

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl⁷



[12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 03806009.4

C08J 9/00

C08J 9/26

C08L 25/00

C08L 61/00

C08G 83/00

C08L101/00

C08G 61/02

[43] 公开日 2005 年 7 月 20 日

[11] 公开号 CN 1643045A

[22] 申请日 2003.2.7 [21] 申请号 03806009.4

[30] 优先权

[32] 2002. 2. 15 [33] US [31] 10,077,646

[86] 国际申请 PCT/US2003/003826 2003.2.7

[87] 国际公布 WO2003/070813 英 2003.8.28

[85] 进入国家阶段日期 2004.9.14

[71] 申请人 陶氏环球技术公司

地址 美国密歇根州

[72] 发明人 苏应雄 Q·S·J·牛

P·H·汤森三世 S·J·马丁

T·H·卡兰塔尔

J·P·戈德沙克斯

K·J·布鲁扎 K·J·鲍克

[74] 专利代理机构 北京纪凯知识产权代理有限公司

代理人 程 伟

C08K 7/16 C08L 51/04 C08J 9/18

C08L 25/06 H01B 3/46 H01L 23/00

H01L 21/332 H01L 21/312

权利要求书 2 页 说明书 13 页

[54] 发明名称 制备纳米多孔薄膜的方法

[57] 摘要

申请人发现,当活性纳米粒子与单体母体化合形成有机基体材料时,特别是聚亚芳基或聚亚芳醚基体材料,选择用作多孔试剂的活性纳米粒子的对获得非常小的孔径是有效的。

I S S N 1 0 0 8 - 4 2 7 4

-
1. 一种制备方法，包括
- 将单体提供给有机聚合基体材料，
- 5 在重均直径小于 30nm 并在具有一定热分解温度的纳米粒子存在的条件下，部分聚合母体以形成一种可固化的低聚混合物，在其中纳米粒子与低聚体接枝，
- 将低聚混合物涂布于基底上，和
- 加热混合物以交联低聚体并分解纳米粒子，从而形成平均直径小
- 10 于 30nm 的孔。
2. 根据权利要求 1 所述的方法，其中聚合基体材料是聚亚芳基。
3. 根据权利要求 2 所述的方法，其中纳米粒子含有聚苯乙烯。
- 15 4. 根据权利要求 1 所述的方法，其中纳米粒子是一种交联的聚合粒子。
5. 根据权利要求 3 所述的方法，其中纳米粒子是一种交联的聚合粒子。
- 20 6. 根据权利要求 2 所述的方法，其中单体选自含有包括共轭二烯官能基团和亲双烯体官能基团的多官能化合物，其中至少一些所述化合物具有三个或更多这样的官能基团。
7. 根据权利要求 2 所述的方法，其中单体选自含有环戊二烯酮和芳香
- 25 乙炔基团的化合物。

-
8. 根据权利要求 6 所述的方法, 其中至少一些单体在同一单体结构中含有共轭双烯和亲双烯体。
9. 根据权利要求 5 所述的方法, 其中交联的聚合粒子含有可用于与单
5 体接枝的残余烯基基团。
10. 根据权利要求 9 所述的方法, 其中粒子是苯乙烯、4-叔丁基苯乙烯、羟基丙基丙烯酸酯和至少一个选自二乙烯基苯与 1,3-二异丙基苯的交联单体反应的产物。
- 10
11. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中粒子是星型聚合物。
12. 根据权利要求 1 所述的方法, 其中粒子是枝状聚合物。
- 15 13. 根据权利要求 9 所述的方法, 其中接枝率在 0.01~0.8 范围之内。

