

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H01L 51/00 (2006.01)

H01L 51/05 (2006.01)



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200680027185.9

[43] 公开日 2008年7月23日

[11] 公开号 CN 101228646A

[22] 申请日 2006.7.21

[21] 申请号 200680027185.9

[30] 优先权

[32] 2005.7.27 [33] EP [31] 05106926.8

[86] 国际申请 PCT/IB2006/052510 2006.7.21

[87] 国际公布 WO2007/013015 英 2007.2.1

[85] 进入国家阶段日期 2008.1.24

[71] 申请人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

[72] 发明人 H·B·阿克曼 B·德布尔

P·W·M·布洛姆

D·M·德里兀

T·C·T·戈恩斯 E·坎塔托雷

[74] 专利代理机构 永新专利商标代理有限公司

代理人 王 英

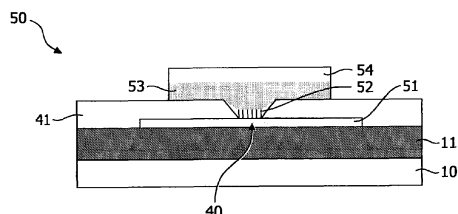
权利要求书 2 页 说明书 10 页 附图 3 页

[54] 发明名称

制造电元件的方法

[57] 摘要

一种元件(50)，包括第一电极(51)、自组装系统(52)，其为或包括单分子层和第二电极(54)。湿式化学沉积的聚合接触层(53)存在于自组装系统(52)和第二电极之间(54)。适宜地，自组装系统(52)和接触层(53)两者都设在空腔(40)中。



1、一种制造包括第一和第二电极以及中间自组装系统的电元件的方法，包括以下步骤：

- 提供具有所述第一电极的衬底；
- 在所述第一电极上提供所述自组装系统；
- 通过湿式化学沉积在所述自组装系统上涂覆包括有机材料的组合物，以便形成聚合接触层；以及
- 在该导电接触层上沉积所述第二电极。

2、如权利要求 1 所述的方法，其中所述自组装系统包括通过自组装在所述第一电极上形成的单分子层。

3、如权利要求 1 或 2 所述的方法，其中所述组合物包括极性溶剂。

4、如权利要求 1 或 2 所述的方法，其中在所述具有第一电极的衬底上提供图案化的电介质层，使得所述第一电极至少局部暴露，之后在所述第一电极的暴露部分上提供所述自组装系统，并且将所述聚合接触层设置为在所述自组装系统和所述电介质层上延伸。

5、如权利要求 1 或 2 所述的方法，其中所述有机材料为导电聚合物。

6、如权利要求 5 所述的方法，其中所述组合物还包括聚合酸材料，该聚合酸材料用作所述导电聚合物的掺杂剂。

7、如权利要求 5 或 6 所述的方法，其中所述导电聚合物为聚(3,4-亚烷基二氧基噻吩)，其中所述亚烷基选自一组群，所述组群包括：任选地被 C₁ 到 C₁₂-烷基-或苯基取代的亚甲基、任选地被 C₁ 到 C₁₂-

烷基-或苯基取代的 1,2-亚乙基、1,3-亚丙基和 1,2-亚环己基。

8、如权利要求 2 所述的方法，其中所述自组装系统设有第一和第二官能团，其中所述第一官能团是形成所述单分子层的化合物的一部分，并且在自组装之后键合到第一电极，所述第二官能团暴露在所述自组装系统上并且使得能够与有机接触层形成键合。

9、一种制造设有多个电元件的电子器件的方法，所述方法包括如上述任一项权利要求所述的制造所述元件的方法。

10、一种电元件，包括第一和第二电极以及中间自组装系统，其中聚合的导电接触层存在于所述自组装系统和所述第二电极之间。

11、如权利要求 10 所述的元件，其中所述自组装系统包括结。

12、如权利要求 10 所述的元件，其中所述自组装系统包括碳纳米管或纳米线。

13、一种电器件，包括如权利要求 9 到 12 中任一项所述的电元件。

制造电元件的方法

技术领域

本发明涉及制造电元件的方法以及制造包含这种元件的电子器件的方法，其中该电元件包括第一和第二电极以及中间自组装系统。

本发明进一步涉及带有第一和第二电极以及中间自组装系统的电元件，以及随之的电子器件。

背景技术

自组装系统的基本例子是自组装单分子层（self-assembled monolayer），也称为 SAM。这种单分子层及其制备本身是公知的。特别地，带有链和端基的有机化合物被涂覆于表面。这样使得端基键合到表面，而链以类阵列方式基本垂直于表面定向。有机化合物的一个例子是硫醇。例如 $C_{16}\text{-SH}$ ，而表面的一个例子是金。

对自组装单分子层的研究已经提出了数种应用。在第一应用中，以图案化方式将单分子层设置在表面上。随后用作构造表面尤其金的抗蚀剂。这种工艺被称为微接触印刷。其他应用例如在生物传感器领域，其中单分子层可保护选择性表面，或其中有待测试的标记物（label）或化合物设在表面上作为自组装单分子层。

