

# 國立交通大學

## 應用化學系

### 博士論文

第一部：矽氧烷與亞醯胺改質之環氧樹脂製備、交聯行為、物性及在  
電子領域應用

**Preparations, Curing Behaviors, Properties of Siloxane-and Imide-modified  
Epoxyes and Their Applications in Electronics**

第二部：矽氧烷與亞醯胺改質之雙丙烯雙酚、矽氧烷改質雙馬來亞醯  
胺與氰酸酯互穿高分子交聯網之材料之研究

**Interpenetrating Polymer Networks Based on Siloxane-and Imide-modified  
Diallyl Bisphenol/Siloxane-containing Maleimide and Cyanate Ester**

研 究 生：李巡天

指 導 教 授：林木獅 教授

中 華 民 國 九 十 四 年 六 月

第一部：矽氧烷與亞醯胺改質之環氧樹脂製備、交聯行為、物性及在  
電子領域應用

**Preparations, Curing Behaviors, Properties of Siloxane-and Imide-modified  
Epoxyes and Their Applications in Electronics**

第二部：矽氧烷與亞醯胺改質之雙丙烯雙酚、矽氧烷改質雙馬來亞醯  
胺與氰酸酯互穿高分子交聯網之材料之研究

**Interpenetrating Polymer Networks Based on Siloxane-and Imide-modified  
Diallyl Bisphenol/Siloxane-containing Maleimide and Cyanate Ester**

研 究 生：李巡天

Student：Hsun-Tien Li

指 導 教 授：林木獅

Advisor：Mu-Shih Lin



Submitted to The department of Applied Chemistry

College of Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Doctor

in

Applied Chemistry

June 2005

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十四年六月

## 摘要

第一部分的研究是先用 nadic anhydride 與 tetramethyldisiloxane 進行矽氫化反應得到 5,5'- ( 1,1,3,3-tetramethyl-1,1,3,3-disiloxanedialyl ) -bis-norbornane-2,3- dicarboxylic anhydride (I)；再藉由亞醯胺反應製備矽氧烷亞醯胺改質之雙胺化合物(IIb)與雙酚化合物(II)；最後利用此雙酚化合物(II)與 epichlorohydrin 反應得新型主鏈含矽氧烷及亞醯胺基團改質之環氧樹脂(III)。分別將此環氧樹脂(III)、商用環氧樹脂(830LVP) 與此矽氧烷雙酸酐(I)以不同當量比(1/1,1/0.8)混合配料。以 FT-IR 及動態 DSC 研究其交聯行為，可以瞭解到此新型環氧樹脂的亞醯胺基團對環氧樹脂交聯反應具有很明顯的催化效應，使得其交聯只有 12.4KJ/mole-14.40KJ/mole 較商用環氧樹脂反應活化能低。硬化後材料 DMA 和 TMA 研究都顯示主鏈上同時含有柔軟的矽氧烷結構和硬質之亞醯胺基團 (bis-norborane-2,3-dicarboximide)設計使得此材料具有較高  $Tan\delta$  以及較大的轉移能量而達到增韌效果，同時又可以保有相當高的玻璃轉移溫度(III/I=1/1 之  $T_g$ : 173.2°C)。矽氧烷與亞醯胺基團也使得此硬化材料展現良好的耐熱特性，尤其是裂解過程中材料本身會產生片狀的 Silicon dioxide 而阻礙了裂解反應的進行。

此新型硬固型環氧樹脂擁有這樣良好的熱機械特性、熱安定性以及較低的介電常數都說明是十分適合應用於高性能半導體構裝產品上。所以在本研究的第四章就用此矽氧烷與亞醯胺改質之環氧樹脂(III)、雙酚化合物(II)與雙胺化合物(IIb)以當量比 1/0.7/0.3 製備驅動 IC 用內部聯通材料。構裝實驗結果顯示此三種化合物結構中的亞醯胺基團對交聯硬化反應具有催化效果使得系統 180 /10s. 就可以有高且穩定的接著強度 (1108.5gf)。也由於此熱固型材料本身有柔軟性的矽氧烷基團所以不需要聚摻混增韌劑 (如:CTBN)就可以製成薄膜材料；而將低吸濕特性的矽氧烷基團設計在分子主鏈上，又在其鄰近就伴隨有硬質基團的亞醯胺基團，所以用此系統製備之內部聯通材料在構裝信賴性測試上顯示電性非常的穩定，完全符合驅動 IC 構裝產品特性需求。

