

發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：961333'0

※申請日期：96.9.6

※IPC 分類：H01L 31/0312 (2006.01)
H05K

一、發明名稱：(中文/英文)

半導體互連及奈米薄膜中用於可延伸電子元件之控制彎曲結構

CONTROLLED BUCKLING STRUCTURES IN SEMICONDUCTOR
INTERCONNECTS AND NANOMEMBRANES FOR STRETCHABLE
ELECTRONICS

二、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文/英文)

美國伊利諾大學理事會

THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS

代表人：(中文/英文)

華特 K 諾爾

KNORR, WALTER K.

住居所或營業所地址：(中文/英文)

美國伊利諾州俄本那市萊特南街506號亨利管理中心352室

352 HENRY ADMINISTRATION BUILDING, 506 SOUTH WRIGHT
STREET, URBANA, ILLINOIS 61801, U.S.A.

國籍：(中文/英文)

美國 U.S.A.

三、發明人：（共 9 人）

姓 名：（中文/英文）

1. 約翰 A. 羅傑斯
ROGERS, JOHN A.
2. 馬修 梅特
MEITL, MATTHEW
3. 孫玉剛
SUN, YUGANG
4. 高興助
KO, HEUNG CHO
5. 安卓 卡森
CARLSON, ANDREW
6. 崔元文
CHOI, WON MOOK
7. 馬克 史托科維奇
STOYKOVICH, MARK
8. 簡寒坤
JIANG, HANQING
9. 黃永剛
HUANG, YONGGANG

國 籍：（中文/英文）

1. 美國 U.S.A.
2. 美國 U.S.A.
3. 中華人民共和國 P.R.C.
4. 韓國 REPUBLIC OF KOREA
5. 美國 U.S.A.
6. 韓國 REPUBLIC OF KOREA
7. 美國 U.S.A.
8. 中華人民共和國 P.R.C.
9. 美國 U.S.A.

四、聲明事項：

☐ 主張專利法第二十二條第二項 ☐ 第一款或 ☐ 第二款規定之事實，其事實發生日期為： 年 月 日。

☒ 申請前已向下列國家（地區）申請專利：

【格式請依：受理國家（地區）、申請日、申請案號 順序註記】

☒ 有主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1. 美國；2006年09月06日；60/824,683

2. 美國；2007年06月18日；60/944,626

☐ 無主張專利法第二十七條第一項國際優先權：

1.

2.

☐ 主張專利法第二十九條第一項國內優先權：

【格式請依：申請日、申請案號 順序註記】

☐ 主張專利法第三十條生物材料：

☐ 須寄存生物材料者：

國內生物材料 【格式請依：寄存機構、日期、號碼 順序註記】

國外生物材料 【格式請依：寄存國家、機構、日期、號碼 順序註記】

☐ 不須寄存生物材料者：

所屬技術領域中具有通常知識者易於獲得時，不須寄存。

九、發明說明：

【先前技術】

自1994年對印刷全聚合物電晶體之首次論證以來，將大量關注針對於包含處於塑膠基板上之可撓性整合式電子設備的潛在之新類別的電子系統。[Garnier, F., Hajlaoui, R., Yassar, A.及 Srivastava, P., Science, 第265卷, 第1684至1686頁]近來，大量研究已針對開發用於(用於)可撓性塑膠電子設備之導體、介電質及半導體元件之新的溶液可處理材料。然而，可撓性電子元件領域之進步不僅係由新的溶液可處理材料之開發所驅動，而且亦由可應用於可撓性電子系統之新的設備組件幾何形狀、有效之設備及設備組件處理方法及高解析度圖案化技術所驅動。預期該等材料、設備組態及製造方法將在快速新興之新類別的可撓性整合式電子設備、系統及電路中起根本作用。

對可撓性電子元件領域之關注起因於此技術所提供之若干重要優勢。舉例而言，此等基板材料之固有可撓性允許將其整合為許多形狀，從而提供對於脆性習知矽基電子設備而言為不可能之大量有用設備組態。另外，溶液可處理組份材料與可撓性基板之組合致能藉由連續高速印刷技術進行之製造，該等技術能夠以較低成本於較大基板區上產生電子設備。

然而，顯示出良好電子效能的可撓性電子設備之設計及製造提出許多重大挑戰。第一，製造習知矽基電子設備之成熟方法與多數可撓性材料不相容。舉例而言，諸如單晶

矽或鍺半導體之傳統高品質無機半導體組件通常藉由在大大超過多數塑膠基板之熔融或分解溫度的溫度(>攝氏1000度)下使薄膜生長而加以處理。另外，多數無機半導體本質上不可溶於將允許基於溶液之處理及輸送之習知溶劑中。第二，雖然許多非晶矽、有機或混合有機-無機半導體適於併入可撓性基板中且可以相對較低之溫度加以處理，但此等材料不具有能夠提供具有良好電子效能之整合式電子設備的電子特性。舉例而言，具有由此等材料製成之半導體元件之薄膜電晶體顯示出比基於互補單晶矽之設備小約三個數量級之場效遷移率。由於此等限制，可撓性電子設備目前限於不需要高效能之特定應用，諸如用於開關元件(用於具有非發射性像素之主動式矩陣平板顯示器)中及用於發光二極體中。

可撓性電子電路為包括可撓性顯示器、具有任意形狀之電活性表面(諸如電子織物及電子皮膚)的許多領域中之研究之活躍區。此等電路經常由於傳導組件不能夠回應於構形改變而延伸而不能夠充分與其環境相一致。因此，彼等可撓性電路易於受損、電子降級，且在嚴苛及/或重複之構形改變下可能不可靠。可撓性電路需要在經由延伸及鬆弛而循環時仍保持完好之可延伸且可撓曲之互連。

能夠撓曲且具有彈性之導體一般藉由在諸如聚矽氧之彈性體中嵌入金屬粒子而製成。彼等傳導橡膠為具有機械彈性且導電的。傳導橡膠之缺點包括高電阻率及在延伸時之顯著電阻變化，由此導致整體較差之互連效能及可靠性。

Gray等人論述了藉由使用封閉於能夠進行高達54%之線性應變同時保持傳導性之聚矽氧彈性體中的微製造曲折導線來建構彈性體電子元件。在彼研究中，將導線形成為螺旋彈簧形狀。與在較低應變(例如，2.4%)下斷裂之直線導線相比，曲折導線在顯著較高之應變(例如，27.2%)下仍保持傳導。該導線幾何形狀依賴於導線藉由撓曲而非延伸而伸長之能力。彼系統在以不同形狀及在額外平面中進行可控及精確圖案化之能力上受到限制，由此限制使系統適應於不同應變及撓曲狀態之能力。

研究提示，彈性可延伸金屬互連經歷電阻隨機械應變之增加。(Mandlik等人，2006年)。Mandlik等人嘗試藉由於錐形奈米圖案化表面上沈積金屬膜而最小化此電阻改變。然而，彼研究依賴於產生賦予薄金屬線延伸能力之微裂縫之起伏特徵。微裂縫藉由平面外扭曲及變形而促進金屬彈性變形。然而，彼等金屬裂縫與厚金屬膜不相容，而替代地與沈積於圖案化彈性體之頂部的相當窄範圍之薄金屬膜(例如，約小於30 nm)相容。

向金屬互連賦予可延伸性之一方式為在導體(例如，金屬)應用期間對基板預加應變(例如，15%至25%)，繼之以對預應變之自發解除，由此誘發金屬導體互連之波狀起伏(見(例如)Lacour等人(2003)；(2005)；(2004)，Jones等人(2004)；Huck等人(2000)；Bowden等人(1998))。Lacour等人(2003)報告藉由最初壓縮金條帶來產生自發起皺之金條帶，電連續性在高達22%之應變(與彈性基板上之金膜之數

個百分比的斷裂應變相比)下得以保持。然而，彼研究使用相當薄之金屬膜之層(例如，約105 nm)且相對有限，因為系統可潛在地製造可延伸約10%之電導體。

自前述內容顯而易見，存在對於具有改良之可延伸性、電特性之互連及設備組件及用於快速且可靠地製造多種不同組態之可延伸互連的相關製程之需要。預期可撓性電子元件領域中之進步在許多重要的新興及既定之技術中起關鍵作用。然而，可撓性電子技術之此等應用的成功在很大程度上取決於對用於製造在折曲、變形及撓曲構形下顯示出良好電子、機械及光學特性之積體電子電路及設備的新型材料、設備組態及商業可行之製造途徑之持續開發。特定言之，需要高效能、機械可延展材料及設備組態在延伸或收縮構形下顯示出有用的電子及機械特性。

【發明內容】

本發明提供可延伸半導體及可延伸電子設備、設備組件及電路。需要可延伸、可撓曲且適型之電子設備及設備組件來製造適於印刷於多種彎曲表面上的電子元件。形狀符合之設備具有在自可撓性顯示器及電子織物至適型生物及物理感應器之範圍內的多種應用。因此，本發明之一實施例為具可撓性且可撓曲之電子設備、設備組件及用於製造具可撓性且可撓曲之設備的相關方法。藉由提供具有波狀或彎曲幾何形狀之互連或半導體薄膜而實現該可撓性及可撓曲性。該幾何形狀提供用於確保系統可延伸且可撓曲而不會有害地影響效能(即使在猛烈且重複之延伸及/或撓曲

循環下)之手段。此外，該等方法提供精確且準確之幾何建構之能力，以使得可使設備及/或設備組件之物理特徵(例如，可延伸性、可撓曲性)適應於系統之操作條件。

舉例而言，可藉由彎曲互連而使一陣列設備組件彼此連接，以促進設備組件相對於彼此之獨立移動。然而，陣列內之局部區域可能具有與其他區域不同的撓曲或延伸要求。本發明之設備及方法促進可具有彎曲互連幾何形狀(包括(例如)互連尺寸、週期性、振幅、定向及一區中互連之總數目)之局部變化之可撓性系統的建構。產生具有可控制定向之多個互連促進使互連適應於設備之操作條件。

在一實施例中，本發明提供用於建立與設備組件之電接觸之可延伸互連。互連具有第一末端、第二末端及安置於第一末端與第二末端之間的中央部分。該等末端結合至基板，諸如可撓性(例如，可延伸)基板、彈性體基板、剛性基板、不為彈性體之基板或者希望向其印刷電子設備、設備組件或其陣列之基板。互連之每一末端可附接至自身由基板支撐的不同設備組件。互連之中央部分處於撓曲組態且不與基板實體接觸(例如，不結合)。在一態樣中，此撓曲組態為中央部分處於應變之結果。在此態樣中，撓曲組態一般為彎曲的，以使得若以隔開設備組件之方式向一或多個設備組件(或下伏基板)施加力，則互連彎曲部分可至少部分地變直以適應設備組件之間的相對運動，同時保持設備組件之間的電接觸。

在一實施例中，互連中央部分為弧形，其具有一振幅，

諸如在約 100 nm與約 1 mm之間的振幅。在一態樣中，不同互連結合區域之數目可大於二，諸如三、四或五。在此態樣中，在第一互連末端與第二互連末端之間的中央部分實際上經再分為許多撓曲組態區域，以使得形成不與基板實體接觸之複數個不同彎曲部分區域。在該組態中，振幅及/或週期性可為恆定或者可在互連之整個縱向長度上變化。互連自身可為任何形狀，諸如薄膜、線或織帶。在互連為織帶之態樣中，織帶可具有在約 300 nm與 1 mm之間的厚度。

為了促進額外設備組件之置放，互連末端電連接至之設備組件可為接觸焊墊。在一態樣中，額外設備組件與接觸焊墊電接觸。

如所指出，支撐互連之基板可視互連所併入之設備而具有任何所要材料。在一實施例中，基板包含諸如聚二甲基矽氧烷(PDMS)之彈性體材料。基板可可逆地變形(例如，PDMS)或不可逆地變形(例如，塑膠)。

在一實施例中，設備可基於其物理特徵來進一步加以描述。舉例而言，本文中提供能夠經受高達 25%之應變同時保持電導率及與設備組件之電接觸的互連。此情況下的"保持"指代在應變適應期間電導率的小於 20%、10%或 5%之降低。

在一實施例中，藉由將本文揭示之互連中之任一者併入具有複數個互連及兩個以上設備組件的設備陣列中來提供多軸延伸及撓曲。在此實施例中，每一互連提供一對設備

組件之間的電接觸。視所要延伸、撓曲及/或壓縮操作條件而定，設備陣列可具有為柵格、花形、橋接或其任一組合(例如，一區域處於柵格組態中，另一區域處於橋接組態中)之幾何組態。另外，藉由將鄰近設備組件連接至一個以上之互連(諸如兩個、三個或四個互連)之能力而提供進一步的延伸及可撓曲性控制。舉例而言，係正方形或矩形之設備組件可鄰近於四個其他設備組件。若每一鄰近對藉由兩個互連而連接，則設備組件將具有自其延伸之八個互連。

在一實施例中，設備陣列具有定向於至少兩個不同方向上之互連之集合。舉例而言，在柵格組態中，互連可具有彼此垂直或正交之兩個定向以提供在兩個方向上延伸之能力。在另一實施例中，設備陣列可包含所有皆相對於彼此對準之互連。彼實施例在延伸或撓曲被限制於單一方向時(例如，將電子設備織物撓曲限制於圓柱形表面)可為有用的。藉由將互連定向於三個或三個以上方向(例如，三個方向或四個方向)上而提供額外撓曲及/或延伸能力。在一實施例中，藉由將設備陣列之互連置放於任一數目之不同層(諸如彼此鄰近之兩層)中而提供額外控制及穩定性。

在一實施例中，設備陣列能夠經受高達約150%之應變而不斷裂。藉由使互連幾何形狀、定向、振幅、週期性、數目適應於操作條件(例如，單軸對多軸延伸及/或撓曲)而最大化達到斷裂之應變。

支撐互連或設備陣列之基板可具有為彎曲(諸如，為凹

入、凸起、半球形或其組合)之至少一部分。在一實施例中，互連所併入之設備為可延伸之光偵測器、顯示器、發光器、光伏打裝置、薄片掃描器、LED顯示器、半導體雷射、光學系統、大面積電子元件、電晶體或積體電路中之一或多者。

在另一實施例中，本發明係關於用於製造能夠建立與設備組件之電接觸之彎曲互連之各種方法。在一態樣中，向彈性體基板表面、互連或兩者上施加結合位點之圖案。施加一力以使基板及與基板接觸之互連應變。結合位點之圖案提供特定互連位置與基板之間的結合。在使基板鬆弛之後(藉由移除力)，即產生彎曲互連。改變預加應變之量值、結合位點圖案化、幾何形狀及間距中之一或多者產生具有不同彎曲或波狀幾何形狀之互連。舉例而言，使結合位點之位置交錯以使得鄰近互連於不同位置處結合至基板提供"反相"之互連幾何形狀。結合位點圖案化係藉由此項技術中已知的任何手段而進行，諸如藉由向彈性體基板表面塗覆可固化光聚合物。視情況可藉由將互連之至少一部分囊封於諸如彈性體材料之囊封材料中來保護互連。彎曲互連可具有適於應用之任何形狀。在一實施例中，圖案為柵格組態、花形組態、橋接組態或其任一組合。

方法及設備可具有具任何尺寸之互連，諸如具有在數十奈米至約一毫米之範圍內的厚度或大於約300 nm之厚度。在一態樣中，彎曲互連具有對應於互連自基板之最大豎直移位的振幅，且該振幅係選自100 nm與1 mm之間的範

圍。對於具有長度及寬度之互連織帶，寬度、振幅或者寬度及振幅視情況可沿互連之長度而變化。影響振幅之一因素為在互連結合之前施加至彈性體基板之預加應變。一般而言，應變愈高，振幅愈大。在一實施例中，施加之力在彈性體基板中產生一應變，其中該應變選自在20%與100%之間的範圍。

在一實施例中，互連之一末端電連接至設備組件，且基板能夠延伸高達約100%，壓縮高達約50%或以低達5 mm之曲率半徑而撓曲而無互連斷裂。互連由任何合適材料製成，諸如金屬或半導體，包括GaAs或Si。在一實施例中，該等方法提供彎曲互連自彈性體基板至諸如彎曲設備基板之設備基板的轉印。

替代經由對彈性體基板預加應變而產生上推或彎曲互連，可藉由向具有波狀表面之聚合印模施加互連材料而製成可延伸且可撓曲之互連。

在一實施例中，為了製造可延伸且可撓曲之互連，使在表面上具有波狀特徵之基板平滑(諸如旋塗聚合物以部分填充凹入特徵)。該部分填充產生平滑波狀基板。接著視需要將金屬特徵沈積至平滑波狀基板上且對該等金屬特徵進行圖案化。平滑波狀基板上之金屬特徵可用於聚合印模抵靠平滑波狀金屬化基板之後續澆鑄。藉由自基板移除聚合印模而將金屬化基板(具有金屬特徵)轉移至聚合物基板來製造可延伸且可撓曲之互連。在一實施例中，金屬與基板之間的界面為Au/Su-8環氧樹脂光阻劑。金屬可為層化

之(例如)Au/Al。基板可經類似地層化，例如玻璃層支撐Su-8層，金屬與基板之間的實際界面為Au/Su-8。

在印模表面上製造上推互連之替代方法依賴於使彎曲基板表面變平，使互連與變平之表面接觸且允許基板表面鬆弛回至其彎曲幾何形狀。如本文所揭示，在一實施例中，該方法進一步提供在接觸之前對結合位點進行空間圖案化。在此實施例中，該方法尤為適於將互連及設備組件轉移至第二相應彎曲基板表面。在一態樣中，諸如黏著劑或黏著前驅物之結合手段在第二彎曲基板與第一彎曲基板上之互連系統之間產生結合，其即使在移除彈性體印模之後亦足以允許互連系統向第二基板之轉移。

在一態樣中，本發明之方法及設備中之任一者具有為PDMS之印模或彈性體基板，其具有對於高達約40%之應變的線性及彈性回應。本發明之互連視情況可為可延伸電極、可延伸被動式矩陣LED顯示器或光偵測器陣列之部分。在一實施例中，本發明為具有藉由本發明之方法而製成之任何一或多個互連之可延伸電子設備，其中該電子設備為可延伸或可撓曲之電極、被動式矩陣LED、太陽能電池、集光器陣列、生物感應器、化學感應器、光電二極體陣列或半導體陣列。在一態樣中，電連接至彎曲互連之設備組件為薄膜、感應器、電路元件、控制元件、微處理器、傳感器或其組合。在一態樣中，藉由使互連之一末端電連接至設備組件而接取互連。

在一實施例中，本發明係關於具有諸如波狀半導體奈米

薄膜之波狀奈米薄膜之方法及結構。該波狀奈米薄膜促進可撓性在設備組件自身中之併入(與連接設備組件之互連之可撓性相比)。在一態樣中，本發明為製造將半導體奈米薄膜材料自第一基板轉移至第二變形基板之雙軸可延伸半導體薄膜之方法，其中在轉移之後，允許變形基板鬆弛回至其靜止組態。在一態樣中，半導體材料之厚度在約40 nm與600 nm之間。二維變形力之解除產生具有二維波狀結構之奈米薄膜。在一態樣中，藉由改變可撓性基板之溫度而產生變形力。

【實施方式】

"互連"指代能夠與組件建立電連接或在組件之間建立電連接之導電材料。特定言之，互連可在分離及/或可相對於彼此移動之組件之間建立電接觸。視所要設備規格、操作及應用而定，互連由合適材料製成。對於需要高傳導性之應用而言，可使用典型互連金屬，包括(但不限於)銅、銀、金、鋁及其類似物、合金。合適傳導材料可包括如矽、氧化銦錫或GaAs之半導體。"半導體"指代於非常低之溫度下為絕緣體，但在約300克耳文之溫度下具有明顯電導率之任何材料。在本描述中，對術語半導體之使用意欲與在微電子及電子設備之技術中對此術語之使用相一致。在本發明中有用之半導體可包含元素半導體，諸如矽、鍺及金剛石，以及化合物半導體，諸如：諸如SiC及SiGe之第IV族化合物半導體、諸如AlSb、AlAs、Aln、AlP、BN、GaSb、GaAs、GaN、GaP、InSb、InAs、InN及InP之

第 III-V 族半導體、諸如 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 之第 III-V 族三元化合物半導體合金、諸如 CsSe 、 CdS 、 CdTe 、 ZnO 、 ZnSe 、 ZnS 及 ZnTe 之第 II-VI 族半導體、第 I-VII 族半導體 CuCl 、諸如 PbS 、 PbTe 及 SnS 之第 IV-VI 族半導體、諸如 PbI_2 、 MoS_2 及 GaSe 之層狀半導體及諸如 CuO 及 Cu_2O 之氧化物半導體。術語半導體包括本徵半導體及非本徵半導體，該等非本徵半導體摻有一或多種選定材料(包括具有 p 型摻雜材料及 n 型摻雜材料之半導體)以提供對給定應用或設備有用之有益電子特性。術語半導體包括包含半導體及/或摻雜劑之混合物的複合材料。在本發明之一些應用中有用之特定半導體材料包括(但不限於) Si 、 Ge 、 SiC 、 AlP 、 AlAs 、 AlSb 、 GaN 、 GaP 、 GaAs 、 GaSb 、 InP 、 InAs 、 GaSb 、 InP 、 InAs 、 InSb 、 ZnO 、 ZnSe 、 ZnTe 、 CdS 、 CdSe 、 ZnSe 、 ZnTe 、 CdS 、 CdSe 、 CdTe 、 HgS 、 PbS 、 PbSe 、 PbTe 、 AlGaAs 、 AlInAs 、 AlInP 、 GaAsP 、 GaInAs 、 GaInP 、 AlGaAsSb 、 AlGaInP 及 GaInAsP 。多孔矽半導體材料對於本發明在感應器及發光材料(諸如發光二極體(LED)及固態雷射)之領域中的應用為有用的。半導體材料之雜質為除半導體材料自身或提供至半導體材料之任何摻雜劑以外之原子、元素、離子及/或分子。雜質為存在於半導體材料中的可能消極地影響半導體材料之電子特性之不合需要的材料，且包括(但不限於)氧、碳及包括重金屬之金屬。重金屬雜質包括(但不限於)週期表上處於銅與鉛之間的族之元素、鈣、鈉及其所有離子、化合物及/或錯合物。

"可延伸"之互連在本文中用以廣泛地指代能夠經受在一或多個方向上的諸如延伸、撓曲及/或壓縮之多種力及應變而不會有害地影響至設備組件之電連接或自設備組件之電導的互連。因此，可延伸互連可由諸如GaAs之相對脆性之材料形成，然而歸因於互連之幾何組態而即使在曝露於顯著變形力(例如，延伸、撓曲、壓縮)下時仍能夠持續起作用。在一例示性實施例中，可延伸互連可經受大於約1%、10%或約30%之應變而不斷裂。在一實例中，藉由使互連之至少一部分所結合至之下伏彈性體基板延伸而產生應變。

