

北商學報 第 41 期

民國 112 年 1 月 第 1-27 頁

應用六標準差於微機電系統三軸加速器封裝良率改善之研究

阮業春* 蔡文彬**

摘 要

臺灣積體電路 (integrated circuit, IC) 設計產業正處蓬勃發展之際，下游 IC 封裝廠扮演著關鍵角色。在競爭激烈的環境中，IC 封裝廠積極對 IC 封裝製程的良率進行改善，以期提升客戶滿意度及競爭力。在微機電系統 (micro electro-mechanical system, MEMS) 三軸加速器 (triaxial accelerometer) 的 IC 封裝製程中，黏晶 (die bond) 站所產生的應力會造成晶片變形，進而導致 MEMS 三軸加速器的靈敏度與偏差運算產生錯誤。本研究應用了六標準差 (Six-Sigma, 6σ) 的 DMAIC 手法一界定 (Define)、量化 (Measure)、分析 (Analysis)、改善 (Improve)、控制 (Control)，針對 MEMS 三軸加速器黏晶製程進行應力分析。定義 (D) 階段先瞭解終端客戶的聲音，並對退貨品問題進行探討；衡量 (M) 階段先進行量測設備的重複性和再現性分析，再衡量製程能力以做為改善的基礎；分析 (A) 階段則使用原因與效果矩陣 (cause & effect matrix) 來找出造成應力之可能影響因子；改善 (I) 階段則利用實驗設計 (design of experiment, DOE) 方法找出影響因子的最佳設計及確認改善效益；最後，控制 (C) 階段運用管制圖監控後續的製造良率。研究結果顯示，透過六標準差方法可將 MEMS 三軸加速器的黏晶製程不良率由 3.22% 降低至 2.07%。

關鍵詞：六標準差、製程改善、IC 封裝、黏晶、三軸加速器、微機電系統

*阮業春，明志科技大學工業工程與管理系專任教授，通訊作者(E-mail:ycjuan@mail.mcut.edu.tw)

**蔡文彬，明志科技大學工業工程與管理系碩士

收稿日期：110年11月15日；接受刊登日期：110年12月13日

Applying Six-Sigma to Yield Rate Improvement of Die Bond Process for Piezoresistive Triaxial Accelerometers

Yeh-Chun Juan* Wen-Pin Tsai**

Abstract

Taiwan's integrated circuit (IC) design industry is booming, and downstream IC packaging companies are playing a key role. In the competitive environment, IC packaging companies are actively improving the yield rate of IC packaging process to enhance customer satisfaction and competitiveness. In the IC packaging process of micro electro-mechanical system (MEMS) triaxial accelerometer, the stress generated by the die bond station will cause wafer deformation, which will lead to errors in the sensitivity and deviation calculation of the MEMS triaxial accelerometer. In this research, the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, and Control) approach of Six-Sigma (6σ) is applied to analyze the stress generated at die bond process for MEMS triaxial accelerometer. The Define (D) stage starts with understanding the voice of the end customer and exploring the problem of returned goods. The Measure (M) stage conducts a repeatability and reproducibility analysis for the measurement equipment and then measures the process capability as a basis for improvement. The Analyze (A) stage uses the cause & effect matrix to identify the possible influence factors for stress generation. The Improve (I) stage applies the design of experiment (DOE) method to find the optimal design of influence factors and ensure the improvement effect. Finally, the Control (C) stage uses the control chart to monitor the subsequent manufacturing yields. The research result shows that the defect rate of the die bond process for MEMS triaxial accelerometer could be reduced from 3.22% to 2.07% by using Six-Sigma method.

Key words: six sigma, process improvement, IC packaging, die bond, triaxial accelerometer, micro electro-mechanical system

* Yeh-Chun Juan, Professor, Department of Industrial Engineering and Management, Ming Chi University of Technology, Corresponding Author (E-mail:ycjuan@mail.mcut.edu.tw)

** Wen-Pin Tsai, Master, Department of Industrial Engineering and Management, Ming Chi University of Technology

Manuscript received: November 15, 2021; Accepted: December 13, 2021

壹、緒論

值此積體電路（integrated circuit, IC）設計產業蓬勃發展之際，微機電系統（micro electro-mechanical system, MEMS）利用微機電加工與半導體製程的批量生產方式，將元件微小化，使產品擁有低成本、高效率、低耗電量與高準確度等生產優勢。隨著MEMS技術的不斷發展，國內外大廠紛紛將MEMS技術整合至各式各樣的感測模組中，如相機、手機、行車紀錄器、遊戲手柄及其他3C產品感測應用等，未來模組應用層面會越來越廣泛。

MEMS三軸加速器（triaxial accelerometer）是一種採用MEMS技術所製造的慣性傳感器元件，其採用壓阻式MEMS結構晶片，壓阻式MEMS結構須增加體蝕刻製程（bulk micromachining）與深蝕刻製程（deep reactive ion etching, DRIE），以製造出類似3D結構的晶圓。MEMS加速器主要應用在振動檢測、姿態控制、安防報警、消費應用、動作識別、狀態記錄等；其中，振動檢測的應用，是用手提電腦之中的「硬碟保護」，或是光學防手震裝置（數位相機、攝影機）；另外，還有動作感知功能，得以透過手勢識別介面控制行動裝置，如遊戲控制器、智慧遙控器、3D滑鼠等（Mougenot et al., 2011）。

壓阻式MEMS係運用壓電效應，內部有一個鋼體支撐的質量塊，在運動狀況下，質量塊會產生壓力，鋼體產生變化，將加速度轉變成電壓信號輸出。由於MEMS晶圓結構與一般IC結構差異極大，不但影響IC封裝的難易程度，也成為MEMS三軸加速器良率偏低的主要因素。如圖1所示，IC封裝中黏晶（die bond）製程所產生的應力殘留問題，除會造成MEMS三軸加速器平面及翹曲形變外，也是MEMS三軸加速器產生錯誤之靈敏度值與運算偏差值的主要形成因素。

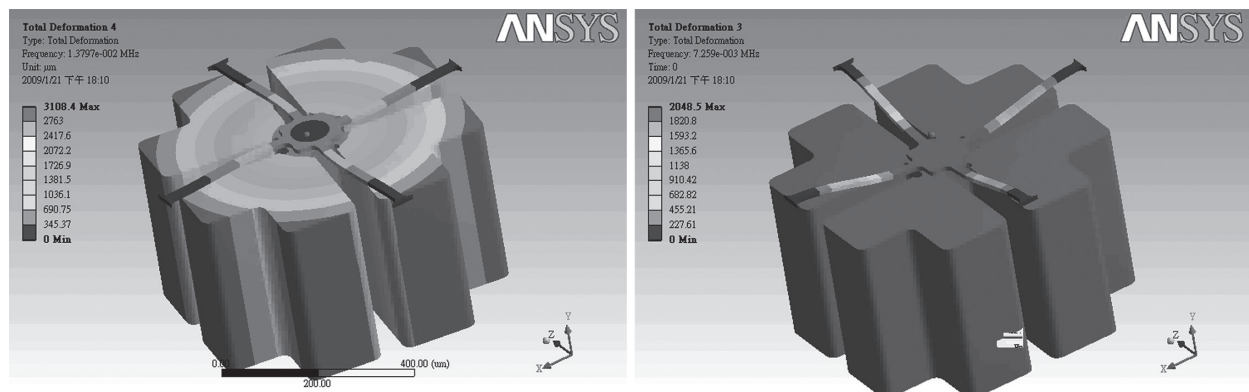


圖1 MEMS三軸加速器結構之平面形變與翹曲形變

本研究將運用六標準差（Six-Sigma, 6σ ）的DMAIC手法—界定（Define）、量化（Measure）、分析（Analysis）、改善（Improve）、控制（Control），針對MEMS三軸加速器黏晶製程進行應力分析，找出影響因子並予以量化，以排除關鍵

因素不穩定性，再利用最佳化參數設計之改善，來提升MEMS三軸加速器IC封裝製程良率及客戶滿意度。

貳、文獻探討

本節將對IC封裝與應力產生、六標準差方法論及六標準差應用於IC封裝製程改善等文獻，做一回顧及評述。

一、IC封裝與應力產生

受到市場對電子產品「輕、薄、短、小、高功能」等要求的推動，電子封裝（electronic packaging）技術的發展與IC技術的發展息息相關。電子封裝是指電子產品的生產過程中，將各種電子元件依需要組裝接連的所有製程（謝宗雍，1997）。電子封裝依組合晶片數目可區分為單晶片構裝與多晶片模組構裝（田民波，2008）。從IC封裝製程中晶圓切割、封膠、聯線技術，主要是固定接著技術，將IC晶片固定在承載襯墊（die pad）上，並利用細微連接技術，引出電力訊號，並以絕緣材料予以密封，建構成立體結構（鐘文仁和陳佑任，2010）。

伴隨著電路密度急劇加大，產生了電路間彼此干擾的問題。當電子產品中有高數目的基本元件與輸出輸入（I/O）接點時，電路訊號傳輸的速度就成了決定產品功能運作快慢的重要考量。在高密度的元件中，熱的產生量也將勝於從前的產品。為了解決這些問題。電子封裝技術成為熱門探討的題目，各種不同封裝型式及封裝材料，也因而推成出新，不斷地增加（呂宗興，1996）。

