

國立交通大學  
應用化學研究所  
碩士論文

模擬探討以減光-緣邊-外架型相移圖罩製備  
45 奈米接觸孔與以散條提升 28 奈米線焦深



The Simulation Studies of Fabrication for 45 nm  
Contact Hole by Using Attenuated-Rim-Outrigger  
Phase Shifting Mask and Increasing Depth of  
Focus for 28 nm Line by Using Scattering Bar

研究生：林建維  
指導教授：龍文安 博士

中華民國九十八年六月

模擬探討以減光-緣邊-外架型相移圖罩製備

45 奈米接觸孔與以散條提升 28 奈米線焦深

The Simulation Studies of Fabrication for 45 nm Contact Hole by  
Using Attenuated-Rim-Outrigger Phase Shifting Mask and  
Increasing Depth of Focus for 28 nm Line by Using Scattering Bar

碩士生：林建維

Student: Lin Chien-wei

指導教授：龍文安博士

Advisor: Dr. Loong Wen-an



A Thesis  
Submitted to Institute of Applied Chemistry  
College of Science  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science  
in Applied Chemistry  
June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

# 模擬探討以減光-緣邊-外架型相移圖罩製備 45 奈米接觸孔與以散條提升 28 奈米線焦深

碩士生：林建維

指導教授：龍文安博士

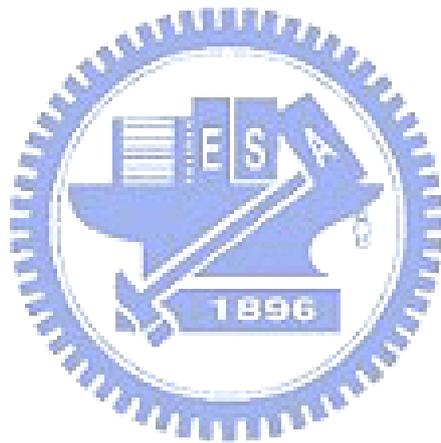
國立交通大學應用化學研究所

## 摘要

本論文使用美國 KLA-Tencor 之光學微影模擬軟體 ProLith v. 9.0，主要探討以減光-緣邊-外架型相移圖罩製備 45 奈米接觸孔與以散條提升 28 奈米線焦深。重要發現如下：

1. 製備 45 奈米二維接觸孔，使用本論文首創之減光-緣邊-外架型相移圖罩，並搭配圓環偏軸發光，焦深最佳，圖罩偏差增大因子亦維持近於 1。此搭配缺點為照射劑量甚高，易造成側葉光強過強而顯影。
2. 製備 28 奈米一維線條，以正偏差法搭配緣邊式減光散條與中央式減光散條，提升焦深效果最佳，可改善禁止間距。正偏差法與加入側面式減光散條此二法對焦深提升有近似效果。由隙之空間影像觀察，當邊端效應產生之干涉波開始分離時，方可加入中央式減光散條，若干涉波尚未分離，加入中央式減光散條反而影響主線條空間影像，降低焦深。

3. 製備孤立線，不受半間距解像度通式  $R = K_1 \frac{\lambda}{\sin \beta}$  束縛，當  $NA=1.35$ ，正偏差法可製備 22 與 16 奈米孤立線。若使用杜邦第二代濕浸式液體（折射率  $n=1.64$ ），提高主線條透射度， $NA$  放大至 1.50，可製備 12 奈米與 8 奈米孤立線。



# The Simulation Studies of Fabrication for 45 nm Contact Hole by Using Attenuated-Rim-Outrigger Phase Shifting Mask and Increasing Depth of Focus for 28 nm Line by Using Scattering Bar

Student: Lin Chien-wei

Advisor: Dr. Loong Wen-an

Institute of Applied Chemistry, National Chiao Tung University

## Abstract

The lithographic simulation software of Prolith v. 9.0 from USA KLA-Tencor was used in this thesis. The main studies are fabrication for 45 nm contact hole by using attenuated-rim-outrigger phase shifting mask and increasing depth of focus (DOF) for 28 nm line by using scattering bar.

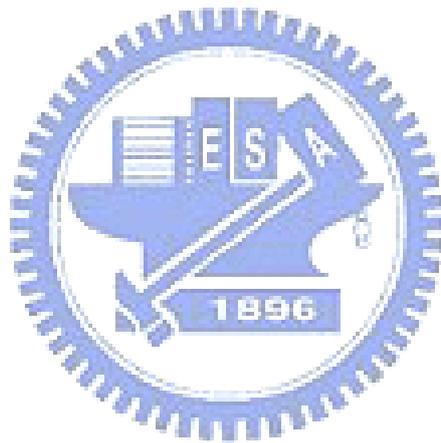
Some important findings are reported as following:

1. The fabrication studies for 2-dimension 45 nm contact hole, using firstly reported attenuated-rim-outrigger phase shifting mask by this thesis, and combined with annular off-axis illumination, DOF was found to be the best, mask error enhancement factor can also be maintained nearly in 1. The shortcoming of this combination was very high exposure dose, easy to cause excessively strong sidelobe intensity, and therefore developed.

2. The fabrication for 1-dimension 28 nm line, the positive bias method combined with rim attenuated scattering bar (R-ASB) and center attenuated scattering bar (C-ASB), DOF increasing effect was found to be the best, forbidden pitches can be improved. The two methods which are positive bias and the adding of side attenuated scattering bar (S-ASB) have shown to have approximate effect to the DOF increase. By observation of aerial image from space, C-ASB can be added only when the interference waves formed by edge effect began to separate. If the interference waves have not yet separated, the adding of C-ASB will affect the aerial images of main lines instead, and DOF will be decreased.

3. The fabrication of isolated lines will not be hampered by the general formula of half pitch resolution ( $R = K_1 \frac{\lambda}{\sin \beta}$ ). When NA was set as 1.35, 22 nm and 16 nm isolated lines can be fabricated by positive bias. If the Dupont second generation

immersion liquid (refractive index  $n=1.64$ ) is used, transmittance of main lines of attenuated phase shift mask raised, and NA enlarged to 1.50, 12 nm and 8 nm isolated lines can be fabricated.