使用"設備組件"以廣泛地指代電氣設備內之個別組件。組件可為光電二極體、LED、TFT、電極、半導體、其他光收集/偵測組件、電晶體、積體電路、能夠收納設備組件之接觸焊墊、薄膜設備、電路元件、控制元件、微處理器、傳感器及其組合中之一或多者。如諸如金屬蒸鍍、導線結合、固體或導電膏之施加的技術中所已知，設備組件可連接至一或多個接觸焊墊。電氣設備一般指代併有複數個設備組件之設備，且包括較大面積之電子元件、印刷線路板、積體電路、設備組件陣列、生物及/或化學感應器、物理感應器(例如，溫度、光、輻射等等)、太陽能電池或光伏打陣列、顯示器陣列、集光器、系統及顯示器。

"基板"指代具有能夠支撐包括設備組件或互連之組件之表面的材料。"結合"至基板之互連指代互連之與基板處於實體接觸且實質上不能夠相對於所結合至之基板表面移動

的部分。相反，未結合之部分能夠相對於基板作顯著移動。互連之未結合部分一般對應於(諸如)藉由應變誘發之互連撓曲而具有"撓曲組態"之部分。

在此描述之上下文中，"撓曲組態"指代具有由力之施加所導致之彎曲構形之結構。在本發明中，撓曲結構可具有一或多個摺疊區域、凸起區域、凹入區域及其任何組合。舉例而言，可以捲曲構形、起皺構形、彎曲構形及/或波狀(亦即，波紋狀)組態而提供在本發明中 useful 之撓曲結構。

諸如可延伸撓曲互連之撓曲結構可以撓曲結構處於應變下之構形而結合至諸如聚合物及/或彈性基板之可撓性基板。在一些實施例中，諸如撓曲織帶結構之撓曲結構處於等於或小於約30%之應變下、等於或小於約10%之應變下、等於或小於約5%之應變下，且在對於一些應用為較佳之實施例中，處於等於或小於約1%之應變下。在一些實施例中，諸如撓曲織帶結構之撓曲結構處於自約0.5%至約30%之範圍中選擇之應變下、自約0.5%至約10%之範圍中選擇的應變下、自約0.5%至約5%之範圍中選擇之應變下。或者，可延伸撓曲互連可結合至係設備組件之基板的基板，該基板包括自身非可撓性之基板。基板自身可為平坦、大體上平坦、彎曲、具有銳緣或其任何組合。可延伸撓曲互連可用於轉移至此等複雜基板表面形狀中之任何一或多者。

互連可具有任何數目之幾何形狀或形狀，只要該幾何形

狀或形狀促進互連在不破裂之情況下的撓曲或延伸即可。可將一般互連幾何形狀描述為"彎曲"或"波狀"。在一態樣中，可由藉由對下伏可變形基板施加力以使得下伏基板之尺寸的改變在互連中產生彎曲或波紋(因為互連之部分結合至基板，且結合部分之間的區域未結合)而對互連施加力(例如，應變)來獲得彼幾何形狀。因此，可藉由結合至基板之末端及末端之間未與基板結合之彎曲中央部分來界定個別互連。"彎曲"指代相對複雜之形狀，諸如對於在中央部分具有一或多個額外結合區域之互連之情況。"弧狀"指代具有振幅之一般呈正弦之形狀，其中振幅對應於互連與基板表面之間的最大分離距離。

互連可具有任何橫截面形狀。一形狀之互連為織帶狀互連。"織帶"指代具有厚度及寬度的大體上呈矩形形狀之橫截面。特定尺寸視經由互連之所要傳導性、互連之組成及使鄰近設備組件電連接之互連的數目而定。舉例而言，使鄰近組件連接之橋接組態的互連可具有與使鄰近組件連接之單一互連不同之尺寸。因此，只要產生合適電導率，尺寸可具有任何合適值，諸如在約10 μm 與1 cm之間的寬度及在約50 nm與1 nm之間的厚度，或者在約0.001與0.1之間的範圍內之寬度厚度比，或約為0.01之比。

"彈性體"指代可延伸或變形且至少部分地返回其原始形狀而無顯著永久變形之聚合材料。彈性體基板通常經受實質上之彈性變形。在本發明中 有用之例示性彈性體基板包括(但不限於)彈性體及彈性體之複合材料或混合物，以及

顯示出彈性之聚合物及共聚物。在一些方法中，經由沿一或多個主軸提供彈性基板之擴展之機構來對彈性體基板預加應變。舉例而言，可藉由使彈性基板沿第一軸擴展(包括用以將半球形表面變換為平坦表面的在徑向方向上之擴展)而提供預加應變。或者，可沿複數個軸來擴展彈性基板(例如經由沿相對於彼此正交定位之第一與第二軸的擴展)。經由提供彈性基板之擴展之機構而對彈性基板預加應變的手段包括撓曲、捲繞、折曲、平整、擴展彈性基板或以其他方式使彈性基板變形。預加應變之手段亦包括藉由升高彈性基板之溫度，藉此提供彈性基板之熱膨脹而提供之預加應變。在本發明中有用之彈性體可包括(但不限於)熱塑性彈性體、苯乙烯類材料、烯烴材料、聚烯烴、聚胺基甲酸酯熱塑性彈性體、聚醯胺、合成橡膠、PDMS、聚丁二烯、聚異丁烯、聚(苯乙烯-丁二烯-苯乙烯)、聚胺基甲酸酯、聚氯丁烯及聚矽氧。

將對於長度自 L (處於靜止)變為 $L+\Delta L$ (在所施加之力下)之應變界定為： $\epsilon=\Delta L/L$ ，其中 ΔL 為自靜止之移位距離。軸向應變指代施加至基板之軸以產生移位 ΔL 之力。亦藉由在其他方向上施加之力來產生應變，諸如撓曲力、壓縮力、剪切力及其任何組合。亦可藉由將彎曲表面延伸為平坦表面或是相反過程來產生應變或壓縮。

"楊氏模數(Young's modulus)"為材料、設備或層之機械特性，其指代對於給定物質，應力與應變之比。楊氏模數可由以下表達式提供；

$$E = \frac{(\text{應力})}{(\text{應變})} = \left(\frac{L_0}{\Delta L} \times \frac{F}{A} \right); \quad (\text{II})$$

其中E為楊氏模數， L_0 為平衡長度， ΔL 為在所施加之應力下的長度改變，F為所施加之力且A為力所施加於之面積。亦可經由下式而以拉梅常數(Lame constant)來表達楊氏模數：

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}; \quad (\text{III})$$

其中 λ 及 μ 為拉梅彈性常數。高楊氏模數(或"高模數")及低楊氏模數(或"低模數")為對於給定材料、層或設備中之楊氏模數之量值的相對描述符。在本發明中，高楊氏模數大於低楊氏模數，對於一些應用較佳地大約10倍，對於其他應用更佳大約100倍且對於其他應用甚至更佳大約1000倍。藉由使具有空間變化之楊氏模數之彈性體聚合及/或藉由以在各個位置處具有不同彈性之多個層而使彈性體層化來獲得複雜表面形狀。

壓縮在本文中與應變類似之方式而使用，但特別指代用以減小基板之特徵性長度或體積之力，從而 $\Delta L < 0$ 。

"斷裂"指代互連中之實體破裂，其使得互連實質上不能夠導電。

"結合位點之圖案"指代結合手段對支撐基板表面及/或對互連之空間應用，其使得所支撐之互連具有與基板之結合區域及未結合區域。舉例而言，於末端結合至基板且在中央部分未結合之互連。進一步之形狀控制藉由在中央部分中提供額外結合位點以使得未結合之區域被劃分為兩個不

同的中央部分而為可能的。結合手段可包括黏著劑、黏著前驅物、熔接、光微影、光可固化聚合物。一般而言，結合位點可藉由多種技術而加以圖案化，且可在能夠提供基板與特徵(例如，互連)之間的強黏著力之表面活性(W_{act})區域及黏著力相對較弱之表面非活性(W_{in})的方面加以描述。可在 W_{act} 與 W_{in} 之尺寸方面描述以黏著方式圖案化成直線之基板。彼等變數連同預加應變之量值 ε_{pre} 影響互連幾何形狀。

藉由以下非限制性實例可進一步瞭解本發明。本文引用之所有參考文獻在不與隨附揭示內容不一致的程度上以引用方式併入本文中。雖然本文之描述含有許多特定細節，但此等特定細節不應解釋為限制本發明之範疇，而應解釋為僅僅提供對本發明之目前較佳的實施例中之一些之說明。因此，本發明之範疇應由所附申請專利範圍及其等效物判定而非由給出之實例所判定。

✓ 圖1大體概述用於製造彎曲或波狀互連之一方法。在基板20上提供金屬特徵10(諸如將為互連之金屬特徵)。視情況可(諸如)藉由光微影或以蔽蔭遮罩而處理接觸金屬特徵及/或基板表面以減小黏著。諸如藉由微機械加工、蝕刻及/或機械雕合而在特徵10與基板20之間引入分隔物(裂縫)25。藉由柔性彈性體印模30取得金屬特徵10。印模30之後續變形在金屬特徵10中產生波狀或彎曲幾何形狀40。由在取得金屬特徵時處於應變下且隨後解除所施加之張力的印模30提供彎曲之產生，或藉由在取得金屬特徵之後壓

縮印模30而提供彎曲之產生。

圖2展示藉由圖1中所概述之方法而產生之彎曲或波狀金屬特徵之一實例。圖2為可延伸波狀/彎曲電互連40之相片，該電互連40係藉由自剛性基板取至經預加應變之可延伸PDMS橡膠基板30上，隨後解除應變，藉此誘發彎曲而形成。

圖3中提供用於產生波狀可延伸電極及/或互連之方法。如圖3A所示，藉由(例如)微機械加工製程而在基板20上製備波狀特徵22。一表面具有波狀特徵22之基板20充當用於模製具有相應波狀表面32之彈性體印模30的母體。藉由(諸如)經由蔽蔭遮罩之蒸鍍及/或電鍍而在波狀表面32上沈積金屬特徵10。

圖4提供用於製造平滑波狀彈性體基板之一方法。各向異性Si(100)蝕刻提供具有銳緣24之基板20(圖4B-頂部畫面)。旋塗PR藉由在基板20之銳緣谷24中沈積PR 26而使銳緣谷平滑。抵靠基板20而澆鑄彈性體印模34。印模34具有銳緣凹入特徵。在印模34上澆鑄第二彈性體印模36以產生具有銳緣峰之印模。以Su-8 50壓印印模36且在適當時使其固化。旋塗PR 26使50之銳緣谷平滑。抵靠具有平滑谷之50而澆鑄彈性體基板30。移除基板30以顯露波狀且平滑之表面32。

圖54概述製造波狀可延伸電極之一方法：於波狀母體上沈積，隨後在彼母體上澆鑄一印模，使印模固化，且藉此在釋放後即將電極轉移至母體。圖55展示藉由圖4中之方

法結合圖54中之方法而製備的在波狀PDMS上之可延伸金屬電極(Au, 300 nm厚)之影像。於金屬特徵10與基板20之間展示界面112。界面112可包含促進底部畫面中所說明的藉由印模30而進行的金屬特徵10之移除之材料。簡言之，一方法使用：於預清潔之2"×3"玻璃載片上旋塗SU-8 10之薄塗層以使得玻璃表面被完全覆蓋。使載片/SU-8與具有所要波狀表面特徵(平滑谷及陡峰)之PDMS印模接觸且輕柔施加壓力以使得所有氣穴經移除。在正面於UV燈下閃蒸固化印模/模結構歷時30秒，翻轉，且在背面固化額外之40秒。在固化之後，在熱板上於65°C下烘焙5分鐘。在烘焙之後，允許樣本冷卻至室溫，並將SU-8模自PDMS母體剝離。SU-8現將具有具有銳緣谷之波狀表面起伏。為了使此等谷趨於平滑，將一份SU-8 2與一份較薄之SU-8混合，且以高RPM而旋塗歷時90秒。曝露於UV燈下歷時20秒來固化且於65°C進行後烘焙歷時3分鐘。一旦冷卻，即經由電鍍、光微影及蝕刻/起離及/或經由蔽蔭遮罩之蒸鍍而沈積金屬線或接觸點。以MPTMS對SU-8上之金屬處理1小時，且接著抵靠其而澆鑄彈性體基板。在移除後，PDMS具有波狀表面起伏(其具有平滑之峰及谷)連同轉移之金屬結構。圖55為藉由圖54中概述之製程而製造之波狀可延伸電極之相片，且亦提供可延伸波狀金屬電極的作為所施加之拉伸應變(高達30%)之函數的量測而得之電阻資料。

圖5提供藉由圖4中概述之方法而製造之平滑波狀PDMS

基板30之一實例。設備組件60可於非波狀區域(例如，大體上平坦之部分)中支撐於波狀基板30且在需要時連接至互連10。

圖6展示向銳緣谷或凹入特徵中旋塗平滑層之一實例。藉由旋塗光可固化環氧樹脂26而使銳緣基板34(圖6A)平滑來產生平滑波狀基板。藉由抵靠圖6B之基板澆鑄PDMS印模且隨後自基板34移除印模30而獲得具有平滑波狀表面32之彈性體(例如，PDMS)印模30。

圖7為可延伸電極之相片。圖7A為具有波狀表面32之彈性體基板30的橫截面之相片。圖7B為藉由在波狀彈性體基板表面32上蒸鍍金屬10而製成之電極的俯視顯微相片。影像之焦平面處於波狀起伏之峰上。在圖7C中，焦平面處於波狀起伏之谷上且金屬互連10處於與電極250之電接觸中。藉由經由蔽蔭遮罩而蒸鍍至平滑波狀彈性體基板上來沈積可延伸電極。在此實例中，電極250在受張力而延伸至高達約10%的期間保持經由互連10之傳導性及連接性。

本文揭示之方法及設備可用以製造多種電子設備，包括(例如)可延伸被動式矩陣LED顯示器(見圖8)。將波狀電極(例如，互連10及接觸焊墊70)圖案化於兩個彈性體基板30上。藉由轉印而將設備組件60(在此情況中為ILED像素)於接觸焊墊70處圖案化波狀電極上。相應地組裝兩個基板30以使得互連10以不同定向(在此實例中為垂直)而延行。圖9說明該被動式矩陣LED顯示器之2D機械可延伸性。除了能夠單軸及雙軸延伸以外，顯示器能夠顯著撓曲而不破裂。

該多軸撓曲向彎曲表面提供模製電子設備之能力以製造彎曲電子設備且併入智慧電子織物或顯示器中。

彎曲電子設備之一該實例提供於圖10中。圖10說明包含分布於球面彎曲透鏡上之無機光電二極體陣列之"人造眼"。展示人造陣列之四個不同視圖。圖11示意性地說明對於可延伸平坦電子設備之要求。為了圍繞球形表面而包繞平坦薄片，薄片必須在一個以上的方向上延伸。

圖12為用於製造能夠與彎曲表面相符之可延伸彎曲半導體陣列之製造機制。藉由在基板(諸如畫面(i)中所說明之"母晶圓")上之選擇性Au或Ti/Au沈積來製造薄Si元件。使Si結合至經預加應變(指示為 $L+\Delta L$)及UVO處理之PDMS(畫面(ii))。如所說明，在兩個方向上提供預加應變。該結合係藉由此項技術中已知之任何手段而進行，諸如(例如)塗覆至Si元件、基板或兩者之黏著劑。以選定圖案應用結合手段以使得Si具有將保持與基板之實體接觸(在變形之後)之結合區域及不與基板實體接觸之處於撓曲組態的其他區域(例如，相對於結合區域中之黏著力不結合或弱結合之區域)。自晶圓基板移除經預加應變之基板以顯露半導體陣列之平坦柵格(畫面(iii))。在將基板自 $L+\Delta L$ 鬆弛至 L 後，互連10即在弱結合之區域中彎曲(見畫面(iv))為撓曲組態，而設備組件60(例如，半導體Si接觸焊墊)仍保持結合至基板30。因此，彎曲互連10向整個陣列賦予可延伸性，且特定言之相對於其他組件60移動組件60之能力。不破壞組件60之間的電接觸而藉此向彎曲表面或可撓曲表面提供

保形能力。

圖 13 提供採取單一柵格組態 140(頂部兩幅畫面)、具有複數個連接之互連 160 的柵格組態(左下部畫面)及花形組態 150(右下部畫面)之彎曲可延伸矽陣列之光學顯微影像。在此等實例中之每一者中，互連 10 在中央部分中彎曲，互連末端附接至接觸焊墊 70。互連及接觸焊墊 70 支撐於 PDMS 基板 30 上。圖 14 至圖 17 進一步提供許多不同互連幾何形狀之特寫視圖。圖 14 提供電子顯微影像以展示具有中央部分 90 連同第一末端 100 及第二末端 110 之基本彎曲或波狀互連 10。中央部分採取撓曲組態。末端 100 及 110 連接至設備組件(在此情況下為接觸焊墊 70)，從而能夠建立與設備組件之電接觸。互連 10 及接觸焊墊 70 支撐於諸如彈性體 PDMS 基板之基板 30 上。

圖 15 為藉由複數個(兩個)互連 160 彼此連接之鄰近設備組件(例如，接觸焊墊 70)之電子顯微影像。圖 15 與圖 14 比較論證了可藉由一或多個互連 10 來使設備組件 70 彼此連接以向電子設備提供額外可撓性。舉例而言，具有相對較大之佔據面積之設備組件或接觸焊墊 70 視情況可藉由多個互連而連接至另一設備組件。

圖 16 為採取花形組態 150 之互連之電子顯微影像。與柵格組態相比，花形組態具有在兩個以上之縱向方向上定向之互連。在此實例中，存在四個不同定向以使得諸如接觸焊墊 70 之設備組件能夠接觸對角鄰近之設備組件。在此實例中，互連 10 具有電連接至設備組件(未圖示)之互連末端

100與110之間的可選結合區域102，藉此將中央部分90劃分為各具有撓曲組態之兩個未結合區域92。

圖17為以橋接組態130配置之互連的電子顯微影像。在橋接組態中，存在橋接中央部分高峰120，三個或三個以上互連末端自其延伸。舉例而言，於未結合區域中相交之兩個互連導致高峰120，其具有自其延伸之四個互連末端。對於設備組件為交錯配置之情形，高峰120可具有自其延伸之三個末端。在設備組件之間存在多個互連連接之情況下，四個以上之末端可自高峰120延伸。

雖然本文提供之圖式中之許多者展示係接觸焊墊70之設備組件，但本文主張的方法及設備能夠連接至大量設備組件以提供可延伸且因此形狀符合之電子設備。舉例而言，圖18展示設備組件60，其為藉由支撐於彈性體基板30上之彎曲互連10而連接至採取陣列組態之其他光電二極體的光電二極體。

圖19描繪彎曲矽陣列之一維延伸行為。畫面(i)為在未施加任何應變力之情況下的彎曲矽陣列之圖像。施加延伸力(如藉由畫面(i)上方之箭頭所指示)以使陣列在一方向上延伸。如畫面(2)至(4)所展示，彎曲互連變平。當於畫面(5)中解除延伸力時，陣列返回至其彎曲組態(見畫面(6)至(8))。畫面(1)與(8)之間的比較展示在延伸之前與延伸之後的彎曲組態相同，此指示該過程可逆。

設備組件之彎曲陣列可易於轉移至彎曲表面，包括剛性或非彈性彎曲表面。藉由圖20之氣泡或氣球印模400來提

供用於促進對彎曲表面之保形接觸的一設備及製程之實例。彈性體基板30(在此實例中為約20 μm 厚之PDMS薄膜)固定於外殼腔室300中以提供由面向內部之基板壁及外殼腔室所界定之腔室容積310。施加正壓力(例如，腔室300中之壓力大於外部壓力)產生能夠與凹入狀收納基板保形接觸之凸起200基板表面。相反，負壓力產生能夠與凸起狀收納基板保形接觸之凹入表面210。對基板之局部彈性(例如，楊氏模數)之空間控制允許產生複雜彎曲幾何形狀。圖20之左下部畫面說明用於藉由引入氣體至腔室310或自腔室310移除氣體之注射器而控制外殼容積310中的壓力之一構件。圖式右側之影像為PDMS薄膜回應於正壓力之增加水準的不同彎曲。用於在彈性體基板上提供彎曲互連之方法及設備中之任一者可與用於轉印至彎曲基板的該等設備一起使用。

圖21中概述用於在彎曲表面上產生彎曲或上推互連之另一構件。抵靠成形之表面澆鑄薄彈性體膜以產生具有至少一彎曲部分之彈性體基板。基板能夠延伸以使表面變平，從而使得基板能夠與彎曲及平坦表面相符。將互連施加至平坦印模，且在解除延伸力之後，基板表面即鬆弛回至彎曲幾何形狀，從而在互連中產生應變，藉由互連中央部分之上推而適應該應變。

圖22中提供由圖20所示之設備造成的彎曲矽陣列之"二維"延伸之實例。在此實例中，互連包含採取柵格組態之複數個彎曲互連連接，其中互連由290 nm厚之Si製成。將

最初為平坦之彎曲矽陣列(左上部影像)置放入外殼中，且施加正壓力以使陣列擴展為氣泡或氣球組態(例如，彎曲表面)。最右側影像中展示最大擴展，且隨後移除正壓力。類似於對於平坦基板之單軸延伸的結果，此"彎曲"延伸為可逆的。在最大化與彎曲表面之保形接觸的擴展之任一階段，可藉由此項技術中已知之任何手段來將陣列轉移至彎曲表面。圖23展示藉由氣球印模而進行的至塗佈有黏著劑(彈性體基板或SU-8)之玻璃透鏡上之矽印刷之實例。透鏡可為凹入或凸起的。在此實例中， R 分別等於19.62 mm及9.33 mm。

實例1：半導體奈米纖帶中之受控彎曲結構連同在可延伸電子元件中之應用實例

對半導體奈米結構之組成、形狀、空間位置及/或幾何組態之控制對於此等材料之幾乎所有應用均為重要的。雖然存在用於界定奈米線及奈米纖帶之材料組成、直徑、長度及位置之方法，但存在相對較少用於控制其二維及三維(2D及3D)組態的方法。本文提供用於在奈米纖帶中形成原本難以產生的特定類別之3D形狀之機械策略。此實例涉及對用以提供對黏著位點之空間控制之微影圖案化表面化學反應與用以誘發受到良好控制的局部移位之支撐基板之彈性變形的組合使用。可藉由力學分析模型而定量地描述以此方式及此等組態而產生於GaAs與Si之奈米纖帶中的經精確設計之彎曲幾何形狀。作為一應用實例，特定結構提供至具有極高可延伸性水準(高達~100%)、可壓縮性水準(高

