



# 反應曲面法在光阻開發的應用

## The Application of Response Surface Methodology in the Development of Photoresists

黃國棟 K.T. Huang\*；趙希德 S.D Chao\*\*；張孟浩 M.H. Chang\*\*\*；張德宜 T.Y. Chang\*\*；  
陳宜見 I.J. Cheng\*\*\*；吳明宗 M.T. Wu\*\*\*\*；陳鈞征 Y.C. Cheng\*\*\*  
工研院材料所有機光子實驗室 \* 經理、\*\* 研究員、\*\*\* 副研究員 MRL/ITRI

### 摘要

本文中所提到的光阻主要應用於彩色濾光片的製作，彩色濾光片在液晶顯示器中，關係著顯示器之彩度、色度、對比度及亮度等特性，是液晶顯示器彩色化的關鍵零組件。除了佔材料成本最高比例外，在 TFT-LCD 中更具有保護薄膜電晶體(Thin Film Transistor; TFT)之功能。而彩色濾光片係屬於 Design-in 之產品，與中游客戶—即 LCD 面板廠商之產品配合表現極為相關。因此紮根材料的研發與建立量產技術，並能快速應對下游的需求變化是提升彩色濾光片及 LCD 產業競爭力的實質關鍵因素。因此反應曲面法在彩色濾光片相關光阻的開發上有相當大的幫助。接下來文章將對反應曲面法基本原理，與其在光阻應用案例進行說明。

### Abstract

In this article, the Photo-resists are mainly applied on the manufacturing of color filter. The performances of the color filter are concerned with the color saturation、color coordination、contrast and brightness of the display. The color filter has the capability to protect the thin film transistor and has the highest cost ratio with the other materials in LCD manufacture. The color filter is a design-in product, and must be matched up the requirement of LCD panel. It is the key to fasten the development and mass production of the relative materials and fast response to the requirements of the customer. So It is helpful and needful to apply the response surface methodology to develop the relative photo-resists of the color filter. In this article, it will be introduced with the principle of RSM and the case study of the photo-resist.



## 關鍵詞 / Key Words

反應曲面法(Response Surface Methodology; RSM)、中央合成設計實驗(Central Composite Design)、光阻(Photo-resist)、彩色濾光片(Color Filter)、交聯深度(Curing Depth)、交聯密度(Curing Density)

## 前言

反應曲面法(Response Surface Methodology; RSM)是特定數學與統計方法之集合所衍生出的方法論，其目的在協助研究人員對科學系統或工程製程中之製程改善、最佳產品設計、系統最佳化等問題提供一套分析、求解程序，大部分應用時機均屬於科學研究後的工程問題研究，尤其是當系統特性受大量變數影響狀況下最為適當。一般而言，執行RSM大致分為兩階段，第一階段稱為反應曲面設計階段(Response Surface Design)，第二階段稱為反應曲面最佳化

階段(Response Surface Optimization)(見表一)。

本文中所提到的光阻主要應用於製作彩色濾光片，彩色濾光片在液晶顯示器中，關係著顯示器之彩度、色度、對比度及亮度等特性，是液晶顯示器彩色化的關鍵零組件。除了佔材料成本最高比例外，在TFT-LCD中更具有保護薄膜電晶體(Thin Film Transistor; TFT)之功能，在諸多液晶顯示器材料中扮演一重要地位。而彩色濾光片係屬於Design-in之產品，與中游客戶—即LCD面板廠商之產品配合表現極為相關，須能依客戶對品質規範之需要而客制化設計與量產。而彩色濾光片要有良好的物性發揮，則繫於原材料功能的整體表現，如彩色光阻、感光BM樹脂、分散顏料、感光突塊等物化特性，因此紮根材料的研發與建立量產技術，並能快速應對下游的需求變化，是提升彩色濾光片及LCD產業競爭力的實質關鍵因素。因此反應曲面法在彩色濾光片相關光阻的開發上有相當大的幫助。接下

表一 科學與工程的差異

	科 學	工 程
目的	弄清楚原因 找出可用的法則 著重於分析及一般化	解決問題 能實用 必須整合到特定的狀態
思考方式	自然法則思考 嘗試找出原因 加於分析後 歸納出通用法則	利用既有知識 為問題製造假設 實驗驗證 迅速完成其實用任務
採取態度	打破砂鍋問到底 為什麼(Why) 如何做(How)	改變變數或方法 達到所需求的目的
進行的方法	逐一因素法 (One-Factor-at-a-Time)	Controllable Variables ↓ Inputs → [Process] → Outputs ↑ Noise Variables



