

二維聲子晶體與表面聲波元件 製程之整合

顧可斌¹，謝志誠²

1. 國立台灣大學生物產業機電工程學研究所研究生
2. 國立台灣大學生物產業機電工程學系教授，本文通訊作者

摘 要

本研究運用創新之方式將表面聲波元件與二維聲子晶體之面型微加工與體型微加工製程予以整合。其中，將聲子晶體結構以微製程製作於一對微米級表面聲波元件之發射器與接收器之間，兩端之發射器與接受器係由叉指狀換能器組成，沈積在層狀壓電薄膜之上。聲子晶體之圓孔直徑為 $6.0\mu\text{m}$ ，深度為 $20\mu\text{m}$ ，深寬比大於 3，由於叉指狀換能器所產生之波長為間距之 4 倍，為了將頻溝限制在數百 MHz 範圍內，故依所欲產生之表面聲波之中心頻率，將叉指狀換能器之電極間距訂在 $3.4\mu\text{m}$ 至 $9.0\mu\text{m}$ 之範圍。本研究在電鍍液中加入添加劑聚乙二醇，成功地完成微米級、高深寬比之聲子晶體孔洞之電鍍填充。

關鍵詞：聲子晶體、表面聲波元件、微機電製程

INTEGRATION AND FABRICATION OF 2D PHONONIC CRYSTALS AND SURFACE ACOUSTIC WAVE MICRO DEVICES

Kebin Gu¹, Jyh-Cherng Shieh²

1. Graduate Student, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University.
2. Professor, Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University, Corresponding Author.

ABSTRACT

In this paper, we present the integration and fabrication of innovative phononic crystals integrated with two sets of interdigital transducer (IDT) for frequency band selection of surface acoustic waves (SAW). The prohibited bandwidth has been verified by fabricating the phononic crystals between a micromachined SAW resonator and a receiver. Both the resonator and receiver are composed of IDT electrodes deposited and patterned on a thin piezoelectric layer. To confine the prohibited bandwidth on the order of hundred MHz, the diameter of the circular pores in

phononic crystals is designed to be 6 micron and the aspect ratio of each pore is 3:1. To maximize the power transduction from IDT electrodes to SAW, the spacing between two interdigits is one-fourth the wavelength of SAW. Specifically, the spacing ranges from 3.4 microns to 9.0 microns, depending on the central frequency. Both surface and bulk micromachining are employed and integrated to fabricate the crystals as well as SAW resonator and receiver altogether. With PEG additives in the electro bath, we successfully accomplish filling micro-level and high aspect ratio pores in 2-D phononic crystals by copper plating.

Keywords: Phononic crystals, surface acoustic wave devices, MEMS fabrication

一、前言

近年來對於週期性介電質結構之探討越來越多，這種具有週期性之結構在電磁波通過時會發生頻溝現象(band gap)，阻擋某些頻率之電磁波通過。1990年代，研究發現電磁波與彈性振動有相當程度之類似性(Kushwaha et al., 1993; 1994)。基於聲子(Phonon)與光子(Photon)之類比關係，研究者推論：由不同彈性材料、不同排列方式組成之週期性結構，可以阻止特定角度或特定頻率的聲波穿越(Kushwaha and Halevi, 1994)。此類週期性結構稱為聲子晶體(Phononic crystals)。聲子晶體之頻溝現象除了可應用作為表面聲波之濾波器外，將聲子晶體與表面聲波元件(Surface Acoustic Wave Device)整合，更具有發展為改良表面聲波元件微感測器(Performance Improvement of SAW Micro-sensors)，射頻電路前端零組件(Front-end Components in RF Circuitries)與高頻表面聲波方向性接收器(Directional Receptions of High Frequency Acoustic Waves)等潛力。

