

國立高雄科技大學模具工程系

National Kaohsiung University of Science and Technology,
Department of Mold and Die Engineering

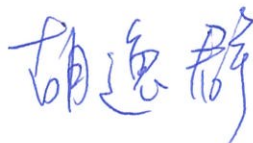
112 學年度 專題製作

題目：晶片底部點膠填充製程分析
(Analysis of Underfill Process in Flip-Chip Packaging)

班 級： 技模三甲

專題學生： 鄭硯心、B112147106
王俊喆、B112147108
陳妙宜、B112147104
宋柏慶、B112147109
陳庚甲、B112147118

指導老師： 胡逸群 老師



中 華 民 國 112 年 05 月

目錄

圖目錄	4
表目錄	5
摘要	7
1 前言	8
1.1 研究動機	8
1.2 研究目的	10
1.3 文獻探討與回顧	10
2 研究方法	12
2.1 研究理論	12
2.1.1 兩個平行板之間的流動	13
2.1.2 焊料凸塊的影響	15
2.1.3 動態接觸角	16
2.1.4 非牛頓流體和溫度依賴性流體	17
2.1.5 毛細管壓力於焊料凸塊表面的變化	20
2.2 研究流程	22
2.3 實驗晶片設計	24
2.4 實驗參數設計	24
2.5 點膠實驗	26

2.6	模流分析	27
3	研究結果與討論	28
3.1	實驗結果	28
3.1.1	充填結果判讀	28
3.1.2	充填結果	28
3.1.3	田口法因子分析	29
3.2	模流分析結果	30
3.3	結果比對	31
3.4	結論	35
4	團隊合作及貢獻	36
5	經費規劃及成本分析	37
5.1	設備之成本	37
5.2	時間之成本	37
6	成果應用	38
6.1	教學、實習的助益	38
6.2	產業界的應用價值	38
6.3	對參與學生能力的培養	38
7	參考文獻	39

圖目錄

圖 1 底部填充製程	9
圖 2 可視化實驗	9
圖 3 電腦模擬分析	9
圖 4 底部填膠示意圖	12
圖 5 毛細管流經兩塊平行板	13
圖 6 倒裝晶元封裝圖案	16
圖 7 提出的瞬態動態接觸角	17
圖 8 底部填充材料 FP4530 的溫度相關特性	19
圖 9 根據流動彎月面的位置考慮焊料凸塊上可變毛細管壓力的流動模型。...	22
圖 10 研究流程圖	23
圖 11 晶片模型等角視圖	24
圖 12 晶片模型側視圖	24
圖 13 點膠機	26
圖 14 晶片充填 50%	28
圖 15 晶片充填 100%	28

表目錄

表 1 軟體介紹	23
表 2 參數因子及水準	25
表 3 $L_9(3^4)$ 田口直交表	25
表 4 直交表點膠實驗結果表	29
表 5 品質特性因子反應表	30
表 6 模流分析數據表	30
表 7 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(25%).....	31
表 8 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(50%).....	31
表 9 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(75%).....	32
表 10 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(100%).....	32
表 11 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(25%).....	32
表 12 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(50%).....	33
表 13 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(75%).....	33
表 14 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(100%).....	33
表 15 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(25%).....	34
表 16 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(50%).....	34
表 17 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(75%).....	34
表 18 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(100%).....	35

表 19 工作分配表	36
表 20 花費成本:.....	37

摘要

在新產品導入的過程中，空洞數量或填充速率對於毛細底部充填封裝製程的影響是至關重要的。若在此過程中出現任何缺陷，則需要進行實驗批次以驗證並改善問題，這也將導致產品導入時程的延長和成本的增加。本研究的主要目標是建立一個實驗模型，以提前預測製程風險，進行設計改善，從而提升充填效率。在可視化實驗過程中，我們測試了不同的參數設計，以瞭解這些參數因子對空洞和充填時間的影響。我們也採用了 CAE 模擬分析，並將其與點膠實驗結果進行比對驗證。從實驗結果來看，由於晶片尺寸較小，使得填充速率均勻，且無逆向流動波前，因此不易形成空洞缺陷。而在填充時間方面，我們通過四因子三水準的田口實驗之品質特性因子反應表得出：低黏度、小尺寸晶片、雙邊點膠路徑有最佳結果，凸塊直徑的影響則較不顯著。其中，黏度被確定為主要影響填充效率的因子。例如，當黏度為#10000 時，流動速度較慢，導致填充時間大於黏度為#3000 和#1000 的情況。此外，模擬分析結果的波前流動方向和充填時間與實驗結果大致相同，這些結果為我們提供了寶貴的參考，有助於我們進一步優化製程並提高效率。

關鍵字：晶片封裝、田口法、點膠、模流分析、可視化實驗

1 前言

1.1 研究動機

在現代電子晶片製造領域，封裝技術的發展對於保護和提升電子元件的性能至關重要。毛細底部充填封裝製程(圖 1)[1]作為一種先進的封裝技術，已經在晶片製造中得到了廣泛的應用。而模流分析作為封裝製程中重要的模擬工具，能夠模擬和預測封裝過程中的流動行為，提供對製程的深入理解和優化。電子封裝元件是由複雜的結構與不同性質的材料所組成，在溫度變化時，孔洞會造成凸塊的錫在後續高溫製程中溢出，使得元件短路，此外孔洞的存在增加了後續封裝體吸濕而爆板產生脫層現象的潛在風險，如何減少孔洞的產生增加其可靠度將成為關鍵。典型的孔洞可能出現在凸塊與底部填膠間或者底部填膠中，利用可視化實驗(圖 2)[2]來觀察填充膠的流動並更改參數設計，以提升其可靠度為一有效的解決方法。

分析覆晶封裝體在底部填充時產生的孔洞，為有效地判斷孔洞的產生及位置，而以實驗方式分析需花費大量的時間，利用電腦模擬分析可節省大量時間及成本。本研究利用分析軟體 Moldex3D(圖 3) [2]，分析使用不同性質底部填膠和凸塊排列對於 FCBGA 封裝體中孔洞產生及分布情形，並對比可視化填充實驗，建立覆晶封裝的預測機制預測其可能發生缺陷位置，找出底部填膠和凸塊排列對於孔洞產生之影響。

使用電腦模擬分析，材料的性質是影響分析結果精確度的重要條件之一，底部填膠材料為環氧樹脂，其材料性質會因為不同的加熱溫度及時間，而有不一樣

的誤差的產生，為提高電腦模擬分析和可視化填充實驗的準確度，故本實驗利用黏度變化小的矽油作為底膠材料，並針對底部填膠的溫度進行室溫恆溫的控制。

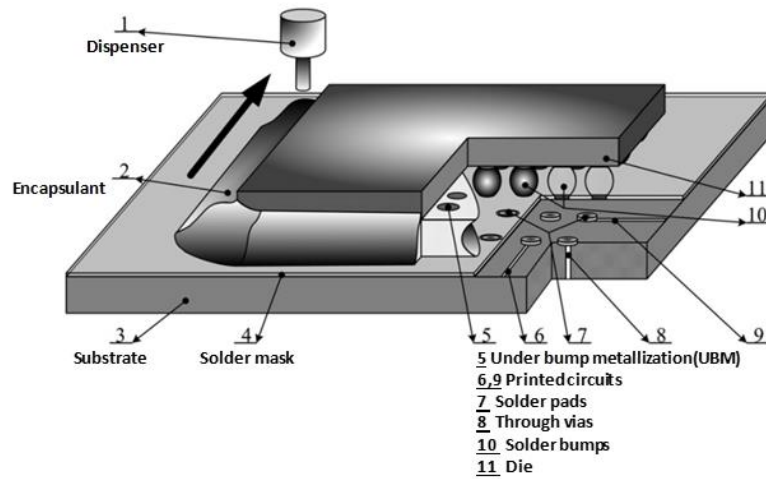


圖 1 底部填充製程[1]