來將說明反應曲面法基本原理與其在光阻應用案例。

## 反應曲面法的發展

反應曲面法始於 1951 年由 Box 和 Wilson 共同進行數學模式的建立與推導，他們將以往 R.A Fisher 應用於農業領域的實驗設計法，具體推動成為反應曲面法，開啓了工業領域中新的里程碑。他們發現許多工業實驗與農業實驗基本上有兩種不同的部分：1.反應變數通常可立即被觀察到。2.實驗者可以很快地從連續的數據上獲取重要資訊。因而在接下來的三十年中，RSM 和其他的設計技術也漸漸地應用在化學與工業製程，以及學術研究中。到 1966 年在 Hill 和 Hunter 等人的相關研究下，其理論模式的建立與應用已趨於完整；在 1966 年至 1988 年期間，相關延伸的研究包含了探討模式的穩健性(Robustness)、可旋轉性(Rotatability)、直交性(Orthogonality)、最佳化設計(Optimal Design)與自變數高度相關(Multicollinearity)等因子實驗或混和實驗(Mixture Experiment)中常見問題，以及反應曲面法分析中之正規分析(Canonical Analysis)、脊線分析(Ridge Analysis; RA)與雙反應曲面系統(Dual Response System; DRS)等，此一古典RSM 研究成果在往後成為實務，成為求解最適實驗設計或作業條件的有利工具，普遍應用於電子、機械、農業、化學工業、生物科技、材料科學、食品科學及工業製程改善等各項研究領域。1980 年後，由於電腦模擬技巧(Computer Simulation)

應用於決策科學上漸受歡迎，RSM 亦成為分析複雜系統中重要影響變數的一項工具。2000 年後，多反應值最佳化設計(Multi-response Optimal Design)與多反應值共同最佳化問題(Multi-response Simultaneous Optimization)成為 RSM 研究的主流。

## 反應曲面法的基本概念

第一階段中，RSM 運用數學模式（迴歸分析）、統計分析與實驗設計之技術，探討獨立變數與反應變數之間的數學模式關係，經由實驗設計使實驗者在所關切的實驗區域內(Interest of Experimental Region)以有系統的方式進行實驗，取得所需的反應值與變數值，在此依照實驗環境或是實際條件發展出（或應用）最適化反應曲面設計、獲得最適化實務模型便是本階段最重要的議題。RSM 之研究問題，一般假設問題為限制性之最佳化問題，而目標函數的確切型式是未知的，在應用上主要存在下列二項限制：1.只適用於連續性的系統，假設所有反應值與獨立變數的量測刻度是連續性的。2.影響系統之獨立變數(Independent Variable)(包含可控制和不可控制變數)，屬於計量性。RSM 一般在此前提的假設與應用系統的限制下，可有效求得最佳實驗或作業變數值。

於第二階段，可稱為反應曲面分析(Response Surface Analysis)或是反應曲面最佳化，先選定一個起始點（或是現行操作水準(Current Operating Condi-



tions))，決定中心點與每一實驗因子的水準範圍(Factor Level)，在有興趣的實驗區域內進行因子或部分因子實驗，記錄反應值並配適一階模型，進而利用最陡下降(上升)法(Steepest Descent/Ascent Method)決定反應曲面最佳搜尋方向，沿此方向一步一步向前探索，期望實際反應值能沿此搜尋方向逐漸減小(或增大)，直到反應值無法再改善為止，其中，前進步伐的決定並非固定不變，可以根據實驗情況或經驗值決定。接著以此組操作水準為新的實驗中心點，並重複實驗步驟，往最佳反應曲面的方向逼近，並執行線性模式之缺適性檢定，一旦發現一階迴歸模型不適合時，表示此時應採用更複雜的數學模式來進行分析。如果選擇二階模式配適實驗資料時，一般進行中央合成設計實驗或是規劃三水準因子設計(Three-level Factorial Design)時，可選擇BBD(Box-Behnken Design)，利用原本的部分因子或全因子設計，加上軸點(Axial Point)及中心點(Central Points)合成為一個中央合成設計實驗，增加軸點的設計是為了使模式中純二次項(Pure Quadratic Terms)能夠有足夠自由度(相互獨立資料數)來估計參數，而增加中心點是為了檢測曲率並提供估計純誤差項(Pure Error)，用於執行迴歸分析中檢定之用。在配適、檢定二階模型完成之後，就進行反應曲面分析，旨在目前實驗區域中，以實際不同情況(或製程限制)針對反應曲面系統作深入探討。此時可利用正