同時在第五章研究中用此矽氧烷與亞醯胺改質之環氧樹脂(III)與雙胺化合物(IIb)以當量比 1/1 在不外加柔軟劑下製備適用於高密度印刷電路基板增層製程用之環氧樹脂材料。因其組成物：環氧樹脂、硬化劑，都同時存在有低吸濕性、低介電常數之矽氧烷 (silylnorbornane)基團及耐熱性佳、高  $T_g$  之亞醯胺基團，硬化材料之  $T_g$  為 172.74 且接著強度為 1.34kg/cm，這顯示由此新型環氧化合物製成之材料可以同時保有矽氧烷、亞醯胺及環氧樹脂原有的機械特性。經過完整的熱壓合製程、雷射鑽孔、化學鍍銅以及電

性信賴性評估，結果顯示此薄膜介電絕緣材料可以滿足高密度印刷電路基板增層製程特性要求，並具有大幅降低材料成本之功效。

第二部分研究是合成出含矽氧烷之雙馬來亞醯胺之化合物 (Si-BMI) 及矽氧烷及亞醯胺結構改質之雙丙烯雙酚化合物 (Si-DABP)，其結構均以經由<sup>1</sup>H NMR及FT-IR之鑑定無誤，再與低介電之氰酸酯 (Cyanate ester: LECY) 形成 IPNs 系統 (Si-BMI/Si-DABP/LECY)。Si-BMI/Si-DABP/LECY系統經由詳細的FT-IR動力學研究發現：Si-DABP的OH基因IPN的網目互鎖結構使得對Cyanate ester環化交聯催化果消失，跟一般具有催化效果的預期相反。Cyanate ester環化交聯反應動力學是符合一級的未催化反應動力學且反應活化能也因IPNs的立體障礙變得較高。

硬化後的熱固型材料具有很高的玻璃轉移溫度 ( $T_g=243$  )，擁有良好的熱穩定性 ( $T_{5wt\%}=311$  )，同時具有較低的介電常數 (2.8) 及良好的柔韌性，這是因為組成中含有柔軟矽氧烷的雙馬來亞醯胺 (Si-BMI)，因此可以成功的降低介電常數及增加韌性。更因為IPN的互穿網目結構以及norborane-2,3-dicarboximide基團，使得材料雖然加入柔軟的部分卻仍可以保有材料的機械特性。

