



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 103827986 B

(45)授权公告日 2017.02.15

(21)申请号 201280047372.9

(22)申请日 2012.08.17

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 103827986 A

(43)申请公布日 2014.05.28

(30)优先权数据

61/524,423 2011.08.17 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2014.03.27

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/US2012/051382 2012.08.17

(87)PCT国际申请的公布数据

W02013/026007 EN 2013.02.21

(73)专利权人 明尼苏达大学董事会

地址 美国明尼苏达州

(72)发明人 王建平 何世海 姜岩峰

(74)专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司 11240

代理人 余刚 张英

(51)Int.Cl.

H01F 1/047(2006.01)

H01F 41/02(2006.01)

(56)对比文件

JP S61143557 A, 1986.07.01,

JP H05311390 A, 1993.11.22,

JP H02212320 A, 1990.08.23,

JP H0696947 A, 1994.04.08,

CN 1621549 A, 2005.06.01,

CN 1156516 A, 1997.08.06,

诸葛兰剑.球磨技术制备铁的氮化物及性能研究.《功能材料》.2000,(第5期),

审查员 钟健

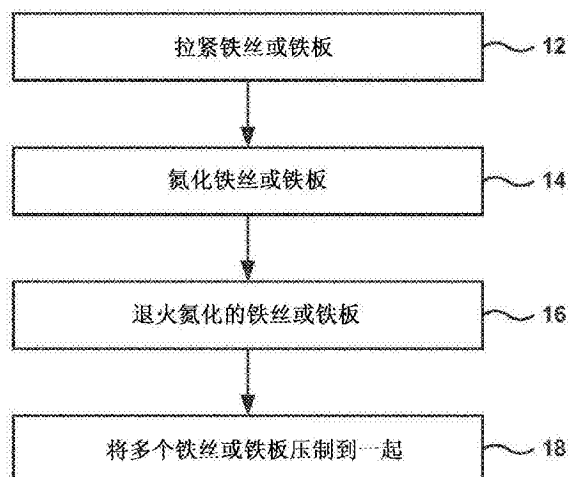
权利要求书3页 说明书11页 附图10页

(54)发明名称

氮化铁永磁体和用于形成氮化铁永磁体的技术

(57)摘要

一种永磁体可以包括 Fe_{16}N_2 相结构。在一些实例中,该永磁体可以通过包括以下步骤的技术形成:在基本平行于铁晶体的<001>晶轴的方向上拉紧包含至少一种铁晶体的铁丝或铁板;氮化铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板;退火氮化的铁丝或铁板以在至少一部分氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构;和压制氮化的铁丝或铁板以形成块体永磁体。



1. 一种形成 Fe_{16}N_2 相结构的方法,包括:

将包含至少一种铁晶体的铁丝或铁板在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧以扭曲所述至少一种铁晶体的晶胞结构并形成沿 $\langle 001 \rangle$ 晶轴具有增加的长度的扭曲的晶胞结构;

氮化所述铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板;和

退火所氮化的铁丝或铁板以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述铁丝或铁板包含单一的铁晶体结构或纹理化结构。

3. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述铁丝或铁板包含多个铁晶体,并且其中,在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述至少一种铁晶体的所述铁丝或铁板包括在平行于所述多个铁晶体的至少一些的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述多个铁晶体的所述铁丝或铁板。

4. 根据权利要求1所述的方法,其中,所述铁丝或铁板包括铁丝,其中所述铁丝限定长轴,并且其中在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述至少一种铁晶体的所述铁丝或铁板包括在平行于所述铁丝的长轴的方向上拉紧所述铁丝。

5. 根据权利要求1所述的方法,其中,在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述至少一种铁晶体的所述铁丝或铁板包括在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述至少一种铁晶体的所述铁丝或铁板至0.3%至7%之间的应变。

6. 根据权利要求1所述的方法,其中,氮化所述铁丝或铁板以形成所氮化的铁丝或铁板包括:

将所述铁丝或铁板暴露于原子氮物质;以及

将所述铁丝或铁板加热至125°C至600°C之间的温度。

7. 根据权利要求6所述的方法,其中,所述原子氮物质由包含 N_2 气、 NH_3 气或脲中至少一种的氮前体形成。

8. 根据权利要求1所述的方法,其中,退火所氮化的铁丝或铁板以在至少部分所氮化的铁丝或铁板中形成所述 Fe_{16}N_2 相结构包括将所氮化的铁丝或铁板在惰性气氛下加热至100°C至300°C之间。

9. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括向包含所述 Fe_{16}N_2 相结构的所氮化的铁丝或铁板中引入磁畴壁钉扎位点。

10. 根据权利要求9所述的方法,其中,向包含所述 Fe_{16}N_2 相结构的所氮化的铁丝或铁板中引入磁畴壁钉扎位点包括用掺杂剂元素离子轰击包含所述 Fe_{16}N_2 相结构的所氮化的铁丝或铁板。

11. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括在平行于所述铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上拉紧包含所述至少一种铁晶体的所述铁丝或铁板之前向所氮化的铁丝或铁板中引入磁畴壁钉扎位点。

12. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括向所述铁丝或铁板中引入包含Ti、Co、Ta、Ni、Mn、Zr、Mo、Nb、Nd、Ga、Ge、C、B、Si、P、Cr、Cu、或Zn中至少一种的相稳定化掺杂剂元素。

13. 根据权利要求1所述的方法,其中,所扭曲的晶胞结构限定与未拉紧的铁体心立方(bcc)晶体晶胞相比沿 $\langle 001 \rangle$ 晶轴拉长0.3%至7%之间的体心正方(bct)铁晶体晶胞。

14. 根据权利要求1所述的方法, 其中, 氮化所述铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板包括经由脉扩散过程氮化所述铁丝或铁板。

15. 根据权利要求14所述的方法, 其中, 经由所述脉扩散氮化所述铁丝或铁板包括在室内将脉和所述铁丝或铁板一起加热至选择的温度以分解所述脉的氮原子, 其中在所述室内所述氮原子扩散进入所述铁丝或铁板中。

16. 根据权利要求14-15中任一项所述的方法, 其中, 所述铁丝或铁板由铁构成。

17. 根据权利要求14-15中任一项所述的方法, 其中, 选择脉与铁的比率以使得在所述脉扩散过程之后, 所述铁丝或铁板基本上由所述 Fe_{16}N_2 相结构构成。

18. 一种形成 Fe_{16}N_2 相结构的系统, 所述系统包括:

应变诱导装置, 配置为向包含至少一种体心立方(bcc)铁晶体的铁丝或铁板在平行于所述体心立方(bcc)铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 轴的方向上施加拉紧力以扭曲至少一种铁晶体的晶胞结构并形成沿 $\langle 001 \rangle$ 晶轴具有增加的长度的扭曲的晶胞结构;

第一加热装置, 配置为加热所拉紧的铁丝或铁板;

原子氮物质的源, 配置为将所拉紧的铁丝或铁板暴露于原子氮物质以形成氮化的铁丝或铁板; 和

第二加热装置, 配置为将所氮化的铁丝或铁板加热至足以退火所氮化的铁丝或铁板的温度以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构。

19. 根据权利要求18所述的系统, 进一步包括用于进行权利要求1-13中任一项所述的方法的装置。

20. 一种通过权利要求1-13中所述方法的任一种生产的氮化铁永磁体。

21. 一种包含通过权利要求1-13中所述方法的任一种生产的氮化的铁丝或铁板的块体永磁体, 其中, 所述氮化的铁丝或铁板包含 Fe_{16}N_2 相结构。

22. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述丝具有至少0.01mm的直径。

23. 根据权利要求22所述的块体永磁体, 其中, 所述丝具有至少0.1mm的直径。

24. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述丝限定从所述丝的第一端延伸至所述丝的第二端的长轴, 其中所述丝包含至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体, 并且其中所述至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 轴平行于所述丝的长轴。

25. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述板具有至少0.01mm的厚度。

26. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述板具有至少0.1mm的厚度。

27. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述板限定从所述板第一端延伸至所述板第二端的长轴, 其中所述板包含至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体, 并且其中所述至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 轴平行于所述板的所述长轴。

28. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体具有大于30MG0e的能量积。

29. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体具有大于60MG0e的能量积。

30. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体具有大于65MG0e的能量积。

31. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体具有大于100MG0e的能

量积。

32. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体具有60MG0e至135MG0e之间的能量积。

33. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 进一步包含至少一个磁畴壁钉扎位点。

34. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 进一步包含含有Ti、Co、Ta、Ni、Mn、Zr、Mo、Nb、Nd、Ga、Ge、C、B、Si、P、Cr、Cu、或Zn中至少一种的相稳定化掺杂剂元素。

35. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体进一步包含Fe₈N相结构。

36. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体由所述Fe₁₆N₂相结构构成。

37. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体的厚度大于0.1mm。

38. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体的厚度大于1mm。

39. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体的厚度大于10mm。

40. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体包含与未拉紧的铁体心立方(bcc)晶体晶胞相比沿<001>晶轴拉长0.3%至7%之间的至少一种体心正方(bct)铁晶体晶胞。

41. 根据权利要求21所述的块体永磁体, 其中, 所述块体永磁体包含8至12at.%的N。

氮化铁永磁体和用于形成氮化铁永磁体的技术

技术领域

[0001] 本公开涉及永磁体和用于形成永磁体的技术。

背景技术

[0002] 永磁体在许多机电系统,包括,例如,替代能源系统中发挥着作用。例如,永磁体用于电动马达或发电机,这些马达或发电机可以用于车辆、风力涡轮机和其它可替代的能源机构。目前使用的许多永磁体包含稀土元素,如钕。这些稀土元素的供应相对短缺,并且未来可能面临价格上升和/或供应短缺。此外,一些包含稀土元素的永磁体生产成本高昂。例如,NdFeB磁体的制作一般包括压碎物料,压制所述物料和在超过1000℃的温度下烧结。

发明内容

[0003] 通常,本公开涉及包含 Fe_{16}N_2 的块体永磁体和用于形成包含 Fe_{16}N_2 的块体永磁体的技术。块体 Fe_{16}N_2 永磁体可以提供包含稀土元素的永磁体的替代永磁体。铁和氮是丰富的元素,因而相对便宜并容易获得。此外,从薄膜 Fe_{16}N_2 永磁体收集的实验证据表明块体 Fe_{16}N_2 永磁体可以具有所需的磁性能,包括高达约134MegaGauss*Oersteds(MGOe)的能量积,这是NdFeB能量积(约60MGOe)的约2倍。高能量积的 Fe_{16}N_2 磁体可以为电动机、发电机和磁共振成像(MRI)磁铁等应用中提供高效率。

