



(19) 中華民國智慧財產局

(12) 發明說明書公告本

(11) 證書號數：TW I489523 B

(45) 公告日：中華民國 104 (2015) 年 06 月 21 日

(21) 申請案號：099127004

(22) 申請日：中華民國 95 (2006) 年 06 月 14 日

(51) Int. Cl. : **H01L21/20 (2006.01)**

(30) 優先權：2006/04/07 美國 60/790,104

(71) 申請人：美國伊利諾大學理事會 (美國) THE BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS (US)

美國

(72) 發明人：羅傑斯 約翰 A ROGERS, JOHN A. (US)；姜達榮 KHANG, DAHL-YOUNG (KR)；孫玉剛 SUN, YUGANG (CN)；米納德 艾坦尼 MENARD, ETIENNE (FR)

(74) 代理人：陳長文

(56) 參考文獻：

US 2003/0222282A1

US 2004/0192082A1

審查人員：許勝宗

申請專利範圍項數：44 項 圖式數：31 共 116 頁

(54) 名稱

用在橡膠基板上高效能電子組件之可延伸形式之單晶矽

A STRETCHABLE FORM OF SINGLE CRYSTAL SILICON FOR HIGH PERFORMANCE ELECTRONICS ON RUBBER SUBSTRATES

(57) 摘要

本發明提供當延伸、壓縮、撓曲或者以其他方式變形時能提供良好效能之可延伸、且視情況可印刷之半導體及電子電路。較佳用於某些應用的本發明之可延伸半導體及電子電路為可撓性的(除了為可延伸的之外)，且因此能顯著伸長、撓曲、彎曲或沿一或多個軸進行其他變形。另外，本發明之可延伸半導體及電子電路可經調適用於廣泛範圍的裝置組態以提供完全可撓性的電子及光電子裝置。

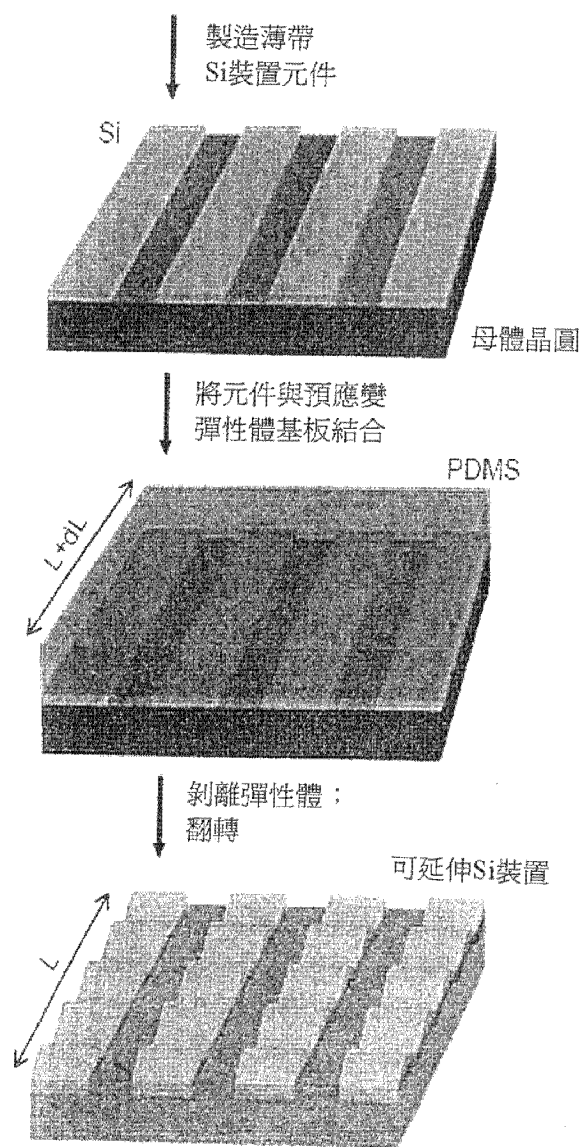


圖 10

六、發明說明：

【發明所屬之技術領域】

本發明係關於用在橡膠基板上高效能電子組件之可延伸形式之單晶矽。

【先前技術】

自1994年一印製的全聚合物電晶體之第一次演示以來，人們對在塑膠基板上包含可撓性積體電子裝置之一潛在的新類別電子系統產生了巨大的興趣。[Garnier, F., Hajlaoui, R., Yassar, A.及Srivastava, P., Science, 第265卷, 第1684-1686頁]近來，大量研究已針對發展新的用於可撓性塑性電子裝置之導體、介電質及半導體元件之溶液可處理材料。然而，可撓性電子裝置領域中之進步不僅由新的溶液可處理材料的發展來驅動，而且由新裝置組件幾何形態、高效裝置及裝置組件處理方法及可應用於塑膠基板之高解析度圖案化技術所驅動。預期此等材料、裝置組態及製造方法將在迅速出現之新型可撓性積體電子裝置、系統及電路中起到關鍵作用。

對可撓性電子裝置領域之興趣是由此技術提供之若干重要優勢而引起。首先，塑膠基板材料之機械耐用性提供不易損壞及/或不易受到由機械應力引起之電子效能降級的電子裝置。其次，此等基板材料之固有的可撓性允許將其整合為許多形狀，從而提供不可能藉由脆性的習知的基於矽之電子裝置來提供的大量有用裝置組態。最後，溶液可處理組件材料與塑膠基板之組合使得藉由能在大基板面積

上以低成本產生電子裝置之連續、高速、印製技術的製造成為可能。

然而，呈現良好電子效能之可撓性電子裝置之設計及製造存在若干顯著挑戰。首先，用於製造習知的基於矽之電子裝置的已良好發展的方法與大部分塑膠材料不相容。舉例而言，諸如單晶矽或鍺半導體之傳統的高品質無機半導體組件通常藉由在某些溫度(>攝氏1000度)下生長薄膜來處理，該等溫度顯著超過大部分塑膠基板的熔融或分解溫度。另外，大部分無機半導體在允許基於溶液之處理及傳送之適宜溶劑中本質地不可溶。其次，儘管許多非晶系矽、有機或混合有機-無機半導體可相容地併入塑膠基板中，且可在相對較低溫度下處理，但是此等材料不具有能提供具有良好電子效能之積體電子裝置之電子性質。舉例而言，具有由此等材料製造之半導體元件的薄膜電晶體顯示出比互補的基於單晶矽之裝置低大約三個數量級之場效應遷移率。作為此等侷限性之結果，可撓性電子裝置目前限於無需高效能的特定應用，諸如用於具有非發射性像素之主動矩陣平板顯示器之開關元件中及發光二極體中。

在擴展塑膠基板上的積體電子裝置之電子效能能力方面已獲得進步以將其適用性擴展至一更廣泛範圍之電子應用。舉例而言，已出現若干新型薄膜電晶體(TFT)設計，其與塑膠基板材料上之處理相容且顯示出顯著高於具有非晶系矽、有機或混合有機-無機半導體元件之薄膜電晶體之裝置效能特性。一類更高效能之可撓性電子裝置係基於

藉由對非晶系矽薄膜之脈衝雷射退火而製造之多晶矽薄膜半導體元件。雖然此類可撓性電子裝置提供增強之裝置電子效能特性，但是對脈衝雷射退火之使用限制了此等裝置製造的容易性及靈活性，進而顯著增加了成本。另一有希望之新型更高效能之可撓性電子裝置是使用諸如奈米線、奈米帶、奈米微粒及奈米碳管之溶液可處理奈米級材料作為若干宏觀電子及微電子裝置中之主動功能性組件之裝置。

離散單結晶奈米線或奈米帶之使用已被評估為於塑膠基板上提供顯示增強裝置效能特性之可印刷電子裝置的一可能之手段。Duan等人描述具有複數個作為半導體通道之可選擇性定向之單結晶矽奈米線或CdS奈米帶的薄膜電晶體設計 [Duan, X., Niu, C, Sahl, V., Chen, J., Parce, J., Empedocles, S.及Goldman, J., Nature, 第425卷, 第274 - 278頁]。該等作者報告一據稱可與塑膠基板上之溶液處理相容之製造過程，其中具有少於或等於150奈米之厚度的單結晶矽奈米線或CdS奈米帶被分散於溶液中，且使用流量定向對準方法將其組裝於一基板之表面上以產生薄膜電晶體之半導體元件。由該等作者提供之一光學顯微圖暗示所揭示之製造過程製備了呈大體上平行取向且間隔約500奈米至約1000奈米的多個奈米線或奈米帶之單層。儘管該等作者報告了個別奈米線或奈米帶之相對高的本質場效應遷移率 ($\approx 119 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)，但是總的裝置場效應遷移率近來已被判定為比由Duan等人報告之本質場效應遷移率值小

"大約兩個數量級"。[Mitzi, D.B, Kosbar, L.L., Murray, C.E., Copel, M. Afzali, A., Nature, 第428頁, 第299-303頁]。此裝置場效應遷移率比習知單結晶無機薄膜電晶體之裝置場效應遷移率低若干數量級, 且可能係歸因於使用Duan等人揭示之方法及裝置組態進行對準、緊密封裝及電接觸離散奈米線或奈米帶中的實際挑戰。

亦已探索了將奈米晶體溶液用作多晶系無機半導體薄膜之先驅體, 以將其作為在塑膠基板上提供呈現更高裝置效能特性之可印刷電子裝置之手段。Ridley等人揭示一溶液處理製造方法, 其中具有約2奈米尺寸之硒化鎘奈米晶體溶液在塑膠相容溫度下被處理以提供場效應電晶體之半導體元件。[Ridley, B.A., Nivi, B. 及 Jacobson, J.M., Science, 第286卷, 746-749 (1999)]該等作者報告一方法, 其中在硒化鎘奈米晶體溶液中的低溫晶粒生長提供包含數百奈米晶體之單晶區域。雖然Ridley等人報告了相對於具有有機半導體元件之比較裝置的改良之電子性質, 但是藉由此等技術達成的裝置遷移率($\approx 1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)比習知單結晶無機薄膜電晶體之裝置場效應遷移率低若干數量級。藉由Ridley等人之裝置組態及製造方法所達成之場效應遷移率的限制可能是由在個別奈米微粒之間建立之電接觸產生的。詳言之, 對用以穩定奈米晶體溶液及防止凝聚之有機端基的使用可阻止在鄰近奈米微粒之間建立良好電接觸, 此種良好電接觸對於提供高裝置場效應遷移率係必要的。

儘管 Duan 等人及 Ridley 等人提供用於在塑膠基板上製造薄膜電晶體之方法，所描述之裝置組態係包含諸如電極、半導體及/或介電質的機械剛性裝置組件之電晶體。選用具有良好機械性質之塑膠基板可提供能在延伸或扭曲定向中工作的電子裝置，然而，預期此種形變會在個別剛性電晶體裝置組件上產生機械應力。此機械應力可導致對個別組件之損傷，例如，裂紋，且亦可降級或中斷裝置組件之間的電接觸。

此外，由 Duan 等人、Ridley 等人及其他人發展之基於塑膠基板之電子系統是否提供對於許多重要裝置應用(包括可撓性感測器陣列、電子紙，及可佩帶電子裝置)為必要的機械延伸性並不明朗。雖然此等團隊展示了有能力承受由撓曲引起之變形的電子裝置，但是此等基於塑膠基板之系統不可能進行可觀的延伸而無損傷、機械失效或裝置效能之顯著降級。因此，此等系統不可能承受由膨脹或壓縮引起之變形，或承受等形覆蓋高度起伏之表面(諸如具有大曲率半徑的彎曲表面)所要求之變形。

如上述，預期可撓性電子裝置領域中之進步會在若干重要新技術及已有技術中起到關鍵作用。然而，可撓性電子裝置技術之此等應用之成功極大地取決於新材料、裝置組態及用於製造在撓曲、變形及彎曲構形中展示良好電子、機械及光學性質的積體電子電路及裝置之商業上可行的製造途徑之持續發展。特定言之，需要在延伸或收縮構形中展示有用之電子及機械性質的高效能、可機械延伸的材料

及裝置組態。

【發明內容】

本發明提供可延伸半導體及可延伸電子裝置、裝置組件及電路。如本文所使用，術語"可延伸"指材料、結構、裝置及裝置組件能承受應變而無破裂或機械失效。本發明之可延伸半導體及電子裝置係可延伸的，且因此能至少在某種程度上延伸及/或壓縮而無損壞、機械失效或裝置效能之顯著降級。較佳用於某些應用的本發明之可延伸半導體及電子電路為可撓性的(除了為可延伸的之外)，且因此能顯著伸長、撓曲，彎曲或進行沿一或多個軸之其他變形。

本發明之有用的可延伸半導體及電子裝置能伸長、壓縮、扭曲及/或膨脹而無機械失效。另外，本發明之可延伸半導體及電子電路即使當承受顯著應變(諸如大於或等於約0.5%，較佳1%且最好為2%的應變)時亦展示良好電子效能。可撓性的可延伸半導體及電子裝置、裝置組件及電路當處於撓曲、彎曲及/或變形狀態時亦顯示良好的電子效能。因為本發明之可延伸半導體元件及可延伸電子裝置、裝置組件及電路在撓曲、延伸、壓縮或變形的裝置定向中可提供有用之電子性質及機械耐用性，所以其適合廣泛範圍的裝置應用及裝置組態。

本發明之可延伸及/或可撓性半導體亦可(視情況)為可印刷的，且(視情況)可包含複合半導體元件，其具有一可操作地與其他結構、材料及/或裝置組件(諸如介電材料及層、電極及其他半導體材料及層)連接之半導體結構。本

發明包括具有可延伸及/或可撓性半導體之廣泛範圍之可延伸及/或可撓性電子及/或光電子裝置，包括(但不限於)電晶體、二極體、發光二極體(LED)、有機發光二極體(OLED)、雷射器、微機電裝置及奈米機電裝置、微流體裝置及奈米流體裝置、記憶體裝置，及系統層級積體電子電路(諸如互補邏輯電路)。

在一個態樣中，本發明提供當處於撓曲、膨脹、壓縮、彎曲及/或變形狀態中時可提供有用之功能性質之可延伸半導體元件。如本文所使用，表述"半導體元件"及"半導體結構"在本文中同等地使用且泛指任何半導體材料、組合物或結構，且特別包括高品質單晶及多晶半導體、經由高溫處理製造之半導體材料、摻雜半導體材料、有機及無機半導體及具有一或多種額外半導體組份及/或非半導體組份(諸如，介電層或材料及/或導電層或材料)的複合半導體材料及結構。

本發明之可延伸半導體元件包含一具有一支撐表面之可撓性基板及一具有一曲線內表面(例如，由該半導體結構之一彎曲構形提供的一曲線內表面)之半導體結構。在此實施例中，該半導體結構之至少一部分曲線內表面與該可撓性基板之支撐表面結合。具有本發明中 useful 之曲線內表面之例示性半導體結構包含彎曲結構。在本文中，"彎曲結構"指一具有由施加力而導致之曲線構形之結構。本發明中之彎曲結構可具有一或多個折疊區域、凸起區域及/或凹入區域。舉例而言，本發明中 useful 之彎曲結構可以一

捲曲構形、一皺褶構形、一翹稜構形及/或一波狀(意即波形)組態來提供。

彎曲結構(諸如具有曲線內表面之可延伸彎曲半導體結構及電子電路)可與諸如聚合物及/或彈性基板之可撓性基板以一其中該彎曲結構承受應變的構形來結合。在某些實施例中，該彎曲結構(諸如一彎曲帶狀結構)承受等於或小於約30%之應變，在較佳用於某些應用之實施例中承受等於或小於約10%的應變，及/或在較佳用於某些應用之實施例中承受等於或小於約1%之應變。在某些實施例中，該彎曲結構(諸如一彎曲帶狀結構)承受選自約1%至約30%之範圍之應變。

在一有用之實施例中，具有一曲線內表面之半導體結構包含一至少部分地與該支撐可撓性基板結合的可轉移半導體元件。在本文中，"可轉移半導體元件"係一能例如經由沈積技術、印刷技術、圖案化技術及/或其他材料轉移方法自一供體表面轉移至一受體表面之半導體結構。本方法中有用之可轉移半導體元件、複合物及裝置包括(但不限於)可印刷半導體元件。

適用之可撓性基板包括(但不限於)聚合物基板、塑膠基板及/或彈性基板。舉例而言，在一實施例中，本發明包含一經轉移且結合至一預應變之彈性基板之可轉移、且(視情況)可印刷之半導體元件。本發明之此態樣中的有用之轉移方法包括印刷技術，如接觸印刷或溶液印刷。彈性基板之隨後鬆弛在該可轉移且(視情況)可印刷之半導體元

件上產生一應變，從而導致(例如經由該半導體元件之彎曲及/或翹曲)該曲線內表面之形成。

在某些實施例中，製造(例如如上述)具有曲線內表面之半導體元件，且隨後將其自用於產生其曲線表面之彈性基板轉移至一不同可撓性基板且將其與該不同可撓性基板結合。本發明之此態樣之有用實施例包括一可轉移且(視情況)可印刷之半導體結構，其包含具有曲線內表面之彎曲半導體帶、線、條、碟片、小板、方塊、柱或圓柱，該內表面具有一皺褶、翹棱及/或波形組態。然而，本發明包括可延伸半導體，其中該半導體元件未經由印刷構件而提供至該可撓性基板及/或其中該半導體元件係不可印刷的。

