[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl[7]
H01L 21/76
C30B 33/08

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 99803025.2

[45] 授权公告日 2004 年 7 月 21 日

[11] 授权公告号 CN 1158702C

[22] 申请日 1999.2.8 [21] 申请号 99803025.2
[30] 优先权
[32] 1998. 2.17 [33] US [31] 09/025,114
[86] 国际申请 PCT/US1999/002625 1999.2.8
[87] 国际公布 WO1999/041779 英 1999.8.19
[85] 进入国家阶段日期 2000.8.17
[71] 专利权人 纽约市哥伦比亚大学托管会
地址 美国纽约州
[72] 发明人 M·列文 小 R·M·奥斯古德
审查员 刘静_1

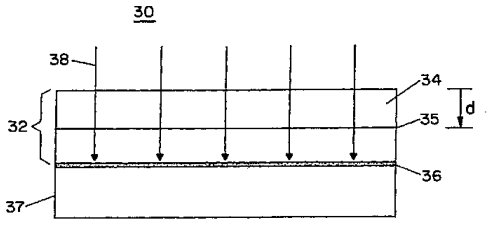
[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所
代理人 洪 玲

权利要求书 2 页 说明书 9 页 附图 6 页

[54] 发明名称 单晶膜的晶体离子切割

[57] 摘要

提供一种从外延层(32)/衬底(37)或体晶体结构上分离单晶膜的方法。该方法包括以下步骤：把离子(38)注入晶体结构以在晶体结构内在晶体结构的上表面以下的注入深度处形成损伤层(36)，并对损伤层进行化学腐蚀以实行单晶膜从晶体结构的分离。本发明的方法尤其有用于从金属氧化物晶体结构上分离单晶金属氧化物膜。



ISSN1008-4274

1. 一种用于把单晶膜从晶体结构加以分离的方法，所述方法包括以下步骤：

把离子注入所述晶体结构，以在所述晶体结构内在所述晶体结构的上表面以下的注入深度处形成损伤层；以及

把所述损伤层暴露于快速温度增加，以实行所述单晶膜从所述晶体结构的分离。

2. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于所述晶体结构是具有位于生长相容衬底上的金属氧化物外延层的外延层/衬底晶体结构。

3. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于所述金属氧化物外延层是一层磁性石榴石材料。

4. 如权利要求 2 所述的方法，其特征在于所述金属氧化物外延层是一层铁电材料。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于所述晶体结构是包括金属氧化物材料的体晶体结构。

6. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于所述暴露步骤包括以下步骤：

把所述晶体结构的温度从室温增加到第一温度范围内的温度；以及

把所述晶体结构的所述温度保持在所述第一温度范围内，以实行所述单晶膜从所述晶体结构的分离。

7. 如权利要求 6 所述的方法，其特征在于所述温度增加步骤的进行小于 60 秒。

8. 如权利要求 6 所述的方法，其特征在于所述温度保持步骤进行约 30 秒。

9. 如权利要求 6 所述的方法，其特征在于所述第一温度范围约 750 到 800 ℃。

10. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于还包括对所述损伤层进行化学处理的步骤以增强从所述晶体结构分离所述单晶膜的步骤。

11. 如权利要求 1 所述的方法，其特征在于所述温度暴露步骤包括低温熔化所述损伤层以实行从所述晶体结构分离所述单晶膜的步骤。

12. 如权利要求 10 所述的方法，其特征在于对所述损伤层进行化学处理

的所述步骤使为实行从所述晶体结构分离所述单晶膜所需的所述快速温度增加的程度减到最小。

13. 如权利要求 12 所述的方法，其特征在于所述温度暴露步骤包括低温熔化所述损伤层以实行从所述晶体结构分离所述单晶膜的步骤。

14. 一种用于从晶体结构上分离单晶膜的方法，所述方法包括以下步骤：

把离子注入所述晶体结构，以在所述晶体结构内在所述晶体结构的上表面以下的注入深度处形成损伤层；

把所述晶体结构键合到第二衬底上；以及

把所述损伤层暴露于快速温度增加，以实行所述单晶膜从所述晶体结构的分离。

15. 如权利要求 14 所述的方法，其特征在于所述晶体结构包括磁性石榴石材料。

16. 如权利要求 14 所述的方法，其特征在于所述晶体结构包括铁电材料。

17. 如权利要求 14 所述的方法，其特征在于所述第二衬底是低温熔化材料。

18. 如权利要求 14 所述的方法，其特征在于所述暴露步骤包括以下步骤：

把所述晶体结构的温度从室温增加到第一温度范围内的温度；以及

把所述晶体结构的所述温度保持在所述第一温度范围内，以实行所述单晶膜从所述晶体结构的分离。

19. 如权利要求 18 所述的方法，其特征在于所述温度增加步骤的进行小于 60 秒。

20. 如权利要求 18 所述的方法，其特征在于所述温度保持步骤进行约 30 秒。

21. 如权利要求 18 所述的方法，其特征在于所述第一温度范围约 750 到 800℃。

22. 如权利要求 18 所述的方法，其特征在于还包括：

在所述晶体结构和所述第二衬底之间加上键合层；以及

熔化掉所述键合层，以实行所述单晶膜从所述晶体结构的分离。

23. 如权利要求 22 所述的方法，其特征在于所述键合层是低温熔化材料。

单晶膜的晶体离子切割

技术领域

本发明一般讲涉及利用单晶膜制造集成电路器件的领域。尤其是，本发明涉及把微米薄的单晶金属氧化物膜从金属氧化物晶体结构中加以分离以键合(bonding)到生长不相容的衬底上。

背景技术

自 1987 年以来，已使用外延剥离(liftoff)技术来实现许多 III-V 族和元素半导体集成电路的异质集成。例如，已示出外延剥离对于在硅、砷化镓和其它公共衬底上集成异质结双极型晶体管(“HBT's”)和二极管激光器是有效的。然而，尽管有这一成就，但在这些公共衬底上却不能集成由其它重要材料，也即诸如金属氧化物等非半导体材料构成的器件。

在电-光和磁-光通信领域中已提出把非半导体材料与常规衬底相结合的集成电路器件的需要。例如，对用于光纤电信中的网络提出了在芯片上集成诸如光学隔离器等磁-光器件的需要。虽然市售的隔离器使用体铋代钇铁石榴石(“Bi-YIG”)，而其它常规的集成隔离器需要在钆镓石榴石(“GGG”)上进行外延生长，但常规的外延生长技术受到高温化学、复杂的化学计量比和晶格匹配的限制。

更重要的是，对于生长在与半导体材料相结合方面表现出良好光学和磁学特性的单晶结构，常规的方法是无效的。例如，在生产具有可接受的光学和磁学特性的单晶膜时，对使用生长多晶膜用的溅射生长的尝试并不成功。