在另一个应用中，出于电气的用途开发有限厚度的自组装单分子层。众所周知，电容器的电容随着第一和第二电极之间的距离、因而中间电介质的厚度而减小。因此使用单分子层作为电介质将产生具有很高电容的电容器。例如这种系统可从 Reed 等人，*Science*, 278 (1997), 252 中获知。此处，将 Ar-Ac-Nar-Nar-Ac-Ar-S 用作单分子层，其中 Ar 是亚苯基，Ac 是乙炔而 Nar 是 2-氨基-1, 6-亚苯基。

尽管这种应用很引人关注，但事实证明制造适当工作的电容器是个难题。形成这种具有金底部电极、硫醇单分子层和气相沉积或溅射的金顶部电极的电容器之后，结果在该电容器中形成短路。换句话说，

有一块区域，其中单分子层已经被中断，而第一电极直接接触第二电极。这可能是有缺陷的制造的结果。或者，可能所得到的电容器具有非常有限的击穿电压，使得在单分子层上应用任何电压都足以形成穿过单分子层的短路。而且，所得到的单分子层具有实质上的负微分电阻(NDR)。当从 0 到 2.5 伏特增加所施加的偏压时，电流密度在第一段 0 到 1V 之间增加，在第二段 1 到 1.5V 之间降低，并且最后又增加。这是不希望有的结果，其妨碍实际应用。

发明内容

因而本发明的第一目的是提供制造首段中提到的这种电元件的方法，得到能够经受住自组装系统上的极小电压差的适当工作的元件。

通过湿式化学沉积将包括有机材料的组合物涂覆在自组装系统上，从而形成聚合物接触层，并且第二电极被沉积在导电接触层上，由此实现该目的。

本发明的发明人已注意到，在实现本发明的过程中，对第二电极的气相沉积引起电容器的故障。所沉积的金粒子足够小以在垂直定向的单分子层链之间扩散。因为金粒子未完全地附着于单分子层的非极性有机链，单分子层中的这种扩散或形成空穴 (hole-forming) 的过程被增强。金粒子可扩散到单分子层中被理解为是沉积方法的结果，例如溅射或气相沉积。这种沉积方法为粒子提供相当大的能量。因此，即使单分子层的分子在分子的相对侧有两个端基，那么金粒子仍将有足够的能量以至于沿裸露的端基扩散到链中。

接着通过使用附加接触层解决了形成改进的顶部电极所产生的问题，该附加接触层并非电介质的一部分，并且这不会将任何电伪差 (electrical artifact) 引入电元件，例如电极表面缺乏均匀性，或者实质增大的接触电阻。这种接触层需要对单分子层具有足够的附着力，并且其应用可以不导致单分子层形变。还必须对其上的顶部电极具有适当的附着力。另外，在应用中使用接触层可以不导致故障，例如电容器必须具有足够的击穿电压。

这种接触层被选择为包括聚合物材料。聚合材料是粘弹性系统，但对于自组装系统的稳定性这不成问题。实际上，接触层的聚合分子的运动受接触层中其它分子的存在限制。仅仅存在多聚物分子在链的方向上的一维运动，而非在溶液和其它系统中所允许的三维运动。这种运动过程在理论文献中被称为蠕动 (reptation)。

而且，通过湿式化学沉积涂覆接触层。当由气相提供接触层时，实质沉积个体分子。这样还有扩散到自组装系统中的风险。通常，湿式化学沉积的材料将是接触层的多聚物。然而不排除仅在有机材料沉积在自组装系统上之后发生聚合作用。从 EP-A 615256 中可获知关于此的适当过程。

接触层进一步被选择为导电的。然而本征导电聚合物还未知。导电由向聚合物提供掺杂剂引起。将会出现这些掺杂剂可扩散到自组装系统中并且仍可导致电元件的击穿。然而，发明人已明白导电有机材料中的掺杂剂被键合至材料的链，因此不能自由扩散穿过接触层并进入自组装系统中。在此注意到不排除仅在接触层沉积在自组装系统上之后使得该接触层导电。

鉴于其导电性，适当地对接触层进行构图。应该明白在元件内部接触层和第一电极之间没有直接接触，因为这将导致短路。然而，在元件外部这可能不同；例如接触层可以是垂直互连的一部分，并且与通向第一电极的导体轨 (conductor track) 连接。

适当地，本发明的自组装系统包括通过自组装形成的单分子层。这被认为适用于自组装系统到第一电极的适当附着。然而，不排除使用另一种沉积单分子层的方法，例如 Langmuir-Blodgett 沉积。此外，自组装系统还可包括多个单分子层，这一点将在下面讨论。

更适宜将有机材料沉积在极性溶剂中，使得溶剂不被吸引到自组装系统的有机的、通常为非极性的链上。如果溶剂被吸引到链上，则接触层的分子将能够在自组装系统的分子之间扩散，导致击穿的风险增大。例如，合适的溶剂是水、乙醇、有机酸（例如甲酸和乙酸）、二甲基亚砷、二甲基甲酰胺、乙腈、丙酮、N-甲基-2-吡咯烷酮以及其任何合适的混合物。