關鍵字：矽氧烷與亞醯胺改質環氧樹脂、矽氧烷與亞醯胺改質雙丙烯雙酚、交聯活化能、熱裂解活化能、互穿透高分子交聯網、動態 FT-IR、氰酸酯反應動力學、電子應用材料

## ABSTRACT

Hydrosilylation of nadic anhydride with tetramethyldisiloxane yielded 5,5'-(1,1,3,3-tetramethyl-Disiloxane-1,3-diyl)-bis-norborane-2,3-dicarboxylic anhydride (I), which further reacted with 4-aminophenol to give N,N'-bis(4-hydroxyphenyl)-5,5'-bis-(1,1,3,3-tetramethyl disiloxane-1,3- diyl)- bisnorborane-2,3-dicarboximide (II). Epoxidation of II with excess epichlorohydrin formed a siloxane- and imide-modified epoxy oligomer (i.e diglycidyl ether of N,N'-bis(4-hydroxyphenyl)- 5,5'-bis- (1,1,3,3-tetramethyl disiloxane-1,3-diyl)- bisnorborane-2,3-dicarboximide) (III). Various equivalent ratios of III/ I for 1/1, 1/0.8 and Bisphenol F epoxy (830LVP DIC Co.)/I for 1/1, 1/0.8 were prepared and cured to produce four crosslinked materials. Kinetic analysis was studied with dynamic DSC, which revealed a relatively lower curing activation energy of III/I systems, because the tertiary amine on the imide group catalyzed the curing reaction. Thermal and dynamic mechanical properties were investigated with TMA and DMA. It is noted that each of these two materials show glass transition temperature ( $T_g$ ) higher than 160 with moderate moduli. These phenomena were interpreted by the fact that the siloxane group in III toughened the crosslinked materials. The thermal degradation kinetics was studied with dynamic TGA and the estimated apparent activation energy were 111.40 (in  $N_2$ ), 117.80 (in air), 149.18 (in  $N_2$ ) for III /I =1/ 0.8, and 147.61KJ/Mole (in air) for III/I=1/1, respectively. White flaky residue of the TGA char was confirmed to be silicone dioxide, which formed a barrier at the surface of the polymer matrix and, in part, accounts for the unique heat resistance of this material.

We choose the equivalent ratio of III/II/IIb=1/0.7/0.3 to fabricate the film type interconnecting material for LCD drive IC application. The film type material could achieve the stable and good bonding adhesion within 5seconds on 180 since the tertiary amine on the imide group catalyzed the curing reaction. We evaluated the reliability performance and the result revealed the siloxane and imide modified epoxy possess the excellent properties for LCD package. Furthermore, the III/IIb=1/1 could be directed coated on the PET substrate without

adding flexible additives. The Tg of the film type dielectric material is 172.74 and the PCB bonding strength is 1.34kg/cm after heating compressing process. The film type material could be competent the complete build-up PCB processing evaluations.

**Keywords:** Siloxane- and imide-modified epoxy oligomer; crosslinked materials; dynamic mechanical properties; thermal degradation kinetics; apparent activation energy ; SiO<sub>2</sub> char residual.  
Electronic application





## 誌 謝

時光飛逝！離我碩士畢業已是十二年前的往事了。還記得剛離開校園到工研院工作時，我就一直盼望能再有機會重回校園完成我的學業。很感謝工研院的各級長官給了我這樣寶貴的在職進修機會讓我得以重回恩師 林木獅博士的門下繼續做研究。

六年的博士研究期間，非常感謝恩師對我學業上的悉心指導，尤其是我每篇論文發表前，老師總是費心地逐字逐句幫我修改與指正，讓我不僅是在專業知識上有所精進，更是對老師嚴謹的求真求實的治學態度有深一層體會。在此向恩師獻上最崇高的敬意。

感謝口試委員 李選能教授、劉大俊教授、林金福教授以及黃華宗教授於百忙之中費心審閱學生的論文，並給予很多的指正使論文更加充實。

感謝工材所 李宗銘經理、黃淑禎小姐、陳凱琪小姐、許嘉紋小姐以及田運宜博士對我工作上的協助與啟發。特別是淑禎和凱琪，是我在材料所最親密的工作伙伴，我們一起面對過很多的挑戰，也一起完成了很多件美好的研究工作。

感謝我的太太 鄧玉雪小姐，非常謝謝她對我工作上的全力支持以及生活上的細心照顧。每當我看到她在電腦前幫我排版、校稿的身影，總讓我仿佛回到十二年前我們一起求學的時光，感到一路走來的相互扶持。也要感謝我的兩個小天使 欣妍和欣博帶給我許多的快樂和憂愁，讓我深深地體會到快樂與憂愁都是上帝的恩典。

最後更要感謝養育我、栽培我的父母和我最摯愛的弟弟 李巡宇，感謝他們在我生活及精神上給予的最大支持和鼓勵，讓我在任何時候都可以沒有後顧之憂的專心研究。茲將這份得來不易的成果獻給雙親，願二老健康長壽。