1980年代開始，即有文獻針對於兩種不同材料之無限平板，在厚度方向重複堆疊而成之一維聲子晶體，或稱為超晶格(super-lattice)結構，提出彈性波之波傳理論(Kushwaha et al., 1988)。Kushwaha等人(1993)針對兩種相異等向性彈性材料所架構之二維週期性結構，提出微體波(bulk acoustic wave)之振動波傳理論，該結構係由垂直填充於基底材料之圓柱體所組成，晶格排列為正方晶格與六角晶格，而波傳之平面則與圓柱軸垂直。Tanaka 與 Tamura (1999) 選用立方晶系之

AlAs 與 GaAs 組合而成之二維聲子晶體，探討表面波之波傳理論。林 (2001)利用平面波展開法(plane-wave expansion method)計算二維聲子晶體之聲波頻溝，預測頻溝出現之頻段與寬度，進而針對指定入射角度及結構尺寸設計濾波頻率，其研究結果顯示該理論可用來預測頻溝現象出現之頻段，作為設計二維表面聲波濾波器之依據。

實驗部分，Montero 等人 (1998)與 Vasseur 等人 (2001) 量測二維聲子晶體縱波之頻溝分佈。劉 (2003) 製作出具備有二維聲子晶體結構之表面聲波元件 (圖 1)，針對高頻表面聲波在微米級二維聲子晶體中傳播進行探討，並在矽基板上沈積氧化鋅(Zinc Oxide)壓電薄膜，再在薄膜上製作叉指狀換能器(interdigital transducer，簡稱IDT)，用以產生及接收聲波訊號，至於在聲波傳遞之途徑上，則以不同材料，設計週期性之二維聲子晶體結構 (圖 2)。劉 (2003) 之聲子晶體結構中，

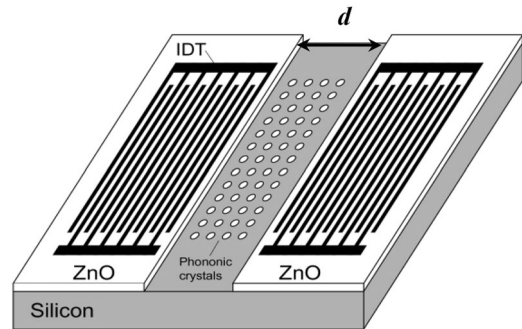


圖 1 聲子晶體在表面聲波元件上之架構圖 (劉, 2003)

Fig.1 Schematic diagram of 2D phononic crystals in SAW micro devices

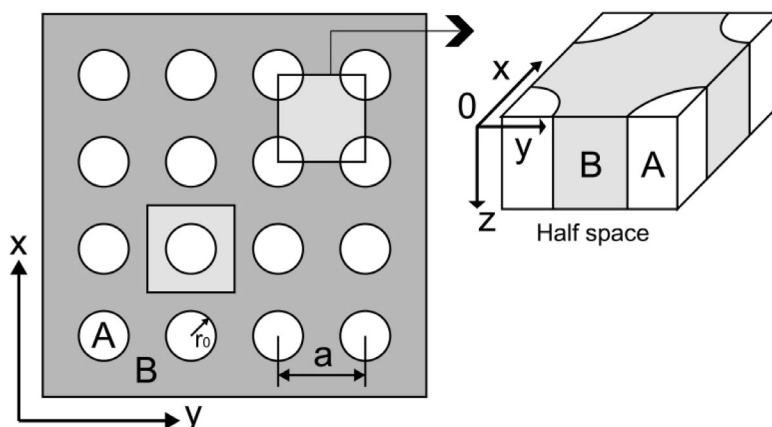


圖 2 週期性二維聲子晶體結構示意圖 (林, 2001)

Fig.2 Structure of 2D phononic crystals

基底材料 B 為矽，填充體材料 A 為柱狀空孔結構，對於 A 為其他種材料之情形並未做進一步探討。

本研究目的為將柱狀空孔填充入不同金屬材質（主要為銅），增加 A 與 B 材料組合之多元性，並運用創新之微機電製程技術，將表面聲波元件與二維聲子晶體之面型微加工與體型微加工予以整合，將聲子晶體結構以微製程製作於一對微米級表面聲波元件之發射器與接收器之間，而兩端之叉指狀換能器則沈積在層狀壓電薄膜上。