可以用数种方法沉积接触层。在第一实施例中，为接触层选择材料，可使其局部导电。这种材料是例如从 WO-A 99/10939 中获知的聚苯胺。然后沉积接触层并使其在自组装系统区域导电。该区域之外的材料可除去，但这不是必须的。

第二，最优选地，将接触层沉积到预先生成的电介质材料的空腔中。适宜地，该电介质材料是光致抗蚀剂材料。这已经证实是可信的方法。接着出于实践上的原因，在沉积单分子层之前生成空腔是有利的。

第三，具有第一电极的衬底可以具有三维形状，例如沟槽形或空腔形。适宜地可通过干式蚀刻在半导体衬底中制作沟槽，而使用这种沟槽来制造电容器本身是公知的。可通过使例如带有铜导体的牺牲层箔的箔形变来产生空腔，在空腔中第一电极在多个表面上延伸。在封装领域这种箔及其形变本身是公知的。

接触层的材料最优选为导电聚合物，例如这种聚合材料，其中由于掺杂剂与聚合物材料尤其与其中的导电基相互作用而使导电性增强。这些材料的例子是可用如烷氧基 (alkoxy)、烷基 (alkyl)、芳基 (aryl) 等等这种侧基取代的聚苯胺 (polyanilines)、聚噻吩 (polythiophenes)、多炔 (polyacetylenes)、聚吡咯 (polypyrrols)。或者，接触层的材料可以是其中结合有导电元素的材料，例如填充有银、石墨等等的环氧树脂或其它聚合物。然而，后面的这些材料显然不是优选，因为所述层的均匀性非常小，而因此其表面区域上的元件的均匀性被降低。

较优选地，接触层的材料为结合了作为固有掺杂剂的多酸的导电聚合物。这种材料具有以下优势：其可用水作为溶剂来进行沉积，在这里水中的具有多酸的导电聚合物的组合物可被称为溶液，而非悬浮液或乳浊液。

最优选地，使用聚(3,4-取代的噻吩) (poly-(3,4-substituted-thiophene)) 作为导电聚合物。众所周知的这类聚合物例子是带有 3,4-亚烷基二氧基取代 (3,4-alkylenedioxy-substitution) 的聚合物，通常被称为 PEDOT。亚

烷基 (alkylenegroup) 适宜是任选地被取代的 C_1 - C_4 -亚烷基, 并且在此处优先选自一个组群, 该组群包括: 任选地被 C_1 到 C_{12} -烷基-或苯基取代的亚甲基、任选地被 C_1 到 C_{12} -烷基-或苯基取代的 1,2-亚乙基、1,3-亚丙基和 1,2-亚环己基。可增加添加剂以增强导电性和处理特性, 例如表面活性剂。

在一个例子中, 将光化学引发剂加到多酸和导电聚合物的组合物中。在沉积之后这种引发剂接着被用以允许材料的交联 (cross-linking)。交联的好处在于: 材料再也不能溶解在其原溶剂中, 从而允许在进一步的处理步骤中使用更多种溶剂。而且, 交联允许用多元醇 (例如山梨醇) 进行后处理, 以增强该层的导电性。从 WO-A 01/20691 中可获知这种工艺。引发剂的另一好处在于可形成在自组装系统和接触层之间的键合。

多种方法可被用于沉积接触层, 以及适宜地用于其图案化。在一个例子中, 使用旋涂或网纹涂布 (webcoating) 以及随后的蚀刻步骤。可在提供第二电极之后实施这种蚀刻步骤, 以便第二电极用作对接触层进行构图的蚀刻掩模。在另一例子中, 使用旋涂或网纹涂布接触层。然后接着对其进行构图。做到这一点的一个方法是在用于接触层的组合物中掺入光化学引发剂, 从而按照预期图案照射它, 并且除去不希望有的区域, 该区域最好是未经照射的区域。做到这点的另一个方法是在空腔中提供接触层, 并且除去空腔外部的材料。在另一个例子中, 通过对接触层进行印刷; 适宜地在此使用喷墨印刷。

第二电极可包括导电材料。材料的选择主要由电子器件中的集成确定。金可以容易地被沉积。其可以提供另一自组装单分子层。而且, 如果例如电元件被制成电路板、智能卡或封装基板 (package substrate) 的一部分, 或者如果电元件设在键合焊盘的正下方, 那么金可以提供焊料。铜和铝及其常规合金是用于提供集成电路中、以及其它元件例如显示器、传感器、印刷电路板等等中的互连的标准材料。导电氧化物, 例如氧化铟锡 (indium-tin-oxide) 是透明的, 被用作光电应用 (例如显示器) 中的导电材料。或者, 导电有机材料可用于第二电极, 尽管对于将其用作互连来说这些材料的导电性仍然相当低。