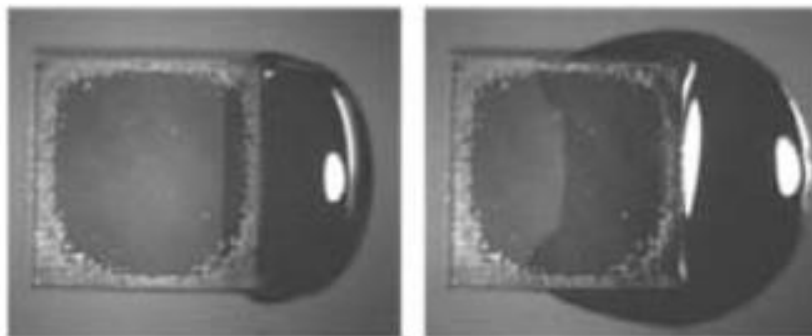


圖 2 可視化實驗[2]



圖 3 電腦模擬分析[2]

1.2 研究目的

本研究的主要貢獻在於建立了一種可視化的實驗模型，該模型能夠預測製程風險，並進行設計改進，從而提高充填效率。實驗上我們使用透明壓克力板取代金屬基板，且只要觀察封膠的流動，因此不需要加熱去達成固化反應，降低整體的流程來簡化實驗，以利於測試不同的參數設計得出哪個因子對於充填效率快慢之影響，並採用 CAE 模擬分析對照可視化點膠實驗結果驗證實驗結果。

1.3 文獻探討與回顧

有許多的電子封裝型式皆需要利用凸塊連接晶片與基板，包含覆晶封裝 (flip chip) [3]、2.5D 封裝[4]等。過程中皆需要填充底膠以保護凸塊[5]，毛細底部填充是各式底膠填充製程中，最廣泛使用的一種。製程中需要確保無孔洞殘留其中，孔洞會造成凸塊的錫在後續高溫製程中溢出，嚴重時會使相臨的錫橋接，使得元件短路，此外孔洞的存在增加了後續封裝體吸濕而爆板產生脫層現象的潛在風險[6]。因此如何正確預測孔洞之位置、尺寸及消除孔洞，是半導體封裝的重要議題。一般封裝內部在成形製程後是否殘留孔洞，會用超音波掃描顯微鏡 (Scanning Acoustic Microscope, SAM) 的 C 掃描模式 (C-SAM) 量測取得[7]。然而此方法只能看到最後的結果，無法得知流動過程。因此有學者利用玻璃取代晶片，進行毛細底部填充製程的可視化實驗以了解其流動行為[8]。

在 Kim 及 Sung 的研究中指出，模流分析的結果，與實驗具高度吻合[9]。因此模流分析也被廣泛的運用在毛細底部填充製程參數的優化上[8, 10-15]。隨著電腦科技的進步，模流分析也從二維模擬走向三維模擬[16-17]。凸塊的存在會

影響模流的流動[8,12-14]，因此模流分析的建模過程中，將凸塊幾何建置出來是非常重要的。

2 研究方法

2.1 研究理論

使用透明壓克力板取代金屬基板達到可視化的目的以了解其流動行為，並利用 AB 膠替代凸塊，解決錫無法焊接於非金屬板上的問題。利用不同黏度的矽油取代底膠，可以更好的探討黏度的影響。通過點膠機進行點膠(圖 4) [18]，觀察其填充情形及是否有孔洞的產生。底膠填充製程工藝中，填充時間估算是製程中主要的考慮因素之一。在過去的幾十年裡，已經提出數種填充時間模型。

底部填膠區域夠薄以進行毛細作用，且沿著晶片的一側或兩側的周圍進行環氧塑料放置。表面張力，是主要對底部填膠產生毛細作用的物理因素。在表面張力的驅動之下，底膠材料藉由毛細作用緩緩注入晶粒下的空間裡。此驅動力將會大幅受到流體與基板之間表面張力的影響，並導致充填時間不同。在實際的點膠製程中，填膠時間過長可能造成塑料在填膠結束前即部分硬化，但是在本採用矽油為工作流體的研究上不會有此現象。本研究將透過 CAE 模擬分析建立具凸塊之三維模流分析模型，並對照可視化點膠實驗結果找到最佳符合需求的設計控制。

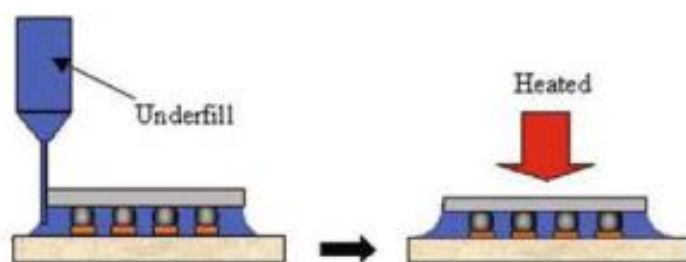


圖 4 底部填膠示意圖

2.1.1 兩個平行板之間的流動(Flow between two parallel plates)

假設液體通過兩個平行板之間的狹窄間隙填充而沒有焊料凸點，可以得出一個簡單的填充時間模型，如圖 5[19]所示。

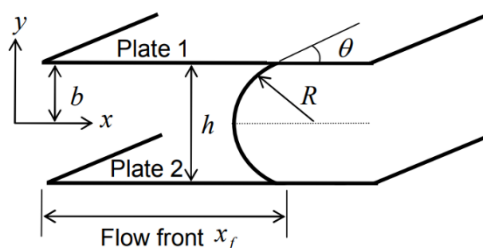


圖 5 毛細管流經兩塊平行板

對於牛頓黏性液體，如果流動是層流且不可壓縮的，則非穩態流動的控制式 $u(y, t)$ 可以表示如下：

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1)$$

其中 μ 是流體黏度， ρ 是密度， p 是壓力， x 是流動方向， y 是晶片法向。根據拉普拉斯-楊式，半月面處的驅動毛細管力為 $\Delta p = 2\sigma \cos\theta/h$ 是表面張力係數， θ 是接觸角， $h = 2b$ 是間隙高度。鑒於式 (1) 無法解析求解，則將速度分解為穩態項和非穩態項，如下所示： $u(y, t) = \bar{u}(y) + u'(y, t)$ 。通過讓 \bar{u} 和 u' 分層，可以得到以下結果：

$$0 = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u'}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 u'}{\partial y^2} \quad (3)$$

穩態分量的解是完全展開的層流速度剖面，非穩態分量的解可以通過 Arpaci[21]提出的變數分離得到。

$$\bar{u} = -\frac{dp/dx}{2\mu}(b^2 - y^2) \quad (4)$$

$$u' = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \exp(-\lambda_n^2 \nu t) \cos \lambda_n y \quad (5)$$

其中 $\lambda_n b = \frac{2(n+1)\pi}{2}$, $n = 0, 1, 2, \dots$

$$a_n = -2 \frac{(-dp/dx) (-1)^n b^2}{\mu (\lambda_n b)^3}$$

通道內的壓力梯度假定為線性;即, $-dp/dx = \Delta p/x_f$, 其中 x_f 是流鋒的位置。

流鋒的速度等於平均速度 u_m , 可以通過對通道橫截面上的速度分佈進行積分來評估。

$$u_m = \frac{dx_f}{dt} = \frac{\Delta p b^2}{x_f \mu} \left[\frac{1}{3} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_n b)^4} \exp(-\lambda_n^2 \nu t) \right] \quad (6)$$

上述式相對於時間 $[0, t_f]$ 的積分得到以下結果：

$$\begin{aligned} x_f^2 &= \frac{2\Delta p b^2}{\mu} \left[\frac{1}{3} t_f - 2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(\lambda_n b)^4} \frac{1}{\lambda_n^2 \nu} (1 - \exp(-\lambda_n^2 \nu t_f)) \right] \\ &\approx \frac{2\Delta p b^2}{\mu} \left(\frac{1}{3} t_f - \frac{32h^2}{\pi^6 \nu} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中僅考慮級數展開中的第一項($n = 0$), 因為它隨著 n 的增加而迅速減小。