陳建羽（2006）提及在IC封裝製程當中，翹曲與殘留應力（Residual stress）一直是相當重要的問題之一。在成型過程中，難以避免翹曲與殘留應力現象的產生，當產品有了翹曲或殘留應力，容易引起接腳偏差、斷裂與信號不良等問題。殘留應力係指材料經過加工後，在無外加壓力作用下，依然殘留於材料內部機械性應力。殘留應力依觀測基準不同可區分為微觀（micro）與巨觀（macro）兩種（So and Broutman, 1976）。材料在加工過程中通常會產生巨觀的殘留應力，就IC封裝製程而言，造成殘留應力區分為三類（Isayev, 1987）：

- （一）膠材流動時所產生的殘留應力。
- （二）膠材固化反應後體積收縮所產生的殘留應力。
- （三）各材料的熱膨脹係數（coefficient of thermal expansion, CTE）不同，材料冷卻速率差異所造成的熱殘留應力。

由於IC封裝製程攸關電子產品最終品質的良窳，故近來已有許多研究投注在IC封裝製程相關的良率及改善。Yung（2018）針對IC封裝電子元件連接問題，引進三

維電腦斷層掃描檢查方法，透過焊料空隙體積和空隙傳播方向計算，以精確地檢測及改善焊料缺陷。Fu et al. (2018) 指出，由於IC封裝黏晶製程中的膠材對熱阻及殘留應力扮演著關鍵角色，進而影響高功率LED的可靠性。因此，為了提高大功率LED可靠性，對剪切應力、熱耗散與電氣和光學性能進行研究。結果顯示，將側膠高度從芯片高度的10%變為100%，可增加剪應力 1693g/mm^2 、降低 1°C/W 熱阻及減少0.4 lm的光通量，進而優化LED的可靠度。Rodriguez and Gomez (2020) 透過橡膠頭改善，以縮小空隙並改善黏晶製程中晶片破裂的問題。此外，由於IC封裝互連結構非常複雜，高頻寄生影響嚴重，設計變量及水準數大增，導致IC封裝互連設計不易。Graycochea Jr. et al. (2020) 藉由四方平面無引腳封裝 (quad flat no-leads, QFN) 導線材料設計進行黏晶製程改善，以整合不同材料CTE不匹配以導線架翹曲問題。此外，Kim and Kong (2020) 提出一種包含實驗設計、領域分解及有線元素分析的混合方法，以解決IC封裝中高速互連電器特性的設計和分析問題。首先透過IC封裝互連關鍵設計變量的辨識，再推導出重新組合分段式互連的阻抗參數方法。結果大量減少IC封裝互連的設計空間並快速獲得優化的解決方案，進而提高系統的性能。

二、六標準差方法論

1987年Motorola的通訊部門在喬治·費雪 (George Fisher) 主導下，提出六標準差 (Six-Sigma, 6σ) 的嶄新品質改善政策 (George, 2002)。六標準差的流程改善方法通常分解為五個步驟，包括界定 (Define)、量化 (Measure)、分析 (Analysis)、改善 (Improve)、控制 (Control) —亦即DMAIC。六標準差幾乎可以應用在任何領域，包括製程、業務執行、以及達成六標準差品質的產品和流程設計。

六標準差的五個流程改善步驟包括 (Michael, 2002)：

- (一) 界定：具體描述現況問題，確認關鍵影響，設定目標範圍及界定顧客要求，制訂核心策略流程圖。
- (二) 衡量：運用管理及統計工具驗證問題、衡量缺點、流程作業狀況以及收集資料。
- (三) 分析：藉由圖形分析與假設測驗來評估與降低變異，並點出流程改善的關鍵少數因子。
- (四) 改善：對關鍵變數問題，訂定改善方案，設計新流程與測試追蹤改善後的關鍵變數是否有降低至最小。
- (五) 控制：確保所做的改善能夠持續下去。衡量不能中斷，才能避免錯誤再度發生。在過去許多流程改善方案裡，往往忽略了控制的觀念；而在六個標準差中，控制是它能長期改善品質與成本的關鍵。

三、六標準差應用於IC封裝製程改善

六標準差已經成功應用於各行各業，無論在電子業、工業、醫學、教育、半導體產業、金融業、金屬業及交通運輸，各方面績效都有明顯提升，也使組織財務績效有良好表現（Su and Chou, 2008; Kwak and Anbari, 2006）。

近來，六標準差也被應用於IC封裝製程的改善。陳信憲（2001）結合六標準差手法與田口實驗設計對改善製程能力之研究，以六標準差品質系統之手法為分析架構，結合實驗設計，導入製程能力分析（Cpk）的過程，藉著變異數分析為方法，找出影響製程能力的重要因素及最適水準；最後藉由一量測系統做為實例，結果發現經其研究模式所得最佳水準之Cpk值大於原有製程水準之Cpk值，由Cpk的提高可以用來驗證IC封裝製程能力的改善。喬廣文（2003）以六標準差方法提升半導體封裝製程品質，並建立品質領先指標，面對製程本身存在的變異，想辦法去控制合理變異和偵測異常變異，降低重工成本和客戶退貨處理成本，以維持企業高品質的形象。該研究主要重心為有效的偵測與客戶應用相關的關鍵製程異常，在其尚未對產品出貨品質造成危害前加以控制與改善。

Chang and Chen（2019）分析IC打線封裝製程績效的一致性，並用六標準差品質指標評估打線封裝製程績效與製程良率間的關係。此外，透過統計推論得到 Q_{PLI} 的管制上界線，並利用其建立測試模型應用於一家IC封裝廠，實驗結果證明確實可有效確保嚴格的品質評估。Rashid（2019）利用六標準差工具確定整流器封裝製程中晶片破裂的根本原因為黏晶參數未得到優化。再利用實驗設計對五個黏晶參數進行分析，以得到優化後的黏晶參數。結果顯示橡膠類型夾頭及較低的晶片拔取力量、錫黏壓力及頂針，可得到最少的晶片破裂。Yang et al.（2019）從綠色經濟角度出發，根據六標準差品質指標發展一個IC封裝封膠製程的完整品質評估模型。由於評估指標包含未知參數，故提出一個基於信賴區間的模糊評估模型，以提高評估準確性，並以實例驗證此方法的實用性與有效性。

實施六標準差於IC封裝製程中，除可提高生產率、客戶滿意度、降低產品不良、減少運作循環時間外，亦可產生組織文化的改變（蘇朝墩，2009；蘇朝墩，2008；Sahoo, Tiwari, and Mileham, 2008; Antony, Kumar, and Tiwari, 2005）。

參、運用六標準差改善MEMS三軸加速器IC封裝良率

本研究以某公司個案為例，採用圖2所示之六標準差的DMAIC改善步驟，進行IC封裝黏晶製程之應力問題改善，以分析流程架構與六標準差的觀念結合，比較改善前後的差異，來確定關鍵製程與關鍵參數，評估出可以用來驗證製程能力與改善最

佳配置方法，建立穩定且一致性的品質，最後，藉由最末製程站之良率提昇以驗證本研究成果。

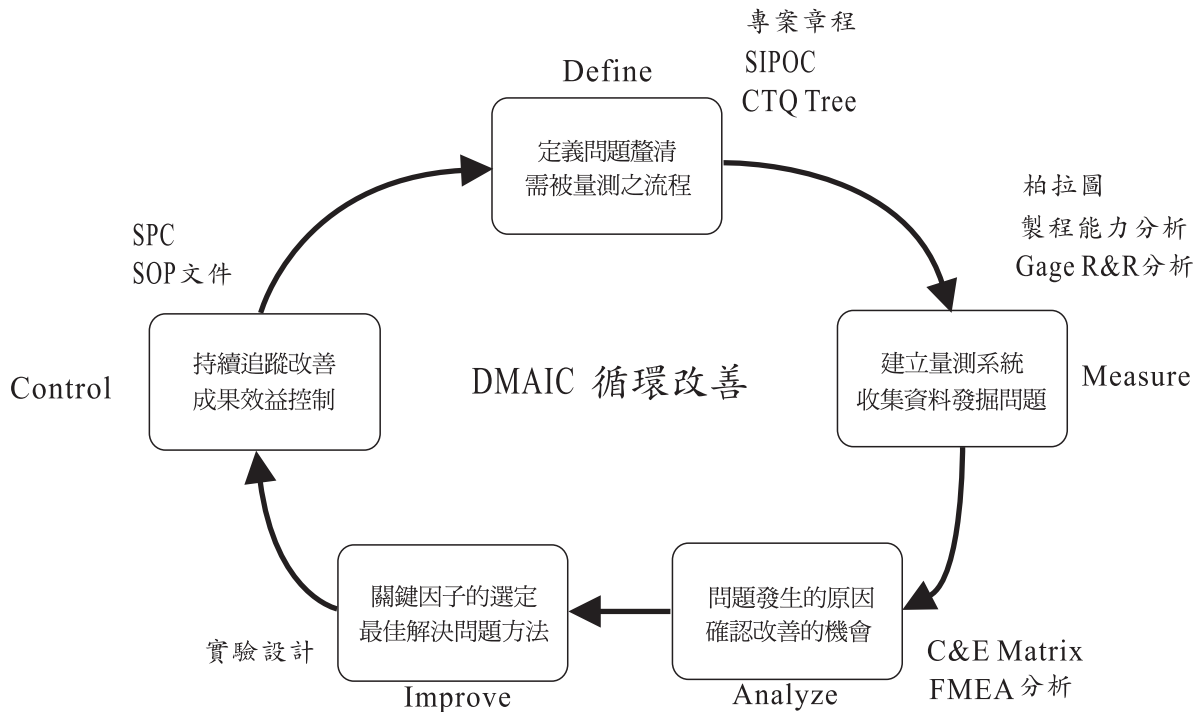


圖2 DMAIC循環改善架構及步驟

一、界定階段

本階段主要是明確界定IC封裝中黏晶站專案範圍及效益改善的目標，以清楚了解且釐清客戶所需的範疇。本階段使用到的方法包括專案章程、SIPOC流程圖、及關鍵品質樹，依序說明如下：