选择第一电极的和键合到第一电极的自组装系统中的化合物的材料，以便形成充分的键合。用于第一电极的合适材料包括金、铜、导电氧化物、铝、掺杂硅的 GaAs、其它 III-V 族半导体、汞、镍、铂、钯等等。例如对本领域技术人员来说本身已知的，以及在 Whitesides 和 Xia, *Angewandte Chem. Int. Ed.*, 37, 1998, 550-575 中提到的，相对于所选择的端基，相应的化合物不同。其例子是硫醇、异氰酸盐、二硫化物、硫醚、硫代酸，其中分子可提供有附加端基。

较优选地，自组装系统设有第一和第二官能团(functional group)，其中第一官能团是形成单分子层的化合物的一部分，并且在自组装之后键合到第一电极，第二官能团暴露在自组装系统上并且能够与有机接触层形成键合。在自组装系统和有机接触层之间提供键合被认为不是必需的，但是对元件的稳定性和性能非常适合。

这种键可以是化学键，因为第二官能团被结合到有机接触层的网络中。这一点可以借助于光化学引发剂以及接触层中的键合位点(bonding site)通过交联实现。适当的键合位点基于通过缩合反应形成键合。如果第二官能团是硫醇、或醇或氮化物(-NH₂)，适当的键合位点是例如酸基。如果第二官能团是酸，那么键合位点适宜是碱(base)。

键合还可以是物理键合，以氢键结合(hydrogen bonding)作为优选例子。具有例如多酸的系统具有足够的允许氢键结合的基。如果例如 PEDOT 的聚-3,4-取代的噻吩作为导电聚合物，也还是这样。

可以看出粘附到第一电极的化合物通常是单分子层。然而不排除使用单分子层分子的混合物。尤其，化合物可具有不同的链长。混合物可以使自组装系统稳定，尤其对于电性重要否则可能机械稳定性不好的单分子层化合物。一个例子是例如辛硫醇和己硫醇的混合物，其形成极薄的单分子层。如应该明白的，此处硫醇官能团可用另一种官能团代替，而带有单个官能团的化合物可用带有两个官能团的化合物代替。

适宜地制造电元件是制造电子器件的一个步骤。这种电子器件可包括如按照本发明制造的多种电元件并适宜地还包括其它无源和有

源元件。本发明的元件还可被集成到阵列中，这允许制造存储器。在电子器件是集成电路的情况下，显示出适宜将本发明的元件集成到互连结构中，或者甚至更适宜集成到钝化层顶部上。应该明白第一和第二电极适宜被设为层的一部分，在这些层中限定其它图案，例如互连、电极、键合焊盘等等。其制造适宜在板级（plate-level）上进行，之后将单个器件彼此分开。

本发明的另一目的是提供在第一和第二电极之间包含自组装系统的电元件。聚合导电接触层位于自组装系统和第二电极之间，由此实现该目的。

如上说明，使用聚合接触层允许用可靠的方式制造这种元件并且使元件具有高电容密度而无不切实际地低的击穿电压或任何短路。该元件尤其可用本发明的方法获得，并且参照该方法所讨论的论述和实施例也应用于该元件，反之亦然。

自组装系统适宜仅是单个单分子层，例如烷基硫醇或烷基二硫醇。显然，单分子层可以具有其它端基，并且是异氰酸盐/酯、二硫化物、硫醚、硫代酸、羟基硅烷、氯代硅烷。化合物适宜是带有烷烃链的自组装单分子层，尽管现有技术阐明了存在替代方案。本领域技术人员应当明白，烷烃通常是 C_6 - C_{20} 烷烃，但主链可含有多种其它结构或官能团，例如酰胺基、氨基、酯基、醚基、酮基、甲硅烷基等。这些基团可构成例如低聚（乙二醇）基 $(OCH_2CH_2)_n$ 中的链的主要部分。而且，烷烃优选是线性的，但可存在甲基或乙基侧基。可用任何其它方式对烷烃进行分支或取代。然而，在大多数情况下，用非线性烷基链得到不太好的单分子层堆叠（packing）。用氢键结合的官能团修饰的链是例外。这些氢键结合的官能团能够显著增强形成不同单分子层的分子间的相互作用。于是，它们可使单分子层稳定化。然后最后所得的元件是电容器。然而，不限于此。此处可注意到电流密度依赖于单分子层链长的倒指数（inversely exponential）：对于链长为 20 埃的烷基硫醇，在 0.2V 的偏压下电流密度大约为 10^5 A/m²，而对于链长为 15 埃的烷基硫醇，在同样的 0.2V 的偏压下电流密度大于 10^8 A/m²。

在第二例子中，自组装系统不仅仅包括单个分子层，而是包括已经通过自组装设置到彼此之上的两个或一对单分子层。如此可形成双层或多层，其中不同层具有不同的性质。或者，可用以形成击穿电压增大的电容器。这种双层或多层的优选型将包括结(junction)。将P-型有机半导体材料用于第一单分子层，而n-型有机半导体材料用于第二单分子层，由此可以实现这一点。P-型材料是例如低聚噻吩，而n-型材料为C₆₀-巴克球型材料。低聚噻吩本身不具有用于形成自组装单分子层的合适官能团。然而其可具有非极性链，而因此还具有带有官能团的非极性链。在非提前公开(non-prepublished)申请EP05101249.0(PHNL050166)中描述了提供具有非极性链的低聚噻吩的合适的合成。