為了獲得時間 t_f 的顯式公式, 指數項也可以忽略, 除非時間小於 0.002 s, 儘管初始條件不滿足($x_f = 0, at t_f = 0$)。通過將毛細管壓力 Δp 代入式 (7), 可

以得到填充時間的最終式, 如下所示：

$$t_f = \frac{6\mu x_f^2}{\Delta p h^2} + \frac{96h^2}{\pi^6 \nu} = \frac{3\mu x_f^2}{h\sigma \cos\theta} + \frac{96h^2}{\pi^6 \nu} \quad (8)$$

式 (8) 右側的第一項由穩速分量產生, 與 Washburn 模型[20]中的項相同。

第二項是非穩態速度分量的最大貢獻，它與流體的間隙高度 h 和運動黏度 ν 有關。對於間隙高度較窄、液體黏度較大，非穩態流動對填充時間的影響較小。

以 Level 2 實驗組為例，代入實驗參數 $h = 0.3 \text{ mm}$, $x_f = 9 \text{ mm}$, $\mu = 3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\sigma = 15.9 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$, $\nu = 2.88 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $\theta = \frac{\pi}{6}$ ，可得預測填充時間 t_f 為 3.05 s ，因為此模型沒有考慮焊料凸塊的影響，填充時間明顯短於實際實驗結果。

2.1.2 焊料凸塊的影響(*Influence of solder bump resistance*)

由於對更小、更薄的電子設備的需求，覆晶封裝中焊料凸塊的直徑和間距顯著減小。因此，需要具有更高焊料凸塊密度的晶片。因此，基於 Washburn 模型預測填充時間並不令人滿意，因為它沒有考慮焊料凸塊的存在。幾項實驗研究報告[22,23]說，實際填充時間比 Washburn 模型估計的時間要長。為了考慮焊料凸塊對毛細管底部填充流動的影響，Wan[24]提出了一個高級模型（稱為 Wan 模型），用於焊料凸塊圖案的矩形陣列，如圖 6 (a) [19]所示。在圖中， L 是凸塊間距， W 是兩個相鄰焊料凸塊之間的間隙， d 是凸塊直徑。通過焊料凸塊陣列的底部填充液流近似為一組具有可變橫截面的一維通道流的組合，如圖 6 (b) [19]所示。儘管存在二維速度場，但僅考慮了橫截面上的平均流向分量。由於橫截面的變化，毛細管力因壓力損失而減小，這可以從虛擬功原理[25]計算出來。驅動壓力的最終式寫如下：

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_{\text{capillary}} - \Delta p_{\text{bump}} \\ &= 2\sigma \cos\theta \left(\frac{1}{W} + \frac{1}{h} \right) - \frac{2d\sigma \cos\theta}{W(W+d)} \end{aligned} \quad (9)$$

$$= \frac{2\sigma \cos\theta (W^2 + hW + dW - dh)}{hW(W + d)}$$

如果 W 變為無窮大，則該式被複製到拉普拉斯-楊式中，而不會出現焊料凸塊。如果幾何形狀和流體特性是固定的，則該模型中的合成驅動壓力是恆定的。通過將式 (9) 的驅動壓力代入式 (8)，可以評估填充時間。

以 Level 2 實驗組為例，代入實驗參數 $h = 0.3 \text{ mm}$, $L = 0.7 \text{ mm}$, $W = 0.3 \text{ mm}$, $d = 0.4 \text{ mm}$, $\sigma = 15.9 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$, $\theta = \frac{\pi}{6}$ ，得預測充填時間 t_f 為 206 s，可知這是個相當保守的預測結果。

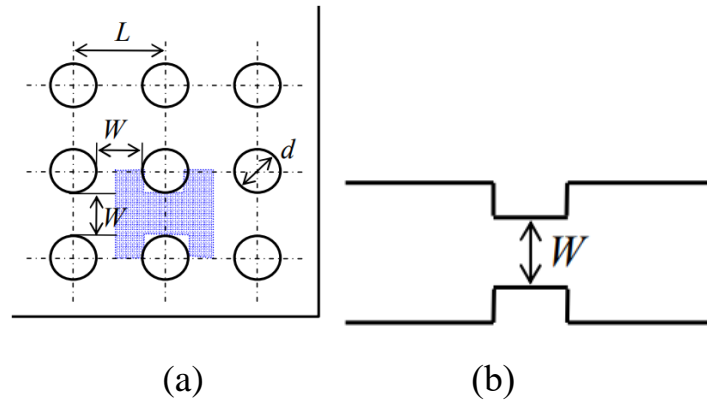


圖 6 倒裝晶元封裝圖案：(a) 焊料凸點圖案的矩形陣列；(b) 通過焊料凸點陣列的近似流道。

2.1.3 動態接觸角 (Time-dependent dynamic contact angle)

在 Washburn 和 Wan 模型中，接觸角被假定為平衡接觸角。實際上，在底部點膠填充工藝的早期階段，接觸角接近 90° ，因為在通道邊緣分配的液體的彎月面在流向上形成直角。隨著時間流逝，接觸角發展到其平衡角。使用恆定接觸角表明平衡接觸角的發展太快，以至於忽略了發展區域。然而，研究表明[26,27]，必須考慮隨時間變化的動態接觸角。

對於動態接觸角，Newman[28]提出了式 $\cos\theta(t) = \cos\theta_s(1 - ae^{-ct})$ ，其

中接觸角隨時間呈指數減小，如圖 7[19]所示。在圖中， θ_s 為靜態或平衡接觸角， θ_0 為初始接觸角。 $a = 1 - \cos\theta_0/\cos\theta_s$ ， $c = \sigma/(\mu M)$ 是係數，其中 M 是取決於固體表面的常數。鑒於接觸角是時間的函數，驅動壓力也會隨時間變化。因此，通過忽略非穩態流動分量對式 (6) 進行積分，得出以下填充時間公式：

$$t_f = \frac{6\mu x_f^2}{\Delta p h^2} + \frac{a}{c}(1 - e^{-ct_f}) \quad (10)$$

該式是填充時間的非線性函數，需要反覆運算解。要計算上式中的驅動壓力，可以使用 Washburn 或 Wan 模型。

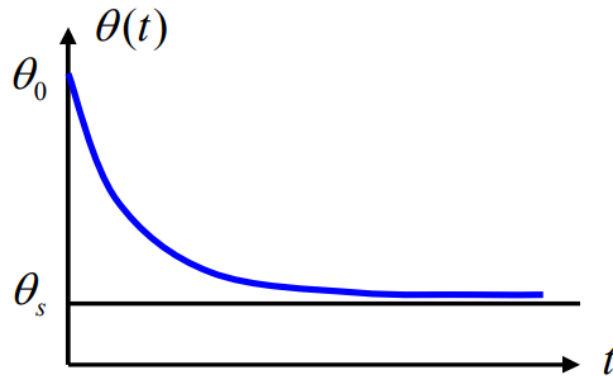


圖 7 提出的瞬態動態接觸角

2.1.4 非牛頓流體和溫度依賴性流體(Non-Newtonian and temperature-dependent fluids)

底部填充材料的特性是底部填充流建模中的另一個關鍵問題。在實際應用中必須考慮材料性能的兩個方面。一個是流變特性，另一個是特性的溫度依賴性。底部填充材料通常被稱為非牛頓流體。作為黏度本構式最廣泛使用的公式是幂律模型[29,30]，其中有效黏度由 $\eta = m\dot{\gamma}^{n-1}$ 給出。在該模型中，黏

