

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高速偽表面聲波(HVPSAW)之波傳特性研究及應用

Investigation and Application on High Velocity Pseudo Wave

計畫編號：NSC 90-2611-E-002-039

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：宋家驥 國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系

一、中文摘要

壓電晶體為表面聲波元件(SAW Device)最重要的基底材料，不同切割及波傳角度皆會影響表面聲波的波傳特性。本研究利用矩陣法(matrix method)，推導半無限域之壓電晶體的表面聲波(SAW)、虛擬表面波(PSAW)(波速趨近橫波波速)、高速虛擬表面波(HVPSAW)(波速趨近縱波波速)，並分析此三種表面波的波傳特性，求出適當的切割及波傳角度，作為表面聲波元件製作時基底材料選擇之基礎。

關鍵詞：表面聲波、虛擬表面波、高速虛擬表面波

二、緣由與目的

近年來許多學者致力於表面生波元件(SAW Device)的研究，以提高操作頻率，低能量損失，並將其應用在行動電話、呼叫器、全球定位系統(GPS)...等通信元件。

在 SAW 元件製造上，常用的材料其表面波速約為 3.0~3.5k m/s，再加上受限於製程中，電子照相製版(photolithography)的技術，使得 SAW 元件的操作頻率僅能到幾個 GHz [1]，($v_{\max} = \lambda_{\min} f_{\max}$ ； v_{\max} 為最大的 SAW 波速； λ_{\min} 為最小的 SAW 波長，受限於製程技術； f_{\max} 為最大的操作頻率)。因此，在現有製程技術限制下，欲提高操作頻率，可選擇適當的介質及方位角，以增加波傳速度。

Engan 等人在 1967 年，在實驗中發現異向性材料中，除了表面波外，還存在一種具有能量衰減不大，但速度較一般表面波高(近似橫波波速)的虛擬表面波(Pseudo

Surface Acoustic Wave, PSAW)，Lim 與 Farnell [2]在 1969 年以部分波法(Partial wave method)，對虛擬表面波進行探討，而 Adler [3]在 1994 年以矩陣法(matrix method)求解層狀非等向性介質之表面波及 PSAW。在國內，吳政忠 [4] 1998 年利用六階矩陣，引入複數之 k_x ，求解層狀介質之虛擬表面波。Cunda、Adler [5]發現異向材料中，還存在一種能量衰減不大，而波速近似縱波波速的高速虛擬表面波(High Velocity Pseudo Surface Acoustic Wave, HVPSAW)。

本研究利用 Alder[3]所提出的八階矩陣法，對壓電晶體表面波傳理論進行推導。首先，由動態彈性力學之平衡方程式及組成律，在考慮壓電效應下引入壓電晶體之電位移方程式及電性組成律，並代入平面諧調波的解，可得在均質介質中八階矩陣之常微分波動方程式。再配合上傳波與下傳波的觀念，即可推導壓電晶體的局部波阻，最後利用層狀介質間的邊界條件連續，即可推導出表面波傳特性。

三、波傳理論

3.1 壓電晶體之八階矩陣波動方程式

在自然狀態下，忽略 body force，則壓電晶體之動態平衡方程式及電位移方程式可表示為：

$$T_{ij,j} = \dots \ddot{u}_i \quad (1)$$

$$D_{i,i} = 0 \quad (2)$$

(其中 T_{ij} 為應力張量、 \dots 為介質之密度、 D_i 為電位移向量、 u_i 為位移向量。)

壓電晶體的組成律可表示為：

$$T_{ij} = C_{ijkl}^E u_{k,l} + e_{ij} W_{,l} \quad (3)$$

$$D_i = e_{ikl} u_{k,l} - V_{ij}^s W_{,l} \quad (4)$$

(其中 C_{ijkl}^E 為定電場條件下之彈性係數 e_{ij} 為介質之壓電係數， V_{ij}^s 為應變， W 為純量電位勢)