在第三例子中，自组装系统包括作为单分子层化合物的材料，该材料包括p-型基和n-型基两种，或者为施主基和受主基。优选地，这种基团被非极性基分离，例如烷基(-R-)或邻亚烃基(orthoalkylene)(-OR-, -ORO-)等等。具有特定特性的分子可被包括在例如从WO-A 2003/079400获知的较大的网络或非极性链中。

在第四例子中，自组装系统包括纳米材料，并且尤其包括碳纳米管或半导体纳米线。这些材料被认为是用于高级半导体例如光电子应用的感兴趣的选则。然而，它们的主要制造方法基于化学气相沉积或对半导体衬底的蚀刻。如果这些纳米材料可被分别制备，随后通过湿式化学沉积集成，那么将是高效的。本发明允许这样。关于这点的一个例子中使用纳米线，该纳米线可通过干式蚀刻从半导体衬底制备。从衬底除去纳米线成为分散体(dispersion)之后，可以通过向分散体添加氨和四乙氧基原硅酸酯或衍生的原硅酸盐来为它们提供表面层。衍生的正硅酸盐可包括如上所述的反应端基。或者，可进行进一步反应来为具有衍生的正硅酸盐的纳米线提供用于集成为自组装系统的一部分的所需反应端基。提供具有功能化表面的纳米线(例如氧化物或其衍生物)的例子本身从WO-A 2004/046021中获知，例如其由(3-氨基丙基)-三乙氧基硅烷与纳米线的溶胶-凝胶反应而获得，通过引用将其内容并入此处。

附图说明

参照附图将进一步说明本发明的这些和其它方面，其中：

图 1 示出了本发明的元件的第一实施例的截面图；

图 2 示出了这样形成的电元件（电容器）的电流密度作为所施加的偏压的函数的曲线图；

图 3 示出了在多种温度下具有直径为 20 微米的空腔 40 的元件 50 的电流密度作为所施加的偏压的函数的曲线图；

图 4 示出了电流密度作为所施加的偏压的函数的另一曲线图。

具体实施方式

图 1 示出了本发明元件的第一实施例的截面示意图。该图没有按比例绘制。元件 50 被制备在直径为 4 英寸（10 cm）的硅衬底 10 上。用 SiO₂ 的热生长层 11 钝化衬底 10。通过热蒸发 1nm 铬和 40nm 金、随后通过光刻制得第一、底部电极 51。接着，将空腔 40 限定在电绝缘层 41 中。将负性光刻胶用作绝缘层 41。限定具有从 1 到 100 微米的多种直径的空腔 40。将自组装系统 52 应用在由此形成的空腔 40 中。在该实施例中系统 42 是单分子层。在不同的实施例中使用 1,8-辛二硫醇和 1,12-十二烷基二硫醇（1,12-dodecanedithiol）和十二烷基硫醇（dodecanethiol）。随后，旋转涂布导电材料的组合物从而形成聚合接触层 53。该组合物含聚（3,4-亚乙二氧基噻吩）（poly(3,4-ethylenedioxythiophene)）和聚苯乙烯磺酸（polystyrene sulphonic acid）-也被称为 PEDOT/PSS-如由 H.C. Starck A.G. 所提供的。在分散体中添加两滴表面活性剂（FSOIOO, DuPont），以便降低表面张力，从而增强空腔 40 中 PEDOT/PSS 的浸润性。通过蒸发在此提供顶部电极 54，并通过光刻对其进行构图。最后，利用反应离子蚀刻（O₂ 等离子，5 min，9 sccm，0.009 mbar）对接触层 53 进行构图。在该步骤中金顶部电极 54 用作蚀刻掩模。

图 2 示出了由此形成的电元件（电容器）的电流密度作为所施加的偏压的函数的曲线图。该曲线图基于对 1,12-十二烷基二硫醇的实

的偏压的函数的曲线图。该曲线图基于对 1,12-十二烷基二硫醇的实验。该数据显示了电阻随接触空腔 40 大小的变化。根据具有 100 微米空腔的元件 50 中不存在短路可推断该技术的鲁棒性。在高达 0.5V 的偏压下测量输运。在环境条件中的室温下进行了测量。

图 3 示出了在多种温度下具有直径为 20 微米的空腔 40 的元件 50 的电流密度作为所施加的偏压的函数的曲线图。使用 1,12-十二烷基二硫醇作为自组装系统。在真空中进行了该测量。首先，如从比较图 2 和图 3 可看到的在真空中电流密度增大。在真空中得到的电流密度可与文献数据中所预期的相比较。第二，输运不依赖温度。这清楚地表明输运受隧穿效应控制。最后，我们注意到在环境条件中的测量在约 1V 偏压下有时显出负微分电阻。这可能是水的假象。在真空中负微分电阻消失。