制备纳米多孔薄膜的方法

5

籍由 NIST 颁发的 70NANB8H4013 号合作协议，本发明在美国政府的支持下得以实现。美国政府拥有本发明的某些权利。

技术领域

10 本发明涉及一种特别适用于制造具有纳米多孔有机夹层电介质的集成电路装置中的纳米多孔薄膜的制备方法。

背景技术

随着集成电路的特征尺寸越来越小，对具有更好性能的电介质材料产生了越来越大的需求，以将该电介质材料用做集成电路中金属线之间的绝缘体。事实上，对具有低介电常数的材料的需求已经达到了目前众所周知的固体电介质材料不足以满足这种需求的程度。因此，
15 发明了多种将孔植入电介质材料中的方法。

依照一类方法，一种硅基母体材料与一种孔生成材料——也被称
20 做多孔试剂（通常是一种在高于硅基材料固化温度的某一温度热分解的材料）——混合，混合物涂布在基底上，硅基母体材料经过化学反应或固化形成基体材料，孔生成材料则通过加热的方式除去。示例见 U.S. 5,700,844、U.S. 5,883,219 和 U.S. 6,143,643。

依照另一类方法，使用一种有机基体材料代替硅基材料。业已报
25 道的一些有机基体材料包括聚亚芳基、聚亚芳基醚和聚酰亚胺。这类方法中的其中一些方法报道见 U.S. 6,280,794（使用松香酸或松脂作为

保护性化合物)、U.S. 6,172,128、U.S. 6,313,185 和 U.S. 6,156,812 (使用像乙烯基乙二醇-聚己内酯这样的有机基团作为热不稳定基团,上述有机基团与聚合单体以共价键键合,当进行处理的时候,形成基体材料)。

- 5 专利 U.S. 6,093,636 和 U.S. 2001/0040294 中使用有机聚合基体材料。在这些体系中,可交联的聚合母体与多孔试剂混合。多孔试剂可能是包括具有活性表面官能度的线性的、支链的、交联的聚合物、共聚物以及交联的聚合纳米粒子在内的多种材料。类似的情况见 Polymeric Materials: Science & Engineering 2001, 85, 502, Xu 等人报道了如何使这样的纳米粒子与聚酰亚胺混合。

Hedrick 等人的早期研究工作建议与多种热不稳定的聚合物单元之中的某一种形成一种嵌段共聚物,示例见 U.S. 5,776,990。

- 15 Bruza 等人也报道了多种制备多孔有机薄膜的方法,见 WO00/31183, Bruza 等人提出使用多种多孔试剂,包括线性的、支链的聚合物和共聚物,也包括纳米粒子型多孔试剂。上述提到的多孔试剂有的具有化学活性,有的不具有化学活性。Bruza 等人也报道指出:在基体固化前的任何阶段,多孔试剂能够和基体材料结合。

发明概述

- 20 虽然在上述提到的制备多孔薄膜的方法当中,许多方法是有效的,然而申请人发现如果要可靠地在有机基体中制备具有非常小的孔,尤其是封闭的晶胞孔的多孔薄膜时,使用上述方法是非常困难的。具体来说,申请人发现当使用除了那些离散粒子型的多孔试剂之外,难以可靠地获得小的孔。而且,与目前认为需要在有机体系中向可交联聚
- 25 合物加入多孔试剂的研究趋势相反,研究人员发现即使使用小的纳米粒子型多孔试剂,这也将导致大的孔径。

作为这些问题的一个解决方案，申请人发现，当将活性纳米粒子与单体母体结合至有机基体材料，特别是聚亚芳基或聚亚芳基醚基体材料时，活性纳米粒子的选择对获得非常小的孔径是有效的。

因此，根据第一个实施方案，本发明是一种方法，包括：

5 向有机聚合基体材料提供一种单体母体，

在纳米粒子存在的条件下，部分聚合母体以形成一种可固化的低聚混合物，在此过程中纳米粒子与低聚体接枝，纳米粒子的特征在于粒子具有活性官能度，且粒子平均直径小于 30nm，