將組成律(3)(4)帶入(1)(2)中可得到壓電晶體之統御方程式：

$$C_{ijkl} u_{k,lj} + e_{ij} W_{,j} = \dots \ddot{u}_i \quad (5)$$

$$e_{ikl} u_{k,li} - V_{ij}^s W_{,li} = 0 \quad (6)$$

考慮一沿 x_1 軸方向傳遞之平面諧調波 (plane harmonic wave) 如圖一壓電晶體所示，因此可將位移 \vec{u} 及表面曳力 (\vec{T}^3) 可表為：

$$\vec{u}(x, z, t) = \hat{u}(z) \exp[i(\tilde{S}t - k_1 x_1)] \quad (7)$$

$$\vec{T}^3(x, z, t) = \hat{T}^3(z) \exp[i(\tilde{S}t - k_1 x_1)] \quad (8)$$

$$D_n(x, z, t) = \hat{D}_n(z) \exp[i(\tilde{S}t - k_1 x_1)] \quad (9)$$

$$W(x, z, t) = \hat{W}(z) \exp[i(\tilde{S}t - k_1 x_1)] \quad (10)$$

將(7)(8)(9)(10)代入(5)(6)中，並定義狀態向

$$\text{量為 } \hat{t} = \begin{Bmatrix} \hat{T}^3 \\ D_3 \\ \hat{v} \\ i\tilde{S}W \end{Bmatrix}_{8 \times 1}$$

則波傳方程式可表為如下之一階常係數 O.D.E.

$$\frac{d\hat{t}}{dx_3} = i\tilde{S}A\hat{t} \quad (11)$$

其中 A 擴充為八階矩陣，

$$\text{且 } A = \begin{bmatrix} \Gamma^{13}X/\nu_p & \dots I - (\Gamma^{11} - \Gamma^{31}X\Gamma^{31})/\nu_p^2 \\ X & X\Gamma^{31}/\nu_p \end{bmatrix}$$

其中 Γ^{ik} 擴充為 4×4 矩陣：

$$\Gamma^{ik} = \begin{bmatrix} C_{11k} & C_{12k} & C_{13k} & C_{14k} \\ C_{21k} & C_{22k} & C_{23k} & C_{24k} \\ C_{31k} & C_{32k} & C_{33k} & C_{34k} \\ C_{41k} & C_{42k} & C_{43k} & C_{44k} \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

3.2 波傳方程式的解及邊界條件

在(11)式的一階常微分方程式解的型式為 $\hat{t}(x_3 + h) = \exp(i\tilde{S}Ah)\hat{t}(x_3) = \Phi(h)\hat{t}(x_3)$ (13)

其中 h 為沿 x_3 軸往介質內部之深度距

離， $\Phi(h)$ 為轉換矩陣

將 $\Phi(h)$ 作特徵分析，依照特徵值中虛部的正負符號區分為兩組沿正 X_3 軸及沿負 X_3 軸方向傳播的波，其相對應的特徵向量為 P_{PL} 及 P_{Pu} 組成八階常數矩陣 P

$$\text{則 } \hat{t}(0) = P_p Y_p(0) \quad (14)$$

其中 Y_p 為各特徵向量的權函數，

$$\begin{bmatrix} \hat{t}_n(0) \\ \hat{t}_v(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{pu} \\ P_{pl} \end{bmatrix} Y_p(0)$$

$$\text{其中 } \hat{t}_n(0) = \begin{bmatrix} T_3(0) \\ D_3(0) \end{bmatrix} \quad \hat{t}_v = \begin{bmatrix} v(0) \\ j\omega W(0) \end{bmatrix}$$

可配合 $X_3=0$ 的曳力即電性的邊界條件求出。

四、結果與討論

利用第三節的研究方法，分別以等向性材料、非等向性材料、壓電材料為例求解 SAW、PSAW、HVPSAW 速度進而了解其波傳特。將各種材料的波傳特性結果分述如下：

一、等向性材料：(W 鎢)

SAW 沿各方向的傳播速度皆相同，如圖二所示。再觀察位移場與曳力場隨深度的變化，如圖三與圖四所示，發現皆在 2 至 3 個波長內及衰減，符合表面聲波的特性；且只有 x 與 z 方向的位移量而沒有橫向偏振的 y 分量，位移場在表面時不為零而表面的曳力場為零符合邊界條件。

二、非等向性材料：(Si 矽)