图 4 示出了电流 I (A) 作为所施加的偏压的函数的另一曲线图。该曲线图基于对十二烷基硫醇即单硫醇的实验。该结构显示类似于隧道二极管的工作。基于十二烷基二硫醇的 MIM 二极管（直径 100 微米）的电流对所施加的电压的特性 (I - V) 示出了电流随所施加的电压的非线性增加。该 I - V 测量在从 199 到 293K 的范围上不存在任何温度依赖性证明非共振隧穿是这些器件中的主要输运机制。

图 5a 是一曲线图，其中示出了与所施加的电压 (V) 相关的电流密度 J 。所示出的测量针对不同的烷基二硫醇，例如，直径横向尺寸范围从 10 到 100 微米的辛烷二硫醇、癸烷二硫醇、十二烷基二硫醇、和十四烷基二硫醇。该曲线图在至少 17 个器件上求平均值并且包括误差棒。发现电流密度随着烷基二硫醇的长度减小。因此烷基二硫醇的长度表现出对隧道势垒 (tunnel barrier) 厚度的有效度量。

图 5b 是一曲线图，其中绘出了在不同偏压下相对于分子长度的电流密度 J 。所施加的偏压是 0.1、0.3 和 0.5V。在对数标度上绘制电流密度 J 。数据满足线性显示出电流密度按照指数关系依赖于势垒厚度。对分子长度的强烈依赖关系证实了，对于分子来说所测电流确实对于结而非分子/界面相关性质是特定的。