# 目 錄

中文提要	.....	i
英文提要	.....	iii
誌謝	.....	v
目錄	.....	vi
表目錄	.....	ix
圖目錄	.....	x
Scheme 目錄	.....	xiii
第一部分		
一、	緒論.....	1
二、	文獻回顧.....	2
2.1	半導體封裝技術簡介.....	2
2.1.1	底部充填膠材料(Capillary flow underfill).....	2
2.1.2	迴焊底部充填(Reflow Underfill).....	3
2.1.3	整體覆晶封裝.....	4
2.1.4	高密度覆晶構裝內部聯通材料.....	5
2.2	環氧樹脂簡介.....	8
2.3	聚亞醯胺簡介.....	11
2.4	矽氧烷簡介.....	13
2.5	含矽氧烷之亞醯胺或環氧樹脂之補強材料文獻回顧.....	13
2.5.1	含亞醯胺基環氧樹脂相關文獻.....	13
2.5.2	含矽氧烷聚亞醯胺相關文獻.....	17
2.5.3	含矽氧烷環氧樹脂相關文獻.....	18
三、	含矽氧烷與亞醯胺之環氧樹脂及其硬化劑合成研究.....	26
3.1	前言.....	26
3.2	藥品與材料.....	26
3.3	試藥純化.....	27
3.4	儀器與設備.....	27
3.5	實驗與測試.....	28
3.5.1	合成 5,5'-(1,1,3,3-tetramethyl-Disiloxane-1,3-diyl)-bis-norborane-2,3-dicarboxylic anhydride (I).....	28
3.5.2	合成 N,N'-bis(4-hydroxyphenyl)-5,5'-(1,1,3,3-tetramethyl-1,1,3,3-disiloxanediy)l)-bis-norbornane-2,3-dicarboximide( ).....	29
3.5.3	合成 diglycidyl ether of N,N'-bis-(4-hydroxyphenyl)-5,5'-bis-(1,1,3,3-tetramethyl disiloxane -1,3-diyl)-bis-norborane-2,3-dicarboximide oligomer (III).....	30
3.5.4	合成 N,N'-bis(4-aminophenyl)-5,5'-(1,1,3,3-tetramethyl-1,1,3,3-disiloxanediy)l)-bis-norbornane-2,3-dicarboximide ( b).....	31
3.5.5	環氧當量重量測定.....	31
3.6	結果與討論.....	32
3.6.1	含矽氧烷雙酸酐 (I).....	32
3.6.2	含矽氧烷雙亞醯胺之雙酚化合物 (II).....	35
3.6.3	含矽氧烷及亞醯胺之環氧樹脂( ).....	36
3.6.4	含矽氧烷雙亞醯胺之雙胺化合物( b).....	38



3.7	結論	40
四、	矽氧烷與亞醯胺改質之環氧樹脂交聯硬化行為與物性研究	42
4.1	前言	42
4.2	藥品與材料	42
4.3	實驗與測試	43
4.3.1	硬化反應系統製備	43
4.3.2	動態 DSC 分析	43
4.3.3	凝膠分率之測試(Gel fraction)	43
4.3.4	材料玻璃轉移溫度(Tg)和熱膨脹係數(CTE)分析	43
4.3.5	材料動態機械特性分析 (DMA)	43
4.3.6	材料熱安定性分析(TGA)	44
4.3.7	耐酸鹼性測試	44
4.3.8	介電常數的測試	44
4.4	結果與討論	44
4.4.1	動態 DSC 分析	44
4.4.2	硬化反應追蹤	49
4.4.3	凝膠分率測試	55
4.4.4	材料玻璃轉移溫度(Tg)和熱膨脹係數(CTE)分析	55
4.4.5	材料動態機械特性分析 (DMA)	56
4.4.6	熱裂解行為分析	62
4.4.7	熱裂動力學分析	64
4.4.8	耐酸鹼性測試	68
4.4.9	介電常數分析	69
4.5	結論	70
五、	含矽氧烷與亞醯胺之熱固型環氧樹脂材料製備驅動 IC 內部聯通材料研究	73
5.1	前言	73
5.1.1	平面顯示器驅動 IC 構裝技術簡介	73
5.1.2	驅動 IC 構裝用異方性導電膠膜材料簡介	76
5.2	藥品與設備	77
5.2.1	藥品與材料	77
5.2.2	儀器及測試條件	78
5.3	實驗與測試	80
5.3.1	導電粉體表面處理實驗	80
5.3.2	內部聯通薄膜材料製備	81
5.3.3	內部聯通薄膜材料構裝加工性測試	81
5.3.4	內部聯通薄膜材料電性測試	81
5.4	結果與討論	82
5.4.1	導電粉體表面處理特性研究	82
5.4.2	內部聯通材料塗料製備	84
5.4.3	內部聯通薄膜材料構裝加工性測試	85
5.4.4	內部聯通薄膜材料電性測試	87
5.5	結論	90
六、	含矽氧烷與亞醯胺之環氧化合物製備印刷電路板增層製程用薄膜型介	92