## 誌 謝

感謝吾師龍文安教授在於學生就學期間給予教導與鼓勵，除了學業之外，在生活禮儀、待人處事方面的教導，也讓我獲益良多，在此謹向老師致上最誠摯的感謝。

感謝口試委員謝宗雍教授與蘇德欽教授於百忙中撥冗審閱論文，不吝指教，惠賜寶貴意見，令我獲益匪淺。

感謝台灣積體電路有限公司給予暑期實習的機會，讓我有機會與學校所學做驗證與比較，在此期間感謝蔡肇宗經理、莊勝閔先生、張岱融先生在這段時間給予的協助與鼓勵。

感謝本實驗室的黃志全學長於研究過程中給予的協助與指導；以及其他實驗室的同學仁棋、于榮、順鴻與好友昭嘉、茂菁、孝邦、志鵬、傳育、敏睿，陪伴我度過這兩年的碩士生涯，分享許多快樂與悲傷。

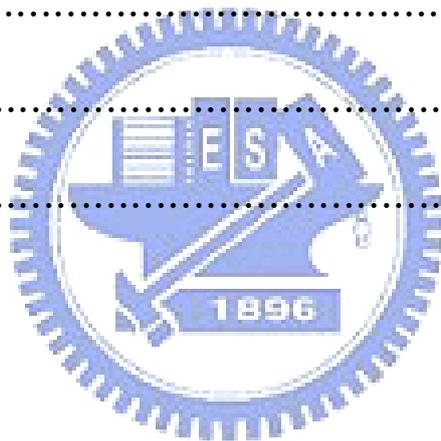
最後，要感謝我的家人，在我研究所的這兩年對我全力的支持，並於生活上給予我關懷和鼓勵，因為有你們做我的後盾，使我這兩年的生活過的更加精彩，更加充實。

謝謝你們，僅以本論文獻給老師、家人、同學與所有幫助過我的朋友。祝福大家，身體健康、萬事如意。

# 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	iii
誌 謝 .....	v
目 錄 .....	vi
表目錄 .....	viii
圖目錄 .....	ix
第一章 緒論.....	1
第二章 文獻回顧.....	5
2.1 二維接觸孔.....	5
2.2 圖罩偏差增大因子.....	9
2.3 禁止間距.....	13
2.4 近年文獻評論.....	17
第三章 模擬設計.....	23
3.1 模擬軟體.....	23
3.2 55 奈米接觸孔.....	24
3.3 45 奈米接觸孔.....	24
3.4 28 奈米線.....	25

3.5	22 奈米以下線幅	25
3.6	模擬流程規劃	27
第四章	結果與討論	31
4.1	55 奈米接觸孔	31
4.2	45 奈米接觸孔	32
4.3	28 奈米線	37
4.4	22 奈米以下線幅	44
第五章	結論	46
參考文獻		95
自傳		99



# 表 目 錄

表 1.1	ITRS 定義 2007~2015 年之微影技術路圖規範……………	48
表 1.2	ITRS 定義 2016~2022 年之微影技術路圖規範……………	49
表 3.1	55 奈米接觸孔模擬各項參數……………	50
表 3.2	45 奈米接觸孔模擬各項參數……………	51
表 3.3	28 奈米線模擬各項參數……………	52



# 圖目錄

圖 2.1	二維接觸孔之圖罩設計.....	53
圖 2.2	雙重線隙製備接觸孔方法.....	54
圖 2.3	漩渦式圖罩設計與空間影像.....	54
圖 2.4	由門檻光強的選擇決定空間影像 CD 值.....	55
圖 2.5	同調與不同調發光在不同隙寬與線寬比下之 MEEF 值	55
圖 2.6	利用橫雙圓孔探討禁止間距產生的原因.....	56
圖 2.7	偏差法與散條修正前後空間影像圖與離焦對焦深的影 響.....	57
圖 2.8	散條的種類與修正情形.....	58
圖 2.9	各式散條的特色與其放置位置.....	59
圖 2.10	側壁間隙層製備 32 奈米密集線流程圖 .....	60
圖 2.11	改良式雙成型製程：(a) 特殊阻劑固化 (b) 正與負型 阻劑交替使用 (第一次正型，第二次負型).....	60
圖 2.12	雙重圓環與雙重橫雙扇面發光.....	61
圖 3.1	55 奈米接觸孔模擬圖罩設計.....	62
圖 4.1	改變接觸孔外架長度之照射寬容度對焦深圖：(a) 間 距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米.....	63

圖 4.2	改變接觸孔外架寬度之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米	64
圖 4.3	改變外架與接觸孔距離之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米	65
圖 4.4	改變接觸孔圖罩偏差之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米	66
圖 4.5	改變接觸孔邊飾大小之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米	67
圖 4.6	改變接觸孔減光背景層透射度 $T$ 之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米	68
圖 4.7	55 奈米接觸孔，改變 NA 與偏軸發光模式之間距與焦深關係圖	69
圖 4.8	45 奈米接觸孔，圓環發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖	70
圖 4.9	45 奈米接觸孔，斜四扇面 (Normal Quasar) 發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖	71
圖 4.10	45 奈米接觸孔，正四扇面 (Cross Quasar) 發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖	72

圖 4.11	45 奈米接觸孔，圓環發光，固定間距 240 奈米，固定 $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，改變 $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對焦深圖：(a) $\sigma_{\text{inner}}=0.50$ (b) $\sigma_{\text{inner}}=0.73$ .....	73
圖 4.12	45 奈米接觸孔，斜四扇面發光，固定間距 240 奈米，固定扇角為 $20^\circ$ ，固定 $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，改變 $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對焦深圖：(a) $\sigma_{\text{inner}}=0.50$ (b) $\sigma_{\text{inner}}=0.73$ .....	74
圖 4.13	45 奈米接觸孔，正四扇面發光，固定間距 240 奈米，固定扇角為 $20^\circ$ ，固定 $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，改變 $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對焦深圖：(a) $\sigma_{\text{inner}}=0.50$ (b) $\sigma_{\text{inner}}=0.73$ .....	75
圖 4.14	45 奈米接觸孔，圓環發光， $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ， $\sigma_{\text{inner}}=0.73$ ，不同圖罩之 MEEF 對間距關係圖.....	76
圖 4.15	28 奈米線，橫雙圓孔發光，固定 $\text{NA}=1.35$ ， $\sigma_{\text{radius}}=0.1$ ，改變 $\sigma_{\text{center}}$ 之焦深與間距關係圖.....	77
圖 4.16	28 奈米線，橫雙圓孔發光，固定 $\text{NA}=1.35$ ， $\sigma_{\text{radius}}=0.2$ ，改變 $\sigma_{\text{center}}$ 之焦深與間距關係圖.....	78
圖 4.17	28 奈米線，正偏差對焦深的影響.....	79
圖 4.18	28 奈米線，加入中央式全條減光散條對焦深的影響...	80