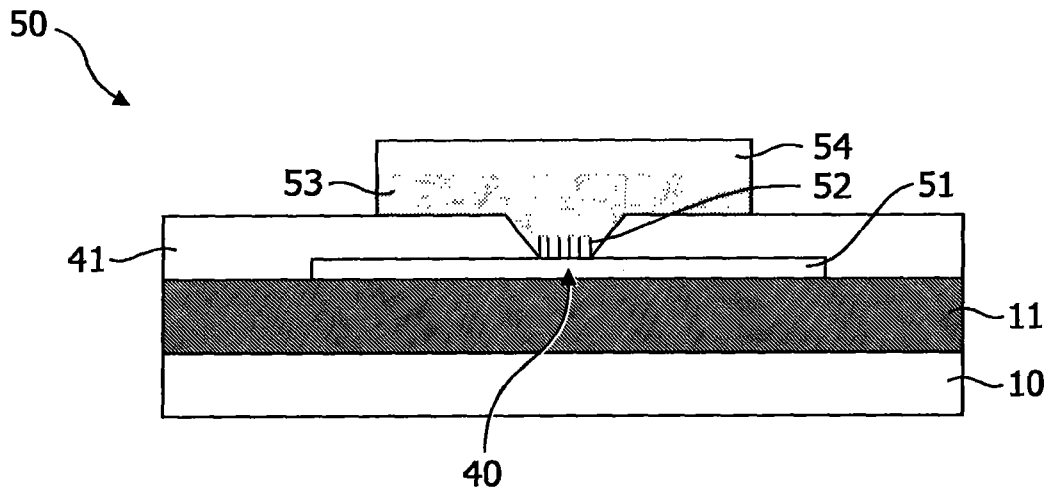


图1

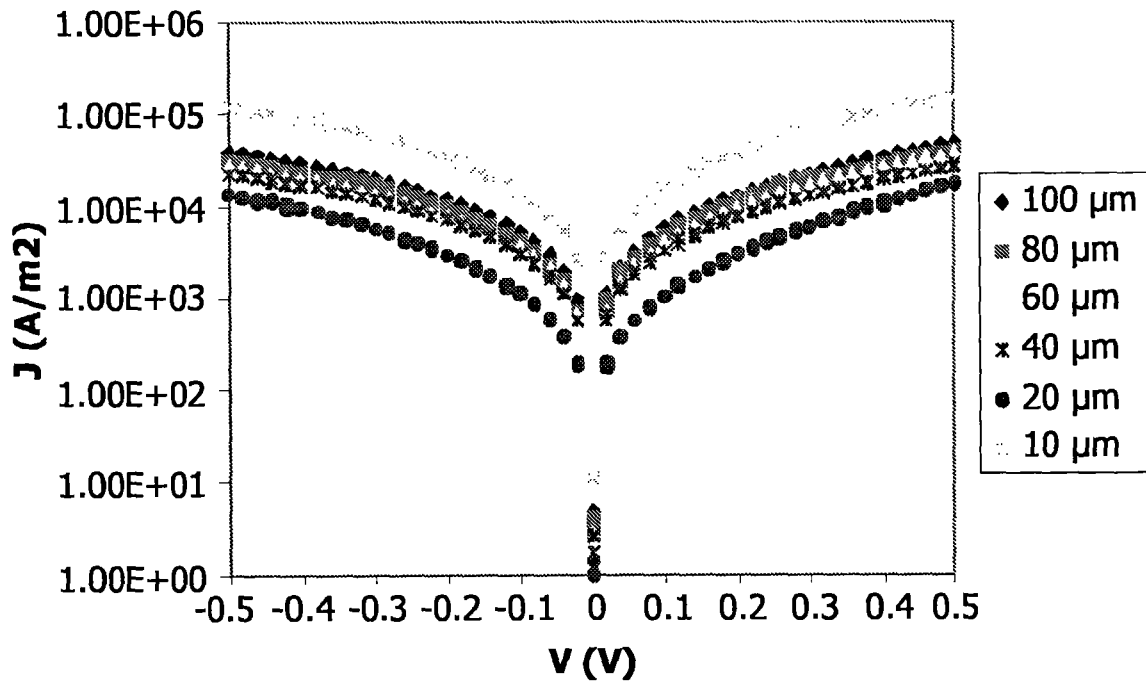


图2

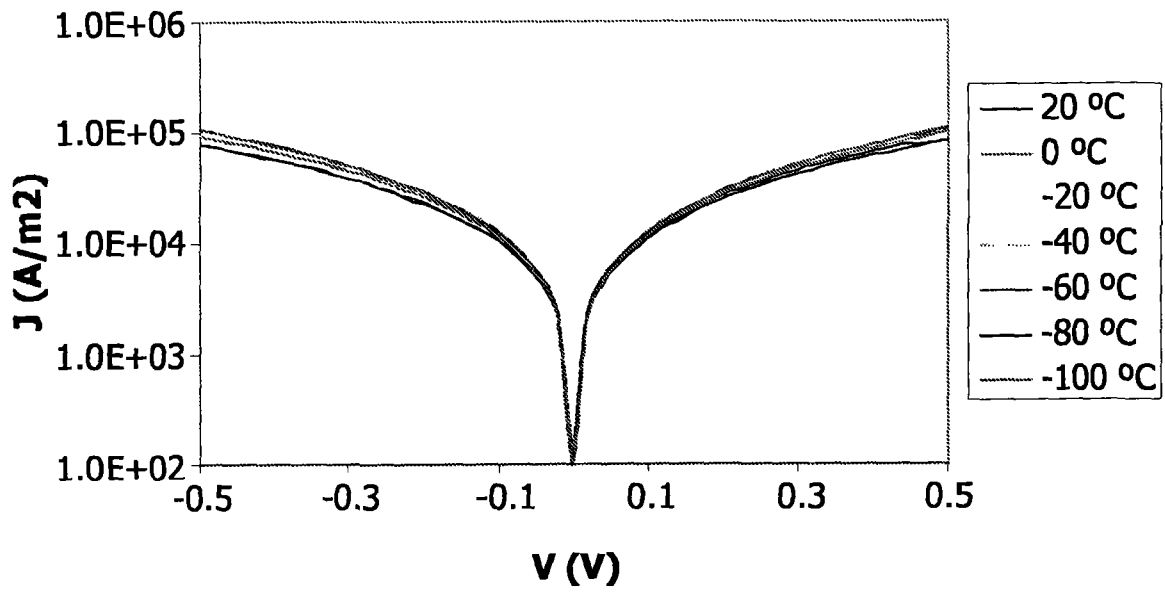


图3