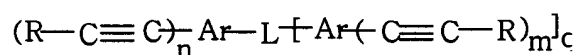
将低聚混合物涂布于基底上，和

10 加热混合物以便交联低聚体并分解纳米粒子，形成平均直径小于 30nm 的孔。

发明的具体实施方式

单体母体

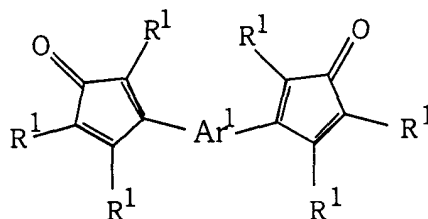
15 单体母体可以是任何能够反应形成有机、交联的聚合基体材料的单体。基体材料最好是聚亚芳基或聚亚芳基醚。示例见美国专利 U.S. 5,115,082、5,155,175、5,179,188、5,874,516、5,965,679、6,121,495、6,172,128、6,313,185 和 6,156,812，以及在 PCT WO 91/09081、WO 97/01593 中指出的适宜的基体聚亚芳基和它们的单体母体。一种适宜
20 单体的优选示例具有如下的化学式：



其中，每一个 Ar 是芳香基团或是惰性取代的芳香基团；每一个 R 独立地是氢原子、烷基、芳基或惰性取代的烷基或芳基基团；L 是共价键或是将一个 Ar 与至少一个其他的 Ar 连接起来的基团；n 和 m 是最小为
25 2 的整数；q 是最小为 1 的整数；在其中一个苯环上的乙炔基基团中，至少两个与另外一个位置相邻。优选地，在两个苯环上的乙炔基基团

中, 至少两个是互为邻位位置。其它优选的单体包括那些可以进行、或至少部分进行狄尔斯-阿尔德(Diels Alder)反应的化合物。因此, 具有共轭二烯烃基团和亲双烯体基团的多官能的化合物是有用的。例如, 可以使用下列单体:

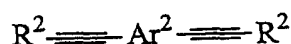
- 5 具有下述结构式 (II) 的双环戊二烯酮:



以及具有下述结构式 (III) 的多官能乙炔:

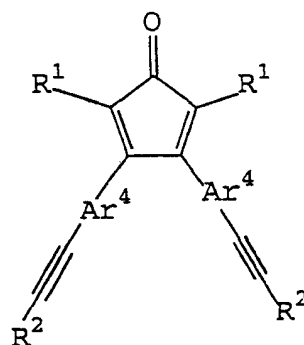


- 10 另一种可供选择的是双乙炔基团, 其结构式如下:



其中: R^1 和 R^2 独立地是氢原子或是未被取代的或是惰性取代的芳基部分, 而 Ar^1 、 Ar^2 和 Ar^3 独立地是未被取代的芳基部分, 或是惰性取代的芳基部分, y 是 3 或更大的整数。其它有用的单体还包括那些在一个

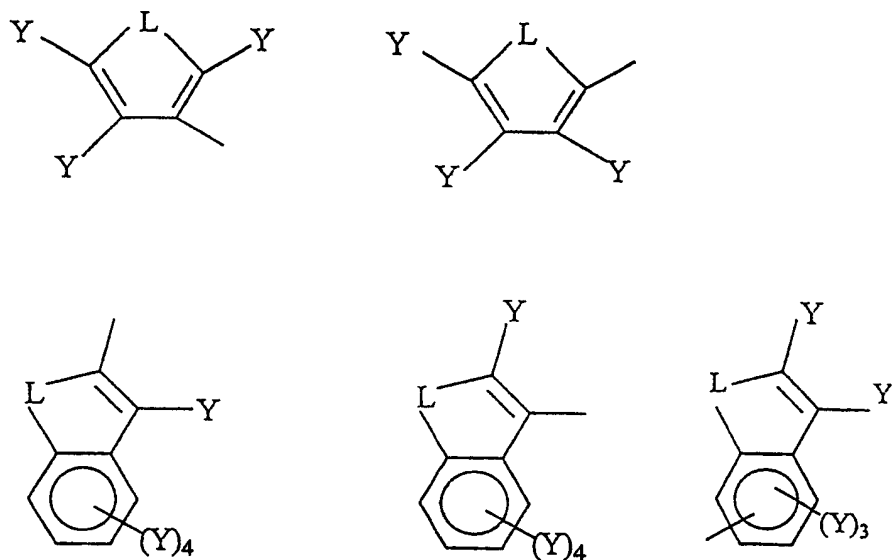
- 15 单体中既存在二烯烃基团, 又具有亲双烯体基团的单体, 例如:



- 其中, R^1 、 R^2 和 Ar^4 如前述所定义。含有至少两个亲双烯体基团和至少两个环结构的单体也是合意的, 所述环结构的特征在于存在两个共
20 价的碳-碳双键和一个离去基团 L, 其中 L 的特征在于当环结构和亲双

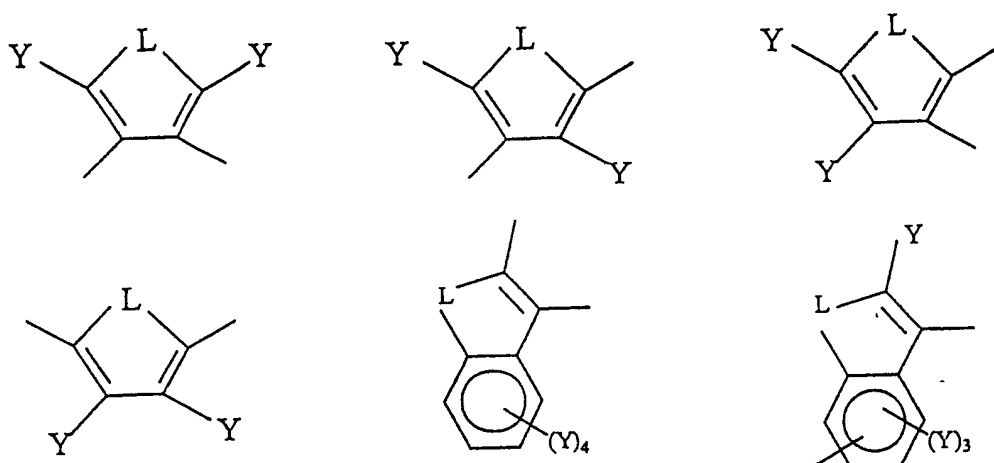
烯体在加热或其它能量存在的情况下反应时,也希望 L 被从芳香环结构中除去。示例见公开申请 10/078,205,代理目录号 61992。

特别地,这些单体的优选基团可以以 Z-X-Z 或者 Z-X-Z'-X-Z 形式的分子式来表示,在这里 Z 选自如下基团:

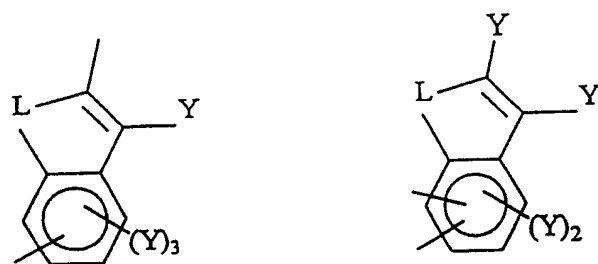


5

Z'选自如下基团:



10



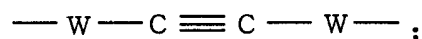
15

L 是-O-、-S-、-N=N-、-(CO)-、-(SO₂)-或者是-O(CO)-;