達~25%)及可撓曲性水準(具有低至~5 mm之曲率半徑)之電子元件的途徑。

對奈米纖帶及奈米線之2維及3維組態在其生長期間加以控制以避免諸如捲曲、環狀及分支布局之特定幾何形狀，或在其生長之後加以控制以(作為實例)藉由將此等元件耦接至受到應變之彈性體支撐物而產生正弦波狀結構或藉由使用成層系統中的內建殘餘應力而產生管狀(或螺旋)結構。具有波狀幾何形狀之半導體奈米纖帶受到關注，此部分因為其使得高效能可延伸電子元件系統能夠用於潛在應用，諸如球面彎曲焦平面陣列、智慧型橡膠外科手套及適型結構保健監視器。電子設備自身可延伸之此方法與達成使用剛性設備島狀物連同可延伸金屬互連之此等相同應用之替代方法不同且可能為對其之補充。先前描述之波狀奈米纖帶具有兩個主要劣勢：(i)其以由材料之模數及纖帶之厚度所界定之固定週期及振幅以幾乎不提供對波紋的幾何形狀或相位之控制之方式而自發形成，及(ii)受到由此製程所導致的非最佳波狀幾何形狀之限制，其可適應之最大應變在20%至30%之範圍內。此處引入之程序使用微影界定之表面黏著位點連同支撐基板之彈性變形來達成彎曲組態(藉由對其幾何形狀之確定性控制)。週期性或非週期性設計對於該等結構之大規模、有組織陣列中的個別奈米纖帶之任一選定集合為可能的。經設計以用於可延伸電子元件之專用幾何形狀致能高達接近150%之應變範圍(即使在諸如GaAs之脆性材料中)，此與力學分析模型一致且多達

先前報告之結果的十倍。

圖 24 展示此程序中之步驟。製造始於對遮罩之製備，該遮罩用於對聚二甲基矽氧烷 (PDMS) 之彈性體基板上的表面化學黏著位點進行圖案化。此過程涉及在稱作 UVO 遮罩的不常見類型之振幅光罩 (經由步驟 i 製造) 與 PDMS 保形接觸時經由該光罩而傳遞深紫外 (UV) 光 (240-260 nm)。UVO 遮罩佔有透明區域中起伏之凹入特徵，使得向 UV 之曝露在接近 PDMS 之表面處產生臭氧之圖案化區。臭氧將以 $-\text{CH}_3$ 及 $-\text{H}$ 端基支配之未改質疏水性表面轉換為以 $-\text{OH}$ 及 $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$ 官能基終止的高度極性及反應性表面 (亦即，活性表面)。未曝露之區保持未改質之表面化學 (亦即，非活性表面)。此處引入之程序涉及於較大單軸預加應變 (對於長度自 L 變為 $L + \Delta L$ ， $\varepsilon_{\text{pre}} = \Delta L / L$) 下在 PDMS 基板 (厚度為 ~ 4 mm) 上之曝露 (步驟 ii)。對於具有簡單週期性線條圖案之遮罩，吾人在步驟 (i) 中將圖 24A 之步驟 (iii) 中的活性條帶 (指示為標有 "活性表面" 之線條) 與非活性條帶之寬度 (例如，鄰近活性條帶之間的距離) 表示為 W_{act} 與 W_{in} 。活性區可強烈且不可逆地結合至在表面上具有曝露之 $-\text{OH}$ 或 $-\text{Si}-\text{O}$ 基團的其他材料。如下文所概括，利用此等圖案化黏著位點以在奈米纖帶中形成經清楚界定之 3D 幾何形狀。或者，藉由在互連與基板接觸之前對互連類似地進行圖案化而提供類似的黏著結合位點圖案。

在此實例中，奈米纖帶由單晶 Si 及 GaAs 組成。藉由使用先前描述之程序 (見 Khang 等人，Science 311, 208-212

(2006))而由絕緣體上矽(SOI)晶圓製備矽纖帶。GaAs纖帶包括藉由分子束磊晶法(molecular-beam epitaxy, MBE)在(100)SI-GaAs晶圓上形成的摻雜Si之n型GaAs(120 nm；載體濃度為 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)、半絕緣GaAs(SI-GaAs；150 nm)及AlAs(200 nm)之多層。藉由使用沿(0 1 1)結晶定向而光阻圖案化之線條作為蝕刻遮罩而在 H_3PO_4 及 H_2O_2 之水性蝕刻劑中化學蝕刻磊晶層，從而界定纖帶。移除光阻劑且接著將晶圓浸泡於HF之乙醇溶液(乙醇與49%之水性HF的體積為2:1)中移除AlAs層，藉此釋放具有由光阻劑判定之寬度(對於圖24D中之實例為100 μm)的GaAs(n-GaAs/SI-GaAs)之纖帶。乙醇向HF溶液之添加減小易碎纖帶歸因於乾燥期間之毛細管力之作用而破裂的機率。較低表面張力(與水相比)亦最小化GaAs纖帶之空間布局中的乾燥誘發之無序。在最後步驟中，沈積較薄 SiO_2 層(~30 nm)以提供必要-Si-OH表面化學以供與PDMS之活性區域結合。

抵靠經UVO處理、預延伸之PDMS基板(平行於預加應變之方向而定向之纖帶)而層壓經處理之SOI或GaAs晶圓，將其在烘箱中於90°C下烘焙數分鐘，且移除晶圓，從而將所有纖帶轉移至PDMS的表面(步驟iv)。加熱促進Si纖帶上之原生 SiO_2 層或GaAs纖帶上之沈積的 SiO_2 層與PDMS之主動區之間的保形接觸及該兩者之間的強矽氧烷鍵(亦即，-O-Si-O-)之形成。相對較弱之凡得瓦爾力(Waals force)使纖帶結合至PDMS之非活性表面區域。使PDMS中之應變鬆弛經由纖帶與PDMS之非活性區域的實體分離而產生彎曲(步

驟v)。歸因於強化學鍵結，織帶保持在活性區域中繫栓至PDMS。所得3D織帶幾何形狀(亦即，彎曲之空間變化的圖案)視預加應變之量值及表面活性之圖案(例如， W_{in} 及 W_{act} 之形狀及尺寸)而定。(可經由織帶上之圖案化結合位點而達成類似結果)。對於簡單線條圖案之情況， W_{in} 及預加應變判定彎曲之寬度及振幅。當 $W_{act} > 100 \mu\text{m}$ 時，歸因於產生"波狀"矽之類型的機械不穩定性，在相同織帶中亦形成具有比彎曲小得多的波長及振幅之正弦波(見圖25，以不同 W_{act} 形成之樣本之影像)。作為製造之最後步驟，可藉由澆鑄並固化液態預聚物而將3D織帶結構囊封於PDMS中(見圖24步驟vi)。歸因於液體之低黏度及低表面能，其流動且填充形成於織帶與基板之間的間隙(見圖26)。

圖24D展示PDMS上之彎曲GaAs織帶之斜視掃描電子顯微鏡(scanning electron microscope, SEM)影像，其中 $\varepsilon_{pre} = 60\%$ 且 $W_{act} = 10 \mu\text{m}$ 且 $W_{in} = 400 \mu\text{m}$ 。該影像顯示對於陣列中之所有織帶具有共有幾何形狀及空間相干相位之均勻週期性彎曲。將錨固點適當地對齊至微影界定之黏著位點。插圖展示結合區域之SEM影像；寬度為 $\sim 10 \mu\text{m}$ ，其與 W_{act} 相一致。該等影像亦顯示PDMS之表面為平坦的，即使在結合位點處亦如此。與先前報告之強耦接之波狀結構大不相同的此行為提示，對於此處描述之情況，PDMS誘發移位，但並不密切涉及於彎曲製程中(亦即，其模數不影響織帶之幾何形狀)。在此意義上，PDMS表示用於經由施加於黏著位點處之力而控制織帶的柔軟、非破壞性工具。

圖 27A 展示以不同 ε_{pre} 形成於 PDMS 上之彎曲織帶的側視光學顯微相片 ($W_{act}=10\ \mu\text{m}$ 且 $W_{in}=190\ \mu\text{m}$)。彎曲之高度(例如, "振幅")隨著 ε_{pre} 而增加。非活性區域中之織帶在較低 ε_{pre} 處未充分分離(見以 $\varepsilon_{pre}=11.3\%$ 及 25.5% 而形成之樣本)。在較高 ε_{pre} 處, 織帶(厚度 h)與 PDMS 分離以形成具有由下式特徵化之豎直移位輪廓之彎曲:

$$y = \frac{1}{2} A_1^0 \left[1 + \cos\left(\frac{\pi}{L_1} x\right) \right]$$

其中:

$$A_1^0 = \frac{4}{\pi} \sqrt{L_1 L_2 \left(\varepsilon_{pre} - \frac{h^2 \pi^2}{12 L_1^2} \right)}$$

$$L_1 = \frac{W_{in}}{2 * (1 + \varepsilon_{pre})}$$

$$L_2 = L_1 + \frac{W_{act}}{2}。$$

如藉由對均勻薄層中所形成之彎曲的非線性分析所判定, 織帶中之最大拉伸應變近似為

$$\varepsilon_{peak} = \kappa \left| \frac{h}{2} = y'' \right|_{\max} \frac{h}{2} = \frac{h}{4} A_1^0 \left(\frac{\pi}{L_1} \right)^2。$$

彎曲之寬度為 $2L_1$ 且週期為 $2L_2$ 。因為對於 $h < 1\ \mu\text{m}$, $h^2 \pi^2 / (12 L_1^2)$ 遠小於 ε_{pre} (在此報告中亦即 $> 10\%$), 所以振幅獨立於織帶之機械特性(例如, 厚度、化學組成、楊氏模數等等), 且主要由黏著位點之布局及預加應變所判定。此結論提示如下方法之一般適用性: 由任何材料製成之織

帶均將形成類似彎曲幾何形狀。此預測與藉由此處所使用之Si與GaAs之織帶而獲得的結果相一致。在圖27A中繪製為虛線之對於33.7%及56.0%之預加應變而計算所得的輪廓與在GaAs織帶中的觀測結果良好地符合。另外，除了在低 ε_{pre} 處(表1及表2)，圖27A所示之彎曲之參數(包括週期、寬度及振幅)與分析計算相一致。此研究之一引起關注之結果在於織帶中之最大拉伸應變較小(例如， $\sim 1.2\%$)，即使對於較大 ε_{pre} (例如，56.0%)亦如此。如隨後所論述，此定比致能可延伸性，即使對於諸如GaAs之脆性材料的情況亦如此。

微影界定之黏著位點可具有比與圖24中之結構相關聯之簡單格柵或柵格圖案複雜的幾何形狀。舉例而言，可在個別織帶中形成具有不同寬度及振幅之彎曲。作為實例，圖27B展示彎曲Si織帶(寬度及厚度分別為50 μm 及290 nm)之SEM影像，該織帶以50%之預加應變及以 $W_{act}=15\text{ }\mu\text{m}$ 且 W_{in} 沿織帶的長度等於350、300、250、250、300及350 μm 為特徵之黏著位點而形成。該影像清楚地展示織帶中之每一者中的鄰近彎曲之寬度及振幅之變化。彎曲織帶亦可以對於不同織帶之不同相位而形成。圖27C呈現以彎曲中隨垂直於織帶之長度的距離而線性變化之相位來設計的Si系統之實例。用於此樣本之UVO遮罩具有分別為15 μm 及250 μm 之 W_{act} 及 W_{in} 。PDMS印模上之活性條帶與Si織帶之間的角度為30°。歸因於對黏著位點之簡單微影控制而可易於達成許多其他可能性，且一些可能性展示於(例如)圖13至

圖 17 中。

具有 $\varepsilon_{pre}=60\%$ 、 $W_{act}=10\ \mu m$ 及不同 W_{in} 的 PDMS 上之彎曲 GaAs 織帶之簡單實例(如圖 27D 中所示)說明對於可延伸電子元件中的應用為重要之態樣。與對力學之分析解良好符合之輪廓展示在 $W_{in}=100\ \mu m$ (及更小)時，歸因於 GaAs 中之破裂而導致的失效。失效係由超過 GaAs 之屈服點($\sim 2\%$)的拉伸應變(在此情況下為 $\sim 2.5\%$)所導致。因此可藉由選擇與 ε_{pre} 成比例之 $W_{in}(\gg W_{act})$ 來達成對延伸及壓縮之強健性的最佳組態。在此情形中，可適應高達及大於 100% 之預加應變。吾人藉由向 PDMS 支撐物施加力而直接論證此類型之可延伸性。織帶之區段的端至端距離($L_{projected}$)之改變提供根據下式而量化可延伸性及可壓縮性之手段：

$$\left| \frac{L_{projected}^{max} - L_{projected}^0}{L_{projected}^0} \right| * 100\% ,$$

其中 $L_{projected}^{max}$ 表示斷裂之前的最大/最小長度，且 $L_{projected}^0$ 為鬆弛狀態下之長度。延伸及壓縮分別對應於大於及小於 $L_{projected}^0$ 之 $L_{projected}^{max}$ 。 $W_{act}=10\ \mu m$ 且 $W_{in}=400\ \mu m$ 且 $\varepsilon_{pre}=60\%$ 的 PDMS 上之彎曲織帶顯示出 60% 之可延伸性(亦即 ε_{pre})及高達 30% 之可壓縮性。將織帶嵌入於 PDMS 中在機械上保護結構，且亦產生持續可逆回應，但在力學上存在微小改變。特定言之，可延伸性及可壓縮性分別減小至 $\sim 51.4\%$ (圖 28A)與 $\sim 18.7\%$ (圖 28B)。織帶頂部之 PDMS 基質部分歸因於下伏 PDMS 的固化誘發之收縮而使彎曲之峰微微變平。小週期波紋在較大壓縮應變下歸因於產生先前所述之波狀織帶結

構之類型的自發力學而形成於此等區域中。如圖28B所說明，機械失效傾向於開始於此等區中，由此減小可壓縮性。 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 且 $W_{in}=300\text{ }\mu\text{m}$ 之彎曲結構避免此類型之行為。雖然該等實例顯示出比圖28A所示之實例稍低的可延伸性，但短週期波紋之缺少將可壓縮性增加至~26%。總體而言，形成於具有圖案化表面化學黏著位點之預延伸之PDMS基板上的具有彎曲之單晶GaAs奈米纖帶顯示出高於50%之可延伸性及大於25%之可壓縮性，此對應於接近100%之滿標度應變範圍。此等數字藉由增加 ϵ_{pre} 及 W_{in} 且藉由使用具有比PDMS高之伸長率的基板材料而得到進一步改良。對於更加精密之系統，亦可重複此等製造程序來產生具有多個彎曲纖帶之層的樣本(見圖29)。

此較大可延伸性/可壓縮性之直接結果為極大程度之機械可撓曲性。圖30A至圖30C呈現說明此特徵之撓曲組態的光學顯微相片。分別將PDMS基板(厚度為~4 mm)撓曲為凹入(~5.7 mm之半徑)、平坦及凸起(~6.1 mm之半徑)的彎曲。該等影像說明輪廓如何改變以適應撓曲誘發之表面應變(對於此等情況為~20%至25%)。實際上，形狀類似於在壓縮(~20%)及張力(~20%)中所獲得之形狀。嵌入之系統歸因於中性機械平面效應而顯示出甚至更高水準之可撓曲性。當頂部與底部PDMS層具有類似厚度時，在撓曲期間不存在彎曲形狀上的改變(圖30D)。

為了論證功能電子設備中之此等機械特性，吾人使用具有類似於圖30所示之輪廓的輪廓之彎曲GaAs纖帶，藉由將

較薄金電極沈積至織帶之SI-GaAs側上以進行肖特基接觸 (Schottky contact)而建立金屬-半導體-金屬光偵測器(MSM PD)。圖31A展示MSM PD在延伸~50%之前及之後的幾何形狀及等效電路及俯視光學顯微相片。在無光之情況下，幾乎無電流流過PD；電流隨著紅外光束(波長為~850 nm)之增加的照射而增大(圖31B)。電流/電壓(I-V)之不對稱特徵可歸因於接觸點之電特性的差異。圖31C(延伸)及圖31D(壓縮)展示在不同程度之延伸及壓縮所量測之I-V。電流在PD延伸高達44.4%時增大，且接著隨著進一步延伸而減小。因此光源之每單位面積的強度為恆定的，所以電流隨延伸之增大可歸因於彎曲GaAs織帶的投影面積(稱作有效面積， S_{eff})隨織帶變平之增大。使PD進一步延伸可能誘發GaAs織帶之表面上及/或晶格中的缺陷，其導致電流之減小且最終在斷裂時導致斷路。類似地，壓縮使 S_{eff} 減小且因此使電流減小(圖31D)。此等結果指示，嵌入於PDMS基質中之彎曲GaAs織帶提供對於諸如耐磨監視器、彎曲成像陣列及其他設備之各種應用為有用的充分可延伸/可壓縮類型之光感應器。

總之，此實例指示，具有以微影方式界定之黏著位點之柔軟彈性體作為用於在半導體奈米織帶中形成特定類型之3維組態的工具為有用的。可延伸電子元件提供此等類型之結構的許多可能應用領域之一實例。簡單PD設備論證一些能力。對結構之高水準控制及將高溫處理步驟(例如，歐姆接觸之形成)與彎曲製程及PDMS分離之能力指示較為

複雜之設備(例如，電晶體及較小電路薄片)為可能的。鄰近織帶中之彎曲的受到良好控制之相位提供電互連多個元件之機會。又，雖然此處報告之實驗使用GaAs與Si奈米織帶，但其他材料(例如，GaN、InP及其他半導體)及其他結構(例如，奈米線、奈米薄膜)與此方法相容。

GaAs織帶之製造：具有定製磊晶層之GaAs晶圓(細節描述於本文中)係購自IQE Inc., Bethlehem, PA。光微影及濕式化學蝕刻產生GaAs織帶。以5000 rpm之速度將AZ光阻劑(例如AZ 5214)旋轉澆鑄於GaAs晶圓上歷時30秒，且接著於100℃下軟烘焙1分鐘。經由具有以沿GaAs之(011)結晶方向而定向之圖案化線的光罩之曝露繼之以顯影在光阻劑中產生線條圖案。溫和O₂電漿(亦即，除渣製程)移除殘餘光阻劑。GaAs晶圓接著在蝕刻劑(4 mL H₃PO₄(85重量%)、52 mL H₂O₂(30重量%)及48 mL去離子水)中經各向異性蝕刻1分鐘，在冰水浴中經冷卻。以於乙醇中稀釋之HF溶液(Fisher[®] Chemicals)(在體積上為1:2)來溶解AlAs層。在通風櫃中使具有在母晶圓上之經釋放織帶的樣本乾燥。以藉由電子束蒸鍍沈積之30 nm的SiO₂來塗佈經乾燥之樣本。

Si織帶之製造：由絕緣體上矽(SOI)晶圓(Soitec, Inc.，頂部矽290 nm，內埋氧化物400 nm，p型)來製造矽織帶。使用AZ 5214光阻劑藉由習知光微影法對晶圓進行圖案化，且藉由SF₆電漿(PlasmaTherm RIE，SF₆ 40 sccm，50毫托，100 W)對其進行蝕刻。在以丙酮將光阻劑洗淨之

後，接著在HF(49%)中蝕刻內埋氧化物層。

UVO遮罩之製造：於食人魚溶液(piranha solution)中清洗熔融石英載片(於60℃)15分鐘且以充足的水對其進行徹底沖洗。藉由氮氣吹掃來乾燥經清洗之載片，且將其置放於電子束蒸鍍器之腔室中以藉由5 nm之Ti(作為黏著層)及100 nm之Au(對於UV光之遮罩層)的連續層而塗佈。以3000 rpm之速度將負性光阻劑(亦即，SU8 5)旋轉澆鑄於載片上歷時30秒來產生~5 μm厚之膜。軟烘焙、曝露於UV光、後烘焙及顯影在光阻劑中產生圖案。溫和O₂電漿(亦即，除渣製程)移除殘餘光阻劑。光阻劑充當遮罩以分別藉由金蝕刻劑(亦即，I₂與KI之水性溶液)及鈦蝕刻劑(亦即，HCl之稀釋溶液)來蝕刻Au與Ti。

PDMS印模之製造：藉由將預聚物(A:B=1:10，Sylgard 184，Dow Corning)傾注至皮氏培養皿中繼之以於65℃下烘焙4小時來製備具有~4 mm之厚度的PDMS基板。自所得固化物件切割具有合適大小及矩形形狀之厚片且接著以異丙醇對其進行沖洗且藉由氮氣吹掃使其乾燥。使用特別設計之台來將PDMS機械延伸至所要程度的應變。經由置放為與PDMS接觸之UVO遮罩使此等經延伸之基板受到短波長UV光(低壓汞燈，BHK，自240至260 nm為173 μW/cm²)的照射歷時5分鐘產生經圖案化之表面化學。

彎曲GaAs纖帶之形成及嵌入：相對於具有經圖案化之表面化學的延伸之PDMS層壓具有塗佈有SiO₂之經釋放之纖帶的GaAs晶圓。在烘箱中於90℃下烘焙5分鐘，在空氣

中冷卻至室溫且接著緩慢鬆弛PDMS中之應變沿每一纖帶產生彎曲。嵌入彎曲纖帶涉及泛光曝露於UV光下5分鐘且接著將液態PDMS預聚物澆鑄至~4 mm之厚度。將樣本在烘箱中於65°C下固化4小時或在室溫下固化36小時使得預聚物固化來使彎曲纖帶嵌入於PDMS之固體基質中。

彎曲纖帶之表徵：藉由使樣本傾斜~90°(對於非嵌入之樣本)或~30°(對於嵌入之樣本)而以光學顯微鏡對纖帶進行成像。在以較薄金層(厚度為~5 nm)塗佈樣本之後將SEM影像記錄於Philips XL30場發射掃描電子顯微鏡上。使用用於預延伸PDMS印模之同一台來延伸及壓縮所得樣本。

SMS PD之製造及表徵：PD之製造始於採取圖24B之底部圖框中所示之組態的樣本。輕柔地將~0.8 mm寬之聚對苯二甲酸乙二酯(PET)薄片的條帶置放於PDMS上，其中條帶之縱軸與纖帶之縱軸垂直。此條帶充當對於30 nm厚之金膜之電子束蒸鍍(以形成肖特基電極)的蔽蔭遮罩。移除PET條帶且鬆弛預延伸之PDMS印模形成建有彎曲GaAs纖帶之SMS PD。將液態PDMS預聚物澆鑄至纖帶之無電極的區域上，且接著於烘箱中固化。金電極延伸越過頂部PDMS以致能藉由半導體參數分析器而進行之探測。(Agilent 4155C)。在對光回應之量測中，藉由使用用於延伸及壓縮之機械台來控制PD。IR LED源(具有850 nm之波長)提供照射。