本發明包括可延伸半導體，該等可延伸半導體包含具有由單一可撓性基板支撐之曲線內表面之單一半導體元件。或者，本發明之可延伸半導體包含複數個可延伸半導體元件，該等可延伸半導體元件具有由單一可撓性基板支撐之曲線內表面。本發明之實施例包括可延伸半導體元件之陣列或圖案，該等可延伸半導體元件具有由單一可撓性基板支撐的曲線內表面。可選擇地，該陣列或圖案中之可延伸半導體元件具有良好界定的、預選擇之實體尺寸、位置及相對空間取向。

本發明亦包括可延伸電子裝置、裝置組件及/或電路，其包含一或多個可延伸半導體結構，及額外積體裝置組件，諸如電觸點、電極、導電層、介電層，及/或額外半

導體層(例如，摻雜層，P-N接面等等)。在此實施例中，可延伸半導體結構及額外積體裝置組件係可操作地耦合，以便提供選擇之裝置功能性，且可彼此電接觸或絕緣。在某些有用之實施例中，額外積體裝置組件(及該(等)可延伸半導體)之至少一部分或所有部分具有曲線內表面，該等曲線內表面係由可撓性基板之支撐表面來支撐，且提供於一彎曲結構中，例如一具有捲曲、波形、翹棱及/或皺褶構形之彎曲結構。額外積體裝置組件及可延伸半導體之曲線內表面可具有大體上相同或不同的輪廓形狀。本發明包括實施例，其中可延伸裝置組件係經由展示本質可延伸性之金屬互連件或亦具有波形、皺褶、彎曲及/或翹棱構形之金屬互連件來互連。

額外積體裝置組件之曲線內表面組態係藉由諸如捲曲、波形、翹棱及/或皺褶組態之電子裝置的一總體上彎曲結構提供於某些實施例中。在此等實施例中，彎曲結構使此等裝置即使當承受顯著應變時也能展示良好電子效能，諸如當處於延伸、壓縮及/或彎曲組態時保持與一半導體元件之導電性或絕緣性。可延伸電子電路可使用與如此處描述之彼等用以製造可延伸半導體元件之技術類似的技術來製造。舉例而言，在一實施例中，包括一可延伸半導體元件之可延伸裝置組件係獨立製造且然後互連。或者，一包含半導體之裝置可以一平坦組態來製造，且隨後處理所得平坦裝置以提供一總體上彎曲的裝置結構，其具有某些或所有裝置組件之曲線內表面。

本發明包括可延伸電子裝置，該等電子裝置包含具有由單一可撓性基板支撐之曲線內表面之單一電子裝置。或者，本發明包括可延伸電子裝置陣列，該等陣列包含複數個可延伸電子裝置或裝置組件，每一者具有由單一可撓性基板支撐之曲線內表面。可選擇地，本發明之裝置陣列中之可延伸電子裝置具有良好界定的、預選擇之實體尺寸、位置及相對空間取向。

在本發明之某些實施例中，半導體結構或電子裝置之曲線內表面係由一彎曲結構來提供。本發明之半導體及/或電子裝置之彎曲結構及曲線內表面可具有提供可延伸性及/或可撓性的任何輪廓形狀，包括(但不限於)以至少一個凸起區域、至少一凹入區域或至少一個凸起區域與至少一個凹入區域之一組合為特徵之輪廓形狀。本發明中 useful 之輪廓形狀包括在一個或兩個空間維度上變化之輪廓形狀。使用具有一內表面(其具有在多個空間維度上展示週期或非週期變化之輪廓形狀)之彎曲結構有助於提供能在包括正交的方向之多個方向上延伸、壓縮、撓曲或進行其他變形之可延伸半導體及/或電子裝置。

有用之實施例包括由彎曲半導體結構及/或電子裝置提供的曲線內表面，該等彎曲半導體結構及/或電子裝置具有包含複數個凸起及凹入區域之構形，例如以波形組態提供之凸起與凹入區域之交替圖案。在一實施例中，可延伸及/或可撓性半導體元件或電子裝置之曲線內表面，或(視情況)整個截面組件具有以大體上週期波形或者大體上非

週期波形為特徵之輪廓形狀。在本文中，週期波形可包含任何兩維或三維維度波形，包括(但不限於)一或多個正弦波、方波、Aries函數、高斯(Gaussian)波形、洛仁子(Lorentzian)波形，或此等波形之組合。在另一實施例中，半導體或電子裝置之曲線內表面，或(視情況)整個截面組件具有由複數個具有較大振幅及寬度之非週期翹棱組成的輪廓形狀。在另一實施例中，半導體或電子裝置之曲線內表面，或(視情況)整個截面組件具有由週期波形及複數個非週期翹棱組成的輪廓形狀。

在一實施例中，本發明之可延伸半導體元件或電子裝置包含一彎曲結構，諸如一具有沿其長度及(視情況)寬度之至少一部分擴展的一週期或非週期波形構形之彎曲帶狀結構。舉例而言，本發明包括彎曲結構，該等彎曲結構包括具有一週期在約1微米與100微米之間且振幅在約50奈米與約5微米之間的正弦波構形之彎曲帶狀結構。彎曲結構可以其他週期波形構形提供，諸如沿此等結構之至少一部分長度及/或寬度擴展之方波及/或高斯波形。包含彎曲帶狀結構之可延伸及可撓性半導體元件及可延伸電子裝置可沿著沿該半導體帶之長度擴展之軸(諸如沿該曲線內表面之第一波形方向擴展之軸)膨脹、壓縮、彎曲及/或變形，且(視情況)可沿一或多個其他軸(諸如沿該等彎曲結構及曲線內表面之其他波形方向擴展之軸)膨脹、壓縮、彎曲及/或變形。

在某些實施例中，本發明之此態樣之半導體結構及電子

裝置的構形當受到機械應力或被施加力時會改變。舉例而言，具有波形或翹稜構形之彎曲半導體結構及電子裝置之週期及/或振幅可回應於所施加機械應力及/或力而改變。在某些實施例中，此改變構形之能力提供了可延伸半導體結構及電子電路膨脹、壓縮、撓曲、變形及/或彎曲而無顯著機械損傷、破裂或實質性的電子性質及/或電子裝置效能之降低的能力。

該半導體結構及/或可延伸電子裝置之曲線內表面可連續地結合至該支撐表面(意即在沿該曲線內表面之大體上所有點(例如約90%)處結合)。或者，該半導體結構及/或可延伸電子裝置之曲線內表面可間斷地與該支撐表面結合，其中該曲線內表面在沿該曲線內表面的所選點處與該支撐表面結合。本發明包括實施例，其中該半導體結構或電子裝置之曲線內表面與該可撓性基板在離散點處結合，且在該內表面與該可撓性基板之間的離散的結合點之間該內表面具有一曲線構形。本發明包括具有一內表面之彎曲半導體結構及電子裝置，該內表面與該可撓性基板在離散點處結合，其中該等離散的結合點藉由未與該可撓性基板直接結合之翹稜區域而彼此隔離。

在本發明之某些可撓性半導體及/或可撓性電子裝置中，僅半導體結構或電子裝置之內表面以一曲線構形提供。或者，本發明包括以一彎曲構形提供之可延伸半導體及可延伸電子裝置，其中該彎曲半導體結構或電子裝置之整個截面組件以一曲線構形提供，諸如波形、皺褶、翹稜

或捲曲構形。在此等實施例中，該曲線構形擴展穿過該半導體結構或電子裝置之至少一部分的整個厚度。舉例而言，本發明之可延伸半導體包括具有波形、皺褶、翹棱及/或捲曲組態之彎曲半導體帶或條。本發明亦包括組合物或電子裝置，其中整個半導體結構或電子裝置，或該半導體結構或電子裝置之至少大部分以一曲線構形提供，諸如波形、皺褶或彎曲構形。

在某些實施例中，該波形、翹棱及/或可延伸構形提供了一種調節本發明之組合物、材料及裝置之性質的適用性的途徑。舉例而言，半導體之遷移率及其觸點之性質至少部分地取決於應變。本發明中空間變化的應變有助於以有利的方式調節材料及裝置性質。如另一實例，在波導中之空間變化之應變引起空間變化之折射率性質(經由彈光效應)，其亦可有利地用於不同類型光柵耦合器。

可延伸半導體結構及/或電子裝置之內表面與可撓性基板的外表面之間的結合可使用任何可提供機械上有用之系統的組合物、結構或結合機制來提供，該機械上有用之系統應能承受延伸及/壓縮移位而無機械失效或電子性質及/或效能之顯著降級且(視情況)能撓曲移位而無機械失效或電子性質及/或效能的顯著降級。該半導體結構及/或電子裝置與該可撓性基板之間的有用之結合提供了當處於多種延伸、壓縮及/或撓曲組態或變形時展示有益的電子性質之機械穩固結構。在本發明之此態樣之一實施例中，該半導體結構及/或電子裝置之內表面之至少一部分與該可撓

性基板的外表面之間之結合係藉由該半導體結構或電子裝置與該可撓性基板之外表面之間的共價及/或非共價鍵結來提供。此等結構中 useful 之例示性結合機制包括使用該半導體結構或電子裝置與該可撓性基板之外表面之間的凡得瓦爾力交互作用、偶極-偶極交互作用及/或氫鍵結交互作用。本發明亦包括實施例，其中結合係藉由該半導體結構或電子裝置與該可撓性基板之外表面之間的一黏接或層壓層、塗層或薄膜來提供。有用之黏接層包括(但不限於)金屬層、聚合物層、部分聚合化聚合物前驅層，及複合材料層。本發明亦包括使用具有一化學改質之外表面之可撓性基板，以便利(例如)具有置於其外表面上之複數個羥基基團的可撓性基板(諸如聚合物基板)與半導體元件或電子裝置之結合。本發明包括可撓性半導體及電子電路，其中該半導體結構或電子電路整體或部分地囊封於一囊封層或塗層中，諸如一聚合物層。

該半導體結構或電子裝置之實體尺寸及組合物至少部分地影響本發明之可延伸半導體元件的總體機械及電子性質。如本文所使用，術語"薄"指一結構具有一小於或等於約100微米之厚度，且對於某些應用較佳為小於或等於約50微米之厚度。諸如薄半導體帶、小板及條或薄膜電晶體之薄半導體結構或電子裝置之使用在某些實施例中係重要的，以便利諸如波形、捲曲或彎曲曲線內表面之曲線內表面之形成，從而提供能延伸、收縮及/或撓曲而無損傷、機械失效或電子性質的顯著降級之構形。諸如薄可印刷半

導體結構之薄半導體結構及電子裝置之使用對包含諸如單晶及/或多晶無機半導體的脆性半導體材料之可延伸半導體及可延伸電子裝置尤其有用。在一有用之實施例中，該半導體結構或電子電路具有在約1微米至約1厘米之範圍上選擇之寬度及在約50奈米至約50微米的範圍上選擇之厚度。

該支撐可撓性基板之組合物及實體尺寸亦可至少部分地影響本發明之可延伸半導體元件及可延伸電子裝置的總體機械性質。有用之可撓性基板包括(但不限於)厚度選自約0.1毫米至約100微米之範圍的可撓性基板。在一有用之實施例中，該可撓性基板包含一聚(二甲基矽氧烷)PDMS層，且具有在約0.1毫米至約10毫米的範圍上選擇之厚度。

本發明亦包括部分處理之可延伸半導體元件或部分處理之可延伸半導體電路。舉例而言，在一實施例中，本發明包括Si帶，其上具有pn二極體裝置。以一波形構形提供之Si帶被可選擇地提供於一PDMS基板上。於此等(絕緣)二極體之間提供互連件，以使得該二極體輸出(例如，光電流)能被放大，例如經由利用蔭罩(shadow mask)之金屬蒸鍍。在一實施例中，在彈性體上製造複數個獨立的可延伸電晶體。以某些方式連線個別電晶體(例如藉由蔭罩蒸鍍)以製造其他有用之電路，例如由以特定方式連接之若干電晶體組成之電路。對於此等狀況，該等互連金屬線亦為可延伸的，因此吾人具有在彈性體上的完全可延伸電路。

在另一態樣中，本發明提供用以製造一可延伸半導體元

件之方法，其包含以下步驟：(1)提供具有內表面之可轉移半導體結構；(2)提供處於一膨脹狀態之預應變彈性基板，其中該彈性基板具有一外表面；(3)將該可轉移半導體結構的內表面之至少一部分與處於膨脹狀態之預應變彈性基板之外表面結合；及(4)允許彈性基板至少部分地鬆弛至一鬆弛狀態，其中該彈性基板的鬆弛使該可轉移半導體結構之內表面彎曲，進而產生具有一曲線內表面之可延伸半導體元件。在本發明之此態樣之某些實施例中，該預應變彈性基板沿第一軸膨脹，且視情況沿一相對該第一軸正交地定位的第二軸膨脹。在一有用之實施例中，提供至該預應變彈性基板之可轉移半導體元件係一可印刷半導體元件。

在另一態樣中，本發明提供一用以製造一可延伸電子電路之方法，其包含以下步驟：(1)提供一具有一內表面之可轉移電子電路；(2)提供處於一膨脹狀態之預應變彈性基板，其中該彈性基板具有一外表面；(3)將該可轉移電子電路的內表面之至少一部分與處於膨脹狀態之預應變彈性基板之外表面結合；及(4)允許該彈性基板至少部分地鬆弛至一鬆弛狀態，其中該彈性基板的鬆弛使該電子電路之內表面彎曲，進而產生該可延伸電子電路。在一有用之實施例中，提供至該預應變彈性基板之可轉移電子電路係一可印刷電子電路，諸如能經由印刷技術(諸如乾式轉移接觸印刷)轉移之電子電路。在某些實施例中，電子電路包含複數個積體裝置組件，包括(但不限於)：一或多個半導體元件(諸如可轉移、且(視情況)可印刷之半導體元件)、介電

元件、電極、包括超導元件之導電元件、及摻雜半導體元件。

可選地，本發明之該態樣之方法可進一步包含自該支撐彈性基板將該可延伸半導體或可延伸電子電路轉移至一接收基板之步驟，該轉移之方式至少部分地保留該半導體元件或電子電路的曲線內表面及/或彎曲結構。該半導體結構或電子電路被轉移至一接收基板，該接收基板係可撓性的，諸如一聚合物接收基板，或一包含紙、金屬或半導體之接收基板。在此實施例中，所轉移之可延伸半導體或可延伸電子裝置可經由廣泛範圍之手段而與該接收基板(如一可撓性、聚合物接收基板)結合，該等手段包括(但不限於)使用黏接及/或層壓層、薄膜及/或塗層，諸如黏接層(如聚醯亞胺膠層)。或者，所轉移的可延伸半導體或可延伸電子裝置可經由所轉移的可延伸半導體或可延伸電子裝置與接收基板之間之氫鍵結、共價鍵結、偶極-偶極交互作用及凡得瓦爾力交互作用而與諸如可撓性、聚合物接收基板的接收基板結合。

在一實施例中，在製造具有由一彈性基板支撐之波形、翹棱、皺褶或捲曲構形之彎曲半導體結構及/或電子電路後，使用一適當黏接層或塗層將此等結構轉移至另一基板上。舉例而言，在一實施例中，在一彈性體基板上製備波形光伏打裝置，且然後(例如)使用聚醯亞胺作為膠層將其轉移至金屬箔上。在該等光伏打裝置與下層的金屬箔(其可充當集極之一，例如藉由圖案化、蝕刻以製造通孔以曝

露金屬表面、金屬沈積物等等)之間建立電連接。此組態之光伏打裝置之波狀表面可被利用以增強光捕獲(或減少光反射)。舉例而言，為獲得更好之抗反射結果，可在此波狀表面上作進一步處理，諸如使表面粗糙度遠小於波狀半導體之波長。簡單說來，可將部分或全部處理之波狀/彎曲半導體/電路轉移至其他基板上(不限於PDMS)，且若必要可藉由添加進一步處理來獲得更增強的使用效能。

可選地，本發明之方法可進一步包含囊封、覆蓋或層壓該可延伸半導體或可延伸電子裝置之步驟。在此上下文中，囊封在分層翹棱結構之狀況下包括其中該囊封材料被提供於該等翹棱之凸起區域下以完全嵌入該翹棱結構的所有側面的幾何形狀及構形。囊封亦包括在該彎曲半導體結構或電子電路之凸起及未凸起特徵之頂部提供一囊封層，諸如聚合物層。在一實施例中，將諸如PDMS預聚合物之預聚合物澆鑄並固化於該可延伸半導體或可延伸電子裝置上。對於某些應用，囊封或覆蓋處理步驟有助於增強本發明之可延伸半導體及電子裝置之機械穩定性及穩固性。本發明包括當處於延伸、壓縮、彎曲及/或撓曲構形時展示良好機械及電子效能之囊封、覆蓋及/或層壓之可延伸半導體及電子裝置。

可選地，本發明之此態樣之方法包括在諸如聚合物基板(例如，2D超薄聚合物基板)或無機基板(例如SiO₂)之供體基板上組裝半導體元件、裝置組件及/或功能性裝置之步驟。在此實施例中，然後將在該供體基板上組裝之結構轉