Y 在每种情况下独立地是氢原子、未被取代的或是惰性取代的芳基基团、未被取代的或是惰性取代的烷基基团,或是



5 X 是未被取代的或是惰性取代的芳基基团,或者是



和

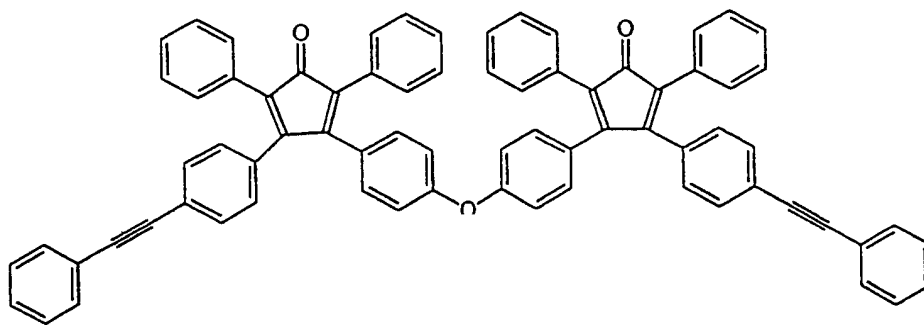
W 是未被取代的或是惰性取代的芳基基团, V 是氢原子、未被取代的或是惰性取代的芳基基团、或是未被取代的或是惰性取代的烷基

10 基团;

条件是 X 和 Y 代表的基团中至少两个基团中含有乙炔基基团。

这里所说的惰性取代, 申请人指的是取代基团不会干扰单体的聚合反应。

对于后面提到的多官能单体的优选示例, 其中一个可以以下述结
15 构式 (I) 来描述:



纳米粒子

基于其化学结构, 不论是否存在溶剂, 纳米粒子是任何能够保持
20 其形态的粒子。保持其形态的意思是粒子与溶剂或者基体材料相互作用时不会展开或者拉伸, 而是在基体材料中形成与纳米粒子本身大小

相类似的畴。当基体材料或溶剂渗透进入纳米粒子内部时，所述畴与基体材料或溶剂可能膨胀，但是纳米粒子将仍然保持其形态。像这样的纳米粒子的例子包括星型聚合物、枝状聚合物和多支链聚合物（例如：聚酰胺胺（PAMAM），Tomalia 等人描述的枝状聚合物，Polymer J
5 （Tokyo）.Vol. 17, 117（1985）；DSM 公司的聚丙烯酸亚胺聚胺（DAB-Am）枝状聚合物；Frechet 聚醚型枝状聚合物（Frechet, et al., J. Am. Chem. Soc. Vol. 112, 7638（1990）；Vol. 113, 4252（1991））；Percec 液晶型单枝状晶体，枝状晶体聚合物以及它们自组合的大分子聚合物（Percec, et al., Nature, Vol. 391, 161（1988）, J. Am. Chem. Soc. Vol. 119,
10 1539（1997））；如 Boltom H 系列枝状聚酯的多支链聚合物体系（由 Perstorp AB 进行商业化生产）。更优选地，纳米粒子应该和聚合的纳米粒子交联。虽然畸形的粒子（例如：稍微有点方形或椭圆形、破碎的，等）也是可以使用的，但是粒子优选应具有接近牛顿物体（例如：球体）的形态。对聚亚芳基和聚亚芳基醚基体材料来说，优选苯乙烯
15 基纳米粒子。然而，纳米粒子中可能包含其它单体，例如 4-叔丁基苯乙烯、二乙烯基苯、1, 3-二异丙基苯、丙烯酸甲酯、丙烯酸丁酯、丙烯酸羟基丙酯、丙烯酸 4-羟基丁酯等。

选择纳米粒子，以便它们能够热分解，优选在缺乏空气下，在高于基体材料聚合反应的合适温度而低于已固化基体材料的玻璃化转变
20 温度的某一温度热分解。特别地，在纳米粒子分解之前设置或固化基体材料以避免胞孔坍塌具有决定性的作用。

这些纳米粒子含有活性官能性或含有活性官能基团。活性官能性或活性官能基团意思是一种化学的类别，其特征在于所述类别在单体母体的部分聚合反应中可以 and 基体母体反应。这样的活性官能性的例子
25 子包括在单体的部分聚合反应中，用于纳米粒子和基体材料反应的烯族不饱和基团、羟基、乙炔、胺、苯乙炔基、环戊二烯酮、 α,β -不饱和

