



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115968581 A

(43) 申请公布日 2023.04.14

(21) 申请号 202180049125.1

(22) 申请日 2021.07.22

(30) 优先权数据

2020124384 2020.07.23 RU

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2023.01.09

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2021/042717 2021.07.22

(87) PCT国际申请的公布数据

W02022/020556 EN 2022.01.27

(71) 申请人 TAE技术公司

地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 S·Y·塔斯卡耶夫

A·N·马卡罗夫 E·O·索科洛娃

(74) 专利代理机构 北京市中咨律师事务所

11247

专利代理师 肖威 刘金辉

(51) Int.Cl.

H05H 3/00 (2006.01)

G22F 3/00 (2006.01)

H05H 6/00 (2006.01)

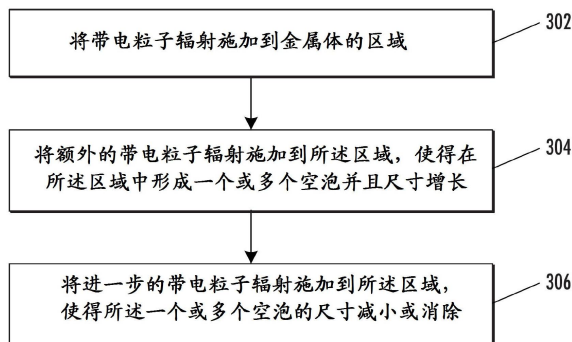
权利要求书6页 说明书20页 附图21页

(54) 发明名称

用于减少和抵抗金属体中的形变的系统、设备和方法

(57) 摘要

提供了金属体,其具有锂层和金属基材。所述金属体可显示出提高的对辐射诱导的形变如起泡的抵抗力。提供了将金属体转变为更抗空泡的结构的方法,作为我们的用于减小或消除先前形成的空泡的方法。还公开了使用所述金属体和方法的系统。



300

1. 一种操作具有包括锂层和金属基材的靶的束系统的方法,所述方法包括:
 - (a) 使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡;和(b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小。
2. 根据权利要求1所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。
3. 根据权利要求1所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流。
4. 根据权利要求1所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。
5. 根据权利要求1所述的方法,其中在步骤(a)和(b)中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。
6. 根据权利要求1所述的方法,其中(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。
7. 根据权利要求1所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。
8. 根据权利要求1所述的方法,其中发射的中子由锂层根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生。
9. 根据权利要求1所述的方法,进一步包括作为硼中子俘获治疗(BNCT)程序的一部分执行(a)和(b)。
10. 根据权利要求1所述的方法,其中所述带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中,靶经历带电微粒辐射,同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。
11. 根据权利要求1所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡的数量和尺寸减小。
12. 根据权利要求1所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡仅尺寸减小。
13. 根据权利要求1所述的方法,其中所述金属基材为铜。
14. 根据权利要求13所述的方法,其中锂层与铜基材接触。
15. 根据权利要求13所述的方法,其中锂层直接形成在铜块基材上。
16. 根据权利要求1所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。
17. 根据权利要求1所述的方法,其中带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。
18. 一种操作具有包括锂层和金属基材的靶的束系统的方法,所述方法包括:
 - (a) 使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡;和(b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在锂层和金属基材之间形成锂化合物层,其尺寸足以减小所述多个空泡的数量和/或尺寸。
19. 根据权利要求18所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。
20. 根据权利要求18所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流。
21. 根据权利要求18所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。

22. 根据权利要求18所述的方法,其中在步骤(a)和(b)中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。

23. 根据权利要求18所述的方法,其中(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

24. 根据权利要求18所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

25. 根据权利要求18所述的方法,其中发射的中子由锂层根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生。

26. 根据权利要求18所述的方法,进一步包括作为硼中子俘获治疗(BNCT)程序的一部分执行(a)和(b)。

27. 根据权利要求18所述的方法,其中带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中使靶经历带电微粒辐射,同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。

28. 根据权利要求18所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡的数量和尺寸减小。

29. 根据权利要求18所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡仅在尺寸上减小。

30. 根据权利要求18所述的方法,其中金属基材为铜,并且锂化合物层为锂铜化合物。

31. 根据权利要求18所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。

32. 根据权利要求18所述的方法,其中带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。

33. 一种操作具有包括锂层和金属基材的靶的束系统的方法,所述方法包括:

(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡;和(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且金属基材从结晶态转变至非晶态达足以使所述多个空泡的数量和/或尺寸减小的程度。

34. 根据权利要求33所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。

35. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流。

36. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。

37. 根据权利要求33所述的方法,其中在步骤(a)和(b)中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。

38. 根据权利要求33所述的方法,其中(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

39. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

40. 根据权利要求33所述的方法,其中发射的中子由锂层根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生。

41. 根据权利要求33所述的方法,进一步包括作为硼中子俘获治疗(BNCT)程序的一部分执行(a)和(b)。

42. 根据权利要求33所述的方法,其中带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中使靶经历带电微粒辐射,同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。

43. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡的数量和尺寸减小。

44. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡仅在尺寸上减小。

45. 根据权利要求33所述的方法,其中(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层。

46. 根据权利要求45所述的方法,其中金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。

47. 根据权利要求45所述的方法,其中(b)使靶材经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层至达到或邻近所述多个空泡的深度。

48. 根据权利要求33所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。

49. 根据权利要求33所述的方法,其中带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。

50. 一种方法,其包括:

(a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射,使得在金属结构的所述区域中形成多个形变,其中所述金属结构包括锂层;和

(b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得所述多个形变的数量和/或尺寸减小。

51. 根据权利要求50所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。

52. 根据权利要求50所述的方法,其中(b)使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射包括使所述区域经历进一步带电粒子辐射,直至形变的数量成数量级减少。

53. 根据权利要求50所述的方法,其中带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中,所述区域经历带电粒子辐射,同时束在束传播方向的横向上在所述区域的表面上移动。

54. 根据权利要求50所述的方法,其中金属基材为铜。

55. 根据权利要求50所述的方法,其中锂层与铜基材接触。

56. 根据权利要求50所述的方法,其中金属结构为等离子体聚变反应堆的一部分,带电粒子辐射从所述聚变反应发射。

57. 根据权利要求50所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。

58. 根据权利要求50所述的方法,其中形变为空泡。

59. 根据权利要求58所述的方法,其中(b)使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得对流力和/或毛细力减小了所述多个形变的数量和/或尺寸。

60. 一种方法,其包括:

(a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射,使得在金属结构的所述区域中形成多个形变,其中所述金属结构包括锂层;和

(b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层,其尺寸足以减小所述多个形变的数量和/或尺寸。

61. 根据权利要求60所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。
62. 根据权利要求60所述的方法,其中(b)使所述区域经历进一步的带电粒子辐射包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。
63. 根据权利要求60所述的方法,其中带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中,所述区域经历带电粒子辐射,同时束在束传播方向的横向上在所述区域的表面上移动。
64. 根据权利要求60所述的方法,其中金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。
65. 根据权利要求60所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。
66. 根据权利要求60所述的方法,其中形变为空泡。
67. 一种方法,其包括:
- (a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射,使得在金属结构的所述区域中形成多个形变,其中所述金属结构包括锂层;和
- (b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得金属基材从结晶态转变为非晶态达足以减小所述多个形变的数量和/或尺寸的程度。
68. 根据权利要求67所述的方法,其中带电粒子辐射为质子束。
69. 根据权利要求67所述的方法,其中(b)使所述区域经历进一步的带电粒子辐射包括使所述区经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。
70. 根据权利要求67所述的方法,其中带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中所述区域经历带电粒子辐射,同时束在束传播方向的横向上在所述区域的表面上移动。
71. 根据权利要求67所述的方法,其中金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。
72. 根据权利要求67所述的方法,其中锂层的厚度为1-300微米。
73. 根据权利要求67所述的方法,其中所述形变为空泡。
74. 根据权利要求67所述的方法,其中(b)使所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层。
75. 根据权利要求74所述的方法,其中金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。
76. 根据权利要求74所述的方法,其中(b)使所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层至达到或邻近所述多个形变的深度。
77. 根据权利要求67所述的方法,其中(b)使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得对流力和/或毛细力减小了所述多个形变的数量和/或尺寸。
78. 一种金属体,其包括:
- 金属基材;和
- 与金属基材耦合的包括锂的层,
- 其中所述金属体暴露于至少 $6.3 \pm 0.6 \times 10^{20}$ 个质子/平方厘米(p/cm^2)的带电粒子能流。
79. 根据权利要求78所述的金属体,其中所述金属体显示出比暴露之前所显示的对空

泡形成的第一抵抗性更大的对空泡形成的第二抵抗性。

80. 根据权利要求78所述的金属体,其中金属基材包括铜。

81. 根据权利要求78所述的金属体,进一步包括在包括锂的层和金属基材之间的锂化合物层。

82. 根据权利要求81所述的金属体,其中包括锂的层包含至少90%的锂-7同位素。

83. 根据权利要求81所述的金属体,其中包括锂的层包含至少98%的锂-7同位素。

84. 根据权利要求78所述的金属体,其中金属基材的第一部分处于非晶态。

85. 根据权利要求84所述的金属体,其中金属基材的第二部分处于结晶态,其中与第二部分相比,第一部分相对更靠近包括锂的层。

86. 根据权利要求78所述的金属体,其被配置用于等离子体聚变反应堆中。

87. 根据权利要求78所述的金属体,其被配置为用作中子产生靶。

88. 一种金属体,其包括:

金属基材;和

位于金属基材上的包括锂的层,

其中所述金属体暴露于带电粒子辐射,使得首先通过带电粒子辐射在金属体中形成一个或多个空泡,然后通过带电粒子辐射减小所述一个或多个空泡的尺寸。

89. 根据权利要求88所述的金属体,其中所述金属体显示出比暴露之前所显示的对空泡形成的第一抵抗性更大的对空泡形成的第二抵抗性。

90. 根据权利要求88所述的金属体,其中金属基材包括铜。

91. 根据权利要求88所述的金属体,进一步包括在包括锂的层和金属基材之间的锂化合物层。

92. 根据权利要求91所述的金属体,其中包括锂的层包含至少90%的锂-7同位素。

93. 根据权利要求91所述的金属体,其中包括锂的层包含至少98%的锂-7同位素。

94. 根据权利要求88所述的金属体,其中金属基材的第一部分处于非晶态。

95. 根据权利要求94所述的金属体,其中金属基材的第二部分处于结晶态,其中与第二部分相比,第一部分相对更靠近包括锂的层。

96. 根据权利要求88所述的金属体,其被配置为用于等离子体聚变反应堆或用作中子产生靶。

97. 一种用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其包括:

铜基材;和

位于铜基材上的包括锂的层,

其中靶暴露于带电粒子辐射,使得首先通过带电粒子辐射在靶中形成一个或多个空泡,然后通过带电粒子辐射减小所述一个或多个空泡的尺寸。

98. 根据权利要求97所述的靶材,其中靶显示出比暴露之前所显示的对空泡形成的第一抵抗性更大的对空泡形成的第二抵抗性。

99. 根据权利要求97所述的靶,其中锂呈固体形式。

100. 根据权利要求97所述的靶,其中锂呈液体形式。

101. 根据权利要求97所述的靶材,其中靶被配置为当暴露于平均能量为1.9-3.0兆电子伏特(MeV)且电流为1-20毫安(mA)的质子辐射时产生中子,直至在所述铜基材中产生至

少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流而基本上不形成空泡。

102. 根据权利要求101所述的靶,其被配置为根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生中子。

103. 一种用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其包括:

包括锂的第一层;

铜基材;和

第二层,其包括位于第一层和铜基材之间的锂铜化合物,

其中靶被配置为当暴露于质子辐射时产生中子。

104. 根据权利要求103所述的靶材,其中靶被配置为在暴露于质子辐射时产生中子,而基本上不会在铜基材中形成空泡。

105. 根据权利要求103所述的靶材,其中靶被配置为在暴露于平均能量为1.9-3.0MeV且电流为1-20mA的质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

106. 根据权利要求103所述的靶,其被配置为根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生中子。

107. 根据权利要求103所述的靶材,其中锂层的厚度为1-300微米。

108. 一种用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其包括:

包括锂的第一层;和

铜基材,其具有处于非晶态的第一部分,

其中靶被配置为当暴露于质子辐射时产生中子。

109. 根据权利要求108所述的靶材,其中靶被配置为在暴露于质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

110. 根据权利要求108所述的靶材,其中靶被配置为在暴露于平均能量为1.9-3.0MeV且电流为1-20mA的质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

111. 根据权利要求108所述的靶,其被配置为根据反应 $p+{}^7\text{Li} \rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生中子。

112. 根据权利要求108所述的靶材,其中第一层的厚度为1-300微米。

113. 根据权利要求108所述的靶材,其中铜基材的第二部分处于结晶态,其中第一部分比第二部分相对更靠近包括锂的第一层。

114. 根据权利要求108所述的靶材,进一步包括在第一层和铜基材之间的锂铜化合物层。

用于减少和抵抗金属体中的形变的系统、设备和方法

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求2020年7月23日提交的俄罗斯专利申请2020124384的优先权,该申请标题为“用于减少和抵抗金属体中的形变的系统、设备和方法”,其全部内容出于所有目的通过引用并入本文中。

[0003] 领域

[0004] 本文所述的主题一般涉及用于降低金属体中形变形成的可能性和/或减小形变尺寸的系统、设备和方法。

[0005] 背景

[0006] 在许多应用中,金属体被放置在受到相对大量带电粒子辐射的环境中。这些应用的实例包括医疗(例如癌症)和诊断、核聚变、空间技术、同位素生产、有害物质检测、贵金属矿石分析、成像等。

[0007] 暴露于足量的带电粒子辐射可导致某些类型的金属体经历潜在的降解状态,其中辐射引发金属体内产生形变。这些形变通常呈空泡形式,导致这种形变的条件通常被称为起泡。起泡可由这些金属体内形成分子氢气引起。当带电粒子辐射(例如质子辐射)与金属电子复合形成分子氢气时,可以形成氢气。所述气体可积聚在金属体内的袋(例如,初生气泡)中。持续暴露于辐射可产生额外的氢气,这导致气袋生长,并潜在地表现为金属体表面上或附近的空泡(例如,裂纹、隆起、薄片和/或其他形变)。这种形式的起泡更普遍地是难溶氢的金属(例如铜、铝、钼、铁、银、钨、铂和金)的特性,而不是氢良溶金属(例如碱金属、碱土金属、钛、钽、铌、钒、镍和钯)的特性。(例如,参见Badruttinov等, *In Situ Observations of Blistering of a Metal Irradiated with 2-MeV Protons*, *Metals* 2017,7,558。)

[0008] 由该空泡引起的材料形变可能是显著的,并且取决于应用的类型,可能导致问题。因此,起泡通常被认为是带电粒子辐射暴露的不良影响。

[0009] 因此,需要具有抗形变特性的系统、设备和方法,例如在暴露于带电粒子辐射的金属体中抵抗空泡形成、降低空泡形成的可能性和/或减小已经形成的空泡的尺寸的系统、设备和方法。

[0010] 概述

[0011] 本文提供了当受到带电粒子辐射时显示出改进的抗形变特性的系统和设备的示例性实施方案,以及用于将这些特性引入所述系统和设备中的方法。这些抗形变特性可包括当受到辐射时对形变形成的抵抗性增加或形变形成的可能性降低。这些方法还包括减小已经由辐射暴露形成的形变的尺寸并且可以减小已经形成的形变数量的实施方案。还提供了显示出这些改进的抗形变特性的制造系统和设备的方法以作为我们调节制造系统和设备的方法,从而使其显示出这些改进特性的方法。形变的实例可包括但不限于由氢气形成引起的空泡。上述实施方案的益处的实例可包括防止形成形变、减轻已经形成的形变的影响(例如,愈合或减轻)、延长受到带电粒子辐射的系统和设备的使用寿命等。

[0012] 在研究下文附图和详述后,本文所述主题的其他系统、设备、方法、特征和优点对于本领域技术人员来说将是显而易见的或将变得显而易见。旨在将所有这些其他系统、方

法、特征和优点都包括在本说明书中,包括在本文所述的主题的范围内,并受所附权利要求的保护。在权利要求中没有明确描述那些特征的情况下,示例性实施方案的特征决不应被解释为限制所附的权利要求。

[0013] 附图简述

[0014] 本文所述主题的细节,就其结构和操作而言,可以通过研究附图而变得显而易见,在附图中,相似的附图标记表示相似的部分。附图中的组件不一定按比例,而是强调说明本主题的原理。此外,所有插图都旨在传达概念,其中相对尺寸、形状和其他详细属性可能是示意性的,而不是字面上或精确地说明。

[0015] 图1A、1B、1C和1D是描绘金属体的示例性实施方案的透视图。

[0016] 图1E是描绘沿图1D的线1E-1E的截面截取的金属体的示例性实施方案的横截面图。

[0017] 图2A是描绘第一次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0018] 图2B是描绘沿图2A的线2B-2B截取的示例性实施方案的横截面图。

[0019] 图2C是描绘第二次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0020] 图2D是描绘沿图2C的线2D-2D截取的示例性实施方案的横截面图。

[0021] 图2E是描绘第三次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0022] 图2F是描绘沿图2E的线2F-2F截取的示例性实施方案的横截面图。

[0023] 图2G和2H是分别描绘在被离子束切割之前和之后粗铜表面上的空泡的实例的图像。

[0024] 图3是描绘减少金属体中空泡的方法的示例性实施方案的流程图。

[0025] 图4A是描绘第一次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0026] 图4B是描绘沿图4A的线4B-4B截取的示例性实施方案的横截面图。

[0027] 图4C是描绘第二次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0028] 图4D是描绘沿图4C的线4D-4D截取的示例性实施方案的横截面图。