二、實驗設備、材料與製程

(一)實驗設備

本研究用於製程之設備如下：

1. 雙面對準曝光機 (Double Side Mask Aligner)：德國 KARL SUS MA6 / BA6。
2. 光阻塗佈機 (Spin Coater)：美國 SCS MODEL 6708D。
3. 加熱版 (Hot Plate)：美國 CORNING PC-420。
4. 掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)：日本 ELIONIX ERA-8800FE。
5. 表面輪廓儀 (Surface Profiler)：美國 TENCOR Alpha Step 500。

6. 電感耦合電漿蝕刻機 (Inductively Coupled Plasma ; ICP)：美國 STS MESC Multiplex ICP, Version 2。
7. 射頻濺鍍機 (RF Sutter)：台灣日真 ULVAC。
8. 熱蒸鍍機 (Thermal Evaporator)：大永真空 DMC-500 光學鍍膜機。

(二)材 料

1. 所使用之矽晶圓為直徑 100mm，P type，晶格方向 110，厚度為 500~550 μ m。矽晶圓規格參數如表 1 所列。
2. 光製程所使用之正光阻為 S1813，顯影液為 MF-319，光阻可由丙酮 (Acetone) 去除。

(三)製 程

二維聲子晶體與表面聲波元件之整合製程，如圖 3 所示，共分為六個步驟 (Li et al., 2002)：

表 1 矽晶圓規格參數

Table 1 Specification of silicon wafer

Diameter	100 mm
Type-Dopant	P/b
Orientation	(110)
Resistivity	3.0-9.0 ohm-cm
Thickness	500-550 μ m

1. 氧化鋅(Zinc oxide)壓電薄膜之沈積：將研磨過之矽晶圓放入裝有硫酸(H_2SO_4)與雙氧水(H_2O_2)

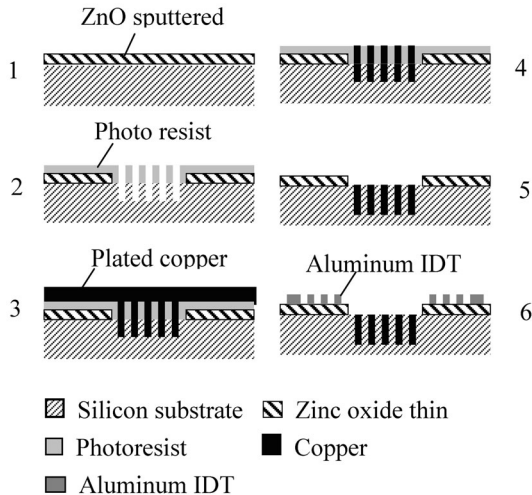


圖 3 二維聲子晶體與表面聲波元件之製程：1.沈積氧化鋅壓電薄膜；2.定義出聲子晶體陣列區域，再以 ICP-RIE 深層蝕刻，製作出二維聲子晶體陣列結構之孔洞；3.利用電鍍方式將孔洞做超填；4.將晶圓表面超填之電鍍銅蝕去；5.掀舉(lift-off)；6.金屬鋁之沈積與 IDT 之掀舉(Li et al., 2002)

Fig.3 Process flow of 2D phononic crystals in SAW micro devices. 1.Zinc oxide is sputtered and patterned onto silicon substrate. 2.The exposed silicon substrate is etched using DRIE to generate two dimensional phononic crystals. 3.Copper seed layer is evaporated. The crystal pores are filled with copper by electro plating. 4.The overplated copper is removed. 5.Photolithography is performed for the lift-off process. 6.Aluminum is deposited and patterned as the IDT structure by lift-off method