酯类、 α,β -不饱和酮类、马来酰亚胺、芳香族和脂肪族腈类、马来酸酯、2-呋喃酯、烯丙基醚和酯、丙炔酯和酮等。官能基团也可能是合成或制备纳米粒子之后保留的或是随后的反应步骤之后加入的残余基团。

最优选的纳米粒子是交联的聚苯乙烯基纳米粒子。这些纳米粒子
5 可以通过苯乙烯单体（例如，苯乙烯、 α -甲基苯乙烯，等）和至少含有两个能够进行自由基聚合反应的烯键式不饱和基团（例如，二乙烯基苯和 1,3-二异丙基苯）的共聚单体的乳化聚合反应得到。特别地，这些交联的纳米粒子的优选实施方案是在公开申请号为_____（代理目录号 61599）专利文献中所报道的那些。这些最优选的纳米粒子将具有一些
10 残余的烯族不饱和基团。并不希望被理论所束缚，申请人推测在 B 阶段，烯族不饱和基团将帮助纳米粒子和基体材料反应。

然而，关于最优选的纳米粒子及其通过狄尔斯—阿尔德反应形成的基体材料，申请人吃惊的发现：除了最小的残余烯族不饱和基团外，不需要另外的官能基团来形成小的、有规则的孔。

15

部分聚合反应（即 B 阶段）

申请人做出的一个既重大又令人吃惊的发现是：在多孔试剂存在的条件下，为了可靠地制备小的孔，必须将多孔试剂与单体基材母体在单体基材母体发生反应之前结合并随后使单体基材母体部分聚合反
20 应。

优选地，纳米粒子和单体在适宜的溶剂中结合。适宜的溶剂包括 1,3,5-三甲基苯、 γ -丁内酯、二丙二醇、醋酸甲醚酯（DPMA），等。

精确的反应条件（即温度、时间，等）将依赖于所选择的基体材料。对大多数聚亚芳基和聚亚芳基醚材料来说，特别是那些通过狄尔斯—阿尔德反应得到的基体材料，B 阶段可以在 150~300℃进行 1~50
25 小时。为了在组合物达到其凝胶点之前停止反应，建议仔细监测组合

物。

正如前面指出的那样，在 B 阶段，多孔试剂将和已生成的低聚体接枝。优选的接枝水平可能同时依靠所使用的多孔试剂和基体配方。最小为 0.01 的接枝率（即与多孔试剂接枝的基体的重量除以多孔试剂的重量）是最优选的。这样的接枝率通过 SEC 或者凝胶渗透色谱(GPC)分析粒子分子量是能够合理的确定的。对于和交联的聚苯乙烯基纳米粒子一起使用的具有结构式（II）和（III）的母体单体来说，接枝率在某种程度上有赖于单体的比例，优选接枝率小于约 0.3，更优选接枝率低于 0.25。对于在同一分子中含有二烯和亲二烯体的多官能单体，例如具有结构式（I）的单体，与交联的聚苯乙烯基纳米粒子一起使用时，优选接枝率小于 0.85，其次优选的是低于 0.4，并优选大于 0.1。

涂布

B 阶段的材料涂布在需要的基底上。在此类材料优选的应用中，通常希望基底含有电相互连接和/或者通过集成电路基底制备中的标准减色或镶嵌（damascene）制造工艺在被涂布基底上形成电相互连接。

涂布可以采用任何已知的工艺实行，但是优选类似旋转涂布这样的溶液涂布技术。

固化和烧结

涂布之后，加热薄膜以除去任何残留的溶剂。加热薄膜也用于在超过基体材料凝胶点的温度交联基体材料。另外，加热薄膜以使得基体材料交联至玻璃化和热降解多孔试剂。这些加热步骤可能发生在一次单一的加热步骤中，或者发生在分开的加热步骤中。为了除去溶剂，50~200℃的温度范围是有代表性的优选温度范围。基体材料优选在超过其凝胶点的温度后交联，加热温度范围是 200~400℃，更优选在