度隨剪切速率 $\dot{\gamma}$ 而變化，參數 m 和 n 是通過實驗確定的。對於牛頓流體， $m = \mu$ 和 $n = 1$ 。如果 $n > 1$ ，則流體稱為剪切增稠；如果 $n < 1$ ，則流體稱為剪切稀化。忽略非穩態速度分量的非牛頓流體的控制式 (1) 可以改寫為：

$$\frac{d}{dy} \left(\eta \frac{du}{dy} \right) = - \frac{dp}{dx} \quad (11)$$

通過對上述式進行積分，可以得到通道內的速度分佈為：

$$u(y) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{-dp/dx}{m} \right)^{\frac{1}{n}} \left(b^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (12)$$

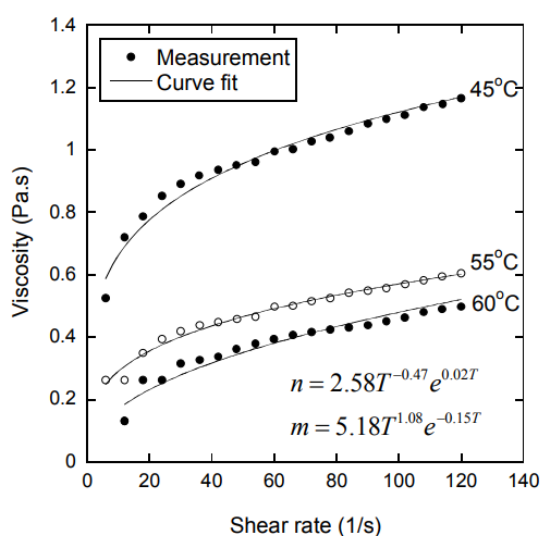
使用前面解釋的對牛頓流體進行的相同程式，流動前沿和填充時間的最終式可以推導出為：

$$x_f = \frac{h}{2} \left(\frac{\Delta p}{m} \right)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{n+1}{2n+1} t_f \right)^{\frac{n}{n+1}} \quad (13)$$

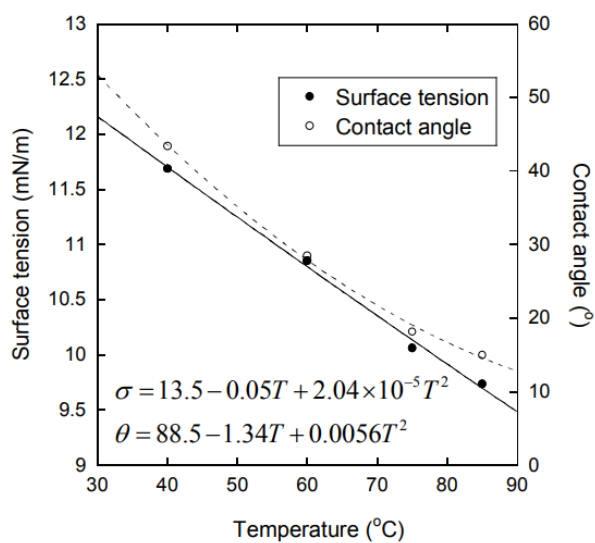
其中驅動壓力可以是毛細管壓力或考慮抗碰撞阻力的淨壓力，分別由 Washburn 和 Wan 模型推導得出。

為了計算式 (14) 中的填充時間，必須確定底部填充材料的特性，如密度、表面張力和接觸角以及黏度的幂律指數。除密度外，典型底部填充材料的這些特性對溫度變化也很敏感。圖 8[19]顯示了底部填充材料 FP4530(USA Dexter Corp.) [31] 的溫度相關特性。通常，底部填充材料儲存在 -40°C 以下以防止硬化。高於室溫時，其黏度變得足夠低，以使毛細管底部填充液流動。圖 8 (a) 所示的黏度隨剪切速率而變化，並充分擬合到 45°C 、 55°C 和 60°C 的幂律本構式。這種材料在加工溫度範圍內具有剪切稀化行為。 m 和 n 對於溫度

的依賴性如圖 8 (a) 所示。在圖中， m 隨溫度降低，有助於黏度降低;而 n 隨溫度升高而增加，從而增強了剪切稀化行為。表面張力和平衡接觸角也在溫度變化下測量，如圖 8 (b) 所示。這兩種特性都隨溫度而降低，但接觸角的減小速率比表面張力的減小速率更顯著。接觸角還取決於晶元和基板的表面材料[32]。而本次實驗的工作流體採用恆定室溫中的矽油，黏度變化甚小以致可以忽略。



(a)



(b)

圖 8 底部填充材料 FP4530 的溫度相關特性：(a) 黏度; (b) 表面張力和接觸角

2.1.5 毛細管壓力於焊料凸塊表面的變化(*Influence of capillary pressure on solder bump surface*)

Young[33,34]根據流動彎月面的位置，考慮焊料凸點上的黏性阻力和可變毛細管壓力，推導出了不同的填充時間模型（Young 模型）。流場被認為是一個多孔空間，具有一系列圓形圓柱體組，並由兩個平行板限制。黏性阻力由通道壁和焊料凸點構成。對於給定的壓力梯度，平行板之間的平均速度可以通過對通道橫截面上的式（4）進行積分來獲得，如下所示：

$$u_m = -\frac{h^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (15)$$

如果將凸塊視為平行圓柱體，則圓形圓柱體之間的流量可以表示為[35]：

$$u_m = -\frac{4d^2}{9\sqrt{2}\pi\mu} \left(\frac{L-d}{d}\right)^{\frac{5}{2}} \frac{dp}{dx} \quad (16)$$

通過組合式中的流動阻力。式（15）和式（16），給定壓力梯度的平均速度可以寫成：

$$u_m = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}, k = \left[\frac{9\sqrt{2}\pi}{4d^2} \left(\frac{d}{L-d}\right)^{\frac{5}{2}} + \frac{12}{h^2} \right]^{-1} \quad (17)$$

其中 k 是滲透性， L 是焊料凸塊間距。

如圖 9[19]所示，當彎月面位於位置 x_f 時，由於橫截面積 $A(x)$ 的變化以滿足質量守恆，平均速度根據位置 x 而變化。

$$u_m(x) = u_m(x_f) \frac{A(x_f)}{A(x)} \quad (18)$$

波前的速度等於彎月面處的平均速度，即 $u_m(x_f) = dx_f/dt$ 。假設壓力梯度是線性的，並且從入口到彎月面位置積分，式（17），則彎月面潤濕距離與

毛細管壓力之間的關係可以根據沿流場的累積黏阻 $R(x_f)$ 推導出來：

$$\mu A(x_f) R(x_f) \frac{dx_f}{dt} = \Delta p, R(x_f) = \int_0^{x_f} \frac{dx}{kA(x)} \quad (19)$$

最終的彎月面潤濕距離可以通過將 dx_f/dt 積分，式(19)中得到。在這個式中，無論位置是否在焊料凸塊區域，橫截面積、黏阻和毛細管壓力都不同。在凹凸區域中，根據以下公式計算它們：

$$A(x) = L - d \cos \varphi \quad (20)$$

$$R(x) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\varphi} \frac{d \cos \varphi d \varphi}{2hk(L - d \cos \varphi)} + R^{i-1} \quad (21)$$

$$\Delta p = \frac{2\sigma_b \cos(\theta_b + \varphi)}{L - d \cos \varphi} + \frac{2\sigma \cos \theta}{h} \quad (22)$$

當半月板位於凸起區域之外時，使用以下公式：

$$A(x) = Lh \quad (23)$$

$$R(x) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{d \cos \varphi d \varphi}{2hk(L - d \cos \varphi)} + \frac{12}{h^3 L} (x_f^i - d) + R^{i-1} \quad (24)$$

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{h} \quad (25)$$

其中 φ 是焊料凸塊上接觸線形成的方向體角， σ_b 和 θ_b 分別是凸塊表面的表面張力和接觸角。上標 $i-1$ 和 i 分別是焊料凸塊陣列的前層和當前層。因此， R^{i-1} 表示直到前一層的累積黏阻。在凸塊區域，兩個毛細管壓力參與底部填充過程，如式(22)所示。一種是由焊料凸塊之間的表面張力引起的毛細管壓力，隨著凸塊間距變小，毛細管壓力可能會變得很大；另一種通常在 Washburn 和 Wan 模型中被認為是由平行板之間的表面張力施加的毛細管壓力。