[0029] 图4E是描绘具有部分形成的化合物层的示例性实施方案的横截面图。

[0030] 图4F是描绘第三次暴露于带电粒子辐射期间金属体的示例性实施方案的透视图。

[0031] 图4G是描绘沿图4F的线4G-4G截取的示例性实施方案的横截面图。

[0032] 图5是描绘减少金属体中空泡的方法的示例性实施方案的流程图。

[0033] 图6A是描绘具有部分形成的非晶区域和空泡的示例性实施方案的横截面图。

[0034] 图6B是描绘具有显著形成的非晶区域和很少到没有起泡的金属体的示例性实施方案的横截面图。

[0035] 图7是描绘减少金属体中空泡的方法的示例性实施方案的流程图。

[0036] 图8A是描绘基于加速器的中子束系统的示例性实施方案的示意图。

[0037] 图8B是描绘被配置为产生中子的靶的示例性实施方案的透视图。

[0038] 图8C是沿图8B的线8C-8C截取的实施方案的横截面图。

[0039] 图8D是具有锂化合物层的实施方案的另一横截面图。

[0040] 图8E是具有非晶区域的实施方案的另一横截面图。

[0041] 图8F和8G是分别示出束移动的阶梯图案和螺旋图案的靶的示例性实施方案的正视图。

[0042] 图9A、9B和9C是描绘具有抗形变益处的用靶产生中子束的方法的示例性实施方案的流程图。

[0043] 图10A、10B和10C是描绘本文所述实施方案的实验验证期间收集的数据的图。

[0044] 图11A、11B和11C是暴露于质子束之后的靶区域的图像。

[0045] 详述

[0046] 在详细描述本主题之前,应当理解,本公开内容不限于所描述的特定实施方案,这些实施方案当然可以变化。还应理解,本文使用的术语仅用于描述特定实施方案的目的,而非旨在进行限制,因为本公开内容的范围将仅由所附权利要求限定。

[0047] 作为本文公开的实施方案的主题的金属体可以用于任何广泛的应用(例如工业、商业或研究等)中,因此可以具有适合这些应用的需要的任何广泛的形状、尺寸或配置。本文公开的金属体至少包括锂层和金属基材。金属基材可主要由一种金属元素(例如,具有高纯度的铜基材)、两种或更多种金属元素的合金、一种或多种金属元素与一种或多种非金属元素的化合物等组成。用于基材104的金属的实例包括但不限于:铜、铝、钼、铁、银、钯、钽、碳(例如石墨和金刚石相)、钨、铂或金。锂层同样可主要由锂组成,或者可以是锂合金或化合物等。锂层可呈固体或液体形式。在本文所述的实施方案中,锂层可由一种或多种锂同位素组成。例如,在本文所述的实施方案中,锂层可由至少90%的锂-7(${}^7\text{Li}$)、至少92%的锂-7、至少95%的锂-7、至少98%的锂-7、至少99%的锂-7和至少99.9%的锂-7等组成。其余可为锂-6同位素(${}^6\text{Li}$)、其他锂同位素、杂质或其他元素(例如在锂化合物中)。

[0048] 图1A-1C是描绘具有锂层103和金属基材104的金属体102的示例性实施方案的透视图。尽管锂层103被显示为具有暴露表面(例如,在这些视图中的顶部),但锂层103也可以嵌入金属体102内,使得其不构成金属体102的最外表面。同样,尽管基材104被显示为具有暴露表面(例如,在底部)的块状基材,但基材104也可以嵌入金属体102内,使得其不构成最外表面(例如通过在金属体102中包含其他结构或材料)。

[0049] 在图1A中,金属体102具有平面或平坦的形式。在图1B中,金属体102具有在Y-Z平面中呈现出曲率的凹形形式;在图1C中,金属体102具有在Y-Z平面中呈现出曲率的凸形形式。凹形和凸形是从读者的角度表示的。图1A-1C描绘了表征金属体102的形状和表面轮廓的一些基本实例。金属体102可具有更复杂的形状和表面轮廓,包括将图1A-1C所示的两种或更多种形状和表面轮廓组合的那些,或者不同和/或更复杂的那些。图1A-1C中所示的金属体102可以表示金属体102的整个物理延度,或者可以表示更大的金属体的一部分或一段。金属体102的示例性三维形状的列表包括但不限于:板或镀层、圆盘、支柱、立方体或其部分、长方体或其部分、圆柱体或其部分、棱柱或其部分、圆锥或其部分,金字塔或其部分、球或其部分、圆环或其部分、中空腔或其部分、上述两种或更多种的任意组合等。

[0050] 图2A-2F描绘了在暴露于带电粒子辐射的各个阶段期间在金属基材104上或附近具有锂层103的金属体102的示例性实施方案。尽管金属体102在此被描绘为平面(平坦)的,但这些图描述的机构同样适用于本文讨论或涵盖的金属体102的所有形状和尺寸配置。

[0051] 图2A是描绘第一次暴露于带电粒子辐射期间具有表面204的区域201的金属体102的透视图。图2B是描绘沿图2A的线2B-2B截取的金属体102的横截面图。带电粒子辐射的入射方向由矢量203表示,其在该实例中是表面204的法向。在该实施方案中,能流(随时间积分的通量,其中通量是瞬间单位面积的粒子)在区域201上是恒定的(例如,整个表面区域

201同时暴露于均匀分布的带电粒子辐射,或者具有比区域201小的横截面积的带电粒子辐射束以均匀的方式在区域201上移动,如本文将描述的那样)。在图1和图2的第一次下,金属体102中没有发生起泡。

[0052] 图2C是描绘金属体102的另一透视图,图2D是描绘沿图2C的线2D-2D截取的金属体102的横截面图。区域201暴露于额外的、长时间的带电粒子辐射导致形变208的形成,在该实例中,形变208是空泡。空泡208的视觉外观和形成机理可能不同。在该实例中,基材104中的气袋209的形成使周围材料形变,表现为表面204的区域201中可见的空泡(例如,表面轮廓的偏差、凸起的表面形成、隆起、裂纹)。

[0053] 起泡阈值(例如起泡开始时的剂量)取决于各种因素,例如金属基材的类型、辐射期间的样品温度、辐射类型(例如离子、质子)、辐射能量等。此前的研究,如Badruttinov等,“In Situ Observations of Blistering of aMetal Irradiated with 2-MeV Protons”, *Metals* 2017,7,558指出,铜表面的起泡阈值取决于铜纯度,铜越纯,阈值越高。Badruttinov指出,对于2兆电子伏特(MeV)的质子能量,铜的最大阈值为 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-2}$,最小值可以低7倍。此外,铜表面上的空泡尺寸取决于铜纯度,其中铜越纯,空泡越大。2MeV质子辐射产生的铜空泡尺寸为 40 ± 20 微米至 160 ± 50 微米。图2G和2H是描绘在被离子束切割之前和之后99.99996%粗铜表面上的空泡的实例的图像。在图2H中,在切割的空泡内部可见气袋。

[0054] 图2E是描绘金属体102的另一透视图,图2F是描绘沿图2E的线2F-2F截取的金属体102的横截面图。在形成空泡208之后,区域201暴露于进一步的带电粒子辐射减小或降低了空泡208的尺寸。图2F显示了与图2D相比,气袋209的体积减小,这又减小了空泡208的高度(图2F与图2D相比)和空泡208凸起部分的表面积(图2E与图2C相比)。

[0055] 在该实施方案中,带电粒子辐射的施加,至少到起泡减少开始的点,导致具有增强的空泡形成抵抗性的金属体102。当辐射施加超过该点时,空泡208继续减小,并且空泡形成的抵抗性进一步增加。因此,经历图2A-2F所述方法的金属体102经历了一种形式的材料调节,这增强了其对进一步空泡形成的抵抗性。

[0056] 图3是描绘图2A-2F所述的工艺的方法300的示例性实施方案的流程图。在步骤302中,将带电粒子辐射施加到金属体102的区域(例如,如图2A-2B所述,具有锂)。在步骤304中,施加额外的带电粒子辐射,使得在该区域中形成一个或多个空泡并且尺寸增大(例如,如图2C-2D所述)。在步骤306中,施加进一步的带电粒子辐射,使得所述一个或多个空泡的尺寸减小。步骤306可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至消除一些或所有空泡,或者在消除空泡之后继续,这取决于应用。在一些实施方案中,步骤304和306之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,该区域中的空泡形成停止或基本上停止(或者该区域中空泡尺寸生长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。进一步施加带电粒子辐射时

[0057] 锂层103可以与金属基材104直接接触,如图1A-1C所示。在本文所述的某些实施方案中,化合物可以形成或位于锂层103和金属基材104之间。图1D是描绘具有锂层103、金属基材104以及位于103和104之间的锂金属化合物层105的平面状金属体102。该化合物可以包括锂(来自层103)和金属基材104的一种或多种金属。例如,当基材104为铜时,则层105可为锂铜化合物(例如, LiCu)。该化合物层105的形成可由金属体102与带电粒子辐射本身的相互作用、由带电粒子辐射产生的热(或由辐射引起的核反应)或由其他机理引起。在金属基材104本身是层状结构的实施方案中,可以在锂层103和金属基材104的最相邻层之间形

成锂化合物层105。

[0058] 图1E是描绘沿图1D的线1E-1E的截面截取的该示例性实施方案的横截面图。如图1E所标记的那样,锂层103具有厚度110,锂化合物层105具有厚度112,基材104具有厚度114。此处,相对厚度仅仅是示例性的。尽管在大多数实施方案中基材104通常是最厚的层,但这不是必需的。锂层103和锂化合物层105之间的过渡120可以是突变的或渐变的,锂化合物层103和基材104之间的过渡130也是如此。

[0059] 图4A-4G描绘了带电粒子辐射暴露的各个阶段的金属体102的另一示例性实施方案。与图2A-2F的实施方案一样,金属体102在此被描绘为平面(平坦)的,但是这些图描述的主题同样适用于本文讨论或涵盖的金属体102的所有形状和尺寸配置。在图4A-4G所示的操作序列期间形成锂化合物层105。在这些实施方案(以及图5和9B等的实施方案)中,空泡尺寸减小和消除的机理是锂化合物层的形成;然而,此处所述的实施方案不限于此(例如,如图3、7、9A和9C的实施方案所示),并且此处所述的主题的范围也涵盖其他机理。

[0060] 图4A是描绘金属体102的透视图,其中表面204的区域201第一次暴露于带电粒子辐射。图4B是描绘沿图4A的线4B-4B截取的金属体102的横截面图。图4A-4B分别类似于图2A-2B。带电粒子辐射的入射方向由矢量203表示,其在该实例中是表面204的法向。在该实施方案中,能流在区域201上是恒定的(例如,整个表面区域201同时暴露于带电粒子辐射的均匀分布,或者具有比区域201小的横截面积的带电粒子辐射束以均匀的方式在区域201上移动,如本文所述)。在图4A和4B的第一次下,金属体102中没有发生起泡。

[0061] 图4C是描绘金属体102的另一透视图,图4D是描绘沿图4C的线4D-4D截取的金属体102横截面图。区域201暴露于额外的、长时间的带电粒子辐射导致了空泡208的形成。空泡的视觉外观和形成机理可能不同。在该实例中,基材104中的气袋209的形成使周围材料形变,表现为表面204的区域201中可见的形变(例如,表面轮廓的偏差、凸起的表面形成、隆起、裂纹等)。在图4A-4D所示的阶段,或者尚未形成锂化合物层,或者已经形成的任何锂化合物层的厚度不足以防止空泡形成或防止空泡形成,如图4E所示。

[0062] 图4F是描绘金属体102的另一透视图,图4G是描绘沿图4F的线4G-4G截取的金属体102的横截面图。此处,在形成空泡208之后,区域201暴露于进一步的带电粒子辐射导致在区域201内形成足够尺寸(例如,图4G中的深度402)的锂化合物层105,从而导致空泡208的尺寸减小或降低。在某些实施方式中,希望形成化合物层105,使得在金属体102的相关部分上均匀地存在足够的尺寸(例如,在整个区域201上存在)。图4G显示,在该实施方案中,锂化合物层105的深度已达到气袋209或接近气袋209,从而允许袋209内的气体扩散通过层105和103并离开金属体102。与仅铜相比,锂铜化合物层105具有提高的氢气扩散率,因此允许袋209的体积内的氢气向外扩散并逸出。结果,与图4D相比,袋209的尺寸减小,这又使得空泡208的凸起部分的高度减小(图4G与图4D相比),且空泡208的凸起部分的表面积减小(图4F与图4C相比)。

[0063] 由于空泡208的视觉外观和形成机理可能不同,因此减少空泡的方式也可能不同。空泡208尺寸减小的实例包括减小表面204上空泡208的暴露表面积、减小空泡208的高度(相对于相邻未起泡表面的高度或相对于起泡前的表面高度测量)、减小气袋209的高度或体积、减小表面204中裂纹的尺寸(宽度或长度)、减小从表面204弯折的材料薄片的高度等。也可以基本上消除凸起形式的空泡208(例如,图2C-2D和图4C-4D),从而使得空泡的减少导

致金属体102的特定区域中空泡208的总数量减少。

[0064] 在图4A-4G的实施方案中带电粒子辐射的施加,至少在形成足够尺寸以允许减少空泡的锂化合物层105的点上,形成了具有提高的空泡形成抵抗性的金属体102。当辐射施加超过该点时,空泡208继续减小,并且空泡形成的抵抗性进一步增加。因此,经历图4A-4G所述工艺的金属体102经历了一种形式的材料调节,这增强了其对空泡形成的抵抗性。

[0065] 空泡通常在入射粒子停止处的材料块中形成。对于相同能量的粒子,行进范围通常遵循概率分布(例如,高斯分布),并随着能量的增加而增加。突入范围主要取决于材料、入射粒子的能量和类型。例如,入射到不同材料上的能量为2MeV的质子将具有根据表1的近似突入范围。

[0066] 表1

[0067]

材料	近似突入范围(微米)
铝	44
铍	50
碳	38
铜	19
铁	20
锂	160
钼	18
钽	17
钛	30
钨	14
钒	23

[0068] 在非锂块状基材上增加锂层103将使入射粒子稍微减速,并且减少表1的停止距离。表1可用于确定在块状材料中产生空泡时的厚度的相对差异,并且对于确定化合物层105达到粒子突入范围时的相对厚度是有指导意义的。

[0069] 图5是描绘图4A-4G所述工艺的方法500的示例性实施方案的流程图。在步骤502中,将带电粒子辐射施加到金属体102的区域(例如,如图4A-4B所述)。在步骤504中,施加额外的带电粒子辐射,使得在该区域中形成一个或多个空泡并且尺寸增大(例如,如图4C-4D所述)。在步骤506中,施加进一步的带电粒子辐射,使得形成具有足够尺寸(例如,厚度)的锂化合物层,以达到或接近(几乎达到)所述一个或多个空泡。达到或几乎达到一个或多个空泡可以允许一个或多个空泡的尺寸通过进一步辐射减小或消除。步骤506可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除、直至形成所需尺寸或厚度的锂化合物层,或者根据应用而甚至更长。在一些实施方案中,步骤504和506之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,该区域中的空泡形成停止或基本上停止(或者该区域中空泡尺寸增长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。

[0070] 在某些实施方案中,带电粒子辐射可通过破坏结晶键而导致基材材料从结晶(包括结晶和多晶)态部分或完全转变为非晶态。图6A-6B是类似于图4E-4G的横截面图,其描绘了非晶块状材料的形成。在这些实施方案中,向非晶材料的转变发生在锂化合物形成期间和之后,尽管非晶材料的形成可以独立于化合物形成而发生。在图6A中,带电粒子辐射203

导致形成带有气袋209的空泡208。锂化合物层的形成沿箭头602的方向发生。基材材料(例如,铜)可能部分发生从结晶态到非晶态的转变,如图案604所示。持续暴露于辐射203会导致化合物层105从表面204变厚,并且在化合物层105和基材区域104中,特别是在气袋209和锂层103之间的空泡壳区域中,导致额外的材料转变为非晶态604。这些区域中向非晶态的转变可以是完全的或部分的(例如,超过50%、超过75%或超过90%)。在某些实施方案中,这种向非晶态的转变可以是减少或消除空泡的原因之一或主要原因。非晶转变可以与化合物层105的形成一起起作用,从而引起空泡减少。其他机理也可能作出贡献。

[0071] 图7是描绘图6A-6B所述工艺的方法700的示例性实施方案的流程图。在步骤702中,将带电粒子辐射施加到金属体102的区域(例如,类似于图4A-4B)。在步骤704中,施加额外的带电粒子辐射,使得形成一个或多个空泡并且尺寸增长,并且金属体102的基材区域可以部分地从结晶态转变为非晶态(例如,如图6A所述)。这可能伴随着锂化合物层的生长和该化合物从结晶态到非晶态的部分转变。在步骤706中,施加进一步的带电粒子辐射,使得结晶态向非晶态的转变持续到足以允许空泡208减少的程度(例如,50%、75%、90%或更大的向非晶态的转变)。这种转变可以在整个金属体102中发生,但是为了减少空泡,该转变至少发生在空泡和顶表面204之间的基材(和化合物,如果存在的话)的区域中(锂层不需要转变)。在一些实施方案中,空泡减少也可以取决于化合物层扩大到达到或接近(几乎达到)一个或多个空泡的深度。步骤706可以持续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除、直至形成所需尺寸或厚度的锂化合物层,或者取决于应用而更长。在一些实施方案中,步骤704和706之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,该区域中的空泡形成停止或基本上停止(或者该区域中空泡尺寸增长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。

[0072] 本文所述的金属体102的实施方案可以在金属102是其部件或元件的装置的操作期间经历方法300、500或700,并且因此可以在操作本身期间经历抗空泡调节。替代地(或者额外地),金属体102的实施方案可以在操作之前经历方法300、500或700,作为制造或调节的方法,然后经调节的材料可以组装或安装为更大系统或装置的一部分,或者以其他方式首先在具有增加的抗空泡性的所需应用中操作。

[0073] 在本文所述的该实施方案和其他实施方案中,带电粒子辐射可以连续或间歇地施加,以实现空泡减少和/或抗空泡性。例如,在辐射施加程序期间,可以以连续或脉冲方式(例如,以恒定或可变频率间歇地)施加辐射(例如,通过束或反应)。该辐射施加程序可以在相当长的一段时间内停止(例如,当系统断电或以其他方式离线时,例如进行系统维护等),然后重新启动,并且即使在整个系统的这种间歇循环的情况下,仍然可以获得抗空泡的益处。

[0074] 在本文所述的工艺(参照上文图2A-7和下文其他实施方案)内操作或根据该工艺调节的金属体102可以用于许多应用中。例如,金属体102可用于等离子体聚变设备,例如用于聚变反应堆的容纳室的面向等离子体的壁。金属体102还可用于粒子加速器、离子注入设备、卫星和航天器、同位素生产设备、有害物质检测设备、贵金属矿石分析设备、成像设备等。

[0075] 值得注意的一个示例性应用是硼中子俘获治疗(BNCT),其中金属体102可以配置为用作在中子束系统中产生中子的靶装置。本文将参照图8A更详细地描述中子束系统800的实例。

[0076] BNCT是一种用于癌症治疗的放射疗法。在BNCT中,给患者服用含硼药物,所述药物具有使硼被患者体内任何肿瘤部位的癌细胞选择性吸收的特性。然后患者暴露于中子辐射,特别是能量为1千电子伏特(keV)至10keV,在某些情况下高达30keV的超热中子。这些超热中子通过核反应与硼相互作用,产生具有很短范围的 α 粒子,例如一个细胞厚度的数量级。因此,含硼癌细胞暴露于超热中子会产生 α 辐射,其剂量足以杀死肿瘤细胞,而不会对周围组织产生严重的副作用。