- 250~375℃加热最多 5 小时，更优选最多 1 小时，最优选 1~5 分钟。优选地，交联至其玻璃化通过加热至 250~450℃的温度范围而发生，更优选 300~400℃加热最多 5 小时，更优选最多 1 小时，最优选 1~5 分钟。优选地，多孔试剂通过加热至 250~450℃的温度范围进行热降解，优选
- 5 350~450℃加热最多 5 小时，更优选 1 小时，最优选 1~30 分钟。

实施例

实施例 1

- 1,3,5-三（苯基乙炔基）苯（7.56g）、4,4'-双（2,4,5-三苯基环戊二烯-3-酮）（15.64g）、 γ -丁内酯（58g）与由二乙烯基苯和苯乙烯通过乳
- 10 化聚合反应形成的平均直径约在 16nm 的交联粒子（4.65g）在 200℃下加热反应 20h。混合物冷却至 130℃并加入 1,3,5-三甲基苯（25g）。组合物的接枝率约为 0.0124。混合物旋转涂布在晶片上，然后在氮气吹扫的加热炉中，自 25℃加热升温至 430℃，升温速率是 7℃/min。晶片
- 15 在 430℃下固化 40min。薄膜的折射率（RI）是 1.562，光散射率（LSI）是 45。TEM 分析表明均匀分布的孔的孔径从 7nm 到 50nm，估计平均孔径为 25nm。

实施例 2

- 1,3,5-三（苯乙炔基）苯（3.78g）、4,4'-双（2,4,5-三苯基环戊二烯-3-酮）（7.82g）、 γ -丁内酯（29g）与由二乙烯基苯和苯乙烯通过乳化聚
- 20 合反应形成的平均直径约在 16nm 的交联粒子（2.28g）在 200℃下加热反应 40h。组合物显示的接枝率约为 0.0164。混合物冷却至 130℃并加入 1,3,5-三甲基苯（15g）。混合物旋转涂布在晶片上，然后在氮气吹扫
- 25 的加热炉中，自 25℃加热升温至 430℃，升温速率是 7℃/min。晶片在 430℃下固化 40min。薄膜的折射率（RI）是 1.571，LSI 是 40.7。TEM

分析表明在薄膜中均匀分布的孔的孔径从 4nm 到 38nm, 估计平均孔径为 18nm。

实施例 3

- 5 3,4-双(4-苯基乙炔基-苯基)-2,5-二苯基环戊-2,4-二酮(4.0g, 美国专利 U.S 5965679 公开)、 γ -丁内酯(9.3g)和由二乙烯基苯和苯乙烯通过乳化聚合反应形成的平均直径约在 26nm 的交联粒子(1.72g)的混合物, 在 200℃下加热反应 28h。混合物冷却至 130℃并加入环己酮(15g)。混合物旋转涂布在晶片上, 然后在氮气吹扫的加热炉中, 自
10 25℃加热升温至 430℃, 升温速率是 7℃/min。晶片在 430℃下固化 40min。薄膜的折射率(RI)是 1.45, LSI 是 26.5。TEM 分析表明在薄膜中均匀分布的孔的孔径从 8nm 到 47nm, 估计平均孔径为 25nm。