移至預應變彈性體基板以形成可延伸材料、裝置或裝置組件。在一實施例中，電晶體、電晶體陣列或具有電晶體之電子裝置首先被組裝在供體基板上，例如經由使用可印刷半導體元件之印刷技術。接著，將整個裝置及/或裝置陣列轉移至預應變彈性基板(例如藉由接觸印刷法)以形成可延伸波形及/或翹棱系統。當在轉移至可延伸彈性體支撐物之前在一薄的、非彈性體材料(類似聚醯亞胺或苯并環丁烯或PET等等)上製備裝置互連件及製造實際尺寸電路較為有利時此方法係有用的。在此類系統中，在組合電晶體/聚合物膜/彈性體基板系統中將獲得非週期2D波形或翹棱結構。

對在本方法中有用的彈性基板進行預應變之方法包括在與半導體結構及/或電子裝置接觸及結合之前及/或期間中彎曲、捲曲、撓曲、及膨脹該彈性基板(例如，藉由使用一機械平臺)。在多個方向上預應變彈性基板之一尤其有用之方法包含在與半導體結構及/或電子裝置接觸及結合之前及/或期間中藉由升高彈性基板的溫度而使該彈性基板熱膨脹。在此等實施例中，彈性基板的鬆弛是藉由在與該可轉移、且(視情況)可印刷之半導體元件或電子裝置接觸及/或結合之後降低該彈性基板之溫度來達成。在某些方法中，藉由引入約1%至約30%之應變來將該彈性基板預應變。

在本文中，表述"彈性基板"指可延伸或變形且可返回至其原始形狀而無實質上永久變形之基板。彈性基板通常承

受實質上彈性的變形。本發明中 有用之例示性彈性基板包括(但不限於)彈性體及彈性體、展示彈性之聚合物及共聚物之複合材料或混合物。在某些方法中，經由一提供該彈性基板沿一或多個主軸膨脹之機構來預應變該彈性基板。舉例而言，可藉由沿第一軸膨脹該彈性基板來提供預應變。然而，本發明亦包括沿複數個軸使該彈性基板膨脹之方法，例如經由沿相對彼此正交定位之第一及第二軸的膨脹。本方法中可用的經由提供彈性基板之膨脹的機構而預應變彈性基板之手段包括彎曲、捲曲、撓曲、整平、膨脹或以其它方式使該彈性基板變形。本發明亦包括藉由升高該彈性基板之溫度進而提供該彈性基板的熱膨脹而提供預應變之手段。

本發明之方法亦能自不同於半導體材料之材料製造可延伸元件、裝置及裝置組件。本發明包括將諸如絕緣體、超導體，及半金屬之非半導體結構轉移並結合至一預應變彈性基板之方法。允許彈性基板至少部分地鬆弛會導致具有曲線內表面之可延伸非半導體結構(例如具有波形及/或翹稜輪廓形狀之非半導體結構)的形成。本發明之此態樣包括具有彎曲結構之可延伸非半導體結構，該彎曲結構諸如以捲曲構形、皺褶構形、翹稜構形及/或以波形組態提供之內表面及(視情況)外表面。

在本發明之可延伸半導體、電子裝置及/或裝置組件中 有用之可撓性基板包括(但不限於)聚合物基板及/或塑膠基板。可延伸半導體包括包含一或多個可轉移、(視情況)可

印刷之半導體結構(諸如可印刷半導體元件)之組合物，其由在製造期間預應變的一彈性基板支撐，以產生該半導體曲線內表面。或者，可延伸半導體包括包含一或多個可轉移半導體結構(諸如可印刷半導體元件)之組合物，其由不同於在製造期間預應變的彈性基板之可撓性基板支撐，以產生該半導體曲線內表面。舉例而言，本發明包括可延伸半導體，其中具有一曲線內表面之半導體結構被自該彈性基板轉移至一不同可撓性基板。

【實施方式】

參看該等圖式，類似參考號指示類似元件且在多個圖式中出現之相同參考號指相同元件。另外，在下文中，以下定義適用：

"可印刷"係關於能轉移、裝配、圖案化、組織及/或整合至基板上或其中之材料、結構、裝置組件及/或積體功能裝置。在本發明之一實施例中，可印刷材料、元件、裝置組件及裝置能經由溶液印刷或乾式轉移接觸印刷而轉移、裝配、圖案化、組織及/或整合至基板上或其中。

本發明之"可印刷半導體元件"包含能(例如使用乾式轉移接觸印刷及/或溶液印刷方法)裝配及/或整合至基板表面上之半導體結構。在一實施例中，本發明之可印刷半導體元件為整體單晶(unitary single crystalline)、多晶或微晶無機半導體結構。在本文中，整體結構係具有機械相連之特徵的單體元件。本發明之半導體元件可為未摻雜或摻雜的，可具有摻雜劑之選擇的空間分佈，且可以包括P及N型摻雜

劑的複數個不同摻雜劑材料來摻雜。本發明包括：至少一個截面尺寸大於或等於約1微米之微結構可印刷半導體元件、及至少一個截面尺寸小於或等於約1微米的奈米結構可印刷半導體元件。在許多應用中，有用之可印刷半導體包含由對高純度塊體材料(諸如使用習知高溫處理技術產生之高純度結晶半導體晶圓)之"由上而下"處理而獲取之元件。在一實施例中，本發明之可印刷半導體元件包含複合結構，其具有一操作地連接至至少一個額外裝置組件或結構(諸如導電層、介電層、電極、額外半導體結構或此等之任何組合)之半導體。在一實施例中，本發明之可印刷半導體元件包含可延伸半導體元件及/或異質半導體元件。

"截面尺寸"指裝置、裝置組件或材料之截面之尺寸。截面尺寸包括寬度、厚度、半徑及直徑。舉例而言，具有帶形狀之半導體元件以一長度及兩個截面尺寸：厚度及寬度，為特徵。舉例而言，具有圓柱形狀之可印刷半導體元件以一長度及截面尺寸：直徑(或者半徑)，為特徵。

"由一基板支撐"指至少部分地存在於一基板表面或至少部分地存在於一或多個位於該結構與該基板表面之間的中間結構上之結構。術語"由一基板支撐"亦可指部分或全部嵌入基板之結構。

"溶液印刷"用以指諸如可印刷半導體元件之一或多個結構藉以分散入一載體介質且以一協調的方式傳送至基板表面之所選區域的過程。在一例示性溶液印刷方法中，結構

被傳送至一基板表面之所選區域係藉由與經受圖案化之基板表面的形態及/或實體特性無關之方法來達成。本發明中可使用之溶液印刷方法包括(但不限於)噴墨印刷、熱轉移印刷，及毛細作用印刷。

"大體上縱向取向"指使得諸如可印刷半導體元件之元件群體之縱軸的方向大體上與一所選對準軸平行的取向。在此定義之上下文中，與一所選軸大體上平行指在與絕對平行方向偏差10度範圍內的取向，較佳為在與絕對平行方向偏差5度範圍內的取向。

"可延伸"指材料、結構、裝置或裝置組件承受應變而無破裂之能力。在一例示性實施例中，一可延伸材料、結構、裝置或裝置組件可承受大於約0.5%之應變而無破裂，對於某些應用較佳可承受大於約1%之應變而無破裂，且對於某些應用最好可承受大於約3%的應變而無破裂。

術語"可撓性"及"可彎曲"在本文中同等地使用，且指材料、結構、裝置或裝置組件變形為一曲線形狀而不經受會引入顯著應變的轉換之能力，該等顯著應變可諸如特徵化材料、結構、裝置或裝置組件之失效點的應變。在一例示性實施例中，可撓性材料、結構、裝置或裝置組件可變形為曲線形狀而不引入大於或等於約5%之應變，對於某些應用較佳不引入大於或等於約1%之應變，且對於某些應用最好不引入大於或等於約0.5%之應變。

該術語"翹稜"指當薄元件、結構及/或裝置藉由在該元件、結構及/或裝置之平面外的方向上彎曲而回應於一壓

縮應變時發生的實體變形。本發明包括具有一或多個表面之可延伸半導體、裝置及組件，該或該等表面具有包含一或多個翹棱之輪廓形狀。

"半導體"指任何在極低溫度下係一絕緣體但在約300絕對溫度下具有一明顯導電性之材料。在本文中，對術語半導體之使用希望與此術語在微電子及電子裝置之技術領域中的使用一致。適用於本發明之半導體可包含諸如矽、鍺及金剛石之元素半導體，以及複合半導體，諸如第IV族複合半導體(諸如SiC及SiGe)、第III-V族半導體(諸如AlSb、AlAs、Aln、AlP、BN、GaSb、GaAs、GaN、GaP、InSb、InAs、InN及InP)、第III-V族三元半導體合金(諸如 $Al_xGa_{1-x}As$)、第II-VI族半導體(諸如CsSe、CdS、CdTe、ZnO、ZnSe、ZnS，及ZnTe)、第I-VII族半導體CuCl、第IV-VI族半導體(諸如PbS、PbTe及SnS)、層半導體(諸如PbI₂、MoS₂及GaSe)、氧化物半導體(諸如CuO及Cu₂O)。術語半導體包括以一或多種選擇之材料摻雜的外質半導體及本質半導體(包括具有p型摻雜材料及n型摻雜材料的半導體)以提供適用於給定應用或裝置之有利電子性質。術語半導體包括包含半導體及/或摻雜劑之一混合物之複合材料。適用於本發明之某些應用之特殊半導體材料包括(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。多孔矽半導體材料適用於本發明在感測器及諸如發光二極體(LED)及固態雷射之發光材料領域中之應用。半導體材料之雜質係不同於該(等)半導體材料自身或任何提供至半導體材料之摻雜劑的原子、元素、離子及/或分子。雜質係可對半導體材料之電子性質造成負面影響之存在於半導體材料中的不當物質，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)週期表上銅與鉛之間之元素族、鈣、鈉，及其所有離子、複合物及/或錯合物。

"塑性"指任何合成或自然產生之材料或材料之組合，通常當加熱時可將其模製或成型且硬化為一所要形狀。適用於本發明之裝置及方法之例示性塑膠包括(但不限於)聚合物、樹脂及纖維素衍生物。在本文中，術語塑性用以包括包含具有一或多種添加物之一或多種塑膠的複合塑性材料，該等添加物可諸如結構增強劑、填充劑、纖維、增塑劑、穩定劑或可提供所要之化學或物理性質之添加物。

"介電質"及"介電材料"在本文中同等地使用，且指對電流具有高阻抗之物質。適用之介電材料包括(但不限於)SiO₂、Ta₂O₅、TiO₂、ZrO₂、Y₂O₃、SiN₄、STO、BST、PLZT、PMN及PZT。

"聚合物"指包含複數個通常稱為單體之重複化學基團之分子。聚合物通常以高分子質量為特徵。本發明中可用之聚合物可為有機聚合物或無機聚合物，且可處於非晶系、

半非晶系、晶體或部分晶體狀態。聚合物可包含具有相同化學組成之單體或可包含具有不同化學組成的複數個單體(諸如共聚物)。具有鏈結的單體鏈之交聯聚合物尤其適用於本發明之某些應用。可用於本發明之方法、裝置及裝置組件之聚合物包括(但不限於)塑膠、彈性體、熱塑性彈性體、彈性塑膠、彈性塑膠、恆溫器(thermostat)、熱塑膠及丙烯酸酯。例示性聚合物包括(但不限於)縮醛聚合物、生物可降解聚合物、纖維素聚合物、含氟聚合物、耐綸、聚丙烯腈聚合物、聚醯胺-醯亞胺聚合物、聚醯亞胺、聚芳酯化合物、聚苯并咪唑、聚丁烯、聚碳酸酯、聚酯、聚醯醯亞胺、聚乙烯、聚乙烯共聚物及經改質聚乙烯、聚酮、聚(甲基丙烯酸甲酯)、聚甲基戊烯、聚苯醚及聚苯硫醚、聚苯二甲醯胺、聚丙烯、聚胺基甲酸酯、苯乙烯樹脂、矽基樹脂、乙烯基樹脂或其任何組合。

"彈性體"指可延伸或變形且返回至其原始形狀而無實質上永久變形的聚合材料。彈性體通常經受實質上彈性變形。適用於本發明之彈性基板至少部分包含一或多個彈性體。適用於本發明之例示性彈性體可包含聚合物、共聚物、複合材料或聚合物與共聚物之混合物。彈性體層指包含至少一個彈性體之層。彈性體層亦可包括摻雜劑及其他非彈性體材料。適用於本發明之彈性體可包括(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、聚氯丁二烯及聚矽氧。

"良好電子效能"及"高效能"在本文中同等地使用，且指裝置及裝置組件具有可提供諸如電子訊號開關及/或放大之所要功能性的諸如場效應遷移率、臨限電壓及開-關比例之電子特性。本發明之展示良好電子效能之例示性可轉移、且視情況可印刷之半導體元件可具有大於或等於 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的本質場效應遷移率，對於某些應用較佳具有大於或等於約 $300 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的本質場效應遷移率。本發明之展示良好電子效能之例示性電晶體可具有大於或等於約 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的裝置場效應遷移率，對於某些應用較佳具有大於或等於約 $300 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的裝置場效應遷移率，且對於某些應用最好具有大於或等於約 $800 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的裝置場效應遷移率。本發明之展示良好電子效能之例示性電晶體可具有小於約5伏特的臨限電壓及/或大於約 1×10^4 之開-關比例。

"大面積"指大於或等於約36平方英吋之面積，諸如用於裝置製造之基板的一接收表面的面積。

"裝置場效應遷移率"指使用與電子裝置對應之輸出電流資料計算得之諸如電晶體的電子裝置之場效應遷移率。

"楊氏模數"係材料、裝置或層之一機械性質，其指一給定物質之應力與應變的比例。楊氏模數可由以下陳述式提供：

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

其中E係楊氏模數， L_0 係平衡長度， ΔL 係在所施加應力下之長度變化，F係所施加之力且A係施加力的面積。楊氏模數亦可通過以下方程式根據Lame常數來表示：

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

其中 λ 及 μ 係Lame常數。高楊氏模數(或"高模數")及低楊氏模數(或"低模數")係對一給定材料、層或裝置中楊氏模數之大小的相對描述。在本發明中，高楊氏模數比低楊氏模數更大，對於某些應用而言較佳約大10倍，對於其他應用而言最好約大100倍，且對於另一些應用而言最好約大1000倍。

在下文中，闡明本發明之裝置、裝置組件及方法之大量特定細節以提供對本發明的準確性質之詳細說明。然而，對於熟習此項技術者將顯而易見的是，無此等特定細節也可實踐本發明。

本發明提供當延伸、壓縮、撓曲或者以其他方式變形時能提供良好效能之可延伸半導體及電子電路。另外，本發明之可延伸半導體及電子電路可經調適用於廣泛範圍的裝置組態以提供完全可撓性的電子及光電子裝置。

圖1提供一展示本發明之可延伸半導體結構之原子力顯微圖。該可延伸半導體元件700包含一具有一支撐表面710之可撓性基板705(諸如聚合物及/或彈性基板)及一具有一曲線內表面720之彎曲半導體結構715。在此實施例中，彎曲半導體結構715之曲線內表面720之至少一部分與該可撓

性基板 705 之支撐表面 710 結合。曲線內表面 720 可在沿內表面 720 之經選擇點處或在沿內表面 720 的大體上所有點處與支撐表面 710 結合。圖 1 中所說明之例示性半導體結構包含一具有一等於約 100 微米之寬度及一等於約 100 奈米之厚度之單晶矽彎曲帶。圖 1 中說明之可撓性基板係一具有約 1 毫米之厚度之 PDMS 基板。曲線內表面 720 具有一彎曲結構，其包含沿該帶之長度擴展之一大體上週期性的波形。如圖 1 所示，該波之振幅約為 500 奈米且該尖鋒間距約為 20 微米。圖 2 展示了提供具有曲線內表面 720 之彎曲半導體結構 715 之展開視圖的原子力顯微圖。圖 3 展示本發明之可延伸半導體結構之一陣列的原子力顯微圖。對圖 3 中原子力顯微圖之分析展示該等彎曲半導體結構被壓縮了約 0.27%。圖 4 展示本發明之可延伸半導體結構之光學顯微圖。

曲線內表面 720 之輪廓形狀允許彎曲半導體結構 715 沿變形軸 730 膨脹或壓縮而不經受大量機械應變。此輪廓形狀亦可允許該半導體結構在不同於變形軸 730 方向的方向上彎曲、撓曲或變形而無由應變引發之顯著機械損傷或效能損失。本發明之半導體結構之曲線表面可具有提供，良好機械性質(諸如可延伸性、可撓性及/或可彎曲性)及/或良好電子效能(諸如當被撓曲、延伸或變形時展示良好場效應遷移率)的任何輪廓形狀。例示性輪廓形狀可具有以下特徵：具有複數個凸起及/或凹入區域，且具有包括正弦波、高斯波、Aries 函數、方波、洛仁子波、週期波、無週

期波或此等波之任何組合之多種波形。適用於本發明之波形可關於兩個或三個實體維度而變化。

圖5展示本發明之可延伸半導體結構的原子力顯微圖，該結構之半導體結構715結合至具有三維起伏圖案之可撓性基板705，該三維起伏圖案位於該基板之支撐表面710上。該三維起伏圖案包含凹入區域750及起伏特徵760。如圖5所示，彎曲半導體結構715在凹入區域750中及起伏特徵760上與支撐表面710結合。