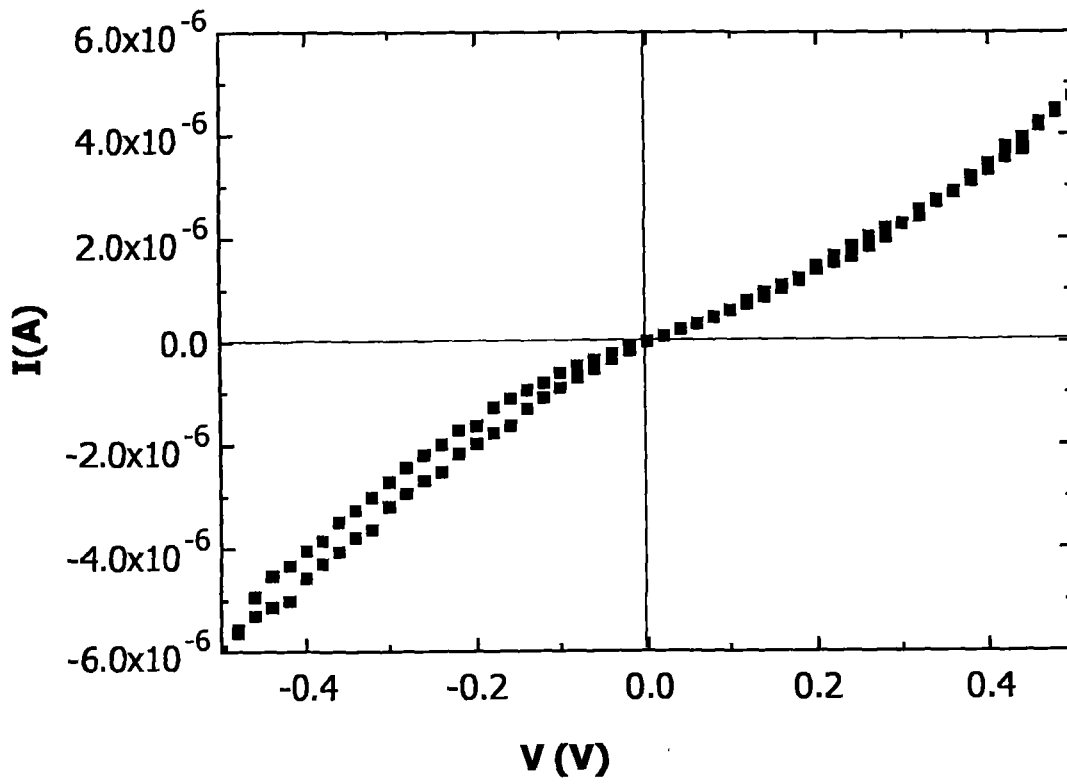


图4

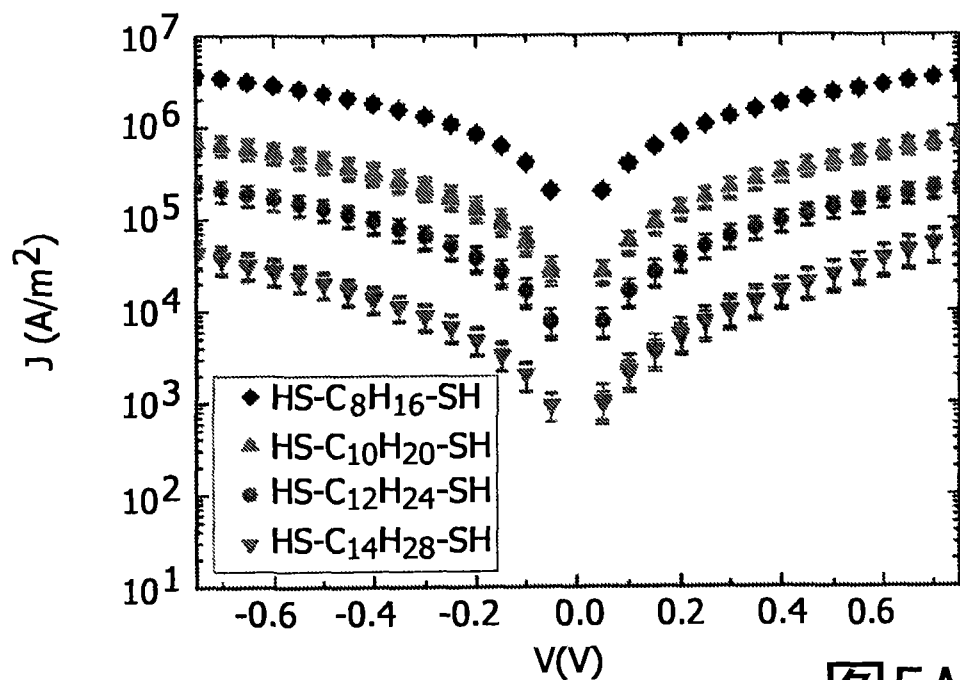


图5A

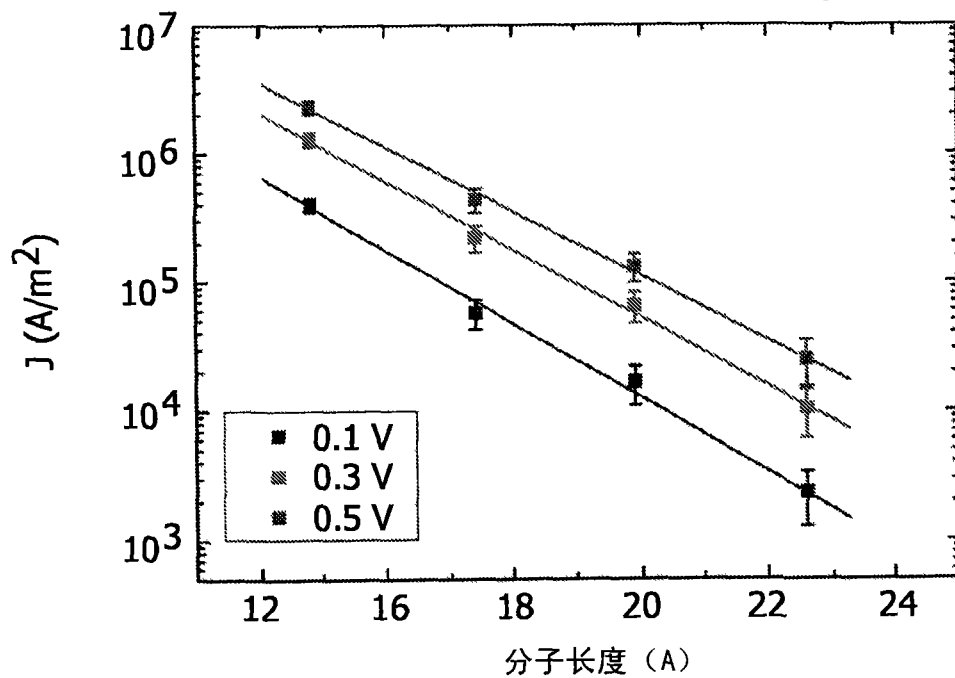


图5B