(3:1)之溶液中清洗 20 分鐘，再以去離子水(DI water)沖洗 10 分鐘，經烤箱烤乾後，即完成矽晶圓之清洗。隨後，將晶圓放入濺鍍機之腔體，進行抽真空至腔體內壓力到達預定值為止，再通入製程氣體並設定溫度與所需之濺鍍功率。然後，先進行預鍍至氣體流量、基板溫度與濺鍍功率達到穩定值之後，再將濺鍍機之擋板(shutter)打開，進行氧化鋅之濺鍍。表 2 為濺鍍氧化鋅壓電薄膜之製程參數。

2. 聲子晶體孔洞之深蝕刻：以光阻定義出聲子晶體陣列之區域，再以感應耦合電漿活性離子蝕刻系統(Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching, ICP-RIE)進行深層蝕刻(Dep Reactive Ion Etching; DRIE)，蝕刻出二維聲子晶體陣列結構之孔洞(圖 4(a)(b)、表 3)。表 4 為 ICP-RIE 之製程參數。深蝕刻後之晶圓再放入硫酸與雙氧水(3:1)比例調配而成之溶液中，浸泡約 15 鐘，移除殘留在晶圓表面之光阻與雜質。待表面洗淨之後，以去離子水清洗晶圓，並以氮氣槍吹乾。為了避免空孔內部有水分殘留，影響後續電鍍製程，需將晶圓放入烤箱，以 120℃ 烤乾 15 分鐘以上。

3. 種子層沈積與電鍍填孔：利用熱蒸鍍(thermal evaporation)，在柱狀深孔表面形成種子層(seed layer)，厚度為 1000 埃(angstrom)，表 5 為蒸鍍之製程參數；然後採用酸性硫酸鹽鍍銅液，以電鍍方式將柱狀孔洞做超填(super filling)，表 6 為酸性硫酸鹽鍍銅液之基本液配方表(Moffat et al., 2000)。

表 2 濺鍍氧化鋅壓電薄膜之製程參數
Table 2 Parameters of ZnO sputtering process

靶材 (Target)	ZnO 4" diameter
氣體 (Gas, sccm)	Ar=84 sccm, O2= 45 sccm
沉積壓力 (Deposition Pressure, torr)	3×10^{-7}
射頻功率 (RF power, W)	150
基材溫度 (Substrate temperature, °C)	220
濺鍍速率 (Sputtering rate, Angstrom/hr)	2600

表 3 層狀表面聲波元件與聲子晶體設計參數 (Wu et al., 2004)
 Table 3 Design parameters of layered SAW device and phononic crystals (Wu et al., 2004)

Configuration	Parameter		
Electrode	Aluminum		
λ (μm)	28.0	24.8	21.6
IDT pairs	40		
IDT aperture (μm)	100λ		
Delay line (μm)	10λ		
IDT thickness ($\text{\AA}$)	2000		
Diameter of crystal pores, $2r$ (μm)	6		
Spacing of pores, a (μm)	10		
Depth of pores (μm)	More than twice λ		
Thickness of ZnO (μm)	1.5		

表 4 ICP-RIE 製程參數
 Table 4 Parameter of ICP-RIE process

Recipe	A (typically used for $> 2\mu\text{m}$ feature)	
Cycle step	Etching	Passivation
Gas flowrate	SF_6 : 130 sccm	C_4F_8 : 80 sccm
Active time (sec)	9	8
Coil RF power (W)	533~540 (setting 600)	533~540 (setting 600)
Platen RF power (W)	15	0
Bias (V)	350~400	0
Pressure (mtorr)	33	18~19
Sidewall Roughness (nm)	185~245 nm	

表 5 熱蒸鍍銅之製程參數
 Table 5 Parameters of thermal evaporation process

Target	Copper (Density = 8.933 g/cm^3)
Melting Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	1083
Pressure (torr)	8.0×10^{-6}
ROTA VR 可變電阻 $\text{k}\Omega$	25
Deposition rate (angstrom/s)	0.2