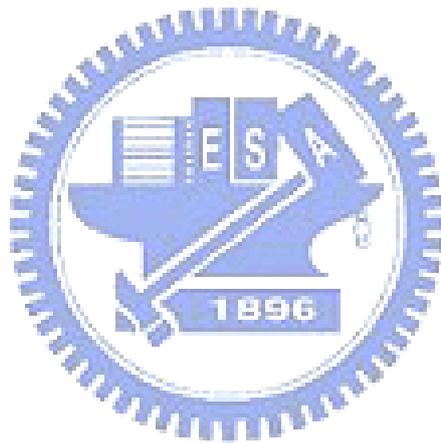
圖 4.19	28 奈米線，加入緣邊式與中央式全條減光散條對焦深的影響.....	81
圖 4.20	28 奈米線，緣邊式全條減光散條寬度對焦深的影響...	82
圖 4.21	28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度 $T=0.2$ ， 改變相位差 $\phi$ 對焦深的影響.....	83
圖 4.22	28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度 $T=0.3$ ， 改變相位差 $\phi$ 對焦深的影響.....	84
圖 4.23	28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度 $T=0.4$ ， 改變相位差 $\phi$ 對焦深的影響.....	85
圖 4.24	28 奈米線，加入與主線條相同透射度與相位差之側面 式散條與中央式散條對焦深的影響.....	86
圖 4.25	邊端效應.....	87
圖 4.26	隙左右兩邊產生振鈴效應之干涉波.....	87
圖 4.27	28 奈米線，加入與主線條相同透射度之側面式散條與 中央式散條之空間影像：(a) 間距 160 奈米 (b) 間距 170 奈米.....	88
圖 4.28	28 奈米線，以三種不同方法模擬各間距之 MEEF 情形	89
圖 4.29	28 奈米線，正偏差法，固定顯影時間，改變照射劑量 與固定照射劑量，改變顯影時間對焦深之影響.....	90

圖 4.30 22 奈米線，正偏差對焦深的影響..... 91

圖 4.31 16 奈米線，正偏差對焦深的影響..... 92

圖 4.32 12 奈米線，正偏差對焦深的影響..... 93

圖 4.33 8 奈米線，正偏差對焦深的影響..... 94



# 第一章 緒論

1948年6月30日，貝爾實驗室(Bell Labs)發表一種體積很小，但是卻可以代替真空管的電晶體，而對於發明電晶體最直接的三個人—蕭克利(William Shockley, 1910-1989)，巴丁(John Bardeen, 1908-1991)和布拉頓(Walter Brattain, 1902-1987)也因為此貢獻，於1956年得到諾貝爾物理獎。而電晶體的技術發展很自然的就導致了積體電路(Integrated Circuit, IC)，積體電路就是把許多分立元件製作在同一個半導體晶片上所形成的電路，1958年，德州儀器(Texas Instruments, TI)的基爾比(Jack Kilby, 1923-2005)成功製造出全球第一顆積體電路，並在1964年獲得專利，首度證明了可以在同一塊半導體晶片上能包含不同的元件。同年，快捷半導體(Fairchild Semiconductor)的諾宜斯(Robert Noyce, 1927-1990)，則使用平面工藝方法，即藉著蒸鍍金屬、微影、蝕刻等方式，解決了積體電路中，不同元件間導線連結的問題。也因為有了積體電路，才使半導體工業成了領袖絕倫的火車頭工業，並促進了電腦的普及。

60年後的今天，人類的生活已和電晶體密不可分，且為了滿足市場的須求，電子元件朝向體積更小、速度更快、耗電量更低邁進，美商英特爾公司(Intel Corporation)，是世界上最大的半導體公司，

已於 2007 年 1 月就已經成功製成全球首顆 45 奈米中央處理器 (Central Processing Unit, CPU)，32 奈米中央處理器也計畫於 2009 年第四季正式投入量產，此時正式可說半導體工業已進入 32 奈米技術節點 (Technology Node) 時代。(美國) 半導體工業協會 (Semiconductor Industry Association, SIA) 所發表的半導體國際技術路圖 (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)，為美國各地半導體的學者和業界共同預估未來演進的路圖，以及各項技術的規範。技術節點因各家廠商標準不一，為避免混淆，ITRS 已於 2005 年後不再使用此名稱，表 1.1、表 1.2 即為 ITRS 在 2007 年底所發表未來數年微影光學的規範之一。

由於積體電路佈局的線路寬度變得越來越細，光學微影 (Optical Lithography) 技術須要不斷的將光源的曝光波長縮短，以提升其解像度 (Resolution, R)，近年來微影機台的主力機種為 193 奈米氟化氫 (ArF) 準分子雷射搭配濕浸式微影 (Immersion Lithography)，並配合解像度增進技術 (Resolution Enhancement Techniques, RETs)，成功的將製程線幅推進至 32 奈米技術節點，至於之後的 22 奈米技術節點，目前以波長~13 奈米之極短紫外光微影 (Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL) [1-3]或不須圖罩之電子束直寫 (Electron Beam Direct Write, EBDW) [4-5]此二大技術最主，但尚有許多問題極須改

善，尚未達到量產須求。

在進入 32 奈米世代後，單次光學照射（曝光）已無法量產 32 奈米(含)以下之密集線，文獻常報導使用雙成型（Double Patterning）技術以製備 32 奈米密集線[6-7]。而微影製程細線化後，二維的接觸孔（Contact Hole, CH）製備通常較一維線隙困難。近年文獻報導 65 奈米以下的接觸孔，量產大都以雙成型搭配阻劑收縮（Resist Shrink）技術為主[8-9]；非量產或細線化研究則以干涉光柵（Interference Grating）搭配修剪圖罩（Trim Mask）[10-11]。上述兩種方法皆須照射（曝光）二次，且對疊對（Overlay）要求較嚴，製程相對較複雜，成本也較昂貴。

製程細線化後，為提升解像度，濕浸式微影（ $NA>1$ ）與偏軸發光（Off-Axis Illumination, OAI）是目前常用的解像度增進技術，但偏軸發光的使用，常伴隨著某些間距因繞射導致光程差（Optical Path Difference, OPD）增大，而產生焦深不足的情形，稱為禁止間距（Forbidden Pitch），須對其修正，以增進焦深，常用的方法為使用圖罩線幅略增之正偏差法（Positive Bias）、加入散條（Scattering Bar, SB）與前二者混用三法。

增進禁止間距焦深之散條，可使用遮光銘膜，缺點為散條寬度受限，因散條不可成像。在 32 奈米一維線幅，遮光銘膜散條寬度估計

低於 15 奈米，製備困難，應用將極為困難。可局部透光之嵌附層減光散條寬度可較遮光銘膜增加，製備較易，故實際應用較易，推測為未來散條使用趨勢。在 65 奈米二維接觸孔以下，焦深急速下降，以傳統之銘膜圖罩或是  $T\%=6$  之減光型相移圖罩已不符須求，須有新式圖罩設計以增進焦深。解像度與焦深如魚與熊掌，不可兼得。提升 32 奈米(含)以下一維線幅與 45 奈米(含)以下二維接觸孔之焦深，為目前半導體業界與學術界共同努力之目標。