以矽(001)切面沿 [100] 軸各方向的傳播速度，如圖五所示；SAW 沿各方向的傳播速度非定值。再觀察位移場與曳力場隨深度的變化，如圖六與圖七所示，發現皆在 2 至 3 個波長內也迅速的衰減，且具有 x、y、z 三個方向的偏振量，而位移及曳力場也符合邊界條件。

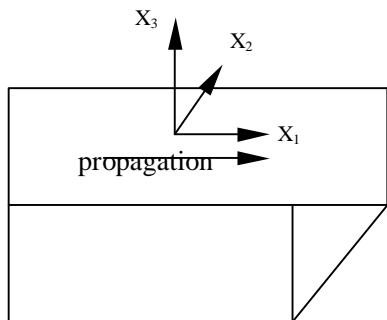
三、壓電材料：(ST-Cut Quartz 石英)

在求解 ST-Cut 石英的過程中發現，除了 SAW 之外在波速趨近快速擬橫波及擬縱波時，亦有可滿足波傳方程及邊界條件的解，即 PSAW 及 HVPSAW。如圖八所示 a,b,c 三點皆有局部極小值，其中 a 點速度

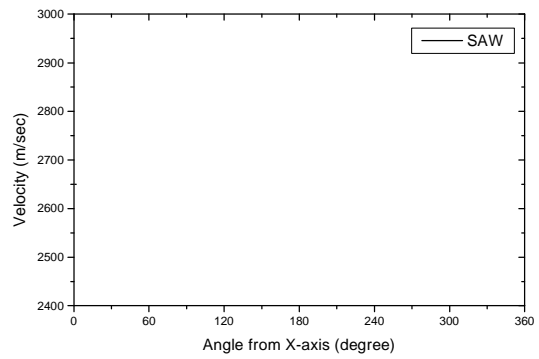
為 3157.56m/s、b 點速度為 5079.85m/s、c 點速度為 5745.62m/s，比較其無因次化之值 a 為 10^{-16} ，b、c 為 10^{-2} 。

因此需對 PSAW 及 HVPSAW 的求解進行修正以滿足無因次化為零的條件。根據[5]，因為 PSAW 及 HVPSAW 沿試體表面傳遞時，能量分布不完全侷限於表面附近，有部分能量滲漏至試體內部造成能量衰減。在(7)-(10)式中的 k_1 引入複數，並將(11)式中 A 矩陣的特徵值虛部絕對值最小的兩組對調，求解其對無因次式的極小值即可得 PSAW 及 HVPSAW。經此方法修正 b 為 5080.21m/s 無因次式為 10^{-15} ，c 點 5745.94m/s 無因次式為 10^{-14} 。在圖九中列出以修正方式求出的 SAW、PSAW 並比較慢速擬橫波(T1)、快速擬橫波(T2)。利用修正的 k_1 可求出沿波傳方向傳遞的能量衰減，如圖十所示。同理可以求得 HVPSAW 並和擬縱波(L)比較，如圖十一所示。並由各波傳方向的 k_1 畫出能量衰減圖，如圖十二所示。

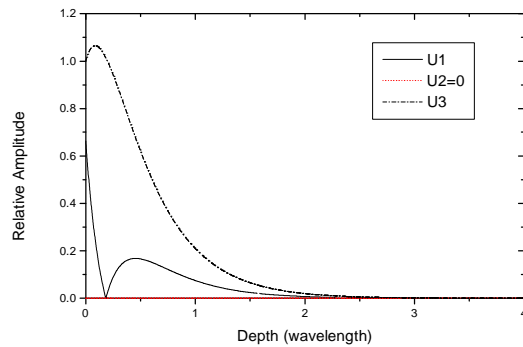
由上述的分析，我們可知 PSAW、HVPSAW 波速均較 SAW 快，且分別趨近於快速擬橫波、擬縱波；但這兩種表面波沿試體表面傳遞時，會有部分能量滲漏至試體內部造成能量衰減。我們可透過圖十觀察，當 ST-Cut 石英波傳方向大約在 90 度時能量衰減趨近於零，因此若選擇此波傳方向可同時利用 PSAW 較快的波速亦可避免能量的衰減。同理，觀察圖十二可求得在波傳方向大約在 24 度時能量衰減較小，可依此波傳角度來設計 SAW Device 的基材，以得到較快且能量衰減易不大的 HVPSAW。



