因此在电阻器中散失的能量为：

$$\Delta U_R = B \epsilon_0 c^2 V \cdot \frac{n}{\epsilon_0 c^2} \frac{k}{R} nL \frac{d\phi}{dt} = \frac{n^2 k}{R} V^2 B \frac{dB}{dt} \quad \text{等式 A3.5}$$

如果动态热循环每秒钟完成 F 次，则 B 的改变率必须至少是 B 除以周期，从而：

$$\text{最小功率} = \frac{n^2 k}{R} V^2 B^2 F^2 \quad \text{等式 A3.6}$$

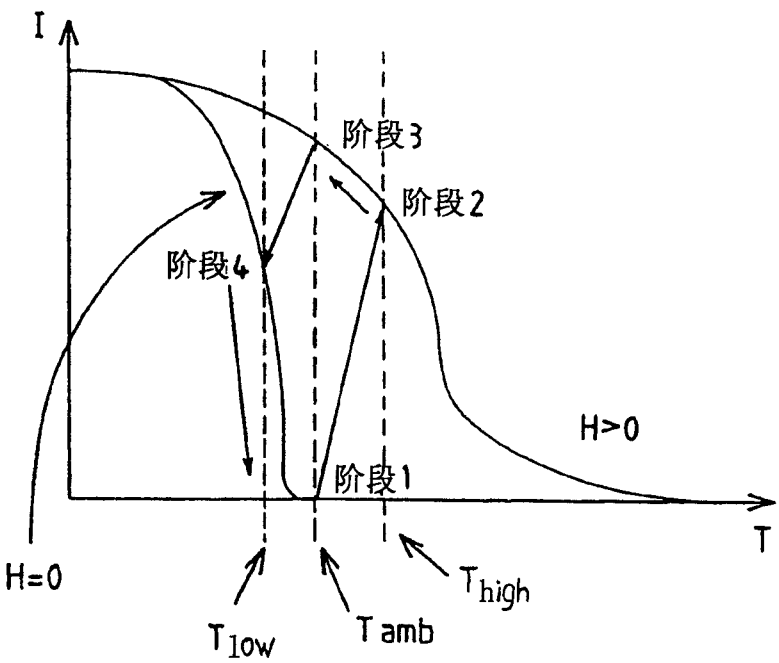


图1

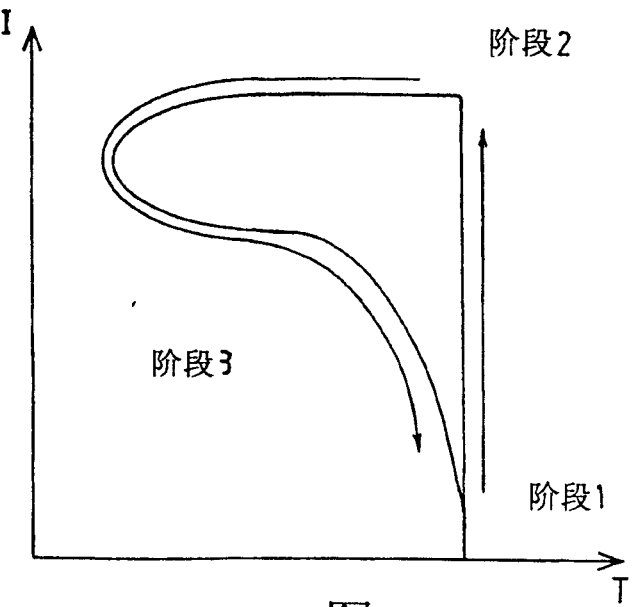


图2

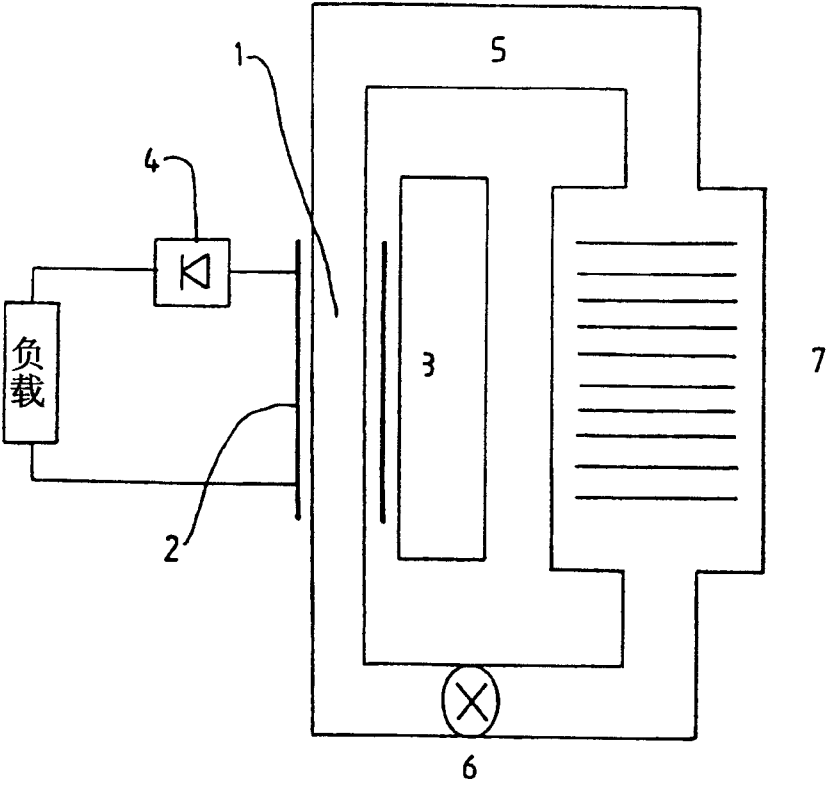