在微波通信领域中，提出了把非半导体材料与常规衬底相结合的集成电路器件的另一个需要。例如，对需要集成电路器件的频率捷变谐振器就已提出这种需要。常规的频率捷变谐振器由诸如铁电固体等多晶材料制成，由于它们的带宽受到限制且损耗角正切高，所以是不理想的。相反，希望构筑由铁电或磁-光单晶膜制成的频率捷变谐振器和其它的集成微波电路。

此外，为 III-V 族半导体所开发的常规外延剥离技术利用隐埋的牺牲层与所关心的外延结构之间大的腐蚀速率差，以把后者从其生长衬底上加以分离。例如，早先的外延剥离技术基于铝镓砷化物(“$Al_xGa_{1-x}As$”)上砷化铝(“AlAs”)层的湿

法腐蚀的高选择性。随后的工作表明，在其它 III-V 族材料中外延生长层的剥离，全部基于牺牲外延层的选择性腐蚀。外延生长层用的常规键合技术包括了在裸衬底上使用粘合剂及范德瓦尔斯力。

因此，本发明的一个目的是提供一种把微米薄的单晶膜从诸如外延层(epilayer)/衬底或体金属氧化物晶体结构等晶体结构上加以分离以键合到生长不相容的衬底上的方法。

本发明的另一个目的是提供一种把磁性石榴石材料制成的微米薄的单晶膜从生长相容的衬底上加以分离以用于集成光子学和微波电路的方法。

本发明的再一个目的是提供一种把铁电材料制成的微米薄的单晶膜从生长相容的衬底或体晶体结构上加以分离以用于集成光子学和微波电路的方法。

本发明的又一个目的是提供一种把微米薄的单晶膜从生长相容的衬底上加以分离而不使用常规腐蚀技术的方法。

从以下详细描述并结合说明本发明实施例的附图，将使本发明进一步的目的、特征和优点变得明显起来。

发明内容

依据本发明的较佳实施例，提供一种从晶体结构上分离单晶膜的方法，该方法包括以下步骤：把离子注入晶体结构以在晶体结构内晶体结构的上表面以下的注入深度处形成损伤层，然后使损伤层暴露于快速温度增加以实行单晶膜从生长相容衬底上的分离。

依据本发明的再一个较佳方法，提供一种从晶体结构上分离单晶膜的方法，该方法包括以下步骤：把离子注入晶体结构以在晶体结构内晶体结构的上表面以下的注入深度处形成损伤层，把此晶体结构键合到第二衬底上，使损伤层暴露于快速温度增加以实行单晶膜从生长相容衬底上的分离。

附图说明

为了全面地理解本发明及其优点，现参考以下描述并结合附图，图中相同的标号表示相同的特征，其中：

图 1A 和 1B 依据本发明较佳的晶体离子切割方法分别示出用于提供单晶膜的外延层/衬底晶体结构和体晶体结构；

图 2 示出单晶膜的较佳晶体离子切割方法；

图 3 示出依据图 2 的晶体离子切割方法的离子注入步骤；

图 4 示出依据图 2 的晶体离子切割方法的离子注入步骤，借此利用外延层/衬底晶体结构以形成 YIG 或 Bi-YIG 单晶金属氧化物膜；

图 5 示出依据图 2 的晶体离子切割方法的离子注入步骤，借此利用体晶体结构以形成 $LiNbO_3$ 单晶金属氧化物膜；

图 6 示出钇铁石榴石中 3.8 MeV 的氦离子的注入分布；

图 7A 和 7B 分别示出依据图 2 晶体离子切割方法腐蚀步骤的侧视图和俯视图；

图 8 示出较佳的晶体离子切割方法，借此通过密封把对单晶金属氧化物膜的损伤减到最小；

图 9 示出较佳的晶体离子切割方法，借此通过快速热退火把残留的晶格损伤和表面粗糙减到最小；

图 10 示出较佳的晶体离子切割方法，借此使晶体结构暴露于快速温度增加；

图 11 示出较佳的晶体离子切割方法，借此把晶体结构键合到第二衬底上并暴露于快速温度增加；

图 12 示出图 11 的方法所用改进的晶体结构，其中把第二衬底直接键合到单晶膜的上表面；以及

图 13 示出图 11 的方法所用改进的晶体结构，其中把第二衬底间接键合到单晶膜的上表面。

具体实施方式

图 1A 和 1B 示出依据本发明较佳的晶体离子切割方法用以提供单晶膜 12 和 19 的晶体结构。图 1A 和 1B 分别示出用于分别形成单晶膜 12 和 19 的部分 15 和 18。有利的是，图 1A 和 1B 的晶体结构可以是金属氧化物的晶体结构，它们具有用于形成单晶金属氧化物膜的金属氧化物部分 15 和 18。

图 1A 示出外延层/衬底晶体结构 10A，它具有衬底 14、位于衬底 14 上表面上的外延层 15、外延层/衬底界面 16 和位于衬底 14 中离外延层/衬底晶体结构 10A 的上表面以下深度 d 处的损伤层 17。虽然图 1A 中的损伤层 17 位于外延层/衬底界面 16 以下，但根据需要损伤层 17 也可位于位于外延层 15 内。

图 1A 的外延层 15 可以是用于形成单晶金属氧化物膜的金属氧化物外延层。这样，外延层 15 可以是位于钆镓石榴石（“GGG”）或其它生长相容衬底的上表面上的一层磁性石榴石材料，最好是钇铁石榴石（“YIG”）、铋代钇铁石榴石（“Bi-

YIG")或其它石榴石材料。金属氧化物外延层 15 也可以是位于生长相容衬底上表面上的一层铁电材料，诸如铌酸锂(“$LiNbO_3$”)或钛酸锶(“$SrTiO_3$”)。另一方面，外延层/衬底晶体结构 10A 可包括位于其中的多个金属氧化物外延层。

图 1B 示出用于形成单晶膜 19 的体晶体结构 10B。体晶体结构 10B 也包括位于其中离体晶体结构 10B 的上表面以下深度 d 的损伤层 17。有利的是，体晶体 10B 可以是用于形成单晶金属氧化物膜的金属氧化物结构。正如图 5 再一次所示那样，图 1B 的体晶体结构 10B 是依据本发明的较佳晶体离子切割法用以形成 $LiNbO_3$ 单晶膜的较佳晶体结构。

图 2 示出对晶体结构上的单晶膜进行晶体离子切割的较佳方法 20。该方法包括把离子注入晶体结构以在衬底内形成损伤层(步骤 22)和从衬底对损伤或“牺牲”层进行化学腐蚀(步骤 24)的步骤。从而，把单晶膜从衬底上加以分离，以转移并键合到诸如硅或砷化镓等生长不相容的结构上。