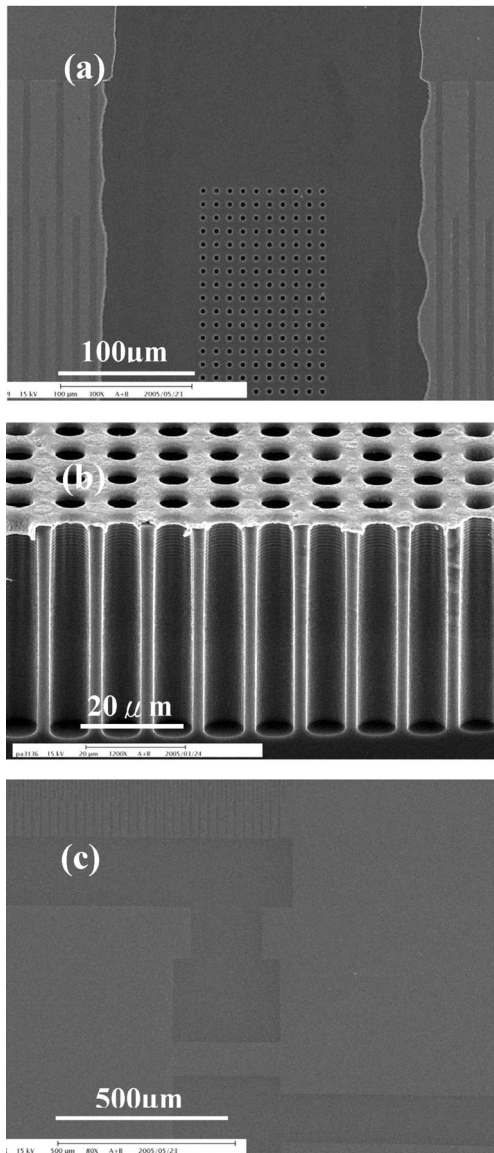


圖 4 (a)表面聲波元件之聲子晶體圓孔俯視圖(b)圓孔剖視圖(c)表面聲波元件上之 IDT
Fig. 4 (a) Top view (b) Sectional view of pore of 2D phononic crystals in SAW micro devices (c) Picture of aluminum IDT

4. 將超填之電鍍銅蝕去：使用銅之蝕刻液醋酸溶液 ($\text{HAc} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{DI water} = 1: 1: 20$) 將晶圓表面超填之電鍍銅蝕去。
5. 掀舉(lift-off)：以丙酮(acetone)進行掀舉，將表面光阻與覆蓋之銅金屬全數帶離矽晶圓表面。

表 6 銅電鍍液之成份 (Moffat et al., 2000)

Table 6 Electrolyte composition (mole/L) (Moffat et al., 2000)

	Basic electrolyte
$\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.25
H_2SO_4	1.8
Cl^-	1×10^{-3}
PEG (3400 Mw)	0
pH	1.2~1.7
Current density (A/m^2)	300

6. 叉指狀換能器之製作：利用黃光製程定義出叉指狀換能器之圖案 (表 3)，經鋁薄膜之沈積與掀舉之製程，完成接收端與發射端之製作。

三、結果與討論

本研究運用創新之方式將表面聲波元件與二維聲子晶體之製程予以整合，在表面聲波元件部份，包括以射頻磁控管濺鍍技術在晶圓上沈積氧化鋅壓電薄膜，以及利用黃光、鋁薄膜之沈積與掀舉等製程，完成叉指狀換能器之製作；在聲子晶體結構部份，則包括聲子晶體陣列之定義、孔洞之蝕刻與填充等，共三個部份，其結果分述於後。

(一) 氧化鋅壓電薄膜之沈積

本研究在矽晶圓表面所沈積之氧化鋅壓電薄膜係採用射頻磁控管濺鍍技術，經濺鍍 8 小時後，利用表面輪廓儀量測其厚度約為 $1.5\mu\text{m}$ 。再利用黃光製程，將氧化鋅壓電薄膜表面以光阻定義出本研究所需之方形區域，再以磷酸水溶液 ($\text{H}_3\text{PO}_4 / \text{HAc} / \text{DI water} = 1: 1: 10$) 進行蝕刻 (蝕刻率約為 50nm/sec)。