图3

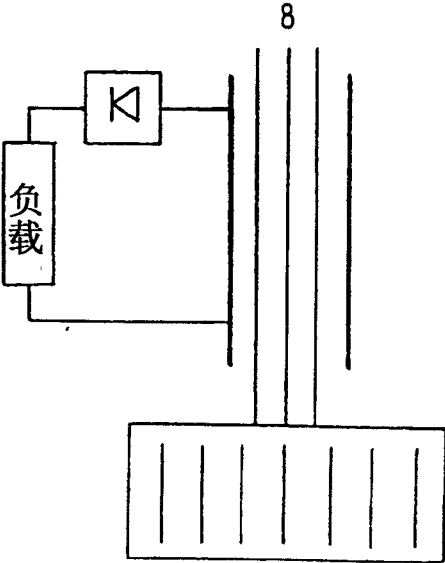


图4

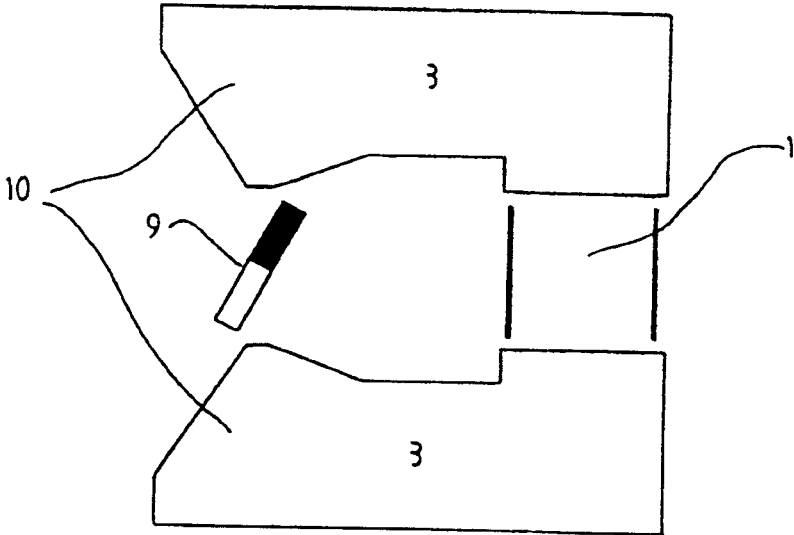


图5

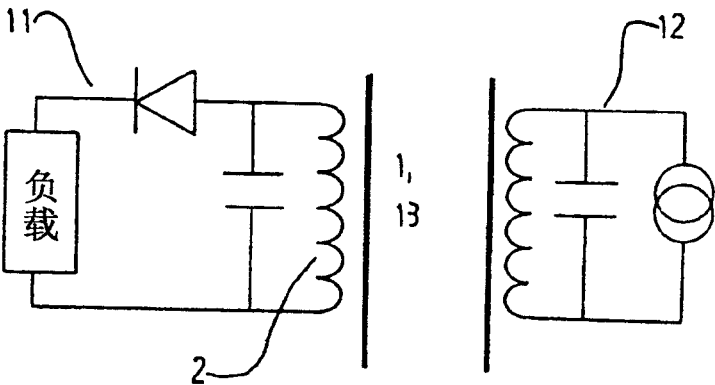


图6

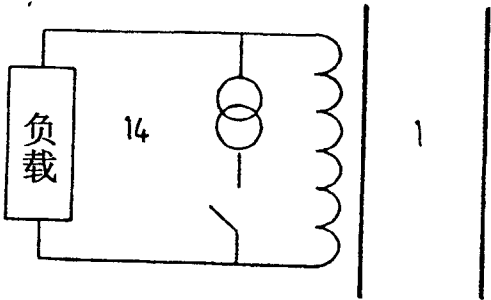