[0077] 为了产生足够的超热中子通量,将带电粒子束如质子(或正氢离子(H⁺))束射向⁷Li靶,随后的核反应 $p+{}^7\text{Li}\rightarrow n+{}^7\text{Be}$ 产生中子束。⁷Li通常被认为是产生中子的最佳靶材料,原因有二。首先,它提供了质子到中子的最高转换比之一。第二, $p+{}^7\text{Li}$ 是吸热反应,需要质子能量高于一定的阈值,约1.9MeV,才能产生中子。在该阈值下或高于该阈值(例如,1.9-约3.0MeV)产生的中子能量通常小于1MeV,并且可以相对容易地减慢到约1-30keV的超热范围。

[0078] 中子可以用慢化剂减速。由于弹性和非弹性散射,借助慢化剂核减速,这具有概率特征,因为中子运动类似于布朗粒子运动。结果,一次中子能量越低,中子能谱越窄。在这种情况下,⁷Li(p,n)⁷Be反应的特征是在中子产生阈值附近横截面的快速增长,这似乎是理想的,因为在软(例如,<1keV)和硬(>30keV)能量范围内产生的中子量可以最小化。临床医生通常希望尽量减少软中子和硬中子的数量,因为它们会导致更高的患者毒性和更严重的副作用。因此,在高于⁷Li反应的能量阈值的这个范围内操作的中子束系统可以配置为在中子产额和所得中子能谱的质量之间达到最佳平衡。

[0079] 由于产生中子的反应是吸热的,因此会产生大量的热量,⁷Li靶(通常称为锂靶)必须考虑到这一点。现有的解决方案将锂层放置在具有高导热性的金属基材(例如,铜)上,并结合水冷却以保持靶或靶组件的温度足够低,使得锂不会蒸发(例如,并在束线内形成放射性污染)。然而,由于施加高能质子束,这些现有解决方案容易起泡,并且已经投入了大量精力来防止在锂靶中形成起泡。

[0080] 防起泡技术通常涉及在锂和下面的铜基材之间放置防起泡材料。使用了具有高氢扩散系数的材料(例如,钽、铌、钒和钼),然而这些材料往往具有比铜低得多的热导率,因此可能使靶的冷却变得更加困难。

[0081] 通常,由于锂具有高化学活性、低熔点(例如,182°C)和低热导率(例如,固态为71W/(mK),液态为43W/(mK))的特征,因此设计锂中子生成靶可能是一项困难的技术任务。还应考虑其他因素。例如,除了产生热量,中子的产生还伴随着 γ 射线通量。为了显著降低锂表面上的 γ 射线通量和温度,锂层应足够薄,使得质子在其中减速到中子产生的阈值。还希望使用具有相对高纯度的锂以最大化中子产额。例如,相对纯的锂提供的中子产额比氢化锂高约1.43倍,比氧化锂高约2倍,比氟化锂高约3.3倍。为了防止锂蒸发(这可能会用放射性Be7(俘获在锂内部)污染束系统和设施),应该对靶进行强力冷却。应当使用薄的下层基材,以使束成形组件的中子减速器尽可能靠近锂层。在一些情况下,希望靶的总厚度小于质子的总突入范围。此外,希望基材抗辐射损伤、易于制造并且易于从系统中移除以便于处理。

[0082] 图8A是描绘基于加速器的中子束系统800的示例性实施方案的示意图。尽管中子束系统的配置不同,但在该实施方案中,系统800包括用作离子束注入器的低能束线820、耦

合到离子束注入器820的高压(HV) 串列加速器840、以及从串列加速器840延伸到锂靶组件801的高能束线850, 锂靶组件可以容纳锂靶802(见图8B)。离子束注入器820可以包括离子源822、从离子源824延伸的离子源真空箱824、耦合到离子源真空箱824的预加速器管826, 以及在预加速器管826和串列加速器840之间耦合的泵送室(例如, 具有内置法拉第杯) 828。离子源822用作带电粒子(在示例性实施方案中为负氢离子) 的源, 该带电粒子可被加速、调节并最终用于在输送到锂靶802时产生中子。

[0083] 负离子产生机理不同的两种负离子源822是: 表面型和体积型。表面型要求在特定内表面上存在铯(Cs)。在公开的PCT申请W02014039579A2中提供了对表面型负离子源的讨论, 出于所有目的, 该PCT申请全文通过引用并入本文。体积型依赖于高电流放电等离子体体积中负离子的形成。这两种类型的离子源都可以提供足够的负离子电流。

[0084] 离子源真空箱824、预加速器管826和泵送室828被配置为将离子束从离子源822传输到串列加速器840的输入端。该低能束线820可以具有一个或多个磁性元件以聚焦和引导束, 以使束与束线轴线和串列加速器840接收角相匹配。

[0085] 预加速器管826提供了从离子源822注入的负离子束的加速。预加速器管824起到束聚焦的重要作用, 以实现整体聚焦, 从而匹配高压串列加速器840入口处的孔面积。

[0086] 串列加速器840由耦合到其上的高压电源842供电, 可产生等于至2倍于施加到串列加速器840内的加速电极的电压的能量。质子束的能量水平通过将串列加速器840输入端到最内侧高电位电极的负氢离子束加速, 从各离子上剥夺两个电子, 然后通过相同的施加电压在下游将得到的质子(H⁺离子) 加速来实现。

[0087] 高能束线850将质子束从串列加速器840的输出端传输到位于延伸到患者治疗室的束线分支870末端的靶组件801中的靶802。在图8A所示的示例性实施方案中, 高能束线850包括三个分支870、880和890, 以延伸到三个不同的患者治疗室中。高能束线850可包括泵送室851、防止束失焦的四极磁体852和872、将束引导到治疗室的偶极或弯曲磁体856和858、束校正器853、诊断部件如电流监测器854和876、快速束位置监测器855部分和扫描磁体874。

[0088] 高能束线850的配置取决于治疗设施的配置。图8A的实施方案用于治疗设施的两层结构。更靠近靶组件801的治疗室之一位于下层。使用弯曲磁体856将束传送到靶组件801。之后, 四极磁体872将束聚焦到靶802处的特定尺寸。通过磁体874, 束可以在靶802的表面上移动(例如, 光栅化、扫描或振荡)。束的移动可有助于实现质子束在锂靶802上的平滑和均匀的时间平均分布, 从而防止过热, 并使靶802的锂层内的中子生成更均匀。

[0089] 在穿过扫描磁体874之后, 束被传送到电流监测器876, 该监测器测量束电流, 并且可以用作安全联锁装置。靶组件801可通过闸阀877与高能束线体积物理隔离。闸阀的功能是在靶置换/加载时将束线的真空体积与靶隔离。束线的水平方向(分支880和890的第二和可能的第三治疗室) 也(部分地) 显示在图8A上。在这种情况下, 束不被弯曲磁体856弯曲90度, 而是直接向右, 然后通过位于水平束线中的四极磁体852。之后, 根据房间配置, 束可以由另一个弯曲磁体858弯曲到所需的角。或者, 弯曲磁体858可以用Y形磁体代替, 以便将位于同一楼层的两个不同治疗室的束线分成两个方向。束在靶802上的撞击产生中子束, 然后中子束可由中子束成形组件(未示出) 成形和修改, 该组件可将中子束直接输出到患者。

[0090] 图9A是描绘与图3所述的工艺类似的产生中子束的方法900的示例性实施方案的

流程图。在步骤902中,将质子束施加到靶802的区域(例如,如图2A-2B所述)。质子束优选具有1.9-3.0MeV的能量,但不限于此。质子束可以以连续或脉冲方式施加、可以保持在静止位置,或者可以以任何所需的图案在靶802的表面上移动(例如,分别参见图8E和8F,其示出了阶梯和螺旋图案)。在步骤904中,施加质子束,使得在该区域中形成一个或多个空泡并且尺寸增大(例如,如图2C-2D所述)。这可以在中子产额没有显著下降的情况下发生,如图10B-10C所述。在步骤906中,进一步施加质子束,使得一个或多个空泡的尺寸减小。步骤906可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除,或者此后继续BNCT的中子产生。同样,只要例如锂层不变得过薄,则质子辐射可以继续,而不会显著降低中子产额。在一些实施方案中,步骤904和906之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,区域中的空泡形成停止或基本上停止(或区域中的空泡尺寸增长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。

[0091] 图9B是描绘与图5所述工艺类似的产生中子束的方法950的示例性实施方案的流程图。在步骤952中,将质子束施加到靶802的区域(例如,如图4A-4B所述)。与前述实施方案一样,质子束优选具有1.9-3.0MeV的能量,但其不限于此。质子束可同样以连续或脉冲方式施加、可以保持在静止位置,或者可以以任何所需的图案在靶802的表面上移动。在步骤954中,施加质子束,使得在该区域中形成一个或多个空泡并且尺寸增大(例如,如图4C-4D所述)。这可以在中子产额没有显著下降的情况下发生,如图10B-10C所述。在步骤956中,进一步施加质子束,使得形成具有足够尺寸(例如,厚度)的锂化合物层,以达到或接近(几乎达到)一个或多个空泡,并允许一个或更多个空泡随着进一步的辐射而尺寸减小。步骤956可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除、直至形成所需尺寸或厚度的锂化合物层,或者此后继续用于BNCT的中子生产。同样,只要例如锂层不由于化合物层的形成而变得过薄,则质子辐射可以继续而不会显著降低中子产额。在一些实施方案中,步骤954和956之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,该区域中的空泡形成停止或基本上停止(或者该区域中的空泡尺寸增长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。

[0092] 图9C是描绘与图7所述工艺类似的产生中子束的方法980的示例性实施方案的流程图。在步骤982中,将质子束施加到靶802的区域。质子束优选具有1.9-3.0MeV的能量,但不限于此。质子束可同样以连续或脉冲方式施加、可以保持在静止位置,或者可以以任何所需的图案在靶802的表面上移动。在步骤984中,施加质子束,使得形成一个或多个空泡并且尺寸增大,并且靶802的基材区域部分地从结晶态转变为非晶态(例如,如图6A所述)。这可能伴随着锂化合物层的生长和该化合物从结晶态到非晶态的部分转变。这可以在中子产额没有显著下降的情况下发生,如图10B-10C所述。在步骤986中,施加进一步的带电粒子辐射,使得向非晶态的转变持续到足以允许减少起泡的程度(例如,50%、75%、90%或更大的向非晶态转变)。该转变可以在整个靶802中发生,但是为了减少空泡,该转变至少在靶802的空泡和顶表面204之间的区域中发生(锂层不需要转变)。步骤986可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除、直至形成所需尺寸或厚度的锂化合物层,或者此后继续BNCT的中子生产。在一些实施方案中,空泡减少也可以取决于化合物层的扩大到达到或接近(几乎达到)一个或多个空泡的深度。步骤986可以继续,直至空泡尺寸减小基本上停止、直至所有空泡被消除、直至形成所需尺寸或厚度的锂化合物层,或者取决于应用而更长。同样,只要例如锂层不由于化合物层的形成而变得过薄,则质子辐射可以继续而不会显

著降低中子产额。在一些实施方案中,步骤984和986之间的间隔可以包括一个阶段,在该阶段中,区域中的空泡形成停止或基本上停止(或区域中的空泡尺寸增长停止或基本上停止),但空泡尺寸减小尚未发生。

[0093] 此处描述的靶802的实施方案可在中子束系统800的操作期间经历方法900、950或980。该系统操作可用于调节靶802,以便在患者身上使用时增强其抗空泡性。或者,该系统操作可以在患者治疗的同时进行,从而在一个或多个为了治疗目的而直接向患者施加中子的程序中形成空泡并减小其尺寸。方法900、950或980的实施也可以通过在非患者和患者应用二者的组合期间操作系统800来实现。在另一实施方案中,方法900、950和/或980可以在靶802的制造期间(例如,在靶802分配到BNCT患者中心之前)使用由不同于设计用于人类患者的带电粒子辐射系统产生的辐射来实现。

[0094] 返回参考图8B,该图是描绘在经历足以引起起泡的粒子辐射之前靶802的示例性实施方案的透视图。在该实施方案中,靶802是圆盘形的,并且与金属体102相似,因为其包括锂层103和金属基材104。铜已被证明作为基材104的材料是特别有利的,但本文的实施方案不限于此。图8C是沿图8B的线8C-8C截取的靶802的横截面图。图8C描绘了在基材104的背面中存在冷却通道804。在系统800的操作期间,通道804可用于在基材104背面循环冷却剂,以消散吸热中子产生反应产生的热量。图8D是靶802在经历足以形成锂化合物层105的粒子辐射之后的横截面图。在基材104为铜的实施方案中,锂化合物层104是锂铜化合物。图8E是靶802在经历足以在基材104中形成非晶区域604的粒子辐射之后的横截面图。

[0095] 图8F和8G是分别显示束移动的阶梯图案860和螺旋图案862的靶802的正视图。束可以在两个方向(图中所示的一个方向)上沿着这些图案连续地来回移动。取决于束斑尺寸,图案可能会或可能不会导致在靶802的整个表面上输送均匀的能量流。本文所述的抗形变益处可以通过在此处所述的靶802的表面上的均匀和非均匀能流来实现。在这些实施方案中,锂层存在于此处所示的整个表面上,然而在靶802的其他实施方案中,锂层可以仅限于此处所示表面的内部区域。

[0096] 锂层103可呈固体形式或液体形式。如果呈液体形式,则锂层103可放置在固体形式的基材104上,使得固体基材可以相对于入射束轴以所需的角度(例如,0-90°)取向。液态锂应以不允许大量锂蒸发(从而可能污染系统或设施)的方式形成在基材上。液态锂层能够利用质子束的显著更高的功率密度,这又能够使用相对较小的靶直径或宽度。

[0097] 锂层103可具有优选足以使锂化合物层生长,同时保持恒定的中子产额的厚度,因为锂扩散到基材中会导致锂层103变薄。表2列出了天然丰富的锂(例如,含有约10%⁶Li的⁷Li)中不同质子能量的示例性锂性质。锂的突入范围是每种能量下质子停止运动的范围。阈值深度是指锂中质子达到约1.88MeV的深度,这是中子产生停止的阈值。对于纯⁷Li,阈值深度略高(例如,对于2.00MeV为17.7微米,对于2.50MeV为92.5微米)。

[0098] 表2

	质子能量 (MeV)	锂中的突入范围 (微米)	阈值深度 (微米)
[0099]	3.00	319.77	176.27
	2.75	274.89	131.39
	2.50	233.11	89.61
	2.25	194.48	50.98
	2.00	159.08	15.58
	1.80	133.12	NA

[0100] 中子产生靶中使用的锂层优选具有至少深达阈值的厚度,因此锂层的所需厚度取决于入射质子的预期能量。通常,BNCT应用的锂层厚度可为1-300微米,以适应1.88-3.0MeV的质子能量。

[0101] 图10A-10C是描绘在本文所述的实施方案的实验验证期间收集的数据的图。该实验数据反映了在用类似于图8A-8C所述的中子束系统800的实施方案产生的束形式的质子辐射暴露靶802的实施方案之后收集的结果。研究中的靶包括99.996%细粒铜的基材104,和蒸发到基材104上的厚度为84 μ m(微米)的锂层103。在15天的跨度内,用质子束辐射直径约为10mm、电流为500 \pm 10 μ A的靶11天(每天4小时)。样品上的电流积分为21.08mA h。当束的质子能量为1.8MeV,低于中子产生阈值时,主要辐射靶,并在1.92和2.04MeV的较大能量下短时间辐射靶,以确定中子产额(见图10B-10C)。

[0102] 图10A是描绘空泡的相对数量(y轴)(束中心中的相对数量)与辐射时间(x轴)的图,辐射时间是束施加到靶602的时间。在表面的整个辐射时间期间,通过具有Basler Ace acA4112-30uc CMOS相机和Hikvision摄像机的KX InfiniMax™远程显微镜监测研究的试样表面,并记录视频信号。在靶表面的不同部位,可以清楚地观察到空泡的出现和消失。图11A是锂表面的宏观图像,图11B-11C是远程显微镜在辐射第六天拍摄的图像。图11A显示了暗带1102,其带宽为约1mm,内径为约13mm,其与质子束的主功率位置重合。区域1104对应于靶802的中心。区域1106对应于仍暴露于质子辐射的主束区域1102外部的的外围区域。区域1108表示未被质子辐射的靶表面。图11B是显示了与质子束的中心的入射相对应的锂靶表面的区域1102的特写,图11C显示了束的外围上的锂靶表面的区域1106的特写。可以看出,质子束中心的锂表面是均匀的,没有空泡,而空泡在束外围是明显的。

[0103] 空泡对锂表面的改性被定量地确定为图像的选定部分中的高亮度区域。视频信号文件的每720帧由计算机处理(大约每30秒)。该处理区分了与空泡对应的高亮度区域,并确定了图像的如下两部分中的这些区域的面积:束中心和外围。显微镜视频信号的处理结果在图10A中示出,其中曲线1001对应于被束中心照射的靶表面的区域,曲线1002对应于被束外围照射的靶区域。此处,Y轴是图像的所选部分(在束中心和外围)的高亮度区域的相对量,X轴显示了在15天跨度内按不同的11天辐射天数分组的处理图像帧的序列。省略了曲线1001中指示空泡从时间零点上升到峰值1010的大部分。为了使结果可见,在图中绘制了分隔一天和另一天辐射的垂直线。由于操作时束的输出没有变化,x轴通常也对应于靶802上的质子能流。1020所示的总时间约为42小时。

[0104] 空泡计数数据1001表明,在时间1003,靶802中已经形成空泡,并且已经达到峰值

水平1010。从时间1003到时间1004,靶801中的空泡计数迅速下降。如图4A-5的实施方案所述,在时间1003,在锂层103和基材104之间形成的锂化合物层可能已经达到足够的深度,从而允许氢从空泡扩散并从金属体102中扩散出来。或者,如图6A-7的实施方案所述,在形成空泡的材料(例如空泡壳)中可能发生了从结晶结构到非晶结构的转变,然后该壳连同渗透的锂一起被大量移除到基材中。或者,可能发生二者的组合。

[0105] 以下实施方案描述了可能全部或部分有助于减少空泡尺寸和/或数量的进一步机理。例如,质子束暴露可导致对流以减少空泡,例如通过将锂从固体转变为局部液体形式(例如热点),这可允许氢气逸出和/或导致空泡壳被移除到基材中。作为另一实例,质子束暴露可导致毛细力的毛细管系统以减少空泡,例如通过使锂渗透到基材材料中的裂纹、裂缝或其他形变中,从而允许氢气逸出和/或使空泡壳被移除到基材中。对流和毛细作用的组合也可能是机理。