图 3 示出依据图 2 晶体离子切割法的离子注入步骤。虽然相对于外延层/衬底晶体结构加以示出，但图 3 的离子注入步骤也适用于从体晶体结构上分离单晶膜。

如图 3 所示，以预定能量把诸如高能氦或氢离子等元素离子 38 注入外延层/衬底晶体结构 30，该结构 30 具有衬底 37、位于衬底 37 上的外延层 34 和外延层/衬底界面 35。该离子也可以是在注入后与晶体晶格发生反应的化学活性离子。注入的离子穿过外延层 34，从而在外延层/衬底晶体结构 30 的上表面以下的深度 d 处形成损伤层 36。或者，损伤层 36 可在外延层 34 内形成。

在形成损伤层 36 时，离子注入步骤把晶格缺陷引入了晶体结构 30。晶格缺陷由把能量转移到靶核而引入，并且在离子轨道(trajectory)的末端附近处形成。依据选中的注入种类和离子能量，在晶体结构 30 的表面以下深度 d 处的衬底 37 中引入晶格缺陷，继而引入损伤层 36。

再参考图 3，因此由注入离子 38 的能量水平确定了单晶膜 32 的厚度，可相应地改变该能量水平以产生想要的膜厚。损伤层或“牺牲”层使得可把单晶膜 32 从晶体结构 30 的顶部切下(slice off)，以转移并键合到生长不相容的衬底上。

图 4 示出图 2 的较佳方法，其中把例如单独充电的 3.8 MeV 的氦离子 48 垂直注入外延层/衬底晶体结构 40 的上表面，以在晶体结构 40 内形成损伤层 46。晶体结构 40 包括 YIG、Bi-YIG 或其它石榴石外延层 42、GGG 或其它生长相容衬底 47 以及外延层/衬底界面 45。在注入期间，单独充电的 3.8 MeV 氦离子的注入剂

量额定在 $5X10^{16}$ 离子/cm^2 的数量级。把样品安装在特别设计的直径为两英寸的水冷靶托上，以保证衬底的温度低于 400℃。

作为附加的预防措施，把离子注入期间的电流束保持较低，例如小于 0.25μA/cm^2。此预防措施是防止样品的光吸收率和磁性各向异性在离子注入期间发生变化所必需的。通过靶托外部的四个法拉第杯来检查注入的均匀性。

类似地，如图 5 所示，可把单独充电的 3.8 MeV 的氦离子 58 垂直注入体晶体结构 50 的表面，以在晶体结构 40 内形成损伤层 56。体晶体结构 50 可以由磁性石榴石或铁电材料构成。

在如图 2 到 5 所示的较佳实施例中，有利地选择重量轻的注入种类(最好是氦)，以产生深埋的损伤层。此外，由于晶体中获得的注入剖面及晶格损伤的分布(继而它由每单位轨道长度的能量损耗或“阻挡本领(stopping power)”来确定)，所以氦是理想的。在高的离子能量下，“阻挡本领”以电子散射为主导，并由林哈德-沙尔夫-肖特(“LSS”)理论加以表征。LSS 理论指出阻挡本领正比于$\sqrt{E}$，这里 E 是沿高离子能量的轨道注入的离子的能量。在低能量下，“阻挡本领”反比于 E^2，且主要由同主核(host nuclei)进行的卢瑟福散射加以表征。

图 6 示出以 3.8 MeV 的能量注入 YIG/GGG 晶体结构的氦离子的注入分布剖面。图 6 的注入分布剖面以来自离子在物质中的迁移(“TRIM”)计算的模拟结果为基础，该计算与以 3.8 MeV 的能量注入 YIG/GGG 晶体结构的氦离子的实际注入分布值相匹配。有利的是，注入剖面较窄，并集中在晶体结构的表面以下近似 9μm 处。以 3.8 MeV 的能量注入 Bi-YIG/GGG 晶体结构的氦离子的注入分布剖面表现出几乎相同的注入深度。

再参考图 2 的较佳方法 20，离子注入步骤 22 后接化学腐蚀步骤，用以从晶体结构的衬底上溶解掉损伤或“牺牲”层。一旦通过化学腐蚀步骤溶解了损伤层，单晶膜使从衬底上分离，并变得可供转移和键合到生长不相容的衬底。

图 7A 和 7B 是分别示出依据图 2 晶体离子切割方法的腐蚀步骤的侧视图和俯视图。如图 7A 所示，把化学腐蚀剂加到外延层/衬底晶体结构 70 上，结构 70 具有衬底 77、位于衬底 74 上表面上的外延层 74 以及损伤层 76。在经受适当的暴露周期后，化学腐蚀剂使单晶膜 72 变得从衬底 74 上分离。无论损伤层 76 位于衬底 77 内部还是在外延层 74 内，化学腐蚀剂的作用都是相同的。然而，腐蚀速率可以不同，视损伤层 76 位于衬底 77 内还是位于外延层 74 内而定。

为把 YIG/Bi-YIG 单晶膜从 YIG/GGG 或 Bi-YIG/GGG 晶体结构上加以分离，最

好使用市售的 85%稀释正磷酸。此外，为了加速化学腐蚀过程，有利的是，搅动正磷酸并把它保持在恒定的温度下，最好是 70℃。还可进一步增加此酸的温度，以实行较快的腐蚀速率。

名义上，把腐蚀剂加到晶体结构 70 上长达 24 到 48 小时，视待分离单晶膜的尺寸而定。进一步如图 7A 所示，在暴露于化学腐蚀剂几小时后，在衬底 77 中形成深的钻蚀(undercut)78。参考如图 4 所示的注入步骤，例如，依据图 6 的注入分布剖面，钻蚀(未示出)集中在 YIG/GGG 晶体结构 40 的上表面以下约 9μm 处。在腐蚀后，把衬底 74 分离，留下单晶膜，其下侧在显微镜下光滑且适合于键合到生长不相容的衬底上。

通过把钻蚀 78 的腐蚀速率与同一情况下上表面的腐蚀速率相比较，来确定牺牲层与晶体结构的剩余部分之间的腐蚀速率差。后者通过以二氧化硅掩蔽上表面的一部分并以剖面仪(profilometer)测量腐蚀台阶加以确定。使用 Nomarski 棱镜显微镜或通过解理掉单晶膜突出的一部分来测量钻蚀的深度。把腐蚀选择性定义为牺牲层与上表面之间腐蚀速率之比，发现其值超过 10^3。

为了把 $LiNbO_3$ 单晶膜从诸如图 5 所示的体晶体结构上加以分离，对于 $LiNbO_3$ 体晶体结构的“牺牲”层的化学腐蚀，5%的稀释氢氟酸是较佳的。为分离 $LiNbO_3$ 单晶膜的 $1mm^2$ 样品，将腐蚀在室温下进行 24 小时或更少。