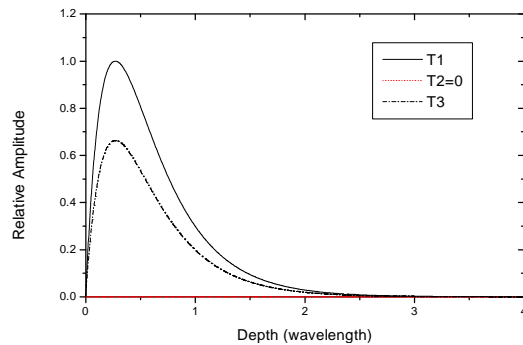
圖一 壓電晶體之試體座標圖



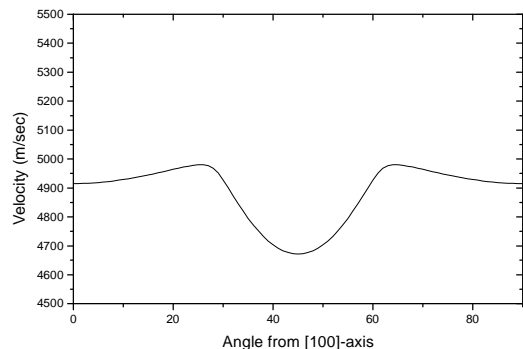
圖二 W 表面波波速與波傳相位角關係



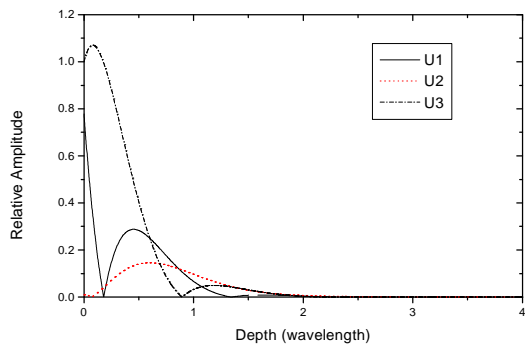
圖三 W 之表面波位場



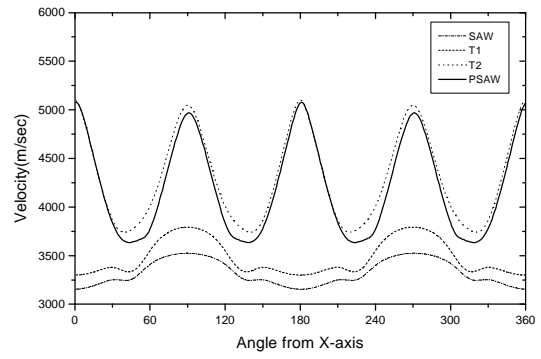
圖四 W 之表面波曳力場



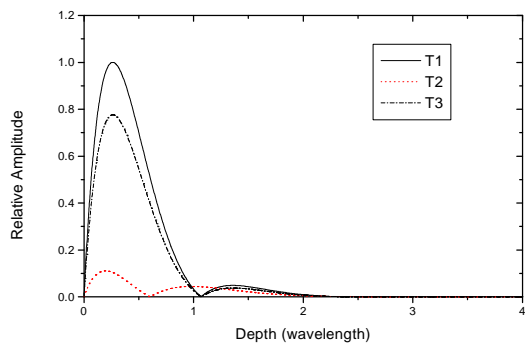
圖五 矽(001)切面之表面波波速與波傳相位角關係



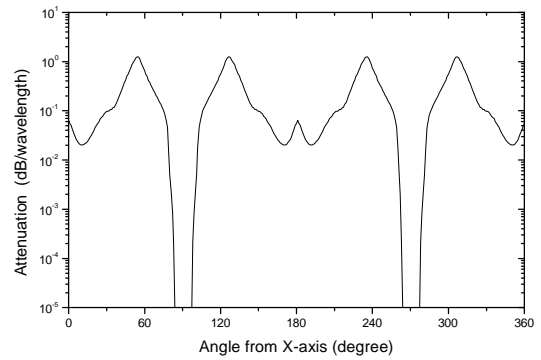
圖六 矽(001)切面之表面波位移場 (波傳角度距 X 軸 20 度)



