

壓電振能擷取簡介

林蕙君、舒貽忠¹

國立台灣大學應用力學研究所

1. 前言

近年來，由於生態環境的監測、災害預警系統的構建及智慧型生活空間的發展，多點分佈無線監測網路的佈置已成必然。如何為這些數量龐大且廣設於各種環境中的電子感測裝置供電，將成為伴之而來的一大問題。另一方面，成熟的無線通訊技術和低功率消耗電路的發展，使得感測器的用電量大幅降低，因此發電量有限的環境能量擷取技術——將太陽能、熱能、動能等環境中充斥而尚未被利用的能量透過各種換能器轉為電能——可望成為此供電問題之解決方案。其中又以振動能較不受環境因素的影響而廣受注目¹。

振動能換能器依其發電原理可分為四種：靜電型²(electrostatic)、電磁感應型(electromagnetic)³、磁致伸縮型(magnetostrictive)及壓電型⁴(piezoelectric)。靜電型振動能發電器是利用振動改變帶電結構體的間距，使電容改變進而間接提升電位能並產生電流，缺點是運作前需額外供電才能使結構體帶電。電磁感應型是利用振動改變金屬線圈與磁鐵的距離，磁通量的改變可使線圈產生感應電流。磁致伸縮型則是利用振動使磁致伸縮材料因變形而造成磁場的改變，進而使線圈產生感應電流。然而，線圈與磁性物質之設置得佔據一定的空間，難以微小化，亦無法與微機電製程相容，因此電磁感應型及磁致伸縮型的發電裝置較不適用於微型裝置上。至於壓電型則是利用振動使壓電材料變形並使改變其電場進而產生電流。此方法不需要額外供電，力電耦合性也較佳，生產上亦能配合微機電製程，因而備受國際上不少研究團隊的重視。

本團隊近年來針對壓電振動能量擷取技術在國際期刊上發表了數篇論文：從 2006 年的標準型交流轉直流之壓電振動能量擷取器之理論模型⁵及最佳功率與發電轉換率之解析公式⁶，到 2007 年之壓電振動能量擷取器結合 SSHI 電路的修正公式⁷，及 2010 年的串聯 SSHI 電路之理論分析⁸，皆對此技術做了相當深入的探討。以下將簡單地介紹如何利用壓

¹ 教授 (yichung@iam.ntu.edu.tw)

電材料發電及其應用的機會。

2. 發電原理

陶瓷壓電材料本是一種介電材料，自然狀態下，原子核的正電荷與其電子雲等量的負電荷所形成的電偶極矩(electric dipole moment)會有區域性的方向，這些微小的區域隨機分布於塊材內，整體而言淨值為零。但若在高溫狀態下施加很大的電場，即可使電偶極矩大致順著電場方向，稱為極化(poling)。

極化過的陶瓷壓電材料受力變形時，電偶極矩的密度也會改變，在材料表面產生正負電荷，此即為正壓電效應(direct piezoelectric effect)。分布不均的正負電荷建立了淨電場，意即有電勢能存在。若能在材料表面鋪設電極提供自由電子，電勢能即可驅動這些自由電子產生電流。然而，電流產生的同時，材料表面的正負電荷也會漸漸中和，電勢能終將消失。因此，若欲持續地產生電能就必須使材料振動，反覆的拉伸與壓縮即可產生電性交錯的交流電。

利用振動產生的交流電其頻率、振幅與振動源的性質息息相關，不規則的振動就產生紊亂的電能，得經整流、濾波、調壓等處理後才能輸出穩定且合乎需求的直流電，以供外部負載使用。因此，一個完整的壓電振動能發電機應包含三個部分：傳導環境中的振動能，並將之轉換為電能的「振動子(oscillator)」；將振動子產生的交流電轉換為直流電的「介面電路(interfacing circuit)」及具有調整輸出電壓、系統電阻值功能的「阻抗匹配電路(impedance adapter)」，其能量傳遞途徑如圖 1 所示。