本論文主要研究目的在於以正偏差法、減光散條與前兩者混用此三法，提升 28 奈米線隙焦深，另以實驗室自行設計之減光-緣邊-外架型 (Attenuated-Rim-Outrigger) 相移圖罩提升 45 奈米接觸孔焦深。

本論文使用著名之美商 KLA-Tencor 公司微影模擬套裝軟體 ProLith v. 9.0，並利用偏軸發光 (Off-Axis Illumination, OAI)、濕浸式微影與不同之圖罩設計，模擬 45 奈米接觸孔與 28 奈米線隙，探討重要參數如各式圖罩、間距 (Pitch)、照射寬容度 (Exposure Latitude, EL)、正規化成像對數斜率 (Normalized Image Log Slope, NILS)、散條透射度、散條相位差等對焦深 (Depth of Focus, DOF)、圖罩偏差增大因子 (Mask Error Enhancement Factor, MEEF) 之影響。上述接觸孔與線隙探討僅能集中在半孤立或孤立情況，因密集情況已無焦深與製程視窗。另外，亦嘗試模擬 22 奈米以下線幅，探討光學微影之極限。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 二維接觸孔

#### 2.1.1 嵌附式減光型相移圖罩 (Embedded Attenuated Phase Shifting Mask, EAPSM)

二維接觸孔為連接半導體元件場效電晶體中閘極、源極與汲極和金屬內連線的孔道，目前業界大都採用嵌附式減光型相移圖罩製備為主。



以一維孤立隙說明此圖罩原理，當微影照射光束通過圖罩中之孤立隙時，相當於通過單狹縫，因繞射產生之中央主極大(中央亮線)，其底寬較圖罩中隙之寬度為大，左右二邊端空間影像之對比較差，影像模糊，破壞解像度。如在中央主極大(0級繞射)底部兩邊端附近，嵌附層正規透射率  $T\%$  為 4~10，作為相移層兼減光層，產生  $\pi$  相對相位差之光幅(光之電場振幅向量簡稱)，其方向相反，可在兩邊端附近，相同光軸上，達成全部或局部之干涉相消，使最後聚焦成像時之主亮紋(-1, 0, +1 級繞射合併)之側壁較陡峭，底寬內縮，邊端空間影像之對比強化，因繞射產生之模糊減少，因而增進解像度，此謂之邊端強化。

通常在相同線幅下，二維孤立接觸孔之側葉/中央光強比值較一維孤立隙高，製備不易，深寬比受限。一般業界通用之正規嵌附層透射率 T% 為 6，文獻上亦有透射率 T% 為 9 與 15 之嵌附層 [12]，適用於較小線幅之接觸孔，主亮紋底寬收縮更多，可縮小線寬，改善解像度外，焦深與製程寬容度亦略增，但缺點為側葉光強增強，宜設法消除。

非孤立（密集）之隙或接觸孔，聚焦成像時，宜使主亮紋（各隙最初之眾多 -1, 0, +1 級繞射光束已聚焦合併成為 -1, 0, +1 三成像光束，此三光束再合併聚焦，還原成像成為各隙主亮紋）底寬收縮，以增進解像度。



## 2.1.2 二維接觸孔圖罩設計

### (a) 緣邊型 (Rim) 相移圖罩 [13]

緣邊型為邊端強化之強型。緣邊為相移層，較適用於二維之接觸孔，因四邊皆可製備緣邊；一維之線隙亦可，但因緣邊僅二邊，效果較差。

早期為突出式，脆弱易斷，已淘汰。目前實際應用為蝕刻石英式，又稱基材式，即以石英為圖罩基材，利用蝕刻後與未蝕刻處石英之厚度差造成 180 度相移，作為相移層，如圖 2.1 (a)。

此型優點為邊端與接觸孔可自我對準，邊端強化作用較強，適合製備二維接觸孔。缺點為側葉光強甚強，緣邊之寬度較接觸孔小甚多，製備困難。

### (b) 減光-緣邊型 (Attenuated-Rim) 相移圖罩

減光-緣邊型為邊端強化之強型，為本實驗室學長郭貴琦、周岳霖於民國 82 年首創，相關內容發表於該年之 1993 SPIE-BACUS 會議 [14]，如圖 2.1 (b)。此型結合減光型與緣邊型，邊端強化作用與緣邊型類似。此型優點為減光區之透射度與相移角度可調控，可干涉消除離中央主極大較遠之 2 級繞射光。缺點為側葉光強較緣邊型更強，修正較困難。

### (c) 外架型 (Outrigger) 相移圖罩

外架型又稱輔助縫型 (Assist-Slot)、次解像型 (Sub-Resolution)，圖罩設計如圖 2.1 (c)。外架相移層宜位於繞射光幅第一極大內側，且寬度須甚細，以達成邊端強化。外架中心如接近第一極大位置，則側葉光強將增強，而邊端強化之優點將喪失。因外架寬度甚細，製備困難，不易實用化，甚少量產應用。此技術已逐漸演變為製備以相移達成減光作用之散條，以修正光學鄰近效應 (Optical Proximity Effect, OPE)。

### (d) 減光-外架型 (Attenuated-Outrigger) 相移圖罩 [15-17]

此圖罩由 A. Misaka 等人於 2003 年首次發表，文獻原名圖罩增強者 (Mask Enhancer, ME)，因不易直接了解，故此本論文意譯為減光式外架型相移圖罩。此圖罩結合減光型相移圖罩與外架型優點，外架與接觸孔具 180 度相位差，縮減成像主亮紋光幅底寬，減光背景層 T% 為 6，與接觸孔呈 360 度相位差，相當於同相位 (相當於 0 度相位差)，具有補光作用，可提升成像主亮紋光強，圖罩設計參看圖 2.1 (d)。此法與業界通用之減光型相移圖罩比較，可提升焦深與製程視窗，MEEF 也相對較小，是近年來二維接觸孔圖罩設計較大突破。

#### (e) 減光-緣邊-外架型 (Attenuated-Rim-Outrigger) 相移圖罩

此圖罩為本實驗室自行研發，以上述之減光式外架型相移圖罩為基礎，在接觸孔外緣再加入一緣邊，此圖罩適合應用於較小線幅，緣邊可再縮減主亮紋底寬，可增強解像度與焦深，但圖罩製作較為不易，圖罩設計如 2.1 (e) 所示。