(一) 專案章程

首先，成立專案將具體的專案計畫寫成文件，內容如表1所述，有具體的專案的名稱、目的及達成所需要的資源，且必須經過組織最高管理者的授權及同意；專案團隊與組織之間的契約書，釐清彼此的責任與義務。

表 1 專案章程的內容 (Pande et al., 2000)

項目	內容
問題聲明	對流程所面臨的問題做出明確的解說。如問題的內容為何？何處/何時發生？嚴重性如何？影響層面多廣？
目標聲明	陳述欲完成的事項，並以量化的目標表示，同時應具名專案的最後期限和見到成果的時間範圍。
限制和假設	記載各種限制、其他可能影響改善小組的因素、組織對改善活動所能提供的資源。
組員和職責	確認改善小組組員及其負責的範圍。
初期的專案計劃	對階段性任務加以確認並設定日期。

(二) SIPOC 流程圖

接著，根據戴明博士提出的SIPOC組織系統模型之改善品質模式，如圖3所示，由供應商 (Suppliers)、輸入 (Input)、流程 (Process)、產出 (Output)、和客戶端 (Customers) 此五部份所構成的關聯、互動的組織系統，確認每個工作過程中與流程中的問題，改善工作流程及縮短時間，提升製造效率與競爭力。

1. 供應商 (S)：提供關鍵原料、關鍵資訊或其它關鍵資源的組織。
2. 輸入 (I)：供應商所提供的資源 (物料或資訊)。
3. 流程 (P)：內部流程步驟，將輸入轉化成輸出的一系列增加價值活動。
4. 產出 (O)：交給顧客的流程產出物，必須能為顧客創造價值。
5. 客戶 (C)：接受產出的人、組織或流程。



圖3 SIPOC組織系統模型 (Siddh et al., 2013)

(三) 關鍵品質樹

本階段最後要建立關鍵品質樹，定義品質的重要關鍵條件，亦即產品在市場上的優勢，依全面品質的觀念，找出顧客的需求，並將重點放在「關鍵品質」上。如圖4所示，關鍵品質樹像是樹狀圖，從左邊的空格開始確認該項產出的某特性是屬於關鍵品質，然後專案成員合力想出與關鍵品質有關的特定資料類型，並按照邏輯順序將它們列入圖的分支中。

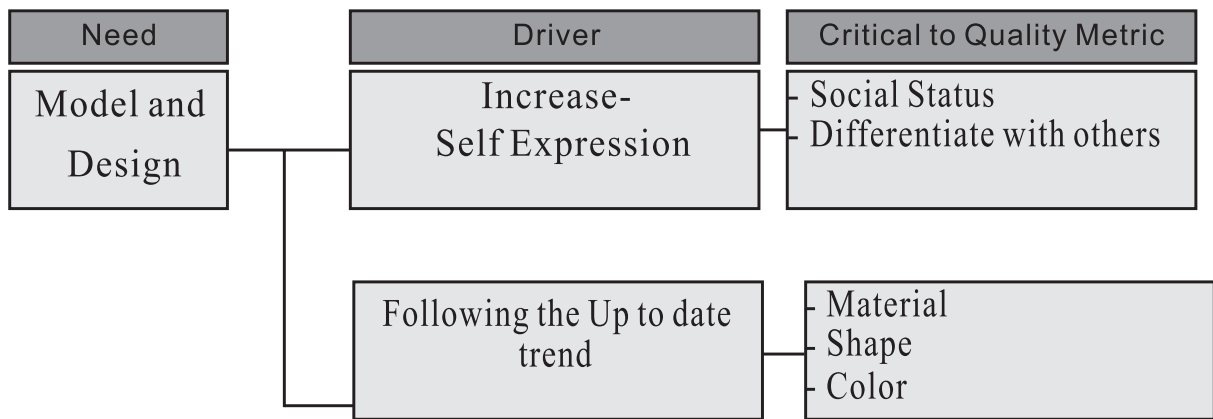


圖4 關鍵品質樹 (Kodrat and Melinda, 2021)

二、衡量階段

衡量階段是檢視內部流程的問題及驗證量測系統的再現性與重複性，找出黏晶站中的影響因子與確認變異來源，然而進行黏晶站之設備製程能力分析與測量系統的分析，其目的在於確認收集的數據資料與所量測的數據結果之正確性。本階段使用到的方法包括柏拉圖 (Pareto Diagrams)、製程能力分析、及量測系統分析 (Measurement System Analysis, MSA)，依序說明如下：

(一) 柏拉圖

柏拉圖是用來區分造成品質問題之重要少數原因，及不重要多數之原因，將品質改善著重於問題之主要原因上，短期內可得較顯著之改進。如圖5所示，依照各類缺點或不良項目的多寡從多到少依次排列的柱形圖，以協助成員確認最常發生問題的項目以優先改善。

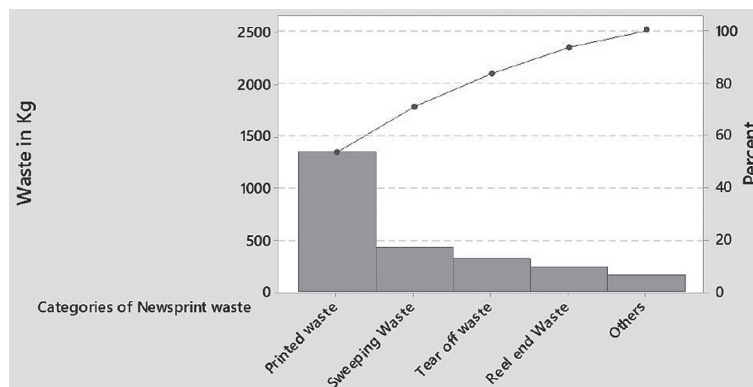


圖5 柏拉圖 (Varma and Lal, 2020)

(二) 製程能力分析

製程能力指標是製程能力分析最常使用的工具，其能廣泛運用於工業界的原因為製程能力指標為無單位的指標，能簡易的衡量製程能力，亦可同時監控許多不同製

程的製程能力 (Wright, 1995)。本步驟將使用製程能力綜合指標Cpk來代表關鍵品質特性的製程水準，並依表2所示，進行改善前後的比較，確認製程水準的改變及改進措施的擬定。

表2 製程能力綜合指標Cpk的等級與改進措施 (傅和彥和黃士滔, 2004)

等級	C _{pk} 值	改進措施
A	$1.67 \leq C_{pk} $	製程能力極優，繼續保持
B	$1.33 \leq C_{pk} \leq 1.67$	製程能力優良，可稍加改進，提升A的等級
C	$1.00 \leq C_{pk} \leq 1.33$	製程能力平平，進行製程改善，提高製程品質
D	$0.67 \leq C_{pk} \leq 1.00$	製程能力不佳，須全面檢討，並考慮停止生產
E	$0 \leq C_{pk} \leq 0.67$	製程能力拙劣，立即停止生產，進行全面改善

(三) 量測系統分析

在評估製程能力前，必須先對量測系統加以分析，並改善其變異使變異減至最小，以確保能更精確的評估出真正的製程能力，因此，量測系統分析是一個重要的步驟。隨機選取要量測的物件及量測人員，由量測人員分別對所選取的物件做數次的量測，量測的順序是隨機的。Gage R&R使用%StudyVar來比較量測系統的重複性及再現性變異和總變異分析，包括數據的分析以及圖形的分析。在Gage R&R分析中，如果%StudyVar的值小於10%則為可靠的量測系統；若介於10%至30%間且區別分類數 (Number of Distinct Data Categories, NDC) 值大於4，為可接受的量測系統；若大於30%則為不可靠的量測系統。

三、分析階段

分析階段針對衡量階段所定義的影響因子進行資料與流程分析，再彙整出黏晶製程所造成應力殘留的要因，來找出流程活動的根本原因並辨認出重要的根本發生來源。本階段主要運用的分析方法，包括因果矩陣 (C&E Matrix) 分析、失效模組與效應分析，依序說明如下：