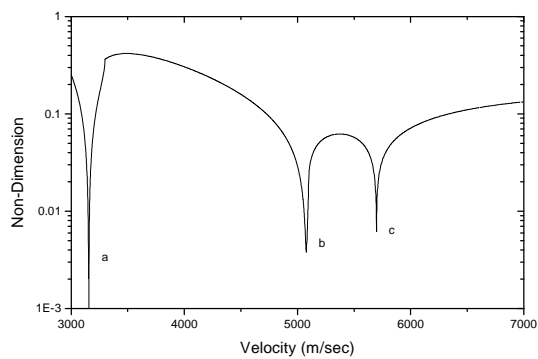
圖九 表面波與虛擬表面波相速隨波傳角度之變化



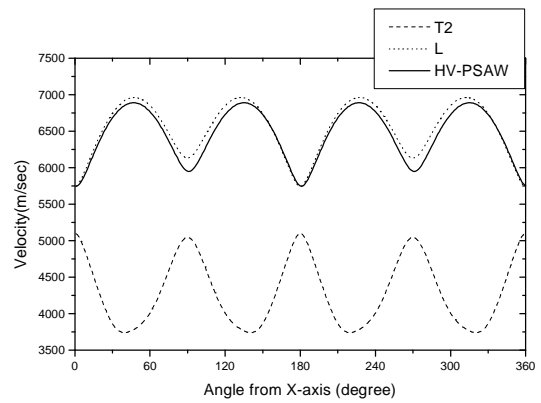
圖七 矽(001)切面之表面波曳力場 (波傳角度距 X 軸 20 度)



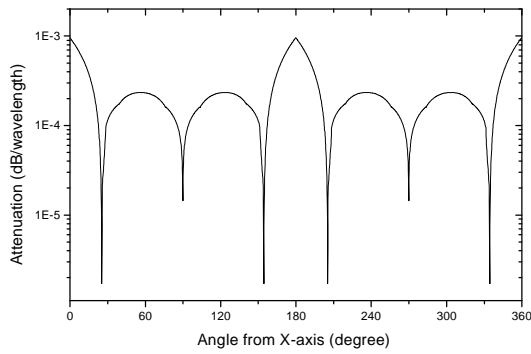
圖十 虛擬表面波衰減隨波傳角度之變化



圖八 無因次化邊界函數隨波速之變化



圖十一 高速虛擬表面波相速隨波傳角度之變化



圖十二 高速虛擬表面波衰減隨波傳角度之變化

五、結論

本研究利用矩陣法(matrix method)，求解出半無限域壓電晶體的 SAW、PSAW、HVPSAW 之波傳特性，其中 PSAW、HVPSAW 具有波速較快的優點分別趨近於快速擬橫波及擬縱波，但沿試體表面傳遞時，能量分布不完全侷限於表面附近，有部分能量滲漏至試體內部造成能量衰減。本文利用修正複數型式波數，得到各傳波方向的能量衰減曲線，由此可判斷出能量衰減較小的波傳角度。

利用此結果可求得同時具備 PSAW、HVPSAW 波速較快的優點且避免能量衰減的切割及波傳角度，提供 SAW Device 設計時基底材料選擇依據。

誌謝

本研究感謝國科會計劃編號 NSC 90-2611-E-002-039 贊助，得以完成。

參考文獻

1. Daniel Royer, "Elastic Waves in Solids II", Springer, 2000.
2. T. C. Lim and G. W. Farnell, "Character of pseudo surface waves on anisotropic crystals," *J. Acoust. Soc. Amer.*, 45 (1969) 845-851.
3. E. L. Adler, "Saw and pseudo-saw properties using matrix methods," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*,

41 (1994) 699-705.

4. 吳宗穎, 黏性液體負載下層狀非等向彈性介質之波傳, 碩士論文, 台灣大學應用力學研究所(1998)
5. M. P. da Cunha and E. L. Adler, "High velocity pseudosurface waves (HVPSAW)," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr.*, 42 (1995) 840-844.