[0106] 在实验中,在时间1004,束施加停止一段时间,然后重新启动。由于这种停止,在重新启动时,从时间1004到时间1005有一段短暂的空泡形成时间,此时空泡减少再次开始,空泡总数降至比时间1004存在的更低的水平。在时间1006、1007、1008和1009进行了类似的循环。然而,靶602在每个循环开始时表现出对空泡形成的增加的抵抗力,使得总体趋势表现出空泡减少,空泡形成的抵抗性随时间增加。在实验结束时,空泡总数降至接近零的计数,该降低大于的峰值的99%。在其他实施方案中,减少可以稍微少一些,例如大于75%、大于90%或大于95%。

[0107] 图10B和10C是描绘y轴上靶602的中子产额与x轴上以毫安小时(mAh)计的质子电流积分 Φ 的图。图10B中的数据由剂量计测量,并在y轴上显示中子剂量率D。图10C中的数据由中子探测器测量,并在y轴上以倒数秒显示计数率Y。在这些图中,x轴上的点21对应于 $6.3 \pm 0.6 \times 10^{20}$ 质子/平方厘米(p/cm^{-2})的质子通量。两个图都表明,随着质子能流的增加,中子产额通常保持恒定,对于图10B的剂量计,中子产额通常在95-108的范围内,对于图10C的检测器,中子产额通常在1617-1915的范围内。点21也通常对应于图10A上的点1020。因此,在形成空泡以及减少和消除空泡的时间段内,中子产额通常保持恒定。因此,中子产额通常不受空泡存在的影响。中子产额没有减少还表明,从基材104通过锂层103扩散的氢没有与锂或锂铜形成氢化物或氢氧化物(或仅形成痕量或可忽略的量,以便在形成和消除空泡时不会显著地降低中子产额)。点21的质子能流可以用患者治疗来表示。如果该能流被缩放到例如具有约10cm直径的暴露区域的靶,并且与具有2.3MeV能量和10毫安(mA)电流的质子束一起使用,则点21的能流将对应于约340名患者的BNCT治疗(假设每个患者40分钟)。

[0108] 在前面的一些实施方案中,描述了将带电粒子辐射施加到金属体上的技术,这导致金属体经历空泡形成的第一阶段,然后是第二阶段,在第二阶段中空泡的尺寸减小或完全消除,而不需要形成锂化合物层。本文还描述了如下实施方案,其中空泡形成的第一阶段之后是通过形成锂化合物层来减少或消除空泡的第二阶段。更进一步地,本文描述了如下实施方案,其中空泡形成的第一阶段之后是空泡减少或消除的第二阶段,该第二阶段通过单独或与锂化合物结合的基材材料从结晶态转变到大部分非晶态。除了这些前述实施方案以外,现在将描述其他实施方案,其中在辐射暴露之前形成锂化合物层和/或非晶材料,这通常会导致空泡形成。具有预先存在的锂化合物层和/或非晶结构的这些实施方案具有增加的对空泡形成的抵抗性,并且在某些条件下可以完全防止空泡形成,从而避免即使在空

泡已经减少和/或消除之后仍然可能持续的任何残余的和潜在的不希望的结构形变。

[0109] 图1D-1E所述的金属体102的实施方案可以在暴露于带电粒子辐射之前制造,从而形成空泡。例如,锂化合物层105可以首先形成在金属基材104上或其中、沉积在金属基材上或耦合到金属基材104,然后锂层103可以随后形成在锂化合物层104上或其中、沉积在锂化合物105上或耦合到锂化合物层105,然后金属基材104可以随后形成在锂化合物层105上、沉积在其上或耦合到锂化合物层105。

[0110] 在另一个实施方案中,金属体102首先用与基材104直接接触的锂层103制造。然后,金属体102可以在特定时间内经历一种或多种刺激,例如热、电和/或压力,使得层103的锂扩散到基材104中,并在先前仅由锂层、仅由金属基材或二者占据的区域中形成化合物层105。施加一种或多种刺激的条件和时间可以确定化合物层105的最终厚度112。

[0111] 具有非晶结构的基材104可以在其上具有锂层103,或者可以在添加锂层103之后转变为非晶结构。类似地,具有非晶结构的锂化合物层105也可以根据上述技术提供,或者可以以结晶态提供,然后转变为非晶态。然后,金属体102可以与预先存在的非晶结构一起用于所需的应用中。

[0112] 化合物层105的厚度112和/或金属体102的非晶部分可以基于金属体102将暴露于其中的辐射的预期条件和特性来选择以减轻空泡形成。例如,可能需要将化合物层105形成到距表面204一定的深度,该深度达到在预期辐射条件下否则将发生空泡形成的位置。空泡形成的深度可以取决于诸如辐射的类型(例如,质子、离子)、辐射的能量、基材104的纯度、基材金属的类型等因素。

[0113] 然后,具有预先存在的锂化合物层和/或预先存在的大部分非晶结构的金属体102的实施方案可以用于所需的应用中而不形成空泡,或者基本上不形成空泡。例如,在锂靶602具有预先存在的锂化合物层(类似于图8D)和/或预先存在的非晶结构(类似于图8E)的BNCT应用中,能量为1.9-3.0MeV(更优选为2.3-2.6MeV)且电流为1-20mA(更优选为8-15mA)的质子束可以在没有起泡或基本上没有起泡的情况下长时间施加到靶602。该长时间可以是至少 $6.3 \pm 0.6 \times 10^{20} \text{p/cm}^{-2}$ 的质子能流。

[0114] 尽管不限于此,但在许多示例性实施方案中,锂层的厚度可为1-300微米,在一些实施方案中厚度可为10-250微米。尽管不限于此,但在许多示例性实施方案中,锂化合物层(如果存在的话)的厚度可为1-500微米,在一些实施方案中厚度可为10-300微米,在一些实施方案中厚度可为15-100微米。尽管不限于此,但在许多示例性实施方案中,基材的非晶部分(如果存在的话)的厚度可为1-500微米,在一些实施方案中厚度可为10-300微米,在一些实施方案中厚度可为15-100微米。尽管不限于此,但在许多示例性实施方案中,基材的厚度可为至少100微米,其中最大厚度取决于应用。在一些实施方案中,基材的厚度为100微米至50厘米。

[0115] 下文将阐述本主题各个方面,以回顾和/或补充到目前为止描述的实施方案中,此处的重点是以下实施方案的相互关系和互换性。换言之,重点在于如下事实:实施方案的每个特征都可以与每个其他特征组合,除非另有明确说明或逻辑上不可信。

[0116] 在第一组实施方案中,提供了一种操作具有包括锂层和金属基材的靶的束系统的方法,其中所述方法包括:(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡;和(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量

和/或尺寸减小。

[0117] 在一些实施方案中,所述带电粒子辐射是质子束。

[0118] 在一些实施方案中,(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流。

[0119] 在一些实施方案中,(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。

[0120] 在一些实施方案中,在步骤(a)和(b)中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。

[0121] 在一些实施方案中,(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0122] 在一些实施方案中,(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0123] 在一些实施方案中,发射的中子由锂层根据反应 $p+7\text{Li} \rightarrow n+7\text{Be}$ 产生。

[0124] 在一些实施方案中,所述方法进一步包括作为硼中子俘获治疗(BNCT)程序的一部分执行(a)和(b)。

[0125] 在一些实施方案中,带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中使靶经历带电粒子辐射,同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。

[0126] 在一些实施方案中,(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且多个空泡的数量和尺寸减小。

[0127] 在一些实施方案中,(b)进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子,并且所述多个空泡仅在尺寸上减小。

[0128] 在一些实施方案中,金属基材为铜。锂层可以与铜基材接触。锂层可以直接形成在铜块基材上。

[0129] 在一些实施方案中,锂层的厚度为1-300微米。

[0130] 在一些实施方案中,带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。

[0131] 在第二组实施方案中,提供了一种操作具有包括锂层和金属基材的靶的束系统的方法,所述方法包括:(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡;和(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在锂层和金属基材之间形成锂化合物层,所述锂化合物层的尺寸足以减小所述多个空泡的数量和/或尺寸。

[0132] 在一些实施方案中,带电粒子辐射为质子束。

[0133] 在一些实施方案中,(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得靶发射中子并且所述多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流。

[0134] 在一些实施方案中,(b)使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,直至空泡的数量成数量级减少。

[0135] 在一些实施方案中,在步骤(a)和(b)中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。

[0136] 在一些实施方案中,(a)使靶经历带电粒子辐射,使得靶发射中子并且在靶中形成

多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0137] 在一些实施方案中, (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0138] 在一些实施方案中, 发射的中子由锂层根据反应 $p+7\text{Li}\rightarrow n+7\text{Be}$ 产生。

[0139] 在一些实施方案中, 所述方法进一步包括作为硼中子俘获治疗 (BNCT) 程序的一部分执行 (a) 和 (b)。

[0140] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射呈束形式, 并且其中在步骤 (a) 和 (b) 中使靶经历带电粒子辐射, 同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。

[0141] 在一些实施方案中, (b) 进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且所述多个空泡的数量和尺寸减小。

[0142] 在一些实施方案中, (b) 进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且所述多个空泡仅在尺寸上减小。

[0143] 在一些实施方案中, 金属基材为铜, 锂化合物层为锂铜化合物。

[0144] 在一些实施方案中, 锂层的厚度为1-300微米。

[0145] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。

[0146] 在第三组实施方案中, 提供了一种操作具有包括锂层和金属基材的靶材的束系统的方法, 所述方法包括: (a) 使靶材经历带电粒子辐射, 使得靶材发射中子并且在靶中形成多个空泡; 以及 (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子并且金属基材从结晶态转变到非晶态达足以减小空泡的数量和/或尺寸的程度。

[0147] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射为质子束。

[0148] 在一些实施方案中, (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子并且多个空泡的数量和/或尺寸减小包括使靶经历至少 0.5×10^{19} 每平方厘米 (cm^{-2}) 的质子能流。

[0149] 在一些实施方案中, (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 直至空泡的数量成数量级减少。

[0150] 在一些实施方案中, 在步骤 (a) 和 (b) 中以至少 1×10^{12} 个中子/秒的第一速率发射中子。

[0151] 在一些实施方案中, (a) 使靶经历带电粒子辐射, 使得靶发射中子并且在靶中形成多个空泡进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0152] 在一些实施方案中, (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且多个空泡的数量和/或尺寸减小进一步包括将发射的中子施加到人类患者。

[0153] 在一些实施方案中, 发射的中子由锂层根据反应 $p+7\text{Li}\rightarrow n+7\text{Be}$ 产生。

[0154] 在一些实施方案中, 所述方法进一步包括作为硼中子俘获治疗 (BNCT) 程序的一部分执行 (a) 和 (b)。

[0155] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射呈束形式, 并且其中在步骤 (a) 和 (b) 中使靶经历带电粒子辐射, 同时束在与束传播方向横向的方向上在靶的表面上移动。

[0156] 在一些实施方案中, (b) 进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且多个空泡的数量和尺寸减小。

[0157] 在一些实施方案中, (b) 进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得靶发射中子, 并且所述多个空泡仅在尺寸上减小。

[0158] 在一些实施方案中, (b) 使靶经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层。金属基材可为铜, 锂化合物层可为锂铜化合物。(b) 使靶经历进一步带电粒子辐射的步骤可包括使靶经历进一步的带电粒子辐射, 使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层, 其深度达到或者接近所述多个空泡。

[0159] 在一些实施方案中, 锂层的厚度为1-300微米。

[0160] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射具有1.9-3.0MeV的能量。

[0161] 在第四组实施方案中, 提供了一种方法, 其包括: (a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射, 使得在金属结构的所述区域中形成多个形变, 其中所述金属结构包括锂层; 以及 (b) 使所述金属结构的区域经历进一步的带电粒子辐射, 使得所述多个形变的数量和/或尺寸减小。

[0162] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射为质子束。

[0163] 在一些实施方案中, (b) 使金属结构的所述区域经历进一步带电粒子辐射包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射, 直至形变的数量成数量级减少。

[0164] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射呈束形式, 并且其中在步骤 (a) 和 (b) 中使所述区域经历带电粒子辐射, 同时束在与束传播方向横向的方向上在所述区域的表面上移动。

[0165] 在一些实施方案中, 金属基材为铜。

[0166] 在一些实施方案中, 锂层与铜基材接触。

[0167] 在一些实施方案中, 金属结构是等离子体聚变反应堆的一部分, 并且从聚变反应发射带电粒子辐射。

[0168] 在一些实施方案中, 锂层的厚度为1-300微米。

[0169] 在一些实施方案中, 形变为空泡。

[0170] 在一些实施方案中, (b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步的带电粒子辐射, 使得对流力和/或毛细力减小了所述多个形变的数量和/或尺寸。

[0171] 在第五组实施方案中, 提供了一种方法, 其包括: (a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射, 使得在金属结构的所述区域中形成多个形变, 其中所述金属结构包括锂层; 以及 (b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射, 使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层, 所述锂化合物层的尺寸足以减小所述多个形变的数量和/或尺寸。

[0172] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射为质子束。

[0173] 在一些实施方案中, (b) 使所述区域经历进一步的带电粒子辐射包括使所述区域经历进一步的带电微粒辐射, 直至空泡的数量成数量级减少。

[0174] 在一些实施方案中, 带电粒子辐射呈束形式, 并且其中在步骤 (a) 和 (b) 中使所述区域经历带电粒子辐射, 同时束在与束传播方向横向的方向上在所述区域的表面上移动。

[0175] 在一些实施方案中, 金属基材为铜, 锂化合物层为锂铜化合物。

[0176] 在一些实施方案中, 锂层的厚度为1-300微米。

[0177] 在一些实施方案中, 形变为空泡。

[0178] 在第六组实施方案中, 提供了一种方法, 其包括: (a) 使金属结构的区域经历带电粒子辐射, 使得在金属结构的所述区域中形成多个形变, 其中所述金属结构包括锂层; 以及

(b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射,使得金属基材从结晶态转变为非晶态达足以减小所述多个形变的数量和/或尺寸的程度。

[0179] 在一些实施方案中,带电粒子辐射为质子束。

[0180] 在一些实施方案中,(b) 使所述区域经历进一步的带电粒子辐射包括使所述区域经历进一步的带电微粒辐射,直至空泡的数量成数量级减少。

[0181] 在一些实施方案中,带电粒子辐射呈束形式,并且其中在步骤(a)和(b)中使所述区域经历带电粒子辐射,同时束在与束传播方向横向的方向上在所述区域的表面上移动。

[0182] 在一些实施方案中,金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。

[0183] 在一些实施方案中,锂层的厚度为1-300微米。

[0184] 在一些实施方案中,形变为空泡。

[0185] 在一些实施方案中,(b) 使所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步的带电微粒辐射,使得在锂层和金属基材之间形成锂化合物层。

[0186] 在一些实施方案中,金属基材为铜,锂化合物层为锂铜化合物。

[0187] 在一些实施方案中,(b) 使所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使靶经历进一步的带电粒子辐射,使得在所述锂层和所述金属基材之间形成锂化合物层至达到或接近所述多个形变的深度。

[0188] 在一些实施方案中,(b) 使金属结构的所述区域经历进一步的带电粒子辐射进一步包括使所述区域经历进一步带电粒子辐射,使得对流力和/或毛细力减小所述多个形变的数量和/或尺寸。

[0189] 在第七组实施方案中,提供了一种金属体,其包括:金属基材;包括与金属基材耦合的锂的层,其中金属体已暴露于至少 $6.3 \pm 0.6 \times 10^{20}$ 质子/平方厘米(p/cm^2)的带电粒子能流。

[0190] 在一些实施方案中,金属体显示出比暴露之前所显示的对空泡形成的抵抗性更大的对空泡形成的抵抗性。

[0191] 在一些实施方案中,金属基材包括铜。

[0192] 在一些实施方案中,金属体进一步包括在包括锂的层和金属基材之间的锂化合物层。包括锂的层可以包括至少90%的锂-7同位素。包括锂的层可以包括至少98%的锂-7同位素。

[0193] 在一些实施方案中,金属基材的第一部分处于非晶态。金属基材的第二部分可处于结晶态,其中第一部分比第二部分更接近包括锂的层。

[0194] 在一些实施方案中,金属体被配置为用于等离子体聚变反应堆。

[0195] 在一些实施方案中,金属体被配置为用作中子产生靶。

[0196] 在第八组实施方案中,提供了一种金属体,其包括:金属基材;以及位于金属基材上的包括锂的层,其中金属体已暴露于带电粒子辐射,使得首先通过带电粒子辐射在金属体中形成一个或多个空泡,然后通过带电粒子射线减小所述一个或多个空泡的尺寸。

[0197] 在一些实施方案中,金属体显示出比暴露之前所显示的对空泡形成的抵抗性更大的对空泡形成的抵抗性。

[0198] 在一些实施方案中,金属基材包括铜。

[0199] 在一些实施方案中,金属体进一步包括在包括锂的层和金属基材之间的锂化合物

层。包括锂的层可以包括至少90%的锂-7同位素。包括锂的层可以包括至少98%的锂-7同位素。

[0200] 在一些实施方案中,金属基材的第一部分处于非晶态。金属基材的第二部分可以处于结晶态,其中第一部分比第二部分更接近包括锂的层。

[0201] 在一些实施方案中,金属体被配置为用于等离子体聚变反应堆或用作中子产生靶。

[0202] 在第九组实施方案中,提供了用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其中靶包括:铜基材;以及位于铜基材上的包括锂的层,其中靶已经暴露于带电粒子辐射,使得首先通过带电粒子辐射在靶中形成一个或多个空泡,然后通过带电粒子辐射减小所述一个或多个空泡的尺寸。

[0203] 在一些实施方案中,靶显示出比暴露之前所显示的对空泡形成的抵抗性更大的对空泡形成的抵抗性。

[0204] 在一些实施方案中,锂呈固体形式。

[0205] 在一些实施方案中,锂呈液体形式。

[0206] 在一些实施方案中,靶被配置为当暴露于具有1.9-3.0兆电子伏特(MeV)的平均能量和1-20毫安(mA)的电流的质子辐射时产生中子,直至产生至少 0.5×10^{19} 每平方厘米(cm^{-2})的质子能流,而在铜基材中基本上不形成空泡。靶可以被配置为根据反应 $p+7\text{Li} \rightarrow n+7\text{Be}$ 产生中子。

[0207] 在第十组实施方案中,提供了用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其包括:包括锂的第一层;铜基材;以及第二层,其包括位于第一层和铜基材之间的锂铜化合物,其中所述靶被配置为当暴露于质子辐射时产生中子。