規分析或脊線分析等技術來進一步瞭解穩定點(Stationary Point)之數學特性，其發現為鞍點(Saddle Point)則須進行更進一步的脊線分析，並配合2D或3D反應曲面圖(或輪廓圖)的協助，若二階模式配適時仍存在缺適性之問題，則可以求得局部最佳操作狀態或再進而配適更高之迴歸模式，如三次(Cubic)或四次(Quartic)模型。

綜合以上所述，反應曲面法是一套用以發展、改善、優化製程的統計與數學技術，其重要概念包括以下：

- 1.反應(Response)y：因變數，即品質特性(如產品黏度、粒徑大小、pattern尺寸、解析度…等)。
- 2.獨立變數 $\theta_1, \theta_2, \dots$ ：自變數，即品質因子(如彩色濾光片製程中的軟烤溫度、旋轉塗佈的時間、轉速、顯影時間及顯影劑種類…等)。
- 3.反應曲面：以獨立數為變數，以反應為函數值所構成之曲面，用以表達反應(即品質特性)與獨立變數(即品質因子)間的關係(如彩色濾光片厚度為品質特性，而彩色光阻的黏度、塗佈的速度及與玻璃基材的間距…等為品質因子，可經由運算而得一多次回歸方程式)。
- 4.等高線圖(Contour Plot)：在以獨立變數為變數之平面中，將具有相同反應(函數值)之點連線即得等高線。以一組等高線來表達反應與獨立變數間的關係圖即為等高線圖(如膜厚表現與黏度及塗佈速率關係)。



顯示器

## 反應曲面法的品質設計程序

1. 實驗設計：如何以衆人之智慧，經由往常經驗、討論，以最少量的實驗數據，獲得最大量有用之品質特性資訊，並加以有系統地選擇獨立變數組合、進行實驗、記錄反應值，以收集建立系統模型所需的數據程序稱為實驗設計。
2. 模型建構：透過實驗只能獲得特定獨立變數組合下的反應，必須建立獨立變數下與反應間的函數關係（反應曲面），因此產生模型建構問題。利用實驗數據建立獨立變數與反應間的函數關係之程序稱為模型建構。模型建構常應用統計學中的迴歸分析技術。
3. 參數優化：由於品質設計問題常有一定的目標需要優化，或有一定的規格需要滿足，因此產生參數優化問題。尋找一個能滿足各種品質特性（反應）的限制，並優化某種品質特性的目標之品質因子水準中的程序，稱為參數優化。要達成參數優化可利用在模型建構中得到的獨立變數與反應間的函數關係（反應曲面），以及利用數學中的最佳化技術。
4. 因為反應曲面法具有連續性的本質，及實驗設計、模型建構、參數優化等三個程序，所以此三種程序需連續、且循環的運作。

## 反應曲面法的數學模式

在 RSM 的實驗與分析中，假設影響反應值之獨立變數為  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$  應變函數為： $Y=f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k)+\varepsilon$  其中  $\varepsilon$  為反應變數的誤差（或實驗誤差），一般假設  $\varepsilon$  服從常態分配且符合相互間獨立性，其期望值為零，若以  $E(Y)=f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k)=\eta$  表示反應的期望值，則  $\eta=f(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k)$  所代表的曲面就稱為反應曲面。通常在收集資料後以最小平方法(Least Squares Estimation; LSE)配適一階迴歸模型(First-order Model)，以尋找出一個適當近似的函數，接著採用迴歸分析的顯著性檢定(General Linear Test Approach)來了解獨立變數與反應變數間的關係強弱，並檢定配適的模式是否恰當(Statistical Adequacy)。當實驗區域接近最佳反應值時，真實反應曲面的曲率(Curvature)會增加，這時需要利用曲率模式來配適反應曲面。從一階模式到二階模式的過程中，使用缺適性檢定(Lack of Fit Test)來檢視一階模式的適當性與曲率是否顯著。若在此操作水準附近區域內發現曲率為顯著，則考慮二階模式(Second-Order or So-called Quadratic Model)，其數學模式表示為：

$$Y=\beta_0+\sum_{i=1}^k \beta_i \theta_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \theta_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} \theta_i \theta_j + \varepsilon$$

假設誤差項變異數為常數並以  $\sigma^2$  表示，使用觀察資料以最小平方法估計未知參數  $\beta_i$ 、 $\beta_{ii}$  和  $\beta_{ij}$ ，同樣的，也必須檢定二階模式的適當性。當這個二階迴歸模式配適良好時，便可以利用這二階模式來求得最適操作水準(Optimal Operating Conditions)與最佳反應值(Optimal Response Level)，並依照實際需要求取最大值或最小值。