圖6展示一說明製造本發明之可延伸半導體結構之一例示性方法的流程圖。在該例示性方法中，提供處於一膨脹狀態之一預應變彈性基板。預應變可藉由該項技術中習知之任何方法來達成，其包括(但不限於)輥壓及/或預彎曲該彈性基板。預應變亦可經由熱方法，例如通過由升高該彈性基板之溫度引發之熱膨脹來達成。經由熱方法之預應變之一優勢係可達成沿複數個不同軸(諸如正交的軸)之膨脹。

本發明之此方法中可用之例示性彈性基板係一具有等於約1毫米的厚度之PDMS基板。該彈性基板可藉由沿一單一軸之膨脹或藉由沿複數個軸之膨脹來預應變。如圖6所示，可印刷半導體元件之至少一部分內表面與處於一膨脹狀態之預應變彈性基板的外表面結合。結合可藉由該半導體表面之內表面之間的共價鍵結、藉由凡得瓦爾力、藉由使用黏結劑或藉由此等方法之任何組合來達成。在該彈性基板係PDMS之例示性實施例中，該PDMS基板之支撐表面

經化學改質使得其具有複數個自其表面擴展的羥基以促進與一矽半導體結構之共價鍵結。再參看圖6，在將該預應變彈性基板與半導體結構結合之後，允許該彈性基板至少部分地鬆弛至一鬆弛狀態。在此實施例中，該彈性基板之鬆弛使該半導體結構之內表面彎曲，進而產生一具有曲線內表面的半導體元件。

如圖6中所示，該製造方法可視情況包括一第二轉移步驟及視情況之鍵結步驟，其中將具有一曲線內表面720之可轉移半導體元件715自該彈性基板轉移至另一基板，較佳一可撓性基板，諸如一聚合物基板。此第二轉移步驟可藉由使具有一曲線內表面720之半導體結構715之曝露表面與另一與該半導體結構715的曝露表面結合之基板之一接收表面接觸來達成。與該另一基板之結合可藉由能至少部分保持該半導體元件之彎曲結構的任何途徑來完成，其包括共價鍵、經由凡得瓦爾力之鍵結、偶極-偶極交互作用、倫敦(London)力之鍵結及/或氫鍵結。本發明亦包括使用提供於該可轉移半導體結構之一曝露表面與該接收表面之間的黏接層、塗層及/或薄膜。

本發明之可延伸半導體元件可有效地整合入大量功能性裝置及裝置組件，諸如電晶體、二極體、雷射、MEMS、NEMS、LEDS及OLEDs。本發明之可延伸半導體元件與習知剛性無機半導體相比具有某些功能性優勢。首先，可延伸半導體元件可為可撓性的，且因此比習知剛性無機半導體更少受由撓曲、彎曲及/或變形引起之結構損壞之影

響。其次，因為彎曲半導體結構可處於一輕微機械應變狀態以提供一曲線內表面，所以本發明之可延伸半導體元件與習知無應變剛性半導體相比可展示更高之本質場效應遷移率。最後，因為可延伸半導體元件在裝置溫度循環中能自由膨脹及收縮，所以其可能提供良好之熱性質。

圖7展示具有一波狀構形之縱向對準的可延伸半導體之陣列之影像。如圖7所示，該等半導體帶被以週期波構形提供且由一單一可撓性橡膠基板支撐。

圖8展示本發明之可延伸半導體元件之一截面影像，其中半導體結構776由該可撓性基板777來支撐。如圖8所示，半導體結構776具有內表面，該等內表面具有一週期性波之輪廓形狀。亦如圖8所示，該週期波構形擴展穿過半導體結構776之整個截面尺寸。

本發明亦提供當延伸、撓曲或變形時具有良好效能之可延伸電子電路、裝置及裝置陣列。與上述可延伸半導體元件類似，本發明提供可延伸電路及電子裝置，其包含一具有一支撐表面的可撓性基板，該支撐表面與一具有一曲線內表面(諸如展示一波形結構之曲線內表面)的裝置、裝置陣列或電路接觸。在此結構排列中，該裝置、裝置陣列或電路結構之至少一部分曲線內表面與該可撓性基板之支撐表面結合。本發明之此態樣之裝置、裝置陣列或電路係一包含複數個諸如半導體、介電質、電極、摻雜半導體及導體之積體裝置組件的多組件元件。在一例示性實施例中，具有小於約10微米之淨厚度之可撓性電路、裝置及裝置陣

列包含複數個積體裝置組件，其至少一部分具有週期波曲線結構。

在本發明之一有用之實施例中，提供包含複數個互連組件的獨立式電子電路或裝置。該電子電路或裝置之一內表面與一處於一膨脹狀態之預應變彈性基板接觸且至少部分結合。預應變可藉由該項技術中已知之任何方法來達成，其包括(但不限於)輥壓及/或預彎曲該彈性基板，且可藉由沿一單一軸之膨脹或藉由沿複數個軸的膨脹來預應變該彈性基板。結合可直接藉由該電子電路或裝置之至少一部分內表面與該預應變彈性基板之間的共價鍵或凡得瓦爾力來實現，或藉由使用黏接劑或一中間結合層來達成。在使該預應變彈性基板與該電子電路或裝置結合之後，允許該彈性基板至少部分地鬆弛至一鬆弛狀態，其使該半導體結構之內表面彎曲。該電子電路或裝置之內表面之彎曲產生一曲線內表面，其在某些有用的實施例中具有一週期或無週期波構形。本發明包括多個實施例，其中包含電子裝置或電路之所有組件皆存在於一週期或無週期波組態中。

可延伸電子電路、裝置及裝置陣列之週期或無週期波組態允許其遵守延伸或彎曲組態而不在該等電路或裝置之個別組件上產生大應變。本發明之此態樣提供可延伸電子電路、裝置及裝置陣列當處於彎曲、延伸或變形狀態時之有用之電子性質。藉由本方法形成之週期波組態之週期可根據以下來變化：(i)包含該電路或裝置的積體組件之集合之淨厚度及(ii)包含積體裝置組件的材料之諸如楊氏模數及

撓曲剛性之機械性質。

圖9A展示一說明製造可延伸薄膜電晶體之陣列之例示性方法之流程圖。如圖9A所示，使用本發明之技術提供獨立式可印刷薄膜電晶體之一陣列。將薄膜電晶體之陣列經由乾式轉移接觸印刷方法以一曝露該等電晶體之內表面之方式轉移至一PDMS基板。接著將所曝露內表面與處於一膨脹狀態之室溫固化預應變PDMS層接觸。該預應變PDMS層之隨後完全固化使該等電晶體之內表面與該預應變PDMS層結合。允許該預應變PDMS層冷卻且呈現一至少部分鬆弛狀態。PDMS層之鬆弛將一週期波結構引入該陣列中之電晶體，進而使得其變為可延伸的。圖9A中之插圖提供藉由本方法製造之可延伸薄膜電晶體陣列之原子力顯微圖。該原子力顯微圖展示了在延伸或變形狀態中提供良好電子效能之週期波結構。

圖9B提供處於鬆弛及延伸組態之可延伸薄膜電晶體陣列之光學顯微圖。以在該陣列上產生一約20%之淨應變而不使該等薄膜電晶體破裂或損傷之方式延伸該陣列。經觀察自一鬆弛組態至一應變組態之轉換為一可逆過程。圖9B亦提供針對施加至閘極之若干電位的汲極電流對汲極電壓的圖，其展示該等可延伸薄膜電晶體在鬆弛及延伸組態皆展示良好效能。

實例1：用於橡膠基板上的高效能電子組件之可延伸形式之單晶矽

吾人已製造由構造為具有微尺度週期波狀幾何形狀之次

微米單晶元件組成之可延伸形式的矽。當由一彈性體基板支撐時，此"波狀"矽能可逆地延伸及壓縮至大應變而不損傷矽。該等波之振幅及週期進行變化以適應此等變形，進而避免矽自身之顯著應變。與矽直接整合之介電質、摻雜劑之圖案、電極及其他元件產生完全形成的、高效能"波狀"金屬氧化物半導體場效應電晶體、pn二極體及其他裝置，其用於可延伸或壓縮至類似大之應變水準之電子電路。

電子學之進步主要由為增加電路運算速度及積體密度、為減少其功率消耗及(對於顯示系統)為使大面積覆蓋成為可能所做出之努力驅使。近來之一方向尋求發展能在具有不尋常外形尺寸之非習知基板上形成高效能電路的方法及材料：紙狀顯示器及光學掃描儀之可撓性塑膠基板、焦平面陣列之球狀曲線支撐及整合之機器人感測器的保形皮膚。當以薄膜形式製備且放置在薄基板薄片上或基板層積板中之中性機械平面附近時，許多電子材料能提供良好彎曲度。在彼等狀態下，該等作用材料在彎曲期間經受之應變可保持在引發破裂所需之典型位準(約1%)以下。對於當操作時可撓曲、延伸或達到極端的彎曲水準之裝置或對於彼等可等形包覆於具有複雜、曲線形狀之支撐物的裝置，要求完全可延伸性，它是一更具挑戰性之特性。在此等系統中，在電路位準之應變可超過幾乎所有已知電子材料，尤其是彼等用於已有應用之良好發展的電子材料，之破裂極限。在某種程度上，此問題能以使用可延伸導線來互連

由剛性隔離島 (isolated island) 支撐之電子組件 (例如電晶體) 之電路來避開。可以此策略獲取有價值之結果，儘管其最適合可以相對低覆蓋面積之主動電子元件來達成的應用。吾人報告一不同方法，其中可延伸性直接以具有微米級週期、"波" 狀幾何形狀之高品質單晶矽薄膜來達成。此等結構經由波振幅及波長之變化而非經由該等材料自身中之潛在破壞性應變來適應大壓縮及拉伸應變。將此等可延伸 "波狀" 矽元件與介電質、摻雜劑之圖案及薄金屬膜整合可導致高效能、可延伸電子裝置。

圖10表示在彈性體 (意即橡膠) 基板上波狀單晶矽帶之製造序列。第一步 (頂部框) 涉及用以在一絕緣物上矽 (SOI) 晶圓上界定一抗蝕層之光微影術，接著是用以移除頂部矽之曝露部分的蝕刻。用丙酮移除該抗蝕層且然後以濃縮氫氟酸蝕刻內埋的 SiO_2 層使該等帶自下層矽基板釋放。該等帶之末端連接至該晶圓以防止其在蝕刻劑中被洗離。該等抗蝕線之寬度 (5-50 μm) 及長度 (約 15 mm) 界定該等帶之尺寸。SOI 晶圓上的頂部矽之厚度 (20-320 nm) 界定該等帶厚度。在下一步驟 (中間框) 中，彈性地延伸一平坦彈性體基板 (聚 (二甲基矽氧烷)，PDMS；1-3 mm 厚) 且然後使其與該等帶等形接觸。將該 PDMS 剝離會使該等帶離開該晶圓且使該等帶黏結至該 PDMS 表面。釋放該 PDMS 中之應變 (意即預應變) 導致會引起在該矽及該 PDMS 表面形成良好界定之波紋的表面變形。(圖 11A 及 11B) 該等起伏輪廓係週期在 5 與 50 μm 之間且振幅在 100 nm 及 1.5 μm 之間 (視矽之厚度

及該PDMS中預應變之大小而定)的正弦曲線(頂部框, 圖11C)。對於一給定系統, 該等波之週期及振幅在大面積(若干 cm^2)上均在約5%內。該等帶之間之PDMS的平滑形態及鄰近帶之波形中不存在相關相表明了該等帶未強力地機械耦接。圖11C(底部框)展示作為沿該等波狀帶之一者之距離的函數而量測之Si尖峰之微拉曼量測結果。該等結果提供了對應力分佈之瞭解。

此靜態波狀組態之性質與在一半無限低模數支撐物上之一均勻、薄高模數層中的起始翹棱幾何形狀之非線性分析一致:

$$\lambda_0 = \frac{\pi h}{\sqrt{\varepsilon_c}}, \quad A_0 = h \sqrt{\frac{\varepsilon_{pre}}{\varepsilon_c} - 1} \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_c = 0.52 \left[\frac{E_{PDMS}(1 - \nu_{Si}^2)}{E_{Si}(1 - \nu_{PDMS}^2)} \right]^{2/3}$ 係翹棱之臨界應變, ε_{pre} 係預應變之位準, λ_0 係波長且 A_0 係振幅。柏松比係 ν , 楊氏模數係 E , 且該等下標指 Si 或 PDMS 之性質。矽之厚度係 h 。此處理涵蓋了製造成之波狀結構之許多特徵。舉例而言, 圖11D 展示當該預應變值固定時(約為此等資料之0.9%), 波長及振幅皆線性地視 Si 厚度而定。波長不取決於預應變之位準(圖12)。此外, 使用 Si 及 PDMS 之機械性質之文獻值 ($E_{Si} = 130 \text{ GPa}$, $E_{PDMS} = 2 \text{ MPa}$, $\nu_{Si} = 0.27$, $\nu_{PDMS} = 0.48$) 之計算產生在量測得的值的約10%(最大偏差)範圍內之振幅及波長。"帶應變"由該等帶之有效長度(由波長確定)與其實際

長度(由透過AFM量測之表面距離確定)的比例來計算，且產生近似等於該PDMS中預應變之值(對於高達約3.5%之預應變)。矽自身中之應變峰值(意即最大值)(吾人稱為矽應變)係由帶厚度及在應變區中根據 $\kappa h/2$ (K 係曲率)的在該等波之極限處之曲率半徑估算得，在該等應變區中該等波存在且臨界應變(對於此處之情況，約為0.03%)與跟彎曲相關的應變峰值相比較小。對於圖11之資料，該等矽應變峰值為約 $0.36(\pm 0.08)\%$ ，其比帶應變小兩倍以上。此矽應變對於給定預應變下的所有帶厚度為相同的(圖13)。所得機械優勢(其中該矽應變峰值大大小於帶應變)對於達成可延伸性至關重要。吾人注意到在蒸鍍或旋塗至PDMS上之金屬及介電質中亦已觀察到翹棱薄膜(與如本文所述之預成型、經轉移之單晶元件及裝置形成對比)。

在製造之後該等波狀結構對施加至彈性體基板之壓縮及拉伸應變的動態回應對可延伸電子裝置最重要。為揭示此過程之機理，當力被施加至PDMS以在與該等帶的長維平行的方向上壓縮或延伸PDMS時，吾人藉由AFM量測波狀Si帶之幾何形狀。歸因於柏松效應，此力產生沿該等帶及與其垂直方向上之應變。該等垂直應變主要導致該等帶之間之區域中的PDMS的變形。另一方面，沿該等帶之應變是由該等波之結構的變化來適應。圖14A中之三維高度影像及表面輪廓呈現代表性的壓縮、未受力及延伸狀態(自該樣品上輕微不同之位置處收集)。在此等及其他情況下，該等帶在變形期間保持其正弦(圖14A之右邊框中的

線)形狀，其中波結構的大約一半位於如由該等帶之間的區域界定之PDMS表面的未受力位置之下(圖15)。圖14B展示相對於該未受力狀態(零)之壓縮(負)及拉伸(正)施加之應變的波長及振幅。該等資料對應於自每點處大量(>50)帶收集之平均的AFM量測結果。所施加的應變由該PDMS基板之所量測的末端間尺寸變化確定。藉由AFM之直接表面量測連同由該等正弦波形估算得之圍線積分展示了所施加的應變等於此處檢查之情況之帶應變(圖16)。(在比該預應變減去該臨界應變更大之拉伸應變處持續之小振幅(<5 nm)波可由在該初始翹棱過程期間Si之輕微滑動而導致。在此小(或零)振幅區中計算得之矽應變峰值及帶應變低於實際值。)有趣地是，該等結果指示了該等波狀帶對於所施加應變有兩種不同實體回應。處於緊張狀態時，該等波以一非直觀方式演變：波長不隨所施加應變而明顯變化，從而與翹棱後機理一致。相反，振幅之變化適應該應變。在此狀態中，矽應變隨著延伸該PDMS而變小；當所施加應變等於該預應變時其達到~0%。相反，在壓縮時，隨著增加所施加應變，該等波長減少且振幅增加。此機械回應與一手風琴風箱之機械回應類似，其與拉緊時之特性有本質的不同。在壓縮期間，歸因於波峰及波谷處之曲率半徑之減小，矽應變隨著所施加應變增加而增加。然而，矽應變之增加速率及大小皆遠低於帶應變，如圖14B所示。此機理使可延伸性成為可能。

與波狀幾何形狀一致之應變範圍中的完全回應可藉由給

出波長 λ 對其在初始翹棱狀態中之值 λ_0 ，及所施加應變 $\varepsilon_{applied}$ 的相依性之方程式來定性地描述：

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 & \text{對於拉伸} \\ \lambda_0(1 + \varepsilon_{applied}) & \text{對於壓縮} \end{cases} \quad (2)$$