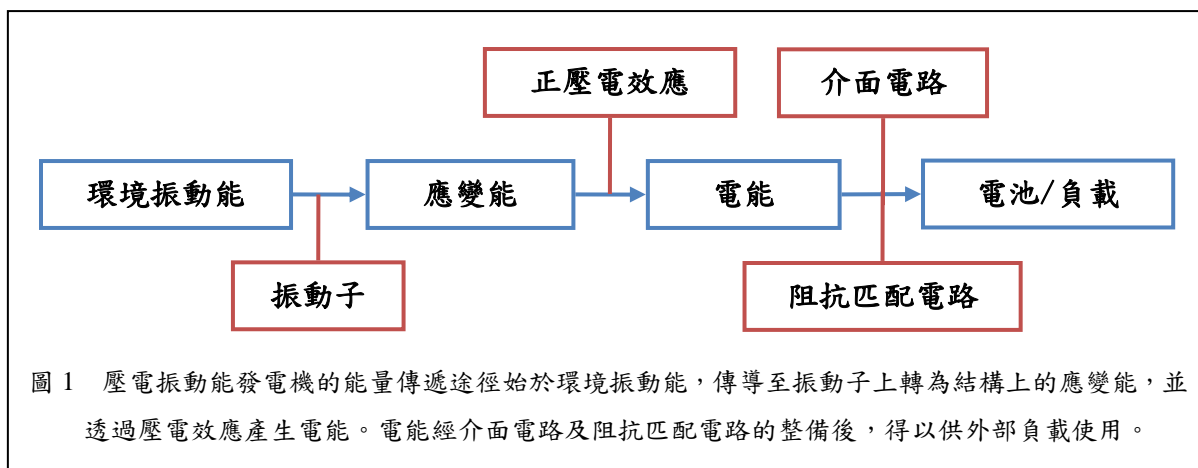


圖 1 壓電振動能發電機的能量傳遞途徑始於環境振動能，傳導至振動子上轉為結構上的應變能，並透過壓電效應產生電能。電能經介面電路及阻抗匹配電路的整備後，得以供外部負載使用。

3. 機構細說

3.1 壓電振動子

振動子必須有效地傳導振動能，使結構產生變形，並將機械應變能有效地轉換為電能。前者要求振動子的共振頻率與振動源的頻率相匹配；後者則要求絕佳的力電耦合能力。在頻率的匹配上，需靠幾何結構的設計來達成^{9,10}，可以是一維的梁形式¹¹或二維的圓形¹²、矩形¹³等，唯二維結構需考慮較複雜的振動模態與電極鋪設方式，在分析設計上較不容易。

力電耦合的性能則以材料的壓電係數 d (每單位應力可產生的電耦極矩) 或 e (每單位應變可產生的電位移) 來表示。常見的材料有 PZT (鋁鈦酸鉛)、PVDF (聚氟乙烯)、ZnO (氧化鋅)，其中 PZT 的壓電係數較其他材料高出百倍以上，故為最常選用之材料。然而，PZT 是一種質地硬而脆的陶瓷材料，使用上常搭配軟性材料作為基材，以改善其易碎裂的本質。PVDF 是一種高分子聚合物，雖然壓電係數稍低，但柔性佳，適用於振幅大的振動環境中，又因其組成成份不含重金屬，所以也較適合用於生物體內；ZnO 則有半導體製程上的優勢，可用於奈微米尺度的振動子上。

力電耦合的性能除了材料間有所不同之外，材料本身因操作模式的不同也有差異。操作模式大致上以 {3-1} 模式與 {3-3} 模式¹⁴ 兩種為主，前者電場方向垂直於應變方向，後者電場方向平行於應變方向。

然而，在分析設計時，我們更常將振動子的機電行為簡化為常微分數學等效模型：

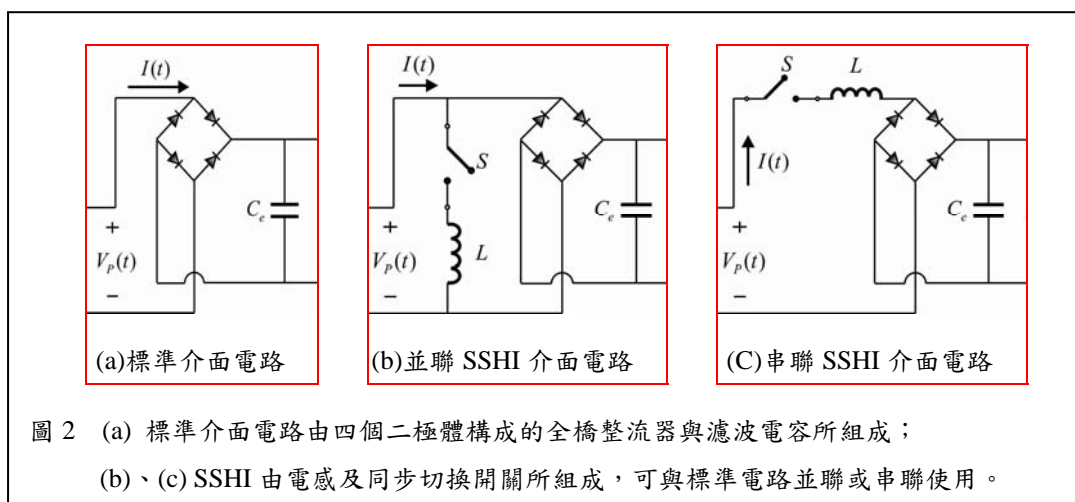
$$\begin{aligned} M \ddot{d}(t) + \eta_m \dot{d}(t) + K_E d(t) + \Theta V_p(t) &= F(t) \\ -\Theta d(t) + C_p V_p(t) &= Q(t) \end{aligned}$$