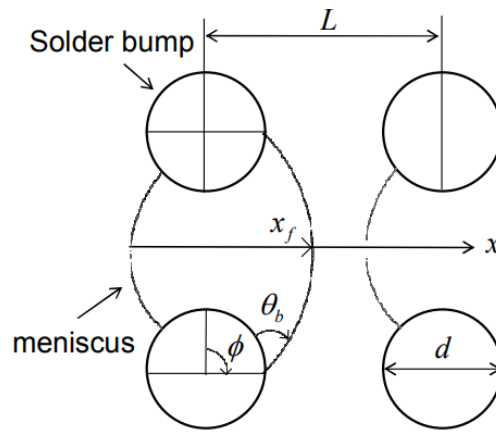


圖 9 根據流動彎月面的位置考慮焊料凸塊上可變毛細管壓力的流動模型。

2.2 研究流程

本次研究流程主要分兩大方向(圖 10)，點膠實驗及電腦模流分析。詳細實驗流程如下：

I. 點膠實驗

- i. 設定實驗晶片尺寸並利用雷切機裁切壓克力板，完成所需晶片尺寸。
- ii. 球閘陣列替代材料(AB 膠)植球。
- iii. 設定實驗參數並利用點膠機進行點膠，等待填充完成。
- iv. 變更實驗條件，配合田口法進行多組實驗：A:材料黏度、B:晶片尺寸、C:凸塊直徑、D:點膠路徑等。
- v. 觀察波前流動行為並進行可視化實驗。

II. 電腦模擬

- i. 利用軟體(表 3)建立具凸塊之三維模流分析模型。
- ii. 變更實驗條件，配合田口法進行多組實驗
- iii. 紀錄模流分析波前流動行為及填充時間。
- iv. 電腦數值模擬結果與實驗結果交互比對。

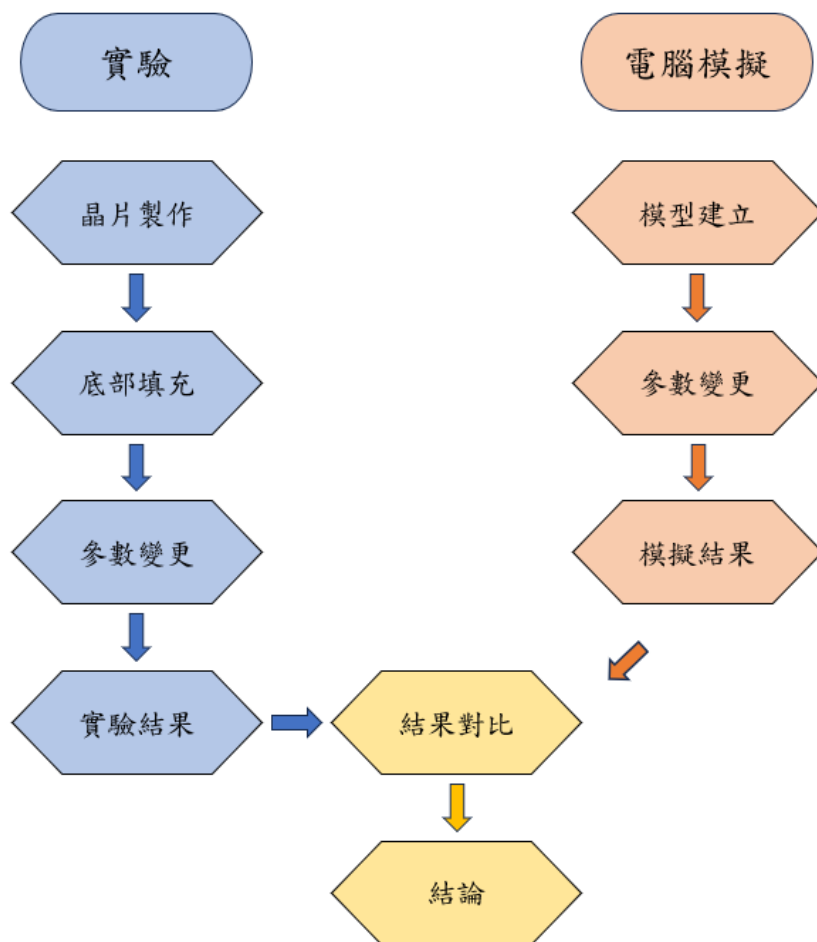


圖 10 研究流程圖

表 1 軟體介紹

名稱	用途
 AutoCAD 2019	1. 2D 繪製 2. 長度、大小設計
 Rhinoceros 5	1. 3D 建模 2. 零件分類 3. 模擬網格建立
 Moldex3D Studio	1. 參數、材料設定 2. 模擬分析 3. 充填結果產生

2.3 實驗晶片設計

晶片方面參考球柵陣列封裝(FCBGA)來設計。上半部為晶片本體，下半部為封裝基板，中間圓形凸起物為凸塊(圖 11)。凸塊在晶片與基板之間形成的空腔為填充材料的流動區域(圖 12)。

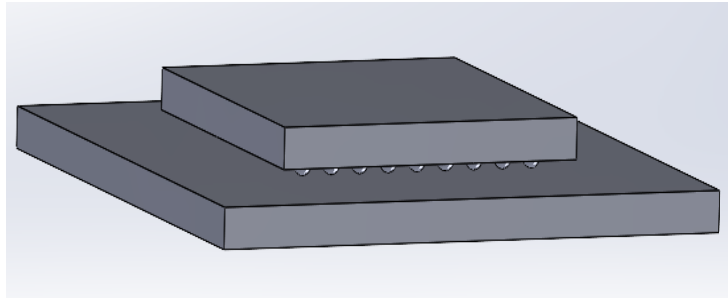


圖 11 晶片模型等角視圖

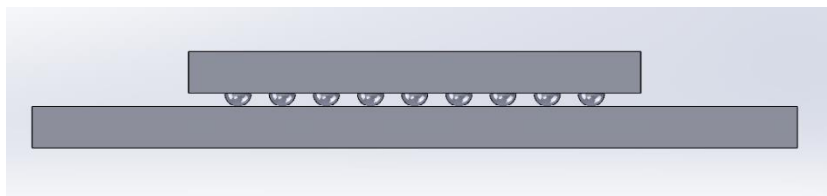


圖 12 晶片模型側視圖

2.4 實驗參數設計

本研究參數因子分為四項：膠體黏度、晶片尺寸、凸塊直徑、點膠路徑，並又各列出三個水準，如表 2 所示。另外，使用了田口法來大幅減少試誤實驗之次數、人力及時間等外，同時亦可確實最佳化製程參數，達成改善產品品質與降低生產成本之雙重效益。直交表使用 $L_9(3^4)$ 的建構(表 3)，故在全因子試驗中需有 $3^4=81$ 組實驗，但若利用田口實驗法，只要 9 組實驗即可。

表 2 參數因子及水準

水準	材料黏度(cps)	晶片尺寸(mm ²)	凸塊直徑(mm)	點膠方式
Level 1	1000	8*8	0.6	單點
Level 2	3000	9*9	0.7	單邊
Level 3	10000	10*10	0.8	雙邊

表 3 L₉(3⁴)田口直交表

No.	材料黏度(cps)	晶片尺寸(mm)	凸塊直徑(mm)	點膠路徑
1	1000	8*8	0.6	單點
2	1000	9*9	0.7	單邊
3	1000	10*10	0.8	雙邊
4	3000	8*8	0.7	雙邊
5	3000	9*9	0.8	單點
6	3000	10*10	0.6	單邊
7	10000	8*8	0.8	單邊
8	10000	9*9	0.6	雙邊
9	10000	10*10	0.7	單點