## 反應曲面法的優點

反應曲面法在處理未知函數曲面的情況中，可以有效降低實驗次數，得到多個獨立變數與某個反應變數的近似函數關係，求得最佳反應值與最佳實驗情況，其優點如下：

1. 經濟性原則：反應曲面法可以使用部分因子設計或特殊反應曲面設計（如混種設計(Hybrid Design)等），以較少的實驗成本及時間獲得不錯且有效的資訊。
2. 深入探討因子間交互作用影響：反應曲面法可以經由分析與配適模式來研究因子間的交互作用，並且進而討論多因子對反應變數影響的程度。
3. 獲得最適化的條件：根據數學理論求得最適的實驗情況，同時利用配適反應方程式繪出模式三度空間曲面圖與等高線圖，觀察並分析出最適的操作條件。
4. 建立資料庫模式：藉由實驗理論模式之建立，可根據客戶需求、成本品質最適化，而快速獲得操作條件。

## 反應曲面在光阻上的應用

在現階段光阻的開發中，所面臨的是產品端材料選擇多樣化，生產步驟變數多；客戶端則是生產設備差異，製程繁複與產品多樣而造成相對應規格變化大，所以每種光阻需較長時間來驗證與商品化過程，通常需要經驗豐富的研發人員與建立龐大資料庫來因應。因此反應曲面法在光阻的開發上具有

相當大的優勢與需求性，接下來以反應曲面法在光阻開發的應用之一—光阻的交聯深度與交聯密度的控制進行經驗分享。

### 一、重要因子篩選

一般在進行反應曲面法實驗前，為減少因不重要因子存在而增加實驗次數，通常會先進行重要因子的篩選。重要因子篩選程序，首先可利用團隊的腦力激盪法與特性要因圖進行因子分析，再以實驗計劃法(Design of Experiment; DOE)中二水準實驗或田口實驗計劃法(Tagushi Method)進行重要因子篩選。本實驗中係利用 Design Expert 軟體實驗計劃法中二水準實驗，對於交聯深度與交聯密度兩個反應篩選出曝光量、起始劑濃度、單體濃度、起始劑比例與光增感劑比例等五項要因因子，這五個重要因子將進行後段反應曲面法實驗。

### 二、反應曲面法實驗設計

本實驗採用反應曲面法中央合成設計實驗，基本上每個因子採 5 水準分配，為減少實驗次數，選擇部份因子法，經 Design Expert 軟體實驗配置結果如表二所示，共進行 32 個配方實驗。

每個配方均經事先塗佈膜厚校正在  $\pm 0.2\mu\text{m}$  膜厚差異，相同的預烤時間與相同顯影條件，量測方面則依據標準操作步驟(SOP)由專人負