如本发明的示例所示，已使用图 2 的晶体离子切割方法把磁性石榴石材料层从 GGG 衬底上加以分离。在一个例子中，通过液相外延在 GGG 衬底上生长 10μm 或 95μm 厚的 YIG 外延层，此 GGG 衬底包含少量的镓，以改善与 GGG 衬底的晶格匹配。在另一个例子中，在 GGG 衬底上还生长 3μm 厚的 Bi-YIG 薄膜。在这两种情况下，使用图 2 的方法把近似于 9 到 10μm 厚的高质量单晶膜从原始衬底上加以分离。然后，把单晶膜通过范德瓦尔斯方法键合到诸如硅和砷化镓一类衬底的生长不相容的衬底上。对单晶膜磁畴的法拉第对比(contrast)检查表明，并未因晶体离子切割工艺的结果而使石榴石的畴结构和矫顽磁力发生变化。

然而，再参考图 2 的较佳方法，化学腐蚀步骤可导致单晶膜上表面的残留晶格损伤、表面粗糙化或边角碎裂等。例如，使用表面剖面仪，已示出在典型的腐蚀条件下暴露六小时即在图 4 的 YIG/GGG 例子中产生 20nm 的平均粗糙度。此外，边角碎裂可能发生在如图 7B 的虚线所示的化学腐蚀步骤期间。因此，需要额外的防护措施，以使单晶膜的损伤减到最小并保证产生高质量的薄膜。

所以，图 8 示出从晶体结构对单晶膜进行晶体离子切割的较佳方法 80，借此

通过密封使残留晶格损伤和表面粗糙减到最少。方法 80 包括以下步骤：把离子注入晶体结构以在衬底内形成损伤层(步骤 82)，密封单晶膜的上表面(步骤 84)以及从衬底上化学腐蚀掉损伤层 (步骤 86)。依据本发明的一个较佳方面，以熔化的蜡或阿皮松 W 混合物来密封图 7 的单晶膜 72 的边角，以防止其后的化学腐蚀步骤所引起的残留晶格损伤和表面粗糙而导致单晶膜的碎裂。

图 9 示出从晶体结构对单晶膜进行晶体离子切割的较佳方法，借此通过快速热退火来使残留晶格损伤和表面粗糙减至最少。方法 90 包括以下步骤：把离子注入晶体结构以在衬底内形成损伤层(步骤 92)，快速热退火(步骤 94)和从衬底化学腐蚀掉损伤层(步骤 96)。

如图 9 所示，快速热退火(步骤 94)在离子注入步骤(步骤 90)后但在化学腐蚀步骤(步骤 96)前进行。此快速热退火用于修复残留损伤，而不损害随后湿法腐蚀隐埋层的效率。最好，在 700℃下，在 5%的氢气和 95%的氮气构成的形成气体中退火 40 秒钟，从而使表面光滑并因之形成高质量的单晶膜。相反，在高于 800℃以上的温度下进行快速温度退火是不理想的，因为通过退火除去(anneal off)“牺牲”层中的损伤明显地削弱了隐埋层的腐蚀速率。因此，与不包括快速温度退火步骤(步骤 94)的方法相比，包括在约 800℃下进行快速温度退火步骤(步骤 94)的图 9 的方法将减小与随后的化学腐蚀步骤(步骤 96)相关的腐蚀速率。

再参考图 2 的较佳方法，化学腐蚀步骤 24 的持续时间额定为 24 到 48 小时，视待分离的单晶膜的尺寸而定。例如，为了把膜的面积为 1 平方毫米部分与衬底完全分离，必需把晶体结构在腐蚀剂中暴露约 24 到 48 小时。

因此，作为图 2 方法的一个更快的选择，图 10 示出从外延层/衬底或体晶体结构对单晶膜进行晶体离子切割的另一较佳方法 100，借此使晶体结构暴露于快速的温度增加来实行单晶膜从生长相容衬底上的分离。方法 100 包括以下步骤：把离子注入晶体结构内外延层/衬底界面以下，以在生长相容衬底内形成损伤层(步骤 100)，暴露晶体结构于快速温度增加，从而实行把单晶膜从生长相容衬底上加以分离或“突然折断(snap off)”（步骤 102）。图 10 的暴露步骤 102 包括在 60 秒内把晶体结构的温度从室温升高到约 750 到 800℃。从而，通过把晶体结构的温度在约 750 到 800℃下保持大致 30 秒来实现单晶膜的分离。

作为附加的步骤，可在离子注入期间或之前使用化学增强气体(诸如氯气)或液体对损伤层进行化学处理，以增强单晶膜的分离。还可对损伤层进行化学处理，以便把实行从晶体结构分离单晶膜所需的快速温度增加的程度减到最小。

图 11 示出从晶体结构对单晶膜进行晶体离子切割的较佳方法 110，借此把晶体结构直接或间接键合到第二衬底并暴露于快速温度增加，以把单晶膜从生长相容衬底上分离下。图 1A 及如图 12 和 13 进一步所示的外延层/衬底晶体结构或者图 1B 的体晶体结构可使用本方法。

再参考图 11，方法 110 包括以下步骤：把离子注入晶体结构以在衬底内形成损伤层(步骤 110)，把单晶膜的上表面直接或间接键合到第二衬底上(步骤 112)，把此晶体结构暴露于快速温度增加，以便实行把单晶膜从晶体结构上加以分离或“突然折断”(步骤 114)。如同图 10 的方法，暴露步骤(步骤 114)包括在 60 秒内把晶体结构的温度从室温升高到约 750 到 800℃。借此，通过把晶体结构的温度在约 750 到 800℃下保持大致 30 秒来实现单晶膜的分离。

有利的是，依据键合步骤(步骤 112)把第二衬底直接键合到晶体结构的上表面，最好是通过 Yokoi 等人在日本应用物理期刊第 36 卷第 2784 页(1997)的“用于半导体与磁性石榴石之间晶圆片直接键合的改进热处理”中所述的直接晶圆片键合技术。第二衬底可以是诸如硅或 GaAs 等半导体。此方法的优点在于，在把单晶膜从晶体结构上加以分离后保留与第二衬底的键合。

或者，图 11 的方法可包括在晶体结构的上表面与第二衬底之间加上低温键合层的步骤。低温键合层的作用是避免在分离过程中将损伤或牺牲层退火掉(anneal out)。不管使用外延层/衬底还是体晶体结构，此技术都是相同的。