图7

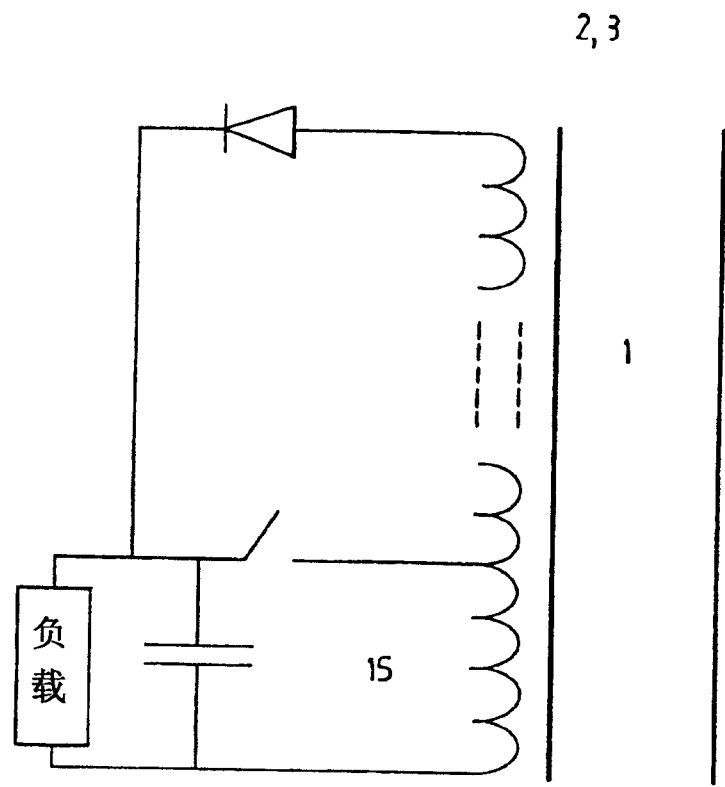


图8

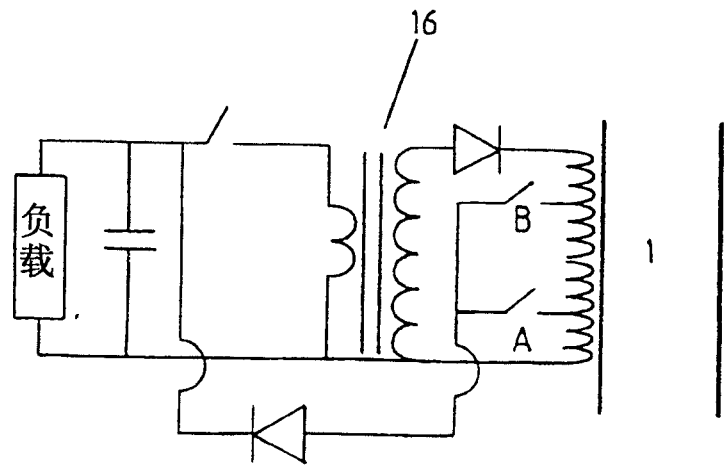


图9

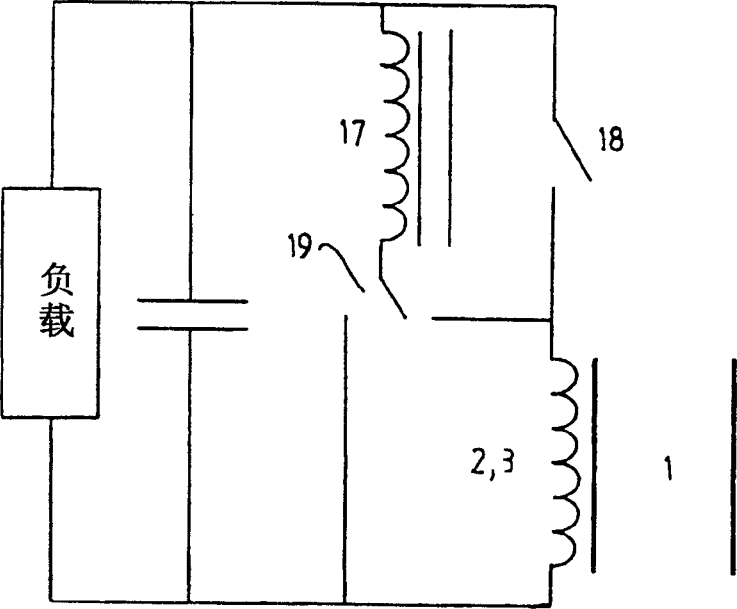


图10

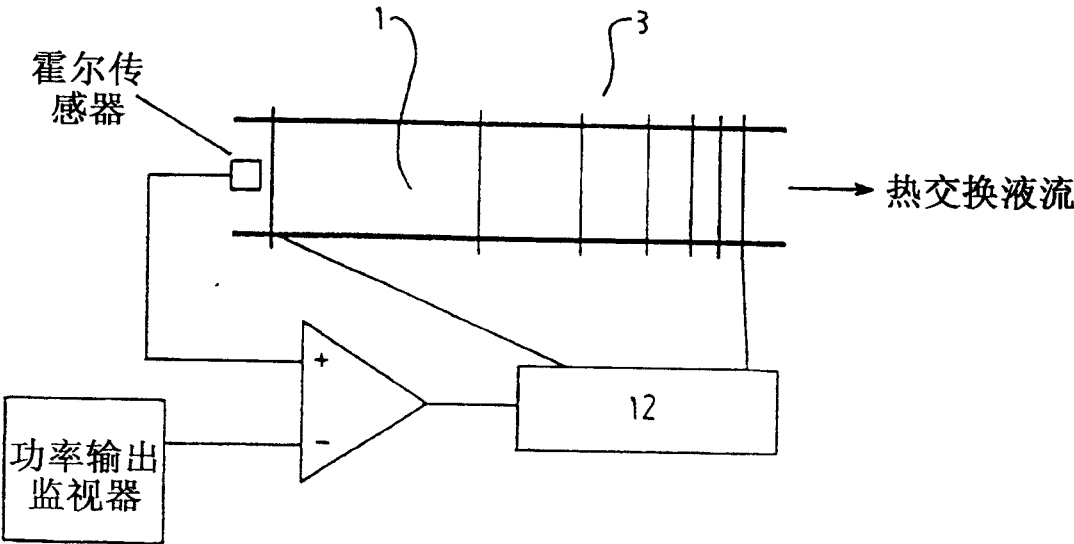


图11