實例2：轉印：

吾人之技術方法使用體現於先前描述之基於平坦印模的

印刷方法中之某些思想。雖然此等基本技術提供有前途之起點，但如下文所述，必須引入許多根本上的新特徵來滿足用於成像之半球陣列偵測器 (Hemispherical Array Detector for Imaging, HARDI) 系統之挑戰。

圖 32 及圖 33 說明與向彎曲表面之轉印相關之總策略。步驟之第一集合 (圖 32) 涉及經設計以將互連之 Si CMOS "小晶片 (chiplet)" 自晶圓之平坦表面起離且接著將幾何形狀變換為半球形狀之較薄球面彎曲彈性體印模的製造及控制。藉由抵靠經選擇具有所要曲率半徑之高品質光學元件 (亦即，凸透鏡與凹透鏡之配對) 澆鑄並固化液態預聚物以獲得諸如聚二甲基矽氧烷 (PDMS) 之彈性體而形成用於此製程之印模。印模具有模製之圓形輪緣。藉由使此輪緣上之模製槽 (圖 32 中之虛線圓) 配合至適當大小之剛性圓形固持環而徑向延伸此元件將此球形印模變換為延伸之平坦薄片。使此延伸之印模與支撐具有較薄互連之預成型且經底切蝕刻之 Si CMOS "小晶片" 的母晶圓接觸且接著剝離該印模以此等互連之 "小晶片" 對此元件 "塗墨"。小晶片與柔軟彈性體元件之間的凡得瓦爾相互作用 (Van der Waals interaction) 對此製程提供充分黏著。

移除固持環使得 PDMS 鬆弛回其初始半球形狀，藉此實現小晶片陣列的平坦至球形之變換。此變換誘發印模之表面處的壓縮應變。藉由互連之局部分層及提昇而在 CMOS 小晶片陣列中適應此等應變 (圖 32 之左下部)。此等 "上推" 互連以避免對小晶片之損害及其電特性之有害的應變誘發

之改變之方式來吸收應變。將小晶片中之應變保持於~0.1%以下實現此等兩個目標。互連所需之空間限制CMOS小晶片之最大填充因數。然而，光偵測器消耗幾乎全部像素面積，由此提供達到80%之填充因數目標的簡單途徑。

在步驟之第二集合(圖33)中，使用經"塗墨"之半球印模來將此等元件轉印至具有匹配形狀之空腔的最終設備基板(例如，在此實例中為具有匹配半球狀空腔之玻璃基板)上。此轉移製程使用諸如光可固化BCB(Dow Chemical)或聚胺基甲酸酯(Norland Optical Adhesive)之紫外(UV)固化光聚合物作為黏著劑。將此等材料以薄(數十微米厚)液態膜之形式塗覆至設備基板。在與印模接觸之後，此液態層即流動以符合與小晶片及上推互連相關聯之起伏結構。穿過透明基板之UV光使光聚合物固化且將其變換為固體形式以在移除印模之後即產生平滑、平面化之頂部表面。用以形成功能系統之最終整合涉及電極及光偵測器材料之沈積及圖案化，及匯流排線至外部控制電路之微影界定。

圖32及圖33之方法具有若干顯著特徵。第一，其利用最新平面電子技術來致能對半球基板之可靠、節省成本及高效能的操作。特定言之，小晶片由以0.13 μm 之設計規則加以處理之矽電晶體之集合組成來得到HARDI系統之局部像素級處理能力。使用習知處理連同絕緣體上矽晶圓以形成此等設備。內埋氧化物提供犧牲層(藉由HF而進行底切蝕刻)來製備用於印刷之小晶片。互連由窄且薄(~100 nm)

之金屬線組成。

第二特徵在於該方法使用彈性體元件及機械設計以致能平面向半球之受到良好控制的變換。轉移印模及綜合機械模型化中之可逆線性力學如隨後所概括而實現此控制。第三個有吸引力之態樣在於，轉移製程及策略之用以控制黏著之某些基本組件在平面應用中已得到論證。實際上，已經設計以用於彼等平面印刷應用之台可經調適以用於圖32及圖33之製程。圖34展示適用於此製程中的具有整合式視覺系統及氣壓致動器之自製印刷器。

使用此等類型之印刷器系統來論證圖32及圖33之製程的若干態樣。圖35展示以單晶矽島狀物之陣列而"塗墨"之半球印模之表面的掃描電子顯微相片影像，該等單晶矽島狀物在正方陣列中藉由重摻雜之矽纖帶而互連。圖36展示光學影像。在平面至球形之變換期間，此等纖帶互連以圖32中所描繪之方式上推。此等類型之互連之關鍵態樣在於，當與完全成形之小晶片的轉移組合時，其減小對於高解析度彎曲表面微影或直接對半球進行之其他形式之處理的需要。

除了材料及總處理策略以外，執行對半球印模、上推互連及與剛性設備島狀物之相互作用的彈性機械回應之全計算模型化。此等計算以促進設計控制及最佳化之水準顯示製程之物理現象。基於線性彈性板理論之簡單估計暗示與圖32之製程相關聯的應變水準對於2 mm厚之印模及半徑為1 cm之球面可達到10%或更高。因此，為了可靠設計控

制，對於高達此值之兩倍(亦即，~20%)的應變在線性彈性狀態中操作印模為必要的。圖37展示PDMS之若干變體之實驗應力/應變曲線，關於該等變體，吾人在基於塊狀平坦印模之印刷的水準上具有經驗。184-PDMS看來似乎提供良好初始材料，因為其提供高達~40%之應變的高線性及彈性回應。

諸如此等之機械量測連同關於小晶片及纖帶上推互連之模數及幾何形狀的文獻值提供對於模型化為必要之資訊。採用兩種計算方法。第一者為滿標度有限元模型化(finite element modeling, FEM)，在其中分析平坦基板上之設備及互連幾何形狀(例如，大小、間距、多層)的細節。在分析中直接考慮不同材料(例如，印模、矽、互連)。外加側向壓力以使印模及電路變形為所要球形形狀。有限元分析給出應變分布(尤其是設備及互連中之最大應變)及經變換之設備之間的不均勻間距。該方法之優勢在於其俘獲設備幾何形狀及材料之所有細節，且因此可用以探索轉印製程之不同設計的效果以減小最大應變及不均勻性。然而，此方法為計算密集的且因此耗費時間，因為其涉及較廣範圍之長度標度及對印模上之大量結構設備之模型化。

第二種方法為設備(小晶片)之單胞模型，該模型分析該等設備在負載情況下之機械效能。每一設備藉由一單胞表示，且其在機械負載下之回應(例如，撓曲及張力)經由有限元方法而得到徹底研究。接著藉由以互連連接之單胞來替代每一設備。接著將此單胞模型併入至有限元分析中以

替代對設備及互連之詳細模型化。此外，在遠離球面之邊緣處，應變相對均勻以使得許多單胞可經整合且其效能可由粗略水準之模型表示。在接近球面邊緣處，應變高度不均勻，使得對設備之詳細模型化仍為必要的。該方法之優勢在於其顯著減少計算量。使用第一種方法中之滿標度有限元模型化來驗證此單胞模型。一旦經驗證，單胞模型即提供強有力之設計工具，因為其適用於對設備、互連及其間距的不同設計之快速探索。

圖38呈現關於如圖32所概括，將半球印模延伸為平坦幾何形狀(且將其鬆弛回至其半球形狀)的初步FEM結果。頂部圖框展示具有如同圖32中所示意性說明之幾何形狀的幾何形狀之半球印模之橫截面圖。此等結果展示延伸薄膜之應變中的如由其不均勻厚度所顯見之微小空間不均勻性。經由適當選擇藉由澆鑄及固化而形成印模時所抵靠之結構來對印模之厚度輪廓進行涉及可消除此等不均勻性。然而，值得注意的是，一些不均勻應變為可接受的，因為(i)上推互連固有地容許扭曲，且(ii)小晶片無需在每一像素位置處完全居中；較大光偵測器將以均勻背面電極填充像素區，該背面電極可獨立於小晶片在像素區內的位置而建立至其之電接觸。

模型化亦可判定Si CMOS小晶片中應變之水準。系統應經設計以將此等小晶片應變保持於~0.1%至0.2%以下來避免電特性之改變及(可能地)歸因於斷裂或分層之機械失效。此模型化促進對印模及處理條件之設計以避免小晶片

曝露於在此範圍以上的應變。

實例3：雙軸可延伸"波狀"矽奈米薄膜

此實例引入雙軸可延伸形式之單晶矽，其由彈性體支撐物上之二維彎曲或"波狀"矽奈米薄膜組成。描述用於此等結構之製造程序，且呈現該等結構之幾何形狀之各種態樣及對於沿各個方向之單軸及雙軸應變的回應。此等系統之力學分析模型提供用於定量理解該等系統之行為之構架。此等類別之材料提供得到具有充分的二維可延伸性之高效能電子元件之途徑。

提供機械可撓曲性之電子元件對於資訊顯示器、X射線成像光伏打設備及其他系統中之應用為所關注的。可逆可延伸性為一不同且更具技術挑戰性之機械特徵，其將致能無法藉由諸如智慧型外科手套、電子眼攝影機及個人保健監視器之僅可撓曲之電子元件實現的設備可能性。在得到此類型之電子元件之一方法中，可延伸導線使剛性設備島狀物互連以對於不可延伸之設備組件提供電路級可延伸性。在替代策略中，某些結構形式之薄單晶半導體及其他電子材料允許設備自身之可延伸性。近來之論證涉及在矽及砷化鎵之奈米纖帶(厚度在數十與數百奈米之間且寬度在微米範圍內)中使用彎曲一維"波狀"幾何形狀以在金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)、金屬半導體場效電晶體(MESFET)、pn接合二極體及肖特基電極中達成單軸可延伸性。此實例展示類似材料之奈米薄膜可成形為二維(2D)波狀幾何形狀以提供充分的2D可延伸性。描述該等系

統之製造程序連同對該等系統之機械回應的詳細實驗表徵及分析模型化。

圖 39 示意性地說明用於在彈性體支撐物上形成二維可延伸 Si 奈米薄膜之步驟。對於此實例，由絕緣體上矽 (SOI) 晶圓 (Soitec, Inc., p 型) 製造此等薄膜，其始於藉由以光微影界定光阻劑之合適圖案且接著以反應性離子蝕刻 (Plasma Therm RIE, SF_6 40 sccm, 50 毫托, 100 W) 移除曝露之矽而形成頂部矽中之孔洞 ($\sim 2.5 \mu\text{m}$ 之直徑及 $\sim 25 \mu\text{m}$ 之間距) 之正方陣列。此相同步驟界定薄膜之整體橫向尺寸，該尺寸對於此處報告之樣本處於 3-5 平方毫米之範圍內。厚度處於 55 nm 與 320 nm 之間。將經蝕刻之樣本浸沒於濃縮氫氟酸 (HF 49%) 中移除 SiO_2 內埋層 (145 至 1000 nm 厚)；在丙酮中清洗移除光阻劑。抵靠經研磨之矽晶圓澆鑄並固化聚二甲基矽氧烷 (PDMS) 之預聚物產生平坦彈性體基板 ($\sim 4 \text{ mm}$ 厚)。曝露於藉由強烈紫外光 (240-260 nm) 形成之臭氧環境中 5 分鐘將疏水性 PDMS 表面 ($-\text{CH}_3$ 及 $-\text{H}$ 端基) 轉換為親水性狀態 ($-\text{OH}$ 及 $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 端基)。在對流烘箱中於 70 至 180°C 下暫時加熱該活性 PDMS 基板誘發受控程度之各向同性熱膨脹。使此元件與經處理之 SOI 晶圓接觸且接著再次將其剝離將整個奈米薄膜轉移至 PDMS。對流烘箱中歷時數分鐘之繼續加熱促進薄膜與 PDMS 之間強黏著結合之形成。在最後步驟中，將奈米薄膜/PDMS 結構冷卻至室溫 (約 25°C) 以釋放熱誘發之預加應變 ($\Delta L/L$)。此製程導致 Si 奈米薄膜及 PDMS 之附近表面區域中的二維 (2D) 波狀結構之起伏之

自發形成。此等結構在一維週期性波起主要作用之接近邊緣處、通常觀測到二維魚骨狀布局之內部區域中及無序魚骨狀結構經常發生的接近中央處顯示出不同狀態。魚骨狀區域以波紋中鄰近峰之間的距離(吾人稱作短波長 λ)、波紋之振幅 A_1 (圖1中未展示)及與魚骨狀結構中之鄰近"凹凸"之間的間隔相關聯之較長距離 $2\pi/k_2$ (沿 x_2 方向)(吾人稱作長波長)為特徵。其他特徵長度為"凹凸"波長 $2\pi/k_1$ (沿 x_1 方向, 與長波長方向 x_2 垂直)、凹凸之振幅 A_2 、凹凸角 θ 。圖39之底部圖框示意性地說明此等特徵。

圖40之部分a-f展示對於具有100 nm之厚度(約 $4\times 4\text{ mm}^2$ 之橫向尺寸)及~3.8%之熱預加應變(藉由加熱至 150°C 而界定)的奈米薄膜, 於魚骨狀波紋之形成期間之不同階段收集的光學顯微相片。此等影像指示兩階段之結構形成, 該等階段中之第一者涉及在較大區上起主要作用之一維波紋繼之以撓曲此等波紋結構以最終在完全冷卻時形成緊密魚骨狀布局(圖40 d-f)。圖40h展示兩個特徵波長之時間演進。短波長傾向於隨著冷卻導致矽上的逐漸較大之壓縮應變(歸因於PDMS之相對較大之熱收縮)而減小。特定言之, 此值自初始階段中之17至18 μm 降至魚骨狀結構變得突出時之~14.7 μm , 且最終在完全冷卻之狀態下降至~12.7 μm 。此波長在較大區上為均勻的(~5%之變化)。相反地, 如自圖40g中之影像所顯而易見的, 與魚骨狀布局相關聯之長波長顯示出寬廣範圍之值。在跨越此樣本之~100個點處之量測得到值之分布, 其概述於圖40g之直方圖中。可

由面外位移 $w=A_1\cos[k_1x_1+k_1A_2\cos(k_2x_2)]$ 表示魚骨狀結構(圖49)。此處，係數：波紋之振幅 A_1 、長波長 $2\pi/k_2$ 、凹凸波長 $2\pi/k_1$ 及凹凸之振幅 A_2 藉由對特定薄膜厚度、膜的機械特性及基板之分析而判定。短波長 λ 為 $(2\pi/k_1)\sin(\theta/2)$ 。模型化使用如由量測而得之等同長度及波狀結構之週期而判定的Si應變替代熱預加應變來作為施加之預加應變(圖50)。使Si變形之實際應變可能歸因於Si於PDMS上之負載效應而通常稍小於估計之熱預加應變。舉例而言，Si應變在3.8%之熱預加應變下為2.4%。對於該位移 w ，Si膜中之應力、應變及位移場可在 A_1 、 k_1 、 A_2 及 k_2 之方面自馮卡門板理論(Von Karman plate theory)獲得。自3D彈性理論獲得PDMS基板中之場。最小化由Si膜中之薄膜能量及撓曲能量及PDMS基板中之彈性能量組成之總能量給出 A_1 、 k_1 、 A_2 及 k_2 。Si及PDMS之楊氏模數及柏松比為 $E_{Si}=130$ GPa、 $\nu_{Si}=0.27$ 、 $E_{PDMS}=1.8$ MPa且 $\nu_{PDMS}=0.5$ 。實驗與模型均給出凹凸角 θ 為約 90° 。理論給出之短波長在2.4%之雙軸預加應變下為 $12.4\text{ }\mu\text{m}$ ，此與以上之實驗結果良好地符合。長波長 $2\pi/k_2$ 之較大變化亦由理論計算所預測到，其為 30 至 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。

圖41呈現類似於圖40之完全冷卻狀態所說明之結構的結構之原子力顯微鏡(atomic force microscope, AFM)及掃描電子顯微鏡(SEM)影像。此等影像清楚地展示，魚骨狀圖案以鋸齒狀結構為特徵，該等結構界定兩個特徵性方向，即使壓縮應變完全為各向同性亦如此。魚骨狀結構表示最

小彈性能量組態，其減小系統中之總平面內應力且減輕兩個方向上之雙軸壓縮。因此，此幾何形狀相較於"棋盤形"及1D波紋布局而言在較大區上為較佳的，因為魚骨狀模式為此等三個模式中在所有方向上使平面內應力鬆弛而不誘發顯著延伸能量之唯一一者。僅在緊接凹凸處誘發顯著延伸。1D模式僅在一個方向上使預加應力降低。棋盤形模式在所有方向上降低應力，但其產生伴隨撓曲之顯著延伸能量。

自AFM影像提取之兩個線切圖指示沿凹凸方向(輪廓i)及垂直於波紋(輪廓ii)的週期性(但僅近似正弦)之起伏輪廓。波紋之由輪廓ii判定之 λ 及 A_1 分別為 $12.8\ \mu\text{m}$ 及 $0.66\ \mu\text{m}$ 。由理論分析給出之為 $12.4\ \mu\text{m}$ 之 λ 類似於實驗資料；然而，得自理論分析的 A_1 為 $0.90\ \mu\text{m}$ ，其為稍高於實驗結果之值。SEM影像清楚地展示如由在波紋之凸起及凹入區域中接近矽中之小孔洞的樣本之狀態所顯見之薄膜與PDMS之間的密切結合。此等影像亦指示波紋結構與此等孔洞之位置完全不相關，因為 $2.5\ \mu\text{m}$ 之孔洞大小遠小於吾人之實驗中的變形模式之特徵性波長。對於波狀結構之幾何形狀對矽之厚度之依賴性的研究可提供對物理現象之額外理解且進一步驗證力學模型。圖42展示一些結果，包括對於類似熱應變以不同厚度形成於薄膜中之波紋結構的光學顯微相片以及波長與振幅。對於 $100\ \text{nm}$ 之厚度，波紋之 λ 及 A_1 分別為 $12.6(\pm 0.37)\ \mu\text{m}$ 及 $0.64(\pm 0.07)\ \mu\text{m}$ ，且對於 $320\ \text{nm}$ 之厚度，其為 $45.1(\pm 1.06)\ \mu\text{m}$ 及 $1.95(\pm 0.18)\ \mu\text{m}$ 。此等值相當良好地

對應於理論計算，該等理論計算得到 λ 及 A_1 對於100 nm之情況為12.4 μm 及0.90 μm 且對於320 nm之情況分別為45.1 μm 及3.29 μm 。

此等波狀薄膜提供各個平面內方向上之對於應變的真實可延伸性，此與藉由先前描述之織帶幾何形狀所提供之一維可延伸性形成對比。為了研究此態樣，吾人藉由使用經校準機械台及以熱誘發之3.8%的預加應變而製備之2D可延伸薄膜執行沿不同方向之單軸抗張延伸測試。圖43提供一些影像。在情況i中，沿長波紋之方向施加之拉伸應變(ϵ_{st})使得魚骨狀結構"展開"(ϵ_{st} 為1.8%)，逐漸導致完全延伸狀態(ϵ_{st} 為3.8%)下的1D波狀幾何形狀。此延伸藉由柏松效應而在正交方向上誘發具有粗略等於拉伸應變之一半的振幅之壓縮應變。可藉由在此方向上壓縮波狀結構而適應此壓縮應變。在解除所施加之拉伸應變之後，原始魚骨狀波紋即恢復而顯示出與最初相當類似之結構。(圖51展示在5、10、15個延伸循環之後收集之光學顯微相片)。

在對角方向上施加之拉伸應變(情況ii)展示類似結構改變，但在完全延伸時，1D波紋結構沿由施加之應變所界定之方向對準而非為初始幾何形狀。對於垂直情況iii，在較小應變(ϵ_{st} 為1.8%)處，樣本之某些部分完全失去魚骨狀布局而沿延伸方向產生新的1D波紋。隨著增加之應變，較多區域經歷此變換直至整個區由此等定向之1D波紋組成。此等新形成之1D波紋垂直於原始波紋之定向；在解除之後，其即簡單地撓曲以形成無序魚骨狀幾何形狀。對於圖43B

中所示之全部情況，波長均隨拉伸應變而增大且在解除之後即恢復至其原始值，即使在正交方向上由柏松效應誘發壓縮應力亦如此。此行為由於由魚骨狀波紋之展開所誘發的 λ 之增大而產生，該增大大於由柏松效應引起之此波長的減小。(圖52)對於情況i，凹凸波長 $2\pi/k_1$ (圖52A)在施加之拉伸應變 ε_{st} 下歸因於柏松效應而減小至 $2\pi/k'_1$ (圖52B)，亦即， $k'_1 > k_1$ 。然而，相應凹凸角 θ' 歸因於魚骨狀結構之展開而大於角 θ 。短波長 $\lambda = (2\pi/k_1)\sin(\theta/2)$ 變為 $\lambda' = (2\pi/k'_1)\sin(\theta'/2)$ ，其在角改變之效應克服柏松效應時可大於 λ 。吾人之理論模型給出對於 $\varepsilon_{st} = 0$ 、1.8%及3.8%， $\lambda = 12.4$ 、14.6及17.2 μm ，此證實了如在實驗中所觀測的，短波長隨施加之應變而增大。對於情況iii， λ 及 $2\pi/k_1$ 均隨施加之延伸應變而增大，因為波紋沿延伸應變之方向而鬆弛，且凹凸角 θ 未因柏松效應而顯著改變。亦藉由熱誘發之拉伸應變來研究彎曲薄膜之雙軸可延伸性(圖53)。由熱應變產生之魚骨狀波紋隨著對樣本加熱而緩慢消失；其在冷卻之後即完全恢復。

此等觀測結果僅適用於薄膜之中央區域。如圖39之底部圖框中所指示，薄膜之邊緣展示1D波紋結構，其中波向量沿邊緣而定向。圖44中展示邊緣區域、中央區域及其之間的過渡區之AFM影像及線切圖輪廓。起源於Si之邊緣附近之1D波紋(頂部圖框)逐漸變得撓曲(中部圖框)直至其變換為中央區域中之魚骨狀幾何形狀(底部圖框)。此等區域中之 λ 值分別為16.6 μm 、13.7 μm 及12.7 μm (自頂部圖框