[0004] 在一些方面中,本公开描述了用于形成块体 Fe_{16}N_2 永磁体的技术。该技术一般可以包括,沿着基本平行于至少一种bcc铁晶体的<001>晶轴的方向,拉紧包含至少一种体心立方(bcc)铁晶体的铁丝或铁板。在一些实例中,该至少一种铁丝或铁板的<001>晶轴可以基本平行于铁丝或铁板的长轴。该技术则包括将铁丝或铁板暴露于氮环境以将氮引入铁丝或铁板中。该技术进一步包括退火氮化的铁丝或铁板以对铁和氮原子的排布定序并在至少一部分的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构(phase constitution)。在一些实例中,多个 Fe_{16}N_2 丝或板能够基本平行于<001>轴进行组装,且多个 Fe_{16}N_2 丝或板可一起压制以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体。

[0005] 在一些方面,本公开描述了用于形成单晶氮化铁丝和板的技术。在一些实例中,如本文中所述的坩埚技术用于形成单晶氮化铁丝和板。除了此类坩埚技术,此类单晶铁丝或铁可以通过从微塑型器浮动或拉动的微熔融区而形成。另外,还描述了用于形成结晶纹理化(例如,具有沿着丝和板的某个方向的所需结晶取向)的氮化铁丝和板的技术。

[0006] 在一个实例中,本公开涉及包括以下步骤的方法:在基本平行于铁晶体的<001>晶轴的方向上拉紧包含至少一种铁晶体的铁丝或铁板;氮化该铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板;和退火该氮化的铁丝或铁板以在至少一部分氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构。

[0007] 在另一实例中,本公开涉及包含以下装置的系统:在基本平行于bcc铁晶体的<001>轴的方向上拉紧包含至少一种体心立方(bcc)铁晶体的铁丝或铁板的装置;加热拉紧的铁丝或铁板的装置;将拉紧的铁丝或铁板暴露于原子氮前体以形成氮化的铁丝或铁板的装

置;和退火氮化的铁丝或铁板以在至少一部分氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构的装置。

[0008] 在另一方面中,本公开涉及包括脲作为将氮原子扩散到铁中的有效原子氮源以形成氮化的铁丝或铁板或块体的方法。

[0009] 在另一方面中,本公开涉及包含含有 Fe_{16}N_2 相结构的丝的永磁体。

[0010] 在另一方面中,本公开涉及包含含有 Fe_{16}N_2 相结构的板的永磁体。

[0011] 在另一方面中,本公开涉及包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体。根据本公开的这个方面,永磁体在至少一个尺度(dimension)上具有至少0.1mm的尺寸。

[0012] 本公开的一个或多个实例的细节在附图和以下的描述进行了阐述。本公开的其它特征、目的以及优点从描述和附图,以及权利要求书中将是显而易见的。

附图说明

[0013] 图1是示出用于形成块体 Fe_{16}N_2 永磁体的实例技术的流程图。

[0014] 图2是示出用其能够将铁丝或铁板拉紧和暴露于氮的实例装置的概念图。

[0015] 图3示出了图2中所示的坩埚加热台的一个实例的进一步细节。

[0016] 图4是显示拉紧状态下氮原子注入铁原子之间的胞间隙中的八个(8)铁晶胞的概念图。

[0017] 图5A和5B是示出将多个铁丝或铁板合并入永磁体的压制过程实例的概念图。

[0018] 图6是示出用其能够拉紧铁丝或铁板的另一实例装置的概念图。

[0019] 图7是示出可以用于经由脲扩散过程氮化铁丝或铁板的实例装置的示意图。

[0020] 图8是氮化铁相图。

[0021] 图9-12是实施以示出本公开的各方面的实例实验的各种结果的曲线图。

[0022] 图13是示出快速带式浇铸以纹理化实例氮化铁丝或板的实例装置的概念图。

具体实施方式

[0023] 通常,本公开涉及包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体和用于形成包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体的技术。具体而言,本文中所述技术用于形成块体相 Fe_{16}N_2 永磁体。

[0024] 当 Fe_{16}N_2 永磁体是各向异性时, Fe_{16}N_2 永磁体可以提供相对较高的能量积,例如,高达约134MG0e。在所述 Fe_{16}N_2 磁体是同向性的实例中,能量积可以高达约33.5MG0e。永磁体的能量积与残磁顽性和剩余磁性之积成正比。比较而言, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 永磁体的能量积可以高达约60MG0e。当用于电动机、发电机等时,较高的能量积可以导致永磁体的效率提高。

[0025] 图1是示出用于形成块体 Fe_{16}N_2 永磁体的实例技术的流程图。图1的技术将同时参照图2~5进行描述。图2示出了用其能够将铁丝或铁板拉紧和暴露于氮的装置的概念图。图3示出了图2中所示的坩埚加热台的一个实例的进一步细节。

[0026] 图2的实例装置包含第一轧辊22,第二轧辊24和坩埚加热台26。第一轧辊22和第二轧辊24分别配置为接收铁丝或铁板28的第一端38和第二端40。铁丝或铁板28在第一端38和第二端40之间限定了长轴。正如图3中最佳所见,铁丝或铁板28穿过由坩埚加热台26限定的孔30。坩埚加热台26包括围绕至少部分由坩埚加热台26限定的孔30的感应器32。

[0027] 图1的实例技术包括沿着基本平行(例如,平行或接近平行)于所述铁丝或铁板28

中至少一种铁晶体的 $\langle 001 \rangle$ 轴的方向拉紧铁丝或铁板28(12)。在一些实例中,铁丝或铁板28由具有体心立方(bcc)晶体结构的铁形成。

[0028] 在一些实例中,铁丝或铁板28由bcc单晶结构形成。在其它实例中,铁丝或铁板28可以由多个bcc铁晶体形成。在这些实例中的一些中,多种铁晶体以使得至少一些,例如,大多数或基本上全部,各个晶胞和/或晶体的 $\langle 001 \rangle$ 轴基本平行于向铁丝或铁板28施加拉紧力的方向定向。例如,当铁作为铁丝或铁板28形成时,至少一些 $\langle 001 \rangle$ 轴可以基本平行于铁丝或铁板28的长轴,如图2和3所示。如上所述,在一些实例中,单晶氮化铁丝和板可以使用坩埚技术形成。除了此类坩埚技术之外,单晶铁丝和铁板可以通过从微塑型器浮动或拉动的微熔融区形成以形成铁丝或铁板28。

[0029] 在一些实例中,铁丝或铁板28可以具有结晶纹理化结构。该技术可以用于形成结晶纹理化(例如,具有沿着丝和板的某个方向的所需结晶取向)铁丝或板28。图13是示出快速带式浇铸以纹理化实例铁丝或铁板,如铁丝或铁板28的一个实例装置70的概念图。正如所示,快速带式浇铸装置70包括含有熔融铁锭料72的锭料室(ingot chamber)76,其可以通过,例如,加热线圈形式的加热源74加热。锭料72通过喷嘴头78流出室76以形成铁条(iron strip)80。铁条80被送入反向旋转的夹送辊82A和82B表面之间的间断带内。在一些实例中,辊82A和82B的旋转可以从每分钟约10转变化至1000转。铁条在夹送辊82A和82B上冷却,在夹送辊82A和82B之间压制之后,形成纹理化铁条84A和84B。在一些实例中,纹理化铁条84A和84B可以形成具有厚度,例如,约 $1\mu\text{m}$ 至约1mm的纹理化铁带(各自或在压制多个铁条后)。

[0030] 在未拉紧的铁bcc晶格中,晶体晶胞的 $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ 和 $\langle 001 \rangle$ 轴可以具有基本相等的长度。然而,当力,例如,拉力,在基本平行于一个晶轴,例如, $\langle 001 \rangle$ 晶轴的方向上施加于晶体晶胞时,晶胞就可能扭曲且铁晶体结构就可以称为体心正方(bct)结构。例如,图4是显示氮原子注入铁原子之间的胞间隙的八个(8)处于拉紧状态的铁晶胞的概念图。图4中的实例包括第一层42的四个铁晶胞和第二层44的四个铁晶胞。第二层44置于第一层42上且第二层44中的晶胞基本上与第一层42中的晶胞对齐(例如,晶胞的 $\langle 001 \rangle$ 晶轴在层之间基本对齐)。如图4所示,铁晶胞被扭曲以使得沿 $\langle 001 \rangle$ 轴的晶胞的长度为大约 $3.14\text{\AA}$,同时沿 $\langle 010 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 轴的晶胞长度为大约 $2.86\text{\AA}$ 。铁晶胞在处于所述拉紧状态时可以称为bet晶胞。当铁晶胞处于所述拉紧状态时, $\langle 001 \rangle$ 轴可以称为晶胞的c-轴。

[0031] 可以使用各种应变诱导装置(strain inducing apparatus)将拉力施加于铁丝或铁板28上。例如,如图2所示,铁丝或铁板28的第一端38和第二端40可以分别通过(例如,缠绕)第一辊22和第二辊24接收,并且辊22,24可以反向旋转(图2中用箭头34和35所示),以将拉力施加在铁丝或铁板28上。

[0032] 在其它实例中,铁丝或铁板28的相对端可以夹在机械夹具,例如,夹钳中,而机械夹具可以彼此远离以将拉力施加在铁丝或铁板28上。图6是示出用其能够如本文中所述拉紧铁丝或铁板28的另一实例装置的概念图。如所示,装置54包括夹具56和58,它们可以通过紧固螺钉60a-d固定铁丝或铁板28的相对端。一旦铁丝或铁板固定于装置19上,螺栓62就可以转向旋转螺栓62的螺纹体,以增加夹具56和58之间的距离,并将拉力施加在铁丝或铁板28上。通过螺栓62的旋转所产生的伸长率或应变的值可以通过任何合适的量表,例如,如,应变仪进行测量。在一些实例中,装置54可放置于炉(例如,管式炉)或其它加热环境中,以

使得铁丝或铁板28可以在铁丝或铁板28通过装置54拉伸过程中和/或之后被加热。

[0033] 应变诱导装置可以将铁丝或铁板28拉伸至一定的伸长率。例如,铁丝或铁板28上的应变(strain)可以为约0.3%~约7%之间。在其它实例中,铁丝或铁板28上的应变可以小于约0.3%或大于约7%。在一些实例中,在铁丝或铁板28上施加一定的应变可以导致铁各个晶胞上产生基本相同的应变,使得晶胞沿着<001>轴拉伸约0.3%至约7%之间。

[0034] 铁丝或铁板28可以具有任何合适的直径和/或厚度。在一些实例中,合适的直径和/或厚度可以是微米(μm)或毫米(mm)数量级的。例如,铁丝可以具有大于约10 μm (0.01mm)的直径。在一些实例中,铁丝具有约0.01mm至约1mm之间,如约0.1mm的直径。类似地,铁板可以具有任何合适的厚度和/或宽度。在一些实例中,铁板可以具有大于约0.01mm,如约0.01mm至约1mm之间或约0.1mm的厚度。在一些实施方式中,铁板的宽度可以大于铁板的厚度。

[0035] 铁丝的直径或铁板的横截面面积(在基本垂直于铁板拉伸/拉紧的方向的平面上)可以影响必须施加于铁丝或铁板28以产生给定应变的力的量。例如,向直径约0.1mm的铁丝施加大约144N的力,可以产生约7%的应变。作为另一实例,向直径约0.2mm的铁丝施加大约576N的力,可以产生约7%的应变。作为另一实例,向直径约0.3mm的铁丝施加大约1296N的力,可以产生约7%的应变。作为另一实例,向直径约0.4mm的铁丝施加大约2304N的力,可以产生约7%的应变。作为另一实例,向直径约0.5mm的铁丝施加大约3600N的力,可以产生约7%的应变。