图 12 示出用于图 11 较佳方法中改进的晶体结构 120。通过举例而非限制，改进的晶体结构 120 类似于图 1A 所示的外延层/衬底晶体结构。改进的晶体结构 120 包括第一生长相容衬底 127、第二衬底 128、位于第一和第二衬底 127 和 128 之间的外延层 124 以及位于第一衬底 127 中离外延层 124 和第二衬底 128 之间的界面 125 深度 d 的损伤层 126。最好通过直接晶圆片键合把第一和第二衬底 127 和 128 键合在一起。外延层 124 最好是安装在诸如 GGG 或其它生长相容衬底等第一衬底 127 之间的一层磁性石榴石或铁电材料。

图 13 示出用于图 11 较佳方法中另一改进的晶体结构 130，其中第二衬底 128 间接地键合到单晶膜 124。如图 13 所示，通过举例而非限制，改进的晶体结构 130 包括第一生长相容衬底 127、第二衬底 128、位于第一衬底 127 之间的外延层 124、位于外延层 124 与第二衬底 128 之间的键合层 132 以及位于第一衬底 127 中离外延层 124 和第二衬底 128 之间的界面 125 深度 d 的损伤层 126。

如图 13 所示，外延层 124 最好是安装在第一衬底 127(最好是 GGG 或其它生长相容衬底)之间的一层磁性石榴石或铁电材料。键合层 132 最好是诸如低温熔化玻璃等低温熔化材料，其熔点小于图 10 和 11 中相应步骤 104 和 116 的 750 至 800℃温度曲线坪顶。