2.5 點膠實驗

點膠機(圖 13)的實驗方法和步驟包括以下：

1. 準備工作：確保點膠機和相關設備處於正常工作狀態，準備好所需的點膠材料和基材。
2. 設置參數：根據點膠材料和點膠目的設置點膠機的參數，如壓力、速度、路徑等。
3. 進行點膠：根據實驗需求，使用點膠機將點膠材料精確地施加到晶片上，根據實驗參數進行單點、單邊、雙邊點膠。
4. 觀察和記錄：觀察點膠效果，記錄充填時間、點膠位置、等相關數據。
5. 分析結果：根據實驗結果進行分析，評估點膠效果是否符合要求，必要時進行調整。
6. 清潔和保養：實驗結束後，及時清潔點膠機和相關設備，做好保養工作，以確保下次實驗的準確性和穩定性。



圖 13 點膠機

2.6 模流分析

模流分析的方法和步驟包括以下：

1. 準備模型：首先，需要建立封裝晶片的 CAD 模型，我們利用 AutoCAD 繪製設計出晶片的形狀及尺寸。
2. 網格建構：使用 Rhinoceros 5 將 CAD 模型轉換成計算機模擬所需的網格。這一步是關鍵的，因為網格的質量會影響模擬結果的準確性和計算效率。
3. 匯入分析軟體：將網格檔匯入至分析軟體 Moldex3D。
4. 設置邊界條件及模擬參數：設定指定的邊界條件及模擬參數，如：進膠點、材料黏度、填充時間等。
5. 執行模擬：選擇毛細底部填充的模擬工具執行模擬，根據設置的邊界條件和模擬參數，模擬塑料在模具內部的流動情況。
6. 分析結果：根據模擬結果進行分析，評估塑料充填過程中出現的問題，如空洞、短料等，必要時進行改進。
7. 文檔記錄：將模擬過程、結果和相關參數進行文檔記錄，以便日後製作報告內容。

3 研究結果與討論

3.1 實驗結果

3.1.1 充填結果判讀

本研究主要觀察毛細底部點膠實驗的充填時間以及有無空洞的產生，並分別記錄晶片充填 50%(圖 14)和 100%(圖 15)的波前流動情形，以供後續對照。



圖 14 晶片充填 50%



圖 15 晶片充填 100%

3.1.2 充填結果

在實驗過程中，我們使用透明壓克力板來替代金屬基板，以便觀察封膠在晶片中的流動情況。我們利用田口法測試了不同的參數設計，以確定哪些因素對充填效率有影響。田口法是一種用於設計實驗和分析數據的統計方法，旨在找出控制因子和噪聲因子之間的最佳組合，以提高產品質量和性能。表 4 展示了此次

研究的點膠實驗結果（Y 為充填時間）。為了提高實驗的精準度，我們進行了三次記錄。從點膠實驗結果來看，本次實驗無逆向流動波前，因此不易形成空洞缺陷。

表 4 直交表點膠實驗結果表

No.	A	B	C	D	Y_1	Y_2	Y_3	Y_{avg}	孔洞
1	1	1	1	1	75	75	77	75.6	無
2	1	2	2	2	84	83	87	84.6	無
3	1	3	3	3	78	73	70	73.6	無
4	2	1	2	3	90	88	83	87	無
5	2	2	3	1	130	117	120	122.3	無
6	2	3	1	2	120	116	110	115.3	無
7	3	1	3	2	280	290	275	281.6	無
8	3	2	1	3	340	335	365	346.6	無
9	3	3	2	1	610	605	630	615	無

3.1.3 田口法因子分析

田口法因子分析是一種用於設計實驗和分析數據的統計方法，特別適合於減少變異性和提高產品質量。根據實驗結果計算出品質特性因子反應表(表 5)，其中包含四個因子（材料黏度、晶片尺寸、凸塊直徑和點膠方式）及其對應的三個水準（Level 1、Level 2 和 Level 3），還有每個因子的效應（Effect）。根據效應

(Effect) 的數值，我們可以判斷哪些因子對結果的影響最大：材料黏度 (336.47) 是最重要的因子，因為它的效應數值最大，所造成充填時間差距較大。晶片尺寸 (119.9) 是第二重要的因子。點膠方式 (110.47) 是第三重要的因子。凸塊直徑 (103.03) 是最不重要的因子。且在填充時間方面得出：低黏度、小尺寸晶片、雙邊點膠路徑有最佳結果。

表 5 品質特性因子反應表

	材料黏度	晶片尺寸	凸塊直徑	點膠方式
Level 1	77.93	148.07	179.17	270.97
Level 2	108.20	184.50	262.20	169.07
Level 3	414.40	267.97	159.17	160.50
Effect	336.47	119.90	103.03	110.47

3.2 模流分析結果

為了驗證點膠實驗結果是否合理，因此使用 CAE 模擬分析建立具凸塊之三維模流分析模型，並對照點膠實驗結果找到最佳符合需求的設計控制，參數方面設定與點膠實驗一致。模流分析如表 6 所示，分析結果與實驗結果大致相同。但本研究因時間不夠，無法分析全部項次，因此只模擬三組成果。

表 6 模流分析數據表

No.	A	B	C	D	Y	孔洞
1	1	1	1	1	80	無
2	1	2	2	2	90	無
3	1	3	3	3	74	無

3.3 結果比對

基於 25%、50%、75%、100% 充填狀態下的波前流動方向和充填時間，我們整理出了模擬結果對比表。通過將實驗結果與模擬分析進行比對，可以看出，項次 1（表 7-10）、項次 2（表 11-14）、項次 3（表 15-18）的模流分析結果與點膠實驗結果在波前流動方向和填充時間方面大致相同。

表 7 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(25%)


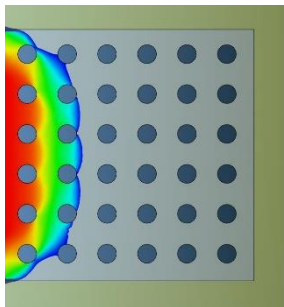
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
25%	1000	8*8	0.6	單點
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	8 秒	充填時間	5 秒	

表 8 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(50%)


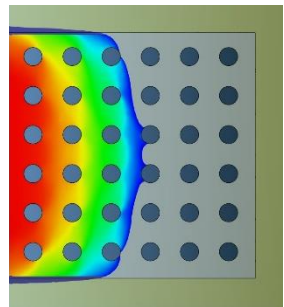
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
50%	1000	8*8	0.6	單點
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	21 秒	充填時間	17 秒	

表 9 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(75%)


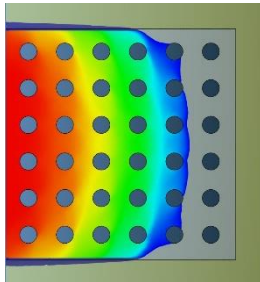
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
75%	1000	8*8	0.6	單點
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	36 秒	充填時間	36 秒	

表 10 項次 1 實驗結果與模擬分析對比(100%)


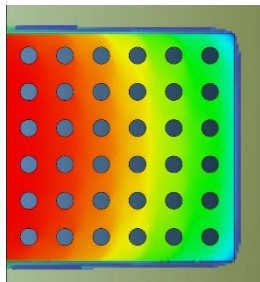
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
100%	1000	8*8	0.6	單點
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	75 秒	充填時間	80 秒	

表 11 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(25%)

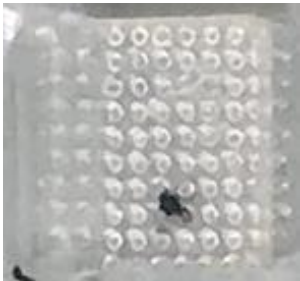
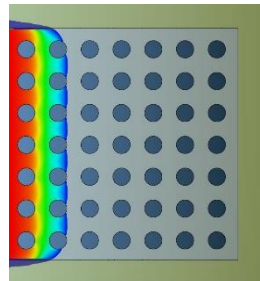
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
25%	1000	9	0.7	單邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	8 秒	充填時間	5 秒	