其中待解的相依變數為： $d(t)$ 為廣義位移、 $V_p(t)$ 為電極兩端的電壓差；機械特性參數： M 、 η_m 、 K_E 分別為廣義質量、阻尼、勁度；電學特性參數： C_p 為寄生電容； Θ 是廣義壓電係數； $F(t)$ 則為振動子所受之外力，與振源的特性有關； $Q(t)$ 為產生之電量，需滿足後續之電路方程式。並依其無因次化的力電耦合係數 ($k_e^2 = \Theta^2 / KC_p$) 與無因次化的機械阻尼係數 ($\zeta_m = \eta / 2\sqrt{KM}$) 之比值，分為強 ($k_e^2 / \zeta_m > 10$)、中 ($1 < k_e^2 / \zeta_m < 10$)、弱 ($k_e^2 / \zeta_m < 1$) 三種不同力電耦合強度的振動子，三者機電行為上大不相同^{5,6}。

3.2 能量擷取介面電路

振動子產生的電能經由鋪設於壓電材料表面的電極導出後，在供外部負載使用前，得先經介面電路的篩選及調整。標準交流轉直流介面電路是由全橋整流器(full bridge rectifier)與電容並聯而成(圖 2-a)，前者將電性交變的電能轉換為單一電性的電能，與後者聯合使用則有整流濾波的效果。

2005 年法國學者 Guyomar 將電感與移接近極值時才導通的 SSD(Synchronized Switch Damping)結構減震技術¹⁵聯合使用於能量擷取介面電路上，合稱為電感式同步切換開關^{16,17}(Synchronized Switch Harvesting in Inductor, SSHI)(圖 2-b,c)。藉由減小振動子的寄生電容值，SSHI 介面電路除了可將發電量提升至標準介面電路的四到九倍之外，且兼有鈍化因振動頻率偏離機械共振頻率所造成的發電效率低落的現象^{7,8}。然而，由於介面電路會主動改變壓電振動子的機電特性¹⁸，所以在分析設計上需格外注意。