虽然已结合特定实施例描述了本发明，但应理解，容许对这些实施例进行修改和变化，而不背离所揭示发明的概念。

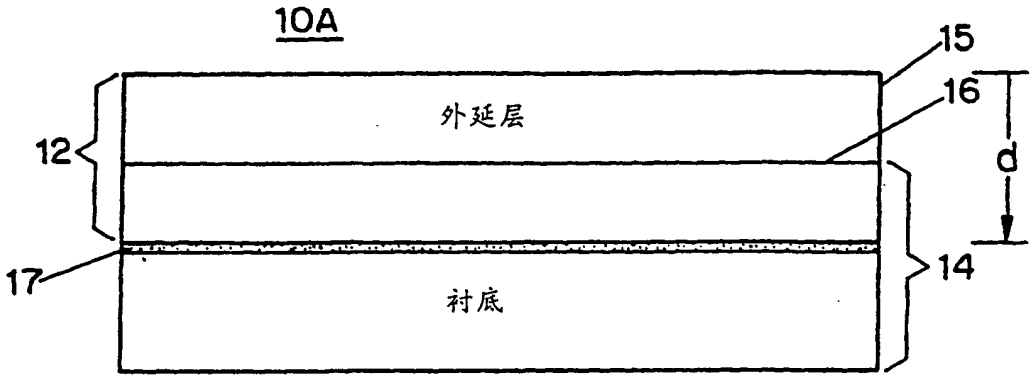

10A
15
16
外延层
12
d
17
14
衬底

图 1A

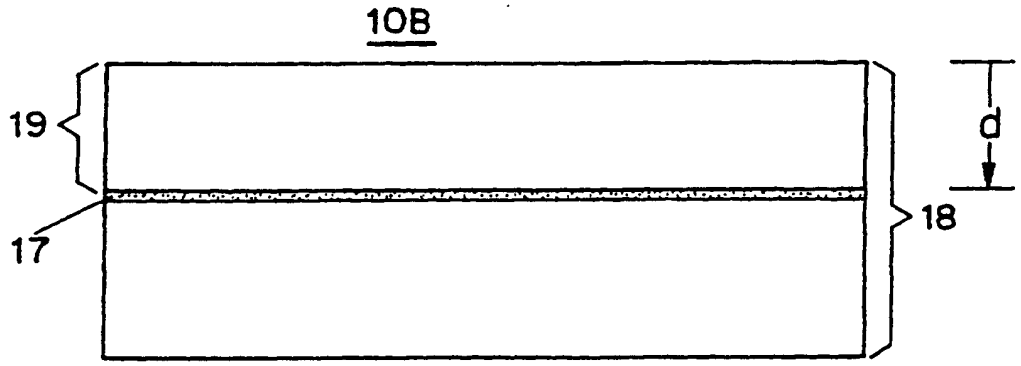

10B
19
d
17
18

图 1B

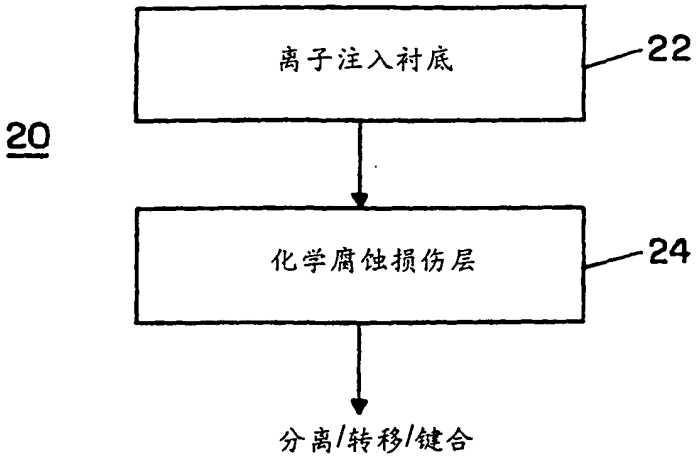

20
离子注入衬底
22
化学腐蚀损伤层
24
分离/转移/键合

图 2

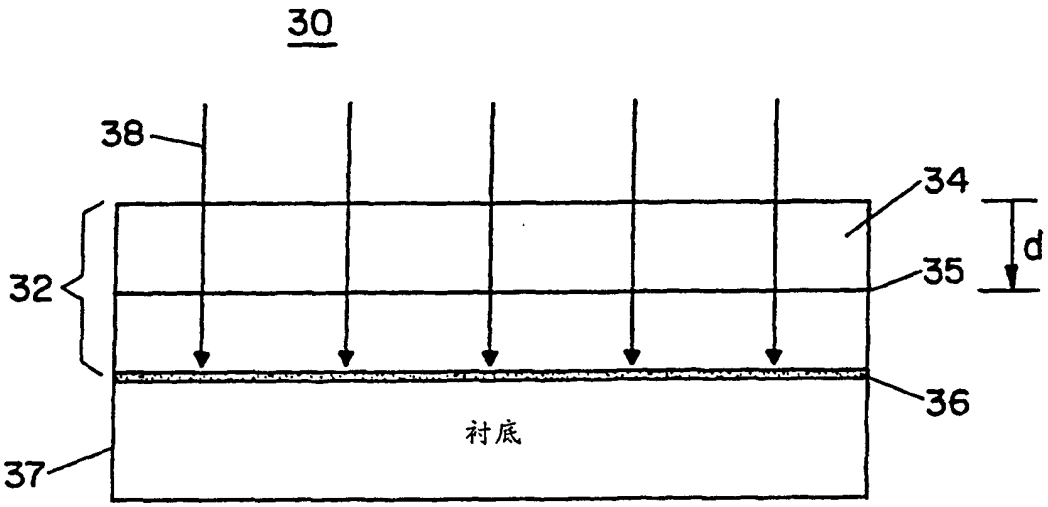


图 3