	電絕緣材料研究.....	92
6.1	前言.....	92
6.2.	藥品與材料.....	94
6.3	實驗與測試.....	95
6.3.1	薄膜型介電絕緣材料製備.....	95
6.3.2	薄膜型介電絕緣材料熱壓製程測試.....	95
6.3.3	增層微影和蝕刻製程.....	95
6.3.4	雷射鑽孔製程測試.....	95
6.3.5	微孔化學鍍銅可行性及信賴性測試.....	95
6.4	結果與討論.....	96
6.4.1	薄膜型介電絕緣材料特性.....	96
6.4.2	薄膜型介電絕緣材料熱壓製程測試.....	99
6.4.3	雷射鑽孔製程測試.....	100
6.4.4	微孔化學鍍銅可行性.....	101
6.4.5.	微孔導通信賴性測試.....	102
6.5	結論.....	104
七、	結論.....	107
第二部分		
	前 言.....	108
	試 藥.....	111
	實驗部分.....	112
	結果與討論.....	117
	結 論.....	134
自傳	.....	



## 表目錄(第一部分)

Table 1	環氧樹脂在電子工業上常用的交聯劑	8
Table 2	矽氧烷環氧化合物結構及特性	22
Table 3	830LVP/I 與 III/I 系統動態 DSC 結果表	47
Table 4	交聯產物之凝膠分率結果	55
Table 5	交聯產物之 TMA 分析結果	56
Table 6	830LVP/I 與 III/I 系統機械特性表	58
Table 7	III/I 系統 Dynamic TGA 表	68
Table 8	830LVP/I 及 III/I 系統耐酸鹼測試結果表	69
Table 9	830LVP/I 與 III/I 系統之介電常數	69
Table 10	內部聯通材料塗料特性表	85
Table 11	純樹脂配方構裝推力(加工性)評估	86
Table 12	Intercon-CP 薄膜系統構裝推力(加工性)評估	87
Table 13	Intercon-Ni 薄膜系統構裝推力(加工性)評估	87
Table 14	Intercon-Ni 系統高溫高濕阻值變化	88
Table 15	高密度印刷電路板技術發展表	93
Table 16	薄膜介電材料特性	99
Table 17	雷射鑽孔(D=100 $\mu$ m)可行性表	100
Table 18	100 $\mu$ m 及 150 $\mu$ m 雷射微孔導通電阻值	103