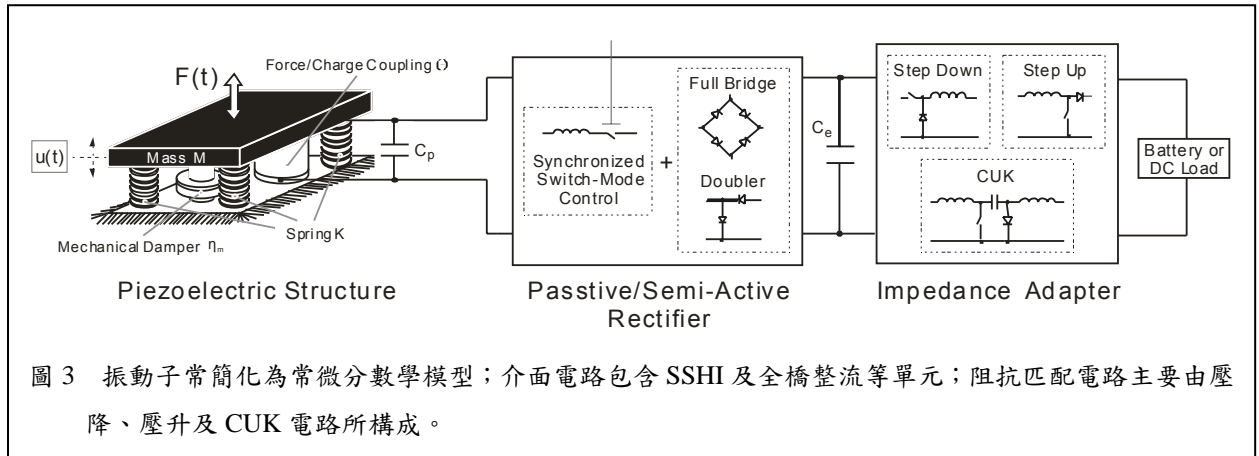


3.3 阻抗匹配電路

經介面電路整備過的電能，雖然已是穩定的直流電，但發電機系統的阻抗未必與外部負載相匹配。為了使電路設計達到最佳化，可透過壓降(step down)、壓升(step up)電路及 CUK 電路等單元所構成的阻抗匹配電路調整系統整體的電阻值及輸出電壓^{19,20}。唯需注意的是，強力電耦合振動子有兩個阻抗匹配點，而中、弱力電耦合振動子卻只有一個匹配點。

總的來說，壓電振動能發電系統在分析設計上可分為三個子部分(圖 3)：振動子要

求振動能傳導能力寬頻化並產生大量電力；介面電路要求高效率的交流轉為直流設計，以提升系統的發電功率；阻抗匹配電路則扮演協調者的角色，使發電系統整體的阻抗與目標負載相匹配，以維持在最佳的運作狀態。



4. 應用機會

壓電振動能發電機的能量傳遞途徑起於環境中的振動機械能，故可利用的振動源為其必要的前提。振動源可來自規律性高且持續進行的機械運作，如：行駛中的車輛傳動軸軸承；人體自然活動時產生的律動²¹，如：步行、脈搏；衝擊性力道產生的振動，如：移動性載重造成的地板振動、點擊軟性物體的表面等。

振動機械能經壓電發電機的轉換及處理後，輸出的直流電需滿足目標電子裝置的耗電量，因此多用於低功率的環境參數感測器、RF 訊號發射器。若要驅動功率稍大的裝置如 LED 顯示設備、手機通訊器材等，則需設置陣列式或多層式的發電單元。

有了適當的振動源、機械能傳遞良好的機構設計、力電耦合性能絕佳的壓電材料及高效率的電路設計，配合外部負載裝置的低功率化及製程上的低成本化，壓電振動能發電機已不再是僅存於腦中的新奇構想。截至目前為止，已有數個機構開發出壓電自電式裝置：2009 年比利時 IMEC 率先研發出壓電自電式環境參數偵測器(圖 4)²²，不需額外的電源就可量測量並回傳偵測點的溫度；日本音力公司也發展出發電地板(圖 5)，利用陣列式的壓電發電單元擷取人們因步行時的踩踏動作而施予地板的振動能。另外還有 Michelin 輪胎的胎壓偵測系統、HEAD 的壓電制震網球拍等。雖然這些產品多半仍在試作階段，但已初具自我供電的功能。