[0208] 在一些实施方案中,靶被配置为在暴露于质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

[0209] 在一些实施方案中,靶被配置为当暴露于平均能量为1.9-3.0MeV且电流为1-20mA的质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

[0210] 在一些实施方案中,靶被配置为根据反应 $p+7\text{Li} \rightarrow n+7\text{Be}$ 产生中子。

[0211] 在一些实施方案中,锂层的厚度为1-300微米。

[0212] 在第十一组实施方案中,提供了用于硼中子俘获治疗(BNCT)的靶,其包括:包括锂的第一层;以及铜基材,其具有处于非晶态的第一部分,其中所述靶被配置为当暴露于质子辐射时产生中子。

[0213] 在一些实施方案中,靶被配置为在暴露于质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

[0214] 在一些实施方案中,靶被配置为当暴露于平均能量为1.9-3.0MeV且电流为1-20mA的质子辐射时产生中子,而基本上不在铜基材中形成空泡。

[0215] 在一些实施方案中,靶被配置为根据反应 $p+7\text{Li} \rightarrow n+7\text{Be}$ 产生中子。

[0216] 在一些实施方案中,第一层的厚度为1-300微米。

[0217] 在一些实施方案中,铜基材的第二部分处于结晶态,其中第一部分比第二部分相对更接近包括锂的第一层。

[0218] 在一些实施方案中,靶进一步包括第一层和铜基材之间的锂铜化合物层。

[0219] 应指出的是,就本文提供的任何实施方案所述的所有特征、元件、组件、功能和步骤旨在可以与来自任何其他实施方案的特征、元件和功能步骤自由组合和替换。如果仅针对一个实施方案描述了某一特征、元件、组件、功能或步骤,则应当理解,除非另有明确说明,否则该特征、元件、组件、功能或步骤可以与本文所述的每个其他实施方案一起使用。因此,本段作为在任何时候引入权利要求的在先基础和书面支持,其组合了来自不同实施方案的特征、元件、组件、功能和步骤,或者将来自一个实施方案的特征、元件、组件、功能和步骤替换为另一个实施方案的特征、元件、组件、功能和步骤,即使在下文描述中没有明确说明,在特定情况下,这种组合或替换是可能的。明确承认,对每一种可能的组合和替换的表述都过于累赘,特别是考虑到每一种该组合和替换都是本领域技术人员容易认识到的。

[0220] 本文和所附权利要求所用的单数形式“一个”、“一种”和“所述”包括复数指代,除非上下文另有明确规定。

[0221] 尽管实施方案容易进行各种修改和替代,但其具体实例已在附图中示出,并在本文中详细描述。然而,应当理解的是,这些实施方案不限于所公开的特定形式,相反,这些实施方式涵盖落入本公开内容的主旨范围内的所有修改、等同和替代方案。此外,实施方案的任何特征、功能、步骤或元件可以在权利要求中陈述或添加,以及通过不在该范围内的特征、功能或元件限定权利要求的本发明范围的负面限制。