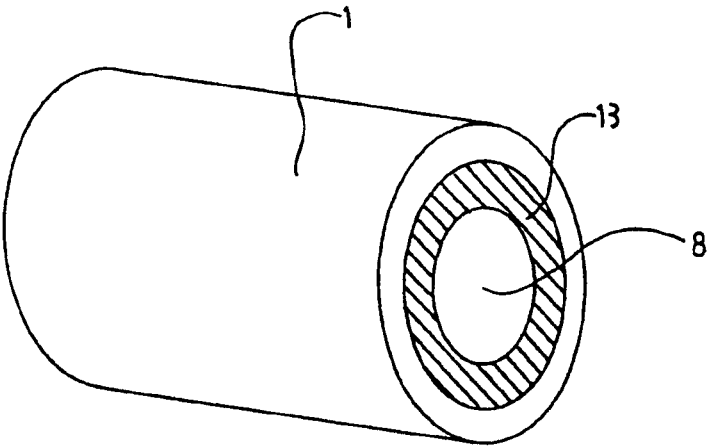


图12

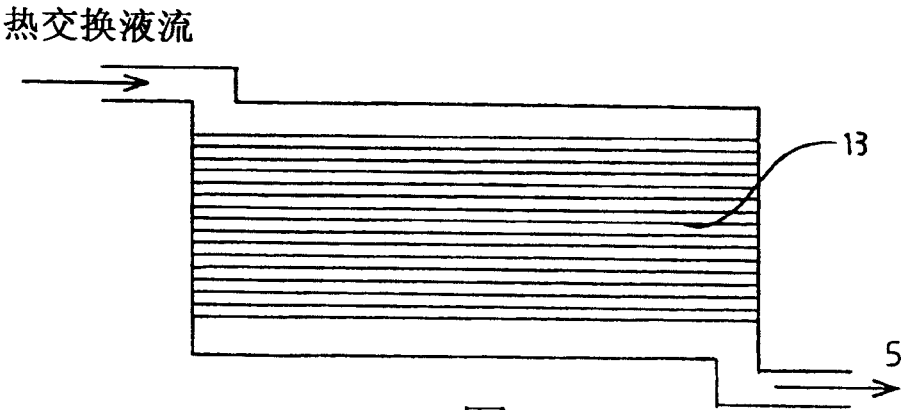


图13

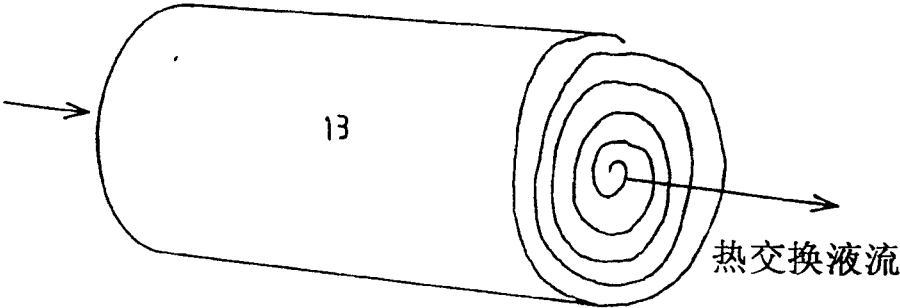


图14

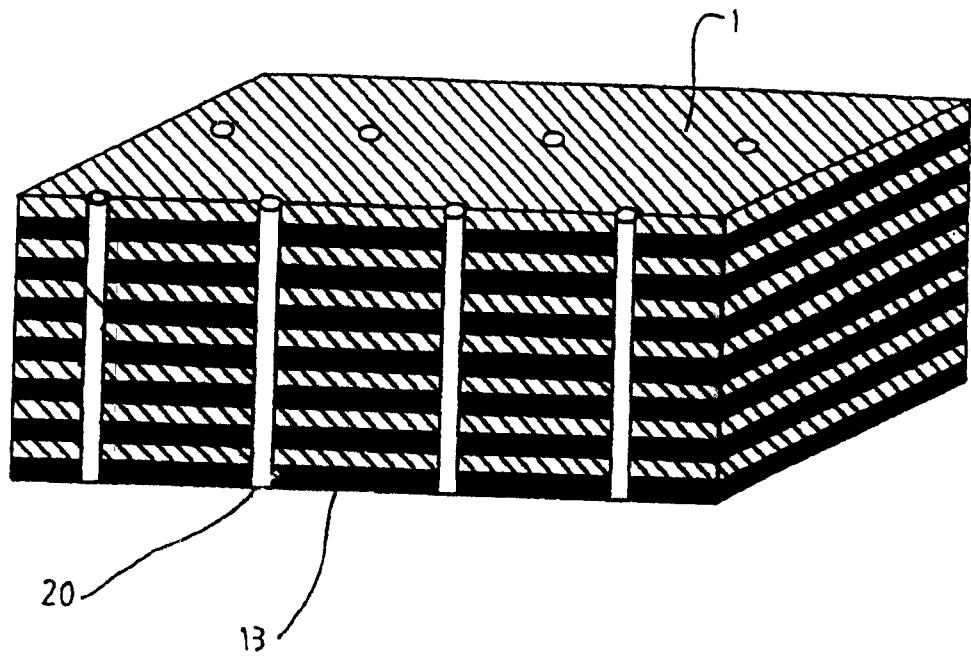


图 15