舉例而言，此拉緊/壓縮不對稱可由在壓縮期間形成之該PDMS及Si之上升區域之間的輕微可逆間隔所產生。對於此情況，連同對於未呈現此不對稱性質之系統，拉緊及壓縮之波振幅 A 皆由對於適度應變(<10-15%)有效的單一陳述式給出：

$$A = \sqrt{A_0^2 - h^2 \frac{\varepsilon_{applied}}{\varepsilon_c}} = h \sqrt{\frac{\varepsilon_{pre} - \varepsilon_{applied}}{\varepsilon_c} - 1} \quad (3)$$

其中 A_0 係對應於該初始翹棱狀態之值。如圖14A所示，此等陳述式獲得與實驗的數量一致，而無任何參數擬合。當適應該拉伸/壓縮應變之波狀起伏保持時，矽應變峰值由該彎曲條件控制且由(33)給出

$$\varepsilon_{Si}^{peak} = 2\varepsilon_c \sqrt{\frac{\varepsilon_{pre} - \varepsilon_{applied}}{\varepsilon_c} - 1} \quad (4)$$

其與圖14B中由曲率量測之應變十分一致。(亦參看圖18)。此分析陳述式有助於界定該系統能承受而不使矽破裂之所施加應變之範圍。對於0.9%之預應變，若假設矽失效應變為約2%(對於壓縮或者拉伸)，則此範圍為-27% to 2.9%。控制預應變之位準允許將此應變範圍(意即接近30%)用以平衡壓縮與拉伸變形的所要程度。舉例而言，一3.5%之預應變(所檢查之最大值)產生-24% to 5.5%的範

圍。吾人注意到此等計算假設甚至在極端的變形水準下所施加應變也等於帶應變。在實驗上，吾人發現歸因於在該等帶之末端以外及該等帶之間用以適應應變以使得所施加應變不被完全轉移至該等帶的PDMS之能力，此等估算結果通常被超過。

吾人已藉由在製造序列(圖10，頂部框)之開始包括額外之步驟來使用習知處理技術界定矽中摻雜劑的圖案、薄金屬觸點及介電層而建立功能性、可延伸裝置。以此方式製造之兩個及三個端子裝置、二極體及電晶體分別提供具有進階功能性之電路的基礎建構區塊。其中整合之帶裝置首先被自SOI起離至一未變形PDMS板上且然後至一預應變PDMS基板之雙重轉移過程可建立波狀裝置，其具有經曝露以用於探測的金屬觸點。圖17A及17B展示針對施加至PDMS之各種位準之應變的一可延伸pn接面二極體之光學影像及電回應。吾人發現在具有延伸或壓縮之裝置的電性質中沒有在資料之散佈範圍中的系統變化。該等曲線中之偏差主要歸因於探針觸點之品質之變化。此等pn接面二極體除作為普通整流裝置之外可用作一光偵測器(處於相反偏壓狀態)或用作光伏打裝置。光電流密度在約-1 V之反向偏壓時為約35 mA/cm²。在正向偏壓，短路電流密度及開路電壓分別為約17 mA/cm²及0.2 V，其產生0.3之填充因子。回應之形狀與模型化(圖17B中之實線)一致。裝置性質即使在約100個壓縮、延伸及釋放週期之後亦未顯著變化(圖19)。圖17C展示一可延伸、波狀矽肖特基障壁金屬

氧化物半導體場效應電晶體(MOSFET)之電流-電壓特性，該MOSFET是藉由與用於pn二極體之程序類似的程序且藉由作為閘極介電質(33)之熱SiO₂之整合薄層(40 nm)形成。由對此波狀電晶體之電學量測而擷取之裝置參數(線形範圍遷移率約100 cm²/Vs(可能限於觸點)、臨限電壓約-3 V)可與使用相同處理條件在SOI晶圓上形成的裝置之裝置參數相比較。(圖20及21)。如在pn二極體中，此等波狀電晶體能可逆地延伸及壓縮至大應變位準而不損傷該等裝置或顯著改變電性質。在二極體及電晶體中，在該等裝置之末端以外的PDMS之變形導致比所施加應變更小的裝置(帶)應變。總體可延伸性由裝置可延伸性及此等類型之PDMS變形之組合效應導致。在比此處檢查之壓縮應變更大之壓縮應變下，PDMS傾向於以一使得探測變得困難的方式彎曲。在更大之拉緊應變下，視矽厚度、帶長度及矽與PDMS之間結合的強度而定，該等帶破裂、抑或滑動且保持完整。

此等可延伸矽MOSFET及pn二極體僅表示可形成之許多類型"波狀"電子裝置中之兩種。完整電路薄片或薄矽板亦可被結構化為單軸或雙軸可延伸波狀幾何形狀。除了波狀裝置之惟一機械特性以外，會在許多半導體中產生的應變與電子特性的耦合亦提供了設計可利用應變中之機械可調節、週期性變化以達成不同尋常之電子回應之裝置結構的機會。

材料及方法

樣品製備：由Si基板(Soitec公司)上的SiO₂(145 nm、145 nm、200 nm、400 nm、400 nm或1 μm之厚度)上的Si(20、50、100、205、290或320 nm之厚度)組成之絕緣物上矽(SOI)晶圓。在一種狀況下，吾人使用Si(Shin-Etsu)上的Si(約2.5 μm之厚度)及SiO₂(約1.5 μm之厚度)之SOI晶圓。在所有狀況下，摻雜硼(p型)或磷(n型)之頂部Si層具有在5至20 Ωcm之間的電阻率。此等SOI晶圓之頂部Si以光阻劑(AZ 5214光阻劑，Karl Suss MJB-3 接觸遮罩對準器)圖案化且經反應性離子蝕刻(RIE)以界定Si帶(5~50 μm寬，15 mm長)(PlasmaTherm RIE, SF6 40sccm, 50mTorr, 100W)。藉由在HF(49%)中底切蝕刻來移除該SiO₂層，該蝕刻時間主要視Si帶之寬度而定。橫向蝕刻速率通常為2至3 μm/min。藉由將基底與固化劑以10:1之重量比例混合且在70°C下固化>2小時或在室溫下固化>12小時來準備聚(二甲基矽氧烷)(PDMS)彈性體(Sylgard 184, Dow Corning)之板。

將此等PDMS平板(1至3 mm之厚度)與已蝕刻SOI晶圓上之Si共形接觸以產生該等波狀結構。可使用在此接觸之前建立該PDMS之受控膨脹、繼之以在自晶圓移除後收縮的任何方法。吾人檢查三種不同技術。在第一種技術中，在接觸該SOI基板之後對PDMS之機械輥軋建立該等預應變。儘管波狀結構可以此方式形成，但是其傾向於具有非均勻的波週期及振幅。在第二種技術中，在接觸之前將該PDMS(熱膨脹係數=3.1×10⁻⁴ K⁻¹)加熱至30°C與180°C之間

的溫度且然後在自該SOI移除後將其冷卻，其以一高度可重現的方式在大面積上產生具有良好均勻性之波狀Si結構。以此方法，吾人藉由改變溫度來準確地控制PDMS中預應變位準(圖12)。第三種方法使用在與SOI接觸之前用機械台延伸且接著在移除之後實體地釋放之PDMS。與熱學方法類似，此方法允許有良好均勻性及重現性，但與該熱學方法相比更難以精細地調節預應變位準。

對於諸如pn接面二極體及電晶體之裝置，電子束蒸鍍(Temesal BJD1800)且光微影圖案化(經由蝕刻或起離)的金屬層(Al、Cr、Au)充當觸點及閘極。將旋塗摻雜劑(SOD)(對於p型，B-75X，Honeywell，USA；對於n型，P509，Filmtronics，USA)用於摻雜矽帶。首先將該等SOD材料旋塗(4000 rpm，20 s)至預圖案化SOI晶圓上。藉由電漿增強化學氣相沈積(PECVD)(PlasmaTherm)製備之二氧化矽層(300 nm)用作該SOD之遮罩。在950°C加熱10秒之後，使用6:1之緩衝氧化物蝕刻劑(BOE)蝕刻掉SOI晶圓上之SOD與遮罩層。對於電晶體裝置，熱生長(藉由爐中之高純度氧氣流乾式氧化至25 nm與45 nm之間的厚度，1100°C，10~20分鐘)之二氧化矽提供閘極介電質。在完成該SOI基板上的所有裝置處理步驟之後，藉由光阻(AZ5214或Shipley S1818)來覆蓋具有整合之裝置結構之Si帶(通常50 μm寬，15 mm長)以在下層SiO₂之HF蝕刻期間保護該裝置層。在藉由氧電漿移除該光阻層之後，將無任何預應變之平坦PDMS(70°C，>4小時)板用於自處於平坦幾何形狀

的 SOI 基板移除該等帶裝置。然後將部份固化的 PDMS (在將基底與固化劑混合之後在室溫下 >12 小時) 板與該完全固化 PDMS 板上的該等 Si 帶裝置接觸。完成該部份固化 PDMS 之固化 (藉由在 70°C 加熱)，接著移除此板，將該等裝置自該第一 PDMS 板轉移至該新 PDMS 基板。與冷卻至室溫相關聯之收縮會建立一預應變，使得移除及釋放建立波狀裝置，同時電極被曝露以用於探測。

量測：將原子力顯微圖 (AFM) (DI-3100, Veeco) 用以精確地量測該等波性質 (波長、振幅)。自所獲得之影像，量測且統計地分析沿該波狀 Si 之截面輪廓。使用一自製延伸台、以及 AFM 及半導體參數分析器 (Agilent, 5155C) 來量測波狀 Si/PDMS 之機械及電回應。藉由 Jobin Yvon HR 800 光譜分析器使用來自 He-Ne 雷射之 632.8 nm 的光執行拉曼量測。沿該波狀 Si 以 1 μm 間隔量測該拉曼光譜，其中在沿該等結構之長度的每一位置處調整焦點以最大化訊號。所量測光譜藉由洛仁子函數來擬合以定位尖峰波數。歸因於尖峰波數對顯微鏡之聚焦位置之輕微依賴，拉曼結果僅提供對應力分佈的定性瞭解。

圍線長度、帶應變及矽應變之計算：該等實驗結果展示，對於此處探究之材料及幾何形狀範圍，波狀 Si 的形狀可準確地用簡單正弦函數 (意即， $y = A \sin(kx)$ ($k = 2\pi/\lambda$)) 來表示。然後按 $L = \int_0^\lambda \sqrt{1+y'^2} dx$ 來計算該圍線長度。

使用 $\varepsilon = \frac{|\lambda - L|}{\lambda}$ 來計算波狀 Si 之帶應變。矽應變峰值在該等波之波峰及波谷處產生，且使用 $\varepsilon_{\text{Si}}^{\text{peak}} = \frac{h}{2R_c}$ 來計算，其中 h 為

Si 厚度，且 R_c 係波峰或波谷處之曲率半徑，其由

$R_c = \frac{1}{y''} \Big|_{x=\pm \left[\frac{(2n-1)\pi}{2k} \right]}$ 給出，其中 n 係一整數且 y'' 係 y 關於 x 的二階導

數。使用該實際形狀之正弦函數近似，矽應變峰值由

$\epsilon_{Si}^{peak} = \frac{2\pi^2 Ah}{\lambda^2}$ 給出。圖 12 展示作為用以建立該預應變之溫度

之函數的波長。如圖 13 展示，歸因於波振幅及波長對厚度

之線形相依性 ($A \sim h$, $\lambda \sim h$)，該應變峰值獨立於 Si 厚度。圖

15 展示了波狀結構包含相對於該等帶之間之 PDMS 表面的

水平面的幾乎相等之向上及向下移位。矽帶應變等於此處

檢查之系統之所施加應變(圖 16)。

一手風琴風箱模型：當在壓縮時矽可與 PDMS 分離時，

系統由手風琴風箱機理而非翹棧機理支配。在該風箱狀況

下，所施加之壓縮應變 ($\epsilon_{applied}$) 之波長為 $\lambda_0(1 + \epsilon_{applied})$ ，其

中 λ 為無應變組態中的波長，如方程式 (2) 所描述。因為矽

帶之圍線長度在壓縮應變之前及之後近似相同，吾人可使

用以下關係式來確定波振幅 A 。

$$\int_0^{\lambda_0} \sqrt{1 + \left[\left(A_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda_0} x \right) \right]^2} dx = \int_0^{\lambda_0(1+\epsilon_{applied})} \sqrt{1 + \left[\left(A \sin \frac{2\pi}{\lambda_0(1+\epsilon_{applied})} x \right) \right]^2} dx$$

此方程式對於 $\frac{A_0}{\lambda_0} \ll 1$ 具有漸近解 $A = \sqrt{1 + \epsilon_{applied}} \sqrt{A \frac{2}{0} - h^2 \frac{\epsilon_{applied}}{\epsilon_c}}$ 。

在小壓縮應變下，此方程式簡化為方程式 (3)，其亦適用於

Si 與 PDMS 之分離係不可能的情況，且該體系遵循翹棧機

理。矽應變峰值由 $\epsilon_{Si}^{peak} = \frac{2\epsilon_c}{(1 + \epsilon_{applied})^{3/2}} \sqrt{\frac{\epsilon_{pre} - \epsilon_{applied}}{\epsilon_c} - 1}$ 給出。對於中

度壓縮應變，此陳述式近似與方程式 (4) 相同。在施加中度

應變的界限內，與波振幅類似，矽應變峰值對於該風箱模型及該翹棱模型具有類似函數形式。圖18展示根據以上陳述式及根據方程式(4)計算之應變峰值。

裝置特徵化：將半導體參數分析器(Agilent, 5155C)及習知探測台用於該等波狀pn接面二極體及電晶體之電學特徵化。Pn二極體之光回應在約 1 W/cm^2 之照度下量測，如藉由一光學功率計(Ophir Optronics公司, Laser Power Meter AN/2)來量測。吾人使用機械台在延伸及壓縮期間及之後來量測該等裝置。作為探究該過程之可逆性的方法，吾人在約100個壓縮(至約5%應變)、延伸(至約15%應變)及釋放週期之前及之後在環境光下量測三個不同pn二極體。圖19展示結果。圖20及21展示來自波狀電晶體之影像、示意性說明及裝置量測結果。

實例2：用於彈性體基板上的高效能電子電路之翹棱及波狀GaAs帶

製造厚度在次微米範圍內且具有良好界定的、"波狀"及/或"翹棱"幾何形狀之單晶GaAs帶。位於一彈性體基板之表面上或嵌入一彈性體基板中之所得結構展示達到 $>10\%$ 之應變的可逆延伸性及壓縮性，比GaAs自身的可逆延伸及壓縮應變大十倍以上。藉由在此等結構之GaAs帶上整合歐姆及肖特基觸點，可達成高效能可延伸電子裝置(例如金屬半導體場效應電晶體)。此類電子系統可單獨使用或與類似設計之矽、介電質及/或金屬材料組合使用，以形成用於要求高頻率運作以及可延伸性、極端可撓性或與具有複

雜曲線形狀之表面相符的能力之應用的電路。

在傳統微電子學中，主要根據速度、功率效率及整合層級來量測效能能力。而在其他更新的電子裝置形態中的進步是由在非習知基板(例如低成本塑膠、箔、紙)上達成整合或覆蓋大面積之能力所驅動的。舉例而言，藉由等形地包裹身體以數位地將所要組織成像之大面積成像器可達成新形式的X射線醫療診斷。可在多種表面及表面形狀上展開之輕重量、牆壁尺寸之顯示器或感測器提供了用於建築設計之新技術。已探究包括小有機分子、聚合物、非晶系矽、多晶矽、單晶矽奈米線及微結構帶之各種材料，以充當可支援此等及其他應用之類型的薄膜電子裝置的半導體通道。此等材料使具有跨越一廣泛範圍(意即自 10^{-5} 至 $500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)之遷移率及在可撓性基板上呈可機械彎曲薄膜形態之電晶體成為可能。諸如大孔徑干涉合成孔徑雷達(InSAR)及射頻(RF)監視系統之要求高速運作之應用要求具有很高遷移率的半導體，諸如GaAs，或InP等等。單晶複合物半導體之脆弱性產生若干必須克服之製造挑戰以便製造具有該等半導體的高速、可撓性電晶體。吾人藉由使用自高品質塊晶圓建立之印刷GaAs線陣列來於塑膠基板上建構金屬半導體場效應電晶體(MESFET)而建立一實際方法。此等裝置即使在中等規模裝置(例如微米間長度)中亦展示良好機械可撓性及接近2 GHz之 f_T 。此實例展示基於GaAs帶之MESFET(與線裝置相反)，其經設計具有特殊幾何形狀，不僅提供可彎曲性而且提供顯著超過該GaAs自身

的本質屈服點(約2%)之應變水準(約10%)之機械可延伸性。所得之類型的可延伸高效能電子系統可提供極高水準的可彎曲性及與曲線表面等形整合之能力。此GaAs系統實例以四種重要方式擴展吾人所描述之"波狀"矽：(i)其展示GaAs(GaAs在實際條件下是比Si更機械脆弱之材料)之可延伸性，(ii)其引入一新"翹棱"幾何形狀，其可連同先前描述之"波狀"組態或獨立於先前描述之"波狀"組態而用於實現可延伸性，(iii)其達成一新類型可延伸裝置(意即MESFET)，及(iv)其展示了與矽相比可延伸於更大範圍中且在壓縮/拉緊中具有更大對稱性的延伸。