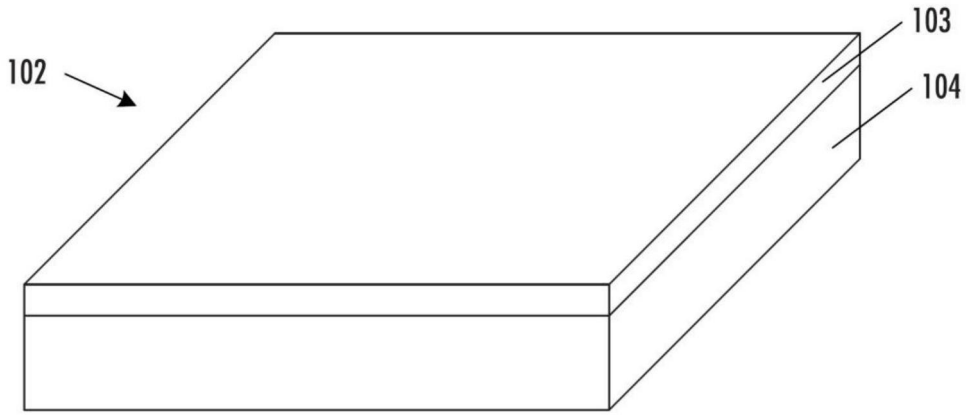


图1A

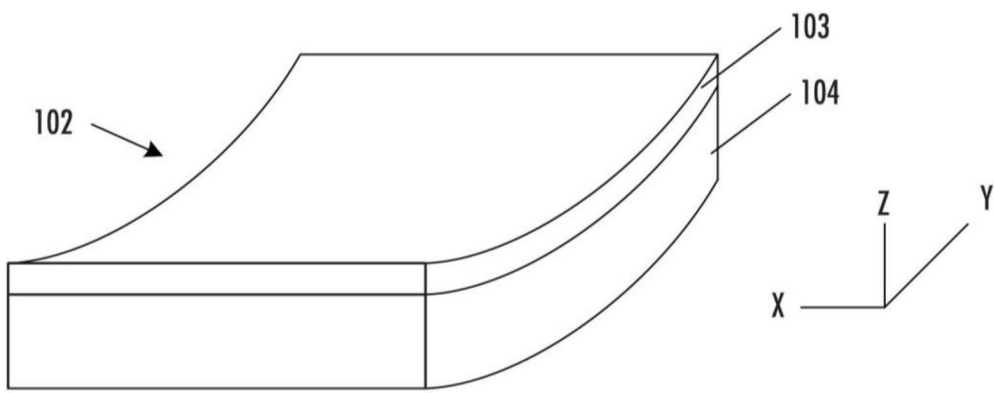


图1B

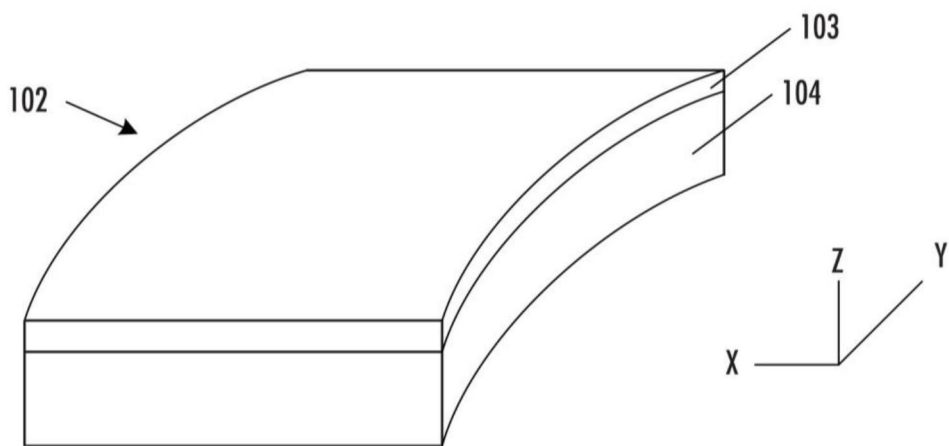


图1C

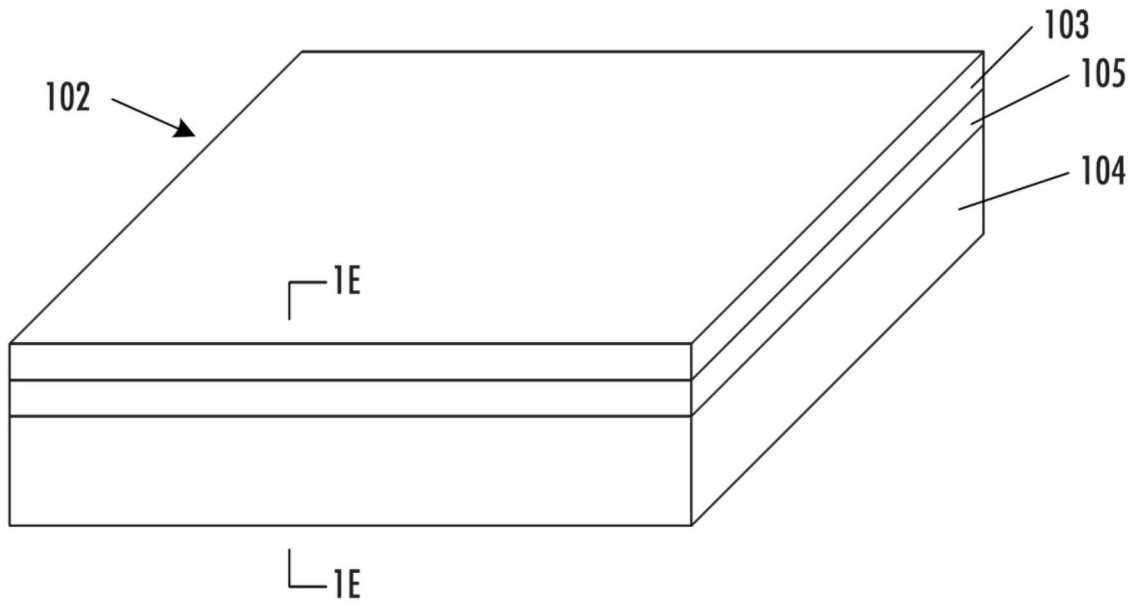


图1D

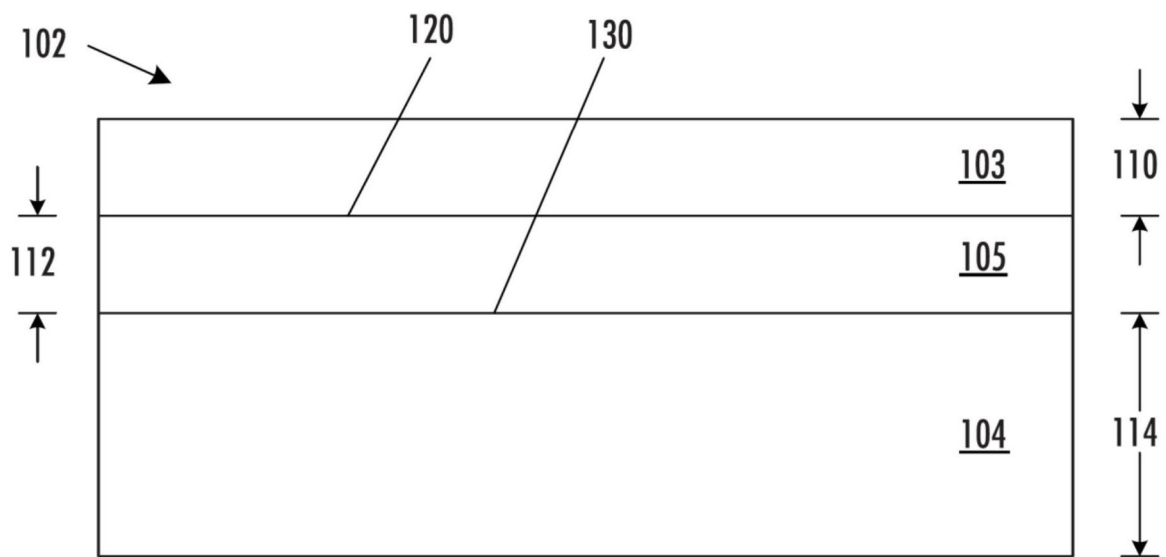


图1E

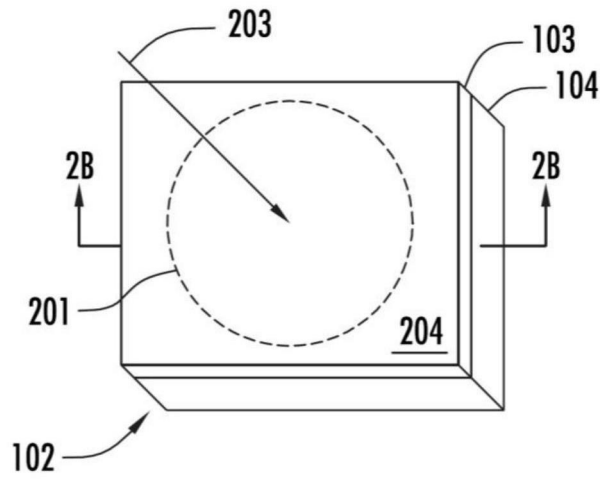


图2A

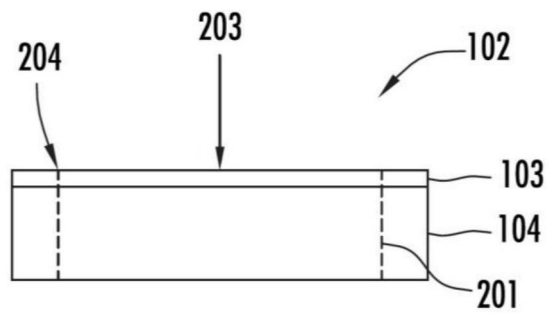


图2B

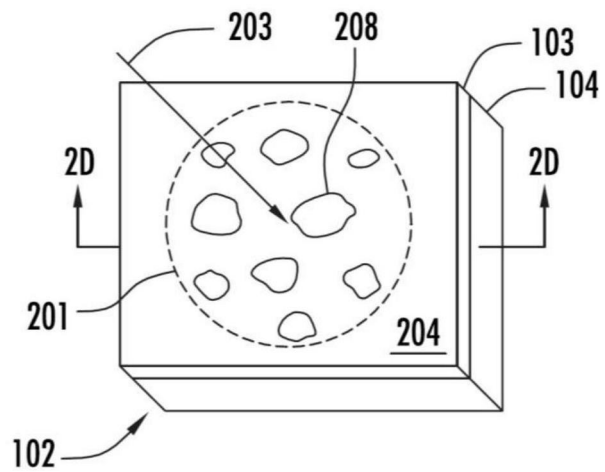


图2C

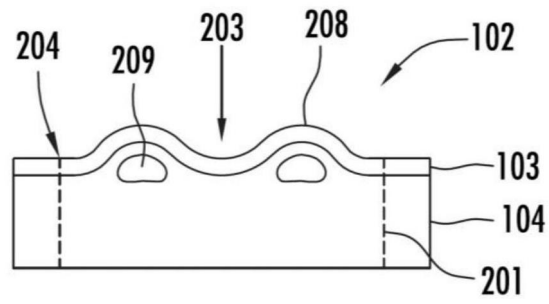


图2D

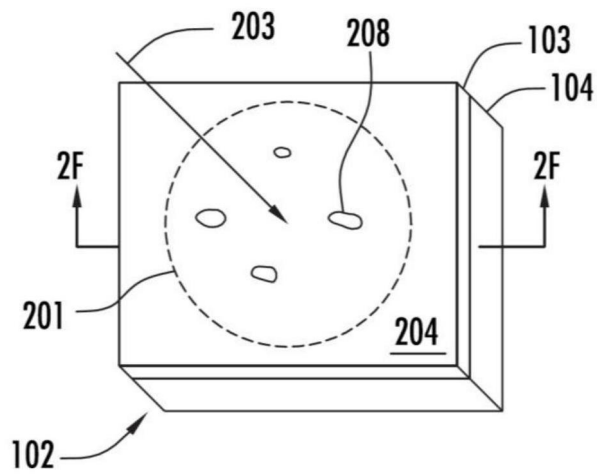


图2E

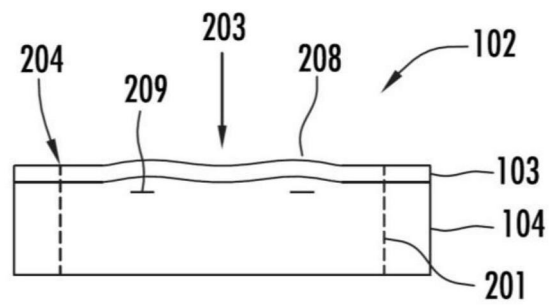


图2F

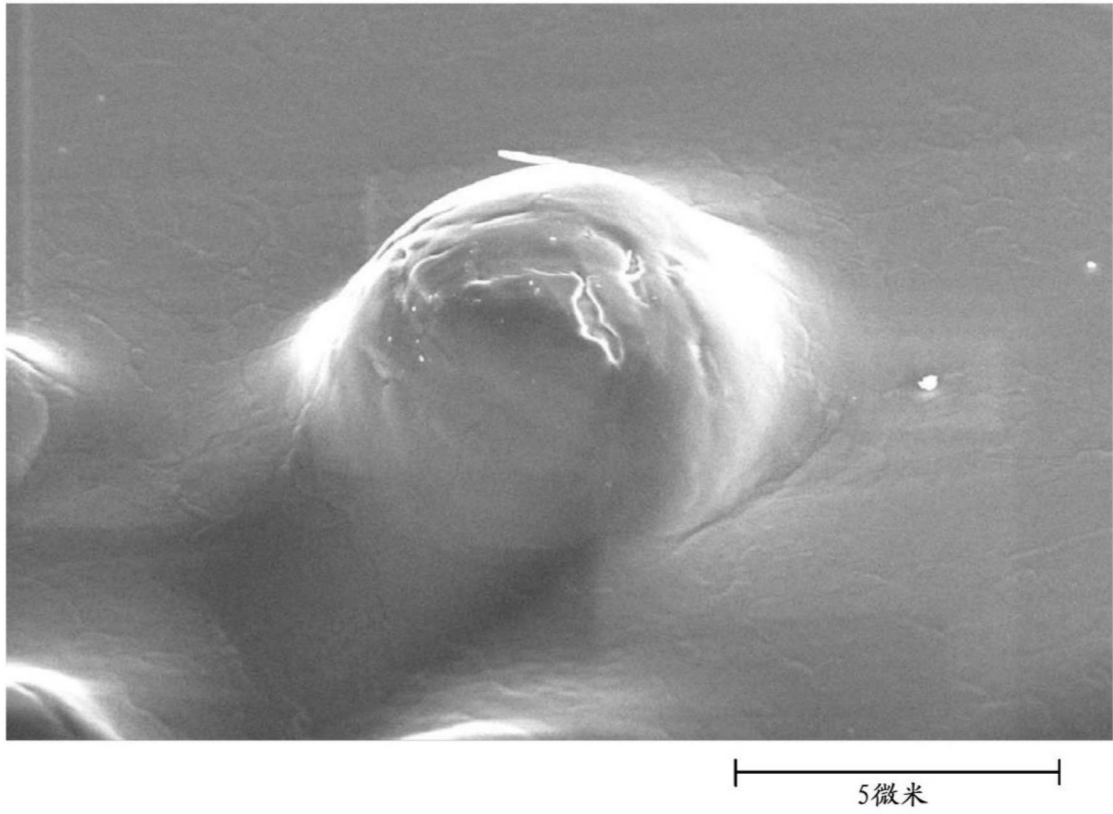


图2G

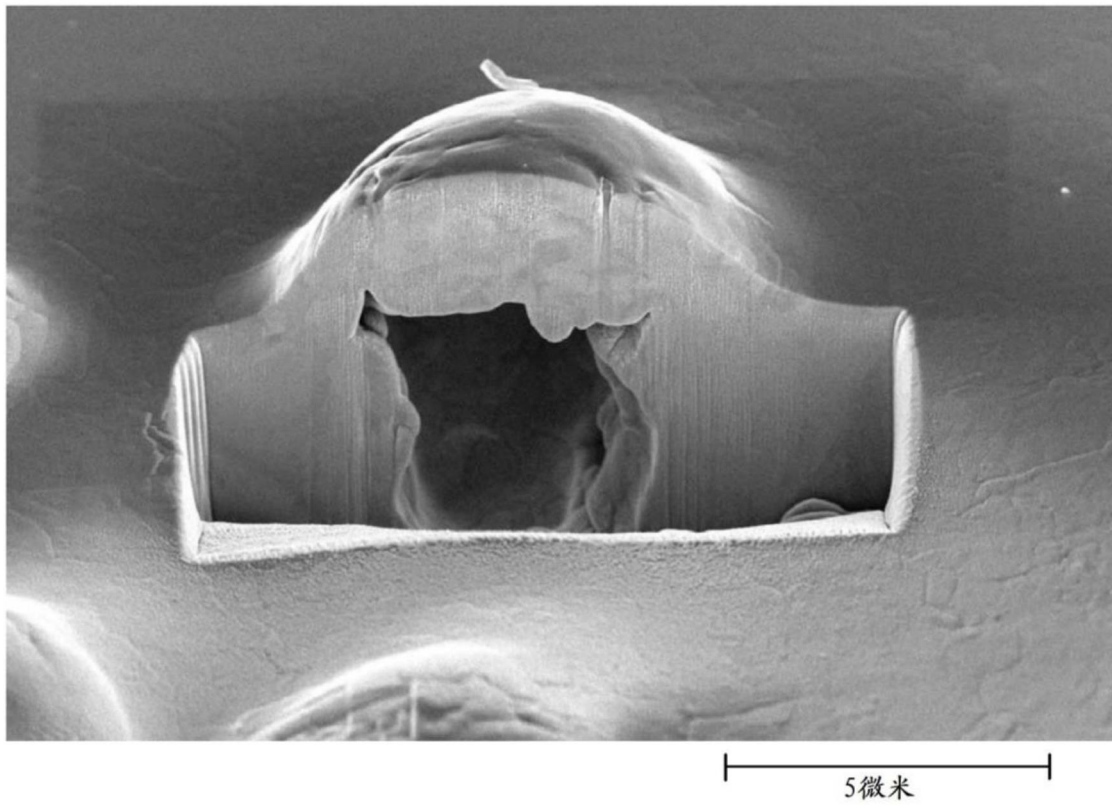


图2H

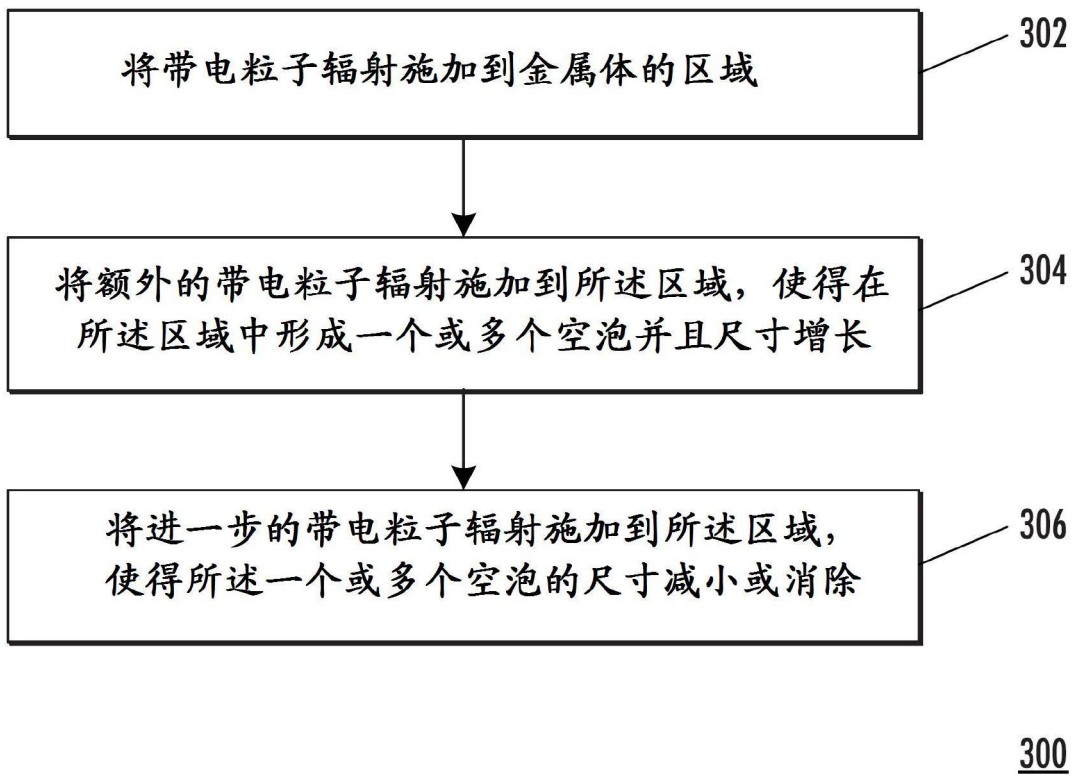