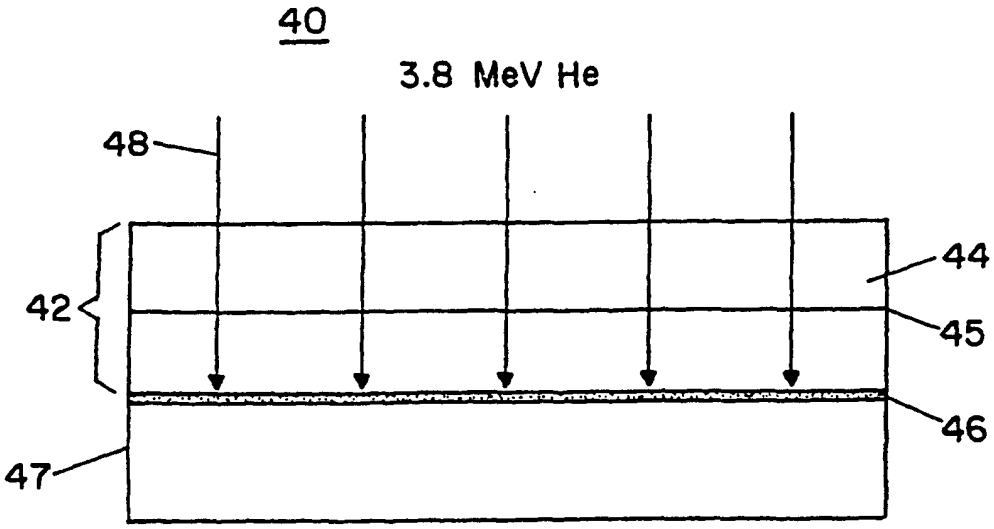


图 4

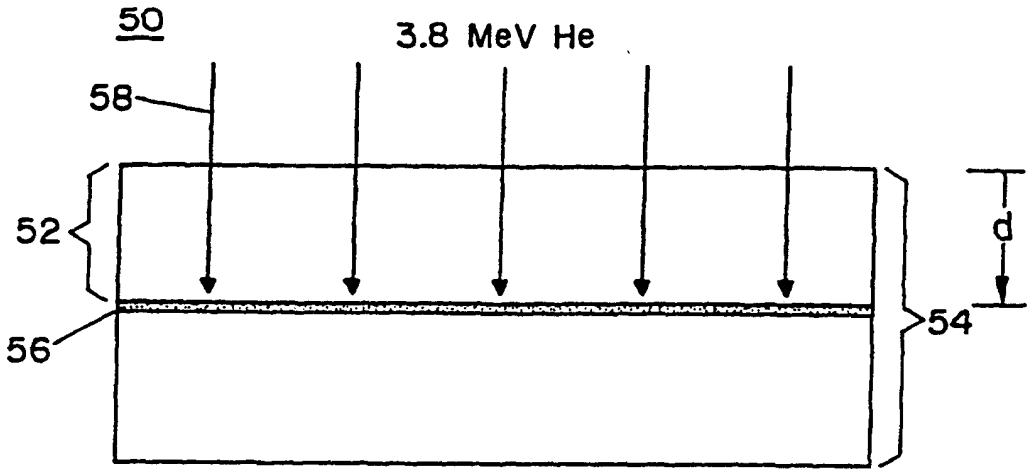


图 5

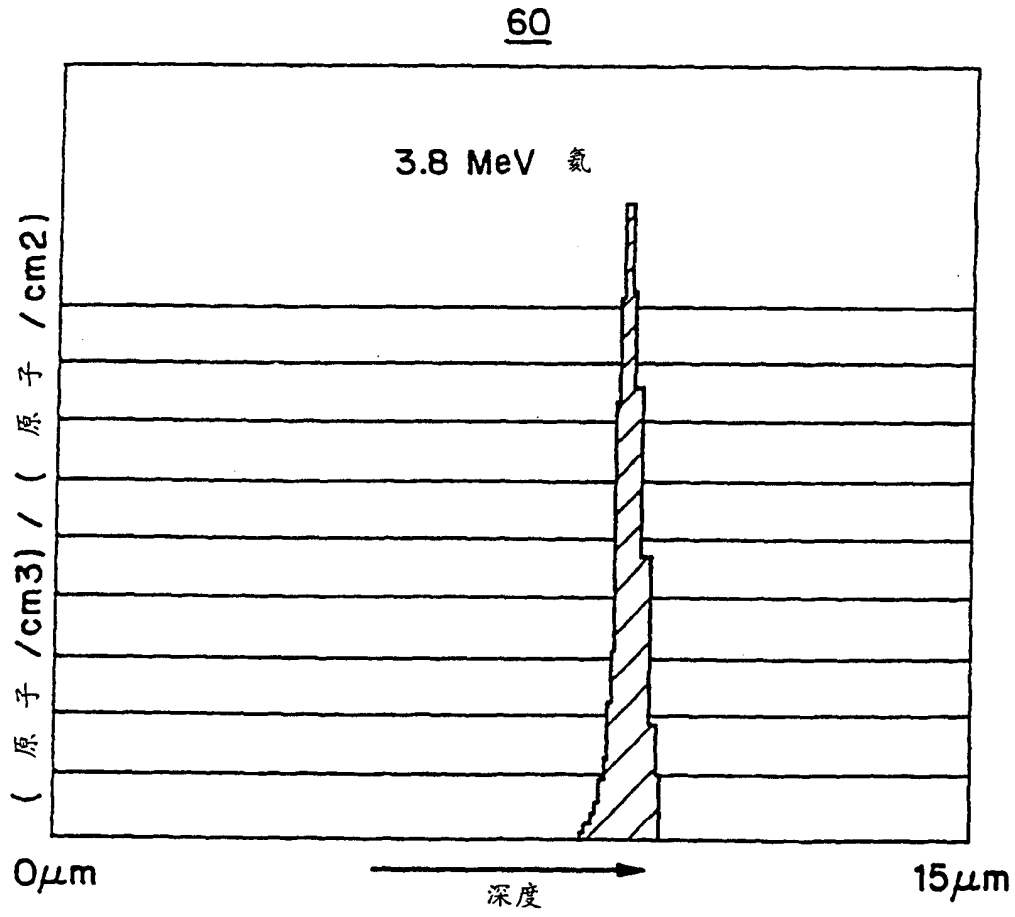


图 6

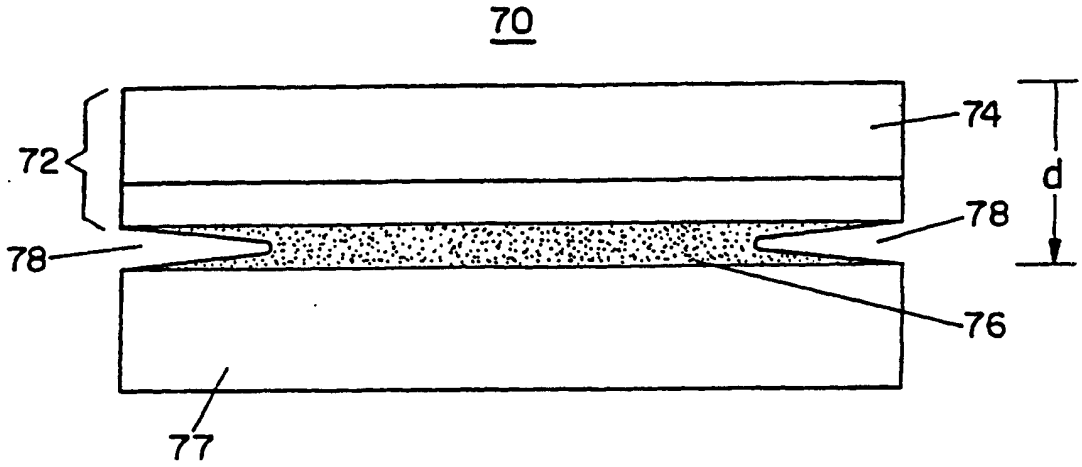


图 7A

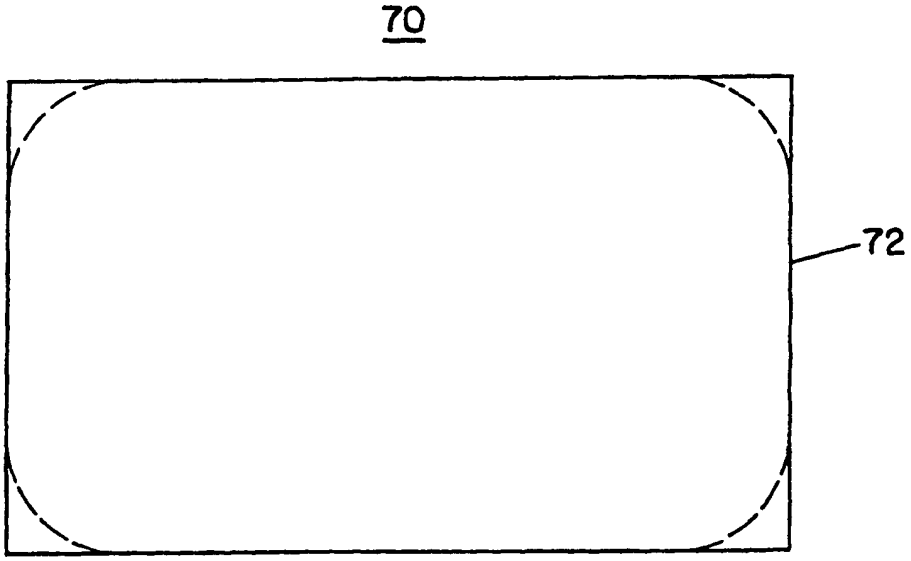


图 7B

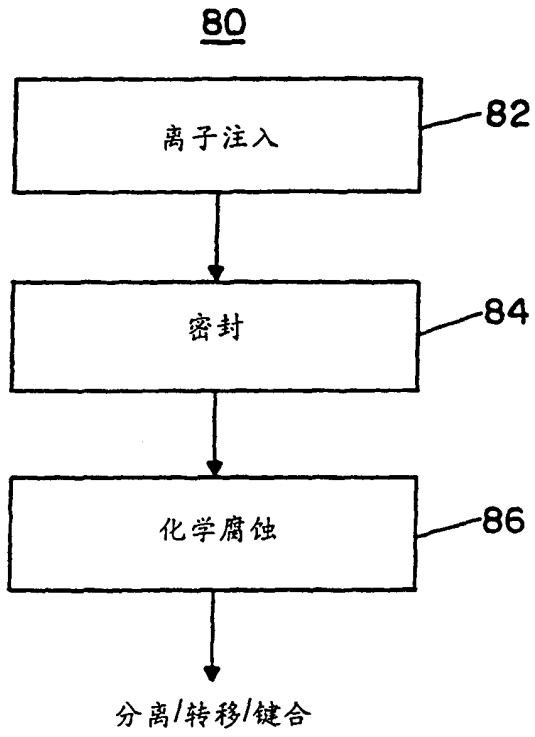

80
离子注入
82
密封
84
化学腐蚀
86
分离/转移/键合

图 8

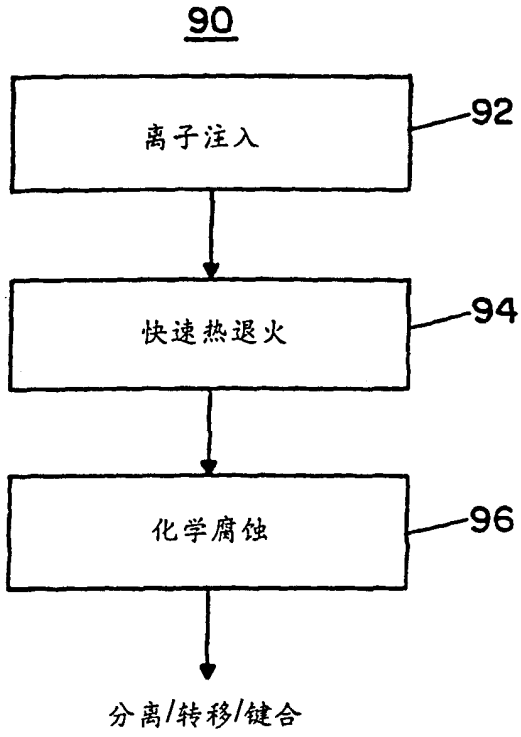