責，其目的在於減少非因子與人員誤差。

### 三、RSM 實驗解析

#### 1. 交聯密度解析

在解析步驟方面，首先可經缺適性檢定來檢視模式的適當性與曲率是否顯著。若在此水準附近區域內發現曲率為

顯著，便可以利用這模式來求得最適操作水準與最佳反應值，並依照實際需求取得最大值或最小值（見表三）。

軟體建議選擇二次式(Quadratic)，一旦選擇了模式則可進行變異數分析(Analysis of Variance; ANOVA)。

從 ANOVA 分析中得知此 Model 是顯著的，從 Prob>F 分析（Prob>F 值<0.05 為顯著因子）從表四可知重要因子

表二 5因子，Central Composition Design，部份因子法設計表

Std	Run	Block	Factor 1 A: Initiator %	Factor 2 B: Light Intensity mj/cm <sup>2</sup>	Factor 3 C: Monomer %	Factor 4 D: initiator Ratio	Factor 5 E: 增感劑比例	Response 1 Curing Density %	Response 2 Curing Depth μm
14	1	Block 1	1.00	-1.00	1.00	1.00	-1.00		
3	2	Block 1	-1.00	1.00	-1.00	-1.00	-1.00		
4	3	Block 1	1.00	1.00	-1.00	-1.00	1.00		
12	4	Block 1	1.00	1.00	-1.00	1.00	-1.00		
16	5	Block 1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
6	6	Block 1	1.00	-1.00	1.00	-1.00	1.00		
25	7	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	-2.00		
23	8	Block 1	0.00	0.00	0.00	-2.00	0.00		
8	9	Block 1	1.00	1.00	1.00	-1.00	-1.00		
22	10	Block 1	0.00	0.00	2.00	0.00	0.00		
21	11	Block 1	0.00	0.00	-2.00	0.00	0.00		
1	12	Block 1	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	1.00		
2	13	Block 1	1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00		
28	14	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
24	15	Block 1	0.00	0.00	0.00	2.00	0.00		
27	16	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
18	17	Block 1	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
5	18	Block 1	-1.00	-1.00	1.00	-1.00	-1.00		
15	19	Block 1	-1.00	1.00	1.00	1.00	-1.00		
9	20	Block 1	-1.00	-1.00	-1.00	1.00	-1.00		
20	21	Block 1	0.00	2.00	0.00	0.00	0.00		
19	22	Block 1	0.00	-2.00	0.00	0.00	0.00		
26	23	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	2.00		
30	24	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
13	25	Block 1	-1.00	-1.00	1.00	1.00	1.00		
10	26	Block 1	1.00	-1.00	-1.00	1.00	1.00		
11	27	Block 1	-1.00	1.00	-1.00	1.00	1.00		
7	28	Block 1	-1.00	1.00	1.00	-1.00	1.00		
31	29	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
29	30	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
17	31	Block 1	-2.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
32	32	Block 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		



顯示器

有 A=起始劑濃度、B=曝光量、C=單體濃度、D=起始劑比例與二次因子 A<sup>2</sup>、D<sup>2</sup>、AC、BC 同時可得到一二次模擬方程式：

$$\begin{aligned}\text{Curing Density} = & 0.79 + 0.13 \times A + 0.044 \times B \\ & + 0.0072 \times C - 0.051 \times D \\ & - 0.051 \times A^2 - 0.017 D^2 \\ & - 0.032 \times A \times C - 0.043 \times B \times C\end{aligned}$$

**表三 交聯密度實驗之缺適性檢定表**

Lack of Fit Tests						
Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	
Linear	0.17	21	8.062E-003	46.90	0.0002	
2FI	0.11	11	0.010	59.56	0.0001	
Quadratic	0.017	6	2.858E-003	16.63	0.0037	Suggested
Cubic	3.186E-003	1	3.186E-003	18.53	0.0077	Aliased
Pure Error	8.596E-004	5	1.719E-004			

**表四 交聯密度實驗之 ANOVA 表**

Source	Squares	DF	Square	Value	Prob > F	
Model	0.80	20	0.040	24.48	<0.0001	Significant
A	0.41	1	0.41	252.59	<0.0001	
B	0.047	1	0.047	28.58	0.0002	
C	0.13	1	0.13	76.49	<0.0001	
D	0.062	1	0.062	38.16	<0.0001	
E	1.301E-003	1	1.301E-003	0.79	0.3918	
A <sup>2</sup>	0.084	1	0.084	51.23	<0.0001	
B <sup>2</sup>	4.420E-003	1	4.420E-003	2.70	0.1286	
C <sup>2</sup>	2.853E-003	1	2.853E-003	1.74	0.2136	
D <sup>2</sup>	0.011	1	0.011	6.91	0.0235	
E <sup>2</sup>	7.926E-003	1	7.926E-003	4.84	0.0501	
AB	4.287E-003	1	4.287E-003	2.62	0.1339	
AC	0.016	1	0.016	9.78	0.0096	
AD	5.302E-004	1	5.302E-004	0.32	0.5808	
AE	7.563E-008	1	7.563E-008	4.619E-005	0.9947	
BC	0.030	1	0.030	18.09	0.0014	
BD	2.627E-005	1	2.627E-005	0.016	0.9015	
BE	1.899E-003	1	1.899E-003	1.16	0.3046	
CD	9.719E-004	1	9.719E-004	0.59	0.4573	
CE	3.267E-004	1	3.267E-004	0.20	0.6638	
DE	3.006E-003	1	3.006E-003	1.84	0.2026	
Residual	0.018	11	1.637E-003			
lack of Fit	0.017	6	2.858E-003	16.63	0.0037	Significant
Pure Error	8.596E-004	5	1.719E-004			

