

Forming and Bonding Microchannels for the Manufacture of IC Chip Heat Dissipators

IC晶片散熱器微小通道的成型與接合

T.H. Chuang*, P.H. Chen**, Y.H. Tseng*, L.C. Tsao*, S.S. Wang*,
S.Y. Chang*, and L.S. Chang***
莊東漢*、陳炳輝**、曾乙修*、曹龍泉*、王宣勝*、張世穎*、張立信***

利用微影電鑄成型技術(LIGA)製作寬度 100 μm 深度 50 μm 的鎳質微小溝槽，再將此 LIGA 成型微小溝槽與鎳金屬封蓋進行固態接合與擴散軟銲。實驗顯示溫度 1300 $^{\circ}\text{C}$ 、壓力 0.4MPa 進行固態接合 10 小時，可以得到理想的接合界面，但是接合表面必須先經微研磨拋光，損失微小溝槽深度大約 4 μm ，而且微小溝槽會因為高溫潛變而發生變形。先將鎳金屬封蓋蒸鍍 3 μm 厚度鎳薄膜，再與 LIGA 微小溝槽進行 300 $^{\circ}\text{C}$ 擴散軟銲 2 小時，可得到 8.1MPa 之接合強度，蒸鍍 1 μm 純錫薄膜之擴散軟銲所得到接合強度較低，此兩種薄膜之擴散軟銲均可獲得良好的接合界面，不僅孔洞較固態接合少，而且微小溝槽不會發生變形。

關鍵詞：擴散軟銲、固態接合、微小溝槽、微影電鑄成型

Ni Microchannels of 100 μm in width and 50 μm in depth are manufactured by employing LIGA technology. Such LIGA-fabricated microchannels are bonded to Ni cover plates using solid-state bonding and diffusion soldering methods. Experimental results show that a satisfactory joint can be obtained after solid-state bonding at 1300 $^{\circ}\text{C}$ for 10 hrs under 0.4 MPa pressure. However, the surfaces of the specimens must be ground and polished before bonding, which may result in a decrease of the microchannel depth for about 4 μm . In addition, the deformation of microchannels will take place due to the high temperature creep. When the surfaces of Ni cover plates are vapor-deposited with 3 μm thick In films and then bonded to the LIGA-fabricated microchannels at 300 $^{\circ}\text{C}$ for 2 hrs using the diffusion soldering method, a tensile strength of 8.1 MPa can be achieved. A lower bonding strength is obtained when the Ni cover plates are deposited with 1 μm thick Sn films. In either case of diffusion soldering, a sound interface can result. In comparison with the solid-state bonding specimens, there are fewer cavities at the interfaces of the diffusion soldered specimens and their microchannels will not deform.

Keywords: Diffusion soldering, Solid-state bonding, Microchannels, LIGA

(2001/12/6 Received, 2002/1/10 Revised, 2002/1/24 Accepted)

* Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan
** Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei 106, Taiwan
*** Department of Materials Science and Engineering, National Chung-Shing University, Taichung, Taiwan
(*國立台灣大學材料系)
(**國立台灣大學機械系)
(***國立中興大學材料系)

1. 前言

隨著 IC 晶片功率密度的增高，構裝的散熱成爲一項重要的課題^(1,2)，散熱不良除了造成構裝接點可靠度降低，也將使 IC 晶片的電性表現大幅劣化。針對高功率密度 IC 晶片的散熱，Tuckerman 在二十年前就已經提出微型熱交換器(Micro Heatexchanger)的概念^(3,4)：將平行排列的微小通道(Micro-tunnels)貼附在 IC 晶片背面，利用流體直接將熱量帶走，由熱傳理論計算，50 μm 寬度的微小通道可以從正常運作溫度的 IC 晶片帶走超過 1,000W/cm²的熱量，Tuckerman 實際以非等向蝕刻矽晶片製作微小溝槽(Micro-channels)，表面無電鍍鍍薄膜，再利用陽極接合技術(Anodic Bonding)與一 Pyrex 玻璃蓋板接合成微小通道之微型熱交換器。Kang 則進一步提出交叉流動(Cross-flow)的微型熱交換器概念⁽⁵⁾，並且以鑽石車刀切削銅薄片製作微細溝槽，再利用固態接合技術(Solid State Bonding)製作交叉排列微小通道的微型熱交換器。