[0036] 在一些实例中,一旦已经形成 Fe_{16}N_2 相结构,铁丝或铁板28可以包括用于稳定 Fe_{16}N_2 相结构的掺杂剂元素。例如,物相稳定掺杂剂元素可以包括钴(Co)、钛(Ti)、铜(Cu)、锌(Zn)等。

[0037] 由于应变诱导装置将拉力施加在铁丝或铁板28上和/或一旦应变诱导装置在铁丝或铁板28上施加基本恒定的拉力,则铁丝或铁板28可以被氮化(14)。在一些实例中,在氮化过程期间,可以用加热装置加热铁丝或铁板28。可用于加热铁丝或铁板28的加热装置的一个实例是坩埚加热台26,如图2和3所示。

[0038] 坩埚加热台26限定铁丝或铁板28通过的孔30(例如,部分铁丝或铁板28设置其中)。在一些实例中,坩埚加热台26在铁丝或铁板28加热期间没有任何部分接触铁丝或铁板28。在一些实施方式中,这是有利的,因为它降低了不需要的元素或化学物种接触并扩散到铁丝或铁板28中的危险。不需要的元素或化学物种可以影响铁丝或铁板28的性能;因此,减少或限制铁丝或铁板28与其它材料之间的接触可能是合乎需要的。

[0039] 坩埚加热台26还包括围绕至少一部分由坩埚加热台26限定的孔30的感应器32。感应器32包括电流由此可以通过的导电材料如铝、银或铜。电流可以是交流电(AC),其可以在铁丝或铁板28中诱导涡流且加热铁丝或铁板28。在其它实例中,代替使用坩埚加热台26加热铁丝或铁板28,也可以使用其它非接触式加热源。例如,辐射热源如红外加热灯可以用于加热铁丝或铁板28。作为另一实例,等离子体弧灯可以用于加热铁丝或铁板28。

[0040] 不管在氮化过程期间何种加热装置加热铁丝或铁板28,加热装置可以将铁丝或铁板28的温度加热足够长的时间而使氮基本上扩散到铁丝或铁板28的整个厚度或直径中达到预定的浓度。按照这种方式,加热时间和温度是相关的,并且还可能受到铁丝或铁板28的组成和/或几何结构的影响。例如,铁丝或铁板28可以加热至约125 $^{\circ}\text{C}$ 至约600 $^{\circ}\text{C}$ 的温度达约

2至约9h。在一些实例中,铁丝或铁板28可以加热至约500℃至约600℃之间的温度达约2至约4h之间。

[0041] 在一些实例中,铁丝或铁板28包括直径为约0.1mm的铁丝。在这些实例中的一些中,铁丝或铁板28可以加热至约125℃的温度达约8.85h或约600℃的温度达约2.4h。一般而言,在给定的温度下,氮化处理时间可能与铁丝或铁板28的特征尺寸平方,如铁丝的直径或铁板的厚度的平方成反比。

[0042] 除了加热铁丝或铁板28之外,氮化铁丝或铁板28(14)包括将铁丝或铁板28暴露于原子氮物质,其扩散进入铁丝或铁板28中。在一些实例中,原子氮物质可以作为双原子氮(N_2)供给,其随后分离(裂解)成单个氮原子。在其它实例中,原子氮可以由其它原子氮前体如氨(NH_3)提供。在其它实例中,原子氮可以由脲($CO(NH_2)_2$)提供。

[0043] 氮可以单独以气相(例如,基本纯净的氮或双原子氮气)或作为与载气的混合物供给。在一些实例中,载气是氩气(Ar)。气体或气体混合物可以以任何合适的压力,如约0.001托(约0.133帕斯卡(Pa))至约10托(约1333Pa)之间,如约0.01托(约1.33Pa)至约0.1托(约13.33托)之间提供。在一些实例中,当氮气作为与载气的混合物的部分递送时,则氮或氮前体(例如, NH_3)的分压可以为约0.02托至约0.1托之间。

[0044] 使用多种技术可以裂解氮前体(例如, N_2 或 NH_3)以形成原子氮物质。例如,可以使用辐射加热氮前体以裂解氮前体而形成原子氮物质和/或促进氮前体和铁丝或铁板28之间的反应。作为另一实例,可以使用等离子体弧灯分解氮前体以形成原子氮物质和/或促进氮前体和铁丝或铁板28之间的反应。

[0045] 在一些实例中,铁丝或铁板28可以经由脲扩散过程被氮化(14),其中脲用作氮源(例如,而不是双原子氮或氨)。脲(也称为尿素)是具有化学式 $CO(NH_2)_2$ 的有机化合物,在一些情况下其可以用作氮释放肥料。为了氮化铁丝或铁板28(14),脲可以,例如,在炉子中与铁丝或铁板28加热,以产生可以扩散进入铁丝或铁板28中的分解的氮原子。如将在下面进行的进一步描述,所得到的氮化的铁材料的组成可以通过扩散方法的温度以及工艺方法所用的铁与脲的比率(例如,重量比)控制到一定程度。在其它实例中,铁丝或铁板28可以通过类似于在半导体方法中用于引入掺杂剂而使用的植入方法被氮化。

[0046] 图7是示出可以经由脲扩散方法用于氮化铁丝或铁板28的实例装置64的示意图。这种脲扩散方法可以用于,例如,在具有单晶铁、多个晶体结构或纹理化结构时氮化铁丝或铁板28。此外,具有不同形状的铁材料,如丝、板或块体,也能够使用这种方法被扩散。对于丝材料,丝的直径可以,例如,从几微米至毫米变化。对于板材料,板厚度可以,例如,从几纳米至毫米变化。对于块体材料,材料的重量可以,例如,从约1毫克至几千克。

[0047] 如所示,装置64包括真空炉68内的坩埚66。铁丝或铁板28连同氮源脲72一起位于坩埚66内。如图7中所示,包含氩气和氢气的载气在脲扩散过程期间进料至坩埚66中。在其它实例中,可以采用不同的载气或甚至不使用载气。在一些实例中,脲扩散过程期间真空炉68内的气体流速可以为大约5标准立方厘米/分钟(sccm)至约50sccm如,例如,20标准立方厘米/分钟至大约50sccm或5标准立方厘米/分钟(sccm)至大约20sccm。

[0048] 加热线圈70可以在脲扩散过程期间使用任何合适的技术如,例如,涡电流、感应电流、射频等加热铁丝或铁板28和脲72。坩埚66可以配置为承受脲扩散过程期间所用的温度。在一些实例中,坩埚66可能能够承受上达至大约1600℃的温度。

[0049] 脲72可以与铁丝或铁板28一起加热,以产生可以扩散进入铁丝或铁板28中的氮以生成氮化铁材料。在一些实例中,脲72和铁丝或铁板28在坩埚66内可以加热到约650℃或更高,接着冷却骤冷铁和氮混合物以基本在整个铁丝或铁板28的厚度或直径内形成具有 Fe_{16}N_2 相结构的氮化铁材料。在一些实例中,脲72和铁丝或铁板28可以在坩埚66中加热至大约650℃或更高达大约5分钟到大约1小时。在一些实例中,脲72和铁丝或铁板28可以加热至约1000℃至约1500℃之间达数分钟至大约1小时。加热的时间可以取决于脲72和铁丝或铁板28被加热到的温度。例如,如果铁丝或铁板28为约1微米厚,则该扩散过程可以在约1200℃下在约5分钟内完成,在约1100℃下约12分钟完成等。

[0050] 为了在骤冷过程期间冷却加热的材料,可以在坩埚外部循环冷水以迅速冷却内容物。在一些实例中,温度可以在约20s内从650℃降至室温。

[0051] 正如下面将要进行的描述,在一些实例中,脲72和铁丝或铁板28的温度可以为,例如,约200℃至约150℃之间以退火铁和氮混合物以形成基本上在整个铁丝或铁板28的厚度或直径内具有 Fe_{16}N_2 相结构的氮化铁材料。脲72和铁丝或铁板28可以在退火温度下,例如,约1~约40小时之间。此退火过程可以除了其它氮扩散技术之外使用或作为其替代使用,例如,当铁材料是单晶铁丝和板或纹理化铁丝和具有微米级厚度的板时。在每次退火及骤冷时,氮在炉68中可以从氮气或包含氩气+氢气载气的气体混合物扩散进入铁丝或铁板28。在一些实例中,气体混合物可以具有约86%Ar+4%H₂+10%N₂的组成。在其它实例中,气混合物可以具有10%N₂+90%Ar或100%N₂或100%Ar的组成。

[0052] 如将在下面进一步描述,经由脲扩散过程形成的氮化铁材料的组成可以依赖于所用的脲与铁的重量比。因此,在一些实例中,脲与铁的重量比可以选择以形成具有 Fe_{16}N_2 相结构的氮化铁材料。然而,这种脲扩散方法可以用于形成除了具有 Fe_{16}N_2 相结构之外的氮化铁材料如,例如,Fe₂N,Fe₃N,Fe₄N,Fe₈N等。此外,该脲扩散方法可以用于将氮扩散到除了铁之外的材料中。例如,这种脲扩散方法可以用于将氮扩散到钨、FeCo、FePt、CoPt、Co、Zn、Mn等中。

[0053] 不管使用何种技术氮化铁丝或铁板28(14),氮可以扩散到铁丝或铁板28中达到约8原子百分比(at.%)至约14at.%,如约11at.%。氮在铁中的浓度可以是平均浓度,并可以在整个铁丝或铁板28的体积内变化。在一些实例中,至少一部分氮化的铁丝或铁板28(在氮化铁丝或铁板28(14)之后)的所产生的相结构可以是 α' 相Fe₈N。Fe₈N相结构是化学有序 Fe_{16}N_2 相的化学无序副本。Fe₈N相结构也具有bcc晶胞,并能引入相对较高的磁晶各向异性。

[0054] 在一些实例中,氮化铁丝或铁板28可以是 α'' 相 Fe_{16}N_8 。图8是氮化铁相图。如图8所示,在约11at.%N的原子百分比下, α'' 相 Fe_{16}N_8 可以通过在超过约650℃的温度下骤冷Fe-N混合物一段合适的时间而形成。此外,在大约11at.%N的原子百分比下, α'' 相 Fe_{16}N_8 可以通过在低于约200℃的温度下退火Fe-N混合物一段合适的时间而形成。

[0055] 在一些实例中,一旦铁丝或铁板28已被氮化(14),则铁丝或铁板28可以在某温度下退火一段时间,以促进氮原子扩散到铁晶格中的合适胞间隙内而形成 Fe_{16}N_2 (16)。图4示出了氮原子位于其中的铁晶体晶格合适胞间隙的实例。在一些实例中,氮化铁丝或铁板28可以在约100℃至约300℃之间的温度下退火。在其它实例中,退火温度可以为约126.85℃(约400开尔文)。氮化的铁丝或铁板28可以使用坩埚加热台26、等离子体弧灯、辐射热源如红外加热灯、烤炉或封闭式曲颈甑(closed retort)进行退火。