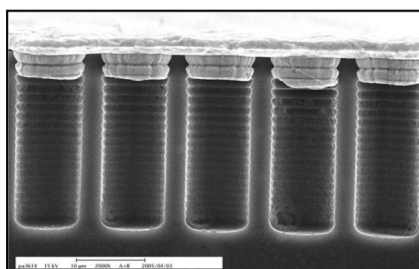
其中之黃光製程，係以 S1813 正光阻均勻塗佈於晶圓表面，置於 90°C 之熱板上軟烤加熱 90 秒，再利用曝光機進行紫外線曝光動作，然後將晶圓上照射到光線部份之光阻以顯影液去除，形成光罩上之圖案。曝光後之矽晶圓再放入 MF-319 (光阻 S1813 相對應之顯影液)，顯影 60 秒整，

放入去離子水中潤絲 (rinse) 30 秒，以顯微鏡觀察曝光顯影成效，若顯影成功則置於 120℃ 之烤箱中進行硬烤，時間在 30 分鐘以上。

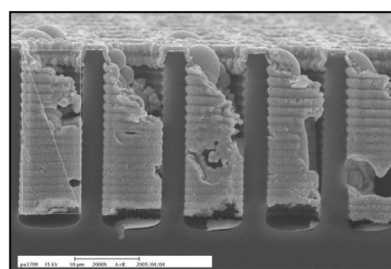
(二) 聲子晶體週期性柱狀結構之製作

本研究將聲子晶體結構以微製程製作於表面聲波元件之發射器與接收器之間。首先，以光阻定義出聲子晶體陣列之區域，再以感應耦合電漿活性離子蝕刻系統，蝕刻出二維聲子晶體陣列結構之孔洞，然後使用熱蒸鍍機，在晶圓表面沈積銅薄膜作為種子層，再以電鍍方式將鍍銅液填入孔洞中。為了探討種子層厚度與聚乙二醇 (polyethylene glycol; PEG) 添加劑對於鍍銅液填孔能力之影響，本研究分別以 200 埃與 1000 埃之種子層厚度，搭配有無添加劑之鍍銅液，觀察孔洞之填充情形，結果顯示：

1. 當種子層厚度為 200 埃時，不管有無添加劑，電鍍反應幾乎都只發生在基板表面而不會進入孔洞內部。推測原因，應為蒸鍍沉積之銅種子層階梯覆蓋 (step coverage) 能力不佳，側壁之種子層沉積不連續，導致孔洞內部種子層無法發揮電鍍導電功用。
2. 當種子層厚度增加至 1000 埃時，種子層在側壁之階梯覆蓋成為連續，並深入至孔洞底部。此時，電鍍液中有無添加劑則對填孔效果有明顯差異，圖 5 (a) 顯示無加入添加劑之鍍銅液僅在孔洞上方出現微量之填孔現象，圖 5 (b) 顯示加入添加劑後，鍍銅液才得以順利填入孔洞內。



(a)



(b)

圖 5 電鍍液(a)無添加(b)有添加 PEG 對填孔能力之影響

Fig.5 Cross-sectional SEM pictures show the effect of pore-filling (a) without and (b) with PEG additives in the electroplating bath

(三) 叉指狀換能器之製作

利用黃光製程定義出叉指狀換能器之圖案，再將硬烤完成後之晶圓置入熱蒸鍍機進行鋁金屬薄膜之沈積，厚度為 2,000 埃。待晶圓冷卻至室溫後，將晶圓放入丙酮溶液中，溶去光阻，掀舉出叉指狀換能器，如圖 4 (c) 所示。