本研究利用微影電鑄成型技術(Lithographic Galvanofomung Abformung, LIGA)製作鍍質微細溝槽，然後分別嘗試以固態接合技術及擴散軟鐸技術(Diffusion Soldering)將此 LIGA 微細溝槽與一鍍薄板接合形成微小通道，以提供 IC 晶片微型散熱器元件。針對微型通道的封蓋接合如果採用一般硬鐸(Brazing)、軟鐸(Soldering)或膠合技術(Adhesive Bonding)均會因爲填充金屬或黏膠阻塞微型通道而不可行。

微影電鑄成型技術(LIGA)主要結合了積體電路的微影蝕刻技術與電化學的電鍍鑄模技術，以製作出具有高精密度與高深寬比的微結構元件，是微機電(Micro Electro Mechanical System, MEMS)領域的主要技術之一，已經被應用於微致動器、微熱交換器、微幫浦及微光學系統元件之製造^(6,7)。固態接合技術是將兩個待接合工件堆疊並施加足夠壓力使接合界面產生微觀塑性變形而緊密接觸，同時施加高溫使接合界面兩邊的原子相互擴散，而達到接合目的^(8,9)。擴散軟鐸則是在兩個待接合金屬工

件表面先鍍上一層大約 1 至 4 μm 的低熔點金屬薄膜 (Sn, In 等)，加熱使低熔點金屬薄膜熔融並與金屬工件接合^(10,11)，其界面相互反應形成介金屬層。由於低熔點金屬薄膜完全消耗，取代生成於接合界面的介金屬則具有較高熔點，因此可以在較低溫度接合，而應用於較高溫度，有別於硬鐸或軟鐸技術在應用上受限於填充金屬或鐸錫的熔點。接合完成的微小通道可利用導熱膠直接黏貼在 IC 晶片背面，成爲一微型散熱器，此種散熱器具有極低的熱阻值，可以有效地將 IC 晶片運作所產生的高熱量帶走。

2. 實驗方法

先利用微影電鑄成型(LIGA)技術製作寬度 100 μm 、深度 50 μm 、間距 300、500、1250 及 2500 μm 的鍍質微小溝槽。鍍金屬封蓋是採用純度 99.7%、厚度 0.8mm 的鍍板，切割成與微型通道基材相近之尺寸 (約 5mm \times 6mm)，表面先進行研磨、拋光以獲得平整、乾淨的鍍金屬封蓋。固態接合實驗是在 5 $\times 10^{-5}$ Torr 之真空爐中進行，先將已處理表面乾淨平整的鍍質微小溝槽及鍍金屬封蓋相互堆疊，施加壓力爲 0.4MPa，溫度 1000 及 1300 $^{\circ}\text{C}$ ，接合時間 2 及 10 小時。擴散軟鐸是將表面清潔完成的鍍金屬封蓋真空蒸鍍一層低熔點金屬薄膜，實驗所選用的低熔點金屬包含純鈷 (3 μm 厚) 和純錫 (1 μm 厚)。然後與 LIGA 微小溝槽試片相互堆疊，在 5 $\times 10^{-5}$ Torr 高真空爐中進行接合，溫度分別取 200、250、300 及 350 $^{\circ}\text{C}$ ，接合時間 15 及 120 分鐘。

3. 結果與討論

本實驗所製作完成的典型 LIGA 微小溝槽如圖 1 所示，圖 2 顯示此 LIGA 成型的試片表面有些許的凸起顆粒與平行條紋。此表面凸起顆粒，利用 EDX 分析其成分與微小溝槽基材同爲鍍元素，顯示其來自於電鑄不均勻沉積，而非製程附著之外來污染物。這些凸起顆粒與平行條紋對固態接合的影響很大，必須先進行