[0056] 该退火过程可以继续一段预定的时间,该时间足以使氮原子扩散到合适的胞间隙中。在一些实例中,退火过程持续达约20h至约100h之间,如约40h至约60h之间。在一些实例中,退火过程可以在惰性气氛如Ar下发生,以减少或基本上防止铁氧化。在一些实施方式中,在铁丝或铁板28退火(16)时,温度保持基本恒定。

[0057] 一旦退火工艺过程已经完成,铁丝或铁板28可以包含 Fe_{16}N_2 相结构。在一些实例中,至少部分铁丝或铁板28基本上由 Fe_{16}N_2 相结构构成。本文所用的“基本上由…构成”是指铁丝或铁板28包括 Fe_{16}N_2 和不会对 Fe_{16}N_2 相的基本而新颖的特性产生实质性影响的其它材料。在其它实例中,例如,在铁丝或铁板28的不同部分中,铁丝或铁板28可以包含 Fe_{16}N_2 相结构和 Fe_8N 相结构。在丝和板及其后来的压制装配中 Fe_8N 相结构和 Fe_{16}N_2 相结构通过量子力学的工作原理可以磁性地一起交换-偶联。这可以形成所谓的交换弹性磁体(exchange-spring magnet),其甚至只有小部分的 Fe_{16}N_2 也可以增加磁能量积。

[0058] 在一些实例中,正如下面的进一步详细描述,铁丝或铁板28可以包含掺杂剂元素或作为磁畴壁钉扎位点(magnetic domain wall pinning site)的瑕疵,其可以增加铁丝或铁板28的矫顽力。如本文所用,基本上由 Fe_{16}N_2 相结构构成的铁丝或铁板28可以包含掺杂剂或作为磁畴壁钉扎位点的瑕疵。在其它实例中,如下面的进一步详细描述,铁丝或铁板28可以包含作为晶界(grain boundary)的非磁性掺杂剂元素,其可以增加铁丝或铁板的矫顽力。如本文所用,由 Fe_{16}N_2 相结构构成的铁丝或铁板28可以包含作为晶界的非磁性元素。

[0059] 一旦已经完成退火过程,铁丝或铁板28可以在惰性气氛如氩气下冷却,以减少或防止氧化。

[0060] 在一些实例中,铁丝或铁板28可以不是所需应用的足够尺寸。在此类实例中,可以形成多个铁丝或铁板28(每个都包含或基本上由 Fe_{16}N_2 相结构构成)并且多个铁丝或铁板28可以压制在一起以形成包含或基本上由 Fe_{16}N_2 相结构构成的更大永磁体(18)。

[0061] 图5A和5B是示出压制过程的实例的概念图。如图5A所示,多个铁丝或铁板28排布以使得各个铁丝或铁板28的<001>轴基本对齐。在各个铁丝或铁板28的<001>轴基本平行于丝或板28的长轴的实例中,基本上对齐铁丝或铁板28可以包括将一个铁丝或铁板28置于另一铁丝或铁板28上。对齐各个铁丝或铁板28的<001>轴可以为永磁体52提供单轴磁各向异性。

[0062] 可以使用,例如,冷压制或热压制压制多个铁丝或铁板28。在一些实例中,进行压制的温度可以低于约300℃,因为 Fe_{16}N_2 在超过300℃时可能开始降解。压制可以在足以将多个铁丝或铁板28连接成基本单一的永磁体52的压力和时间下进行,如图5B所示。

[0063] 任何数量的铁丝或铁板28都可以压制在一起以形成永磁体52。在一些实例中,永磁体52在至少一个尺度上具有至少0.1mm的尺寸。在一些实例中,永磁体52在至少一个尺寸上具有至少1mm的尺寸。在一些实例中,永磁体52在至少一个尺寸上具有至少1cm的尺寸。

[0064] 在一些实例中,为了提供所需的高矫顽力,可以期望在铁丝或铁板28和/或永磁体52内控制磁畴移动(magnetic domain movement)。控制磁畴移动的一种方法是通过将磁畴壁钉扎位点引入到铁丝或铁板28和/或永磁体52中。在一些实例中,磁畴壁钉扎位点可以通过向铁晶体晶格中引入瑕疵而形成。该瑕疵可以通过向铁晶体晶格中注入掺杂剂元素或通过铁晶体晶格的机械应变而引入。在一些实例中,该瑕疵可以在引入氮和形成 Fe_{16}N_2 相结构之前引入到铁晶体晶格中。在其它实例中,该瑕疵可以在退火铁丝或铁板28以形成 Fe_{16}N_2

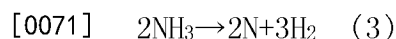
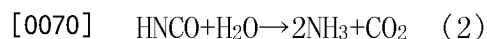
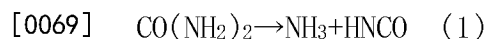
(16)后引入。作为磁畴壁钉扎位点的瑕疵可以借此引入到铁丝或铁板28中的一个实例可以是硼(B)、铜(Cu)、碳(C)、硅(Si)等的离子轰击,进入到铁晶体晶格中。在其它实例中,由非磁性元素或化合物(例如,Cu、Ti、Zr、Ta、SiO₂、Al₂O₃等)组成的粉末可以与包含Fe₁₆N₂相的铁丝或铁板压制在一起。这些非磁性粉末,具有从几纳米至几百纳米范围的尺寸,在压制过程之后起到Fe₁₆N₂相的晶界作用。那些晶界可以增强永磁体的矫顽力。

[0065] 虽然针对氮化铁进行了描述,一种或多种本文中所述的实例方法也可以适用于FeCo合金以形成单晶或高度纹理化FeCo丝和板。Co原子可以取代铁晶格中的部分Fe原子,以提高磁晶各向异性。此外,一种或多种本文中所述的实例拉紧扩散方法也可以适用于这些FeCo丝和板。另外,一种或多种实例方法也可以适用于连同N原子一起将碳(C)、硼(B)和磷(P)原子扩散到Fe或FeCo丝和板中或部分扩散C、P、B到Fe或FeCo丝和板中。因此,本文所述的方法也可以适用于FeCo合金以形成单晶或高度纹理化FeCo丝和板。另外,Co原子可以取代铁晶格中部分Fe原子,例如,以提高磁晶各向异性。此外,本文所述的方法也可以适用于连同氮原子一起将碳(C)、硼(B)和磷(P)原子扩散到Fe或FeCo丝和板中或部分扩散C、P、B到Fe或FeCo丝和板中。此外,本文所述方法所用的铁可以采取丝、板或块体形式的形状。

[0066] 实施例

[0067] 实施了一系列实验以评价本文中所述的实例氮化铁的一个或多个方面。具体而言,各种实例氮化铁材料经由脬扩散形成,并随后进行评价。脬与块体铁的重量比进行变化,以确定氮化铁材料的结构对该比率的依赖性。如图12中所示,使用脬与铁的重量比约0.5(即1:2)、1.0、1.2、1.6、和2.0形成五个不同的实施例。

[0068] 为了参考起见,在超过约1573°C的温度下,用于所述脬扩散过程的主要化学反应过程是:



[0073] 在该反应过程中,对于氮原子,可以相对容易地重新结合成分子,如等式(4)所示。因此,在一些实施例中,可以通过在脬扩散过程期间将脬紧接或接近块体铁材料放置降低氮原子的重新结合。例如,在一些情况下,脬可以直接接触块体铁材料的表面或在块体材料约1厘米之内。

[0074] 根据本文所述的脬扩散过程制备氮化铁样品。在经由脬扩散过程制备氮化铁样品之后,使用俄歇电子能谱法测定实例铁材料表面上的化学组成。图9是是一个实施例的俄歇测定结果的图,其表明在材料中存在氮。

[0075] 图12是脬扩散过程中所用的脬与块体铁材料的重量比相对于最终氮化铁材料的氮浓度(at.%)的作图。如上面所指出,使用了0.5(即1:2)、1.0、1.2、1.6和2.0的脬与块体铁材料比。如图12所示,不同的脬与铁重量比可以导致脬扩散之后氮化铁材料内的不同氮浓度。具体而言,图12示出了铁氮化物材料中氮的原子比率随着相对于块体铁用量的脬用量增加而增加。因此,在至少一些情况下,经由脬扩散形成的氮化铁材料的所需氮浓度可以通过在起始原料中使用对应于所需氮浓度的脬与铁的重量比而获得。

[0076] 图10是低于氮化铁材料表面的深度相对于经由脬扩散以约2.0的脬与铁重量比开

始而形成的氮化铁材料的浓度(at.%)的作图。如图10所示,从氮化铁材料表面至材料表面之下约1600Å的氮浓度为约6at.%。此外,不存在任何痕量的氧和碳,这意味着其它掺杂剂源已被有效降低。

[0077] 图11是低于氮化铁材料表面的深度相对于经由脉扩散以约1.0的脉与铁重量比开始而形成的氮化铁材料的浓度(at.%)的作图。如图11所示,从氮化铁材料表面至材料表面之下约800Å的氮浓度为约6at.%-12at.%。在一些实施例中,该浓度能够通过改善真空系统,例如,如使用泵送系统而导致更大的流量而进一步降低。也如所示,氧已经降低至约4at.%。虽然存在超过10at.%的碳,但因为这能够认为是氮的替代元素,因此它对所制作的永磁体无显著负面影响。

[0078] 一种示例方法包括在基本平行于铁晶体的<001>晶轴的方向上拉紧包含至少一种铁晶体的铁丝或铁板以扭曲至少一种铁晶体的晶胞结构并形成沿<001>晶轴具有增加的长度的扭曲的晶胞结构。该方法进一步包括氮化铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板,和退火所氮化的铁丝或铁板以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成Fe₁₆N₂相结构。

[0079] 在示例方法中,在基本平行于铁晶体的<001>晶轴的方向上拉紧包含至少一种铁晶体的铁丝或铁板可以包括通过在第一方向上拉动铁丝或铁板的第一端和在基本与第一方向相反的第二方向上拉动铁丝或铁板的第二端来向铁丝或铁板施加拉力。

[0080] 在示例方法中,将铁丝或铁板加热至约125℃至约600℃之间的温度可以包括将铁丝或铁板加热至约125℃的温度达约8.85h。

[0081] 在示例方法中,将铁丝或铁板加热至约125℃至约600℃之间的温度可以包括将铁丝或铁板加热至约600℃的温度达约2.4h。

[0082] 在示例方法中,氮化铁丝或铁板以形成所氮化的铁丝或铁板可以包括将铁丝或铁板暴露于原子氮物质。

[0083] 在示例方法中,氮前体可以与载气混合。氮前体可以与载气混合至约0.02至约0.1之间的分压。

[0084] 在示例方法中,将铁丝或铁板暴露于原子氮物质可以包括将铁丝或铁板暴露于约0.133Pa至约1333Pa之间的压力下的氮前体。

[0085] 在示例方法中,退火所氮化的铁丝或铁板以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成所述Fe₁₆N₂相结构可以包括将所氮化的铁丝或铁板加热至约100℃至约300℃之间达约20h至约100h之间。