## 表目錄(第二部分)

Table1.	IPNs 系統 Dynamic DSC	130
Table 2	凝膠分率測試結果	131

## 圖目錄(第一部分)

Figure 1	底部充填覆晶封裝製程示意圖	2
Figure 2	覆晶底部充填殘留空洞示意圖	3
Figure 3	覆晶迴焊底部充填製程示意圖	4
Figure 4	真空整體覆晶封裝製程示意圖	5
Figure 5	覆晶構裝整體固態模封製程示意圖	5
Figure 6	異方性導電膠膜覆晶構裝製程示意圖	6
Figure 7	環氧樹脂的三種硬化反應	9
Figure 8	酸酐硬化環氧化合物反應機制(一)	9
Figure 9	酸酐硬化環氧化合物反應機制(二)	10
Figure 10	縮合聚亞醯胺的反應	11
Figure 11	BMI 合成示意圖	12
Figure 12	矽氧烷雙酸酐化合物(I)之 <sup>1</sup> H核磁共振光譜	33
Figure 13	矽氧烷雙酸酐化合物( ) <sup>13</sup> C核磁共振光譜	34
Figure 14	矽氧烷雙酸酐化合物( )之紅外線光譜	34
Figure 15	矽氧烷亞醯胺雙酚化合物(II)之 <sup>1</sup> H核磁共振光譜	35
Figure 16	矽氧烷亞醯胺雙酚化合物(II)之 <sup>13</sup> C核磁共振光譜	36
Figure 17	矽氧烷亞醯胺雙酚化合物(II)之紅外線光譜	36
Figure 18	矽氧烷亞醯胺環氧化合物(III)之 <sup>1</sup> H核磁共振光譜	37
Figure 19	矽氧烷亞醯胺環氧化合物(III)之 <sup>13</sup> C核磁共振光譜	37
Figure 20	矽氧烷亞醯胺環氧化合物(III)之紅外線光譜	38
Figure 21	矽氧烷亞醯胺雙胺合物(IIb)之 <sup>1</sup> H核磁共振光譜	39
Figure 22	矽氧烷亞醯胺雙胺合物(IIb)之 <sup>13</sup> C核磁共振光譜	39
Figure 23	矽氧烷亞醯胺雙胺合物(IIb)之紅外線光譜	40
Figure 24	830LVP/I=1/1 之Dynamic DSC	45
Figure 25	830LVP/I=1/0.8 之Dynamic DSC	45
Figure 26	III/I=1/1 之Dynamic DSC	46
Figure 27	III/I=1/0.8 之Dynamic DSC	46
Figure 28	830LVP/I=1/1 之 Dynamic DSC	48
Figure 29	830LVP/I=1/0.8 之 Dynamic DSC	48
Figure 30	III/I=1/1 之 Dynamic DSC	49
Figure 31	III/I=1/0.8 之 Dynamic DSC	49
Figure 32	830LVP/I=1/1 系統之FT-IR光譜	51
Figure 33	830LVP/I=1/0.8 系統之FT-IR光譜	52
Figure 34	III/I=1/1 系統之FT-IR光譜	53
Figure 35	III/I=1/0.8 系統之FT-IR光譜	54
Figure 36	830LVP/I 及III/I 系統之TMA圖	56
Figure 37	830LVP/I 及III/I 系統之Tan δ圖	57