輕微的研磨拋光，但對於擴散軟銲則由於有低熔點液態金屬薄膜填充，影響較輕微。圖 3 顯示微小溝槽底部中央有輕微接縫存在，此中央接縫的形成是由於電鑄後期通道兩側金屬逐漸

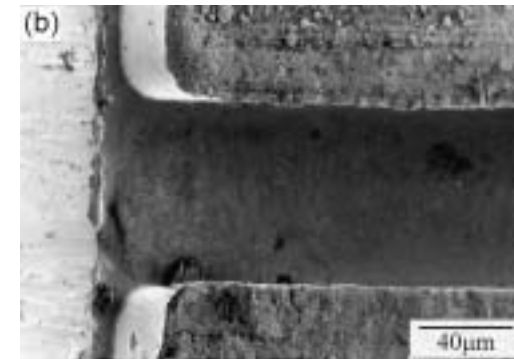
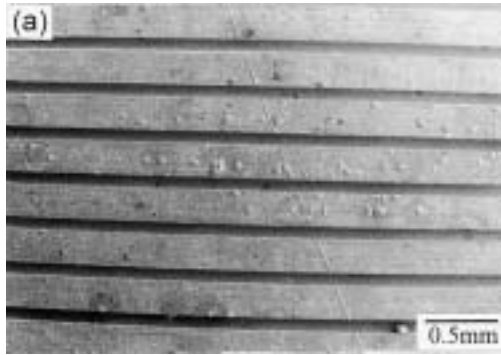


Fig. 1 Typical morphology of microchannels manufactured by LIGA technology.

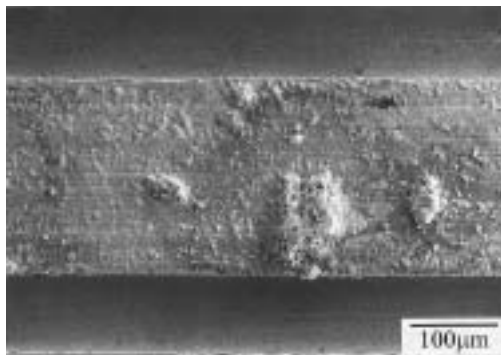


Fig. 2 Appearance of bumpy particles and parallel streaks on the surfaces of the LIGA-fabricated microchannels.

會聚所致，必須在電鑄過程兩側金屬相互接觸時期，適當控制金屬沉積速率使兩側相互密合。將此 LIGA 微小溝槽試片在真空環境，進行 1000°C 持溫 10 小時的退火處理，不需經由腐蝕處理即可明顯的看到再結晶現象 (圖 4)。針對 IC 晶片散熱器量產，此微型通道需配合晶片尺寸分割，本研究分別嘗試鑽石切割與線放電切割兩種方法。圖 5a 顯示鑽石切割位置會有塑性拉伸邊緣，其拉伸高度達數十 μm ，不論後續進行固態接合或擴散軟銲均會造成界面不密合，必須以研磨拋光去除這些拉伸邊緣；利用線放電切割則由於金屬重熔現象，會在切割位置形成凝固堆積的凸起邊緣 (圖 5b)，同樣造成接合界面無法密合。本研究尚未找到其它適當切割方法，可以在 LIGA 微型

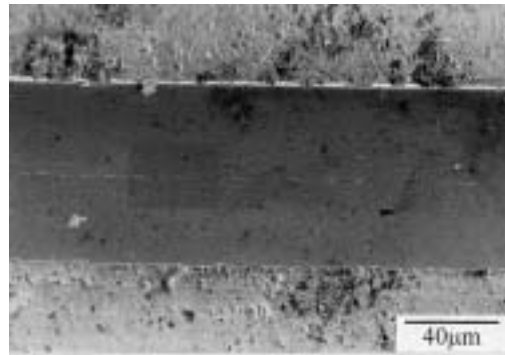


Fig. 3 Appearance of center-line crevices at the bottom of the LIGA-fabricated microchannels.