(一) 因果矩陣分析

如表3所示，因果矩陣圖是尋找問題的方法，利用矩陣圖中製程與潛在原因相互對應及關聯性來確認問題的影響因子，再依輕、重影響程度的權重填入目標值，依加總後的總分排序來判斷影響因子嚴重度。

表 3 因果矩陣分析 (Varma and Lal, 2020)

Sr. No	Potential causes	Cost-saving possibility	Frequency of incidence	Effect on waste	Achievability of solution	Total
1	Web breaks between operation	6	8	9	6	7.25
2	Auto pasting of copies	7	9	4	4	6
3	Incorrect presetting	5	7	6	3	5.25
4	Inappropriate machine setting	4	5	4	7	5
5	Unbalance ink-water combination	6	5	4	7	5.5
6	Unsuitable dosing of fountain	7	7	5	4	5.75
7	Wrong roller setting	7	5	7	8	6.75
8	Variation in cut off	5	5	5	9	6
9	Irregular inking	7	6	6	4	5.75

(二) 失效模組與效應分析

如表4所示，失效模組與效應分析在做風險分析的評比，對於製程中潛在性的風險做分析，針對製程中的問題點分別將嚴重度 (Severity)、發生率 (Occurrence)、檢出率 (Detection) 做評分，並將三者相乘的乘績，得到風險優先數值 (Risk Priority Number, RPN)，由數值越大優先解決。此法可應用於設計失效模組分析或製程失效模組分析，有助於確定專案改善及制定改善目標。

表 4 失效模組與效應分析 (Park, 2003)

FMEA type (design or process):			Project name/description:							Date (Orig.):						
Responsibility:			Prepared by:							Date (Rev.):						
Core team:										Date (Key):						
Design FMEA (Item/Function)	Potential Failure Mode	Potential Effect (s) of Failure	Severity	Class	Potential Cause(s)/ Mechanism (s) of Failure	Occurrence	Current Controls	Detection	RPN	Recommended Actions	Responsibility and Target Completion Date	Actions Taken	Severity	Occurrence	Detection	RPN

四、改善階段

改善階段藉由分析階段所確認之黏晶站製程參數的關鍵因子，以選擇改善的思考方向，確定輸入與輸出變數之間的關係，找出最佳化方案並制定改善計畫，消除不良品產生的製程參數且量化並確認對於關鍵品質的影響，以達到改善效益並利用實驗設計中2K因子設計，找出最佳製程參數組合，來降低製程中的變異。

五、控制階段

控制階段主要目的是維持改善後的成果，必須制定一套管制計畫及訓練計畫，並將相關作業程序都標準化，建立一份標準作業程序（Standard Operating Procedure, SOP），貫徹SOP目的是確保輸入變數為可控的而輸出的結果為可預期，以減少人為的變異因素，並確保改善後的關鍵製程指標都有在管制範圍內達到低成本與高品質的目標。

肆、個案實證結果

個案D公司是一家IC設計、封裝、測試廠，專注於MEMS動作感測器（Motion Sensor）生產，如三軸加速度感測器（重力加速度感測器）及陀螺儀等產品。自2007年起從關鍵的封裝測試技術切入MEMS領域，且成功地開發出獨特的量產測試設備，進而跨入前端MEMS晶片設計；2009年成功開發出具備量產及極具競爭力的三軸加速度感測器，完整串聯整個產業鏈；2011年更成功開發出適用於不同應用之產品，如應用於手機、平板電腦、遊戲手柄、行車紀錄器等。

表5為D公司MEMS三軸加速器不良原因、不良率及單顆成品售價的損失金額。當時良率為95.65%；不良品報廢數量為548,471（=12,618,824-12,070,353）顆；損失金額約為164,541美元。其中，IC封裝後Offset fail不良比例居高不下，不良比例達3.22%，至今依然存著offset數值有偏差問題發生，經IC設計部門研究與討論後，Offset fail為MEMS質量塊受到外力影響所導致偏差值錯誤。經判斷為黏晶站中的基板來源、點膠製程、上片製程中的關鍵因子造成應力殘留於MEMS質量上，而導致質量塊變形所造成。

表5 D公司三軸加速器不良原因比率及損失

Input	Output	Yield	Defect code													
			Offset fail		O/S		OTP error		Register O/S		Gain fail		Sensitivity fail		Cross fail	
12,618,824	12,070,353	95.65%	406,043	3.22%	64,296	0.5%	38,410	0.3%	14,331	0.11%	10,727	0.1%	9,459	0.1%	5,205	0.04%
單顆售價0.3美金 (USD)			121,812.9		19,288.8		11,523		4,299.3		3,218.1		2,837.7		1,561.5	

本研究依照前述六標準差的DMAIC方法，對MEMS三軸加速器黏晶製程進行應力分析，找出影響因子並予以量化，以排除關鍵因素不穩定性，再利用最佳化參數設計改善，來提升MEMS三軸加速器IC封裝製程良率及客戶滿意度。

一、界定階段

（一）如表6所示，首先擬定改善計畫，計畫內容包括問題聲明、目標聲明、成員、範圍、開始日期、預計完成日期、及效益改善目標。

表 6 改善計劃書

項目	內容		
問題聲明	提升Die bond製程良率		
開始時間	2014/01/B	預計完成時間	2014/04/B
目標聲明	1. Die shear：推力值大於200g以上 2. Die tilt：傾斜高度小於10um以下 3. Die rotation：黏晶後旋轉角度小於3度 4. 基板潔淨度：基板清洗水滴角度小於30度		
限制和假設	1. 執行實驗需固定黏晶站之設備 2. 量測系統須執行校正調整		
組員和職責	1. 所屬D/B站工程師／Setup機台與參數調整 2. 品保工程師／產品之量測系統與確認核准 3. 專案經理／各部門溝通協調及可行性評估		
初期的專案計劃	Offset fail不良率降低至3.22%以下		

(二) 圖6運用SIPOC流程圖從製程中找出重要的輸入到輸出，以蒐集詳細資料並標示出改善的範圍。本個案的核心流程為：點膠→貼片→CCD檢驗，SIPOC流程圖中詳細列出每一步驟中的關鍵投入變數。

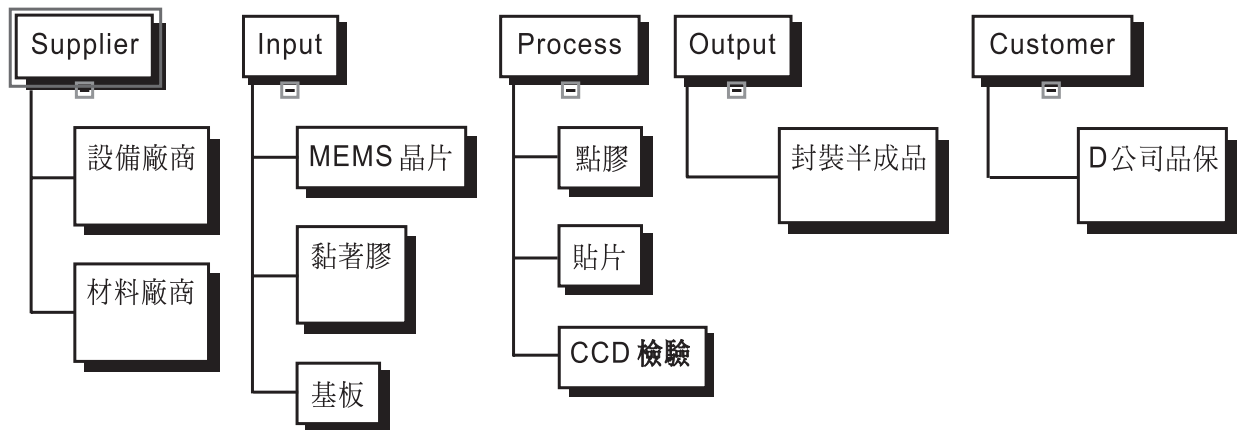


圖6 黏晶站SIPOC流程圖

(三) 圖7以關鍵品質樹將黏晶製程中會造成應力殘留之品質需求，以樹狀圖方式展開明確及可衡量的技術規範、性能要求以及品質規格。由於晶片黏貼於基板上，故需依照下列封裝標準執行：

1. 晶片推力 (die shear)：推力值大於200g以上，挑戰目標維持不變。依照 MIL-STD-833F DIE SHEAR 規範必達之條件。
2. 晶片傾斜 (die tilt)：傾斜高度小於10um以下，挑戰目標為8um以下。依照各家封裝廠的設備能力所制定，而控制傾斜度是要使MEMS中質量塊可

以平均於一個共平面水準上，確保封裝製程中MEMS質量塊受到的應力均勻度一致性。

3. 晶片旋轉（die rotation）：黏晶後旋轉角度小於3度，挑戰目標為小於2度。依照各家封裝廠的設備能力所制定，晶片旋轉的控制是使MEMS在測試運算時，每一顆受測之IC偏差值能一致性。
4. 基板潔淨度：基板清洗水滴角度小於30度，此目的是確認基板與晶片黏著的穩定性，減少來料品質之影響，此規範是依照各家封裝廠的設備能力所制定。