起)，其中 A_1 為 $0.52\ \mu\text{m}$ 、 $0.55\ \mu\text{m}$ 及 $0.67\ \mu\text{m}$ 。與邊緣處之 1D 波紋相對比，2D 魚骨狀波紋具有較小 λ 及 A_1 ，此提示 Si 之內部區比邊緣受到較強的壓縮應變之影響。邊緣附近之應力狀態在某距離範圍內，由於薄膜之無牽引力邊緣而近似為單軸壓縮。此單軸壓縮平行於此自由邊緣，且因此導致沿該邊緣之 1D 波紋。然而，應力狀態在魚骨狀結構產生之中央區域中變為等雙軸壓縮。對於 1D 波紋邊緣與魚骨狀波紋之間的過渡區，不平衡雙軸壓縮造成具有較大凹凸角之 "半" 魚骨狀波紋。吾人之模型得到對於 1D 波紋分別為 $16.9\ \mu\text{m}$ 及 $0.83\ \mu\text{m}$ 之 λ 及 A_1 及對於魚骨狀結構分別為 $12.4\ \mu\text{m}$ 及 $0.90\ \mu\text{m}$ 之 λ 及 A_1 。此等結果與實驗觀測值相當良好地符合。

為了進一步研究此等邊緣效應，吾人製造具有 $1000\ \mu\text{m}$ 之長度及 $100\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ 及 $1000\ \mu\text{m}$ 之寬度的矩形薄膜，其均處於同一 PDMS 基板上。圖 45 展示此等結構對於兩個不同水準之熱預加應變之光學顯微相片。在較低熱預加應變 (約 2.3%，圖 45A) 處， $100\ \mu\text{m}$ 及 $200\ \mu\text{m}$ 寬之薄膜顯示出自一側至另一側的完全 1D 波紋，其在末端具有平坦未變形之區域。 $500\ \mu\text{m}$ 寬之薄膜展示類似之 1D 波紋及平坦區域，但波紋在結構之中部具有微微撓曲之幾何形狀，其具有大體上小於 $100\ \mu\text{m}$ 及 $200\ \mu\text{m}$ 之情況的整體有序性及定向上之均勻性。對於 $1000\ \mu\text{m}$ 之方塊，1D 波紋存在於邊緣之中央區域中，其在角落中具有平坦區。薄膜之中央部分展示完全形成之魚骨狀幾何形狀。對於角落平坦區域，

歸因於兩個自由邊緣而存在近似無應力之狀態。在該等角落附近無波紋形成。隨著增大之預加應變(4.8%，圖45B)，所有情況下之平坦區域在大小上均減小。1D波紋狀態在100 μm 及200 μm 之織帶中持續，但顯著魚骨狀形態在500 μm 之情況的中央區域中出現。在較高預加應變處，等雙軸壓縮應變存在於500 μm 寬之薄膜的內部區域中。對於1000 μm 之方塊薄膜，魚骨狀狀態延伸至接近邊緣之區域。可將界定平坦區域之空間延伸之特徵長度標度(吾人稱作邊緣效應長度) L_{edge} 估計為薄膜大小及預加應變的函數。圖45C展示指示對於此處研究之情況，此長度以獨立於薄膜之大小之方式隨預加應變之線性縮放的結果。隨著預加應變變得較高，單軸應變區域之長度變得較小。因此，可在接近兩個自由邊緣處之無應力區域中觀測到較短範圍之1D波紋形式及類似狀態。

圖46展示在包括圓形、橢圓形、六邊形及三角形之其他薄膜幾何形狀中形成之波狀結構的光學顯微相片。該等結果定性地與圖45之織帶及方塊中之觀測結果相一致。特定言之，邊緣區域展示平行於邊緣而定向之1D波紋。具有正交定向之波紋僅出現於距邊緣距離大於 L_{edge} 處。對於圓形，1D波紋歸因於薄膜之形狀而以全面徑向定向出現於接近邊緣處，魚骨狀波紋出現於中央。橢圓形顯示出類似行為，但在長軸之邊緣處具有平坦區域(歸因於此等區域中之較小曲率半徑)。對於六邊形及三角形形狀，銳角隅角(分別為 120° 及 60° 之角度)導致平坦區域。魚骨狀幾何形狀

出現於六邊形之中央。三角形之中央展示對於此處所示之預加應變的水準，1D波紋之合併。對於具有清角之形狀(例如，六邊形、三角形及橢圓形之尖端)，在隅角附近不存在波紋，因為兩個相交之自由邊緣(未必垂直)給出無應力狀態。對於三角形形狀，不存在足夠空間來產生魚骨狀結構，即使是在中央區域中亦如此。

薄膜自身提供達成雙軸可延伸電子設備之途徑。可利用上文概述之邊緣效應來實現對於該等設備之特定類別可為有用之特定結果。特定言之，在成像系統中，於光偵測器之位置處保持平坦未變形區域以避免在此等設備具有波狀形狀時發生之非理想狀態可能具有價值。圖47呈現達成此結果之可延伸薄膜之一些代表性實例。此等結構由以 $30\text{ }\mu\text{m}\times 150\text{ }\mu\text{m}$ 之織帶(對於正交織帶而言為 $30\text{ }\mu\text{m}\times 210\text{ }\mu\text{m}$)在豎直及水平方向上(圖47A、圖47C)及在豎直、水平及對角方向上(圖47E、圖47G)連接的 $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$ 之正方島狀物組成。織帶中之波紋之振幅及波長的改變提供以在較大程度上避免正方島狀物之區域中之變形的方式來適應所施加之應變之手段。吾人檢查此等結構在若干不同所施加應變下之行為。圖47之部分a及e展示在藉由於烘箱中加熱樣本而施加的較低應變(約2.3%)之狀態中之代表性情況。圖47之部分c及g展示在藉由使用機械台而施加之相對較高的雙軸應變(約15%)下之相同結構。如所顯而易見的，在低應變狀態下島狀物保持平坦；在足夠高之應變下，開始於此等區域中形成波紋結構。如傾斜角度之SEM影像(圖

47B、圖 47D、圖 47F、圖 47H) 中所示，在所有應變下，PDMS 與 Si 之間的良好黏著得以保持。圖 47 之部分 b 及 d 中之高放大率 SEM 影像的插圖亦證實 Si 與 PDMS 之強結合。

總而言之，矽之奈米薄膜可與預加應變之彈性體基板整合以產生具有幾何形狀之一範圍的 2D "波狀" 結構。此等系統之機械行為的許多態樣與理論預測之行為良好地一致。此等結果對於電子元件在使用期間或在安裝期間需要充分可延伸性之系統中之應用為有用的。

參考文獻

1. Duan, X. & Lieber, C. M. General synthesis of compound semiconductor nanowires. *Adv. Mater.* 12, 298-302 (2000)。
2. Xiang, J., Lu, W., Hu, Y., Wu, Y., Yan, H. & Lieber, C. M. Ge/Si nanowire heterostructures as high-performance field-effect transistors. *Nature* 441, 489-493 (2006)。
3. Wu, Y., Yan, H., Huang, M., Messer, B., Song, J. H. & Yang, P. Inorganic semiconductor nanowires: rational growth, assembly, and novel properties. *Chem. Eur. J.* 8, 1261-1268 (2002)。
4. Pan, Z. W., Dai, Z. R. & Wang, Z. L. Nanobelts of semiconducting oxides. *Science* 291, 1947-1949 (2001)。
5. Peng, X., Manna, L., Yang, W., Wickham, J., Scher, E., Kadavanich, A. & Alivisatos, A. P. Shape control of CdSe nanocrystals. *Nature* 404, 59-61 (2000)。

6. Wang, D., Chang, Y.-L, Lu, Z. & Dai, H. Oxidation resistant germanium nanowires: bulk synthesis, long chain alkanethiol functionalization, and Langmuir-Blodgett assembly. *J. Am. Chem. Soc.* 127, 11871-11875 (2005) .

7. Huang, M. H., Wu, Y., Feick, H., Tran, N., Weber, E. & Yang, P. Catalytic growth of zinc oxide nanowires by vapor transport. *Adv. Mater.* 13, 113-116 (2001) .

8. Gudiksen, M. S., Wang, J. & Lieber, C. M. Synthetic control of the diameter and length of single crystal semiconductor nanowires. *J. Phys. Chem. B* 105, 4062-4064 (2001) .

9. Yu, H., Li, J., Loomis, R. A., Wang, L.-W. & Buhro, W. E. Two-versus three-dimensional quantum confinement in indium phosphide wires and dots. *Nat. Mater.* 2, 517-520 (2003) .

10. Sun, Y. & Rogers, J. A. Fabricating semiconductor nano/microwires and transfer printing ordered arrays of them onto plastic substrates. *Nano Lett.* 4, 1953-1959 (2004) .

11. Yin, Y., Gates, B. & Xia, Y. A soft lithography approach to the fabrication of nanostructures of single crystalline silicon with well-defined dimensions and shapes. *Nat. Mater.* 12, 1426-1430 (2000) .

12. Kodambaka, S., Hannon, J. B., Tromp, R. M. & Ross, H. J. Growth of single-crystalline silicon nanowires by catalyzed decomposition of silane. *Nat. Mater.* 1, 387-391 (2002) .

F. M. Control of Si nanowire growth by oxygen. *Nano Lett.* 6, 1292-1296 (2006) .

13. Shan, Y., Kalkan, A. K., Peng, C.-Y. & Fonash, S. J. From Si source gas directly to positioned, electrically contacted Si nanowires: the self-assembling "grow-in-place" approach. *Nano Lett.* 4, 2085-2089 (2004) .

14. He, R., Cao, D., Fan, R., Hochbaum, A. I., Carraro, C, Maboudian, R. & Yang, P. Si nanowire bridges in microtrenches: integration of growth into device fabrication. *Adv. Mater.* 17, 2098-2102 (2005) .

15. Lee, K. J., Motala, M. J., Meitl, M. A., Childs, W. R., Menard, E., Shim, A. K., Rogers, J. A. & Nuzzo, R. G. Large-area, selective transfer of microstructured silicon: a printing-based approach to high-performance thin-film transistors supported on flexible substrates. *Adv. Mater.* 17, 2332-2336 (2005) .

16. Gao, P. X., Ding, Y., Mai, W., Hughes, W. L., Lao, C. & Wang, Z. L. Conversion of zinc oxide nanobelts into superlattice-structured nanohelices. *Science* 309, 1700-1704 (2005) .

17. Kong, X. Y., Ding, Y., Yang, R. & Wang, Z. L. Single-crystal nanorings formed by epitaxial self-coiling of polar nanobelts. *Science* 303, 1348-1351 (2004) .

18. Chen, P., Chua, S. J., Wang, Y. D., Sander, M. D. &

Fonstad, C. G. InGaN nanorings and nanodots by selective area epitaxy. *Appl. Phys. Lett.* 87, 143111 (2005) .

19. Manna, L, Milliron, D. J., Meisel, A., Scher, E. C. & Alivisatos, A. P. Controlled growth of tetrapod-branched inorganic nanocrystals. *Nat. Mater.* 2, 382-385 (2003) .

20. Dick, K. A., Deppert, K., Larsson, M. W., Mårtensson, T., Seifert, W., Wallenberg, L. R. & Samuelson, L. Synthesis of branched 'nanotrees' by controlled seeding of multiple branching events. *Nat. Mater.* 3, 380-384 (2004) .

21. Khang, D.-Y., Jiang, H., Huang, Y. & Rogers, J. A. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates. *Science* 311, 208-212 (2006) .

22. Schmidt, O. G. & Eberl, K. Thin solid films roll up into nanotubes. *Nature* 410, 168-168 (2001) .

23. Zhang, L, Ruh, E., Grützmacher, D., Dong, L, Bell, D. J., Nelson, B. J. & Schönenberger, C. Anomalous coiling of SiGe/Si and SiGe/Si/Cr helical nanobelts. *Nano Lett.* 6, 1311 -1317 (2006) .

24. Jin, H.-C, Abelson, J. R., Erhardt, M. K. & Nuzzo, R. G. Soft lithographic fabrication of an image sensor array on a curved substrate. *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, 2548-2551 (2004) .

25. Someya, T., Sekitani, T., Iba, S., Kato, Y., Kawaguchi, H. & Sakurai, T. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101, 9966-9970 (2004) .

26. Nathan, A., Park, B., Sazonov, A., Tao, S., Chan, I., Servati, P., Karim, K., Charania, T., Striakhilev, D., Ma, Q. & Murthy, R. V. R. Amorphous silicon detector and thin film transistor technology for large-area imaging of X-rays. *Microelectronics J.* 31, 883-891 (2000) .

27. Lacour, S. P., Jones, J., Wagner, S., Li, T. & Suo, Z. Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces. *Proc. IEEE* 93, 1459-1467 (2005) .

28. Childs, W. R., Motala, M. J., Lee, K. J. & Nuzzo, R. G. Masterless soft lithography: patterning UV/Ozone-induced adhesion on poly(dimethylsiloxane) surfaces. *Langmuir* 21, 10096-10105 (2005) .

29. Sun, Y., Kumar, V., Adesida, I. & Rogers, J. A. Buckled and wavy ribbons of GaAs for high-performance electronics on elastomeric substrates. *Adv. Mater.*, in press .

30. Sun, Y., Khang, D.-Y., Hua, F., Hurley, K. Nuzzo, R. G. & Rogers, J. A. Photolithographic route to the fabrication of micro/nanowires of III-V semiconductors.

Adv. Funct. Mater. 15, 30-40 (2005) .

32. Loo, Y.-L.; Someya, T., Baldwin, K. W., Bao, Z., Ho, P., Dodabalapur, A., Katz, H. E. & Rogers, J. A. Soft, conformable electrical contacts for organic semiconductors: high-resolution plastic circuits by lamination. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 99, 10252-10256 (2002) .

33. Suo, Z., Ma, E. Y., Gleskova, H., Wagner, S. Mechanics of rollable and foldable film-on-foil electronics. Appl. Phys. Lett. 74, 1177-1179 (1999) .

P. Mandlik, S. P. Lacour, J. W. Li, S. Y. Chou, 及 S. Wagner, IEEE Electron Device Letters 27, 650-652 (2006) .

D. S. Gray, J. Tien 及 C. S. Chen, Advanced Materials 16, 393-+ (2004) .

S. P. Lacour, S. Wagner, Z. Y. Huang 及 Z. Suo, Applied Physics Letters 82, 2404-2406 (2003) .

S. P. Lacour, J. Jones, S. Wagner, T. Li 及 Z. G. Suo, Proceedings of the IEEE 93, 1459-1467 (2005) .

J. Jones, S. P. Lacour, S. Wagner 及 Z. G. Suo, Journal of Vacuum Science & Technology A 22, 1723-1725 (2004) .

S. P. Lacour, J. Jones, Z. Suo 及 S. Wagner, IEEE Electron Device Letters 25, 179-181 (2004) .

W. T. S. Huck, N. Bowden, P. Onck, T. Pardoen, J. W. Hutchinson 及 G. M. Whitesides, Langmuir 16, 3497-3501 (2000) .

N. Bowden, S. Brittain, A. G. Evans, J. W. Hutchinson及
G. M. Whitesides, *Nature* 393, 146-149 (1998)。

S. Wagner, S. P. Lacour, J. Jones, P. H. I. Hsu, J. C.
Sturm, T. Li及Z. G. Suo, *Physica E-Low-Dimensional
Systems & Nanostructures* 25, 326-334 (2004)。

H. Kudo, T. Sawada, E. Kazawa, H. Yoshida, Y. Iwasaki
及K. Mitsubayashi, *Biosensors & Bioelectronics* 22, 558-
562 (2006)。

T. Li, Z. G. Suo, S. P. Lacour及S. Wagner, *Journal of
Materials Research* 20, 3274-3277 (2005)。

S. P. Lacour, D. Chan, S. Wagner, T. Li及Z. G. Suo,
Applied Physics Letters 88 (2006)。

S. P. Lacour, C. Tsay及S. Wagner, *IEEE Electron Device
Letters* 25, 792-794 (2004)。

S. P. Lacour, S. Wagner, R. J. Narayan, T. Li及Z. G.
Suo, *Journal of Applied Physics* 100 (2006)。

Reuss, R. H等人，*Proc. IEEE* 2005, 93, 1239。

Jain, K.等人，*Proc. IEEE* 2005, 93, 1500。

Nathan, A.等人，*Microelectron. Reliab.* 2002, 42, 735。

Someya, T等人，*T. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2004,
101, 9966。

Hsu, P. H. I.等人，*IEEE Trans. Electron. DeV.* 2004, 51,
371。

Jin, H. C.等人，*Vac. Sci. Technol., B: Microelectron.*

Nanometer Struct.-Process., Meas., Phenom. 2004, 22, 2548。

Nathan, A.; 等人, Microelectron. J. 2000, 31, 883。

Someya, T. 等人, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 2005, 103, 12321。

Lacour, S. P. 等人, Proc. IEEE 2005, 93, 1459. (c)。

Lacour, S. P. 等人, Appl. Phys. Lett. 2003, 82, 2404。

Khang, D.-Y. 等人, Science 2006, 311, 208。

Sun, Y. 等人, Adv. Mater. 2006, 18, 2857。

Sun, Y. 等人, Nat. Nanotechnol. 2007, 1, 201。

Ouyang, M. 等人, Chem. Mater. 2000, 12, 1591。

Childs, W. R.; Nuzzo, R. G. J. Am. Chem. Soc. 2002, 124, 13583。

Efimenko, K. 等人, J. Colloid Interface Sci. 2002, 254, 306。

Hillborg, H. 等人, Langmuir 2004, 20, 785。

Buma, T. 等人, Appl. Phys. Lett. 2001, 79, 548。

Properties of Silicon; INSPEC: New York, 1998。The coefficients of thermal expansion are RPDMS) $3.1 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 及 α_{Si}) $2.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ for PDMS substrate 及 Si nanomembrane, respectively. The thermal prestrain for the samples prepared at 150°C was calculated by $A\alpha\Delta T = (3.1 \times 10^{-4} - 2.6 \times 10^{-6})(150 - 25) = 3.8\%$ 。

Timoshenko, S. Theory of Plates 及 Shells; McGraw-Hill:

New York, 1940。

Timoshenko, S.; Goodier, J. N. Theory of Elasticity, 3rd ed.; McGraw-Hill: New York, 1969。

Chen, X.; Hutchinson, J. W. J. Appl. Mech. Trans. ASME 2004, 71, 597。

Chen, X.; Hutchinson, J. W. Scr. Mater. 2004, 50, 797。

Huang, Z. Y. et al. J. Mech. Phys. Solids 2005, 53, 2101。

Bietsch, A.; Michel, B. J. Appl. Phys. 2000, 88, 4310。

Ohzono, T.; Shimomura, M. Phys. Rev. B 2004, 69, 132202。

Ohzono, T.; Shimomura, M. Langmuir 2005, 21, 7230。

實例4：藉由使用印刷半導體奈米材料而得到之異質整合式三維電子元件

吾人已開發一種簡單方法來將寬廣類別之相異材料組合至具有二維或三維(3D)布局之異質整合式(HGI)電子系統中。該製程始於不同半導體奈米材料(例如，單壁碳奈米管及氮化鎵、矽及砷化鎵之單晶奈米線/纖帶)於單獨基板上之合成。對使用柔軟印模及此等基板作為供體的附加轉印製程繼之以設備及互連之形成之重複應用產生將此等(或其他)半導體奈米材料的任何組合併入於剛性或可撓性設備基板上之高效能3D-HGI電子元件。此通用方法可產生使用其他技術難以達成或不可能達成的寬廣範圍之不常見電子系統。

許多現有及新興電子設備受益於相異類別之半導體向二維或三維(2D或3D)布局的單一系統中之整體異質整合(HGI)。實例包括多功能射頻通信設備、紅外(IR)成像攝影機、可定址感應器陣列及混合CMOS/奈米線/奈米設備電路(3-7)。在一些代表性系統中，化合物半導體或其他材料提供高速操作、有效光偵測或感應能力，而矽CMOS在通常包括堆疊3D組態之電路中提供數位讀出及信號處理。晶圓結合(8)及磊晶成長(9、10)表示用於達成此等類型之3D-HGI系統的兩種最為廣泛使用之方法。前者製程涉及藉由使用黏著劑或熱起始界面化學而進行的分別形成於不同半導體晶圓上之積體電路、光電二極體或感應器之實體結合。此方法在許多情況中適用，但其具有重要缺點，包括(i)縮放至較大區或第三(亦即，堆疊)維度中之數層的有限能力，(ii)與不常見材料(例如，奈米結構之材料)或低溫材料及基板之不相容性，(iii)對於貫穿晶圓之電互連的具有挑戰性之製造及對準，(iv)對於平坦、平面結合表面之高要求及(v)可因藉由全異材料之差異熱膨脹/收縮而產生的機械應變發生之曲折及破裂。磊晶成長提供一種不同方法，其涉及藉由分子束磊晶法或其他手段而進行的較薄半導體材料層於其他材料之晶圓之表面上的直接形成。雖然此方法避免前述問題中之一些，但對於磊晶法之要求對可成長之材料的品質及類型加以嚴格限制，即使是在使用緩衝層及其他進階技術時亦如此。相反地，諸如無機材料之奈米級線、織帶、薄膜或粒子或者諸如單壁碳奈米管

(SWNT)或石墨薄片(graphene sheet)(11-14)的基於碳之系統之新興類別的半導體奈米材料可成長且接著懸浮於溶劑中，或以回避對於磊晶成長或晶圓結合之需要之方式而轉移至基板上。近來的工作展示(例如)藉由溶液澆鑄(15)而形成之交叉奈米線二極體以2D布局的整合。此處呈現之結果說明相異單晶無機半導體(例如，GaN、Si及GaAs之奈米線/纖帶)可如何藉由使用可伸縮及確定性印刷技術而彼此組合及亦與其他類別之奈米材料(例如，SWNT)組合來產生2D或3D布局之複雜HGI電子系統。特定言之，整合至剛性無機及可撓性塑膠基板上之設備陣列、邏輯閘及活動可定址光偵測器中的高效能金屬氧化物半導體場效電晶體(MOSFET)、金屬半導體場效電晶體(MESFET)、薄膜電晶體(TFT)、光電二極體及其他組件之超薄多層堆疊論證該等能力中的一些。

圖57說明用於製造此等3D-HGI系統之代表性步驟。該製程始於各處於自己的源基板上之半導體奈米材料之合成。此處呈現之設備整合藉由使用基於晶圓之源材料及微影蝕刻程序而形成之單晶Si、GaN及GaAs的奈米線及奈米纖帶(16-21)與藉由化學氣相沈積而成長之SWNT之網路(13、21)。圖57之頂部的掃描電子顯微相片展示在自源基板移除之後的此等半導體奈米材料。對於電路製造，此等元件仍處於在製造或成長階段期間於晶圓上界定之組態：在Si、GaN及GaAs奈米線/纖帶之情況下為對準陣列，且對於SWNT為亞單層隨機網路。可在源基板上執行用於實現