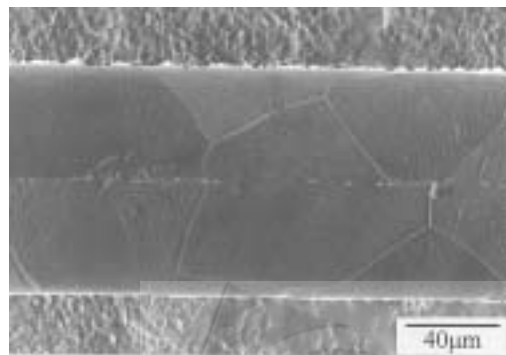


Fig. 4 Occurrence of recrystallization in LIGA microchannel specimens after annealing at 1000°C for 10 hrs.

溝槽的分割上獲得良好的截面，相對於 LIGA 製程自然形成的鍍質小溝槽邊緣部位（圖 6），顯示其外觀相當平整，有利於後續的接合製程，因此在 LIGA 製程直接生產所需的尺寸規格，是目前製作鍍微型通道的較佳方式。

直接將 LIGA 成型的微小溝槽試片與鍍金屬封蓋進行固態接合均無法得到理想的接合結果，主要癥結在於 LIGA 試片表面的凸起顆粒。因此，將這些 LIGA 微小溝槽試片表面先以 1500 號細砂紙輕微研磨，再以 $1\mu\text{m}$ 及 $0.3\mu\text{m}$ 氧化鋁粉拋光，然後進行固態接合，得到圖 7 之典型微小通道，研磨拋光步驟使 LIGA 微小溝槽的深度減少大約 $4\mu\text{m}$ 。由於固態接合完全依賴原子固態擴散反應，除了必須表面非常平整光滑，並且要施加足夠壓力使界面得以緊密接觸，同時須高溫長時間加熱（本研究只有當溫度高達 1300°C ，時間 10 小時，才可得到

理想接合界面），如此將造成 LIGA 微小溝槽試片發生高溫潛變，而使接合後的微小通道變形（圖 7b）；尤其當溝槽間距愈小時，接合界面所受壓力愈大，接合後的微小通道變形愈嚴

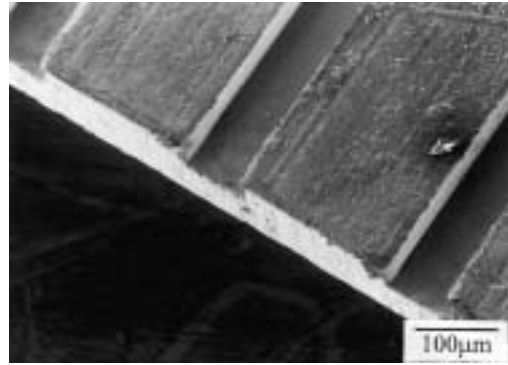


Fig. 6 Sound edges of the LIGA microchannel specimens formed naturally without cutting.

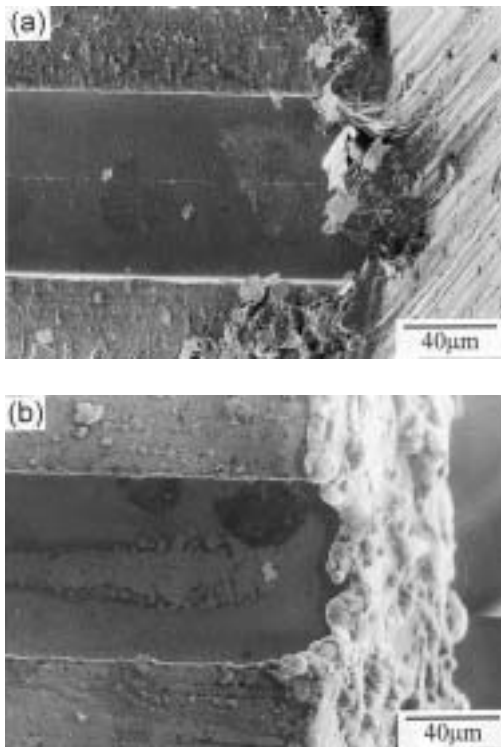


Fig. 5 Occurrence of edge defects in LIGA microchannel specimens after (a) diamond cutting, and (b) discharge cutting.