圖22說明用於在一由聚(二甲基矽氧烷)(PDMS)製造之彈性體基板上製造可延伸GaAs帶之步驟。該等帶由具有多個磊晶層之高品質GaAs塊晶圓產生。該晶圓是藉由在(100)半絕緣GaAs(Si-GaAs)晶圓上生長一200 nm厚AlAs層，接著順序沈積一具有150 nm厚度之Si-GaAs層及具有120 nm厚度及 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 載體濃度之Si摻雜n型GaAs層來製備。與(0 11)結晶方向平行而界定之光阻線之圖案充當磊晶層(包括GaAs及AlAs)的化學蝕刻之遮罩。使用 H_3PO_4 及 H_2O_2 之含水蝕刻劑之各向異性蝕刻將此等頂部層隔離為具有由光阻界定的長度及取向，且具有相對於晶圓表面成銳角之側壁的個別條塊。在該各向異性蝕刻之後移除該光阻且接著將該晶圓浸泡於HF之乙醇溶液(乙醇與49%含水HF之間體積比為2:1)可移除該AlAs層及釋放GaAs帶(n-GaAs/Si-GaAs)。在此步驟中，使用乙醇取代水減少了歸

因於乾燥期間之毛細管力之作用而在該等易碎帶中可發生的破裂。與水相比乙醇之更低之表面張力亦最小化了在該等GaAs帶之空間布局中的由乾燥引發之無序。在下一步驟中，將具有釋放的GaAs帶之晶圓與一預延伸PDMS平板之表面接觸，使該等帶沿延伸方向對準。在此種狀況下，凡得瓦爾力在PDMS與GaAs之間之交互作用中占主要地位。對於要求更強交互作用強度之狀況，將SiO₂之一薄層沈積至GaAs上，且在接觸之前不久將PDMS曝露於紫外線引發之臭氧(意即，空氣中氧氣之產物)。臭氧在PDMS之表面上產生-Si-OH基團，其一經接觸就與SiO₂表面反應以形成橋接矽氧烷-Si-O-Si-鍵。由於該等帶之側面之幾何形狀，所沈積SiO₂在每一帶的邊緣處係非連續的。對於弱及強結合程序兩者而言，將該PDMS自該母晶圓剝離就使所有帶轉移至PDMS之表面。使該PDMS中預應變鬆弛會導致沿該等帶之大尺度翹棱及/或正弦波狀結構之自發形成。該等帶之幾何形狀極大地取決於施加至該印章之預應變(藉由 $\Delta L/L$ 界定)、PDMS與帶之間的交互作用、及該等帶之撓曲剛性。對於此處研究之帶，小預應變(<2%)對於強及弱交互作用之狀況皆產生具有相對小的波長及振幅之高度正弦的"波"(圖22右邊框、中間框)。GaAs中此等幾何形狀與針對Si報告之幾何形狀類似。可施加更高之預應變(例如高達約15%)以建立類似類型的波，其中在該等帶與該基板之間存在強結合。在弱交互作用強度及大預應變之狀況下形成由具有相對大振幅及寬度之無週期"翹棱"組成之不同類型

的幾何形狀(圖 22 右邊框、頂部框)。另外，吾人之研究結果展示兩種類型結構(翹棱及波)可在單一帶中共存，其撓曲剛性沿其長度變化(例如歸因於與裝置結構相關聯之厚度變化)。

圖 23 展示了藉由 PDMS(約 5 mm 厚度)與帶之間的強結合而形成之具有 270 nm(包括 *n*-GaAs 及 Si-GaAs 層)厚度及 100 μm (此實例中討論的所有帶皆具有 100 μm 之寬度)寬度之波狀 GaAs 帶的若干顯微圖。使用在 GaAs 上的 2-nm Ti 及 28-nm SiO_2 層，該製造遵循強結合之程序。在結合之前不久或在結合期間藉由熱膨脹(在一烘箱中加熱至 90°C)而在 PDMS 中建立約 1.9%(自 PDMS 之熱回應計算得)的雙軸預應變。此加熱亦加速界面矽氧烷鍵之形成。在將 GaAs 帶轉移之後將該 PDMS 冷卻至室溫(約 27°C)，從而釋放預應變。圖 23 之框 A、B 及 C 分別展示用光學顯微鏡、電子掃描顯微鏡(SEM)及原子力顯微鏡(AFM)自相同樣品收集之影像。該等影像展示了該等 GaAs 帶中週期性、波狀結構之形成。藉由自 AFM 影像(圖 23D)估計切割線(圖 23E 及 23F)來定量地分析該等波。與帶之縱向方向平行之圍線清楚地展示了與正弦波(圖 23E 之虛線)的計算擬合一致的週期性、波狀輪廓。此結果與對半無限低模數支撐物上的均勻的、薄的、高模數層中之起始翹棱幾何形狀之非線性分析達成一致。與此函數關聯之峰-峰振幅及波長分別被確定為 2.56 及 35.0 μm 。自該印章上鄰近兩個尖峰之間水平距離(意即該波長)與該等尖峰之間實際圍線長度(意即藉由 AFM 量測的

表面距離)之間的比例計算之應變(吾人稱為帶應變)產生比該PDMS中預應變更小的值(意即1.3%)。此差別可歸因於PDMS之低剪力模數及與比PDMS基板之長度更短的GaAs帶之長度相關之島效應。在波峰及波谷處之GaAs帶之表面應變(吾人稱為最大GaAs應變)由帶厚度及根據 $kh/2$ (其中K為曲率)的該等波之波峰或波谷的曲率半徑求得。在此估算中,因為該PDMS可被視為模數與GaAs之模數相比較低之半無限支撐物(GaAs之楊氏模數:85.5 GPa對PDMS之楊氏模數:2 MPa),所以可忽略該PDMS印章中應變對GaAs的直接影響。對於圖23E之資料,最大GaAs應變為約0.62%,其比帶應變(意即1.3%)小兩倍以上。此機械優勢在GaAs帶中提供可延伸性,物理性質與波狀Si相似。

如圖23F中所示,該等帶之波峰及波谷區域分別比原始PDMS之表面(意即無帶的區域)之輪廓水平面(綠曲線之右邊部分)更高及更低。該結果暗示作為分別由波峰及波谷中的GaAs帶施加至PDMS之向上及向下力之結果,GaAs下的PDMS採取一波狀輪廓。靠近該等波之波峰的PDMS之準確幾何形狀難以直接估計。吾人懷疑除了向上變形外亦存在由柏松效應引起之橫向頸縮。可藉由將應變施加至PDMS來延伸及壓縮(所謂的所施加應變分別對延伸表示為正而對壓縮表示為負)該PDMS印製器上的波狀帶。圖23A及23B之插圖展示當施加一相對小延伸應變(意即約1.5%)時變形為其原始扁平幾何形狀之帶的影像。進一步的延伸將更多張力應變轉移至該扁平GaAs帶,從而當此過量應變

達到GaAs之失效應變時導致帶之破損。施加至基板之壓縮應變減少該等波狀帶之波長且增加該等波狀帶之振幅。當波峰(及波谷)處之彎曲應變超過該失效應變時就產生壓縮失效。此隨著應變之波長變化與先前矽中的觀察結果一致且與由理想模型推導出的波長不變性之預測不同。

可藉由經由使用一機械台(與熱膨脹相反)而增加施加至PDMS的預應變來改良波狀GaAs帶之可延伸性。舉例而言,將具有SiO₂層之GaAs帶轉移至一具有7.8%預應變之PDMS印章的表面上可產生GaAs中無任何可觀測破裂之波狀帶(圖24A)。此種狀況下,波峰處的彎曲應變估算為約1.2%,其比GaAs之失效應變(意即約2%)更低。與該低預應變狀況類似,當延伸及壓縮該系統時該等波狀帶類似於一手風琴般運作:波長及振幅變化以適應所施加應變。如圖24A所示,該等波長隨著拉伸應變而增加,直至該等帶變為扁平,且隨著壓縮應變減小,直至該等帶破裂。此等變形為完全可逆的,且不包含PDMS上的GaAs之任何可量測的滑動。與在具有弱結合及低得多的預應變之Si帶中所觀測到之略微不對稱性質相比,波長在壓縮及拉伸中隨著所施加應變而線性地變化(見圖24B中黑色線及符號)。

在實際應用中,以一保持該等GaAs帶及裝置之可延伸性之方式將其囊封可為有用的。作為一種可能性之簡單展示,吾人在諸如圖24A中所示者的樣品上澆鑄且固化PDMS預聚合物以將該等帶嵌入PDMS。經嵌入系統展示與未嵌入之系統類似之機械性質,意即延伸該系統時增加波長而

壓縮該系統時減少波長(圖 24B 中紅色線及符號)。歸因於固化第二 PDMS 層之收縮產生中等量的額外應變(約 1%)。此應變導致該等波狀帶之波長中的略微減少，進而略微擴展了可延伸性之範圍。圖 24B 展示該差別。總的來說，以約 7.8% 之預應變產生之系統可延伸或壓縮至高達約 10% 的應變而不在 GaAs 中引致任何可觀測之破損。

PDMS 基板上的波狀 GaAs 帶可用以製造高效能電子裝置，諸如 MESFET，該等電子裝置之電極是經由在轉移至 PDMS 之前在晶圓上的金屬化及加工而形成。此等金屬層以一空間相依之方式改變該等帶之撓曲剛性。圖 25A 展示在轉移至一具有約 1.9% 之預應變之 PDMS 基板之後與歐姆條(源極及汲極)及肖特基觸點(閘極)整合的 GaAs 帶。該等歐姆觸點由包括 AuGe(70 nm)/Ni(10 nm)/Au(70 nm) 之金屬堆疊組成，該等金屬堆疊係經由微影界定之遮罩以及在一具有流動的 N_2 之石英管中在高溫(意即 450°C 持續 1 min) 下將晶圓之順序退火而形成於初始晶圓上。此等歐姆區段具有 $500\ \mu\text{m}$ 之長度。兩個相鄰歐姆觸點之間之距離為 $500\ \mu\text{m}$ (意即通道長度)。具有 $240\ \mu\text{m}$ 之長度(意即閘極長度)之肖特基觸點係藉由根據光微影設計之遮罩經由電子束蒸鍍直接沈積 75-nm Cr 層及 75-nm Au 層來產生。該等電極具有等於該等 GaAs 帶之寬度，意即 $100\ \mu\text{m}$ ；其相對大尺寸便利了探測。可顯著減小電極及半導體通道之尺寸以達成增強之裝置效能。如圖 25A 中所示，此等可延伸 GaAs MESFET 僅在無電極之區域中展示短程週期波。在較厚區

域中不存在波是由主要歸因於與該等金屬相關聯之額外厚度的該等區域的增強的撓曲剛性所引起的。可藉由使用大於約3%之預應變而在更厚區域中起始週期波。然而，在此等狀況下，歸因於關鍵瑕疵及/或在該等金屬電極之邊緣附近的高應變峰值，該等帶傾向於在該等金屬電極的邊緣處破裂。此失效模式限制了可延伸性。

為克服此侷限性，吾人藉由消除矽氧烷鍵結來減小MESFET與PDMS之間之交互作用的強度。對於此等實例，歸因於該等帶自PDMS表面之實體脫離，>3%之預應變就產生具有相對大寬度及振幅之大的、無週期翹棱。圖25B呈現此類型系統(如以約7%之預應變製備)，其中該等大的翹棱形成於該等裝置的較薄之區域中。如該等垂直線所指示，該脫離似乎略微擴展至具有歐姆條之較厚區域。沿帶之對比度變化係歸因於反射及與通過該曲線GaAs區段之光相關的折射。該SEM影像(圖25C)清楚地展示弧形翹棱及扁平、未受力PDMS之形成。此等翹棱顯示尾部延伸至具有歐姆觸點之側邊的非對稱輪廓(如由紅色曲線指示)。此不對稱可歸因於個別電晶體之歐姆條及肖特基觸點之不等長度(500 μm 對240 μm)。藉由約6%與約7%之間之所施加延伸應變，此類翹棱MESFET可延伸至其原始扁平狀態(圖25D)。然而，由於弱結合，壓縮圖25B中所示之系統導致帶自PDMS表面之連續脫離而形成更大的翹棱。根據先前描述之程序將此等裝置嵌入PDMS中消除了此類非受控之性質。圖25B展示此系統，其中液態PDMS前驅物填充該等

翹棱之下之間隙。完全包圍之PDMS限定了該等帶且防止其滑動及脫離。嵌入裝置能可逆地延伸及壓縮至高達約6%之應變而不損壞該等帶。值得注意的是，當將嵌入系統壓縮-5.83%(圖25E之頂部框)時，在具有金屬電極之區域中形成週期性的小的波狀以及在翹棱區域中形成新的波紋。此等新的小波狀之形成(與該等大翹棱組合)增強了可壓縮性。延伸該系統迫使該等翹棱區域以一使得此等翹棱可變平之方式來壓縮及延伸該PDMS，進而伸長了該等帶的伸出長度(圖25E之底部框)。此等結果表明具有大翹棱(幾何形狀與波狀截然不同)之嵌入裝置代表了一可與波狀方法組合使用或獨立於該波狀方法使用的用以達成可延伸性及可壓縮性之有希望的方法。

翹棱裝置之效能可藉由直接探測自源極至汲極之電流來評估。圖26A展示在一晶圓上製造，使用一扁平PDMS印章揀取且轉移印刷至一具有4.7%之預應變之PDMS基板上的GaAs帶裝置。在此組態中，金屬電極曝露至空氣以用於電探測。在將預延伸之PDMS鬆弛至3.4%之應變之後，週期性的小波狀形成於MESFET之薄區域中(圖26A：自頂部第二個框)。當將該預延伸PDMS印章完全鬆弛時，在純GaAs之每一區段中的小波狀合併為個別的大翹棱(圖26A：自頂部第三個框)。藉由施加4.7%的延伸應變，該等翹棱裝置可延伸至其扁平狀態(圖26A：底部框)。具有0.0%(圖26A：自頂部第三個框)及4.7%(圖26A：底部框)之所施加應變之相同裝置的IV曲線分別以紅色及黑色繪製於圖26B

中。該等結果指示PDMS基板上翹棱MESFET之自源極至汲極之電流可以施加至閘極之電壓來良好地調節，且所施加延伸應變對裝置效能僅產生微小影響。

概括而言，此實例揭示了一用以在PDMS彈性體基板上形成"翹棱"及"波狀"GaAs帶及形成嵌入PDMS彈性體基板中之"翹棱"及"波狀"GaAs帶之方法。此等帶之幾何組態視製造中所使用之預應變位準、PDMS與帶之間交互作用強度、及所使用材料的厚度及類型而定。歸因於翹棱及波狀帶之幾何形狀的以一能適應所施加應變而不將彼等應變轉移至材料自身的方式來進行調節之能力，GaAs多層堆疊及完全形成之MESFET裝置之翹棱及波狀帶展示了較高水準的可壓縮性/可延伸性。在一類似GaAs之本質脆弱之材料中成功實現高水準的機械可延伸性(且作為結果，諸如極端可彎曲性的其他具有吸引力之機械特性)提供了可適用於寬廣範圍的其他材料類型的類似策略。

熱誘發之預應變係歸因於PDMS印章之熱膨脹，其具有 $\alpha_L = 3.1 \times 10^{-4} \mu\text{m}/\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 的本體線性熱膨脹係數。另一方面，GaAs之熱膨脹係數僅為 $5.73 \times 10^{-6} \mu\text{m}/\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。因此，對於在 90°C 製備且冷卻至 27°C 之樣品，PDMS上的預應變(相對GaAs帶)根據 $\Delta\alpha_L \times \Delta T = (3.1 \times 10^{-4} - 5.73 \times 10^{-6}) \times (90 - 27) = 1.9\%$ 來測定。

方法：自IQE公司(伯利恆，PA)購買具有用戶設計之磊晶層之GaAs晶圓。微影製程使用AZ光阻劑(即AZ 5214及AZ nLOF 2020分別用於正及負成像)。在以冰水浴冷卻之

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)中各向異性地蝕刻具有光阻遮罩圖案之GaAs晶圓。用乙醇的稀HF溶液(體積比1:2)(Fisher® Chemicals)將AlAs層溶解。將在母體晶圓上具有釋放的帶之樣品在一通風櫥中乾燥。將經乾燥之樣品置於電子束蒸鍍器(Temesal FC-1800)之腔室中，且鍍覆2-nm Ti及28-nm SiO_2 之順序的層。在AlAs層之移除之前藉由電子束蒸鍍而沈積用於MESFET裝置之金屬。藉由將低模數PDMS之混合物(A:B=1:10，Sylgard 184，Dow Corning)倒至以(三癸氟基-1,1,2,2-四氫辛基)-1-三氯矽烷之單層預改質的一片矽晶圓上，接著在65°C下烘焙4小時來製備具有約5 mm厚度之PDMS印製器。為了產生強結合，將該等印章曝露至UV光5分鐘。在該轉移過程中，經由熱膨脹(在烘箱中)及/或機械力來延伸該等印章。然後將具有釋放的帶之晶圓層壓至經延伸之PDMS印章的表面上，且使其在高溫(視所需預應變而定)保持接觸5分鐘。將母體晶圓自該等印章剝離且將所有帶轉移至印章。經由冷卻至室溫及/或移除該等機械力而將施加至印章之預應變釋放，從而導致沿該等帶之波狀輪廓的形成。在該等機械評估中，使用一特殊設計之台來延伸以及壓縮具有"波狀"及"翹棱"GaAs帶之PDMS印章。