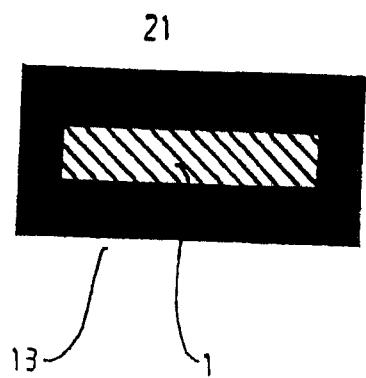


图 16A

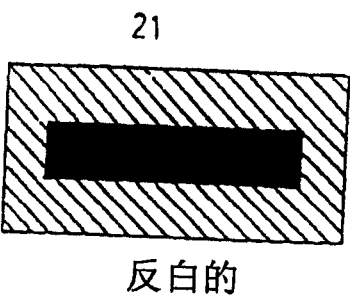


图 16B

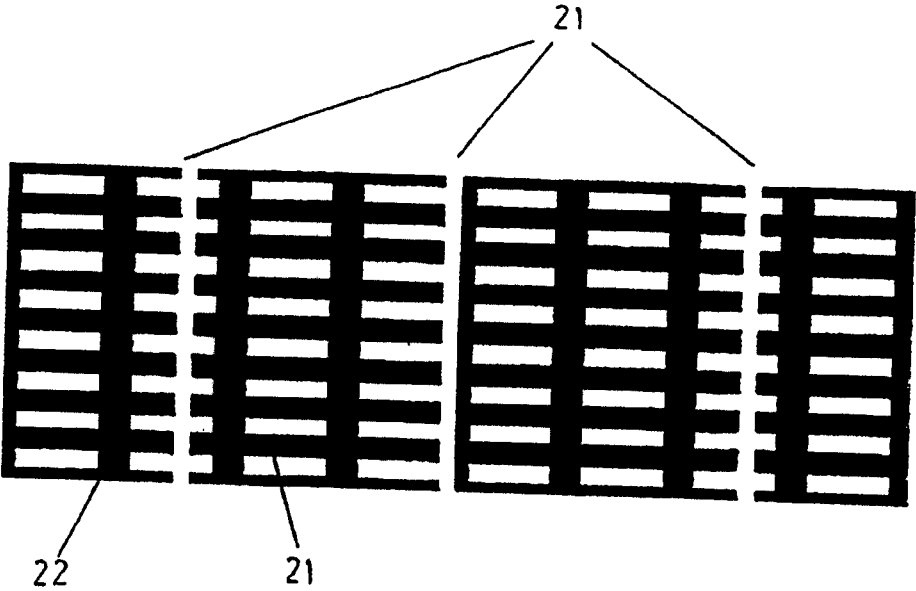


图 17

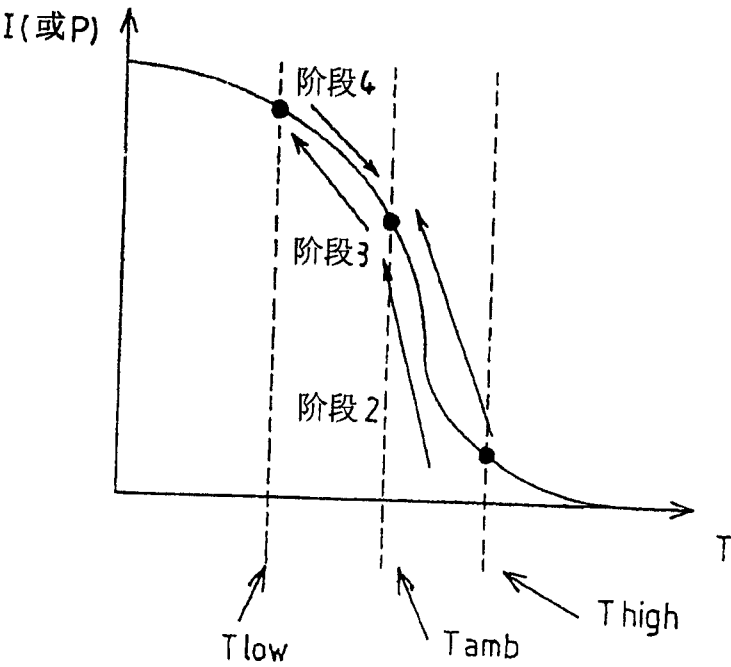


图 18

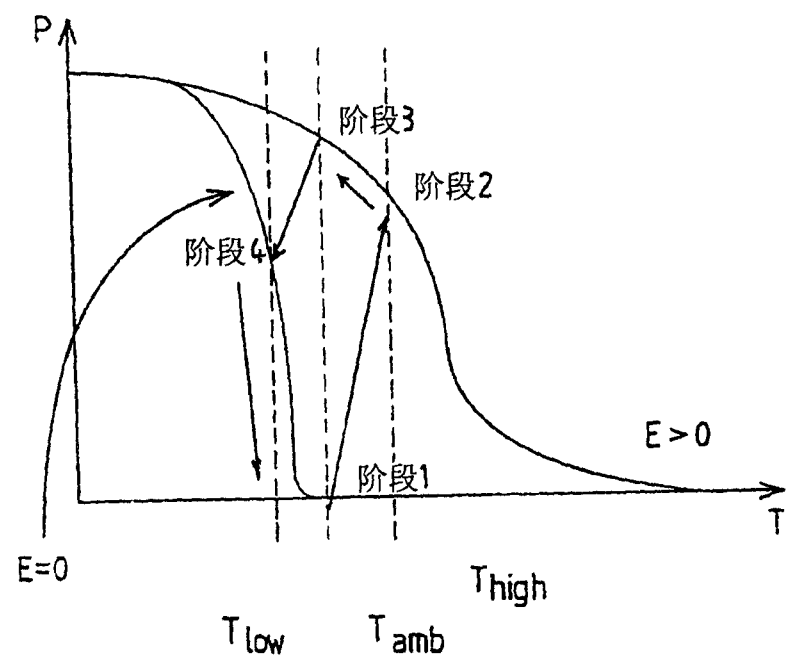