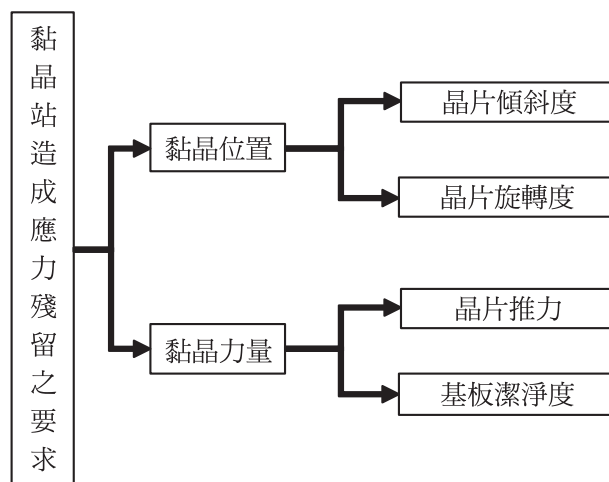


圖7 黏晶站品質需求之關鍵品質樹

二、衡量階段

（一）柏拉圖

經由公司內部資料量化後，先找出製程中的關鍵少數因子，也就是重要的不良項目。如圖8的柏拉圖分析所示，在個案中有些不良項目是黏晶後所造成應力殘留的關鍵，包括缺膠、晶片來料不良、晶裂、異物等不良項目。經統計的結果顯示，於黏晶站生產量590,392顆中，缺膠佔了生產量的比例就有33.48%。故本個案以「缺膠」為主要改善關鍵，其他不良項目則採取配套方式輔助改善。在進行衡量前，先確認機台設備系統能力與人員使用的量測系統儀器，再進行相關的資料的蒐集與分析。

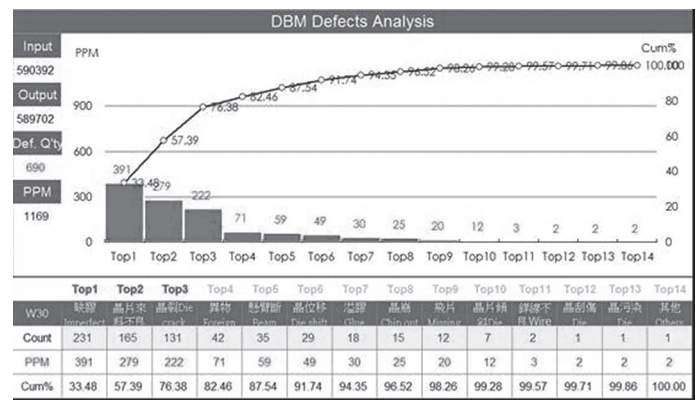


圖8 黏晶站不良因素柏拉圖

(二) 製程能力分析

使用黏晶設備專屬的標準校正量測物件，分別對黏晶位置 (bond placement) 與黏晶壓力 (bond force) 確認機台設備的能力。如圖9所示，由校正後黏晶位置精準度資料得知黏晶位置偏移量為50um，分別取得X偏移量與Y偏移量的製程能力分別為 $C_{pk} = 1.35$ 及 $C_{pk} = 1.34$ ，此製程能力屬於穩定狀態。

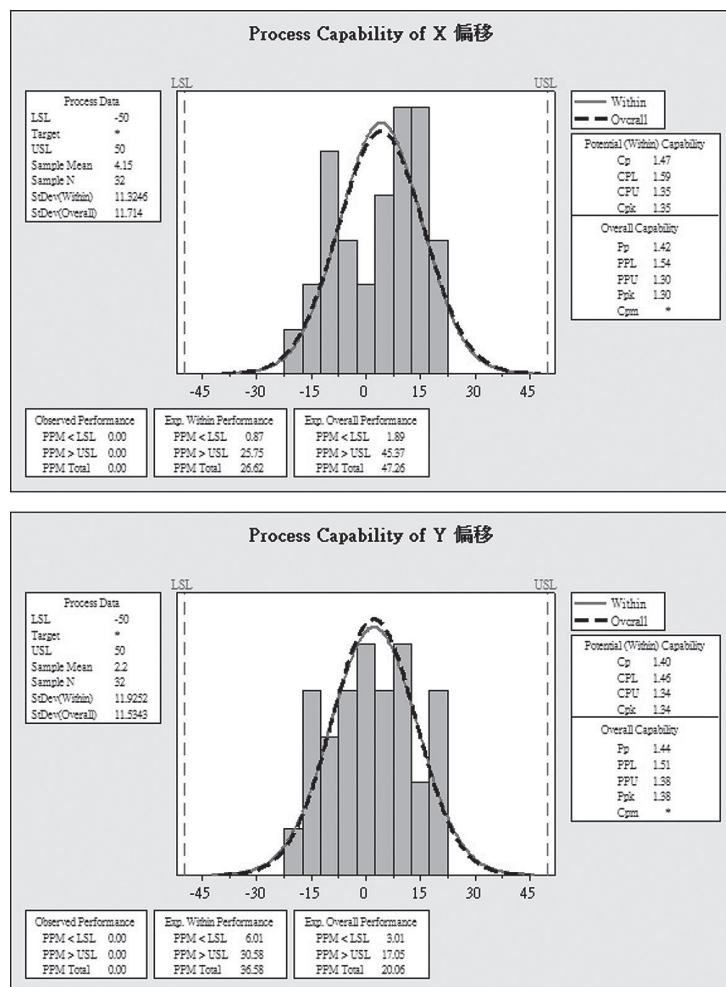


圖9 X方向及Y方向黏晶製程能力圖

在黏晶壓力方面，由校正後資料可將黏晶壓力目標值設為50g，規格為52g與48g。如圖10所示，黏晶壓力Cpk = 1.37，故此製程能力屬於穩定狀態。

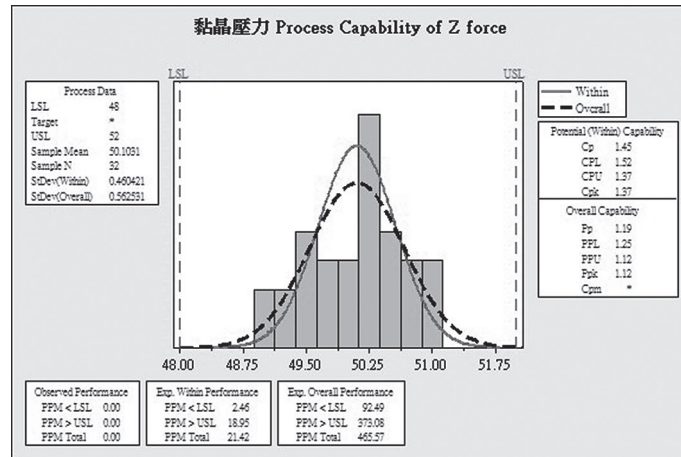


圖10 黏晶壓力製程能力圖

(三) 量測系統分析

使用DAGE拉、推力儀器測量零件，推刀施以水平力朝向MEMS晶片推擠，直到MEMS晶片脫落於承載物上，此時推力儀器將停止動作，而推力儀器會記錄MEMS晶片所受到的推力。依照規範，每年定期送校合格委外廠商做推力儀器校正。推力量測屬於破壞性測試，為確保推力儀器及人員施測的穩定度，利用300g標準砝碼針對推力儀器做推力值的驗證，將早、中、晚班人員連續量測10天推力值，再與推力儀器的能力做比較，如圖11所示，量測數據皆符合要求。

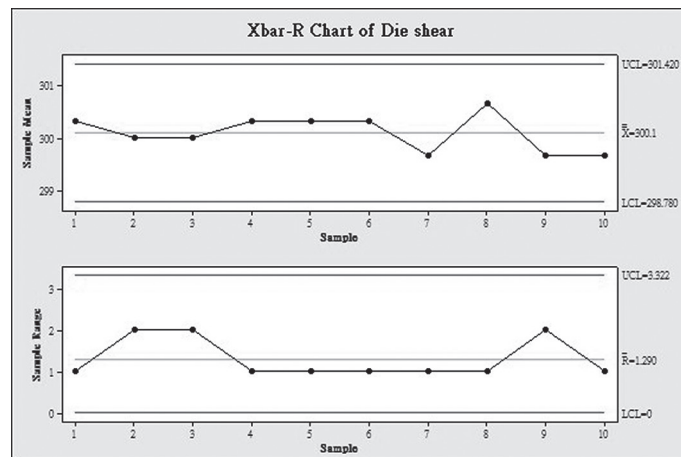


圖11 推力值管制圖

另外，使用2.5D金相顯微鏡量測晶片傾斜度（die tilt）及晶片旋轉角度（die rotation），對於早、中、晚班操作人員與量測儀器實施Gage R&R評估量測系統，每個操作人員對每個工件樣品重覆量測3次。表7為Die tile之Gage R&R分析表，量