Figure 38	830LVP/I 及 III/I 系統之 Storage modulus ( $E'$ )圖	58
Figure 39	Mapping-SEM of 830LVP/I=1/1. (a) SEM , (b) C-Mapping SEM , (c) O-Mapping SEM , (d) Si-Mapping SEM	59
Figure 40	Mapping-SEM of 830LVP/I=1/0.8. (a) SEM , (b) C-Mapping SEM , (c) O-Mapping SEM , (d) Si-Mapping SEM	60
Figure 41	Mapping-SEM of III/I=1/1. (a) SEM , (b) C-Mapping SEM , (c) O-Mapping SEM , (d) Si-Mapping SEM	61
Figure 42	Mapping-SEM of III/I=1/1. (a) SEM , (b) C-Mapping SEM , (c) O-Mapping SEM , (d) Si-Mapping SEM	62
Figure 43	III/I 系統之 TGA圖	63
Figure 44	830LVP/I 與 III/I 系統 TGA比較圖	63
Figure 45	III/I系統熱裂解殘留物成份分析圖	64
Figure 46	III/I Dynamic TGA (a) III/I=1/1 in N <sub>2</sub> ; (b) III/I=1/1 in Air ; III/I=1/0.8 in N <sub>2</sub> ; III/I=1/0.8 in Air	66
Figure 47	TAB構裝示意圖 (摘錄自: SID'01 short course (S-2))	74
Figure 48	COF構裝示意圖 (摘錄自: SID'01 short course (S-2))	75
Figure 49	COG構裝示意圖 (摘錄自: SID'01 short course (S-2))	75
Figure 50	ACF構裝流程圖	77
Figure 51	導電粉體表面處理量TGA分析:(a) 未處理;(b)第一階段處理;(c)第二階段處理	82
Figure 52	導電粉體表面處理SEM分析:(a) 未處理;(b)第一階段處理;(c)第二階段處理	83
Figure 53	導電粉體抗沈降測試	84
Figure 54	薄膜材料反應性(DSC)分析	85
Figure 55	Intercon-Ni 高溫高濕推力實驗	89
Figure 56	IC 構裝架構圖	92
Figure 57	增層製程雷射鑽孔剖面示意圖	93
Figure 58	增層製程用薄膜型介電絕緣材料	97
Figure 59	增層製程用薄膜型介電絕緣材料 (a) DSC圖 ; (b)硬化後TMA圖	98
Figure 60	增層製程用薄膜型介電絕緣材料接著強度	98
Figure 61	熱壓合樣品圖	100
Figure 62	熱壓合樣品剖面圖	100
Figure 63	孔徑(75 $\mu$ m)有膠渣殘存	101
Figure 64	孔徑(100 $\mu$ m)無膠渣	101
Figure 65	雷射鑽孔化學鍍銅剖面圖	101
Figure 66	增層製程通孔焊錫測試剖面圖(a) 頂部無脫層 (b)底部無脫層	102

## 圖目錄(第二部分)

Figure 1	Si-DABP/Si-BMI/LECY 系統相減圖@145°C	120
Figure 2	Difference Spectra of Si-DABP/SI-BMI/LECY@145°C	121
Figure 3	Si-DABPA/Si-BMI/LECY@145°C 之 FT-IR 疊圖	122
Figure 4	2 <sup>nd</sup> . Difference Spectra of IPN@145°C	122
Figure 5	Difference Spectra of Comparative reaction@145°C	123
Figure 6	Difference Spectra of Comparative reaction@145°C	124
Figure 7	2 <sup>nd</sup> . Difference Spectra of Comparative reaction@145°C	124
Figure 8	IPNs 系統中 OCN 轉化率對時間變化圖	127
Figure 9	IPNs 系統 LECY 之 OCN 的 -Ln(1-P)對時間變化圖	129
Figure 10	IPNs 系統 LECY 之 OCN 反應之 -Lnk 對 1/T 圖	129
Figure 11	IPNs 系統之 dynamic DSC 圖	130
Figure 12	IPNs 系統 TGA 圖	131
Figure 13	IPNs 系統 TMA 圖	132
Figure 14	IPNs 系統之 Loss Modulus, (A) Si-BMI/LECY; (B) IPNs; (C) Si-DABP/Si-BMI	133





## Scheme 目錄(第一部分)

Scheme 1	矽氧烷雙酸酐化合物(I)合成示意圖·····	28
Scheme 2	矽氧烷與亞醯胺雙酚化合物(II)合成示意圖·····	29
Scheme 3	矽氧烷與亞醯胺環氧化合物(III)合成示意圖·····	30
Scheme 4	矽氧烷與亞醯胺雙胺化合物(IIb)合成示意圖·····	31

## Scheme 目錄(第二部分)

Scheme 1.	Si-DABP and Si-BMI 合成示意圖·····	114
Scheme 2	Si-DABP/Si-BMI 和 LECY 之 IPNs 示意圖·····	125
Scheme 3	Simon 等推測之 Cyanate ester 催化聚合反應機構·····	127