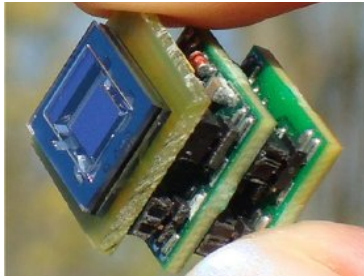


圖 4 2009 年 IMEC 開發出自電式環境溫度偵測器。每隔十五分鐘可將偵測點的溫度傳回測站。

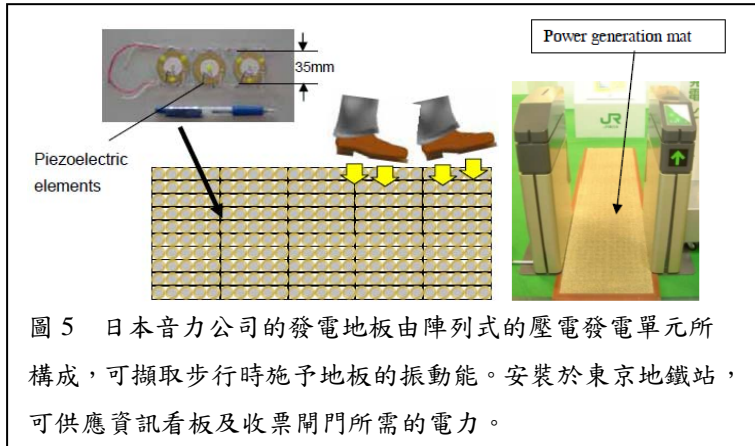


圖 5 日本音力公司的發電地板由陣列式的壓電發電單元所構成，可擷取步行時施予地板的振動能。安裝於東京地鐵站，可供應資訊看板及收票閘門所需的電力。

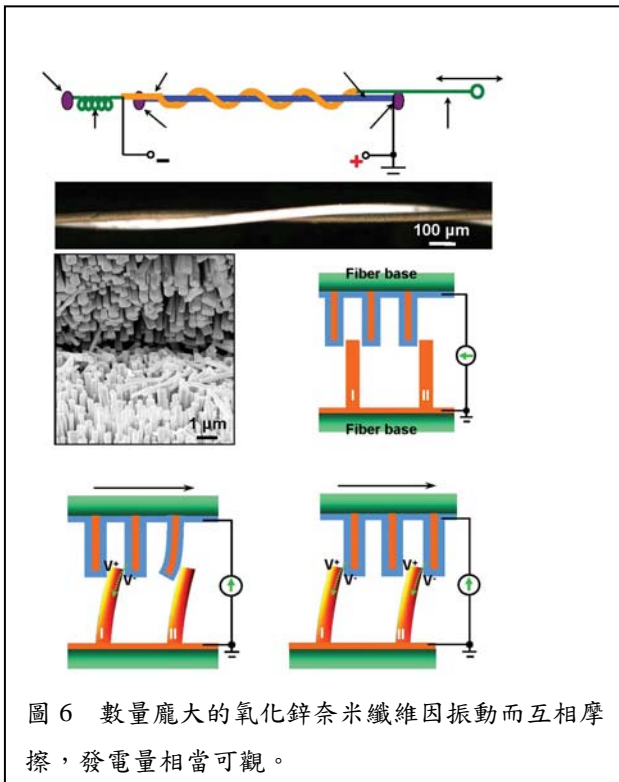


圖 6 數量龐大的氧化鋅奈米纖維因振動而互相摩擦，發電量相當可觀。

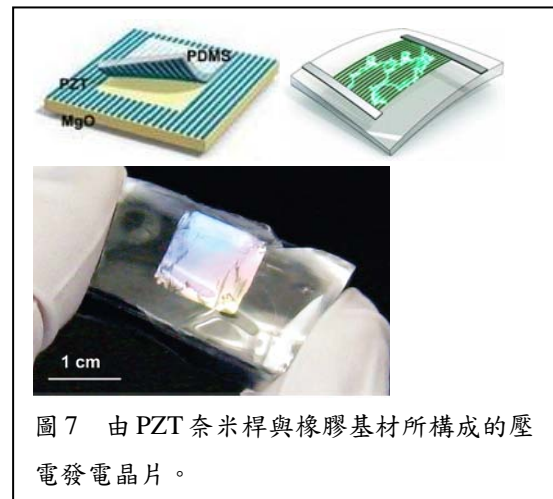


圖 7 由 PZT 奈米桿與橡膠基材所構成的壓電發電晶片。

此外，美國喬治亞理工學院王中林教授研發中的壓電奈米纖維(圖 6)²³更是廣受注目。多層式的氧化鋅奈米纖維可做成發電衣穿在身上，步行時身體的擺動使得數量龐大的奈米線互相摩擦，預估一平方米就可產生 20-80mW 的電量，可望為手機等通訊裝置供電。普林斯頓大學與加州理工學院的研究者則是將 PZT 奈米桿與彈性十足的橡膠材料聯合使用，製成發電晶片(圖 7)²⁴，期能為植入式的醫療裝置供電。

5. 結語

一項科技的發展往往需要各領域的相關技術的配合。從壓電效應的發現、力電耦合上的應用到近十年來壓電自電裝置的開發，我們不難了解壓電振動能量擷取技術是個高度跨學門的領域：振動子的結構設計上需將機械能傳遞能力寬頻化、並保護壓電材料免受破壞；材料方面需將力電耦合能力大幅提升並尋求無毒配方；電路設計上需要有效地將雜亂的交流電轉為穩定的直流電；後端電子裝置則需盡量低功率化。因此其應用範圍及商品化的機會需靠各相關領域的創新與巧思。儘管仍有許多困難要克服，但可以肯定的是，環境振動能擷取技術深具應用上的潛力，且在潔淨能源的呼聲之下，未來勢必有更多研發成功的案例！