測系統變異 (Total Gage R&R) 為0.0000215，佔全部變異的7.15%；而物件與物件間的變異 (Part-to-Part) 為0.0002794，佔全部變異的92.85%；確認% Study Var = 26.74%與NDC (Number of Distinct Categories) = 5，根據Automotive Industry Action Group (AIAG) 定義，介於10%至30%間表示量測系統可被接受，而NDC必須大於5或者更多，量測系統才能被用來分析製程。

表 7 Die tilt量測數據之Gage R&R分析表

Source	VarComp	% Contribution (of VarComp)	
Total Gage R&R	0.0000215	7.15	
Repeatability	0.0000189	6.28	
Reproducibility	0.0000026	0.88	
Operators	0.0000000	0.00	
Operators*Parts	0.0000026	0.88	
Part-To-Part	0.0002794	92.85	
Total Variation	0.0003009	100.00	
Source	StdDev (SD)	Study Var (6*SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0046392	0.027835	26.74
Repeatability	0.0043461	0.026077	25.05
Reproducibility	0.0016229	0.009737	9.36
Operators	0.0000000	0.000000	0.00
Operators*Parts	0.0016229	0.009737	9.36
Part-To-Part	0.0167147	0.100288	96.36
Total Variation	0.0173466	0.104080	100.00

Number of Distinct Categories = 5

表8為Die rotation之Gage R&R分析表，量測系統變異為0.0000293，佔全部變異6.84%；而物件與物件間的變異為0.0003986，佔全部變異93.16%；確認% Study Var = 26.15%與NDC = 5，符合AIAG定義且量測系統可用以分析製程。

表 8 Die rotation量測數據之Gage R&R分析表

Source	VarComp	% Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.0000293	6.84
Repeatability	0.0000233	5.45
Reproducibility	0.0000059	1.39
Operators	0.0000005	0.12
Operators*Parts	0.0000054	1.27
Part-To-Part	0.0003986	93.16
Total Variation	0.0004278	100.00

表 8 Die rotation量測數據之Gage R&R分析表（續）

Source	StdDev (SD)	Study Var (6*SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0054092	0.032455	26.15
Repeatability	0.0048305	0.028983	23.35
Reproducibility	0.0024343	0.014606	11.77
Operators	0.0007027	0.004216	3.40
Operators*Parts	0.0023307	0.013984	11.27
Part-To-Part	0.0199640	0.119784	96.52
Total Variation	0.0206838	0.124103	100.00

Number of Distinct Categories = 5

三、分析階段

本步驟以表9之因果矩陣對黏晶製程各因子對應力殘留的重要度做分析。結果顯示，製造流程中「點膠型式」是造成可能應力殘留排序最優先的關鍵因子。

表 9 黏晶站應力殘留因果矩陣分析

應力殘留之C&E評分表						
相關製程	項目	晶片推力	晶片傾斜	晶片旋轉	基板清潔度	總分
	重要度乘積	7	9	5	3	
基板來源	存放時間過久	4	2	2	5	71
	承載盤附著異物	5	5	3	5	110
	取放板材	3	5	4	6	104
	板材表面鍍金不良	2	6	6	7	119
點膠製程	點膠針尺寸	6	3	6	3	108
	點膠氣壓量	7	5	3	3	118
	點膠速度	7	5	3	3	118
	點膠針清潔頻率	5	5	4	2	106
	點膠型式	7	8	6	3	160
上片製程	吸嘴頭尺寸	6	6	6	2	132
	壓板密合度	3	6	6	2	111
	下壓力量	8	7	7	2	160
	頂針高度	2	6	6	3	107
	貼片速度	5	8	8	2	153

接著，利用表10對黏晶站製程進行FMEA分析，表中說明產品製造所發生失效的原因，並針對嚴重度、發生度及檢出度予以評分，並將三項之評分相乘，所得乘積即為風險優先指數，評分分數越大，產生之失效嚴重性也就越大，故可以之排定改善工作之優先順序。

表 10 黏晶站失效模組與效應分析

FMEA FAILURE MODE and EFFECT ANALYSIS								
項目	失效模式	失效影響	嚴重度	發生原因	發生度	管制方法	檢出度	風險度
黏晶站製程	溢膠	後製程無法打線 (晶片鋸墊汙染)	8	氣壓量控制異常	4	1.作業前測試(首件檢查) 2.增加流量閥監控	2	64
		靈敏度值與運算偏差值錯誤	8	點膠型式	4	1.作業前測試(首件檢查) 2.增加流量閥監控	6	192
	缺膠	晶片推力值不足	7	膠針或膠管內有異物	3	1.進料檢驗加嚴 2.作業前測試(首件檢查)	5	105
		後製程無法打線 (晶片飛失)	7	膠針或膠管內有異物	3	點膠後增設CCD辨識	2	42
		晶片旋轉	5	膠針或膠管內有異物	3	作業前測試(首件檢查)	2	30
	漏上晶片	後製程無法打線	7	視覺辨識系統辨識不良	2	執行人工線上監控	3	42
	晶崩 (裂)	無功能	8	上片壓力過大	5	執行人工線上監控 (IR檢驗設備)	6	240
	懸臂斷	無功能	8	上片速度過快	5	執行人工線上監控	3	120
	晶位移	靈敏度值與運算偏差值錯誤	6	吸嘴有異物	3	執行人工線上監控	2	36
	機台卡料	後製程需手動作業	9	參數設定有誤	2	教育訓練	1	18

由上述分析可找出應力殘留的關鍵影響因子有點膠型式、上片壓力、上片速度快等，在後續改善階段可對此三項關鍵因子做實驗設計，以找出最佳化參數設定條件。

四、改善階段

分析階段找到點膠型式、上片壓力、上片速度為黏晶製程應力殘留的關鍵影響因子，根據界定階段所定義出的目標做為改善後追蹤的依據，並由測試站(Function Test)確認黏晶站所造成應力殘留的問題是否有改善。

如表11所示，本研究藉由實驗設計來為三個控制因子及一個反應變數的單一目標，求得一組最佳解。首先針對各控制因子的操作條件設定相關水準，用ANSYS模

擬系統所模擬出各樣式之點膠型式的應力值做為參考依據，且依照公司黏晶站所量產制定的上片壓力與上片速度的參數，取上、下界限值做為實驗設計中設定參數之基準。

表 11 黏晶製程應力殘留關鍵影響因子之實驗設定水準

因子水準	點膠型式	上片壓力	上片速度
原水準	口字型膠	50g	100mm/sec
水準一	4點膠	75g	130mm/sec
水準二	3點膠	25g	70mm/sec

每組（水準一、水準二）實驗條件（ $2*2*2 = 8$ 組實驗）投入一條基板有360顆樣品數量，且每組實驗重複執行3次（共 $8*3 = 24$ 次實驗），每組參數實驗經由測試可得到offset fail不良率，如表12所示。

表 12 實驗之Offset fail不良率

編號	點膠型式 (點數)	上片壓力 (g)	上片速度 (mm/ sec)	Offset fail不良率 (%)	編號	點膠型式 (點數)	上片壓力 (g)	上片速度 (mm/ sec)	Offset fail不良率 (%)
1	3	25	130	2.21	13	4	25	70	6.45
2	3	25	70	1.24	14	4	25	130	6.15
3	3	75	70	3.32	15	4	25	70	6.35
4	4	75	70	6.87	16	3	25	70	1.19
5	4	25	130	5.88	17	3	75	130	5.03
6	3	75	130	4.55	18	4	25	130	5.95
7	3	25	130	2.41	19	4	75	130	6.78
8	3	25	130	2.38	20	3	75	70	3.54
9	4	75	70	6.35	21	4	25	70	5.98
10	3	75	130	4.87	22	4	75	70	6.23
11	3	25	70	1.08	23	3	75	70	3.44
12	4	75	130	6.98	24	4	75	130	7.33

由圖12殘差分析可知，此模型符合常態性且變異數齊一及獨立性之假設。

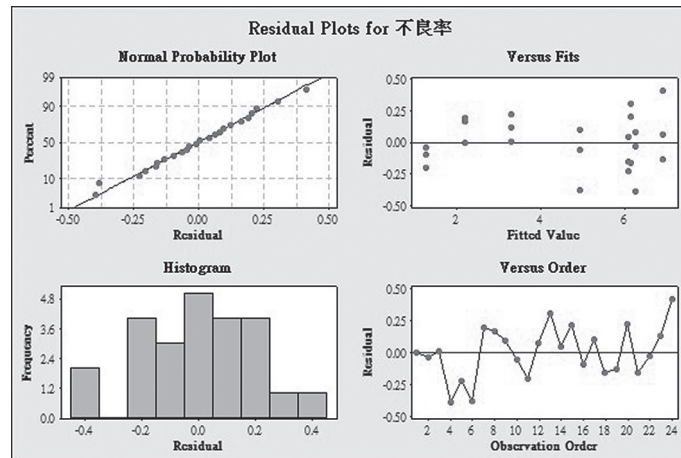


圖12 黏晶站失效模組與效應分析圖

如表13之MINITAB分析資料得知，點膠型式、上片壓力、上片速度、點膠型式*上片壓力、點膠型式*上片速度、上片壓力*上片速度等因素之P值 < 0.05 ，故為顯著因子。且由圖13柏拉圖可知，這些顯著因子的排序為A（點膠型式）、B（上片壓力）、AB（點膠型式*上片壓力）、C（上片速度）、AC（點膠型式*上片速度）及BC（上片壓力*上片速度）。