图3

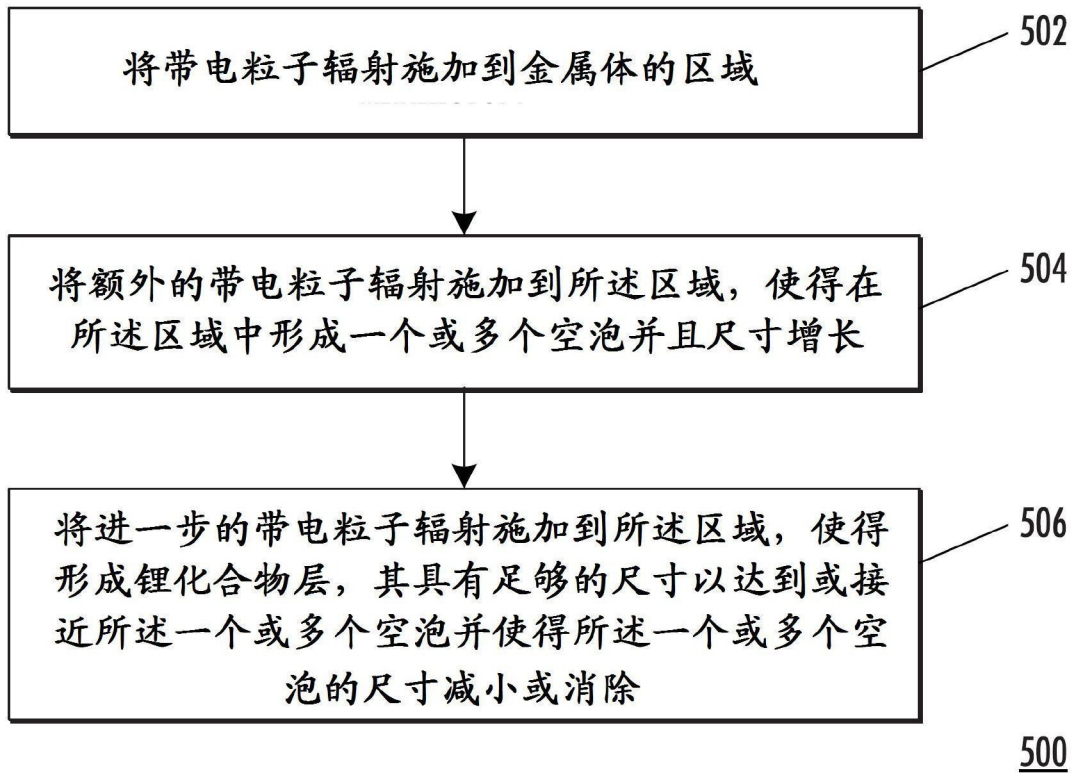


图5

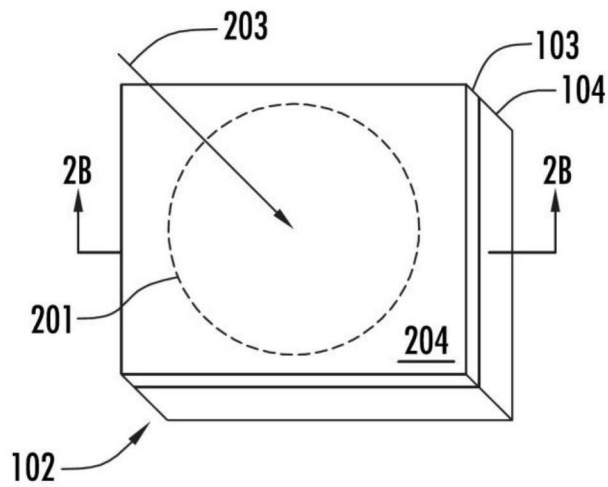


图4A

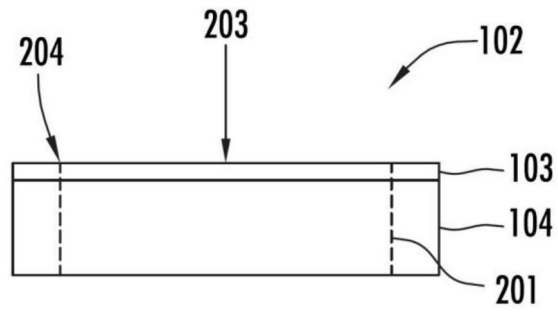


图4B

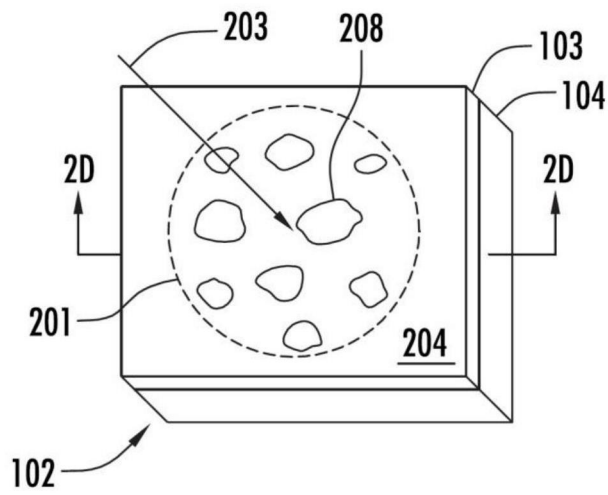


图4C

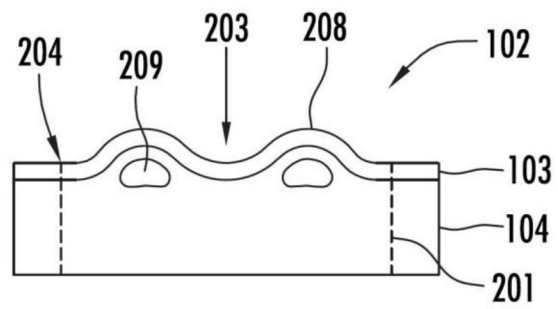


图4D

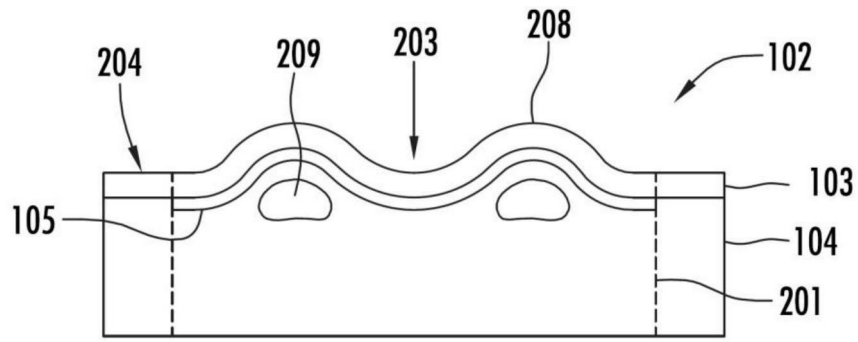


图4E

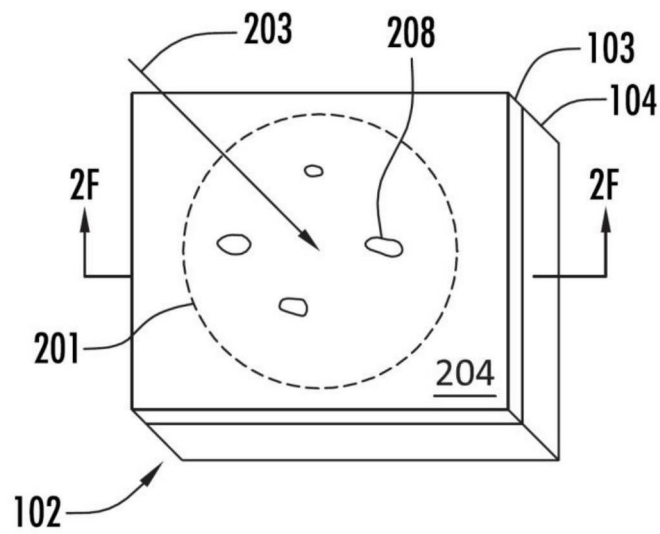


图4F

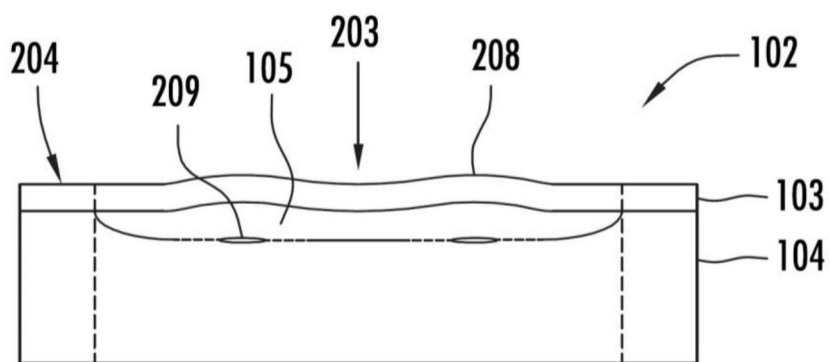


图4G

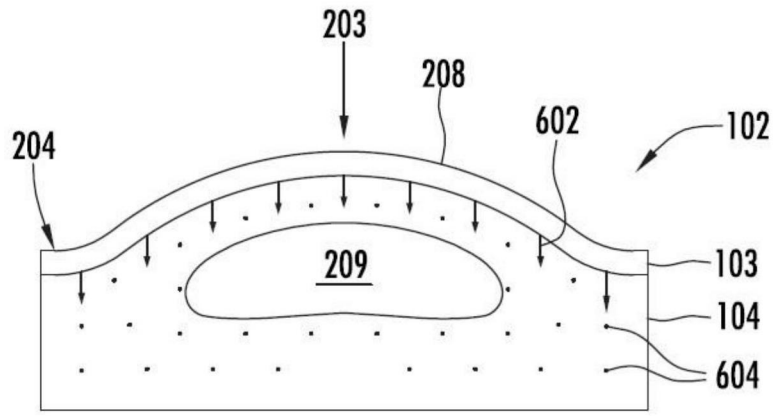


图6A

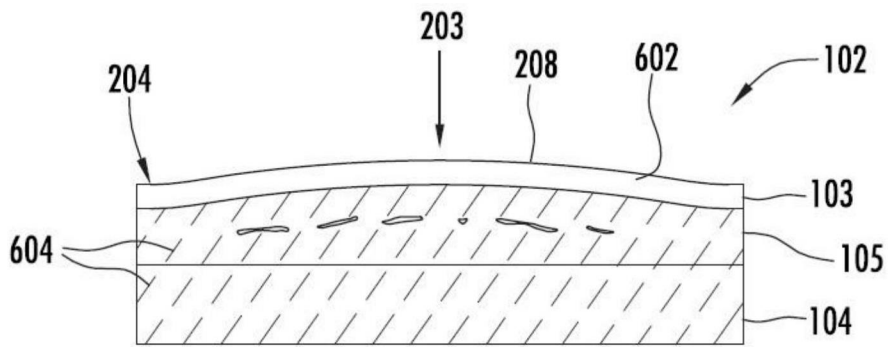


图6B

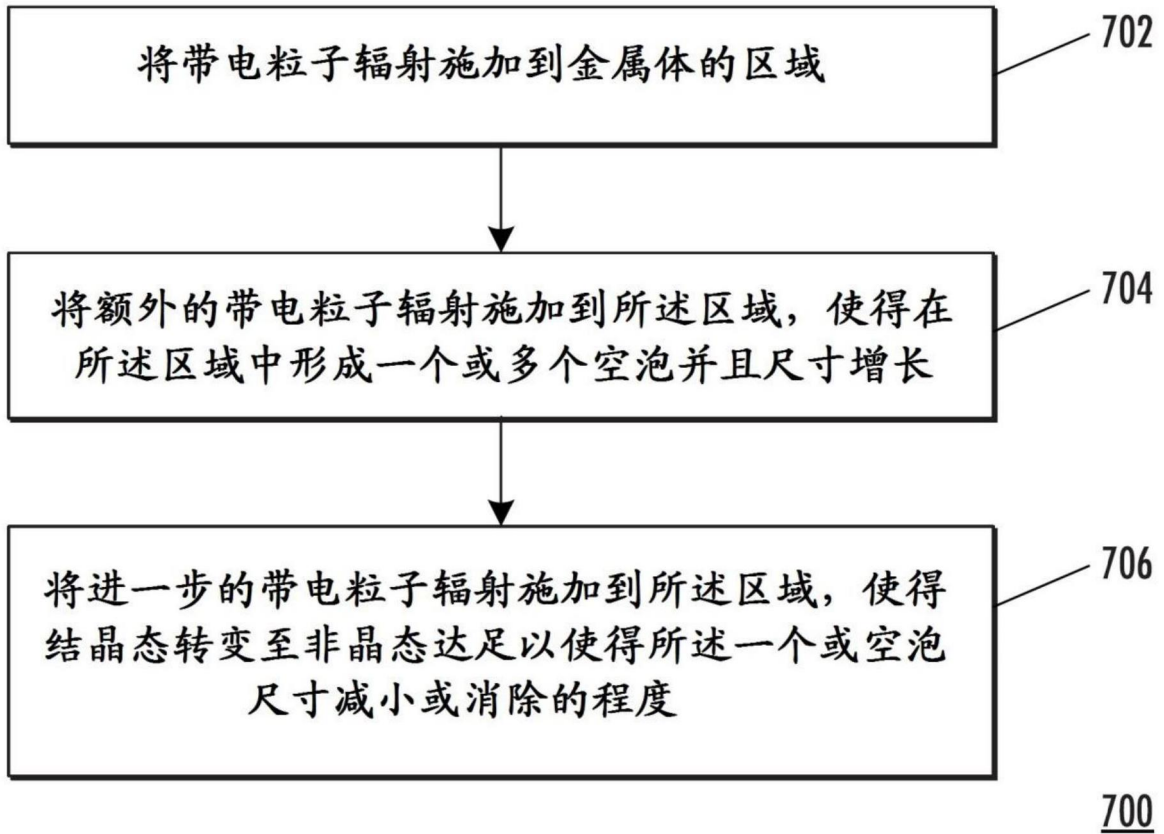


图7

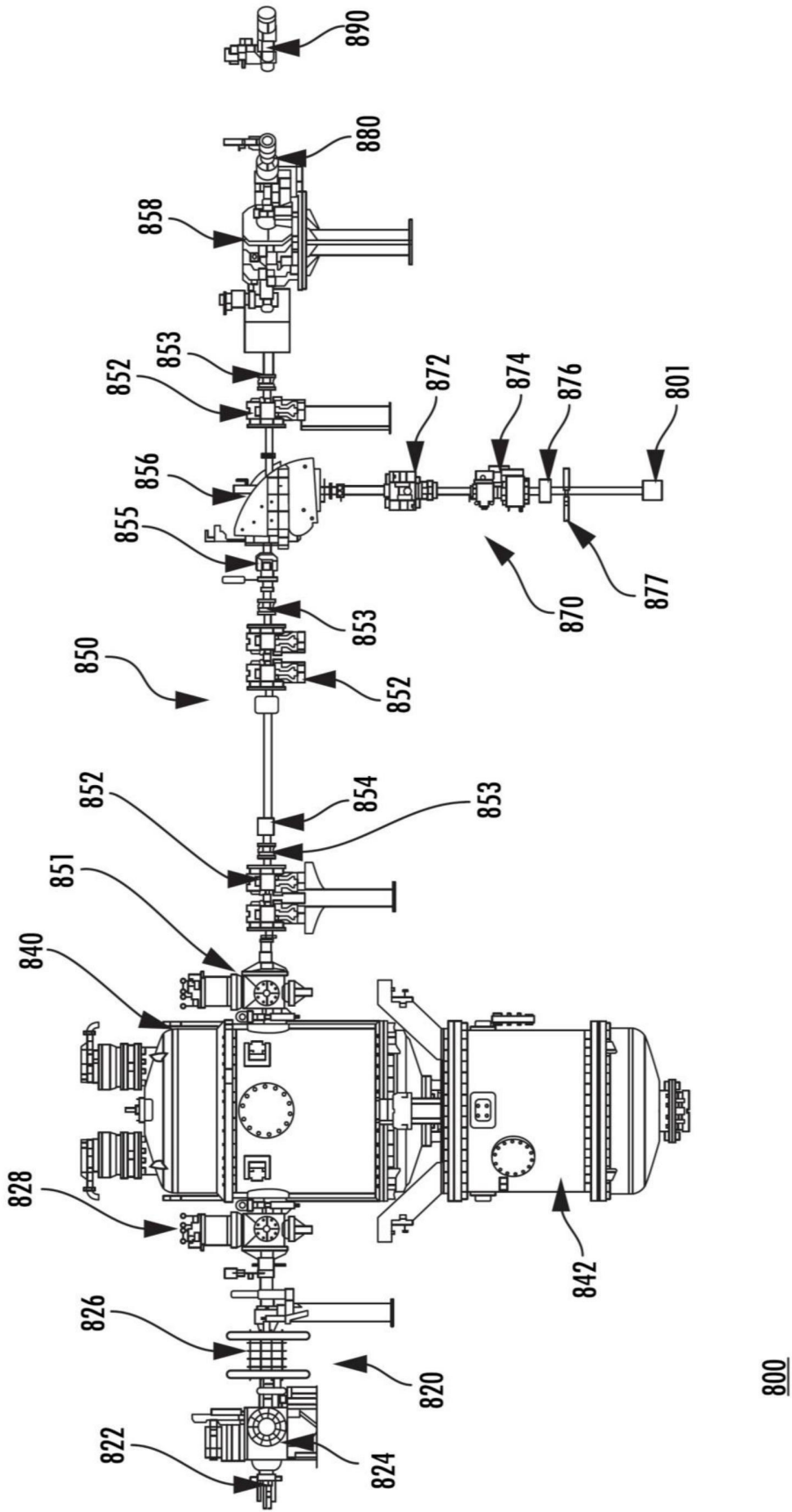


图8A

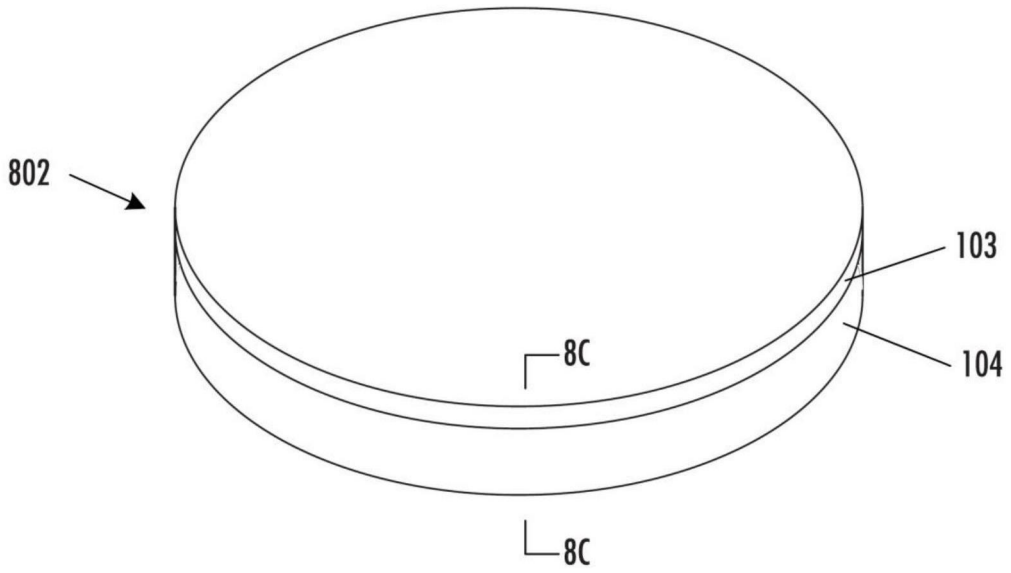


图8B