### 2.1.3 其他較特殊製備方法

#### (a) 雙重線隙製備法 (The double line and space (L&S) formation method) [18-19]

此方法為 H. Nakamura 等人於 2005 年所發表，以 X 方向雙圓孔製備 Y 方向線條，然後 Y 方向雙圓孔再製備 X 方向線條，此時 Y 與

X 方向線條形成縱橫交錯之圖案，交點蝕刻後即可形成二維接觸孔，此法可增加焦深與製程視窗，但須注意二次照射(曝光)之疊對問題，如圖 2.2 所示。

### (b) 漩渦式圖罩 (Vortex Mask) [20]

如圖 2.3，為雷文生 (M. D. Levenson) 等人研發，特點為將製備晶圓上圓形接觸孔之圖罩正方形區，分割為四相等小正方，順或反時鐘以相對相位 0、90、180、270 度構成，光幅螺旋 (Spiral) 如拔除酒瓶軟木塞之螺旋鑽 (Corkscrew)，或激流產生之漩渦 (Vortex)，圖罩因以為名。缺點為圖罩製作須蝕刻三次以上，甚為繁瑣。



## 2.2 圖罩偏差增大因子

### 2.2.1 基本原理

圖罩偏差增大因子 (MEEF)，定義如下式：

$$\Delta CD_{\text{wafer}} = \text{MEEF} \times \frac{\Delta CD_{\text{mask}}}{X}$$

MEEF 代表圖罩上線幅偏差  $\Delta CD_{\text{mask}}$  (正與負) 與晶圓上阻劑線幅偏差  $\Delta CD_{\text{wafer}}$  (正與負) 兩者之比，偏差皆以設計線幅為基準。X 為機台成像縮率，通常為 4 倍。當線幅愈小，間距愈小， $\Delta CD_{\text{mask}}$  導致之  $\Delta CD_{\text{wafer}}$  偏差通常愈大，且有超越比例之增大現象，故稱增大因子，為方便使用，MEEF 通常取絕對值 (可視為正值)。通常二維接觸孔

$<0.7\lambda/NA$ ，一維之等線/隙密集線 $<0.4\lambda/NA$ ，MEEF 即不可忽視，為製程上重要考慮因素。

### 2.2.2 MEEF 量測方法

微影雷射光源(Light Source)可視為由無數點光源(Point Source)構成，相同點光源所發射之光子間具空間同調性(Spatial Coherence)，光子間有最強干涉；不同點光源所發射之光子間具空間不同調性(Spatial Incoherence)，光子間無干涉。因此微影光源僅具空間同調性與空間不同調性，並無空間部份同調性(Spatial Partial Coherence)此性質，文獻報導常引起誤解。經圖罩繞射後之-1, 0, +1 三光束比照上述性質，即源自同一點光源，光束間有最強干涉；如源自不同點光源，光束間無干涉。

微影光束可經改變光圈 $\sigma$ (光圈相擾度)之大小，調控其光束間與光子間整體呈現之綜合空間同調性高低，亦即綜合干涉性之強弱。部份同調性之干涉性質介於干涉最強(光圈 $\sigma=0$ )之空間同調性與無干涉(光圈 $\sigma=\infty$ )之空間不同調性之間。實際微影為 $0<\sigma<1$ ，具空間部份同調性或部份干涉性。

麥克(C. A. Mack)以空間影像解釋 MEEF[21-22]，假設在同調發光(Coherent Illumination)(即光圈 $\sigma=0$ )與不同調發光(Incoherent Illumination)(即光圈 $\sigma=\infty$ )兩種條件，並假設投影鏡只收集 0 與-1、

+1 級繞射光，麥克空間影像 MEEF 公式如下：

$$\text{Coherent Illumination: Image MEEF} = \frac{2 + \cos(2\pi S/p)}{1 - \cos(2\pi S/p)}$$

$$\text{Incoherent Illumination: Image MEEF} = \frac{\frac{1}{\text{MTF}_1} + 1 + \cos(2\pi S/p)}{1 - \cos(2\pi S/p)}$$

上式中  $S$  為隙寬， $p$  為間距， $\text{MTF}_1$  之 MTF (Modulation Transfer Function) 原義為物理界習用之調變轉移函數，在光學微影為空間影像對比度 (簡稱像比)，範圍 0~1， $\text{MTF}_1$  意義為像比僅由 0 至 1 級繞射光(-1, 0, +1)構成，未含 2 級繞射光，因數學函數極複雜，尚無法精確解出。 $\text{MTF}_1$  雖未含 2 級繞射光，但在一般成像，誤差並不大，模擬已足夠。

由上述公式可發現， $\text{MEEF}_{\text{coh}}$  只與負載循環 (Duty Cycle,  $S/p$ ) 有關， $\text{MEEF}_{\text{incoh}}$  與  $\text{MTF}_1$  有關，理想像比， $\text{MTF}_1$  為 1.0，此時  $\text{MEEF}_{\text{incoh}} = \text{MEEF}_{\text{coh}}$ ；實際像比， $\text{MTF}_1$  通常為 0.5~0.8，此時  $\text{MEEF}_{\text{incoh}} > \text{MEEF}_{\text{coh}}$ 。圖 2.4 可觀察空間影像關鍵尺寸由顯影門檻光強所決定，圖 2.5 可觀察到同調與不同調發光之 MEEF 與不同隙寬和線寬比 ( $S/L$ ) (與負載循環相似) 有密切關係。

麥克空間影像 MEEF 公式缺點主要有三，其一為空間影像關鍵尺寸 (Image CD) (由設定之顯影門檻光強決定) 並不等於晶圓阻劑關鍵尺寸 (Resist CD) (由實際阻劑顯影決定)；其二為實際微影為部份同調 (Partially Coherent) ( $0 < \text{光圈 } \sigma < 1$ )，其 MEEF 介於上述之同

調發光與不同調發光之間，並無公式可用；其三為成像光束僅限 0 與 1 級，已知當間距  $p$  較大（繞射角  $\theta$  較小）時，成像光束常包含 2 級。簡言之，MEEF 理論尚不成熟，目前仍屬於實驗科學。

一維線隙之 MEEF 作法通常為固定在單一線幅下，探討 MEEF 與間距的關係，以 ProLith 模擬為例，作法為先計算出特定線幅最適化照射劑量，再改變圖罩上線條偏差，並以原來相同之最適化劑量照射，依照晶圓上阻劑線幅偏差  $\Delta CD_{\text{wafer}}$  與圖罩上線幅偏差  $\Delta CD_{\text{mask}}$  之比值，即可計算出 MEEF 值，此處各間距之劑量皆須相同，較符合實際須求。圖罩上線條可以數條為一單位設計，若以三條線為例子，改變圖罩上線條偏差可選擇三條線同時改變，或是選擇中央或左右兩邊線條擇其一條作偏差，上述圖罩設計偏差情形在實際製程上皆可能發生，模擬只能作為製程基本參考依據，實際製程上應更為複雜。模擬 MEEF 之照射劑量標準通常以間距最小處為主，因間距最小處所須照射劑量較高，若以間距較大處之照射劑量為主，間距最小處可能會造成光強不足，導致阻劑無法顯影，產生誤差。間距較小處之製備較難，故其 MEEF 通常較間距較大處為大。