90
离子注入
92
快速热退火
94
化学腐蚀
96
分离/转移/键合

图 9

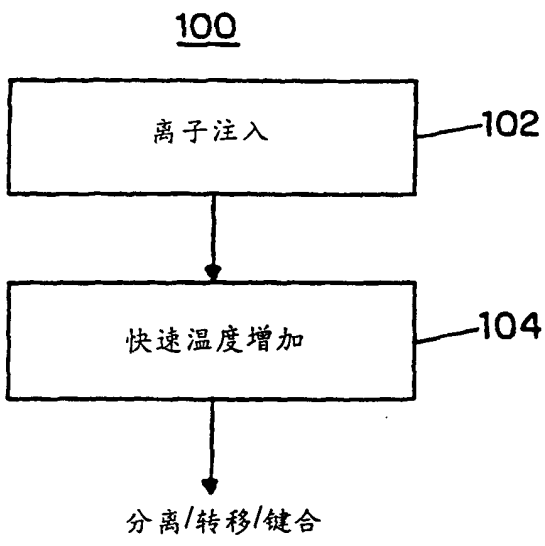

100
离子注入
102
快速温度增加
104
分离/转移/键合

图 10

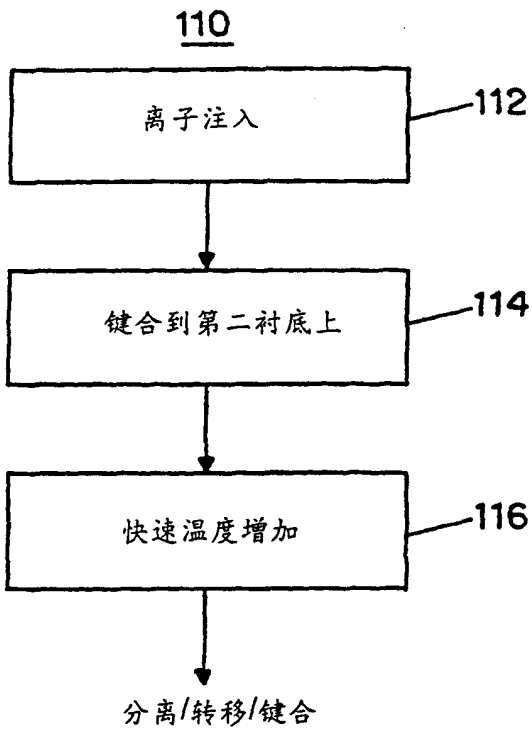

110
离子注入
112
键合到第二衬底上
114
快速温度增加
116
分离/转移/键合

图 11

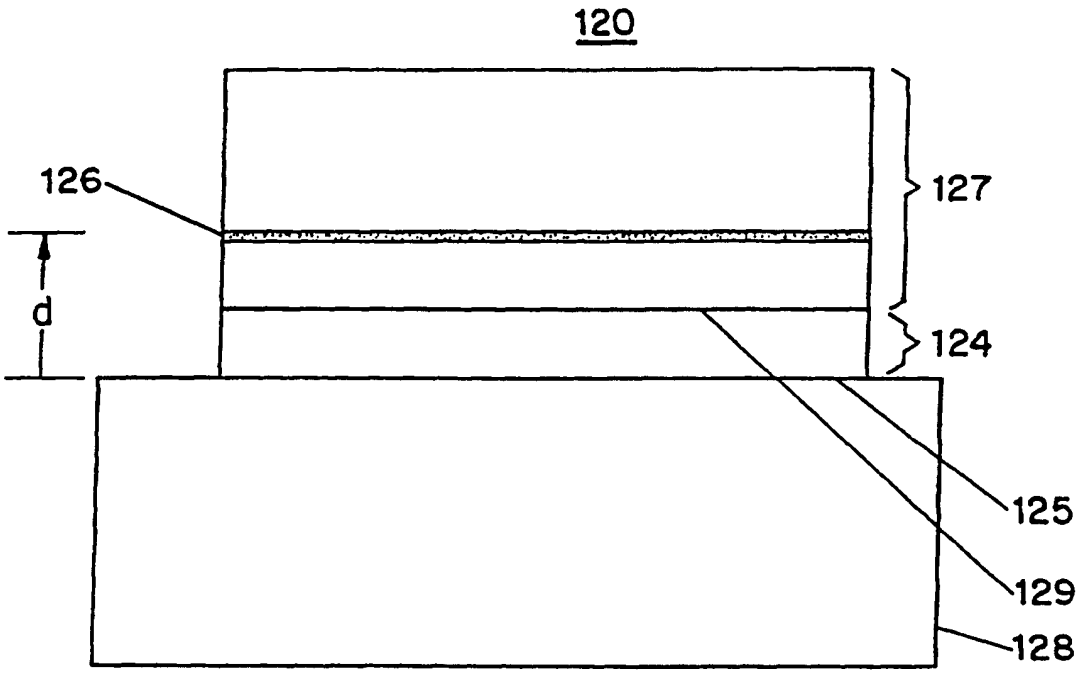


图 12

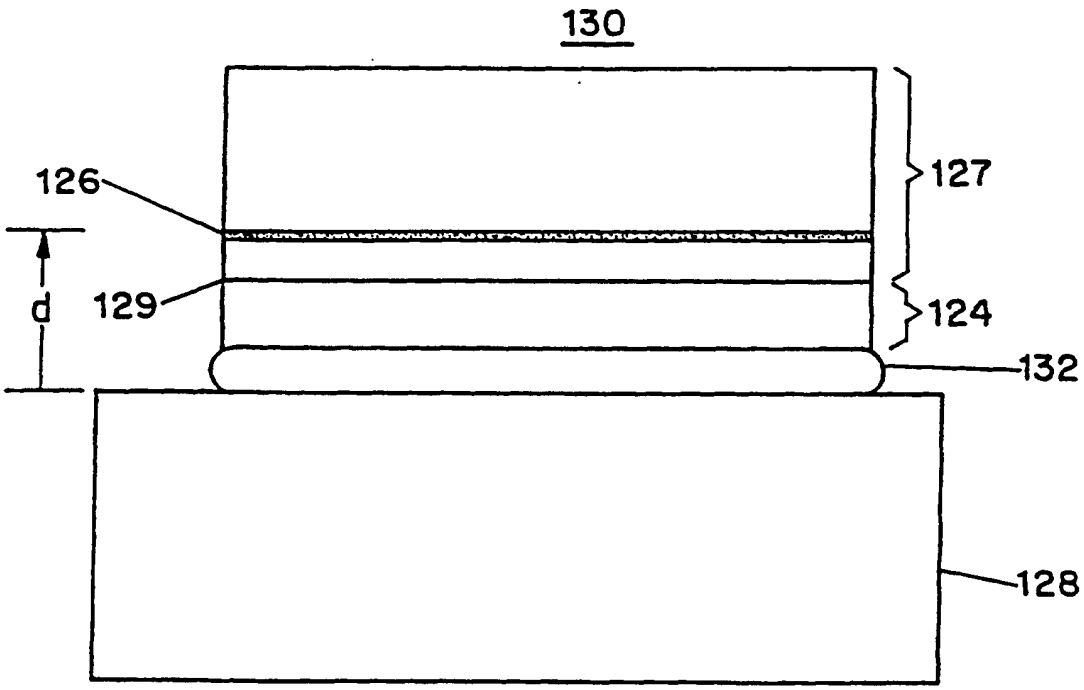


图 13