製程中，定義 IDT 之光罩需與矽晶圓上已有之聲子晶體圖案作精密對準，才可將矽晶圓放入熱蒸鍍機進行鋁金屬薄膜之沈積。

四、結 論

以微機電製程技術將高頻表面聲波元件與二維聲子晶體結構相整合，是當前相當新穎之微加工製程。本研究成功地以改良之電鍍方法將銅金屬填充進入直徑 6 μm ，深度為 20 μm ，深寬比超過 3 之二維聲子晶體週期性排列之柱狀結構，改善傳統電鍍液無法進入填充微米級高深寬比孔洞之問題。未來，除就製程之結果進行實驗驗證，以確認其功能外，可繼續朝不同金屬材料之填充，並進入更高深寬比之研究，使表面聲波之振幅能量在 z 方向深度可完全通過聲子晶體結構範圍，減少誤差。此外，更可進一步將目前週期性排列之陣列結構，設計成各式微型聲波波導通道，觀察波導通道對於表面聲波傳遞之影響，以對各種叉指狀致能器之設計、聲子晶體之週期結構之特徵包括頻寬等，做完全之瞭解及探討。

五、誌 謝

本研究前期得力於台大生機系張建六教授所奠立之基礎與國立台灣大學應用力學研究所吳政忠教授超音波實驗室之理論基礎數據指導，與工研院 FY93 之經費支助。研究後期承蒙台大機械系施文彬教授之協助才得以完成，謹此致謝。

六、參考文獻

1. 林思親。2001。二維聲子晶體波傳與頻溝現象之研究。碩士論文。台灣台北：國立臺灣大學／應用力學研究所。
2. 劉世揚。2003。高頻表面聲波在微米級二維聲子晶體中傳播之實驗探討。碩士論文。台灣台北：國立臺灣大學／應用力學研究所。
3. Kushwaha, M. S. , P. Halevi and J. P. Wolfe. 1988. Acoustic-phonon propagation in superlattices. *Phys. Rev. B* 38 (2) : 1427-1449.
4. Kushwaha, M. S., P. Halevi, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani. 1993. Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites. *Phys. Rev. Lett.* 71 (13) : 2022-2025.
5. Kushwaha, M. S. , P. Halevi, G. Martinez, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani. 1994. Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys. Rev. B* 49(4) : 2313-2322.
6. Kushwaha, M. S. and P. Halevi. 1994. Band-gap engineering in periodic elastic composites. *Appl. Phys. Lett.* 64(9) : 1085-1087.
7. Li, X. H., R. Abe, Y. X. Liu, and E. Esashi. 2002. Fabrication of high-density electrical feed-throughs by deep-reactive-ion etching of Pyrex glass. *Journal of Microelectromechanical System* 11(6) : 625-630.
8. Moffat, T. P., J. E. Bonevich, W. H. Huber, A. Stanishevsky, D. R. Kelly, G. R. Stafford, and D. Josell. 2000. Superconformal electrodeposition of copper in 500-90 nm features. *Journal of The Electrochemical Society* 147 (12) : 4524-4535.
9. Montero de Espinosa, F. R. , E. Jimenez, and M. Torres. 1998. Ultrasonic Band Gap in a periodic Two-Dimensional Composite. *Phys. Rev. Lett.* 80 (6) : 1208-1211.
10. Tanaka Yukihiro and Shih-ichiro Tamura. 1999. Acoustic stop bands of surface and bulk modes in two-dimensional phononic lattices consisting of aluminum and a polymer. *Phys. Rev. B* 60(19) : 13294-13297.
11. Vasseur, J. O., P. A. Deymier, B. Chenni, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, and D. Prevost. 2001. Experimental and theoretical evidence of absolute acoustic band gaps in two-dimensional solid phononic crystals. *Phys. Rev. Lett.* 86 (14): 3012-3015.
12. Wu, T., Z. Huang, and S. Lin. 2004. Surface and bulk acoustic waves in two-dimensional phononic crystal consisting of materials with general anisotropy. *Physical Review B* 69: 094~301.

收稿日期：2006 年 4 月 3 日

修改日期：2006 年 4 月 12 日

接受日期：2006 年 4 月 17 日