[0086] 在示例方法中,退火所氮化的铁丝或铁板以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成所述Fe₁₆N₂相结构可以包括在惰性气氛下退火所氮化的铁丝或铁板。

[0087] 该示例方法可以进一步包括压制包含Fe₁₆N₂相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含Fe₁₆N₂相结构的永磁体。

[0088] 在示例方法中,压制包含Fe₁₆N₂相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含Fe₁₆N₂相结构的永磁体包括冷压制包含所述Fe₁₆N₂相结构的氮多个化的铁丝或铁板以形成包含Fe₁₆N₂相结构的永磁体。

[0089] 在示例方法中,压制包含Fe₁₆N₂相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含Fe₁₆N₂相结构的永磁体可以包括在压制包含Fe₁₆N₂相结构的第一氮化的铁丝或铁板和包含Fe₁₆N₂相结构的第二氮化的铁丝或铁板之前将第一氮化的铁丝或铁板的<001>晶轴与第二氮化的

铁丝或铁板的<001>晶轴基本对齐。

[0090] 在示例方法中,压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体可以包括压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构并在至少一个尺度上限定至少0.1mm尺寸的永磁体。

[0091] 在示例方法中,压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构的永磁体可以包括压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构并在至少一个尺度上限定至少1mm尺寸的永磁体。

[0092] 在示例方法中,氮化铁丝或铁板以形成氮化的铁丝或铁板可以包括将铁丝或铁板暴露于原子氮物质,其中原子氮物质由脲形成。

[0093] 在示例方法中,向包含 Fe_{16}N_2 相结构的所氮化的铁丝或铁板中引入磁畴壁钉扎位点包括用掺杂剂元素离子轰击包含 Fe_{16}N_2 相结构的所氮化的铁丝或铁板。

[0094] 在一个实施例中,一种系统包括应变诱导装置,配置为向包含至少一种体心立方(bcc)铁晶体的铁丝或铁板在基本平行于bcc铁晶体的<001>轴的方向上施加拉紧力;第一加热装置,配置为加热拉紧的铁丝或铁板;原子氮物质的源,配置为将拉紧的铁丝或铁板暴露于原子氮物质以形成氮化的铁丝或铁板;和第二加热装置,配置为将所氮化的铁丝或铁板加热至足以退火所氮化的铁丝或铁板的温度以在至少一部分所氮化的铁丝或铁板中形成 Fe_{16}N_2 相结构。

[0095] 该示例系统可以进一步包括压制机,配置为压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构的基本单一的永磁体。

[0096] 压制机可以配置为压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构并在至少一个尺度上限定至少0.1mm尺寸的基本单一的永磁体。

[0097] 压制机可以配置为压制包含 Fe_{16}N_2 相结构的多个氮化的铁丝或铁板以形成包含 Fe_{16}N_2 相结构并在至少一个尺度上限定至少1mm尺寸的基本单一的永磁体。

[0098] 原子氮物质的源可以包括脲。

[0099] 应变诱导装置可以包括配置为接收铁丝或铁板的第一端的第一轧辊和配置为接收铁丝或铁板的第二端的第二轧辊,其中,第二端基本上与第一端相对,并且其中第一轧辊和第二轧辊配置为旋转以在铁丝或铁板的第一端和铁丝或铁板的第二端之间施加拉力。

[0100] 第一轧辊和第二轧辊配置为旋转以拉紧铁丝或铁板约0.3%至约7.0%之间。

[0101] 第一加热装置可以包括如坩埚加热台、辐射热源或等离子体弧灯。

[0102] 第二加热装置可以包括如加热坩埚、辐射热源、等离子体弧灯、炉子或闭式曲颈甑。

[0103] 在一个实施例中,永磁体包含丝,该丝包含 Fe_{16}N_2 相结构。在示例永磁体中,丝可以具有至少约0.01mm的直径。在其他实施例中,丝可以具有约0.1mm的直径。

[0104] 在示例永磁体中,丝可以具有大于约30MG0e的能量积。在其他实施例中,丝具有大于约60MG0e的能量积。在其他实施例中,丝具有大于约65MG0e的能量积。在其他实施例中,丝具有大于约100MG0e的能量积。在其他实施例中,丝具有约60MG0e至约135MG0e之间的能量积。

[0105] 在示例永磁体中,丝限定从丝的第一端延伸至丝的第二端的长轴,其中丝包含至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体,并且其中至少一种bct氮化铁晶体的<001>轴基本平行

于所述丝的长轴。

[0106] 在一个实施例中,永磁体可以包含至少一个磁畴壁钉扎位点。

[0107] 该示例永磁体可以进一步包含含有Ti、Co、Ta、Ni、Mn、Zr、Mo、Nb、Nd、Ga、Ge、C、B、Si、P、Cr、Cu、或Zn中至少一种的相稳定化掺杂剂元素。

[0108] 在一个实施例中,永磁体的丝包含Fe₈N相结构。在另一个实施例中,永磁体的丝基本上由Fe₁₆N₂相结构构成。

[0109] 在另一个实施例中,永磁体包含板,该板包含Fe₁₆N₂相结构。

[0110] 在一些实施例中,板可以具有至少约0.01mm的厚度。在其他实施例中,板具有约0.1mm的厚度。

[0111] 板可以具有大于约30MG0e的能量积。在其他实施例中,板可以具有大于约60MG0e的能量积。在其他实施例中,板具有大于约65MG0e的能量积。在其他实施例中,板具有大于约100MG0e的能量积。在其他实施例中,板具有约60MG0e至约135MG0e之间的能量积。

[0112] 在永磁体的实施例中,板限定从板第一端延伸至板第二端的长轴,其中板包含至少一种体心正方(bct)氮化铁晶体,并且其中至少一种bct氮化铁晶体的<001>轴基本平行于板的长轴。

[0113] 在永磁体的实施例中,板进一步包含Fe₈N相结构。

[0114] 在永磁体的实施例中,板基本上由Fe₁₆N₂相结构构成。

[0115] 在另一个实施例中,永磁体包含Fe₁₆N₂相结构,其中,永磁体在至少一个尺度上具有至少0.1mm的尺寸。在一些实施例中,永磁体在至少一个尺度上具有至少1mm的尺寸。在一些实施例中,永磁体在至少一个尺度上具有至少1cm的尺寸。

[0116] 永磁体可以具有大于约30MG0e的能量积。在其他实施例中,永磁体可以具有大于约60MG0e的能量积。在其他实施例中,永磁体可以具有大于约65MG0e的能量积。在其他实施例中,永磁体可以具有大于约100MG0e的能量积。在其他实施例中,永磁体可以具有约60MG*0e至约135MG*0e之间的能量积。

[0117] 永磁体可以包含Fe₈N相结构。在其他实施例中,永磁体基本上由Fe₁₆N₂相结构构成。

[0118] 另一种示例方法包括经由脲扩散过程氮化金属构件。

[0119] 在一个实施例中,经由脲扩散氮化金属构件包括在室内将脲和金属构件一起加热至选择的温度以分解脲的氮原子,其中在室内氮原子扩散进入金属构件中。

[0120] 金属构件包括铁。在另一个实施例中,金属构件基本上由铁构成。在一个实施例中,选择脲与铁的比率以使得在脲扩散过程之后,金属构件基本上由Fe₁₆N₂相结构构成。