與 Si、GaN 及 GaAs 之歐姆接觸之高溫摻雜及退火程序。下一步驟涉及使用先前描述之基於彈性體印模之印刷技術來將此等經處理之元件自源基板轉移至設備基板(諸如圖 57 中所說明的聚醯亞胺(PI)之薄片)。特定言之，抵靠源基板層壓聚二甲基矽氧烷(PDMS)之印模建立與半導體奈米材料元件之軟凡得瓦爾黏著接觸。使經"塗墨"之印模與在表面上具有液態預聚物(例如，聚醯胺酸)之薄旋轉澆鑄層之設備基板(例如，PI 薄片)接觸，且接著使聚合物固化使得在印模經移除時此等半導體材料嵌埋於此層上且良好地黏附至此層(16-20)。類似程序對於基板(亦即，剛性或可撓性、有機或無機)之一範圍及半導體奈米材料之一範圍適用[此製程之一略經修改的版本用於 SWNT(21)。]。中間層(在此情況下為 PI)之厚度可小至 500 nm，且對於此處描述之系統通常為 1 至 1.5 μm 。在包括閘極介電質、電極及互連之形成的某一額外處理之後，可重複轉印及設備製造步驟，其始於於先前完成之電路級之頂部旋塗新的預聚物中間層。經特別設計以用於轉印之自動台或習知遮罩對準器致能在數平方公分上 $\sim 1 \mu\text{m}$ 之疊置重合精度。(22)(圖 61)。簡單地藉由在中間層中之由光圖案化及/或乾式蝕刻界定之開口上蒸鍍金屬線及將金屬線蒸鍍至該等開口中而形成層與層的互連(23)。此用以得到 3D-HGI 電子元件之不常見方法具有若干重要特徵。第一，設備基板上之所有處理均於低溫下發生，藉此避免可導致多層堆疊系統中之不合需要之變形的差異熱膨脹/收縮效應。此操作亦致能對低溫

塑膠基板及中間層材料之使用，且其有助於確保下伏電路層不會因對上覆設備之處理而熱降級。第二，該方法可應用於寬廣類別之半導體奈米材料，包括諸如SWNT之薄膜的新興材料。第三，柔軟印模致能與下伏設備層之非破壞性接觸；此等印模連同超薄半導體材料亦可容許具有某構形之表面。第四，超薄設備幾何形狀($<1\ \mu\text{m}$)及中間層($<1.5\ \mu\text{m}$)允許層與層之電互連的簡單形成。克服習知方法之劣勢中之許多者的此等特徵說明於下文描述之若干電路論證中。

圖58呈現藉由使用圖57中說明之總處理流程，使用具有摻雜接觸點(形成於源晶圓上)、電漿增強化學氣相沈積之 SiO_2 介電質及用於源極、汲極及閘極之Cr/Au金屬化的單晶矽奈米纖帶(24)而製造之三層3D堆疊陣列Si MOSFET。每一設備使用三個對準之奈米纖帶，其具有分別為 $87\ \mu\text{m}$ 、 $290\ \text{nm}$ 及 $250\ \mu\text{m}$ 之寬度、厚度及長度。圖2A展示系統之邊緣之俯視光學顯微相片，該邊緣具有經設計以分別顯示基板之支撐一個、兩個及三個MOSFET層之部分的布局。第二層之設備幾何形狀相對於第一層及第三層之九十度旋轉有助於闡明系統之布局。堆疊結構之示意性橫截面圖及傾斜圖出現於圖58B中。可使用共焦光學顯微法來在三維上觀察樣本。圖58C展示該等影像之俯視圖及傾斜圖，其經著色以易於觀察。(影像品質隨深度而稍有降級，此歸因於自上層之散射及吸收)。圖58D呈現對每一層中之代表性設備[具有 $19\ \mu\text{m}$ 之通道長度(L_c)、由在摻雜源

極/汲極區域上延伸之閘極電極的距離界定之 $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 之通道重疊距離(L_0)及 $200\text{ }\mu\text{m}$ 之通道寬度(W)的頂部閘極MOSFET]之電量測結果。三層中之每一者上之形成於PI基板上的設備展示出極佳特性($470\pm30\text{ cm}^2/\text{Vs}$ 之線性遷移率, $>10^4$ 之開關比及 $-0.1\pm0.2\text{ V}$ 之臨限電壓), 且在不同層中的設備之間不存在系統差異。可藉由重複相同程序來向此系統添加額外層。如圖59中所說明, 除了具有單一半導體之3D電路以外, 可在多層中使用各種半導體以形成完整3D-HGI系統。為了說明此能力, 吾人分別使用GaN及Si奈米纖帶與SWNT膜而在PI基板上製造MESFET(特定言之, 高電子遷移率電晶體HEMT)、MOSFET及TFT之陣列。圖59A及圖59B分別展示所得設備之高放大率光學影像與共焦影像。第一層上之GaN HEMT對於源極及汲極使用歐姆接觸點(Ti/Al/Mo/Au, 其於源晶圓上加以退火), 且對於閘極使用肖特基(Ni/Au)接觸點。通道長度與寬度及閘極寬度分別為 $20\text{ }\mu\text{m}$ 、 $170\text{ }\mu\text{m}$ 及 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。每一設備使用具有分別為 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $10\text{ }\mu\text{m}$ 及 $150\text{ }\mu\text{m}$ 之厚度、寬度及長度、藉由設備基板上之處理而電互連的GaN纖帶(由AlGaN/GaN/AlN之多層堆疊構成)。第二層上之SWNT TFT對於閘極介電質使用 SiO_2 /環氧樹脂, 且對於源極、汲極及閘極使用Cr/Au, 其具有分別為 $50\text{ }\mu\text{m}$ 及 $200\text{ }\mu\text{m}$ 之通道長度及寬度。Si MOSFET使用與圖58中所示之設計相同的設計。可藉由使用Si、SWNT及GaN之不同組合來建構各種其他3D-HGI設備(圖61及圖62)。圖59C呈現圖59A及圖59B之系統中的典

型設備之電流-電壓特徵。在所有情況中，特性均類似於在源晶圓上製造的特性：GaN HEMT具有 -2.4 ± 0.2 V之臨限電壓(V_{th})、 $>10^6$ 之開關比及 0.6 ± 0.5 mS之轉導；SWNT TFT具有 $V_{th} = -5.3 \pm 1.5$ V、 $>10^5$ 之開關比及 5.9 ± 2.0 cm^2/Vs 之線性遷移率；Si MOSFET具有 $V_{th} = 0.2 \pm 0.3$ V、 $>10^4$ 之開關比及 500 ± 30 cm^2/Vs 之線性遷移率。此等設備之一受關注態樣(其係由對薄PI基板(25 μm)、設備(2.4 μm)及PI/PU中間層(5 μm)之使用而得出)為其機械可撓曲性，此對於在可撓性電子元件中之應用為重要的。吾人將對於圖59A之3D-HGI系統中之Si、SWNT及GaN設備的有效轉導(g_{eff})評估為撓曲半徑之函數。展示如經正規化為未撓曲狀態下之轉導(g_{0eff})的此等資料之圖59D說明對於低至3.7 mm之撓曲半徑的穩定效能。

形成於此等3D-HGI設備中之不同級之間的電互連可產生引起關注之電路能力。較薄聚合物中間層使得此等互連能夠藉由在微影界定之開口上蒸鍍金屬線或將金屬線蒸鍍至該等開口中而簡單地形成。圖60呈現一些實例。圖60A中所示之第一者為3D NMOS反相器(邏輯閘)，其中驅動($L=4$ μm ， $W=200$ μm)與負載($L=4$ μm ， $W=30$ μm)Si MOSFET處於不同級上。在5 V之電源電壓之情況下，此雙層反相器顯示出經良好界定的轉移特徵，其中增益為 ~ 2 ，此與使用類似電晶體之習知平面反相器(25)之效能相當。圖60B展示藉由使用整合之n通道Si MOSFET與p通道SWNT TFT而具有互補設計(CMOS)之反相器，其經設計以使上拉

與下拉方向上之電流驅動能力均衡(圖 65)。以至 VDD 端子之 5 V 偏壓及自 0 V 至 5 V 之閘極電壓(輸入)而收集之轉移曲線出現於圖 60A 中。曲線形狀及增益(高達~7)定性地與數值電路模擬(圖 65)相一致。作為第三實例，吾人建立與可撓性 PI 基板上之 Si MOSFET 整合的金屬-半導體-金屬(MSM)紅外(IR)偵測器(26)來論證用於製造可用於活性 IR 成像器中之單胞的能力。在此情況下，轉移至具有 Si 奈米纖帶 MOSFET 之印刷陣列之基板上的 GaAs 之印刷奈米纖帶(厚度、寬度及長度分別為 270 μm 、100 nm 及 400 μm)形成 MSM 之基礎。沈積於此等 GaAs 奈米纖帶之末端上的電極(Ti/Au=5/70 nm)形成背對背肖特基二極體，其中間隔為 10 μm 。所得偵測器單元顯示出隨 IR 照射之強度而增大的電流增強(圖 60C)，此與電路模擬(圖 66)相一致。在不考慮自半導體之表面反射的光之情況下，在 1 V 至 5 V 觀測到於 850 nm 之波長處約 0.30 A/W 之回應率。該系統亦顯示出具有低於 1 cm 之曲率半徑的可撓曲性，此對於諸如廣角 IR 夜視成像器之彎曲焦平面陣列之進階系統可為有用的。

印刷半導體奈米材料提供得到 3D-HGI 系統之新方法且可在各種應用領域中具有重要應用，不僅是此處報告之系統所提示的應用領域，且有其他應用領域，包括具有整合式讀出及感應電子元件之微流體設備、將不常見感應材料與習知矽基電子元件合併之生化感應系統及將化合物半導體之發光器與矽驅動電子元件或微機電結構組合的光子/光電子系統。另外，此方法與較薄輕型塑膠基板之相容性

可產生對於具有不常見形狀因數或機械可撓性作為關鍵特徵的設備之額外機會。

材料及方法：設備製造：矽設備：製造始於藉由處理絕緣體上矽晶圓(SOI；具有290 nm之頂部Si層之Soitec unibond，其具有 $6.0\sim 9.4\times 10^{14}/\text{cm}^3$ 之摻雜級)而進行的對單晶矽之接觸點摻雜薄纖帶之界定。第一步驟涉及磷摻雜，其使用固源及旋塗式摻雜劑(Filmtronic, P509)且使用電漿增強化學氣相沈積(PECVD)之 SiO_2 (Plasmatherm, 300 nm, 900毫托, 350 sccm, 2%之 SiH_4/He , 795 sccm NO_2 , 250°C)的光微影界定之層作為遮罩來控制摻雜劑於何處擴散至矽中。在摻雜之後，經由光阻劑之圖案化層而進行的 SF_6 電漿蝕刻界定纖帶。藉由濃HF溶液(Fisher Chemicals)而進行的對內埋氧化物之底切蝕刻將纖帶自晶圓釋放。此程序完成單晶矽之接觸點摻雜纖帶的製造。在下一步驟中，使聚二甲基矽氧烷(PDMS, A:B=1:10, Sylgard 184, Dow Corning)之平坦彈性體印模與光阻劑塗佈之纖帶接觸，且接著剝離印模，從而將纖帶自晶圓移除，且藉由疏水性PDMS與光阻劑之間的凡得瓦爾力使得纖帶仍黏附至印模之表面。抵靠旋塗有較薄液態PI前驅物聚醯胺酸(Sigma_Aldrich Inc.)層($\sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$)之 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的聚醯亞胺(PI)薄片來層壓如此以來自晶圓之s-Si纖帶而經"塗墨"的印模。使前驅物固化，剝離PDMS印模且汽提光阻劑將纖帶保留為嵌埋於PI基板之表面上且良好地黏附至該表面。閘極介電質層由藉由PECVD於相對較低之溫度， 250°C 下沈積之

SiO₂層(厚度為~100 nm)組成。光微影及CF₄電漿蝕刻界定對矽之摻雜源極/汲極區域之開口。在藉由光微影及濕式蝕刻而進行之單一步驟中界定Cr/Au(5/100 nm，藉由電子束蒸鍍自底部至頂部而形成，Temescal FC-1800)之源極、汲極及閘極電極。

GaN設備：在具有異質結構[AlGaN(18 nm)/GaN(0.6 μm)/AlN(0.6 μm)/Si]的GaN之塊狀晶圓上製造GaN微結構。歐姆接觸區由AZ 5214光阻劑界定且接著於RIE系統中以SiCl₄電漿而加以清洗。Ti/Al/Mo/Au(15 nm/60 nm/35 nm/50 nm)金屬層接著藉由電子束蒸鍍(Ti/Al/Mo)及熱蒸鍍(Au)而沈積。洗掉完整之抗蝕劑使金屬接觸點保留於GaN上。在N₂環境中於850°C下歷時30秒之熱退火形成歐姆接觸點。SiO₂(Plasmatherm, 300 nm, 900毫托，350 sccm, 2%之SiH₄/He, 795 sccm NO₂, 250°C)及Cr金屬(電子束蒸鍍器，150 nm)層經沈積作為對於隨後的感應耦合電漿(ICP)蝕刻之遮罩材料。光微影、濕式蝕刻及RIE處理(50毫托，40 sccm CF₄, 100 W, 14分鐘)界定GaN之織帶幾何形狀。在以丙酮移除光阻劑之後，使用ICP乾式蝕刻(3.2毫托，15 sccm Cl₂, 5 sccm Ar, -100 V偏壓，14分鐘)來移除曝露之GaN且稍稍蝕刻至Si中(~1.5 μm)以促進隨後的各向異性蝕刻。接著藉由使用四甲基銨氫氧化物(Aldrich, 150°C，歷時4分30秒)而自GaN下方蝕刻掉Si。將樣本浸漬於BOE(6:1, NH₄F: HF)中歷時30秒以移除PECVD SiO₂，且將新的50 nm之電子束蒸鍍之SiO₂層沈積於GaN織帶的頂部

上。接著抵靠塗佈有 2 μm 之聚胺基甲酸酯 (PU, Norland optical adhesive, No. 73) 的 PI 薄片層壓藉由來自母晶圓之 GaN 纖帶而經 "塗墨" 之 PDMS 厚片。使樣本曝露於 UV 光 ($173 \mu\text{Wcm}^{-2}$) 下 15 分鐘以使 PU 固化。剝離 PDMS 且藉由浸沒於 BOE 中 20 秒而移除電子束 SiO_2 導致 GaN 元件向塑膠基板之轉移。使用負性光阻劑 (AZ nLOF2020) 來圖案化 Ni/Au (80/180 nm) 之肖特基接觸點。藉由 AZ 汽提器 (KWIK, 歷時 30 分鐘) 來移除光阻劑。

SWNT 設備：使用化學氣相沈積 (CVD) 來在 SiO_2/Si 晶圓上生長個別單壁碳奈米管之隨機網路。使用連同甲醇而沈積於基板上之鐵蛋白 (Sigma Aldrich) 作為催化劑。饋入氣體為甲烷 (1900 sccm CH_4 連同 300 sccm H_2)。藉由 Ar 氣之高流動來沖洗爐中之石英管以在生長之前進行清洗。在生長期間，使溫度保持於 900°C 歷時 20 分鐘。轉移涉及類似於如先前所描述之製程的印刷之程序或者將厚 Au 層及 PI 前驅物塗佈於具有管之 SiO_2/Si 基板上的稍稍不同之方法。在使 PI 固化之後剝離 Au/PI。相對於塗佈有薄環氧樹脂層 (SU8, 150 nm) 之經預圖案化之設備基板而層壓此層，且接著分別藉由氧反應性離子蝕刻及濕式蝕刻而移除 PI 及 Au 層完成轉移。在底部閘極設備之情況中，基板支撐經預圖案化之閘極電極及介電質。特定言之，藉由光微影而圖案化 Cr/Au/Cr (2 nm/10 nm/10 nm) 之閘極電極，且接著使用 PECVD 將 300 nm 之 SiO_2 沈積於基板上。直接於管之頂部界定 Cr/Au (2 nm/20 nm) 之源極及汲極電極。

3D 電路：3D Si NMOS 反相器：藉由重複應用相同製造程序來建構多層設備。特定言之，將PI前驅物旋轉澆鑄於設備之現有層之頂部，且將矽纖帶轉印於頂部。接著使用相同製程來製造設備。對於豎直金屬互連，藉由在AZ4620光阻劑之層中光圖案化開口，且接著藉由於RIE系統中使用CF₄及O₂電漿蝕刻掉此曝露區中之SiO₂及PI而界定電極區。向此區中沈積300 nm之Al於底部建立接觸，且在藉由蝕刻之SiO₂及PI而形成之階梯邊緣上提供電連續連接。

SWNT及Si CMOS反相器：SWNT設備由藉由光微影在管網路上界定的Au(20 nm)之源極/汲極接觸點組成。SiO₂(100 nm)/Si晶圓基板提供閘極介電質及閘極。接著在選擇性地以光阻劑(AZ5214)塗佈SWNT電晶體之後將環氧樹脂(SU8, 500 nm)旋塗至此基板上。在用於環氧樹脂之固化的UV曝露之後，抵靠基板而層壓以未摻雜Si纖帶"塗墨"之PDMS厚片，且隨後藉由緩慢人工剝離來移除該厚片以完成轉印製程。使用Cr/Au(5 nm/100 nm)作為對於矽設備中之源極及汲極電極之肖特基接觸點。使用Al(100 nm)以連接SWNT與Si電晶體。

整合有Si TFT之GaAs MSM IR偵測器：使用GaAs晶圓(IQE Inc., Bethlehem, PA.)以產生背對背肖特基二極體。由具有多個磊晶層[摻雜Si之n型GaAs(120 nm)/半絕緣(SI)-GaAs(150 nm)/AlAs(200 nm)/SI-GaAs]的GaAs之高品質塊狀晶圓產生纖帶。n型GaAs之載體濃度為 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。在

蝕刻劑(4 mL H_3PO_4 (85重量%)、52 mL H_2O_2 (30重量%)及48 mL去離子水)中對具有光阻劑遮罩圖案之GaAs晶圓進行各向異性蝕刻。以乙醇中之稀HF溶液(在體積上為1:2)來蝕刻掉AlAs層。接著藉由電子束蒸鍍器沈積2 nm之Ti及28 nm之 SiO_2 之層。接著使以GaAs纖帶塗墨之PDMS印模與塗佈有PI的Si電晶體之層(厚度為1.5 μm)接觸。剝離PDMS且藉由BOE蝕刻劑移除Ti及 SiO_2 完成GaAs向設備基板之轉移。藉由電子束蒸鍍而沈積用於肖特基接觸點之金屬(Ti/Au=5 nm/70 nm)。藉由首先圖案化AZ4620光阻劑之層，接著於RIE系統中使用 CF_4 及 O_2 電漿蝕刻穿開口且接著沈積300 nm之Al來界定GaAs背對背肖特基二極體與Si MOSFET之間的電互連。

設備表徵：使用半導體參數分析器(Agilent, 4155C)及習知探測台來進行二極體及電晶體之電表徵。在具有850 nm之波長的IR LED源下量測IR回應。

電路模擬：為了比較CMOS反相器之量測而得之轉移曲線與一模擬，經驗地產生對於n通道Si MOSFET與p通道SWNT TFT之2級PSPICE模型。基於預設PSPICE MOSFET模型(MbreakN及MbreakP)而產生此等PSPICE模型，該預設PSPICE MOSFET模型具有提取之參數來配合圖65B所示之Si NMOS及SWNT PMOS之量測而得的四個曲線。藉由使用與Si MOSFET串連連接之背對背肖特基二極體而經驗地產生對於GaAs MSM光偵測器之PSPICE模型。

實例4之參考文獻：

1. K. Banerjee, S. J. Souri, P. Kapur, K. C. Saraswat, Proc. IEEE, 89, 602 (2001) .
2. S. F. Al-Sarawi, D. Abbott, P. D. Franzon, IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part B, 21, 2 (1998) .
3. A. S. Brown, W. A. Doolittle, N. M. Jokerst, S. Kang, S. Huang, S. W. Seo Materials Science and Engineering B 87, 317 (2001) .
4. Y.-C. Tseng, P. Xuan, A. Javey, R. Malloy, Q. Wang, J. Bokor, H. Dai, Nano letters 4, 123 (2004) .
5. C. Joachim, J. K. Gimzewski, A. Aviram, Nature 408, 541 (2000) .
6. G. Roelkens 等人 , Optics Express 13, 10102 (2005) .
7. D. B. Strukov, K. K. Likharev, Nanotechnology 16, 888 (2005) .
8. K. Vanhollebeke, I. Moerman, P. Van Daele, P. Demeester, Prog. Cryst. Growth Charact. Mater. 41, 1 (2000) .
9. H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986) .
10. T. Kuykendall, P. J. Pauzauskie, Y. Zhang, J. Goldberger, D. Sirbulu, J. Denlinger, P. Yang, Nature Materials 3, 524, (2004) .
11. A. M. Morales, C. M. Lieber, Science 279, 208

(1998) ◦

12. M. Law, D. J. Sirbuly, J. C. Johnson, J. Goldberger, R. J. Saykally, P. Yang, *Science* 305, 1269 (2004) ◦

13. J. Kong, H. T. Soh, A. M. Cassell, C. F. Quate & H. Dai, *Nature* 395, 878 (1998) ◦

14. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* 306, 666 (2004) ◦

15. Y. Huang, X. Duan, C. M. Lieber, *Small* 1, 1 (2005) ◦

16. M. A. Meitl, Z. Zhu, V. Kumar, K. Lee, X. Feng, Y. Huang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Nature Materials* 5, 33 (2006) ◦

17. E. Menard, K. J. Lee, D. Y. Khang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 84, 5398 (2004) ◦

18. Y. Sun, S. Kim, I. Adesida, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 87, 083501 (2005) ◦

19. K. Lee, M. A. Meitl, V. Kumar, J.-H. Ahn, I. Adesida, J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, *Appl. Phys. Lett.*, accepted ◦

20. S.-H. Hur, D.-Y. Khang, C. Kocabas, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 85, 5730 (2004) ◦

21. Materials & Methods are available as supporting material on Science Online ◦

22. J. Dong, M. A. Meitl, E. Menard, P. Ferreira及J. A. Rogers, 未出版。

23. S. Linder, H. Baltes, F. Gnaedinger及E. Doering: Proc. IEEE Micro Electro Mech. Systems 349, (1994)。

24. J.-H. Ahn, H.-S. Kim, K. Lee, Z.-T. Zhu, E. Menard, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, IEEE Electron Devices Lett. 27, 460 (2006)。