图 19

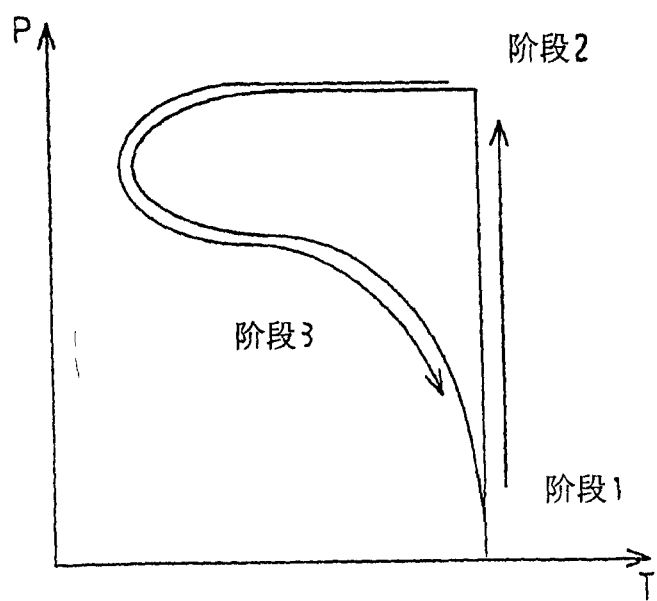


图 20

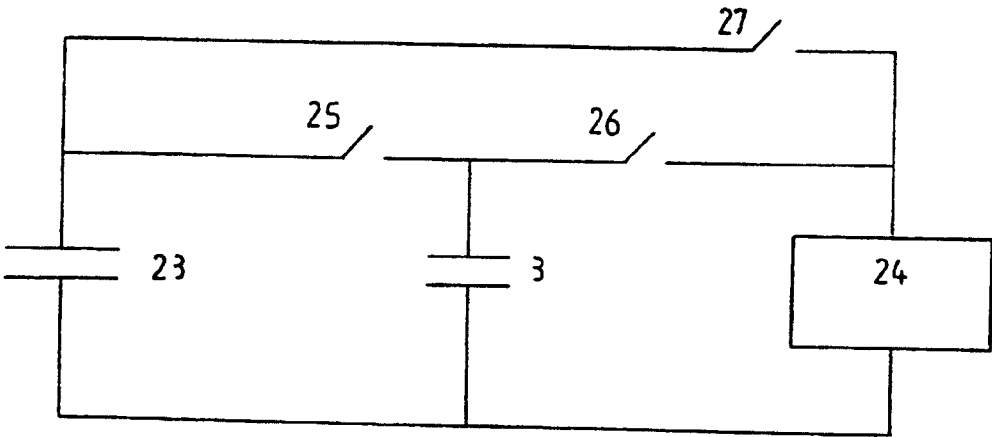


图21

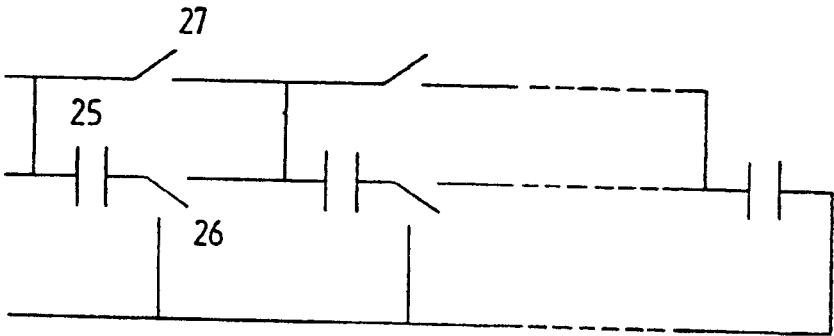


图22

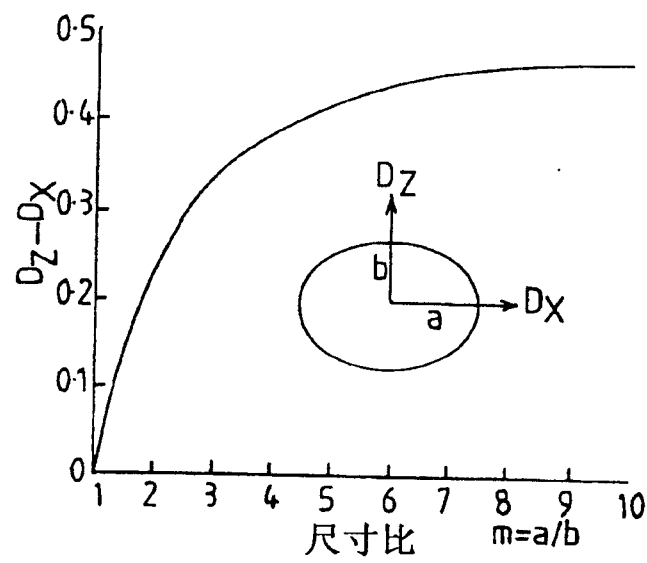