[0121] 已经描述了各种实施例。这些和其它实施例都落入以下权利要求的范围内。

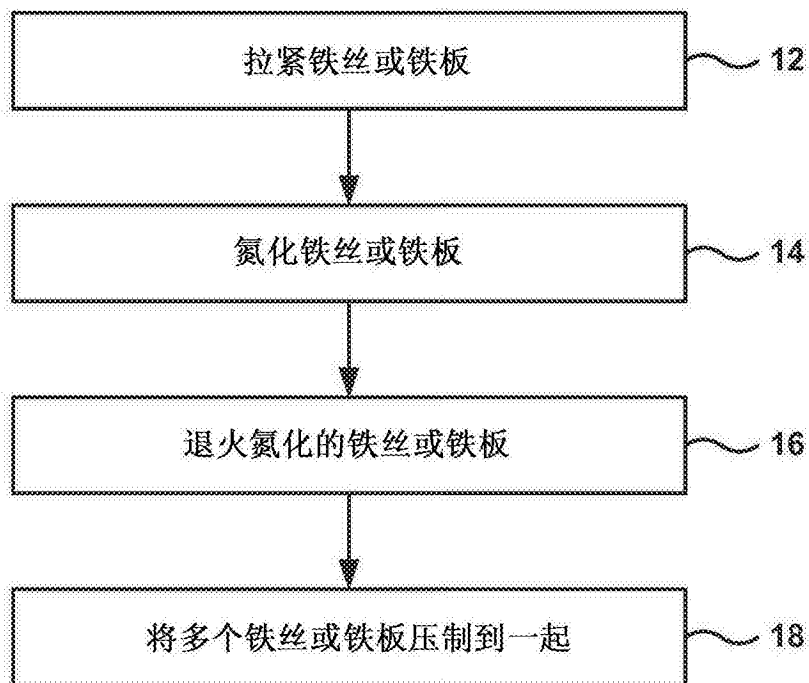


图1

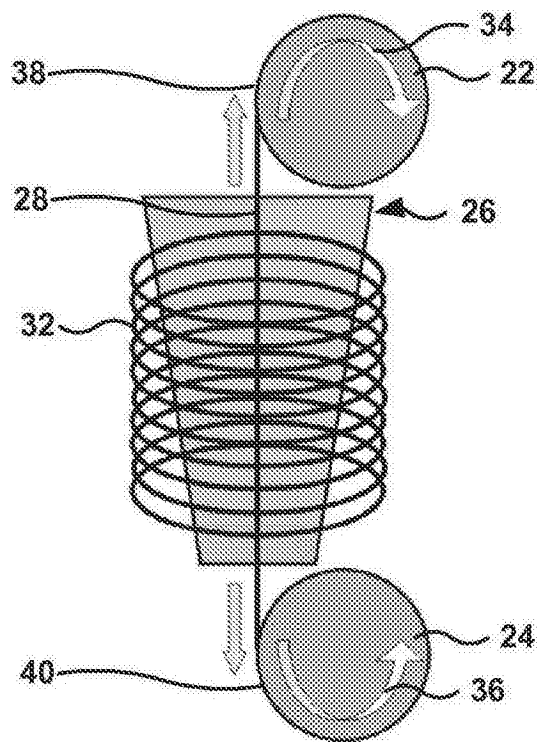


图2

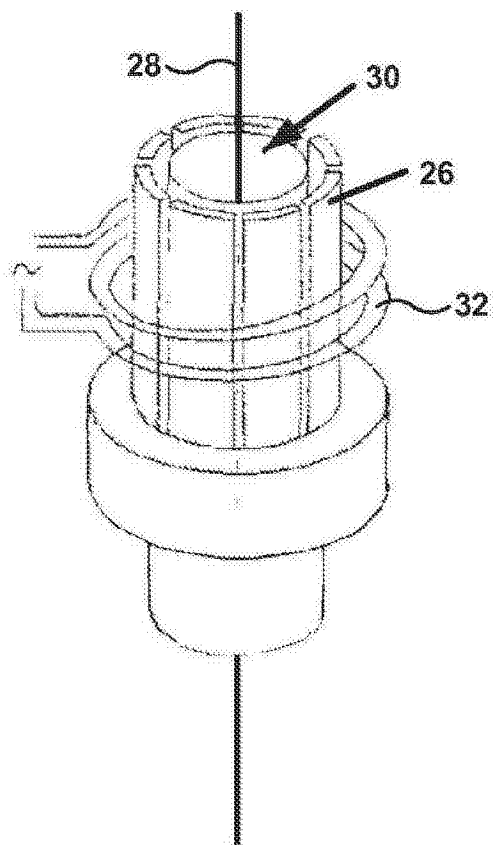


图3

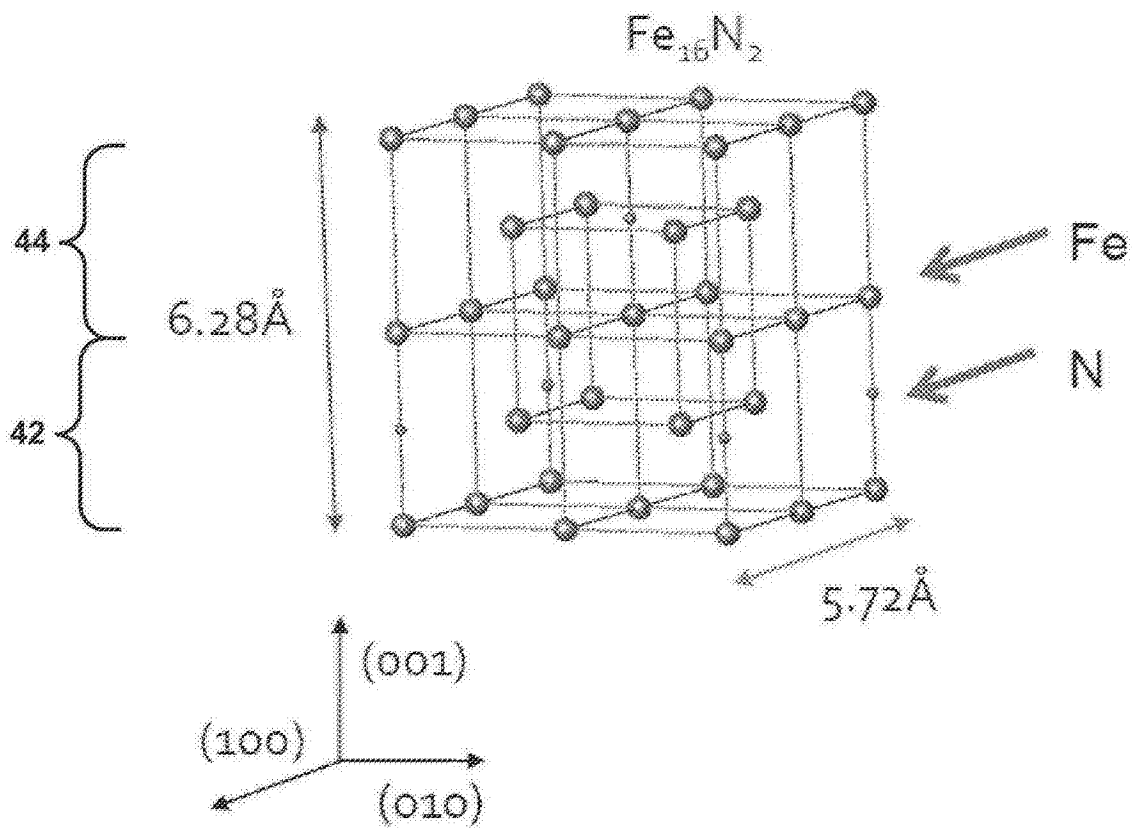