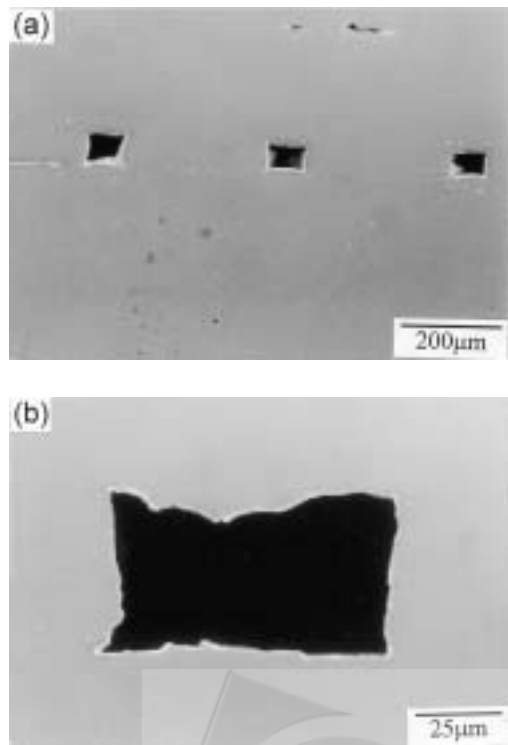


Fig. 7 Typical microtunnels created by joining a microchannel specimen with a Ni cover plate using solid-state bonding technology.

重，甚至如圖 8 所示崩塌成扁圓形。此外，即使是接合效果較佳的試片，其接合界面仍可見到局部孔洞存在（圖 7a）。

將 LIGA 成型的微小溝槽試片與表面蒸鍍 $3\mu\text{m}$ 厚純銲薄膜的鍍金屬封蓋進行擴散軟銲，得到圖 9 之微小通道，其外形完全維持原來 LIGA 成型之方形溝槽，接合效果良好。圖 9b 顯示接合界面形成厚度大約 $5\mu\text{m}$ 的連續介金屬夾層，很少出現先前固態接合試片常見的界面孔洞。在 LIGA 微小溝槽與鍍金屬封蓋之間接合界面所形成的介金屬以 EDX 分析其成份，發現在 200°C 及 250°C 接合界面之介金屬為 $\text{Ni}_{10}\text{In}_{27}$ ，而在 300°C 及 350°C 接合之界面介金屬為 Ni_2In_3 ，此 Ni_2In_3 介金屬應為純銲薄膜消耗完後， $\text{Ni}_{10}\text{In}_{27}$ 介金屬繼續與純鍍反應所形成： $\text{Ni}_{10}\text{In}_{27} + 8\text{Ni} \rightarrow 9\text{Ni}_2\text{In}_3$ 。將不同溫度接合 120 分鐘的微小通道試片進行拉伸試驗，所得到的接合強度列於表 1，接合強度的計算是取拉伸荷重除以實際接合面積（亦即扣除溝槽底部面積），表 1 結果顯示 300°C 為一最佳接合溫度，各溫度接合強度均高於純銲的拉伸強度 (3.5MPa)，但仍遠低於一般鉛錫合金拉伸強度（大約 53MPa ）。

將鍍金屬封蓋表面蒸鍍 $1\mu\text{m}$ 厚度的純錫薄膜，再與 LIGA 成型的微小溝槽試片進行擴散軟銲，得到圖 10 之接合界面，不僅原先 LIGA 成型的方形微小溝槽未發生變形，且接