表 13 實驗設計資料分析

Factorial Fit：不良率versus點膠型式，上片壓力，上片速度
 Estimated Effects and Coefficients for不良率 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.046900	0.000436	107.66	0.000
點膠型式	0.035033	0.017517	0.000436	40.21	0.000
上片壓力	0.015017	0.007508	0.000436	17.24	0.000
上片速度	0.007067	0.003533	0.000436	8.11	0.000
點膠型式*上片壓力	-0.008717	-0.004358	0.000436	-10.00	0.000
點膠型式*上片速度	-0.005667	-0.002833	0.000436	-6.50	0.000
上片壓力*上片速度	0.002583	0.001292	0.000436	2.97	0.009
點膠型式*上片壓力*上片速度	0.001483	0.000742	0.000436	1.70	0.108

S = 0.00213415 PRESS = 0.000163965

R-Sq = 99.26% R-Sq (pred) = 98.33% R-Sq (adj) = 98.93%

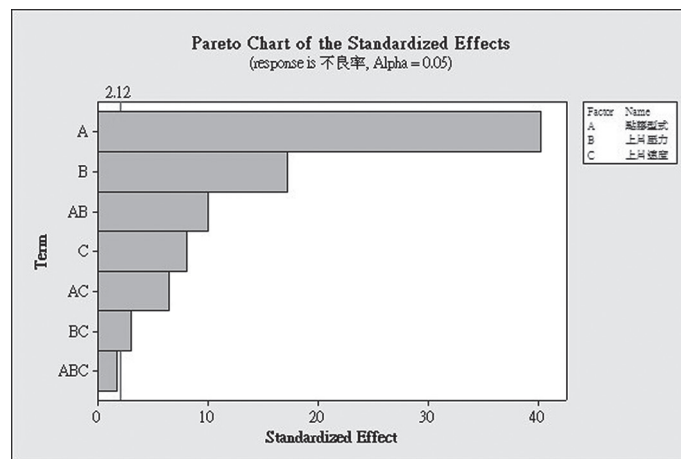


圖13 顯著因子之柏拉圖

經柏拉圖確認顯著因子後，再以實驗設計中的2K因子設計，如圖14所示，得知實驗參數中的最佳組合為點膠型式3點、上片壓力25g、上片速度70mm/sec。

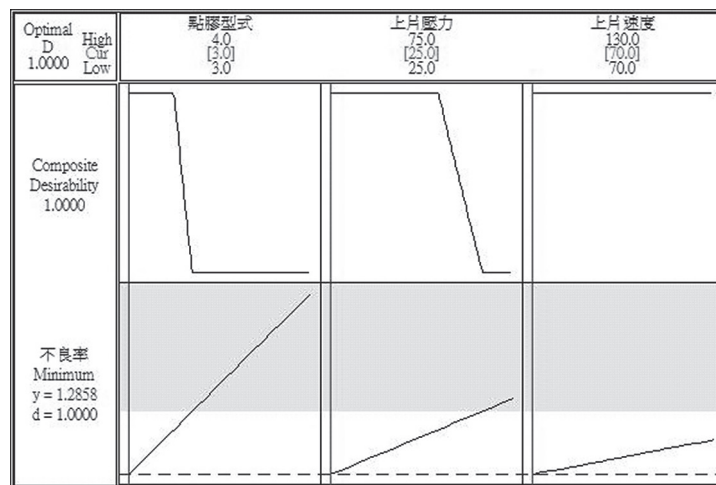


圖14 最佳參數組合條件

將最佳參數組合膠型式3點、上片壓力25g、上片速度70mm/sec套入黏晶製程並比對原始資料，以確認此組合條件是否可達到界定階段所定義的目標值。如圖15 (a) 所示，推力值改善前後都維持在界定階段所從定義之目標200g以上；如圖15 (b) 所示，晶片傾斜改善前平均值為8.56um，改善後平均值為7.8481um，傾斜約改善8.3%，符合界定階段所定義之目標；如圖15 (c) 所示，晶片旋轉改善前平均值為2.16度，改善後為1.8428度，旋轉約改善14.7%，符合界定階段所定義之目標；如圖15 (d) 所示，Offset fail不良率由3.22%改善為2.07%，改善不良率1.15%。

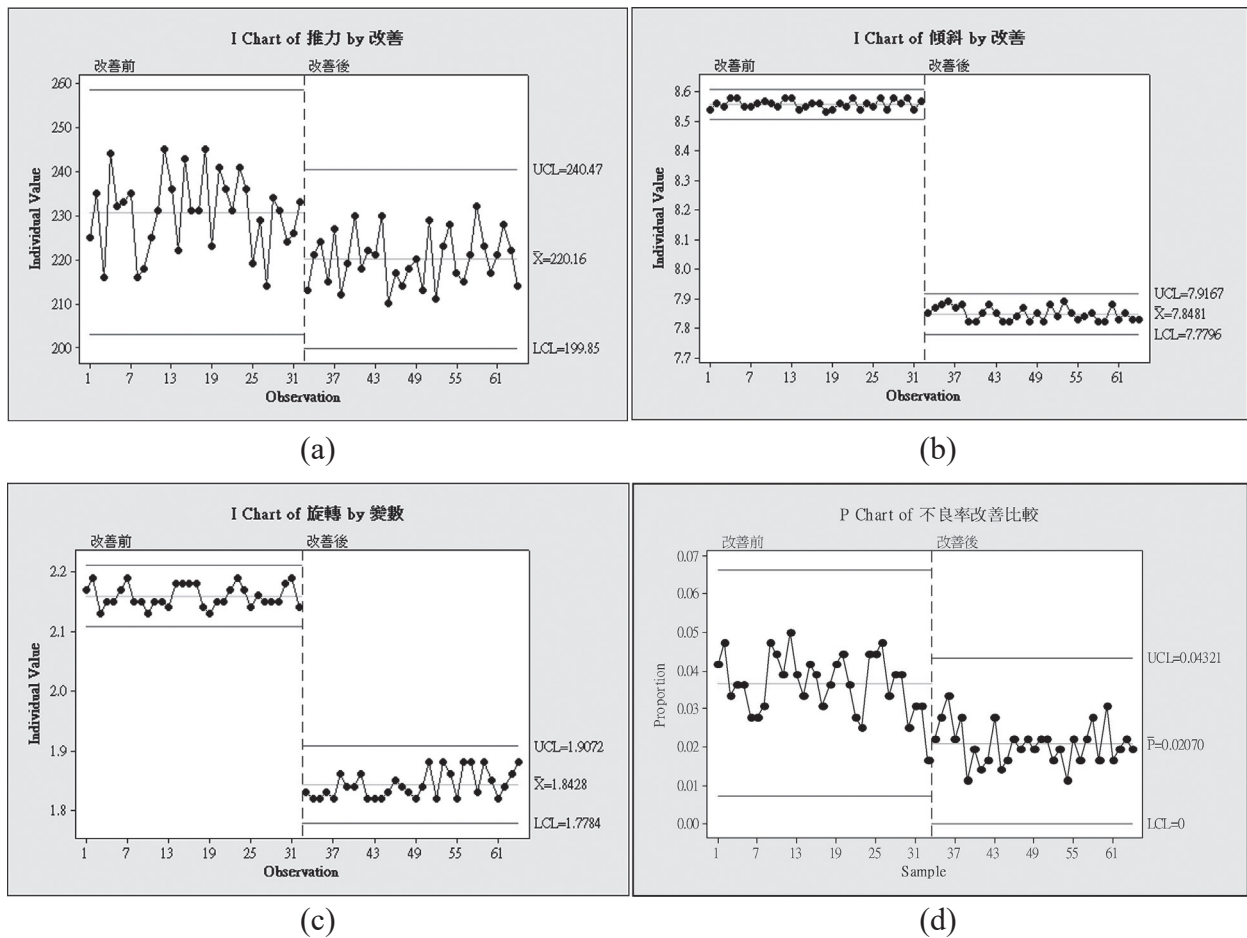


圖15 改善前、後之管制圖比較

五、控制階段

在達成預定改善目標後，須將活動過程中所有改善計劃的文件標準化，讓現場操作人員能確實遵守並執行，定期利用Offset fail不良率推移圖的方式監控目標，持續改善製程。

如表14所示，本研究將活動過程中對於問題點的改善措施予以作業規範文件標準化，讓操作人員能夠有所依循，並依照標準程序去執行。

此外，如圖16所示，本研究收集並記錄每週測試站offset fail不良率的資料，並繪製不良率推移圖以監控是否達到預定之目標，由圖可知目前不良率均未超過2.5%之管制界限，亦可藉此圖實施管制計劃，不間斷運用DMAIC改善手法。