图4

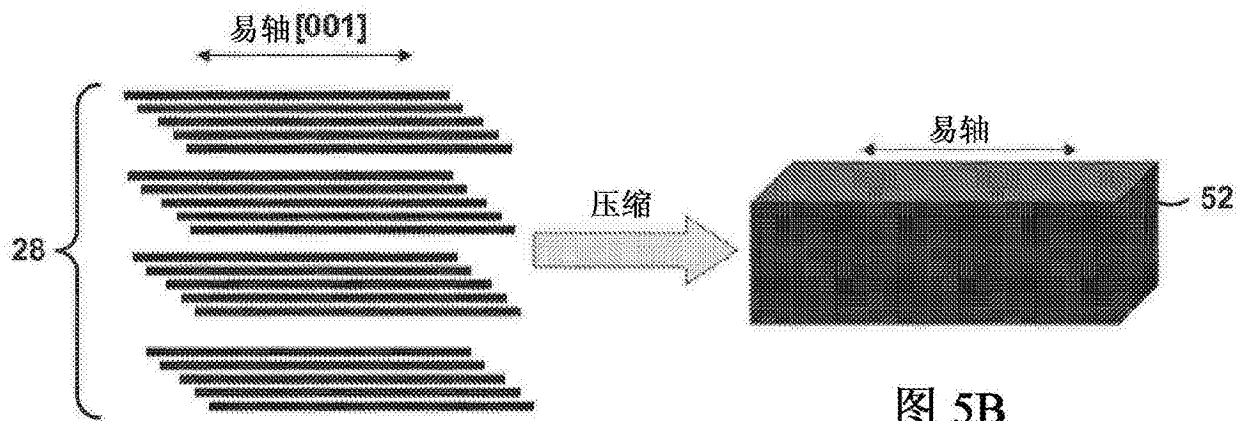


图 5B

图 5A

54

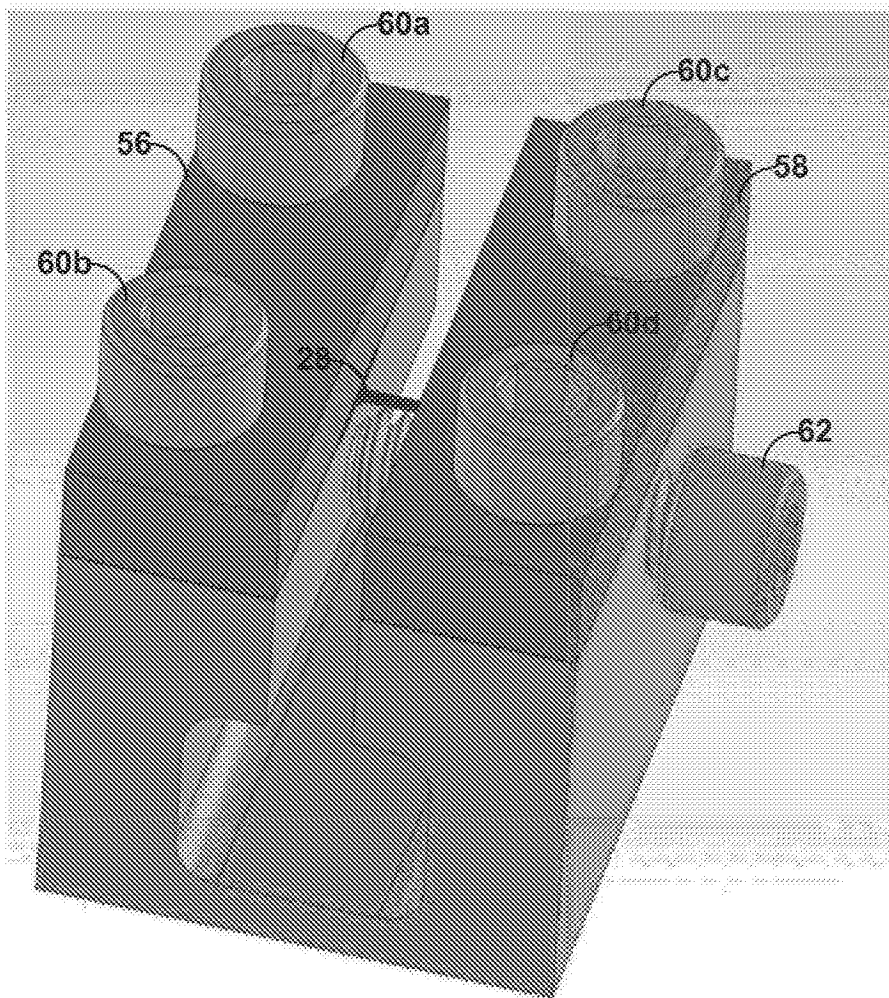


图6

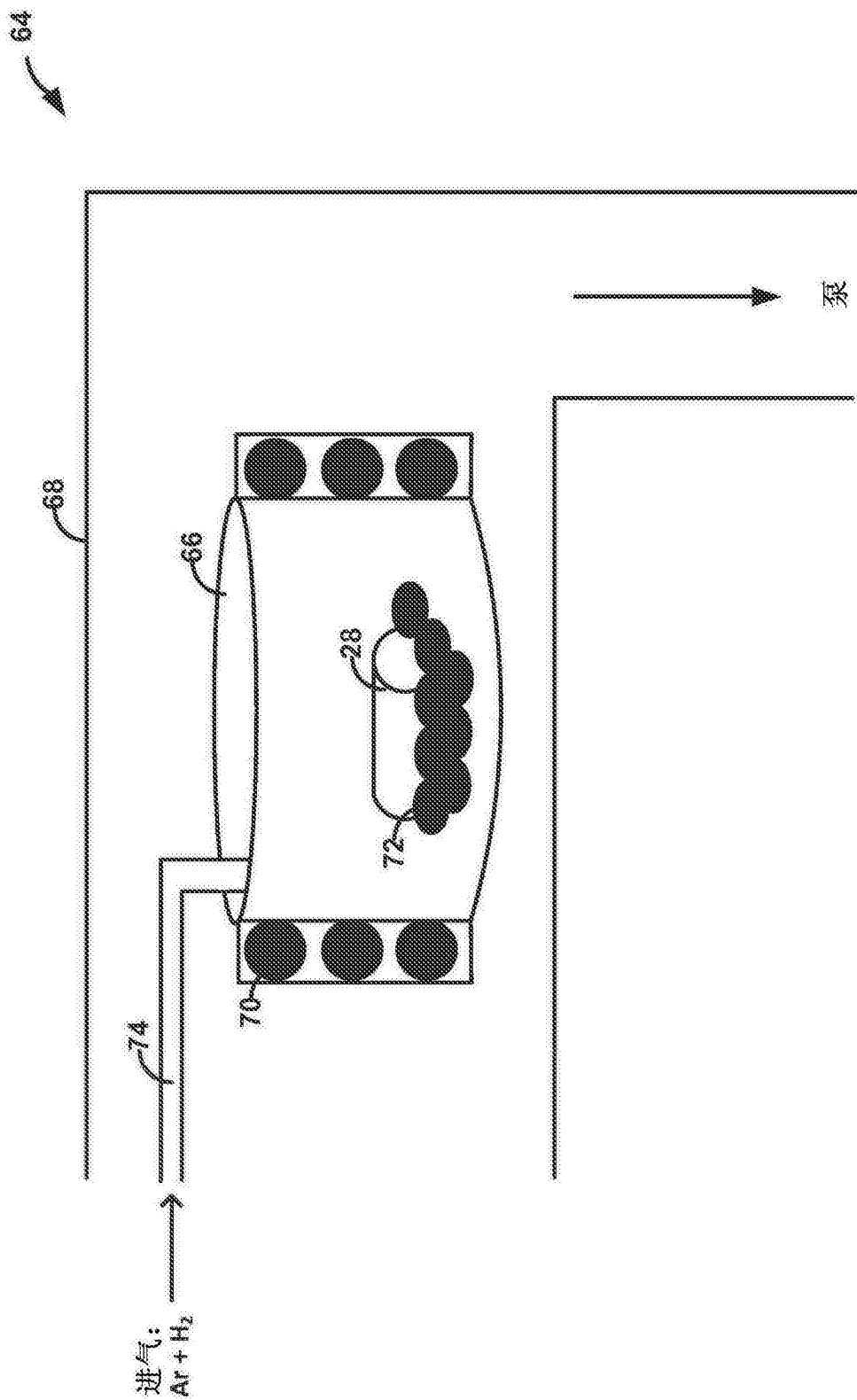


图7

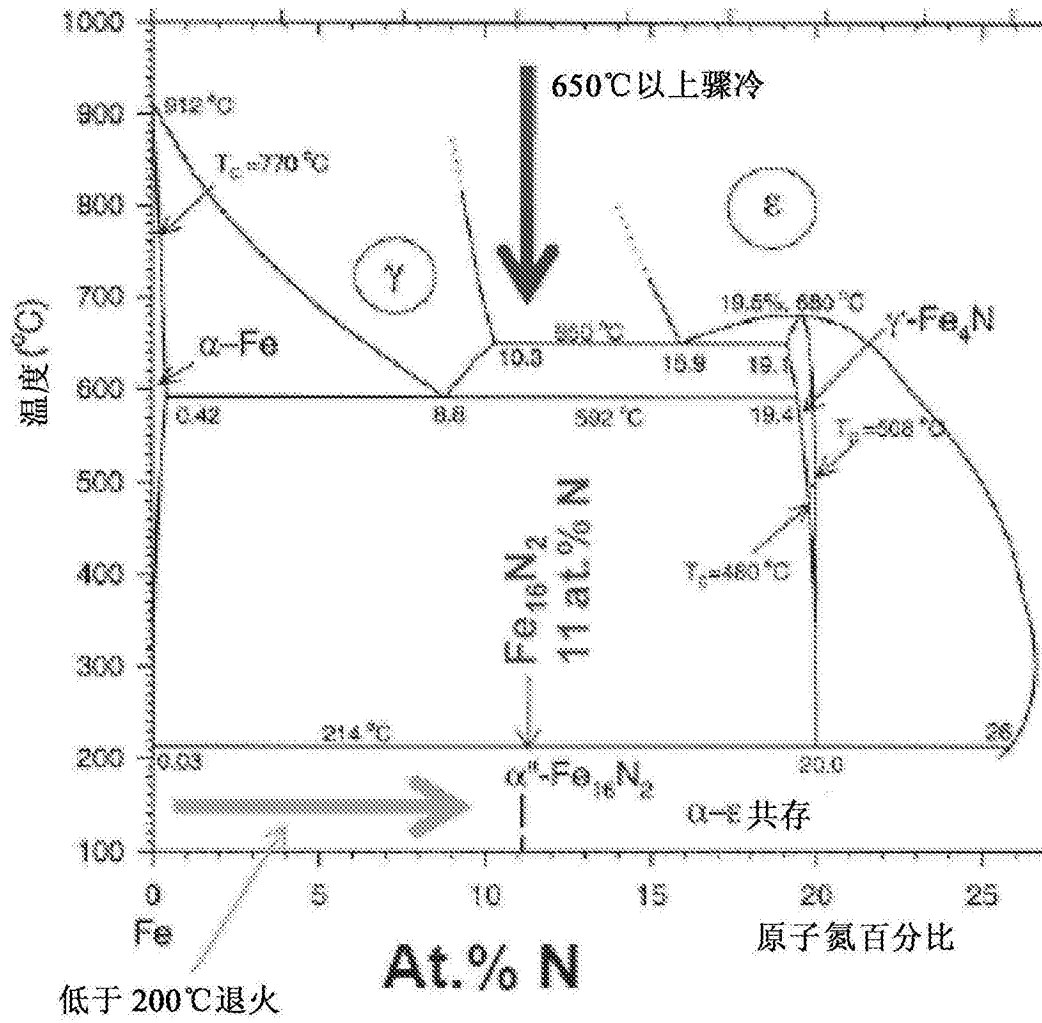


图8