对比实施例 1 和 2

- 15 以环己酮和 γ -丁内酯酮为溶剂, 1,3,5-三(苯基乙炔基)苯和 4,4'-双(2,4,5-三苯基环戊二烯-3-酮)按照 1:1 的摩尔比进行部分聚合反应, 在上述 100g 部分聚合反应产物(溶液中 20wt%的低聚体)中加入由二乙烯基苯和苯乙烯通过乳化聚合反应形成的平均直径约在 18nm 的交联粒子(4g)。部分聚合反应产物的重均分子量约为 27,000g/mol, 数均
20 分子量约 9,000g/mol。加入环己酮(43g)以使低聚体的重量含量降至 14wt%。在 2000rpm 下对晶片旋转涂布 20s, 随后在 150℃加热板上烘烤晶片 2min。晶片以 7℃/min 的速率加热升温至 430℃, 并在此温度下保持 40min。TEM 分析表明晶片中的畴大于 200nm。通过在 100g 含有 30wt%的低聚体中加入 6g 交联的聚苯乙烯纳米粒子, 所述低聚体的
25 重均分子质量约为 10,000g/mol, 数均分子量约 4,600g/mol, 上述试验结果得以重复。TEM 分析也表明晶片中的畴大于 200nm。

实施例 4-从如结构式 I 的单体和星型聚合物制备多孔基体

A. 制备活性星型聚合物

2.5L 的玻璃聚合反应器以热环己烷清洗，真空干燥，然后在其中
5 加入 2L 环己烷。加热反应器至 50℃，然后加入 0.43M 的仲丁基锂 25.2ml
(10.86mmol)，紧随其后加入 49.74g 苯乙烯和 74ml THF。得到的深橙
色溶液搅拌 15min。这时对聚合反应取样（样品 A）并加入溶于环己烷
中的 5.39g (41.41mmol, 3.8eq) 对-二乙烯基苯，得到深红色溶液。30min
后，加入 47.5g 苯乙烯，得到深橙色溶液。15 min 后自反应器中取样（样
10 品 B）并加入 4.8g 环氧乙烷，得到无色的粘稠溶液。1 小时后，加入
包含于四氢呋喃中的 5.44g (22.60mmol, 2.1eq) 4-苯乙炔基苯甲酰氯。
又经过 1h 后，冷却反应器并移去反应产物。最终星型聚合物的等分试
样（样品 C）通过在甲醇溶液中沉淀的方式分离。样品的 GPC 的分析
结果如下所示（数据相对于聚苯乙烯标准物，除非标记为绝对的）：

15

样品	Mw	Mn	Mw/Mn
A	4,700	4,100	1.15
B	77,400	69,400	1.12
C	96,000	77,400	1.24
C（绝对的）	345,000	241,000	1.43

紫外光谱分析表明星型聚合物中二苯乙炔的平均含量为 2.25wt%，
或者是每个星型聚合物单位含有 22.6 二苯乙炔单位。

20 B. 活性星型聚合物和具有结构式 I 的单体的 B 阶段

在 Schlenk 试管中加入上述 A 阶段得到的 1.2857g 活性聚苯乙烯星
型聚合物（绝对 Mn=241000，绝对 Mw=345000，每个星型聚合物单位

中二苯乙炔部分的平均数=23) 和 γ -丁内酯 (8.75g)。试管与稳定氮气
气源连接并浸入加热至 45°C 的油浴中。混合物通宵搅拌。随后在试管
中加入单体 I (3.00g)。搅拌混合物并应用多个真空/氮气循环来脱
除混合物中的空气。保持试管内一定的氮气压力, 然后提高油浴温度
5 至 200°C 并保持此温度 8.5h。自油浴中取出试管, 并使之冷却。使用环
己烷 (8.3928g) 稀释混合物。混合物的凝胶渗透色谱分析指出, 相对
于聚苯乙烯标准物, $M_n=3545$, $M_w=35,274$ 。

C. 从单体 I 和活性星型聚合物制备多孔基体

10 上述 B 阶段得到的混合物旋转涂布在 4" 硅晶片上, 在 150°C 加热
板上烘烤 2min 以除去溶剂, 然后在氮气吹扫的加热炉中, 以 7°C/min
的速率升温至 430°C, 并在此温度下保持 40min。得到的多孔薄膜的折
射率 (RI) 是 1.47 (相对于全密度聚合物的 1.64), 介电常数是 2.13。
应用透射电子显微镜 (TEM) 技术评价得到的薄膜, 表明平均孔直径
15 为 18nm。