表 14 黏晶站作業標準規範

規範編號 Spec No.	DC-WI-DB01		頁次 Page	1 of 24
檔案名稱 Doc. Title	黏晶站作業規範		版本 Ver.	A.9
修訂履歷 Revise History				
版別 Ver.	制定日期 Initiation Date	撰寫者 Originator	變更要旨 Description	生效日期 Effective Date
A.8	2013.10.21	Gary	新增10.1首件檢查 點膠位置檢驗。 修改10.4每子批 檢驗數量/次數。 修改10.6.1晶粒旋轉 (R) 備註。 修改10.6.1膠體厚度異常WBLT檢驗規格。 新增10.6.1膠體厚度異常Tilt檢驗規格。 修改10.6.1膠體覆蓋面積異常G-sensor異常判斷。 修改13.3黏晶站機台工作參數表。 新增13.4黏晶站不良記錄表。	2013.10.31
A.9	2014.03.19	Ben	修改10.1參數變更：點膠型式、上片壓力、上片速度 修改10.6.1檢驗規格：晶片推力、晶片傾斜、晶片旋轉	2014.03.21
核准 Approved		發行章 Issued Stamp		

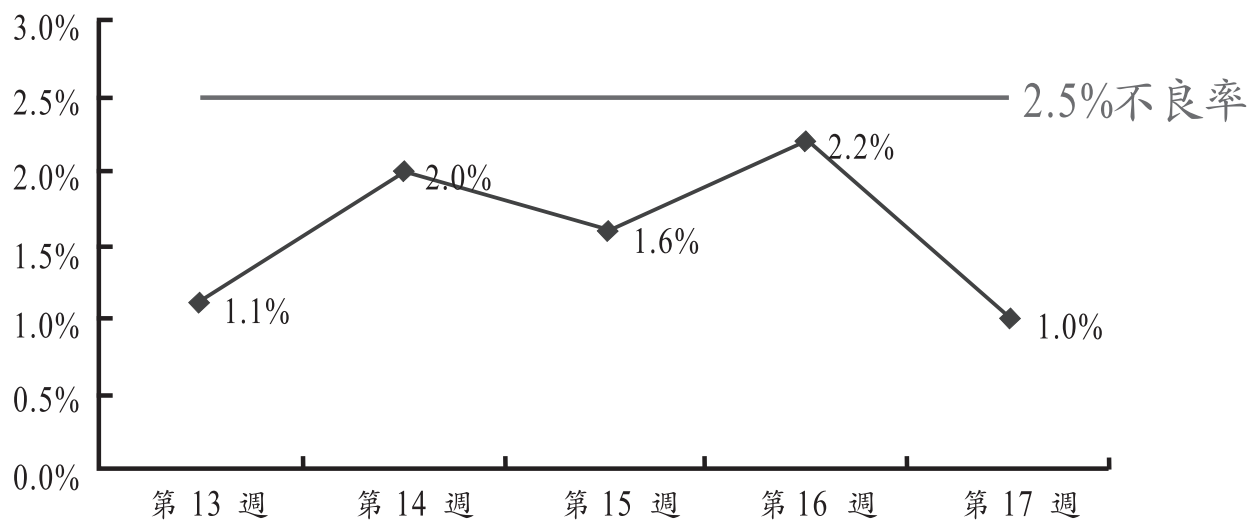


圖16 Offset fail不良率推移圖

伍、結論

本研究運用六標準差方法於壓阻式三軸加速器黏晶製程改善，透過點膠方式的改變，將Offset fail不良率由3.22%降低至2.07%，改善不良率1.15%，有效降低封裝黏晶製程中所產生的應力問題，同時透過製程參數優化產生改善效益，減少失敗成本的支出約新臺幣621萬元，並將相關標準化作業流程移轉至生產線進行實際追蹤與監控。

本研究經由六標準差改變點膠方式以降低封裝黏晶製程中所產生的應力，但不同公司生產不同產品及使用不同設備，應以六標準差方法重新進行研究。未來亦可嘗試利用歷史資料，探勘出具關聯性、邏輯性、規則性之資訊並加以分析，以做為產品設計缺陷改善之參考，或加強產品設計之適用性與完整性。

參考文獻

- 田民波（2008）。**半導體電子元件構裝技術**，臺北市：五南圖書出版股份有限公司。
- 呂宗興（1996）。電子構裝技術的發展歷程，**工業材料**，115，49-53。
- 陳建羽（2006）。以田口實驗方式進行IC封裝元件翹曲之數值模擬，逢甲大學機械與電腦輔助工程學系碩士論文，未出版，臺中。
- 陳信憲（2001）。結合6 σ 手法與田口實驗設計對改善製程能力之研究，國防管理學院資源管理研究所碩士論文，未出版，臺北。
- 喬廣文（2003）。應用六標準差方法提升半導體封裝製程品質，交通大學管理學院碩士在職專班工業工程與管理組碩士論文，未出版，新竹。
- 傅和彥、黃士滔（2004）。**品質管理：觀念、理論與方法**（3版）。新北市：前程企業管理有限公司。
- 謝宗雍（1997）。電子構裝技術簡介，**電子月刊**，3（7），57-77。
- 鐘文仁、陳佑任（2010）。**IC封裝製程與CAE應用**，新北市：全華圖書股份有限公司。
- 蘇朝墩（2008）。六標準差執行上的三個思維：策略、戰術與文化，**品質月刊**，44（10），9-16。
- 蘇朝墩（2009）。**六標準差**，新北市：前程企業管理有限公司。
- Antony, J., Kumar, M., & Tiwari, M. K. (2005). An application of Six Sigma methodology

- to reduce the engine-overheating problem in an automotive company. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 219(8), 633-646.
- Chang, T. C., & Chen, K. S. (2019). Testing process quality of wire bonding with multiple gold wires from viewpoint of producers. *International Journal of Production Research*, 57(17), 5400-5413.
- Fu, H., Ying, S., Hsieh, H., & Huang, P. (2018). Characteristics study of die-bond process of high-power LED package. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 8(11), 2007-2011.
- George, M. L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Speed*, New York: McGraw-Hill.
- Graycochea Jr., E. M., Gomez, F. R. I., & Rodriguez, R. S. (2020). Warpage Mitigation through Diebond Process Improvement with Enhanced Leadframe Configuration. *Journal of Engineering Research and Reports*, 10(2), 39-42.
- Isayev, A. I. (1987). *Injection and Compression Molding Fundamentals*, New York: Marcel Dekker, Inc.
- Kim, M., & Kong, S. (2020). Efficient approach for electrical design and analysis of high-speed interconnect in integrated circuit packages. *Electronics*, 9, 303.
- Kodrat, D. S., & Melinda, T. (2021). Creating a brand strategy for the footwear industry. *International Journal of Economics, Business and Management Research*, 4(8), 29-42.
- Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2006). Benefits, obstacles and future of six sigma approach. *Technovation*, 26(5-6), 708-715.
- Mougenot, D., Cherepovskiy, A., & JunJie, L. (2011). MEMS-based accelerometers: expectations and practical achievements. *First Break*, 29(2), 85-90.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., and Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma Way: How GE, Motorola and Other Top Companies Are Honing Their Performance*, New York: McGraw-Hill.
- Park, S. H. (2003). *Six Sigma for Quality and Productivity Promotion*. Tokyo: Asian Productivity Organization.
- Rashid, N. A. (2019). *Improvement of Powermite Package Crack and Chip Die Process Optimization Study in Die Attach and Molding Process* (Doctoral dissertation, UTAR).
- Rodriguez, R. S., & Gomez, F. R. I. (2020). Rubber-tip Design Improvement for Die Crack Elimination at Diebond Process. *Journal of Engineering Research and Reports*, 12(2), 1-5.

- Sahoo, A. K., Tiwari, M. K., & Mileham, A. R. (2008). Six Sigma based approach to optimize radial forging operation variables. *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1-3), 125-136.
- Siddh, M. M., Gadekar, G., Soni, G., & Jain, R. (2013). Lean Six Sigma approach for quality and business performance. *Global Journal of Management and Business Studies*, 3(6), 589-594.
- So, P., & Broutman, L. J. (1976). Residual stresses in polymers and their effect on mechanical behavior. *Polymer Engineering & Science*, 16(12), 785-791.
- Su, C. T., & Chou, C. J. (2008). A systematic methodology for the creation of Six Sigma projects: A case study of semiconductor foundry. *Expert Systems with Applications*, 34(4), 2693-2703.
- Varma, J. H., & Lal, S. (2020). Root cause analysis of newsprint waste using pareto analysis and cause and effect matrix. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 810, No. 1, p. 012072). IOP Publishing.
- Wright, P. A. (1995). A process capacity index sensitive to skewness. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 52(3), 195-203.
- Yang, C. M., Lin, K. P., & Chen, K. S. (2019). Confidence interval based fuzzy evaluation model for an integrated-circuit packaging molding process. *Applied Sciences*, 9(13), 2623.
- Yung, L. C. (2018). Investigation of the solder void defect in IC semiconductor packaging by 3D computed tomography analysis. *Proceedings of 2018 IEEE 20th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 886-889.