二維接觸孔因有 X 與 Y 兩方向，以及緣邊型與外架型等各式圖罩，其 MEEF 相對複雜，文獻上通常只探討嵌附式減光型相移圖罩 [23]，緣邊型與外架型則甚少討論，本論文作法為圖罩偏差時以接觸

孔中心線為準，緣邊因與接觸孔相連，當接觸孔放大或縮小時，只能向外或向內依偏差比例放大或縮小；外架中心線位置維持不變，同步照偏差比例放大或縮小即可，亦可求得 MEEF 對間距之關係。

## 2.3 禁止間距 (Forbidden Pitch) [24-25]

### 2.3.1 產生的原因

禁止間距的廣義的定義通常泛指在某些間距下，因光學鄰近效應、光程差較大等因，使實際所得焦深低於須要焦深(Required DOF)。根據 2003 年史密斯 (B. W. Smith) [26] 的文獻，以橫雙圓孔探討禁止間距的現象，如圖 2.6 所示，為方便說明，將入口光瞳中的 0 級繞射光束兩個圓形輝光區之間的位置定義為圓心區，如有繞射光束進入圓心區，相當於背景光增強。當間距漸增時，繞射角漸減，0 級繞射光束為背景光，位於中央且位置不變，-1、+1 級繞射光隨間距增大而內縮，在與 0 級繞射光重疊時，-1、+1 級繞射光與 0 級繞射光光程差達到最小，如圖中的 B；當間距再增加，-1、+1 級繞射光開始進入圓心區，0 級繞射光與 -1、+1 級繞射光的對稱性消失，背景光增大，導致光程差增加，在圖中的 D 達到最大光程差，造成焦深最低，此時最易產生所謂的禁止間距。如間距再增大，2 級繞射光也開始進入

入口光瞳，如 1、2 級繞射光與 0 級繞射光重疊或重合，光程差減，增長焦深；圓心區內之-1、+1 級繞射光比照 0 級繞射光（背景光），背景光面積增加，減少焦深。焦深增、減作用互相競爭，較強者勝出。焦深與 NILS 通常具正比關係，如將焦深對間距關係圖之縱軸換成 NILS，通常可得類似曲線。

焦深亦可從另一個觀點說明，當間距增大（線寬固定，隙寬增大），在中央位置之 0 級繞射光亦越強，成像光束對稱性降低，與 1 級繞射光之光程差愈大，易造成禁止間距。

### 2.3.2 以圖案偏差（Bias）修正禁止間距[27-28]

圖罩上通常共同存在孤立線與密集線，因為光學鄰近效應的關係，如未經修正，無法獲得設計線幅，修改孤立線與密集線的線幅，加寬（正偏差）線條或縮窄（負偏差）線條，達到修正的效果，即為圖案偏差法，一般修正以密集線的中心為基準，希望經過修正，在相同劑量下，其他間距亦能得到相同的線幅，而偏差法修正通常以密集線為主。

如圖 2.7 (a) 為例，由空間影像探討使用偏差法對孤立線修正情形，經由正偏差修正（編號 3）後，可以降低孤立線（編號 2）之光強，使密集線與孤立線，門檻光強接近，達成修正目的。

### 2.3.3 以散條 (Scattering Bars) 修正禁止間距

散條亦稱為次解像輔助特形 (Sub-Resolution Assist Feature, SRAF)，在孤立線兩旁加散條，亦可修正孤立線與密集線之差異，圖2.7 (a) 顯示孤立線加散條修正 (編號4) 空間影像之光強、斜率、形狀與密集線 (編號1) 甚為接近，相對於偏差法，此為較佳之修正方法。

散條修正主要的原理依2001年史密斯 (B. W. Smith) [29] 文獻之公式：

(a) 圖罩之隙產生之0、1、2級繞射光幅E

$$E_0 = (1 + E) \left(\frac{S}{p}\right) - E \quad (\text{正或負值})$$

$$E_1 = (1 + E) \left(\frac{S}{p}\right) \sin c \left(\frac{S}{p}\right) \quad (\text{正值})$$

$$E_2 = (1 + E) \left(\frac{S}{p}\right) \sin c \left(\frac{2S}{p}\right) \quad \left(\frac{S}{p} < 0.5 \text{ 為正值}, \frac{S}{p} > 0.5 \text{ 為負值}\right)$$

$$\sin c(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

S為隙寬，p為間距，E為圖罩光幅 (鉻膜E=0、減光型E>0)。sin c為類似高斯波形之數學函數，分子π用180°，分母π用3.14。

(b) 圖罩隙加入單一遮光全條或遮光陣列散條之新修正繞射光幅E

$$E_0 = \left[ (1 + E) \left(\frac{S}{p}\right) - E \right] \times \left[ 1 - (1 - E_{SB}) \left(\frac{b}{S}\right) \right] \quad (\text{正或負值, 絕對值降})$$

$$E_1 = \left[ (1 + E) \left(\frac{S}{p}\right) \sin c \left(\frac{S}{p}\right) \right] - \left[ (1 - E_{SB}) \left(\frac{b}{p}\right) \sin c \left(\frac{b}{p}\right) \right] \quad (\text{正或負值,})$$

絕對值降)

$$E_2 = \left[ (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) \sin c \left( \frac{2S}{p} \right) \right] - \left[ (1 - E_{SB}) \left( \frac{b}{p} \right) \sin c \left( \frac{2b}{p} \right) \right] \quad (\text{正或負值,}$$

絕對值升或降)

$b$ 為散條的寬度， $E_{SB}$ 為散條之光幅，遮光全條散條（散條整體 $T\%=0$ ）

之 $E_{SB}=0$ ；遮光陣列散條（散條整體 $T\%>0$ ）之 $E_{SB}>0$ 。

上述的公式適用於雙光強（鉻膜）與減光型圖罩，散條僅適用於全條遮光或遮光陣列，無相位差之單一散條，二條以上或有相位差之散條公式過於複雜，在此不做討論。由公式可看出加入散條後， $E_0$ 與 $E_1$ 之絕對值皆降，但 $E_1$ 下降較 $E_0$ 少，使 $E_1/E_0$ 比增加，成像光束對稱性增加，可減少0與1級光光程差，因而增進焦深。如圖2.7（b），可看出散條加入前後，離焦對焦深的影響。

散條運用於圖罩上如圖2.8所示，又可分為明場與暗場圖罩的修正，其原理剛好相反，明場圖罩散條主要用於減光，暗場圖罩上的散條主要用於增光，明場圖罩上使用的散條，主要分為遮光全條、減光全條、遮光陣列[30]三種，簡述如下，其優缺點如圖2.9（a）所示：