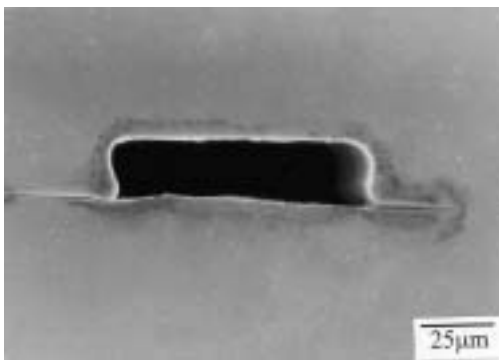


Fig. 8 Severe deformation of the microtunnels induced by the creep behavior of microchannels after solid-state bonding at 1300°C for 10 hrs under 0.4 MPa pressure.

合界面只有大約 $1\mu\text{m}$ 厚的介金屬層，EDX 無法分析其成份。但參考 Bader 等人的報導⁽¹²⁾： $\text{Ni}/\text{Sn}/\text{Ni}$ 薄膜擴散軟銲所得介金屬層為 Ni_3Sn_4 ，當純錫薄膜完全消耗後， Ni_3Sn_4 長時間與 Ni 繼續反應會形成 Ni_3Sn_2 及 Ni_3Sn 介金屬。表 1 之拉伸試驗結果顯示在 250°C 擴散軟銲 120 分鐘後的微小通道試片可得到最高接

Table 1. Tensile strengths (MPa) of the micro-channel specimens bonded to Ni cover plates at various temperatures for 2 hrs using the diffusion soldering.

Specimens	200°C	250°C	300°C	350°C
Ni/In/Ni	4.2	6.4	8.1	7.5
Ni/Sn/Ni	–	7.3	5.2	3.5

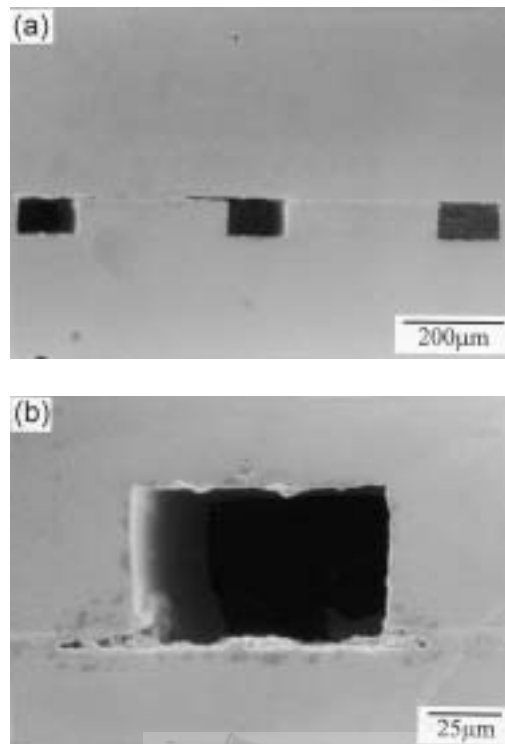


Fig. 9 Typical microtunnels created by joining a microchannel specimen with a Ni cover plate using solid-liquid interdiffusion bonding technology. (The Ni cover plate has been pre-coated with a $3\mu\text{m}$ thick In film.)

合強度(7.3MPa)，300°C 以上進行接合，其強度反而大幅降低。拉伸試驗破斷面顯示此高溫只有少部分面積發生界面反應達到接合效果，造成此接合不良的原因可能是蒸鍍純錫薄膜厚度只有1 μm ，在300°C 以上高溫進行擴散軟銲時，大部分純錫薄膜一發生熔融即直接與鎳金屬封蓋反應形成高溫介金屬層，而無法再與 LIGA 微小溝槽試片反應達到接合目的。理想的低熔點金屬薄膜厚度應至少3 μm 。