图23

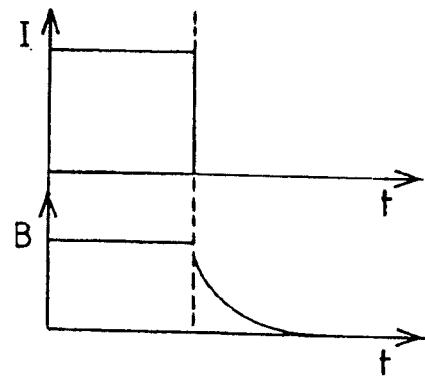


图24

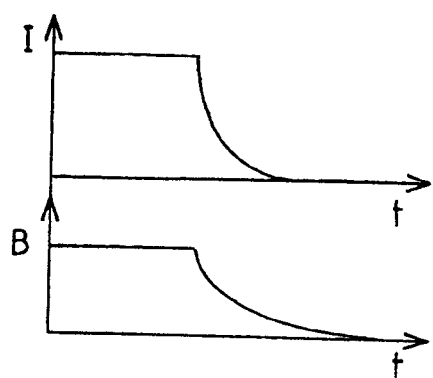


图25

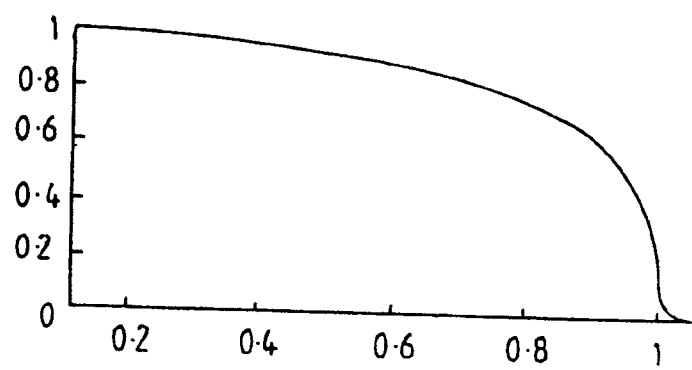


图26

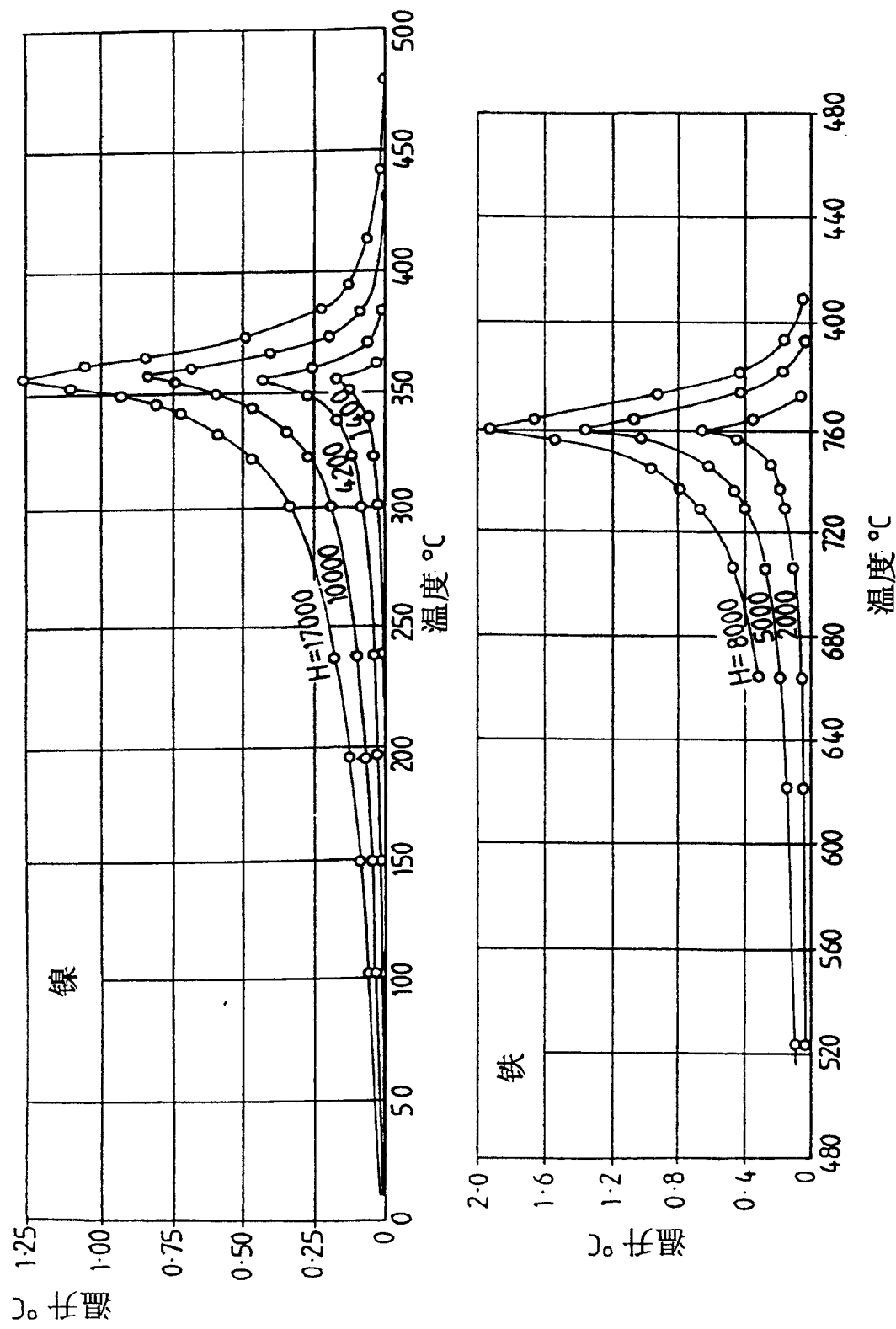


图27