此二次模擬方程式除可做為交聯密度之控制方程式，亦可在水準區域求得最佳值。

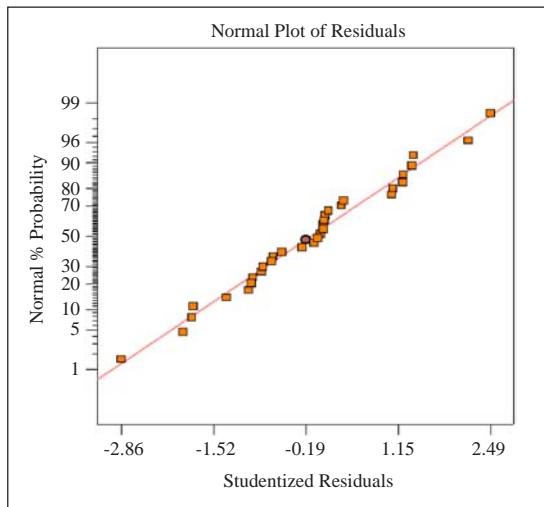
同時可藉殘值分析(Residual Analysis)，檢定實驗數據是否偏離群體，一般而言殘值絕對值若大於 3，則表示可能偏離群體；從圖一可知，所有數據之殘值絕對值均小於 3，屬正常。

軟體可繪製出其各重要因子間交互作用結果之等效曲線圖（見圖二）與反應曲面圖（見圖三），接下來繼續探討低曝光量與高曝光量時，起始劑含量與單體含量對交聯密度的影響。

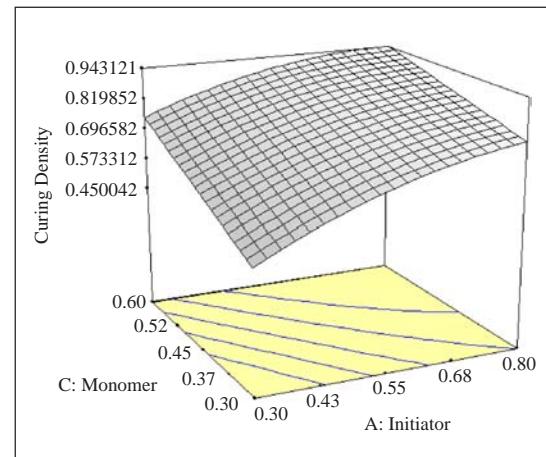
另一方面，也可探討在曝光量 = 250 mj/cm<sup>2</sup>，起始劑含量與單體含量對交聯密度的變化。

從圖四、圖五得知當低曝光量時，起始劑含量與單體含量愈高，交聯密度愈高，而起始劑若低於 0.3，交聯密度將低於 75%，所以兩者需互相配比；而高曝光量時，起始劑是決定交聯密度的重要因子。