表 12 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(50%)

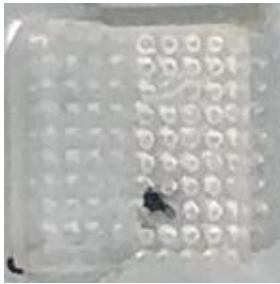
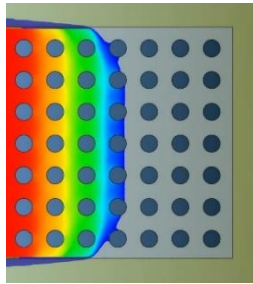
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
50%	1000	9	0.7	單邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	20 秒	充填時間	19 秒	

表 13 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(75%)

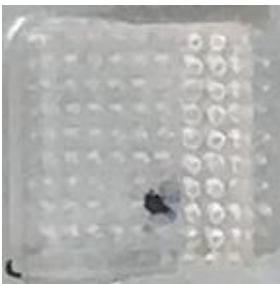
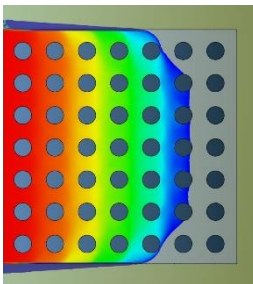
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
75%	1000	9	0.7	單邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	45 秒	充填時間	42 秒	

表 14 項次 2 實驗結果與模擬分析對比(100%)

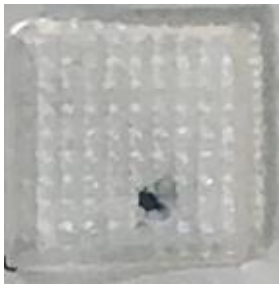
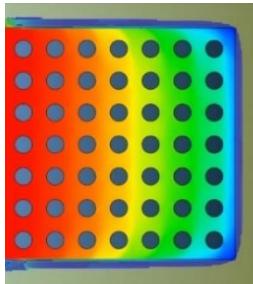
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
100%	1000	9	0.7	單邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	87 秒	充填時間	90 秒	

表 15 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(25%)

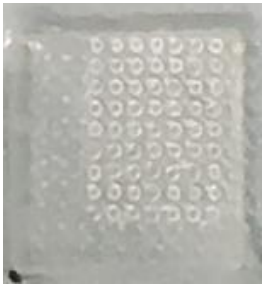
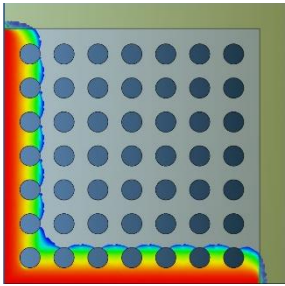
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
25%	1000	10*10	0.8	雙邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	6 秒	充填時間	3 秒	

表 16 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(50%)


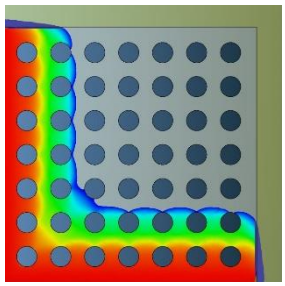
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
50%	1000	10*10	0.8	雙邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	13 秒	充填時間	8 秒	

表 17 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(75%)


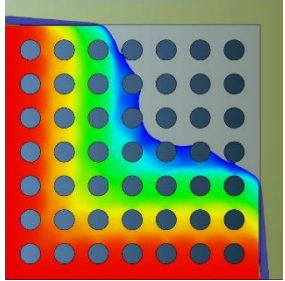

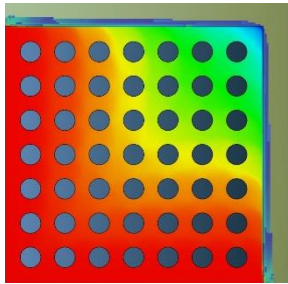
充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
75%	1000	10*10	0.8	雙邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	25 秒	充填時間	20 秒	

表 18 項次 3 實驗結果與模擬分析對比(100%)

充填比例	材料黏度	晶片大小	凸塊直徑	點膠路徑
100%	1000	10*10	0.8	雙邊
實驗照片		模擬分析		
				
充填時間	70 秒	充填時間	74 秒	

3.4 結論

本次研究主要觀察毛細底部點膠實驗的充填時間以及是否產生空洞。從實驗結果來看，並未發生逆向流動波前，因此不易形成空洞缺陷。在填充時間方面，我們通過品質特性因子反應表得出：低黏度、小尺寸晶片、雙邊點膠路徑的結果最佳，而凸塊直徑的影響較不顯著。從這個因子分析中，我們可以得出以下結論：材料黏度是影響結果的最重要因子，黏度越高晶片填充的時間越長。晶片尺寸和點膠方式也有顯著影響，可以進行進一步的優化研究。凸塊直徑的影響相對較小，可以在其他因子優化後再考慮優化這個因子。這些結論可以幫助我們在實驗設計和工藝優化中更有效地分配資源和努力，優化最重要的因子以達到最佳結果。我們同時建立了一個包含凸塊的三維模流分析模型，並與實驗結果進行比較。根據結果對比表顯示當黏度為#1000 時，模流分析結果與點膠實驗結果在各充填比例的波前流動方向和填充時間方面大致相同。

4 團隊合作及貢獻

我們在分工上採取了功能型組織。如表 19 所示，分成最主要的兩項:實驗和軟體分析，以及其他細項，如:採購、繪圖、文書等。其最大的好處是大家可以專注於熟悉的事務與工作流程，不需頻繁的切換工作內容，效率可以達到最高。我們每周也都有固定開會的時間，透過開會彼此學習，協調工作量以及檢討研究進度。

表 19 工作分配表

姓名	負責項目	貢獻百分比
鄭硯心	實驗、軟體分析、文書處理	30%
王俊喆	實驗、軟體分析、文書處理	30%
陳妙宜	實驗、繪圖建模、軟體分析	17.5%
宋柏慶	採購、實驗、拍照記錄	17.5%
陳庚甲	採購、實驗	5%

5 經費規劃及成本分析

5.1 設備之成本

設備上因為需要使用軟體進行模流分析，所以需購置較高階電腦進行分析，電腦設備的好壞也會影響到專案的模擬時長。

5.2 時間之成本

實驗中需要用到點膠設備、材料固化設備，以及材料上的耗材成本。

表 20 花費成本：

成本項目	單價	數量	總價	備註
Moldex3D 模擬軟體	90,000/年	1	90,000	年租金
模擬電腦	50,000/台	0.2	10,000	分 5 年攤提
點膠機	210,000/台	1	42,000	分 5 年攤提
球閘陣列替代材料	300/100g	1	300	
壓克力板	100/片	10	100	
UV 固化燈	260/台	1	260	
植球鋼網	300/組	1	300	
總計			142,960	

6 成果應用

6.1 教學、實習的助益

本系上有半導體封裝課程、電腦輔助設計課程，以上課程跟此研究都有關係，此研究成果可當考核實施案例提供參考，也可在課程中當作教材。

6.2 產業界的應用價值

空洞為底部充填封裝製程常出現的缺陷，在新產品導入的過程中，若有缺陷產生，通常需要下實驗批次進行驗證以改善問題，也因此增加了產品的導入時程及成本。現今商用之模流分析軟體已能正確的模擬封膠製程的流動行為，因此在半導體封裝業藉由模流分析可以提前預測製程缺陷並進行設計改善進而避免缺陷的發生。為了降低開發成本並縮短實驗流程，我們利用 AB 膠替代錫球，且採用 CAE 模擬分析並對照可視化點膠實驗結果找到最佳符合需求的設計控制。本研究可以當作整合數值模擬與可視化點膠實驗於產業界智慧製造的良好範例。

6.3 對參與學生能力的培養

我們可以透過的這項研究去了解到 IC 封裝的相關知識，學會電腦輔助工程分析軟體的使用，學會點膠機的使用方法，以及如何將可視化實驗去對照模流分析結果。並對我們如何善用系上基礎課程所學於工程專案上之能力培養起到很大的作用。