25. J.-H. Ahn, H.-S. Kim, K. Lee, Z.-T. Zhu, E. Menard, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, 未出版。

26. J. B. D. Soole, H. Schumacher, IEEE J. Quantum Electron. 27, 737 (1991)。

美國專利申請案第11/115,954號、第11/145,574號、第11/145,542號、第60/863,248號、第11/465,317號、第11/423,287號、第11/423,192號及第11/421,654號在不與本發明之描述不一致的程度上以引用方式併入本文中。

遍及此申請案之所有參考文獻(例如包括經頒予或授予之專利或等效物之專利文件；專利申請公開案；及非專利文獻或其他源材料)在每一參考文獻至少部分不與本申請案之揭示內容不一致的程度上(例如，部分不一致之參考文獻藉由引用除了該參考文獻之部分不一致之部分以外的部分而併入)以全文引用之方式併入本文中，如同個別地以引用方式併入一般。

本文已使用之術語及表達係用作描述之術語且非限制之術語，且在使用該等術語及表達中不欲排除所展示及描述

的特徵之任何等效物或其部分，但應認識到，各種修改在所主張的本發明之範疇內為可能的。因此，應瞭解，雖然已藉由較佳實施例、例示性實施例及可選特徵而特別揭示本發明，但可由熟習此項技術者採用對本文揭示之概念的修改及變化，且應瞭解，將該等修改及變化視作處於由所附申請專利範圍界定之本發明之範疇內。本文提供之特定實施例為本發明之有用實施例的實例，且熟習此項技術者將易瞭解，可藉由使用本發明之描述中所闡述之設備、設備組件、方法步驟之大量變化來執行本發明。如對於熟習此項技術者為明顯的，對於本發明之方法有用之方法及設備可包括大量可選組成及處理元件及步驟。

除非另行規定，否則本文描述或舉例說明之組件的每一表述或組合可用以實踐本發明。

在說明書中無論何時給出一範圍(例如，溫度範圍、時間範圍或者組成或濃度範圍)時，所有中間範圍及子範圍以及所給出之範圍中包括的所有個別值均欲包括於揭示內容中。應瞭解，包括於本文之描述中的任何子範圍或者範圍或子範圍中之個別值可自本文之申請專利範圍排除。

說明書中提及之所有專利及公開案指示熟習與本發明有關之技術者之技術水準。本文引用之參考文獻以其全文引用之方式併入本文中以指示在其出版或申請日期時的技術狀態，且意欲此資訊可在需要時使用於本文中以排除處於先前技術中之特定實施例。舉例而言，在主張物質之組成時，應瞭解，在先於申請者之發明之前的技術中已知並可

用之化合物(包括在本文引用之參考文獻中提供致能揭示案所關於的化合物)不欲包括於本文所主張的物質組成中。

在用於本文中時，"包含"與"包括"、"含有"或"以.....為特徵"同義且為包括性或開放式的，且不排除額外未敘述之元件或方法步驟。在用於本文中時，"由.....組成"排除在所主張之元件中未規定的任何元件、步驟或成份。在用於本文中時，"本質上由.....組成"不排除不在本質上影響申請專利範圍之基本及新穎特徵的材料或步驟。在本文之每一例子中，術語"包含"、"本質上由...組成"及"由...組成"中之任一者可由另兩個術語中之任一者替代。可在缺少未於本文中特別揭示之任何元件、限制的情況下實踐在本文中適當地以說明方式描述之本發明。

一般熟習此項技術者將瞭解，可在實踐本發明時使用除特別舉例說明之內容以外的起始材料、生物材料、試劑、合成方法、純化方法、分析方法、檢定方法及生物學方法而無需採用過度實驗。該等材料及方法的所有技術已知之功能等效物意欲包括於本發明中。已使用之術語及表達係用作描述之術語且非限制之術語，且在使用該等術語及表達中不欲排除所展示及描述的特徵之任何等效物或其部分，但應認識到，各種修改在所主張的本發明之範疇內為可能的。因此，應瞭解，雖然已藉由較佳實施例及可選特徵而特別揭示本發明，但可由熟習此項技術者採用對本文揭示之概念的修改及變化，且應瞭解，將該等修改及變化

視作處於由所附申請專利範圍界定之本發明之範疇內。

表 1：自圖 31A 所示之彎曲提取之參數(得自實驗及計算)。
該等計算假設活性區域之寬度(亦即，對於圖式中所示之樣本為 10 μm) 在延伸之前及之後相同。

預加應變	量測而得之寬度 (μm)	計算而得之寬度 (μm)	量測而得之振幅 A_m (μm)	計算而得之振幅 A_{cal} (μm)	計算而得之峰值應變 ϵ_{peak} (%)
11.3%	136.6	170.7	37.5	37.6	0.38
25.5%	139.6	151.4	51.5	50.3	0.65
33.7%	140.1	142.1	56.4	54.3	0.80
56.0%	124.3	121.8	63.6	60.4	1.2

表 2：自圖 31D 所示之彎曲提取之參數(得自實驗及計算)

W_n (μm)	量測而得之波長 λ_m (μm)	計算而得之波長 λ_{cal} (μm)	量測而得之振幅 A_m (μm)	計算而得之振幅 A_{cal} (μm)	計算而得之峰值應變 ϵ_{peak} (%)
100	N/A	69	N/A	33.2	2.5
200	123	131	66.3	64.1	1.2
300	199	194	100.6	94.9	0.80
400	253	256	129.3	128.8	0.61

【圖式簡單說明】

圖 1 概述用於製造波狀或彎曲可延伸金屬互連之一方

法。A為流程圖概述且B說明流程圖步驟。

圖2為可延伸波狀/彎曲電互連之相片，該電互連係藉由自剛性基板取至經預加應變之可延伸PDMS橡膠基板上，隨後解除應變以誘發彎曲而形成。

圖3概述藉由在波狀結構之彈性體基板上沈積而製造波狀可延伸電極之一方法。

圖4提供關於用於製造平滑波狀彈性體基板之一方法的細節。A為流程圖概述且B說明流程圖步驟。

圖5提供藉由圖3至圖4中所概括之方法而產生之平滑波狀PDMS基板的影像。所展示之互連具有22.6%之可延伸性且具有約900 nm厚(700 nm Al/ 200 nm Au)之金屬互連、約38微米之波長及約15.6微米之振幅(自峰至谷之距離)。B展示互連之一用於與設備組件建立電接觸之末端。可將設備組件定位於基板之平坦部分中。

圖6A具有尖點之市售雙凸透鏡陣列(購自Edmund Optics)。B旋塗光可固化環氧樹脂以製造平滑波狀基板。C抵靠得自B之基板而澆鑄PDMS印模以產生具有平滑特徵之波狀彈性體印模。

圖7藉由經由蔽蔭遮罩而蒸鍍至平滑波狀彈性體基板上而沈積之可延伸電極。電極在受張力而延伸至高達~10%期間保持傳導性及連接性。定標線條為約0.1 mm。A為彈性體基板上之波狀起伏之橫截面圖。B為蒸鍍至波狀彈性體基板上之電極之俯視顯微相片。焦平面處於波狀起伏之峰上。C為蒸鍍至波狀彈性體基板上之電極之俯視顯微相

片。焦平面處於波狀起伏之谷上。

圖 8 為對用於使用可延伸電極製造可延伸被動式矩陣 LED 顯示器之製程之示意性說明。

圖 9 說明具有波狀電極之被動式矩陣 LED 顯示器之機械可延伸性。

圖 10 說明分布於具有球形彎曲之透鏡上的無機光電二極體陣列。所展示的為各種透鏡形狀及角度

圖 11 說明當圍繞球形表面而包繞平坦薄片時對於可延伸性之需要。

圖 12 概述用於製造能夠與球面彎曲之表面相符的可延伸彎曲半導體陣列之一機制。

圖 13 具有單一連接柵格組態(A及B)、多個(例如，兩個)連接柵格組態(C)及花形連接組態(D)之彎曲可延伸矽陣列之光學顯微影像。可延伸互連能夠於(例如)接觸焊墊區域處電連接光電二極體、光收集/偵測設備及其他設備組件。此等系統能夠與彎曲表面相符。圖 13A 至圖 13D 中描繪之組態處於 PDMS 基板上。

圖 14 採取柵格組態的能夠支撐設備組件且與彎曲表面相符之彎曲可延伸矽陣列之電子顯微影像。定標線條在 A 中為 200 μm 且在 B 中為 50 μm 。

圖 15 採取柵格組態之彎曲可延伸矽陣列之電子顯微影像，該等陣列具有藉由複數個(例如，兩個)互連彼此連接之鄰近接觸焊墊且能夠支撐設備組件且與彎曲表面相符。定標線條在 A 中為 200 μm 且在 B 中為 50 μm 。

圖 16 採取花形組態的能夠支撐設備組件且與彎曲表面相符之彎曲可延伸矽陣列之電子顯微影像。定標線條在 A 中為 200 μm 且在 B 中為 50 μm 。

圖 17 採取橋接組態的能夠支撐設備組件且與彎曲表面相符之彎曲可延伸矽陣列之電子顯微影像。定標線條在 A 中為 200 μm 且在 B 中為 50 μm 。

圖 18 PDMS 上之可延伸彎曲矽陣列上的採取柵格陣列組態之光電二極體之相片。

圖 19 論證可延伸互連在延伸與鬆弛期間的可逆行爲。在畫面 1 中使系統鬆弛。如藉由延伸箭頭所指示而在畫面 2、3 及 4 中使系統延伸。畫面 4 中之最大延伸為約 10% 且導致大體上平坦之互連(對於在延伸力之方向上對準之互連)。在畫面 5 至 8 中釋放系統，且畫面 8 具有與畫面 1 中所示之幾何形狀及組態等效的幾何形狀及組態。定標線條為 0.2 mm。

圖 20 能夠與彎曲基板以及平坦基板保形接觸之"氣泡印模"或"氣球印模"設備。

圖 21 能夠與球面彎曲及平坦表面相符之另一設備為可延伸球面模製之印模。抵靠彎曲表面(在此實例中為凹入透鏡)澆鑄印模且將其移除。使印模延伸以使其表面大體上變平，可將互連轉移至該表面。

圖 22 在"氣泡"或"氣球"印模上之延伸循環期間之可延伸彎曲矽陣列。在此實例中，鄰近接觸焊墊之間的互連包含兩個波狀互連(厚度為 290 nm 之 Si)。延伸測試使用氣泡擴

展來提供多向延伸。最右側畫面處於最大延伸中，且底部兩幅畫面展示當移除延伸力時，互連鬆弛回至左上部畫面所示的其延伸之前的組態。

圖 23 經由氣球印模而印刷至塗佈有黏著劑 (PDMS 或 SU-8) 之玻璃透鏡上之矽。

圖 24 概括用於設計半導體奈米纖帶中之 3 維彎曲形狀之處理步驟。A 製造 UVO 遮罩且使用其在 PDMS 基板上圖案化表面化學。B 形成彎曲 GaAs 纖帶且將其嵌入於 PDMS 中。C 彎曲 GaAs 纖帶對延伸及壓縮之回應。D 使用 a 及 b 中之程序而形成之樣本的 SEM 影像。用於產生此樣本之預加應變為 60%，其中 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 且 $W_{in}=400\text{ }\mu\text{m}$ 。

圖 25 藉由使用 33.7% 之預加應變且以 (A) $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 及 $W_{in}=190\text{ }\mu\text{m}$ ；及 (B) $W_{act}=100\text{ }\mu\text{m}$ 及 $W_{in}=100\text{ }\mu\text{m}$ 而形成於 PDMS 基板上的彎曲之側視輪廓。兩個樣本均由於纖帶自 PDMS 之分離而在非活性區域中顯示彎曲。具有較小峰之正弦波僅形成於活性區域中，其中 $W_{act}=100\text{ }\mu\text{m}$ 。此等兩個樣本之比較指示將 W_{act} 選擇為小於一臨界值避免較小波狀結構之形成。

圖 26 嵌入於 PDMS 中之彎曲 GaAs 纖帶在顯微切片之後的側視影像。此影像展示 PDMS 完全填充纖帶與下伏基板之間的間隙。在此情況下之彎曲以 60% 之預加應變且以 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 及 $W_{in}=300\text{ }\mu\text{m}$ 而形成。在此等彎曲纖帶之表面上澆鑄之 PDMS 預聚物在烘箱中於 65°C 下固化 4 小時。

圖 27 彎曲 (A 及 D) GaAs 及 (B、C) Si 纖帶之側視輪廓的光學

顯微相片。A形成於以 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 及 $W_{in}=190\text{ }\mu\text{m}$ ，以不同預加應變：11.3%、25.5%、33.7%及56.0%(自頂部至底部)而經圖案化之PDMS上的GaAs織帶結構。對於 $\varepsilon_{pre}=33.7\%$ 及56.0%之虛線為以數學方法預測之互連幾何形狀。B形成於經預加應變至50%且以 $W_{act}=15\text{ }\mu\text{m}$ 及 W_{in} 為350、300、250、250、300及350 μm (自左向右)而經圖案化之PDMS基板上的Si織帶結構。藉由使樣本以45之角度傾斜而獲得影像。C形成於經預加應變至50%且以黏著位點之平行線($W_{act}=15\text{ }\mu\text{m}$ 且 $W_{in}=250\text{ }\mu\text{m}$)而經圖案化之PDMS基板上的Si織帶結構，該等平行線以相對於織帶之長度成30之角度而定向。藉由使樣本以75之角度傾斜而獲得影像。D形成於經預加應變至60%，具有 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 及不同 W_{in} (100、200、300及400 μm (自頂部至底部))之基板上的GaAs織帶結構。

圖28嵌入於PDMS中之彎曲GaAs織帶的延伸及壓縮。A延伸至拉伸應變之不同水準(正%)的單一彎曲織帶之影像。斷裂在接近50%時發生。B壓縮至壓縮應變之不同水準(負%)的單一彎曲織帶之影像。對於大於~-15%之壓縮應變，小、短週期波狀幾何形狀出現於彎曲之高峰處。C壓縮至壓縮應變之不同水準的單一彎曲織帶之影像。此等情況下之彎曲係以60%之預加應變，以 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 且 $W_{in}=400\text{ }\mu\text{m}$ (A、B)及以 $W_{act}=10\text{ }\mu\text{m}$ 且 $W_{in}=300\text{ }\mu\text{m}$ (C)而形成。每一畫面中之紅線及箭頭指示同一織帶上之相同位置以突出顯示機械變形。插圖提供標有白框之區段的放大影像，其清

楚展示在高壓縮應變下裂縫之形成。根據下式而計算對應

$$\text{於延伸或壓縮程度之數字：} \left| \frac{L_{\text{projected}}^{\text{max}} - L_{\text{projected}}^0}{L_{\text{projected}}^0} \right| * 100\%$$

圖 29 具有兩個彎曲 GaAs 纖帶陣列之層之樣本的相片。以逐層機制來製造該結構。第一個 GaAs 纖帶之層 (以 60% 之預加應變且以 $W_{\text{act}}=10 \mu\text{m}$ 及 $W_{\text{in}}=400 \mu\text{m}$ 而界定之彎曲幾何形狀) 嵌入於 PDMS 中。第二個彎曲纖帶之層藉由使用 50% 之預加應變且以 $W_{\text{act}}=10 \mu\text{m}$ 及 $W_{\text{in}}=300 \mu\text{m}$ 而形成於此基板之表面上。

圖 30 PDMS 之表面上及 PDMS 之基質中的彎曲纖帶之撓曲。A-C 為採用較低放大率之光學顯微影像 (左上部圖框) 及較高放大率之光學顯微影像 (右側圖框) 及對 PDMS 上之具有 (A) 凹入, (B) 平坦及 (C) 凸起表面之彎曲 GaAs 纖帶的示意性說明 (左下部圖框)。c 中之定標線條適用於 a 及 b。d 為嵌入於 PDMS 中之彎曲纖帶在撓曲之前 (左側) 及之後 (右側) 的影像。頂部及底部圖框分別展示頂部及底部表面之彎曲。右側影像中之定標線條亦適用於左側影像。彎曲纖帶以 60% 之預加應變且以 $W_{\text{act}}=10 \mu\text{m}$ 及 $W_{\text{in}}=400 \mu\text{m}$ 而形成。

圖 31 可延伸金屬 - 半導體 - 金屬光偵測器 (metal-semiconductor-metal photodetector, MSM PD) 之表徵。A 對彎曲 PD 之幾何形狀 (頂部)、等效電路 (中部) 及彎曲 PD 在延伸之前及期間的光學影像 (底部) 之示意性說明。B 自藉由 IR 燈以不同輸出強度而輻射之彎曲 PD 記錄的電流 (I)-電壓

(V)曲線。以恆定之亮度及不同程度的延伸(C)或壓縮(D)而說明PD之I-V特徵。

圖32半球彈性體轉移"印模"可將互連之Si CMOS "小晶片"自習知晶圓起離，且接著將其幾何形狀變換為半球形。小晶片之間的"上推"互連適應與此平面至彎曲表面之變換相關聯的應變。

圖33互連之CMOS小晶片自半球印模向匹配的半球設備基板之轉移。光可固化黏著劑層使CMOS結合至設備基板且亦使表面平面化。

圖34具有夾具、致動器及視覺系統，與半球印模相容之印刷器裝置。

圖35半球印模上藉由"上推"織帶互連而電連接之單晶矽島狀物的可壓縮陣列。

圖36經"塗墨"至具有~2 cm之曲率半徑之半球印模之表面上的互連之單晶矽島狀物之陣列之光學影像。

圖37可用於半球印模之各種聚矽氧彈性體之應力/應變曲線。對小於20%之應變的線性、純彈性回應係重要的。

圖38對具有0.57 mm之最初均勻厚度之半球印模中的球形至平面之變換之有限元模型化。

圖39對用於製造彈性體支撐物上之二維"波狀"半導體奈米薄膜之步驟的示意性說明。

圖40(a-f)矽奈米薄膜中之2維波狀結構在其形成期間之各個階段之光學顯微相片。插圖展示二維功率譜，(g)低放大率的完全形成之結構之影像。對於此樣本，矽之厚度為

100 nm，其具有約 $4 \times 4 \text{ mm}^2$ 之橫向尺寸，基板為PDMS且熱誘發之預加應變為3.8%。(h)對應於圖框(a-f)之短波長之曲線，及(i)於得自圖框(g)之各個點處估計的長波長之直方圖。

圖 41 PDMS上之2維波狀Si奈米薄膜之AFM(a)及SEM(b-d)影像(傾斜角 60°)。矽之厚度為100 nm，且熱預加應變為3.8%。此等影像突出顯示波狀圖案之高度週期性性質、如由在Si與PDMS之接近於Si中蝕刻之孔洞之邊緣處可見的密切接觸而顯見之Si與PDMS之間良好結合，及波紋結構與此等孔洞之位置之間相關性的缺失。

圖 42(a)PDMS上之以3.8%之熱預加應變形成、具有各種厚度(55 nm、100 nm、260 nm、320 nm)之2維波狀Si奈米薄膜之光學顯微相片，及(b)短波長及振幅對Si厚度之依賴性。

圖 43(a)在於三個不同定向上施加之不同單軸應變下的2維波狀Si奈米薄膜之光學顯微相片。此等樣本由PDMS上之以3.8%之熱預加應變形成、具有100 nm之厚度的Si薄膜組成。於延伸前之鬆弛狀態(頂部圖框)、延伸後之鬆弛狀態(底部圖框)及在1.8%之單軸施加的拉伸應變下(頂部中部圖框)及3.8%之單軸施加之拉伸應變下(底部中部圖框)收集該等影像，(b)短波長對在三個不同方向上施加之應變之依賴性。

圖 44 2維波狀Si奈米薄膜之不同區域之AFM影像，其展示接近薄膜之邊緣處的區域(頂部圖框)、稍稍遠離此邊緣

區域之區域(中部圖框)及接近薄膜的中央之區域(底部圖框)之一維波狀幾何特徵。此等樣本由PDMS上之以3.8%之熱預加應變形成、具有100 nm之厚度的Si薄膜組成。

圖45具有1000 μm 之長度且具有100 μm 、200 μm 、500 μm 及1000 μm 之寬度的2維波狀Si奈米薄膜之光學顯微相片。此等薄膜均具有100 nm之厚度且以(a)2.3%及(b)4.8%之熱預加應變而形成於同一PDMS基板上。(c)對於類似薄膜，邊緣效應長度對預加應變之依賴性。

圖46具有不同形狀之2維波狀Si奈米薄膜之光學顯微相片：(a)圓形、(b)橢圓形、(c)六邊形及(d)三角形。此等薄膜均具有100 nm之厚度且以4.8%之熱預加應變而形成於PDMS上。

圖47具有經設計以利用邊緣效應來在平坦島狀物之互連陣列中提供2維可延伸性之形狀的Si奈米薄膜之波狀結構之光學顯微相片。在此處說明之兩種情況中，Si為100 nm厚，方塊為100 μm ×100 μm 且纖帶連接為30 μm ×150 μm 之線。預加應變為2.3%(a、e)及15%(c、g)。展示(a、c、e、g)之纖帶及方塊之選定區域的SEM影像(75°之傾斜角)分別展示於(b、d、f、h)中。高放大率SEM影像之插圖展示b及d中之具有波紋的凸起區域。

圖48為PDMS基板波紋上之2維波狀Si奈米薄膜之樣本(100 nm厚，4×5 mm²及3.8%之熱預加應變)的相片(頂部圖框)，且(i)為邊緣處之1維波紋，(ii)為內部區域處之魚骨狀波紋且(iii)為中央處之無序魚骨狀波紋。定標線條為50

μm。

圖 49 對魚骨狀波紋結構中之特徵性長度之示意性說明。

圖 50 魚骨狀波紋及 1 維波紋處作為所施加之熱預加應變之函數的 Si 應變。在實驗中藉由 $\epsilon_{Si} = (L - \lambda) / \lambda$ 來量測 Si 應變，其中 L 及 λ 為 AFM 表面輪廓中之表面及水平距離。

圖 51 延伸測試 ($\sim \epsilon_{Si} = 4.0\%$) 之循環後的魚骨狀波紋之光學顯微影像。以 100 nm 厚之 Si 薄膜及 3.8% 之雙軸熱預加應變來製備測試樣本。魚骨狀波紋在高達 15 次的延伸測試之循環之後恢復為具有與最初相當類似的結構，除了源自薄膜裂縫之一些缺陷。

圖 52 對藉由應用單軸拉伸應變而進行的魚骨狀波紋之 "展開" 之示意性說明。壓縮應變 ϵ_{cp} 係歸因於在拉伸應變為 ϵ_{st} 之情況下的柏松效應 (Poisson effect)。