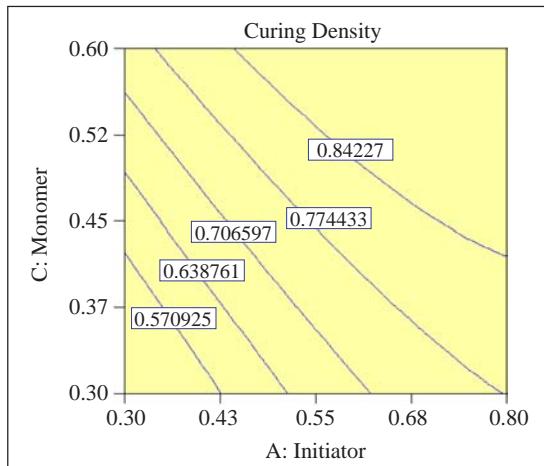
另一方面，我們



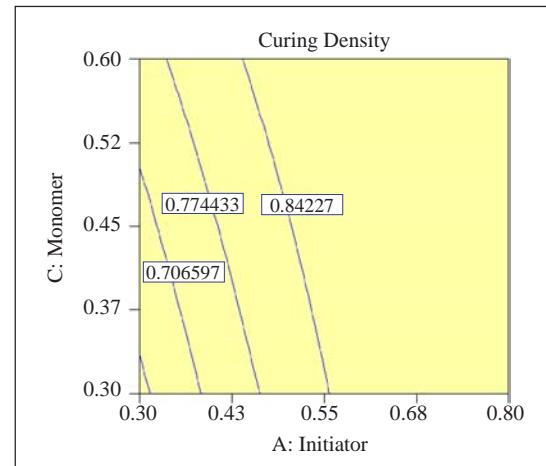
▲圖一 交聯密度實驗之殘值分析



▲圖三 交聯密度實驗中，曝光量 =100mj/cm<sup>2</sup>、起始劑含量與單體含量之反應曲面圖



▲圖二 交聯密度實驗中，曝光量 =100mj/cm<sup>2</sup>、起始劑含量與單體含量之等效應曲線圖



▲圖四 交聯密度實驗中，曝光量 =250mj/cm<sup>2</sup>、起始劑含量與單體含量之等效應曲線圖

也可針對低起始劑量與高起始劑量進行單體含量與曝光量對交聯密度的探討（見圖六、七）。

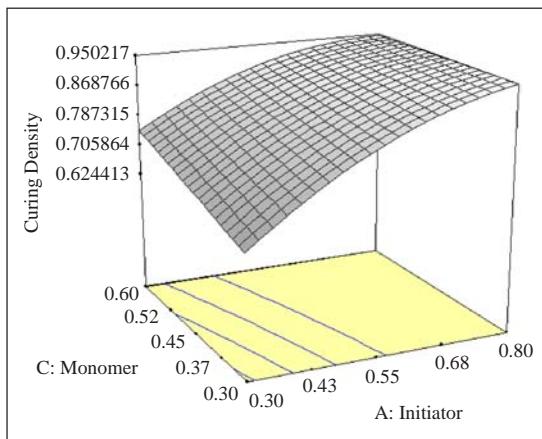
從圖六得知當低起始劑含量時，曝光量與單體含量愈高，交聯密度愈高，而單體含量若達交聯密度 0.6，將不受曝光量影響；而高起始劑含量時，曝光量與單體含量均為決定交聯密度的重要

因子。

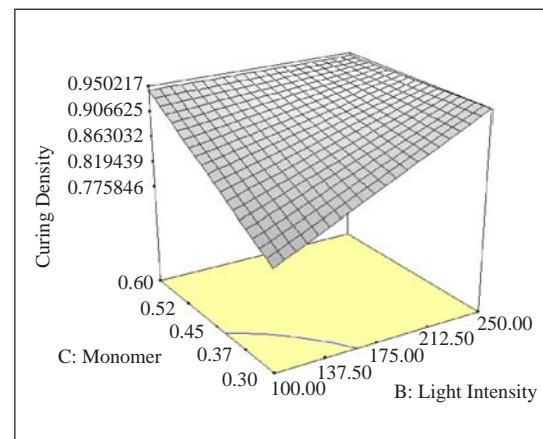
## 2. 交聯深度解析

對於交聯深度解析，如前步驟，可經缺適性檢定來檢視模式的適當性與曲率是否顯著。軟體分析結果同樣建議選擇二次式。

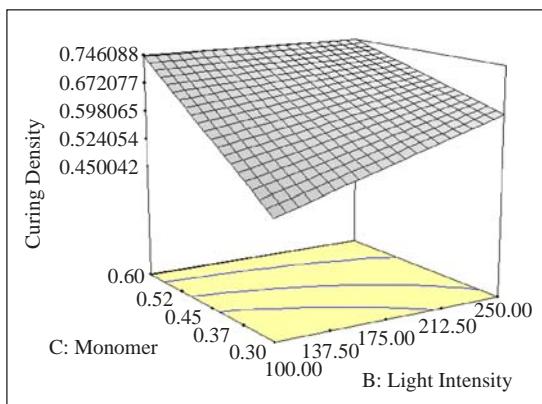
在變異數分析中顯示一次因子 A=起始劑含量、B= 曝光量、D= 起始劑比



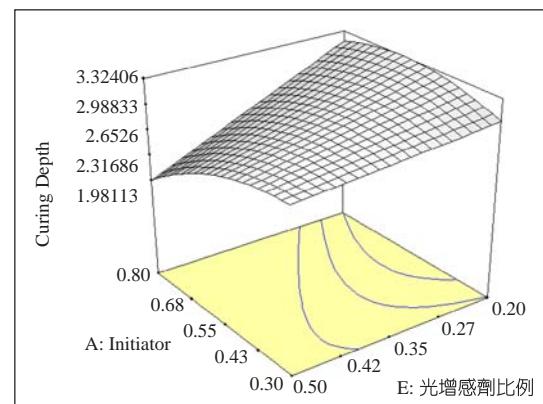
▲圖五 交聯密度實驗中，曝光量 = 250mJ/cm<sup>2</sup>、起始劑含量與單體含量之反應曲面圖