4. 結 論

針對高功率密度 IC 晶片的散熱問題，具有微小通道的微型熱交換器被視為一種最有效的解決方案。利用微影電鑄成型技術(LIGA)可以製作出尺寸精確之高深寬比微小溝槽，將此 LIGA 成型微小溝槽與一鎳金屬封蓋接合成微小通道，再以導熱膠黏貼至 IC 晶片背面，可以得到此種高效率的微型散熱器。有關微小溝槽與鎳金屬封蓋的接合，一般硬銲、軟銲或膠合均會因為填充金屬或黏膠阻塞微小通道而不可行。本研究發現固態接合雖可達到接合目的，但表面要求極度平整光滑，而且高溫長時間加壓接合條件會因為潛變而造成微小溝槽變形。先在鎳金屬封蓋鍍銲或錫薄膜，然後與 LIGA 微小溝槽進行擴散軟銲，當薄膜鍍層厚度大約3 μm ，接合溫度250°C 至300°C，接合

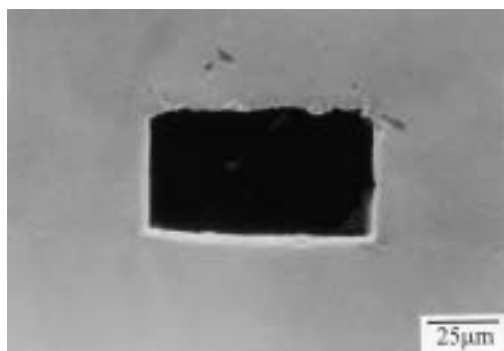


Fig.10 Typical microtunnels created by joining a microchannel specimen with a Ni cover plate using solid-liquid interdiffusion bonding technology. (The Ni cover plate has been pre-coated with a 1 μm thick Sn film.)

時間120分鐘可以得到理想的接合界面與接合強度。本研究除了顯示擴散軟銲在微小通道製作的可行性，也證實此方法較一般固態接合方法為佳，對於其它類似的微機電金屬元件接合亦同樣可以優先考慮採用。

誌 謝

本研究由國科會計畫「固液擴散接合製作電子構裝耐溫微接點研究」(NSC88-2216-E002-036)經費支持。

參考文獻

1. T. Handa, S. Iida, and J. Utsunomiya, IEEE Trans. Components Hybrids, and Manufact. Techno., **16** (1993) 384.
2. P.C. Chen, and W.K. Lin, App.Therm. Eng. Vol.21 (2001) 1739.
3. D.B. Tuckerman and R.F. W. Pease, IEEE Electron Device Lett., (1981) 5.
4. D.B. Tuckerman, "Heat Transfer Microstructures for Intergrated Circuits", Ph. D. dissertation, Stanford University, 1984.
5. S.W. David Kang, "Micro Cross-Flow Heat Exchanger", Ph. D. dissertation, Louisiana Tech University, 1992.
6. W. Menz and J. Mohr, "Mikrosystemtechnik fur Ingenieure 2nd Edi", VCH Verlag GmbH, Weinheim, Germany (1997) 231.
7. E.W. Becker, H. Betz, W. Ehrfeld, W. Glashauser, A. Heuberger, H.J. Michel, D. Munchmeyer, S. Pongratz, and R.V. Simens, Naturwissenschaften, **69** (1982) 520.
8. J.M. Gerken and W.A. Owczarski, "A Review of Diffusion Welding", Welding Research Council Bulletin, No. **109**, (1965).
9. P.M. Bartle, P.T. Houldcroft, J.C. Needham, E.F. Sheldon, S.A. Westgate, and J.P. Wilson, "Diffusion Bonding as a production Process", The Welding Inst., Abington Hall Abington Cambridge CB16AL, (1979).
10. I. Bernstein and H. Bartholomew, Trans. Metall. Soc. AIME, **236** (1966) 405.
11. F. Bartels, T. Muschik, H. Hieber and W. Gust, in : Proc. ELMAT 91 : Materials in Microelectronics, (1991); ed. H. Hieber, VDE-Verlag, (1991) 223.
12. S. Bader, W. Gust and H. Hieber, Acta metal. Mater., **43** (1995) 329.