#### **(a) 遮光全條**

如圖2.9(a)甲一，其為厚鉻膜，散條整體 $T\%=0$ ，相位差 $\Delta\phi=0^\circ$ ，製作簡單，為半導體業量產最常使用的散條。但缺點因為其不透光，故條寬須甚小，32奈米線幅以下，製備較為不易，條寬若太大，亦有

成像的問題。

### (b) 減光全條

如圖2.9 (a) 甲四，為嵌附層（減光相移層），散條整體 $T\%>0$ 、相位差 $\Delta\phi>0^\circ$ ，優點為散條自身有透射度，相對於遮光全條，可以使條寬較大，較易製備，因此使用減光全條有其優勢，缺點為相位差太大時易導致成像，且須尋得適當嵌附層材料。

### (c) 遮光陣列

如圖2.9(a)甲三，將遮光銘膜蝕刻成陣列形狀，散條整體 $T\%>0$ 、相位差 $\Delta\phi=0^\circ$ ，優點為其寬度可較減光全條寬，缺點為蝕刻微細陣列圖案難度高。

孤立線依其間距的不同，可以分別加入窄、寬或點線之散條一至三條[31-32]，如圖2.9 (b)，從間距比較小的半孤立線開始加入，改善禁止間距，而散條放置的位置通常取等距置放在中央，一條取兩等份（即為中央），兩條則取三等份，三條取四等份；亦可在線條的兩側加入散條修正。模擬上利用各個間距加入散條之後的焦深與NILS的變化，評估加入散條數量的依據。

## 2.4 近二年文獻評論

半導體製程進入 32 奈米節點之後，由於極短紫外光微影、無圖

罩電子束直寫與聚焦離子束 (Focus Ion Beam, FIB) 微影等下世代微影技術尚未完備，無法達到量產規模，目前主流仍以 193 奈米濕浸式微影為主。以下就製備 45 奈米(含)以下二維接觸孔與 32 奈米(含)一維線隙、增進焦深與降低 MEEF 技術，篩選近二年與 193 奈米濕浸式微影相關，較有發展潛力之文獻，作相關評論。

#### 2.4.1 製備 45 奈米 (含) 以下二維接觸孔

目前 45 奈米以下接觸孔製備仍以雙成型技術搭配阻劑收縮技術為主[33]，接觸孔阻劑收縮製程主要以化學收縮輔助解像度增進微影 (Resolution Enhancement Lithography Assisted by Chemical Shrink, RELACS)、收縮輔助薄膜增進解像度 (Shrink Assist Film for Enhanced Resolution, SAFIER)、熱流動 (Thermal Flow) 與化學氣相沈積 (Chemical Vapor Deposition) 較為常見。前兩法阻劑收縮時接觸孔關鍵尺寸一致性 (CD Uniformity) 較佳，但製程較複雜，成本較高。

2008 年 M. Kushibiki 等人發表[34]，以活性離子蝕刻 (Reactive Ion Etching) 達成阻劑收縮，搭配雙成型技術，可製備 30 奈米密集接觸孔，為近年較創新技術。由於活性離子蝕刻為雙成型技術之硬罩 (Hard Mask) 蝕刻唯一選擇，合併使用可降低成本；且接觸孔關鍵尺寸與活性離子蝕刻時間呈良好線性關係，故此法控制接觸孔關鍵尺

寸一致性甚佳，可得較大製程視窗，甚具未來潛力。

#### 2.4.2 製備 32 奈米（含）以下一維線隙

32 奈米以下線幅，製備密集線隙仍以雙成型技術為主，但雙成型技術之疊對與二次照射（曝光）之關鍵尺寸控制極為重要。近年尚有以側壁間隙層做蝕刻硬罩，僅須照射（曝光）一次，可製備密集線；或是將現有之雙成型技術加以改良，可減少一次蝕刻程序，降低成本。此二法簡述如下。

##### (a) 側壁間隙層製程 (Side Wall Spacer Process) [35]

此製程首先製備線隙比約 1:3 之線條，再沉積側壁間隙層材料，經回蝕 (Etch Back) 後移除原始製備線條之阻劑，再以側壁間隙層做蝕刻硬罩，側壁間隙層可自行對準，減少傳統雙成型疊對問題，可製備 32 奈米密集線，如圖 2.10 所示。

##### (b) 改良式雙成型技術[36]

傳統雙成型技術須蝕刻二次，若於製備第一次線條時使用特殊阻劑，經照射與熱烤後阻劑產生固化，再製備第二次線條；或分別使用正與負型阻劑作二次照射（第一次正型，第二次負型）。如圖 2.11 所示，可減少傳統雙成型技術第一次照射完蝕刻之步驟，降低成本。

### 2.4.3 增進焦深技術

製程微小化後，焦深逐漸降低，若焦深不足，阻劑厚度必須甚薄，抗電漿蝕刻與抗離子植入性能不足，影響製程甚大。因此，如何提升焦深亦成為近年半導體製程重要研究議題。常用之提升焦深技術有偏軸發光、相移圖罩、濕浸式微影、線性偏振光、縱向二次照射（曝光）與各式光學鄰近效應修正（圖罩設計改良、散條、偏差法與邊飾等）。近年文獻發表較有潛力之增進焦深技術有改良式偏軸發光與逆向微影技術（Inverse Lithography Technology），此二法簡述如下。

#### (a) 改良式偏軸發光 [37-38]

製程細線化後，為增進解像度，偏軸發光已成為必要使用之解像度增進技術之一，但偏軸發光常伴隨著禁止間距的產生，傳統圓環與橫雙扇面發光在部份間距其 0 級與 1 級繞射光重疊較少，甚至有不重疊的情形產生，導致光程差增大，故常有焦深不足的現象。若在原始圓環內側部份再加上一圓環；與橫雙扇面內側加入另一橫雙扇面，成為雙重圓環（Double Annular）與雙重橫雙扇面，原文命名為 Double Dipole，實際形狀為 Quasar，如圖 2.12 所示。此時 0 級與 1 級繞射光在各間距之重疊性大幅提高，可提升焦深，減少禁止間距的產生；且由於 0 級與 1 級繞射光重疊性變好，以相同劑量照射，圖罩線條在各

間距之關鍵尺寸一致性較佳。

### (b) 逆向微影技術 [39]

目前半導體界普遍使用的光學鄰近效應修正只針對圖罩佈局圖上主要特形(Main Feature)進行邊緣的補償修正，在散條或次解像輔助特形的應用上大大的侷限在有限的規定(Rules)。例如僅允許簡單的幾何圖形配置、固定的排列方式以及特定的排列間隔，此做法在線幅較大之製程還可以維持一定的效率與修正水平，但是當世代演進32奈米以下時，光的繞射效應將使此一受限於各種規則的作法無法達到圖罩設計須求。