▲圖七 交聯密度實驗中，高起始劑含量、曝光量與單體含量之反應曲面圖



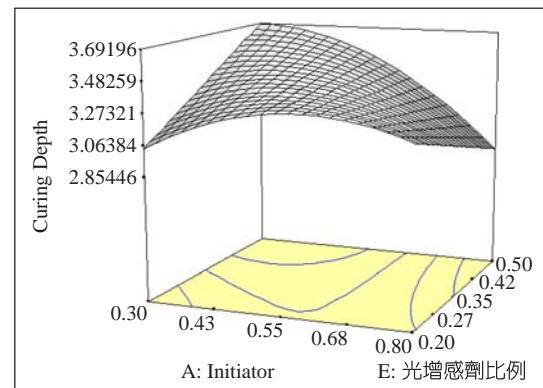
▲圖六 交聯密度實驗中，低起始劑含量、曝光量與單體含量之反應曲面圖



▲圖八 交聯深度實驗中，低曝光量、起始劑含量與光增感劑比例之反應曲面圖

例、E=增感劑比例與二次因子A<sup>2</sup>、D<sup>2</sup>、AE、BE顯著，其重要因子可發現與交聯密度有部份不同，也就是交聯深度不受單體含量影響，而增感劑比例與起始劑含量、曝光量的交互作用會影響交聯深度，其二次模擬方程式為：

$$\begin{aligned} \text{Curing Depth} = & 3.5 - 0.17 \times A + 0.22 \times B + 0.19 \times D \\ & - 0.14 \times E - 0.21 \times A^2 - 0.13 \times D^2 \\ & - 0.25 \times A \times E + 0.22 \times B \times E \end{aligned}$$



▲圖九 交聯深度實驗中，高曝光量、起始劑含量與光增感劑比例之反應曲面圖



同時軟體可繪製出其各重要因素間交互作用結果之等效應曲線圖與反應曲面圖，其中值得注意的是曝光量高低不同時，對起始劑與光增感劑配比的不同。

圖八顯示低曝光量欲得較好的交聯深度時，光增感劑比例選擇低較好，而不管光增感劑比例如何變化，起始劑量有中心較佳值；而高曝光量時顯示光增感劑比例高，起始劑比例低較好（見圖九）。

## 結論

彩色濾光片用光阻開發，理論發展成熟，材料選擇也經驗證有效，它面臨的問題是需能依客戶對品質規範之需要而客制化設計與量產，並能快速應對下游的需求變化，是提升彩色濾光片及LCD產業競爭力的實質關鍵因素，因此反應曲面法在彩色濾光片相關光阻的開發上有相當大的幫助。

實驗設計法成功的關鍵因素，首先要充分了解問題的本質，包含團隊工作的討論過程、實驗方法的選擇、因子選定與範圍、反應變數與可靠度關係，和清楚的實驗策略，包含實行篩選實驗（2水準）與重要因子進行RSM過程中討論，以執行腦力激盪與特性要因圖分析，（魚骨圖）以系統性選擇因子與變數是重要的。實驗中為提升實驗數據的精確性，必須事先確認量測工具的準確性與再現性，並儘量減少人為誤差。最好採隨機方式進行實驗順序來平衡Noise對反應變數的影響，若可進行重覆實驗或Fold-over design 將可增加統計檢定的可信度。還可考慮納入集區(Blocking)變數

來增加實驗精確度，避免受批次、時間、設備差異影響。最後一定要執行驗證實驗來確認再現性，若實驗驗證結果未達目標，則有可能是選擇錯誤實驗方法，選擇不恰當的因子與變數，尚有未發現的因子與統計分析技術不當等原因，應該重新討論再次修正後進行第二次實驗。

反應曲面法是結合特定數學與統計方法之集合所衍生出的方法論，其目的在協助研究人員對科學系統或工程製程問題中製程改善、最佳產品設計、系統最佳化等問題，提供一套分析、求解程序。不可迷信它可解決所有問題，大部分應用時機均屬於工程問題研究，一些基礎的科學研究，還是需理論的推導與逐一實驗的探索。

## 致謝

最後感謝每日在實驗室辛勤工作的有機光子實驗室同仁，辛苦外還能堅持好的研究品質。也感謝材料所品保室高嘉鴻主任與賴淑媚小姐在品質手法孜孜不倦的推動幫忙。希望品質手法的推動與經驗的分享能幫助相關研究人員。

## 參考文獻

1. Sarah J. Hood and Peter D. Welch, Proceedings of the 1993 Winter Simulation Conference (1993).
2. R. H. Myers and D. C. Montgomery, Response Surface Methodology : Process and Product Optimization Using Designed Experiments, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, New York, NY (2002).
3. 實驗計畫法－製程與產品最佳化，葉怡成著，五南出版社出版。
4. STATISTICA6.0版與統計資料分析，唐麗英、王春和合著，儒林圖書公司出版。
5. 紫外線硬化樹脂，加藤清視著。
6. 增感劑，德丸克己、大河原信合著，講談社出版。