7 參考文獻

- [1] Hui Wang, Huamin Zhou, Yun Zhang, Dequn Li and Kai Xu, “Three-dimensional simulation of underfill process in flip-chip encapsulation,” *Computers & Fluids*, 44 (2011) 187–201
- [2] Sung-Won Moon, Zhihua Li, Shripad Gokhale, and Jinlin Wang, “3-D Numerical Simulation and Validation of Underfill Flow of Flip-Chips,” *IEEE Transactions on Components*, (2011)
- [3] Zhuqing Zhang and C. P. Wong, “Recent advances in flip-chip underfill: materials, process, and reliability,” in *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, vol. 27, no. 3, pp. 515-524, Aug. 2004, doi: 10.1109/TADVP.2004.831870.
- [4] O. Suzuki, “Recent Advances in Underfill for New Package Architectures,” *2020 Pan Pacific Microelectronics Symposium (Pan Pacific)*, HI, USA, 2020, pp. 1-7, doi: 10.23919/PanPacific48324.2020.9059466.
- [5] F. C. Ng, M. A. Abas, (2022 Mar.), “Underfill Flow in Flip-Chip Encapsulation Process: A Review,” *Journal of Electronic Packaging*, 144(1): 010803.
- [6] Y.D. Kweon, J. Ha, K.C. Kim, M.S. Jang, J.C. Doh, C.B. Lee and D. Yoo, (2011 Dec.), “MUF Technology Development for SiP Module,” *ECS Transactions*, 34(1), 865-871, doi: 10.1149/1.3567684
- [7] K. Chai, E. Wu and J. Y. Tong, (2002), "Challenge of vacuum molded flip chip packaging technology," *2nd International IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics. POLYTRONIC 2002. Conference Proceedings (Cat. No.02EX599)*, pp. 221-224, doi: 10.1109/POLYTR.2002.1020218.
- [8] F. C. Ng, A. Abas, M.Z. Abdullah, “Effect of solder bump shapes on underfill flow in flip-chip encapsulation using analytical, numerical and PIV experimental approaches,” *Microelectronics Reliability*, vol. 81, 2018, pp. 41-63,

doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.025.

- [9] Y. B. Kim, and J. Sung, 2012, “Capillary-Driven Micro Flows for the Underfill Process in Microelectronics Packaging,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(12), pp. 3751–3759.
- [10] A. Abas, M. S. Haslinda, M. H. H. Ishak, A. S. Nurfatin, M. Z. Abdullah, and F. Che Ani, 2016, “Effect of ILU Dispensing Types for Different Solder Bump Arrangements on CUF Encapsulation Process,” *Microelectron. Eng.*, 163, pp. 83–97.
- [11] J. Wang, 2007, “The Effects of Rheological and Wetting Properties on Underfill Filler Settling and Flow Voids in Flip Chip Packages,” *Microelectron. Reliab.*, 47(12), pp. 1958–1966
- [12] A. Abas, Z. L. Gan, M. H. H. Ishak, M. Z. Abdullah, and S. F. Khor, 2016, “Lattice Boltzmann Method of Different BGA Orientations on I-Type Dispensing Method,” *PLoS One*, 11(7), p. e0159357.
- [13] A. Abas, M. H. H. Ishak, M. Z. Abdullah, F. C. Ani, and S. F. Khor, 2016, “Lattice Boltzmann Method Study of BGA Bump Arrangements on Void Formation,” *Microelectron. Reliab.*, 56, pp. 170–181.
- [14] F. C. Ng, M. A. Abas, M. Z. Abdullah, M. H. H. Ishak, and G. Y. Chong, 2017, “CUF Scaling Effect on Contact Angle and Threshold Pressure,” *Soldering Surf. Mount Technol.*, 29(4), pp. 173–190.
- [15] A. Abas, F. C. Ng, Z. L. Gan, M. H. H. Ishak, M. Z. Abdullah, and G. Y. Chong, 2018, “Effect of Scale Size, Orientation Type and Dispensing Method on Void Formation in the CUF Encapsulation of BGA,” *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.*, 43(4), p. 0059.
- [16] C. Y. Khor, Z. M. Ariff, F. C. Ani, M. A. Mujeebu, M. K. Abdullah, M. Z. Abdullah, and M. A. Joseph, 2010, “Three-Dimensional Numerical and Experimental Investigations on Polymer Rheology in Meso-Scale Injection Molding,” *Int.*

Commun. Heat Mass Transfer, 37(2), pp. 131–139.

- [17]H. Wang, H. Zhou, Y. Zhang, D., Li, and K. Xu, 2011, “Three-Dimensional Simulation of Underfill Process in Flip-Chip Encapsulation,” *Comput. Fluids*, 44(1), pp. 187–201.
- [18]Zhuqing Zhang and C. P. Wong, “Recent Advances in Flip-Chip Underfill: Materials, Process, and Reliability” *IEEE Trans Advanced packaging*, Vol. 27, pp. 515-524 , 2004
- [19]Young Bae Kim and Jaeyong Sung, “Capillary-driven micro flows for the underfill process”, *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (12) (2012) 3751~3759
- [20]E. W. Washburn, The dynamics of capillary flow, *Phys. Rev.*, 17 (1921) 273-283.
- [21]V. S. Arpaci, *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wesley Publishing Company, New York, USA (1966).
- [22]L. Nguyen, C. Quentin, P. Fine, B. Cobb, S. Bayyuk, H. Yang and S. A. Bidstrup-Allen, Underfill of flip chip on laminates: simulation and validation, *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*, 22 (2) (1999) 168-176.
- [23]G. Lehmann, A. Maria, P. -C. Lee and E. J. Cotts, Modeling the underfill flow process, *Proc. Technical Program, Conference on Surface Mount Technology*, San Jose, CA, USA (1997) 340-350.
- [24]J. W. Wan, W. J. Zhang and D. J. Bergstrom, An analytical model for predicting the underfill flow characteristics in flipchip encapsulation, *IEEE Trans. Advanced Packaging*, 28 (3) (2005) 481-487.
- [25]K. Hosokawa, T. Fujii and I. Endo, Droplet-based nano/ picoliter mixer using hydrophobic microcapillary vent, *Proc. IEEE MEMS*, Orlando, FL, USA (1999) 388-393.
- [26]Gerlach, H. Lambach and D. Seidel, Propagation of adhesives in joints during capillary adhesive bonding of microcomponents, *Microsystems Technologies*, 6

(1999) 19-22.

- [27]H. Schonhorn, H. L. Frisch and T. K. Kwei, Kinetics of wetting of surfaces by polymer melts, *J. Applied Phys.*, 37 (13) (1966) 4967-4973.
- [28]S. Newman, Kinetics of wetting of surfaces by polymers; capillary flow, *J. Colloid and Interface Sci.*, 26 (1968) 209-213.
- [29]C. W. Macosko, *Rheology: Principles, Measurements, and Applications*, VCH Publishers, Inc., New York, USA (1994).
- [30]R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, New York, USA (1960).
- [31]J. W. Wan, Analysis and modeling of underfill flow driven by capillary action in flip-chip packaging, Ph.D Thesis at University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada (2005).
- [32]J. Wang, Underfill of flip chip on organic substrate: viscosity, surface tension, and contact angle, *Microelectronics Reliability*, 42 (2002) 293-299.
- [33]W. B. Young and W. L. Yang, The effect of solder bump pitch on the underfill flow, *IEEE Trans. Advanced Packaging*, 25 (4) (2002) 537-542.
- [34]W. B. Young, Capillary impregnation into cylinder banks, *J. Colloid and Interface Sci.*, 273 (2004) 576-580.
- [35]B. R. Gebart, Permeability of unidirectional reinforcements for RTM, *J. Composite Mater.*, 26 (8) (1992) 1100-1133.