參考資料

-
- ¹ Roundy S, Wright P K and Rabaey J M 2004 Energy Scavenging for Wireless Sensors Networks with Special Focus on Vibrations (Boston, MA: Kluwer-Academic)
 - ² Chiu Y and Tseng V F G 2008 A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches J. Micromech. Microeng. **18** 104004
 - ³ Cheng S, Wang N, and Arold D P 2007 Modeling of magnetic vibrational energy harvesters using equivalent circuit representations J. Micromech. Microeng. **17** 2328-2335
 - ⁴ Sodano H A, Inman D J and Park G 2004 Review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials Shock Vib. Digest **36** 197-205
 - ⁵ Y C Shu and I C Lien 2006 Analysis of Power Output for Piezoelectric Energy Harvesting Systems Smart Mater. and Struct. **15** 1499-1512
 - ⁶ Y C Shu and I C Lien 2006 Efficiency of Energy Conversion for a piezoelectric Power Harvesting System J. Micromech. and Microeng. **16** 2429-2438
 - ⁷ Y C Shu, I C Lien and W J Wu 2007 An Improved Analysis of SSHI Interface in Piezoelectric Energy Harvesting Smart Mater. and Struct. **16** 2253-2264
 - ⁸ I C Lien, Y C Shu, W J Wu, S M Shiu and H C Lin 2010 Revisit of Series-SSHI with Comparisons to Other Interfacing Circuits in Piezoelectric Energy Harvesting Smart Mater. and Struct. **19** 125009
 - ⁹ Fang H B, Liu J Q, Xu Z Y, Dong L, Chen D, Cai B C and Liu Y 2006 A MEMS-based piezoelectric power generator for low frequency vibration energy harvesting Chin. Phys. Lett. **23** 732-734
 - ¹⁰ Paquin S and St-Amant Y 2010 Improving the performance of a piezoelectric energy harvester using a variable thickness beam Smart Mater. Struct. **19** 105020
 - ¹¹ Hu H P, Cao J G and Cui Z J 2007 Performance of a piezoelectric bimorph harvester with variable width J. Mech. **23** 197-202
 - ¹² Mo C, Radziemski L J and Clark W W 2010 Analysis of piezoelectric circular diaphragm energy harvesters for use in a pressure fluctuating system Smart Mater. Struct. **19** 02016
 - ¹³ Cho J, Anderson M, Richards R, Bahr D and Richards C 2005 Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I Modeling J. Micromech. Microeng. **15** 1797-1803
 - ¹⁴ Jeon Y B, Sood R, Jeong J H and Kim S G 2005 MEMS power generator with transverse mode thin film PZT Sensors Actuators A **122** 16-22

-
- ¹⁵ Richard C, Guyomar D, Audigier D, and Ching G 1999 Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device Proc. SPIE **3672** 104-111
 - ¹⁶ Lefevre E, Badel A, Richard C and Guyomar D 2005 Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction J. Intell. Mater. Syst. Struct. **16** 865-876
 - ¹⁷ Badel A, Guyomar D, Lefevre E and Richard C 2005 Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion J. Intell. Mater. Syst. Struct. **16** 889-901
 - ¹⁸ Guan M J and Liao WH 2007 On the efficiencies of piezoelectric energy harvesting circuits towards storage device voltage Smart Mater. Struct. **16** 498-505
 - ¹⁹ Ottman G K, Holfmann H F, Bhatt A C and Lesieutre G A 2002 Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply IEEE Trans. Power Electron. **17** 669-676
 - ²⁰ Ottman G K, Holfmann H F and Lesieutre G A 2003 Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode IEEE Trans. Power Electron. **18** 696-703
 - ²¹ Rome L C, Flynn L, Goldman E M and Yoo T D 2005 Generating electricity while walking with loads Science **309** 1725-1728
 - ²² R Elfrink, M Renaud, T M Kamel, C de Nooijer, M Jambunathan, M Goedbloed, D Hohlfeld, S Matova, V Pop, L Caballero and R van Schaijk 2010 Vacuum-packaged piezoelectric vibration energy harvesters: damping contributions and autonomy for a wireless sensor system J. Micromech. Microeng. **20** 104001
 - ²³ Qin Y, Wang X and Wang Z L 2008 Microfiber-nanowire hybrid structure for energy scavenging Nature **451** 809-814
 - ²⁴ Yi Qi, Noah T Jafferis, Kenneth Lyons, Jr., Christine M Lee, Habib Ahmad, and Michael C McAlpine 2010 Nano Lett. **10** 524-528