圖 53 魚骨狀波紋在作為雙軸延伸測試之加熱及冷卻過程期間的形態改變之光學顯微影像。以 100 nm 厚之 Si 薄膜及 2.9% 之雙軸熱預加應變來製備測試樣本。

圖 54 概述製造波狀可延伸電極之一方法，該方法係藉由於結構化波狀母體上沈積，隨後在彼母體上澆鑄一印模，使印模固化，且藉此在釋放後即將電極轉移至母體。

圖 55 提供藉由圖 4 中之方法結合圖 54 中之方法而製備的在波狀 PDMS 上之可延伸金屬電極 (Au, 300 nm 厚) 之影像。底部畫面為可延伸波狀金屬電極的作為所施加之拉伸應變 (高達 30%) 之函數的量測得之電阻資料之圖。

圖 56 為本發明之方法用於製造可撓性可延伸 iLED 條帶照

明燈之應用之實例。A為說明設備能夠大程度地撓曲之設備的顯微相片，且在此實例中撓曲半徑為0.85 cm。B提供波狀PDMS基板上之可延伸金屬之橫截面圖(頂部畫面，定標線條為40 μm)及俯視圖(底部畫面，定標線條為3 mm)。金屬能夠延伸約30%而無物理特性之顯著降級。C為局部應變對PDMS上之正弦波狀金屬互連(展示於B中)之波長(方塊，左側軸)及振幅(圓形，右側軸)的影響之圖。隨著應變增大，存在金屬之波長之相應增大及金屬之振幅的相應減小。

圖57對用以得到異質三維電子元件之基於印刷半導體奈米材料之方法的示意性說明。該製程涉及獨立地形成於源基板上之奈米管、奈米線、奈米纖帶或其他活性奈米材料之集合向共用設備基板的重複轉印以產生超薄多層堆疊幾何形狀的互連電子元件。

圖58(A)對於半導體使用印刷矽奈米纖帶之單晶矽金屬氧化物場效電晶體(MOSFET)之陣列之三維多層堆疊的光學顯微相片。此影像之底部(標有第一)、中部(標有第二)及頂部(標有第三)部分分別對應於設備之具有一個、二個及三個層之區域。(B)示意性橫截面圖(頂部)及傾斜圖(底部)。S、D及G分別指代源極、汲極及閘極電極(均以金色而展示)。亮藍及暗藍區域對應於矽纖帶之摻雜及未摻雜區域；紫色層為 SiO_2 閘極介電質。(C)於如(A)及(B)中所示之設備基板的設備基板上藉由共焦顯微法而收集之三維影像(左側圖框：俯視圖；右側圖框：傾斜圖)。對層進行著

色(金色：頂層；紅色：中部層；藍色：底層；矽：灰色)以易於觀察。(D)該等層中之每一者中的Si MOSFET之電流-電壓特徵，其展示極佳效能($470 \pm 30 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 之遷移率)及特性之良好均勻性。通道長度及寬度分別為19及200 μm 。

圖 59(A)三層堆疊之三維異質式電子設備的光學顯微相片，該等電子設備包括Ga_N奈米纖帶HEMT、Si奈米纖帶MOSFET及SWNT網路TFT。(B)藉由共焦顯微法而收集之三維影像。對層進行著色(金色：頂層，Si MOSFET；紅色：中部層，SWNT TFT；藍色：底層)以易於觀察。(C)第一層上之Ga_N設備(通道長度、寬度及閘極寬度分別為20 μm 、170 μm 及5 μm)、第二層上之SWNT設備(通道長度及寬度分別為50 μm 及200 μm)及第三層上之Si設備(通道長度及寬度分別為19 μm 及200 μm)的電特徵。(D)每一層中之設備的作為塑膠基板之撓曲半徑之函數的正規化轉導(gm/g_{0m})(黑色方塊：Si MOSFET；紅色圓形：SWNT TFT；綠色三角：Ga_N HEMT)(左側)。撓曲系統及探測裝置之影像(右側)。

圖 60(A)聚醯亞胺基板上之3維矽NMOS反相器之印刷陣列之影像。反相器由藉由電通道結構互連之兩個不同級上之MOSFET(通道長度為4 μm ，負載與驅動器寬度比為6.7且驅動器寬度為200 μm)組成。右上部之影像提供藉由左側圖框中之紅色框指示之區域的放大視圖。右下部之曲線圖展示典型反相器之轉移特徵。(B)使用p通道SWNT

TFT(通道長度及寬度分別為 30 μm 及 200 μm)及 n 通道 Si MOSFET(通道長度及寬度分別為 75 μm 及 50 μm)之印刷互補反相器之轉移特徵。插圖提供反相器之光學顯微相片(左側)及電路示意圖(右側)。(C)與 Si MOSFET(通道長度及寬度分別為 9 μm 及 200 μm)整合之 GaAs MSM(通道長度及寬度分別為 10 μm 及 100 μm)在藉由紅外光源以 850 nm 而照射的自黑暗至 11 μW 之不同位準處之電流-電壓回應。插圖展示光學影像及電路圖。

圖 61 用於轉印、能夠重合至 $\sim 1\ \mu\text{m}$ 內的自動台之影像。

圖 62(A)聚醯亞胺基板上之 Si MOSFET 及 GaN HEMT 之三維異質整合陣列的光學顯微相片。右側插圖展示橫截面示意圖。電極(金色)、 SiO_2 (PEO; 紫色)、Si(亮藍: 未摻雜; 暗藍: 摻雜)、GaN(暗綠: 歐姆接觸點; 亮綠: 通道)、聚醯亞胺(PI; 褐色)及聚胺基甲酸酯(PU; 淺棕色)均得以展示。(B)典型 Si MOSFET(通道長度及寬度分別為 19 μm 及 200 μm)及 GaN HEMT(通道長度、寬度及閘極寬度分別為 20 μm 、170 μm 及 5 μm)之電流-電壓特徵。分別在 $V_{\text{dd}}=0.1\ \text{V}$ 及 $V_{\text{dd}}=2\ \text{V}$ 下量測左側圖框中關於 Si 及 GaN 之資料。

圖 63(A)聚醯亞胺基板上之 Si MOSFET 及 SWNT TFT 之三維異質整合陣列的光學顯微相片。右側插圖展示橫截面示意圖。電極(金色)、環氧樹脂(青色)、 SiO_2 (PEO; 紫色)、Si(亮藍: 未摻雜; 暗藍: 摻雜)、SWNT(灰色)、聚醯亞胺(PI; 褐色)及固化聚醯亞胺(淺棕色)均得以展示。(B)典型

SWNT TFT(通道長度及寬度分別為 $75\ \mu\text{m}$ 及 $200\ \mu\text{m}$) 及典型 Si MOSFET(閘極長度及通道寬度分別為 $19\ \mu\text{m}$ 及 $200\ \mu\text{m}$) 之電流-電壓特徵。分別在 $V_{dd}=-0.5\ \text{V}$ 及 $V_{dd}=0.1\ \text{V}$ 下量測左側圖框中關於 SWNT 及 Si 之資料。

圖 64(A) 聚醯亞胺基板上之 Si MOSFET、SWNT TFT 及 GaN HEMT 之三維異質整合陣列的橫截面示意性說明。(B) Si MOSFET(通道寬度= $200\ \mu\text{m}$ ，黑線：通道長度= $9\ \mu\text{m}$ ，紅色： $14\ \mu\text{m}$ ，綠色： $19\ \mu\text{m}$ ，藍色： $24\ \mu\text{m}$) 中之若干者的轉移特徵、有效遷移率及開關比，(C) SWNT TFT (通道寬度= $200\ \mu\text{m}$ ，黑線：通道長度= $25\ \mu\text{m}$ ，紅色： $50\ \mu\text{m}$ ，綠色： $75\ \mu\text{m}$ ，藍色： $100\ \mu\text{m}$) 之轉移特徵、有效遷移率及開關比及 (D) GaN HEMT(通道長度、寬度及閘極寬度分別為 $20\ \mu\text{m}$ 、 $170\ \mu\text{m}$ 及 $5\ \mu\text{m}$) 之轉移特徵、轉導及開關比。

圖 65(A) 建立於矽晶圓基板上之 SWNT-Si CMOS 反相器的橫截面之示意結構。(B) 形成 CMOS 反相器之 n 通道 Si MOSFET 及 p 通道 SWNT TFT 之轉移特徵及 I-V 特徵。(C) 反相器之計算而得之轉移特徵及 Si 與 SWNT 電晶體之 I-V 特徵。

圖 66(A) 建立於聚醯亞胺基板上之 GaAs MSM-Si MOSFET IR 偵測器的橫截面之示意結構及電路示意圖。(B) GaAs MSM IR 偵測器 ($L=10\ \mu\text{m}$ ， $W=100\ \mu\text{m}$) 之電流-電壓特徵及 Si MOSFET ($L=9\ \mu\text{m}$ ， $w=200\ \mu\text{m}$) 在 $3\ \text{V}$ 電源的情況下之轉移特徵及 I-V 特徵。(C) GaAs MSM 之計算而得之 IV 特徵及與 Si MOSFET 整合之 GaAs MSM 在 $3\ \text{V}$ 電源的情況下

之 I-V 回應。

【主要元件符號說明】

10	金屬特徵/SU-8/互連
20	基板
22	波狀特徵
24	銳緣/銳緣谷
25	分隔物(裂縫)
26	PR/光可固化環氧樹脂
30	彈性體印模/基板/彈性體基板
32	波狀表面/波狀彈性體基板表面
34	彈性體印模/銳緣基板
36	第二彈性體印模
40	波狀或彎曲幾何形狀/電互連
50	Su-8
60	設備組件
70	接觸焊墊/設備組件
90	中央部分
92	未結合區域
100	第一末端
102	結合區域
110	第二末端
112	界面
120	橋接中央部分高峰
130	橋接組態

140	單一柵格組態
150	花形組態
160	互連
200	凸起
210	凹入表面
250	電極
300	外殼腔室
310	腔室容積/外殼容積/腔室

五、中文發明摘要：

在一態樣中，本發明提供可延伸且視情況可印刷之半導體及電子電路，其能夠在延伸、壓縮、折曲或以其他方式變形時提供良好效能。對於一些應用為較佳之可延伸半導體及電子電路，除可延伸以外亦為可撓性的，且因此能夠顯著伸長、折曲、撓曲或進行沿一或多個軸之其他變形。另外，本發明之可延伸半導體及電子電路可調適成寬廣範圍之設備組態，以提供具有充分可撓性之電子及光電子設備。

六、英文發明摘要：

In an aspect, the present invention provides stretchable, and optionally printable, semiconductors and electronic circuits capable of providing good performance when stretched, compressed, flexed or otherwise deformed. Stretchable semiconductors and electronic circuits preferred for some applications are flexible, in addition to being stretchable, and thus are capable of significant elongation, flexing, bending or other deformation along one or more axes. Further, stretchable semiconductors and electronic circuits of the present invention may be adapted to a wide range of device configurations to provide fully flexible electronic and optoelectronic devices.

七、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第(1A)圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

(無元件符號說明)

八、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

(無)

十、申請專利範圍：

1. 一種用於建立與由一彈性體基板所支撐的一第一設備組件及一第二設備組件之電接觸之可延伸互連，該可延伸互連包含：

結合至該彈性體基板之一第一末端；

結合至該彈性體基板之一第二末端；及

安置於該第一末端與該第二末端之間的中央部分；

其中可延伸互連之該第一末端及該第二末端朝向彼此之移動在該中央部分產生一彎曲且在該彈性體基板與該中央部分產生大於或等於 100 nm 且小於或等於 1 mm 之一分離距離；

其中該第一設備組件及該第二設備組件由該彈性體基板支撐；且

其中該可延伸互連電連接該第一設備組件與該第二設備組件，且當該可延伸互連之該第一末端及該第二末端彼此相對移動時維持電導率。

2. 如請求項 1 之可延伸互連，其中該中央部分處於應變下。
3. 如請求項 1 之可延伸互連，其中該互連中央部分包含一或多個結合區域，以形成不與該基板實體接觸之複數個不同彎曲部分區域。
4. 如請求項 3 之可延伸互連，其中該等不同彎曲部分區域中之至少一者的分離距離不同於另一彎曲部分區域之分離距離。

5. 如請求項1之可延伸互連，其中該互連包含一織帶。
6. 如請求項5之可延伸互連，其中該織帶具有一大於100 nm之厚度。
7. 如請求項6之可延伸互連，其中該織帶具有一在約300 nm與1 mm之間的厚度。
8. 如請求項1之可延伸互連，其中該互連具有一包含一中央部分高峰之橋接組態，三個或三個以上之互連自該高峰延伸。
9. 如請求項1之可延伸互連，其中該第一設備組件或該第二設備組件包含一與該等互連末端中之一者電接觸之接觸焊墊。
10. 如請求項9之可延伸互連，其中一額外設備組件與該接觸焊墊電接觸。
11. 如請求項1之可延伸互連，其中該彈性體基板為聚二甲基矽氧烷。
12. 如請求項1之可延伸互連，其能夠調適一基板高達25%之應變，同時保持電導率及與該第一設備組件及該第二設備組件之電接觸。
13. 如請求項1之可延伸互連，進一步包含：
一囊封層，其嵌埋該互連的至少一部份，其中該囊封層係由該基板所支撐。
14. 如請求項13之可延伸互連，其中該囊封層係一彈性體。
15. 如請求項14之可延伸互連，其中該彈性體係對聚二甲基矽氧烷。

16. 如請求項10之可延伸互連，其中該額外設備組件係選自由以下各項組成之群：一薄膜、感應器、電路元件、控制元件、微處理器、傳感器及其組合。
17. 一種包含複數個如請求項1之可延伸互連之設備陣列，其中每一可延伸互連提供一對設備組件之間的電接觸。
18. 如請求項17之設備陣列，其中該陣列具有一柵格組態、花形組態、橋接組態或其任一組合。
19. 如請求項17之設備陣列，其中每一設備組件藉由複數個可延伸互連而連接至一鄰近設備組件。
20. 如請求項19之設備陣列，其中該對設備組件之至少一設備組件連接至八個可延伸互連。
21. 如請求項17之設備陣列，其中至少一可延伸互連在一不同於另一互連的方向上定向。
22. 如請求項17之設備陣列，其中該陣列之至少一部分包含彼此在一方向上平行對準之複數個可延伸互連。
23. 如請求項22之設備陣列，其中該複數個平行之可延伸互連中之至少一者與該等可延伸互連中之至少另一者反相。
24. 如請求項17之設備陣列，其中該複數個可延伸互連在兩個或兩個以上的方向上定向。
25. 如請求項24之設備陣列，其中該等可延伸互連之該定向係在兩個彼此垂直之方向上。
26. 如請求項17之設備陣列，其中該設備組件包含兩個或兩個以上鄰近層，其中每一層包含複數個可延伸互連。

27. 如請求項17之設備陣列，其能夠經受一高達約150%之應變而不斷裂。
28. 如請求項17之設備陣列，其中該基板具有一表面，該表面具有為彎曲之至少一部分。
29. 如請求項28之設備陣列，其中該表面具有為凹入或凸起之至少一部分。
30. 如請求項28之設備陣列，其中該表面為半球狀。
31. 如請求項17之設備陣列，其中該設備組件為一可延伸之光偵測器、顯示器、發光器、光伏打裝置、薄片掃描器、LED顯示器、半導體雷射、光學系統、大面積電子元件、電晶體或一積體電路中之一或多者。
32. 一種製造一用於建立與設備組件之電接觸之彎曲互連之方法，該方法包含：
 - 提供一具有一表面之彈性體基板；
 - 在該彈性體基板表面、該互連或兩者上施加結合位點之一圖案；
 - 對該彈性體基板施加一力以產生對該基板之一應變；
 - 提供一互連；
 - 使該互連與具有結合位點之該圖案的該基板表面接觸，以使得該等互連於該等結合位點處結合至該基板表面；及
 - 移除對該基板之該力以鬆弛該基板；藉此產生一彎曲互連，其具有在該等結合位點處結合至該基板之末端及一處於彎曲的一撓曲組態且不與該基板

實體接觸之中央部分。

33. 如請求項32之方法，其中藉由向該彈性體基板表面塗覆一可固化光聚合物而提供結合位點之該圖案，其中在具有一自10 μm 與20 μm 之間的一範圍選出之寬度 W_{act} 且藉由一自200 μm 與400 μm 之間的一範圍選出之間隔距離 W_{in} 隔開之複數個條帶中塗覆該聚合物。
34. 如請求項32之方法，其中該中央部分處於應變下。
35. 如請求項32之方法，其進一步包含將該互連之至少一部分囊封於一囊封材料中。
36. 如請求項32之方法，其中複數個互連經提供且與該基板表面接觸以產生複數個互連，其中該等互連末端中之每一者結合至該基板，且該互連之該中央部分處於一撓曲組態中且與該彈性體基板實體隔開，藉此產生互連之一圖案。
37. 如請求項36之方法，其中互連之該圖案係選自由一柵格組態、花形組態、橋接組態及其任一組合組成之群。
38. 如請求項37之方法，其中該互連具有一大於約300 nm及小於約1 mm之厚度。
39. 如請求項37之方法，其中該彎曲互連具有一對應於該互連自該基板之一最大豎直移位的振幅，且該振幅係選自一在100 nm與1 mm之間的範圍。
40. 如請求項39之方法，其中該互連具有一長度及一寬度，其中該寬度、該振幅或者該寬度及該振幅沿該互連之該長度而變化。

41. 如請求項32之方法，其中該施加之力在該彈性體基板中產生一應變，該應變選自一在20%與100%之間的範圍。
42. 如請求項32之方法，其中該互連之一末端電連接至該設備組件，且該基板能夠延伸高達約100%，壓縮高達約50%或以低達5 mm之一曲率半徑而撓曲而無互連斷裂。
43. 如請求項32之方法，其中該互連包含GaAs或Si。
44. 如請求項32之方法，其進一步包含將該互連自該彈性體基板轉移至一設備基板。
45. 一種製造一可延伸且可撓曲之互連之方法，其包含：
 - a) 提供一在一表面上具有波狀特徵之基板；
 - b) 藉由旋塗一聚合物以部分填充凹入特徵來使該等波狀特徵平滑；
 - c) 抵靠該經旋塗之基板澆鑄一聚合印模；
 - d) 自該基板移除該聚合印模以使一聚合印模波狀表面曝露；及
 - e) 將金屬沈積至該聚合印模波狀表面上；藉此製造一可延伸且可撓曲之互連。
46. 一種製造一可延伸且可撓曲之互連之方法，其包含：
 - a) 提供一在一表面上具有波狀特徵之基板；
 - b) 藉由旋塗一聚合物以部分填充凹入特徵來使該等波狀特徵平滑，從而產生一平滑波狀基板；
 - c) 將金屬特徵沈積至該平滑波狀基板上且對該等金屬特徵進行圖案化；
 - d) 抵靠該平滑波狀金屬化基板澆鑄一聚合印模；及

- e) 自該基板移除該聚合印模，藉此將該等金屬特徵轉移至該印模，藉此製造一可延伸且可撓曲之互連。
47. 一種在一印模表面上製造一上推互連之方法，其包含：
- a) 在一基板表面上提供一互連；
 - b) 提供一具有一彎曲幾何形狀之彈性體印模；
 - c) 將該互連自該基板轉移至該印模，其係藉由以下步驟而進行：
 - i) 向該印模施加一變形力以提供一大體上平坦的印模表面；
 - ii) 使該經應變之印模與該基板上之該互連接觸；
 - iii) 藉由在一遠離該基板之方向上起離該印模而將該互連自該基板移除，藉此將該互連自該基板表面轉移至該彈性體印模表面；及
 - d) 移除該變形力以使該印模鬆弛為該彎曲幾何形狀，藉此製造一上推互連。
48. 如請求項47之方法，其中當鬆弛該印模時，該彎曲幾何形狀至少部分為半球狀的。
49. 如請求項48之方法，其中該印模具有一圓形周界，且進一步包含一圍繞該圓形周界之模製輪緣以在該變形力施加期間向該印模賦予一徑向力。
50. 如請求項47之方法，其進一步包含將該上推互連轉移至一設備基板上，該轉移包含：
- a) 提供一具有一彎曲表面形狀之設備基板，該彎曲表面形狀對應於該印模彎曲幾何形狀；

- b) 向該設備基板彎曲表面塗覆一黏著劑或黏著前驅物以在該設備基板表面上產生黏著劑或黏著前驅物之一液態膜層；及
- c) 使具有該上推互連之該印模表面與設備基板上的黏著劑之該層接觸，其中在該接觸之後，該黏著液態層即流動以符合該上推互連之該形狀且使該互連結合至該設備基板。

51. 如請求項50之方法，其進一步包含移除該彈性體印模。

52. 如請求項50之方法，其中該黏著劑包含一光聚合物，且該光聚合物黏著層藉由在該印模表面與設備基板之接觸步驟期間或之後施加電磁輻射而得以固化。

53. 如請求項47之方法，其中該印模包含聚二甲基矽氧烷，其對於高達約40%之應變具有一線性及彈性回應。

54. 如請求項47之方法，其中該互連為一可延伸電極、可延伸被動式矩陣LED顯示器或一光偵測器陣列之部分。

55. 一種可延伸電子設備，其包含藉由如請求項32之方法製成之任何一或多個互連，其中該等互連使一對設備組件電連接，且該電子設備係選自由以下各項組成之群：一可延伸或可撓曲之電極、被動式矩陣LED、太陽能電池、集光器陣列、生物感應器、化學感應器、光電二極體陣列及半導體陣列。

56. 一種製造一雙軸可延伸半導體薄膜之方法，其包含：

- a) 在一基板上提供一半導體奈米薄膜材料，其中該材料之厚度在約40 nm與約600 nm之間；

- b) 提供一彈性體基板；
 - c) 活化該彈性體基板之一表面；
 - d) 向該彈性體基板施加一雙軸應變，藉此使該彈性體基板在兩個方向上延伸；
 - e) 使該經活化且經延伸之彈性體基板與基板上之該半導體材料接觸；
 - f) 將該彈性體基板剝離支撐該半導體之該基板，藉此將該半導體奈米薄膜轉移至該彈性體基板；及
 - g) 解除該彈性體基板上之該雙軸應變，藉此產生一具有一二維波狀結構之奈米薄膜。
57. 如請求項56之方法，其中該雙軸應變係藉由加熱該彈性體基板而產生。
58. 如請求項56之方法，其中該彈性體基板包含聚二甲基矽氧烷，且該活化步驟係藉由於一含臭氧環境中使該彈性體基板曝露於具有一在240 nm與260 nm之間的波長之電磁輻射而進行。