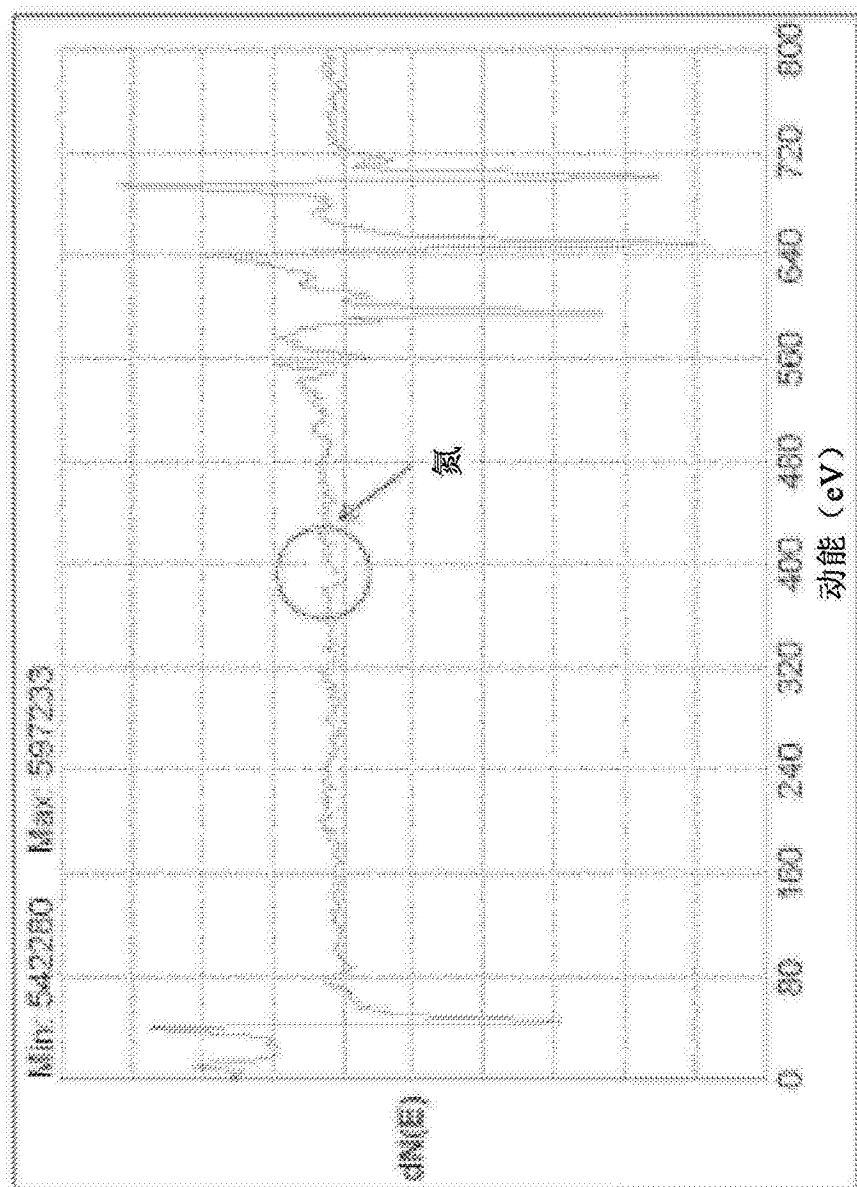


图9

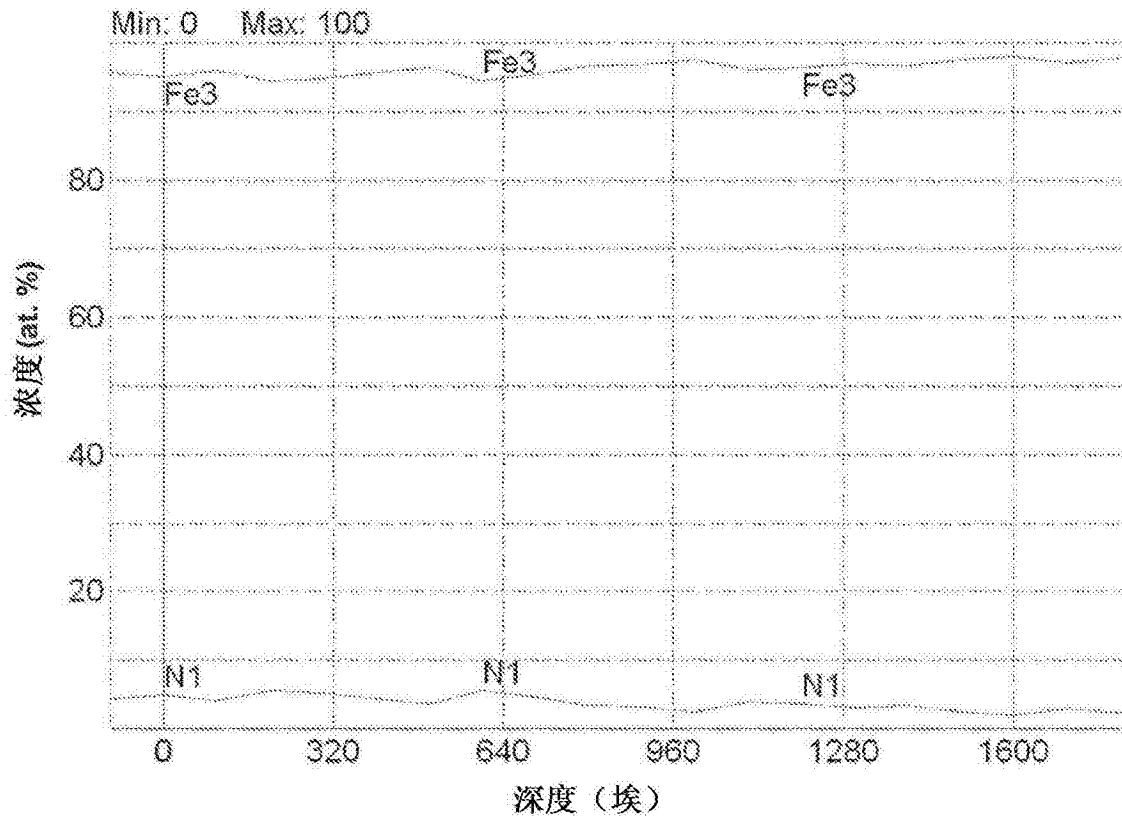


图10

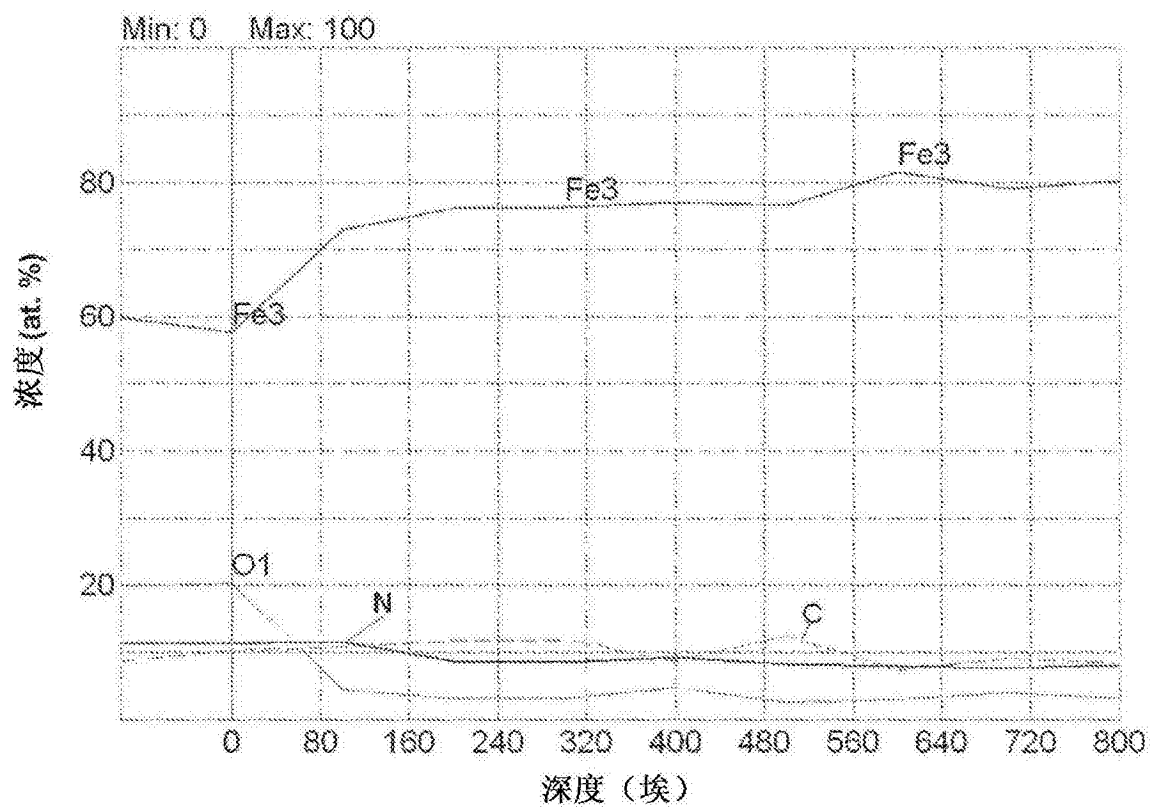


图11

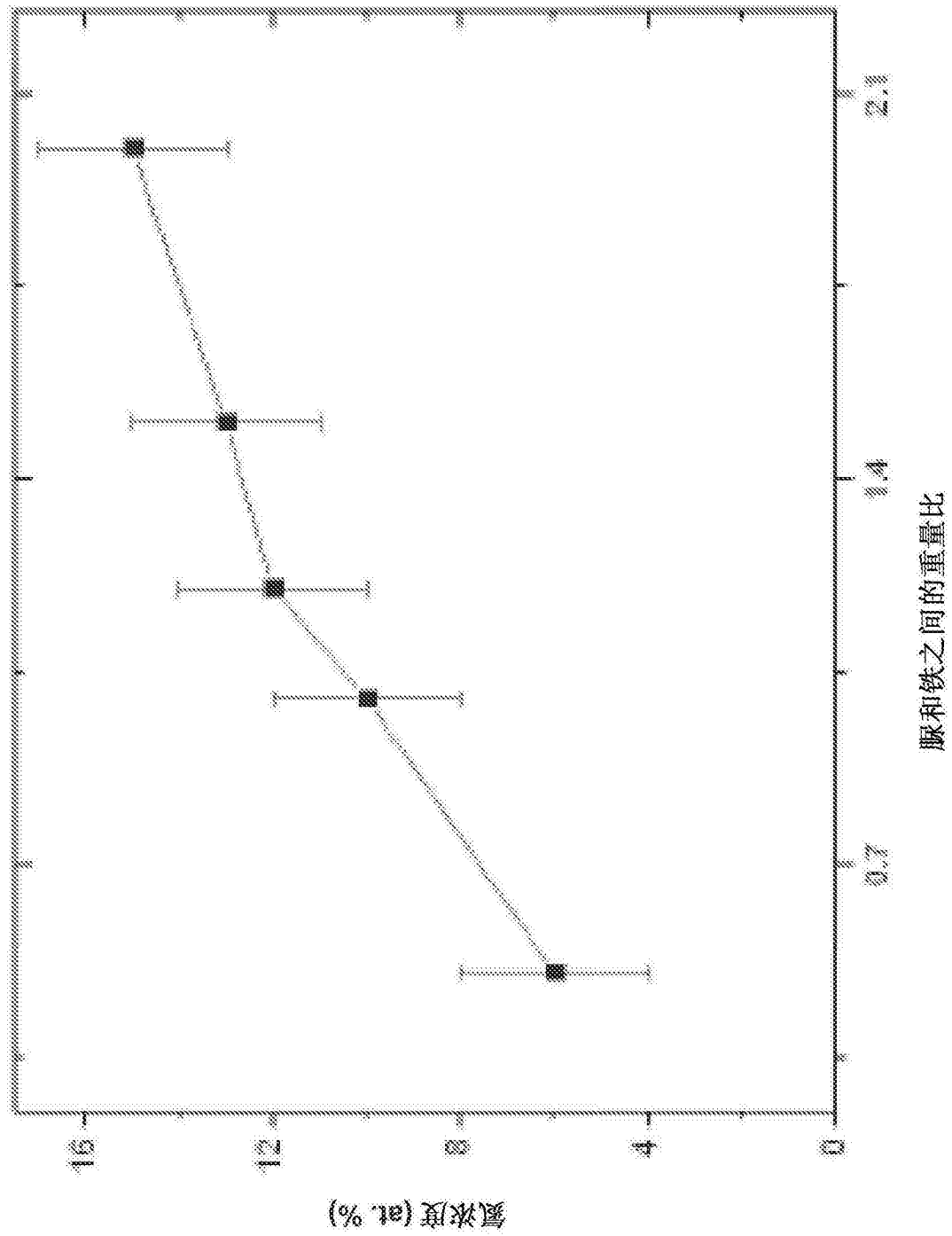


图12

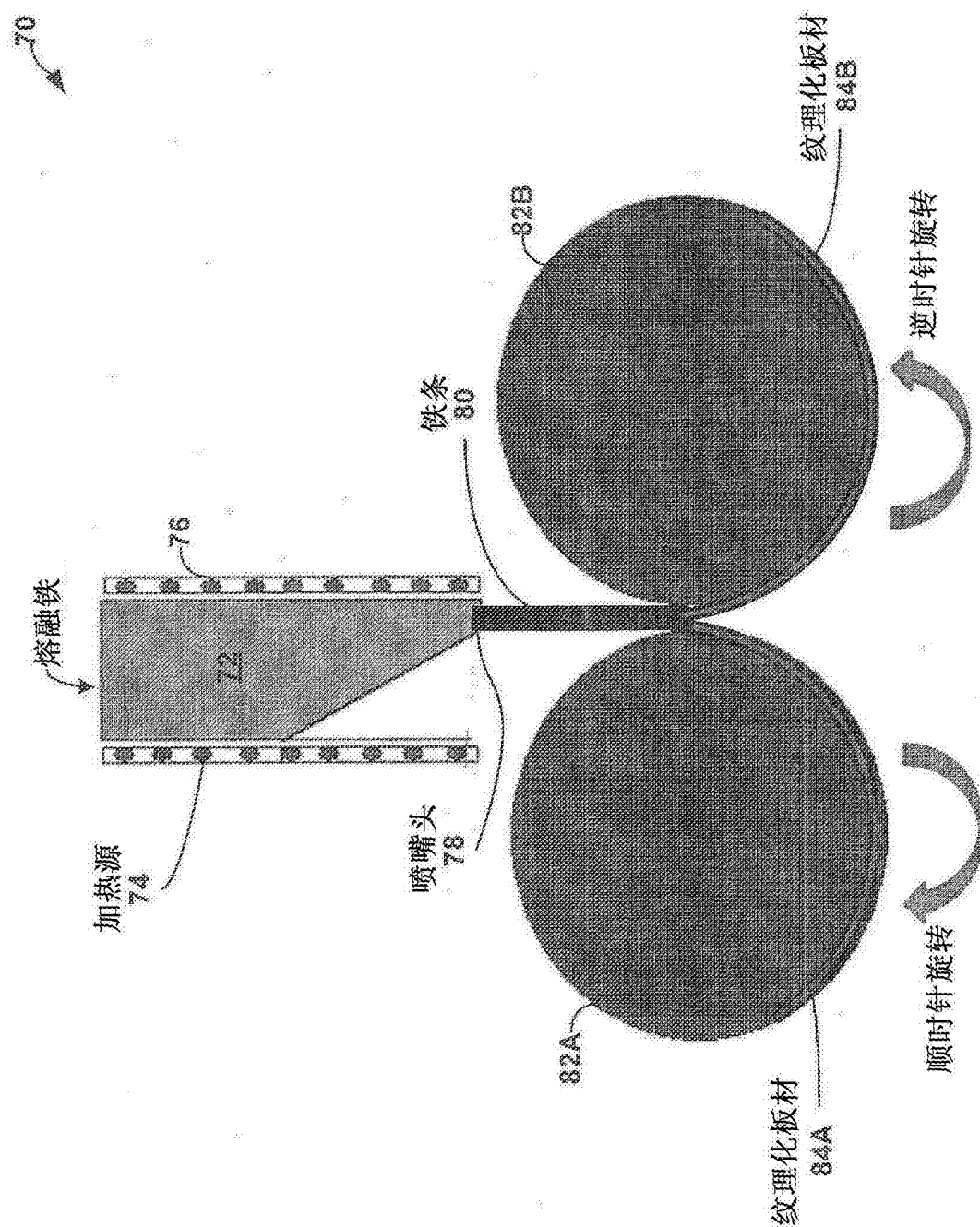


图13