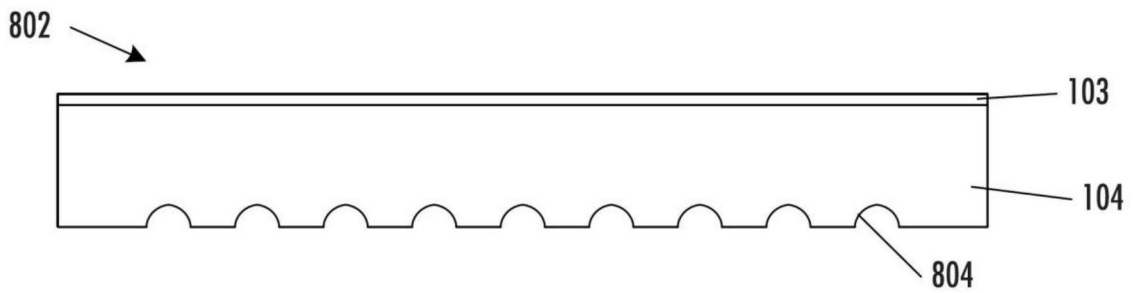


图8C

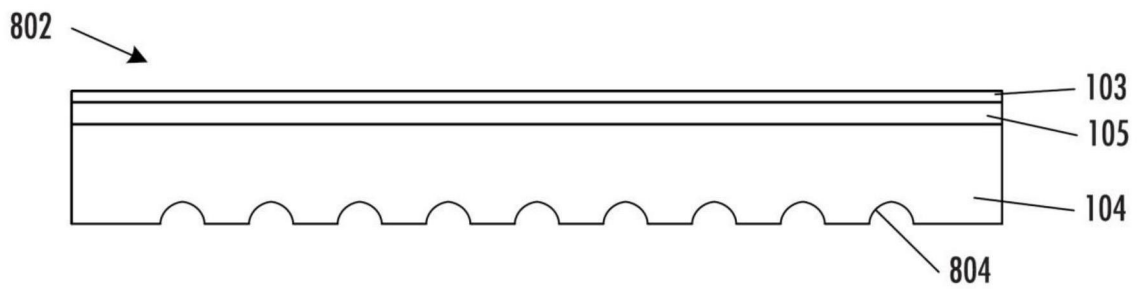


图8D

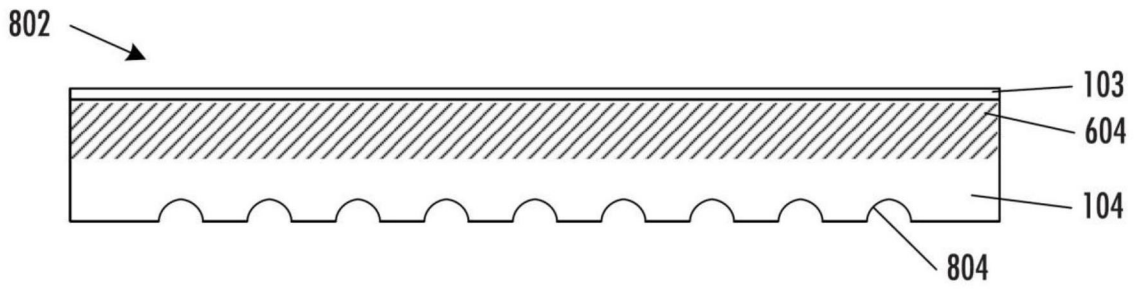


图8E

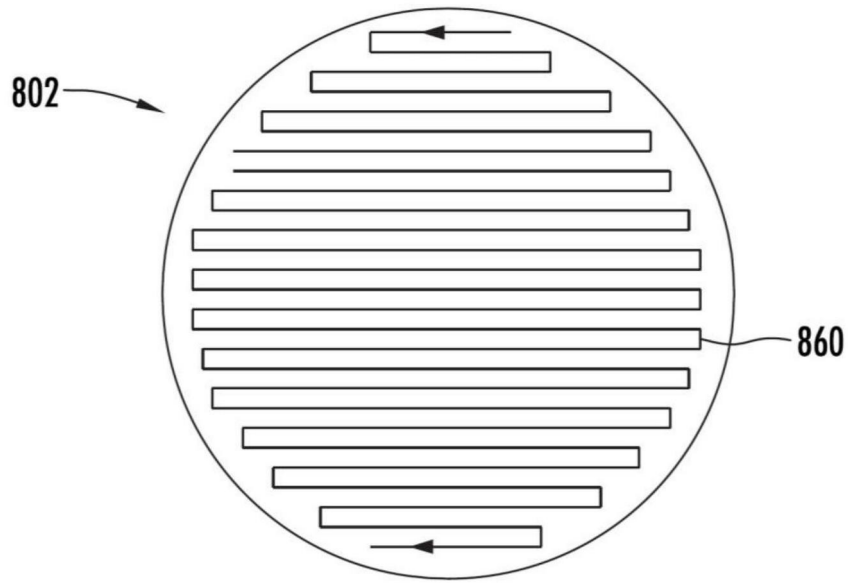


图8F

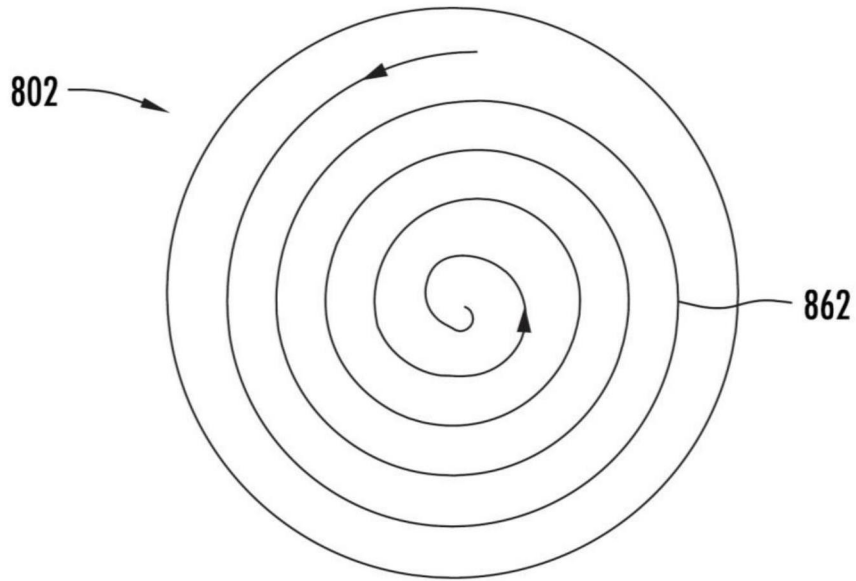


图8G

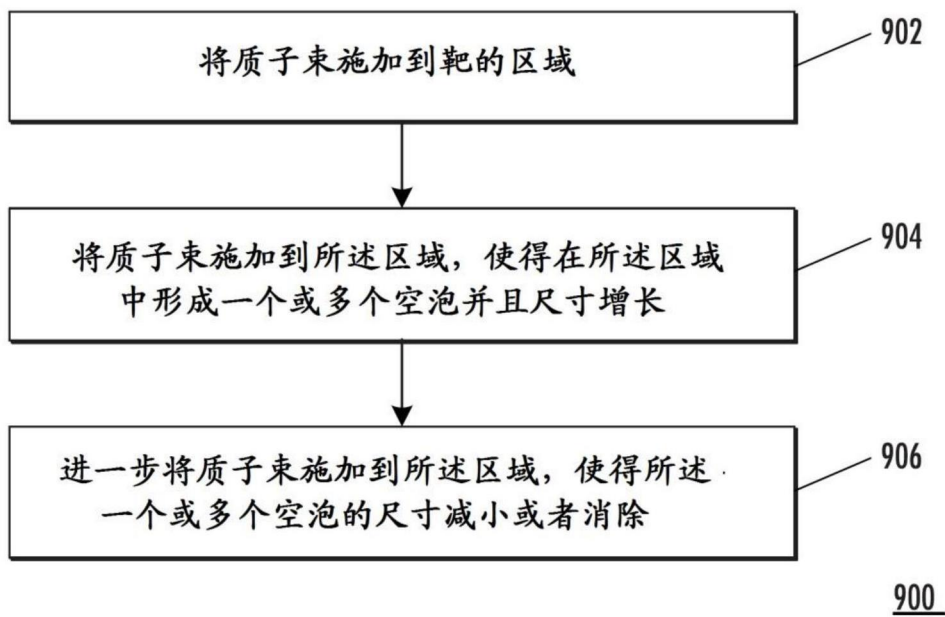


图9A

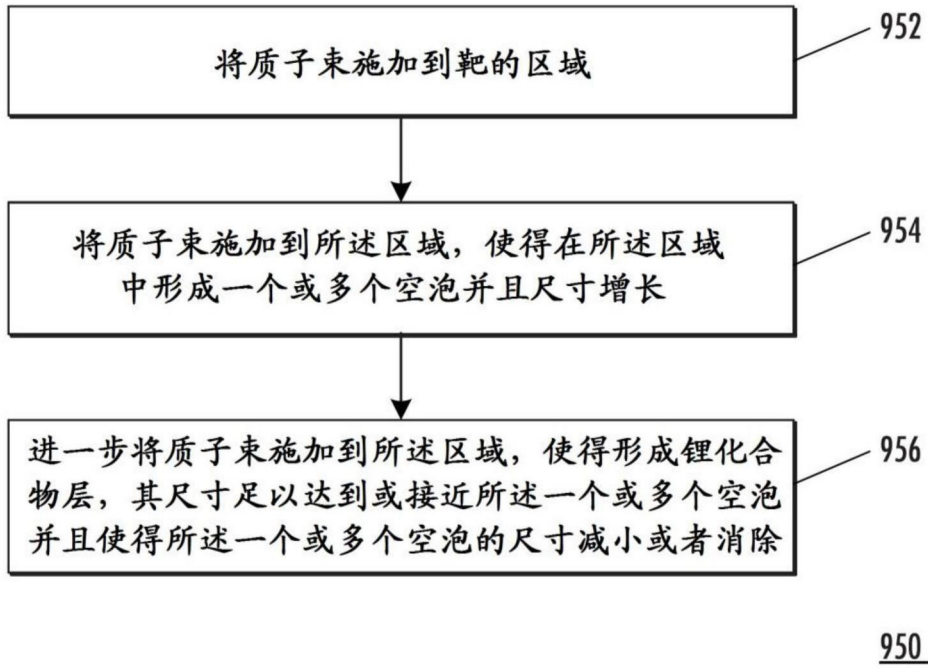


图9B

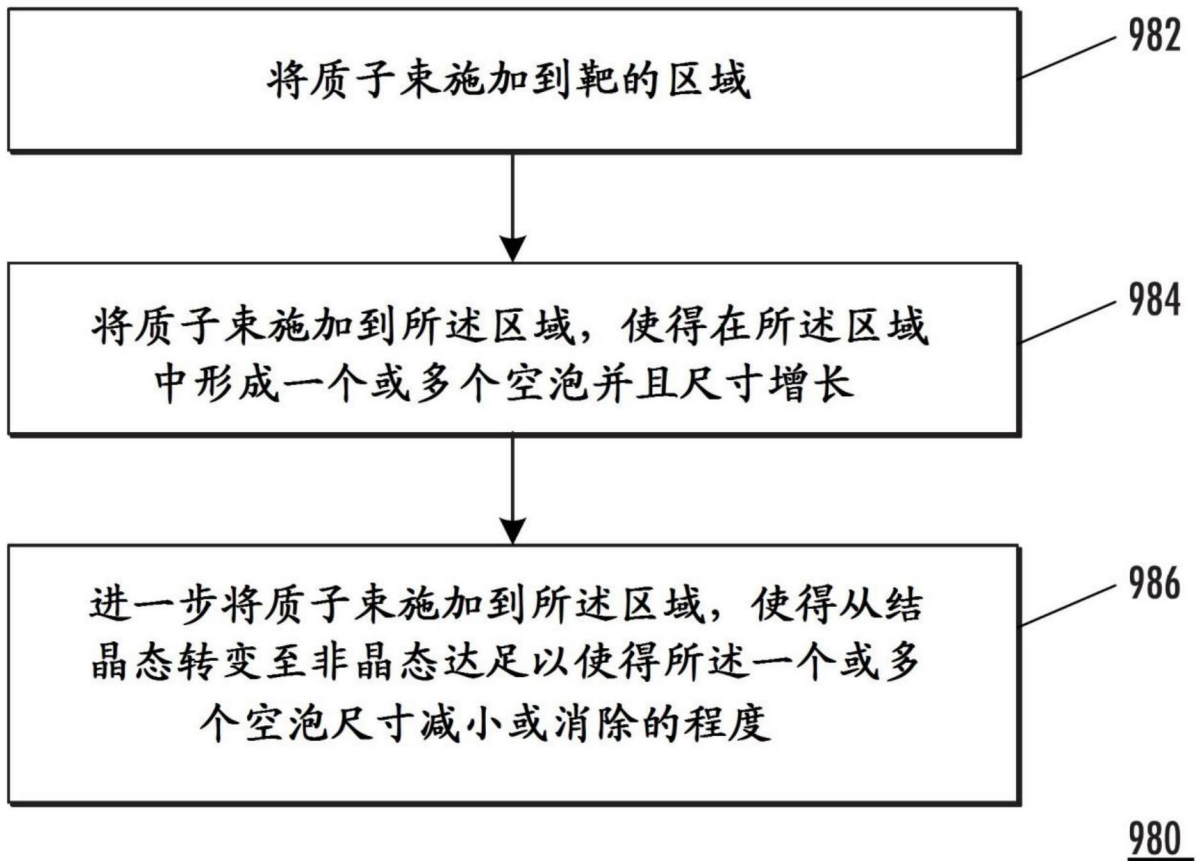


图9C

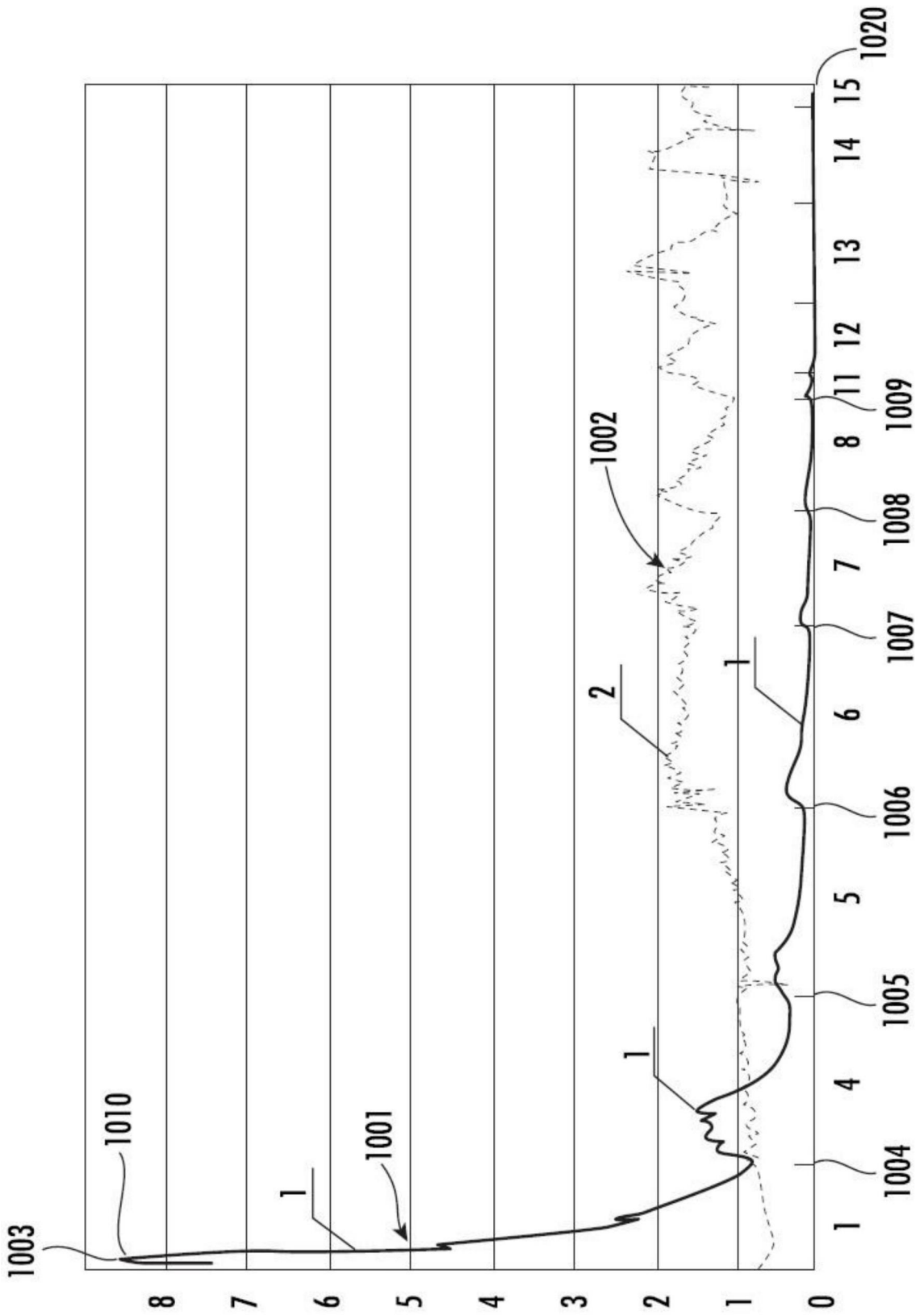


图10A

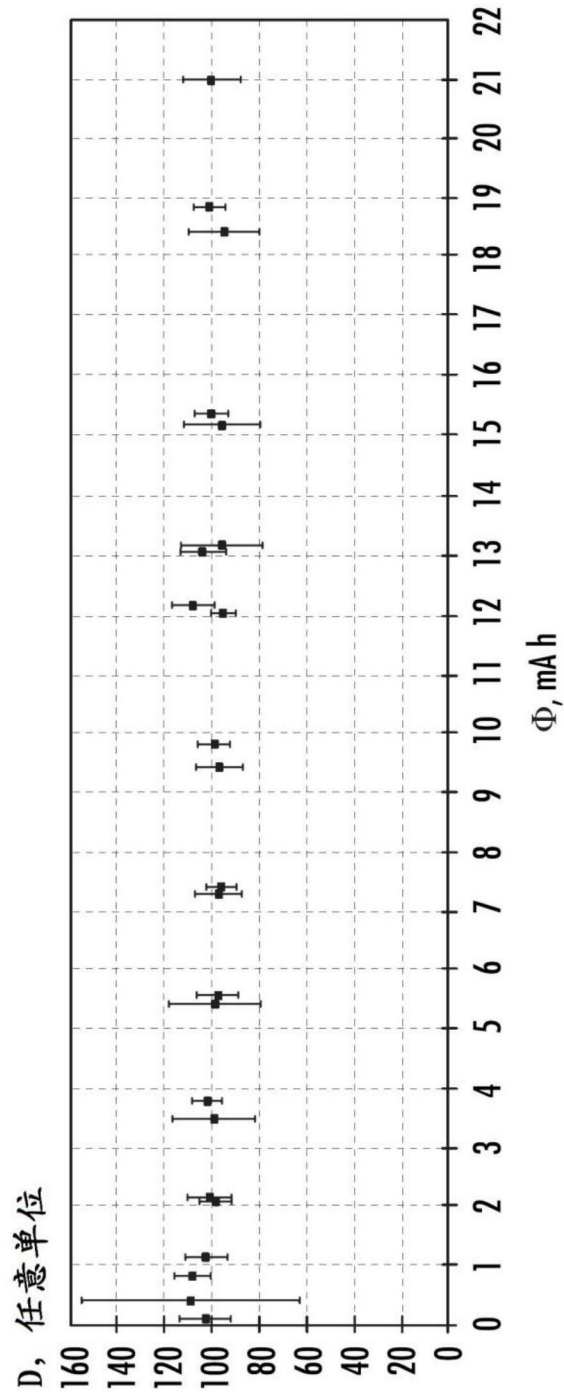


图10B

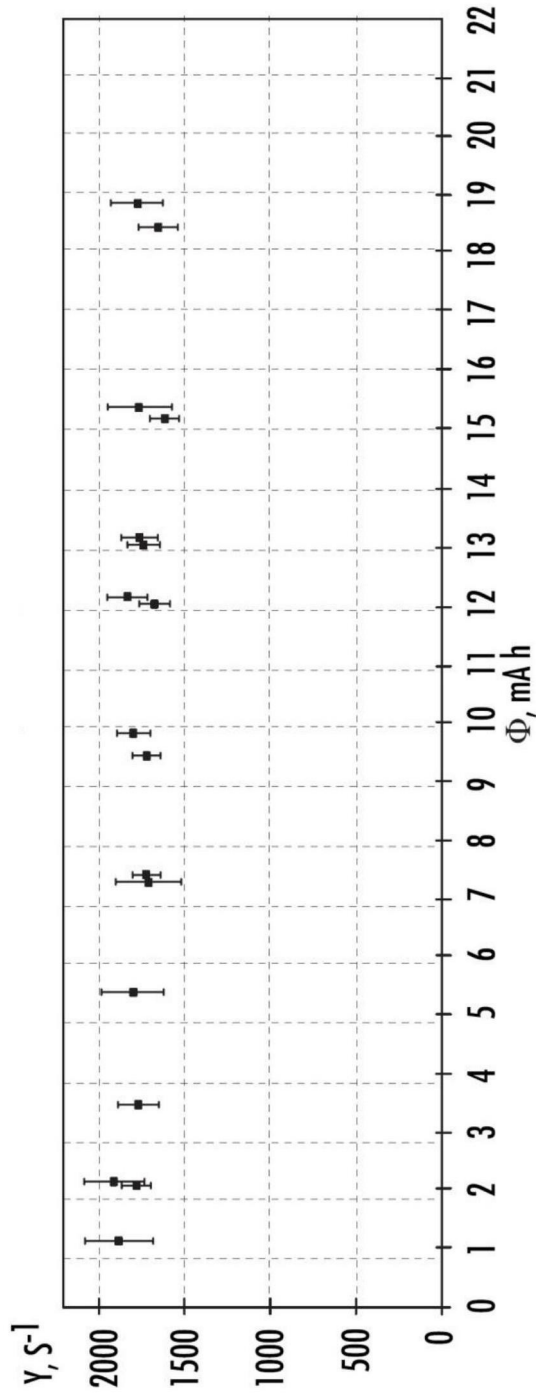


图10C

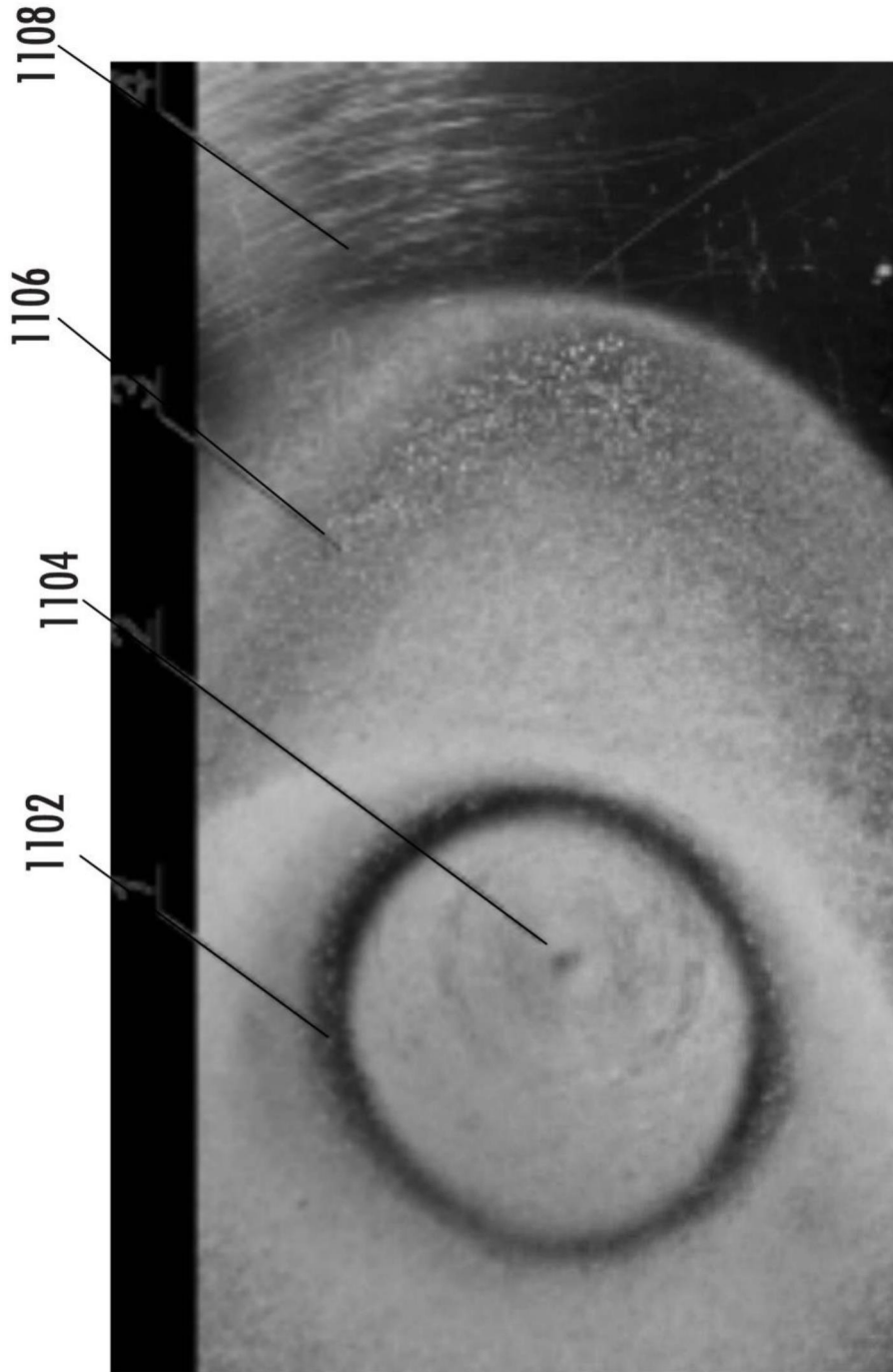


图11A

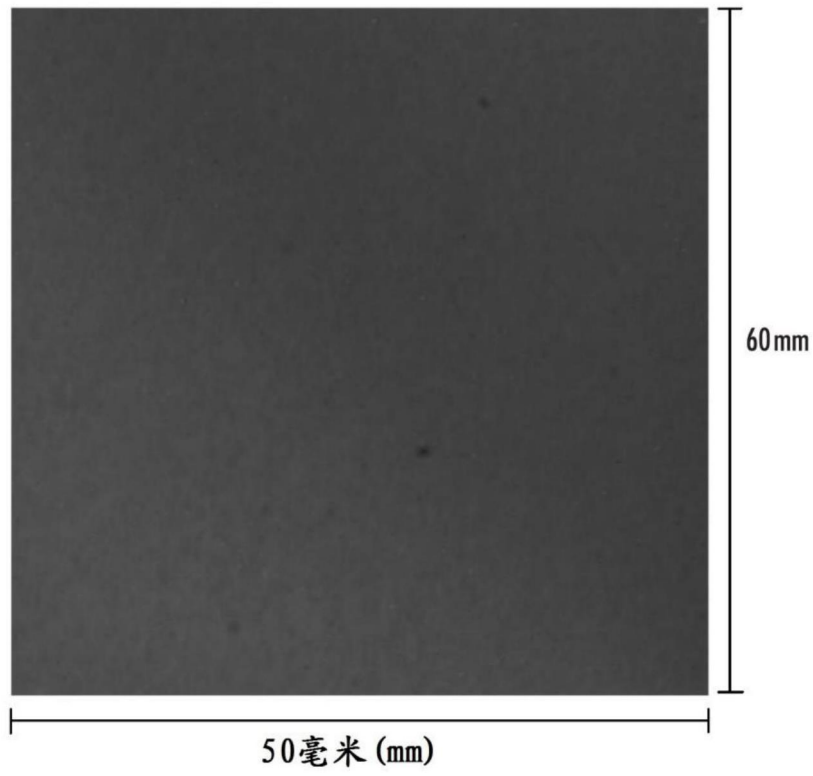


图11B

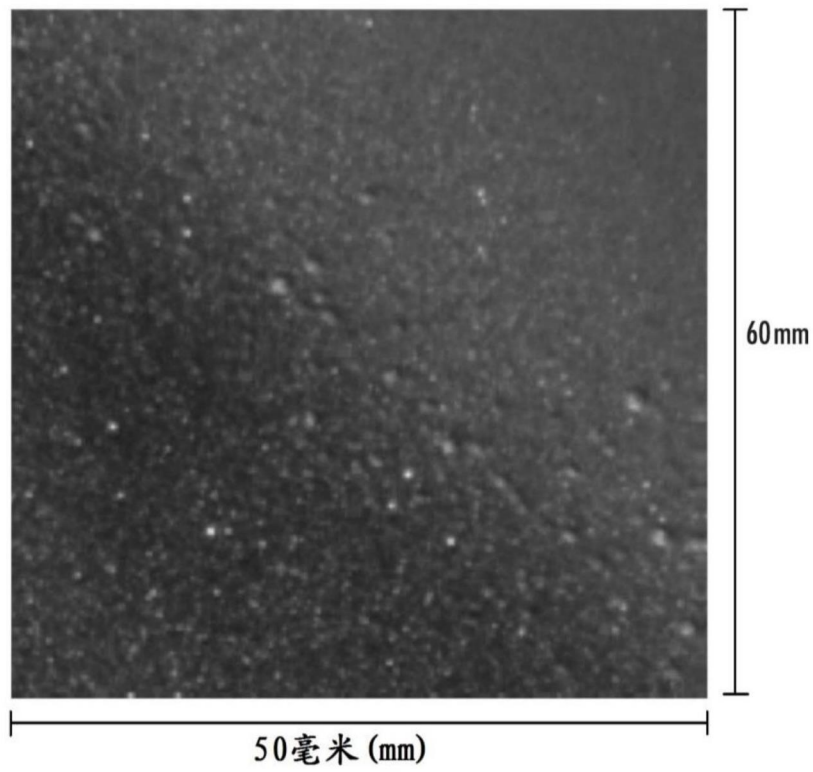


图11C