實例3：二維可延伸半導體

本發明提供能在多個方向(包括彼此正交定向之方向)上延伸、壓縮及/或撓曲的可延伸半導體及可延伸電子裝

置。本發明之此態樣之可延伸半導體及可延伸電子裝置當在多個方向上延伸及/或壓縮時展示良好的機械及電子性質及/或裝置效能。

圖 27A-C 提供本發明之展示二維可延伸性之可延伸矽半導體在不同放大程度的影像。圖 27A-B 中展示之可延伸半導體係藉由透過熱膨脹而預應變一彈性基板來製備。

圖 28A-C 提供本發明之展示二維可延伸性之可延伸半導體的三個不同結構構形之影像。如圖所示，圖 28A 中的半導體結構展示一邊緣線波狀構形，圖 28B 中的半導體結構展示一人字形波狀構形，且圖 28C 中的半導體結構展示一隨機波狀構形。

圖 29A-D 提供透過熱膨脹而預應變一彈性基板來製造之本發明之可延伸半導體的影像。

圖 30 展示透過熱膨脹而預應變一彈性基板來製備之展示二維可延伸性之可延伸半導體的光學影像。圖 30 展示對應於多種延伸及壓縮條件之影像。

圖 31A 展示透過熱膨脹而預應變一彈性基板來製造之展示二維可延伸性之可延伸半導體的一光學影像。圖 31B 及 31C 提供關於圖 31A 中展示之可延伸半導體之機械性質的實驗結果。

文獻

1. S. R. Forrest, *Nature* 428, 911 (2004).
2. 對於近來進步及回顧，見 *Proc. IEEE* 93, Iss. 7 及 8 (2005).

3. J.A. Rogers 等人 , *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 98, 4835 (2001).
4. H.O. Jacobs, A.R. Tao, A. Schwartz, D.H. Gracias, G.M. Whitesides, *Science* 296, 323 (2002).
5. H.E.A. Huitema 等人 , *Nature* 414, 599 (2001).
6. C.D. Sheraw 等人 , *Appl. Phys. Lett.* 80, 1088 (2002)
7. Y. Chen 等人 , *Nature* 423, 136 (2003).
8. H.C. Jin, J.R. Abelson, M.K. Erhardt, R.G. Nuzzo, *J. Vac. Sci. Techn. B* 22, 2548 (2004).
9. P.H.I. Hsu 等人 , *IEEE Trans. Electron. Dev.* 51, 371 (2004).
10. T. Someya 等人 , *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 101, 9966 (2004).
11. H.C. Lim 等人 , *Sens. Act. A* 119, 2005, 332 (2005).
12. J. Vandeputte 等人 , US Patent 6,580,151 (2003).
13. T. Sekitani 等人 , *Appl. Phys. Lett.* 86, 2005, 073511 (2005).
14. E. Menard, R.G. Nuzzo, J.A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 86, 2005, 093507 (2005).
15. H. Gleskova 等人 , *J. Noncryst. Sol.* 338, 732 (2004).
16. S.-H. Hur, O.O. Park, J.A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 86, 243502 (2005).
17. X.F. Duan 等人 , *Nature* 425, 274 (2003).
18. Z. Suo, E.Y. Ma, H. Gleskova, S. Wagner, *Appl. Phys.*

Lett. 74, 1177 (1999).

19. Y.-L. Loo 等人, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 99, 10252 (2002).

20. T. Someya 等人, *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 102, 12321 (2005).

21. S.P. Lacour, J. Jones, S. Wagner, Z.G. Suo, *Proc. IEEE* 93, 1459 (2005).

22. S.P. Lacour 等人, *Appl. Phys. Lett.* 82, 2404 (2003).

23. D.S. Gray, J. Tien, C.S. Chen, *Adv. Mater.* 16, 393 (2004).

24. R. Faez, W.A. Gazotti, M.A. De Paoli, *Polymer* 40, 5497 (1999).

25. C.A. Marquette, L.J. Blum, *Biosens. Bioelectron.* 20, 197 (2004).

26. X. Chen, J.W. Hutchinson, *J. Appl. Mech.* 71, 597 (2004).

27. Z.Y. Huang, W. Hong, Z. Suo, *J. Mech. Phys. Solids* 53, 2101 (2005).

28. *Properties of Silicon* (An INSPEC publication, New York, 1988).

29. A. Bietsch, B. Michel, *J. Appl. Phys.* 88, 4310 (2000).

30. N. Bowden 等人, *Nature* 391, 146 (1998).

31. W.T.S. Huck 等人, *Langmuir* 16, 3497 (2000).

32. C.M. Stafford 等人, *Nat. Mater.* 3, 545 (2004).

[1] R. H. Reuss, B. R. Chalamala, A. Moussessian, M. G. Kane, A. Kumar, D. C. Zhang, J. A. Rogers, M. Hatalis, D. Temple, G. Moddel, B. J. Eliasson, M. J. Estes, J. Kunze, E. S. Handy, E. S. Harmon, D. B. Salzman, J. M. Woodall, M. A. Alam, J. Y. Murthy, S. C. Jacobsen, M. Olivier, D. Markus, P. M. Campbell, E. Snow, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1239.

[2] K. Jain, M. Klosner, M. Zemel, S. Raghunandan, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1500.

[3] A. Nathan, B.-K. Park, Q. Ma, A. Sazonov, J. A. Rowlands, *Microelectronics Reliability* 2002, 42, 735.

[4] Reviews: a) H. Sirringhaus, *Adv. Mater.* 2005, 17, 2411. b) S. R. Forrest, *Nature* 2004, 428, 911. c) C. R. Newman, C. D. Frisbie, D. A. da Silva Filho, J.-L. Brédas, P. C. Ewbank, K. R. Mann, *Chem. Mater.* 2004, 16, 4436. d) H. E. Katz, Z. Bao, S. Gilat, *Acc. Chem. Res.* 2001, 34, 359. e) H. E. Katz, *Chem. Mater.* 2004, 16, 4748. f) Y. Sun, Y. Liu, D. Zhu, *J. Mater. Chem.* 2005, 15, 53.

[5] a) D. Knipp, R. A. Street, A. Völkel, J. Ho, *J. Appl. Phys.* 2003, 93, 347. b) C.-W. Chu, S.-H. Li, C.-W. Chen, V. Shrotriya, Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.* 2005, 87, 193508. c) B. S. Ong, Y. Wu, P. Liu, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1412.

[6] a) G. H. Gelinck, H. E. A. Juitema, E. Van

Veenendaal, E. Cantatore, L. Schrijnemakers, J. B. P. H. Van der Putten, T. C. T. Geuns, M. Beenhakkers, J. B. Giesbers, B.-H. Huisman, E. J. Meijer, E. M. Benito, F. J. Touwslager, A. W. Marsman, B. J. E. Van Rens, D. M. de Leeuw, *Nat. Mater.* 2004, 3, 106. b) J. A. Rogers, Z. Bao, K. Baldwin, A. Dodabalapur, B. Crone, V. R. Raju, V. Kuck, H. Katz, K. Amundson, J. Ewing, P. Drzaic, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2001, 95, 4935. c) T. Someya, Y. Kato, S. Iba, Y. Noguchi, T. Sekitani, H. Kawaguchi, T. Sakurai, *IEEE Trans. Electron Devices* 2005, 52, 2502. d) T. Someya, Y. Kato, T. Sekitani, S. Iba, Y. Noguchi, Y. Murase, H. Kawaguchi, T. Sakurai, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2005, 102, 12321.

[7] single crystal a) V. C. Sundar, J. Zaumseil, V. Podzorov, E. Menard, R. L. Willett, T. Someya, M. E. Gershenson, J. A. Rogers, *Science* 2004, 303, 1644. E. Menard, V. Podzorov, S.- H. Hur, A. Gaur, M. E. Gershenson, J. A. Rogers, *Adv. Mater.* 2004, 16, 2097. c) V. Podzorov, E. Menard, J. A. Rogers, M. E. Gershenson, *Phys. Rev. Lett.* 2005, 95, 226601. d) W.-Y. Chou, H.-L. Cheng, *Adv. Func. Mater.* 2004, 14, 811. e) M. Mas-Torrent, P. Hadley, N. Crivillers, J. Veciana, C. Rovira, *ChemPhysChem* 2006, 7, 86.

[8] a) M. Halik, H. Klauk, U. Zschieschang, G. Schmid,

C. Dehm, M. Schütz, S. Maisch, F. Effenberger, M. Brunnbauer, F. Stellacci, *Nature* 2004, 431, 963. b) M.-H. Yoon, H. Yan, A. Facchetti, T. J. Marks, *J. Am. Chem. Soc.* 2005, 127, 10388. c) Y. Jang, D. H. Kim, Y. D. Park, J. H. Cho, M. Hwang, K. Cho, *Appl. Phys. Lett.* 2006, 88, 072101.

[9] a) M. C. Hamilton, S. Martin, J. Kanicki, *Chem. Mater.* 2004, 16, 4699. b) M. J. Deen, M. H. Kazemeini, Y. M. Haddara, J. Yu, G. Vamvounis, S. Holdcroft, W. Woods, *IEEE Trans. Electron Devices* 2004, 51, 1892. c) K. Cheng, M.-H. Yang, W. W. W. Chiu, C.-Y. Huang, J. Chang, T.-F. Ying, Y. Yang, *Macromol. Rapid Commun.* 2005, 26, 247.

[10] a) E. Fortunato, L. Pereira, H. Aguas, I. Ferreira, R. Martins, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1281. b) A. Sazonov, D. Striakhilev, C.-H. Lee, A. Nathan, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1420. c) A. J. Flewitt, W. I. Milne, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1364. d) P. Servati, A. Nathan, *Proc. IEEE* 2005, 93, 1257.

[11] a) C.-S. Yang, L. L. Smith, C. B. Arthur, G. N. Parsons, *J. Vac. Sci. Technol. B* 2000, 18, 683. b) P. I. Hsu, H. Gleskova, M. Huang, Z. Suo, S. Wagner, J. C. Sturm, *J. Non-Crystalline Solids* 2002, 299-302, 1355.

[12] Y. Chen, J. Au, P. Kazlas, A. Ritenour, H. Gates, M. McCreary, *Nature* 2003, 423, 136.

[13] a) M. Wu, S. Wagner, *Appl. Phys. Lett.* 2001, 78,

3729. b) S. Wagner, H. Gleskova, I.-C. Cheng, M. Wu, *Thin Solid Films* 2003, 430, 15. c) M. Wu, S. Wagner, *Appl. Surf. Sci.* 2001, 175-176, 753.

[14] a) S. V. Karnik, M. K. Hatalis, *Jpn. J. Appl. Phys.* 2003, 42, 1200. c) S. V. Karnik, M. K. Hatalis, *Solid-State Electronics* 2003, 47, 653.

[15] P. K. Shetty, N. D. Theodore, J. Ren, J. Menendez, H. C. Kim, E. Misra, J. W. Mayer, T. L. Alford, *Mater. Lett.* 2005, 59, 872.

[16] A. Imparato, C. Minarini, A. Rubino, P. Tassini, F. Villani, D. D. Sala, E. Amendola, M. Kunst, H.-C. Neitzert, S. Bellone, *Thin Solid Films* 2005, 487, 58.

[17] X. Duan, C. Niu, V. Sahi, J. Chen, J. W. Parce, S. Empedocles, J. L. Goldman, *Nature* 2003, 425, 274.

[18] M. C. McAlpine, R. S. Friedman, S. Jin, K.-H. Liu, W. U. Wang, C. M. Lieber, *Nano Lett.* 2003, 3, 1531.

[19] E. Menard, K. J. Lee, D.-Y. Khang, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 2004, 84, 5398.

[20] E. Menard, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 093507.

[21] Z.-T. Zhu, E. Menard, K. Hurley, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 2005, 86, 133507.

[22] K. J. Lee, M. J. Motala, M. A. Meitl, W. R. Childs, E. Menard, A. K. Shim, J. A. Rogers, R. G. Nuzzo, *Adv.*

Mater. 2005, 17, 2332.

[23] Y. Sun, S. Kim, I. Adesida, J. A. Rogers, *Appl. Phys. Lett.* 2005, 87, 083501.

[24] Y. Sun, E. Menard, J. A. Rogers, H.-S. Kim, S. Kim, G. Chen, I. Adesida, R. Dettmer, R. Cortez, A. Tewksbury, *Appl. Phys. Lett.*, submitted.

[25] D.-Y. Khang, H. Jiang, Y. Huang, J. A. Rogers, *Science* 2006, 311, 208.

[26] Y. Sun, J. A. Rogers, *Nano Lett.* 2004, 4, 1953.

[27] Y. Sun, D.-Y. Khang, F. Hua, K. Hurley, R. G. Nuzzo, J. A. Rogers, *Adv. Funct. Mater.* 2005, 15, 30.

[28] T. Buma, M. Spisar, M. O'Donnell, *Appl. Phys. Lett.* 2001, 79, 548.

[29] Z. Y. Huang, W. Hong, Z. Suo, *J. Mech. Phys. Solids* 2005, 53, 2101.

[30] S. Wagner, S. P. Lacour, J. Jone, P.-H. I. Hsu, J. C. Sturm, T. Li, Z. Suo, *Physica E* 2005, 25, 326.

關於以引用方式的併入及變化之聲明

以下參考係關於可在本發明之方法中用以經由接觸印刷及/或溶液印刷技術來轉移、裝配及互連可印刷半導體元件之自裝配技術，且其全文以引用的方式併入本文：(1) "Guided molecular self-assembly: a review of recent efforts", Jiyun C Huie *Smart Mater. Struct.* (2003) 12, 264-271; (2) "Large-Scale Hierarchical Organization of

Nanowire Arrays for Integrated Nanosystems", Whang, D.; Jin, S.; Wu, Y.; Lieber, C. M. *Nano Lett.* (2003) 3(9), 1255-1259; (3) "Directed Assembly of One-Dimensional Nanostructures into Functional Networks", Yu Huang, Xiangfeng Duan, Qingqiao Wei, and Charles M. Lieber, *Science* (2001) 291, 630-633; 及(4)"Electric-field assisted assembly and alignment of metallic nanowires", Peter A. Smith等人, *Appl. Phys. Lett.* (2000) 77(9), 1399-1401。

貫穿本申請案之所有參考，例如包括已頒予或准予之專利或其等效物之專利文獻；專利申請案公開案；未公開專利申請案；及非專利文獻或其他資訊來源材料，以全文引用的方式併入本文，該引用的程度就如同以引用的方式個別併入該等文獻直至每一文獻至少部分與本申請案之揭示內容不一致之範圍(例如，部分不一致的文獻的除了該部分不一致部分外皆被以引用之方式併入本文)。

本文之任何附錄以引用之方式併入本文作為本說明書及/或圖式之部分。

在本文中使用的術語"包含(comprise)"、"包含了(comprises)"、"所包含(comprised)"、"正包含(comprising)"處，應將這些表達理解為規定所說明特徵、整數、步驟，或組件之存在，但不排除一或多個其他特徵、整數、步驟、組件，或其群組之存在或添加。在術語"正包含(comprising)"或"包含(了)(comprise(s))"或"所包含(comprised)"視情況可由語法上類似之術語，例如"由...組成"或"實質上

由...組成"來替代時，亦希望涵蓋本發明之單獨實施例，從而描述不一定同延的另外的實施例。

已參考各種特定及較佳實施例及技術描述本發明。然而，應瞭解到可進行各種變化及修改而同時保持在本發明之精神及範疇內。對於一般熟習此項技術者顯而易見的是，不同於本文中特定描述者之組合物、方法、裝置、裝置元件、材料、程序及技術可應用於如本文廣泛揭示之本發明之實踐而無須訴諸於不適當的實驗。本文所描述之組合物、方法、裝置、裝置元件、材料、程序及技術之所有此項技術中已知之功能等效物皆希望包含於本發明中。無論何時揭示一範圍，皆希望包含所有子範圍及個別值，就像其被獨立提出一樣。本發明並非由所揭示之實施例(包括在圖式中展示或在本說明書中例示者)來限制，該等實施例以實例或說明之方式給出(不具限制性)。本發明之範疇應僅由申請專利範圍來限制。

【圖式簡單說明】

圖1提供一展示本發明之一可延伸半導體結構之原子力顯微圖。

圖2展示一原子力顯微圖，其提供具有曲線內表面之半導體結構之展開視圖。

圖3展示本發明之可延伸半導體結構之陣列的原子力顯微圖。

圖4展示本發明之可延伸半導體結構之光學顯微圖。

圖5展示本發明之具有一半導體結構之可延伸半導體結

構的原子力顯微圖，該半導體結構與一具有三維起伏圖案之可撓性基板結合，該三維起伏圖案位於該基板之支撐表面上。

圖6展示一說明製造本發明之可延伸半導體元件之例示性方法的流程圖。

圖7展示具有由一可撓性橡膠基板支撐之波形曲線內表面之縱向對準的可延伸半導體結構之陣列的圖像。

圖8展示本發明之一可延伸半導體結構之截面影像，其中該可印刷半導體結構776由可撓性基板777來支撐。如圖8所示，可印刷半導體結構776具有內表面，該等內表面具有呈一週期波之輪廓形狀。

圖9A展示一說明製造可延伸薄膜電晶體之陣列的例示性方法之流程圖。圖9B展示處於鬆弛及延伸組態中之可延伸薄膜電晶體之陣列的光學顯微圖。

圖10：在彈性體基板上建構可延伸單晶矽裝置之製程之示意性說明。第一步(頂部框)涉及單晶矽薄(厚度在20與320 nm之間)元件或完整的積體裝置(意即電晶體、二極體等等)之製造，其藉由習知微影處理過程繼之以對絕緣物上矽(SOI)晶圓的頂部矽及SiO₂層之蝕刻來完成。在此等程序之後，帶結構由下層的晶圓支撐但不與其結合(頂部框)。使一預應變彈性體基板(聚(二甲基矽氧烷)PDMS，藉由dL延伸)與該等帶之引線接觸以導致此等材料之間的結合(中部框)。剝離該PDMS，使該等帶結合於其表面上，且接著釋放該預應變使得該PDMS鬆弛回到其不受約束之

狀態(無應力長度 L)。該鬆弛導致在該等帶中自發性形成受到良好控制、極有週期性、可延伸之"波形"結構(底部框)。

圖 11：(A)在PDMS上波狀單晶矽帶(寬度=20 μm ；間距=20 μm ；厚度=100 nm)之一大規模對準陣列的光學影像。(B)自(A)中展示之陣列中取得的四個波狀矽帶之有角度掃描電子顯微圖。該等波結構之波長及振幅在該陣列中極為一致。(C)作為沿PDMS上一波狀Si帶之位置的函數的表面高度(頂部框)及Si拉曼峰之波數(底部框)，分別藉由原子力及拉曼顯微法量測。該等線表示資料之正弦擬合。(D)作為矽之厚度的函數的波狀矽帶之振幅(頂部框)及波長(底部框)，皆針對PDMS中給定位準之預應變。該等線對應於計算，無任何擬合參數。

圖 12：作為溫度之函數的翹棱波長。波長隨溫度增加之略微降低歸因於PDMS的熱收縮，其導致在愈高溫度下製備之樣品的波長愈短。

圖 13：作為矽厚度之函數的矽應變峰值，針對約0.9%之預應變值。紅色符號對應於使用波長及振幅計算得的彎曲應變，該等波長及振幅是基於描述該翹棱過程之方程式而擷取的。黑色符號對應於類似的計算，但使用了藉由AFM量測之波長及振幅。

圖 14：(A)PDMS基板上波狀單晶矽帶(寬度=20 μm ；厚度=100 nm)之原子力顯微圖(AFM；左邊框)及起伏輪廓(右邊框；該等線係實驗資料之正弦擬合)。頂部、中部，及

底部部分分別對應於當PDMS沿帶長度受到-7%(壓縮)、0%(未受力)及4.7%(延伸)的應變時之組態。(B)作為施加至PDMS基板之應變(頂部框)的函數的波狀矽帶之平均振幅(黑色)及波長變化(紅色)。為了波長量測，將不同的基板用於拉緊(圓周)及壓縮(方塊)。矽應變峰值為所施加應變(底部框)之函數。此等圖中之線表示計算，無任何自由擬合參數。

圖 15：PDMS上波狀矽帶之AFM俯視影像，及在相對於該等帶之長維的一角度處估算出之切割線。

圖 16：作為所施加應變之函數的矽帶應變。紅色符號對應於使用波長及振幅藉由輪廓長度之數值積分而計算之應變，該等波長及振幅是使用描述該翹棱過程的方程式擷取。黑色符號對應於沿波狀Si帶在AFM表面輪廓中自表面與水平距離之比例量測得的應變。

圖 17：(A)處於所施加的-11%(頂部)、0%(中部)及11%(底部)應變下之PDMS基板上的可延伸單晶矽pn二極體的光學影像。鋁區域對應於薄(20 nm)Al電極；粉色及綠區域對應於矽之n(硼)及p(磷)摻雜區域。(B)作為可延伸矽pn二極體之偏壓的函數的電流密度，在各種所施加應變位準下量測。標有"亮"及"暗"之曲線分別對應於曝露於環境光或遮蔽於環境光之裝置。實線展示模型化結果。(C)在所施加的-9.9%、0%及9.9%應變下量測之可延伸肖特基障壁矽MOSFET之電流-電壓特性(閘極電壓以1 V步長自0 V變化至-5 V)。

圖 18：作為所施加應變之函數的矽應變峰值。藍色線基於一手風琴風箱 (accordion bellows) 模型，且黑色線係小應變之一近似，其亦與翹棱機構一致。

圖 19：波狀 pn 二極體之電學量測值，在三個不同裝置 (#1、#2 及 #3) 之壓縮 (約 5% 所施加應變)、延伸 (約 15% 所施加應變) 及釋放之約 100 個週期之前 (週期之前) 及之後 (週期之後) 在三個不同裝置中估算得出。該資料指示裝置性質無系統變化。所觀測到的變化之位準與反覆探測不改變所施加應變的單一裝置所得的變化位準相當，且可能歸因於探針觸點之輕微不同。

圖 20：處於未受力狀態 (中部) 及壓縮 (頂部) 及拉緊 (底部) 狀態時之波狀矽肖特基障壁 MOSFET 的光學影像 (頂部框)。該裝置之示意性說明 (底部框)。

圖 21：處於不同所施加應變下時 "波狀" 矽肖特基障壁 MOSFET 中量測得之轉移曲線。

圖 22：用於在 PDMS 基板上產生 "翹棱" 及 "波狀" GaAs 帶之步驟之示意性說明。左邊底部框展示用以促進與該 PDMS 之強結合的在該等帶之表面上的薄 SiO_2 之沈積。此結合導致在右邊中部框中展示之波狀幾何形狀之形成。弱的凡得瓦爾力結合 (及中等至高位準預應變) 導致如右上部框中所展示之翹棱幾何形狀。

圖 23：以經由熱膨脹產生之約 1.9% 之預應變形成之在 PDMS 基板上的波狀 GaAs 帶的影像。相同樣品之光學 (A)、SEM (B)、三維 AFM (C) 及俯視圖 AFM (D) 影像。該 SEM 影像

係藉由在樣品表面與偵測方向之間將該樣品台傾斜 45° 角來獲取。(該等帶上的點可為該等犧牲AlAs層之殘餘物。)分別沿(D)中所示藍色及綠色線繪製之表面高度分佈(E、F)。

圖 24：(A)在不同所施加應變下採集的、以7.8%預應變形成、與該PDMS強結合之波狀GaAs帶之光學顯微圖。左邊及右邊的藍色條加亮顯示了該結構中之某些峰值；此等條之間距離之變化指示波長對所施加應變之相依性。(B)作為(A)中所示波狀GaAs帶之所施加應變之函數的波長變化，以黑色繪製；在嵌入PDMS之後之樣品(A)的系統之類似資料，以紅色繪製。

圖 25：與歐姆(源極及汲極)及肖特基(閘極)觸點整合以形成完整MESFET之GaAs帶之影像。(A)使用1.9%之預應變及與該PDMS之強結合而形成之波狀帶之光學顯微圖，其展示僅在無電極的區域(灰色)中週期波之形成。以約7%之預應變及與該PDMS之弱結合形成之翹棱帶的(B)光學影像及(C)SEM影像。(D)，在(B)中所示之兩個翹棱裝置在其被延伸至平坦之後的光學影像。(E)，在(B)中所示之具有不同外部施加應變(意即自頂部至底部，5.83%之壓縮應變、無施加應變，及5.83%之延伸應變)的個別帶裝置在其被嵌入PDMS之後的一組光學影像。

圖 26：(A)，在PDMS基板中建構之一PDMS印章上具有不同應變之GaAs帶MESFET的光學影像。在該等裝置被轉移至該PDMS印章之表面上之前施加至該PDMS印章的預應

變為4.7%。(B)在該系統被施加4.7%之延伸應變之前及之後(A)中所示的裝置之I-V曲線之比較。

圖27A-C提供展示二維可延伸性之本發明之可延伸半導體在不同放大程度的影像。

圖28A-C提供展示二維可延伸性之本發明之可延伸半導體的三個不同結構構形之影像。

圖29A-D提供藉由通過熱膨脹預應變該彈性基板而製備之本發明之可延伸半導體的影像。

圖30展示在變化之延伸及壓縮狀態下展示二維可延伸性之可延伸半導體的光學影像。

圖31A展示藉由熱膨脹來預應變彈性基板而製造之展示二維可延伸性之可延伸半導體的光學影像。

圖31B及31C提供關於圖31A中展示之可延伸半導體之機械性質的實驗結果。

【主要元件符號說明】

700	半導體元件
705	可撓性基板
710	支撐表面
715	彎曲半導體結構
720	曲線內表面
730	變形軸
750	凹入區域
760	起伏特徵
776	可印刷半導體結構
777	可撓性基板

發明專利說明書

中文說明書

(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：99127004

※ 申請日：95.6.14

※IPC 分類：H01L 21/20 (2006.01)

原申請案號：095121212

一、發明名稱：(中文/英文)

用在橡膠基板上高效能電子組件之可延伸形式之單晶矽

A STRETCHABLE FORM OF SINGLE CRYSTAL SILICON FOR HIGH PERFORMANCE ELECTRONICS ON RUBBER SUBSTRATES

二、中文發明摘要：

本發明提供當延伸、壓縮、撓曲或者以其他方式變形時能提供良好效能之可延伸、且視情況可印刷之半導體及電子電路。較佳用於某些應用的本發明之可延伸半導體及電子電路為可撓性的(除了為可延伸的之外)，且因此能顯著伸長、撓曲、彎曲或沿一或多個軸進行其他變形。另外，本發明之可延伸半導體及電子電路可經調適用於廣泛範圍的裝置組態以提供完全可撓性的電子及光電子裝置。

三、英文發明摘要：

四、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：第 (10) 圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

(無元件符號說明)

五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

(無)

七、申請專利範圍：

1. 一種可延伸半導體元件，其包含：
 - 一具有一支撐表面之彈性基板；及
 - 一具有一曲線內表面之半導體結構，其中該曲線內表面之多個離散點係結合至該彈性基板的該支撐表面，且結合之該等離散點藉由一沒有直接黏合至該彈性基板之翹曲區域而彼此分開，其中該翹曲區域沒有與該基板實體接觸，及其中該曲線內表面具有至少一凸起區域、至少一凹入區域或至少一凸起區域與至少一凹入區域之一組合。
2. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該翹曲區域係處於應變下。
3. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變係選自1%至30%之範圍。
4. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該曲線內表面具有一包含一週期波或一無週期波之輪廓形狀。
5. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該翹曲半導體結構具有一週期波之構形，該週期波延伸該結構之長度的至少一部分。
6. 如請求項5之可延伸半導體元件，其中該翹曲半導體結構具有一正弦波構形，該正弦波構形具有一選自5微米至50微米之範圍的週期及一選自100奈米至1.5微米之範圍的振幅。
7. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該翹曲半導體結

構具有一包含沿該結構之長度延伸的複數個翹曲之構形。

8. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構包含一帶。
9. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該翹曲半導體結構具有一在一維或二維中空間變化之構形，其中該內表面具有一在一維或二維中空間變化之輪廓形狀。
10. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構具有一選自20奈米至320奈米之範圍的厚度。
11. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該彈性基板包含一聚合物。
12. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構係一單晶無機半導體材料。
13. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構包含一材料，該材料選自以下所組成之群組：矽，鍺，碳化矽，磷化鋁，砷化鋁，銻化鋁，氮化鎵，磷化鎵，砷化鎵，銻化鎵，磷化銻，砷化銻，銻化銻，氧化鋅，硒化鋅，碲化鋅，硫化錳，硒化錳，碲化錳，硫化銀，硫化鉛，硒化鉛，碲化鉛，鋁砷化鎵，鋁砷化銻，鋁磷化銻，磷砷化鎵，砷化鎵銻，磷化鎵銻，砷碲化鋁鎵，磷化鋁鎵銻，砷磷化鎵銻，奈米碳管及石墨片。
14. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構包含一可印刷半導體元件。
15. 如請求項1之可延伸半導體元件，進一步包含一與該具

有一曲線內表面之半導體結構接觸的囊封層。

16. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構經由一定位於該半導體結構與該彈性基板之間的黏接層、塗層或薄膜而結合至該彈性基板。
17. 如請求項1之可延伸半導體元件，其中該半導體結構經由位於該半導體結構與該彈性基板之間的氫鍵、凡得瓦爾力交互作用或偶極對偶極交互作用而結合至該彈性基板。
18. 如請求項1之可延伸半導體元件，包含複數個半導體結構帶，每一帶具有一曲線內表面，其中該基板在該等帶之間為平坦。
19. 如請求項6之可延伸半導體元件，其中該週期及該振幅在一1平方公分之基板表面上的5%內係一致。
20. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變大於0.5%。
21. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變大於1%。
22. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變大於2%。
23. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變小於30%。
24. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變小於10%。
25. 如請求項2之可延伸半導體元件，其中該應變小於1%。
26. 一種可延伸電子電路，其包含：
 - 一具有一支撐表面之彈性基板；及
 - 一具有一曲線內表面之電子電路，其中該曲線內表面之多個離散點係結合至該彈性基板的該支撐表面，且結

合之該等離散點藉由一沒有直接黏合至該彈性基板之翹曲區域而彼此分開，其中該翹曲區域沒有與該基板實體接觸，及其中該曲線內表面具有一以一週期波或一無週期波為特徵之輪廓形狀。

27. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該電子電路係一可印刷電子電路。
28. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該電子電路包含複數個積體裝置組件，該複數個積體裝置組件選自由以下所組成之群組：一半導體元件，一介電元件，一電極，一導電元件，及一摻雜半導體元件。
29. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該翹曲區域係處於應變下。
30. 如請求項29之可延伸半導體元件，其中該應變係選自1%至30%之範圍。
31. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該翹曲區域具有一包含一週期波之構形，該週期波延伸該電子電路之長度的至少一部分。
32. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該翹曲區域具有一正弦波構形，該正弦波構形具有一選自5微米至50微米之範圍的週期及一選自100奈米至1.5微米之範圍之振幅。
33. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該翹曲區域具有一包含沿該電子電路之長度延伸的複數個翹曲之構形。
34. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該翹曲區域具有一

在一維或二維中空間變化之構形，其中該內表面具有一
在一維或二維中空間變化的輪廓形狀。

35. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該電子電路具有一
選自20奈米至320奈米之範圍的厚度。

36. 如請求項26之可延伸電子電路，其中該電子電路經由一
定位於該電子電路與該彈性基板之間的黏接層、塗層或
薄膜而結合至該彈性基板。

37. 如請求項26之可延伸電子電路，進一步包含一與該具有
一曲線內表面之電子電路接觸的囊封層。

38. 一種用於製造一可延伸半導體元件之方法，該方法包含
以下步驟：

提供連接至一晶圓之複數個矽帶；

將該等矽帶之一頂表面與一平坦預應變彈性基板保形
地接觸；

以一遠離該晶圓之方向剝離該彈性基板以提升該等帶
與該晶圓分開，而黏接至該彈性基板；

在該彈性基板上釋放該預應變以產生在該等矽帶中之
多個翹曲，

其中該等矽帶具有一曲線內表面，其中該曲線內表面
之多個離散點係結合至該彈性基板的一支撐表面，且結
合之該等離散點藉由一沒有直接黏合至該彈性基板之翹
曲區域而彼此分開。

39. 如請求項38用於製造一可延伸半導體元件之方法，其中
該彈性基板在該等帶之間為平坦。

40. 如請求項38用於製造一可延伸半導體元件之方法，其中該可延伸半導體元件包含一pn接面二極體。
41. 如請求項40用於製造一可延伸半導體元件之方法，其中該pn接面二極體係一光伏打裝置之一部分。
42. 如請求項38用於製造一可延伸半導體元件之方法，其中該可延伸半導體元件包含一場效電晶體。
43. 如請求項38用於製造一可延伸半導體元件之方法，其中該複數個矽帶係藉由以下而提供：
- 在一絕緣體上矽之晶圓上界定一光阻層，藉此界定該複數個帶之尺寸；
 - 移除該光阻層；及
 - 藉由蝕刻將該等帶之一中央部分從下面的該晶圓釋放，而保持該帶的多個端部之連接至該晶圓。
44. 一種用於製造一可延伸半導體元件之雙重轉移方法，該方法包含以下步驟：
- 提供連接至一晶圓之複數個矽帶；
 - 將該等矽帶之一頂表面與一平坦未應變彈性基板保形地接觸；
 - 以一遠離該晶圓之方向剝離該彈性基板以提升該等帶與該晶圓分開，而黏接該等帶至該未應變彈性基板；
 - 將黏接至該未應變彈性基板之該等矽帶之一頂表面與一預應變彈性基板保形地接觸；
 - 以一遠離該未應變彈性基板之方向剝離該預應變彈性基板以提升該等帶與該未應變彈性基板分開，而黏接該

等帶至該預應變彈性基板；及

在該彈性基板上釋放該預應變以產生在該等矽帶中之多個翹曲，

其中該等矽帶具有一曲線內表面，其中該曲線內表面之多個離散點係結合至該彈性基板的一支撐表面，且結合之該等離散點藉由一沒有直接黏合至該彈性基板之翹曲區域而彼此分開。