為解決此問題，目前業界採用一種逆向且能快速運算的辦法，故稱為逆向微影技術。此技術重點在於針對所期望在晶圓上出現的元件圖案，以軟體技術直接算出形成該圖案所須要的圖罩圖案，而現有圖罩圖案製作技術必須等到於晶圓上形成圖形後，才能進一步據此改善圖罩上的圖案。

逆向微影技術雖可設計較佳製程視窗與焦深之圖罩，但圖罩複雜性也將大大提升。一般而言，圖罩較精密，製程視窗較大，則焦深較長[40]，故須取得平衡，以符合成本效益。

#### 2.4.4 降低 MEEF 技術

隨著線幅縮小，MEEF 已成為微影製程中不可忽視的重要參數，當解像度趨近於極限，此時 MEEF 將急速增大。一般而言，控制  $MEEF \leq 2$  為宜，良好的光學鄰近效應修正可有效降低 MEEF。如以前述所提之逆向微影技術加入 MEEF 參數計算；或以雙成型技術製備密集線，亦可有效降低 MEEF。簡述如下

### (a) 逆向微影技術（加入 MEEF 參數）

傳統製程視窗計算並未考慮 MEEF 與圖罩偏差，故當解像度提升時，常伴隨 MEEF 值增大，必須加以改善。

MEEF 改善方法根據 L. Pang 等人於 2008 年發表文獻[41]，以前述所提之逆向微影技術為基礎，將 MEEF 值、圖案偏差造成空間影像邊緣輪廓變易等非線性參數，加入逆向微影技術軟體計算方程式中，設計所得圖罩可有效降低 MEEF，且維持足夠大製程視窗。

### (b) 雙成型技術

密集線因較難製備，故其 MEEF 值通常較大，32 奈米（含）以下密集線，以 193 奈米濕浸式微影解像度製備，單次照射（曝光）已超出解像度極限，MEEF 趨近於無限大；32 奈米（含）以下孤立線製備較易，MEEF 通常較小。以雙成型技術製備 32 奈米（含）以下密集線，亦可改善 MEEF 增大情形[42]。

## 第三章 模擬設計

### 3.1 模擬軟體[43-44]

本實驗室使用著名之美商 KLA-Tencor 之微影軟體 ProLith v. 9.0 為模擬工具，此模擬軟體可設定或調變之參數甚多，如：光源波長( $\lambda$ )、發光方式、光圈  $\sigma$  (光圈相擾度)、投影鏡系統聚光當量 (數值孔徑) (Numerical Aperture, NA)、圖罩設計、阻劑類型、阻劑相關參數、阻劑烘烤相關參數、照射劑量 (Exposure Dose) 與門檻光強等。可進行觀測之選項亦不少，如：空間影像 (Aerial Image)、阻劑輪廓 (Resist Profile)、阻劑側壁角度 (Resist Sidewall Angle)、阻劑線寬 (Resist Line Width)、最適化照射劑量計算結果、阻劑厚度損失百分比 (Resist Thickness Loss %)、正規化成像對數斜率 (Normalized Image Log Slope, NILS) 與製程視窗 (Process Window) 等。

雖然 ProLith 模擬工具之介面簡單、操作方便，模擬結果也有相當之準確性，然而實際製程之複雜性甚高，須考慮之變因與參數極多，嚴格說來，其結果並非一般電腦軟體能夠輕易預測。但是在理想條件下，基本的微影模擬仍有相當高的指標性作用，對於實驗室之研究頗富參考價值。在現今半導體產業上，模擬工具是不可或缺的一項利器，藉由實際生產前的電腦模擬，如使用光學鄰近效應修正，增加像比、

增進焦深、消除晶圓阻劑線條架橋 (Bridging) 等，便可避免不必要的風險或誤差，進而節省成本與增加產率。

### 3.2 55 奈米接觸孔

模擬使用減光-外架型相移圖罩設計、193 奈米濕浸式微影系統、圓環發光，搭配 S 線性偏振光，先以較易模擬的 55 奈米接觸孔，在固定間距下探討外架長度、外架寬度、外架與接觸孔距離，減光背景層透射度 T、邊飾 (Serif)、偏差法 (Bias) 對製程視窗的影響，如圖 3.1 所示。



### 3.3 45 奈米接觸孔

利用本論文自行研發之減光-緣邊-外架型相移圖罩，與外架型、減光-外架型、緣邊型、減光-緣邊型、嵌附式減光型等各式相移圖罩作比較，先找出各圖罩設計之最適化值，探討 45 奈米接觸孔在不同間距下的焦深、製程視窗、MEEF 值與改變光圈  $\sigma$  對製程視窗的影響。

接觸孔的阻劑厚度設定在文獻上甚少討論，並無一定規範，但因接觸孔焦深較低，故厚度通常比相同線幅之一維線隙阻劑厚度為低，阻劑主要作用為抗電漿蝕刻與抗離子植入，若阻劑性能較強，厚度相對可較低，本論文設定 55 奈米接觸孔的阻劑厚度為 110 奈米，45 奈

米接觸孔的阻劑厚度為 90 奈米，其他相關參數設定參照表 3.1、3.2 所示。

### 3.4 28 奈米線

使用  $T\%=6$  之減光型相移圖罩、搭配橫雙圓孔偏軸發光、193 奈米濕浸式微影系統與 Y 線性偏振光，固定  $NA=1.35$ ，改變橫雙圓孔之孔半 ( $\sigma_{radius}$ ) 與孔距 ( $\sigma_{center}$ ) 並繪製間距與焦深關係圖，觀察禁止間距情形，相關參數設定參看表 3.3。

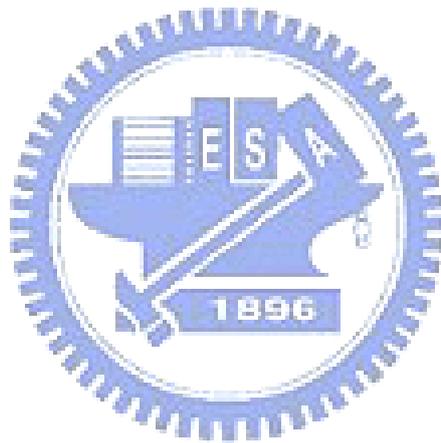
接著選擇較易修正禁止間距之孔半與孔距做為後續模擬之用，並嘗試以正偏差法、減光全條散條與此兩者混用修正禁止間距，探討減光全條散條放置位置、寬度、相位差與加入之間距，達到提升焦深之目的，並觀察各式散條加入前後對空間影像的影響，最後繪製 MEEF 與間距關係圖，觀察 MEEF 與間距之關係。

另外探討固定顯影時間，圖罩上線條正偏差時改變照射劑量以製備 28 奈米線；或以無偏差之劑量為準，圖罩上線條正偏差時改變顯影時間製備 28 奈米線，並觀察此兩種方法焦深之差異。

### 3.5 22 奈米以下線幅

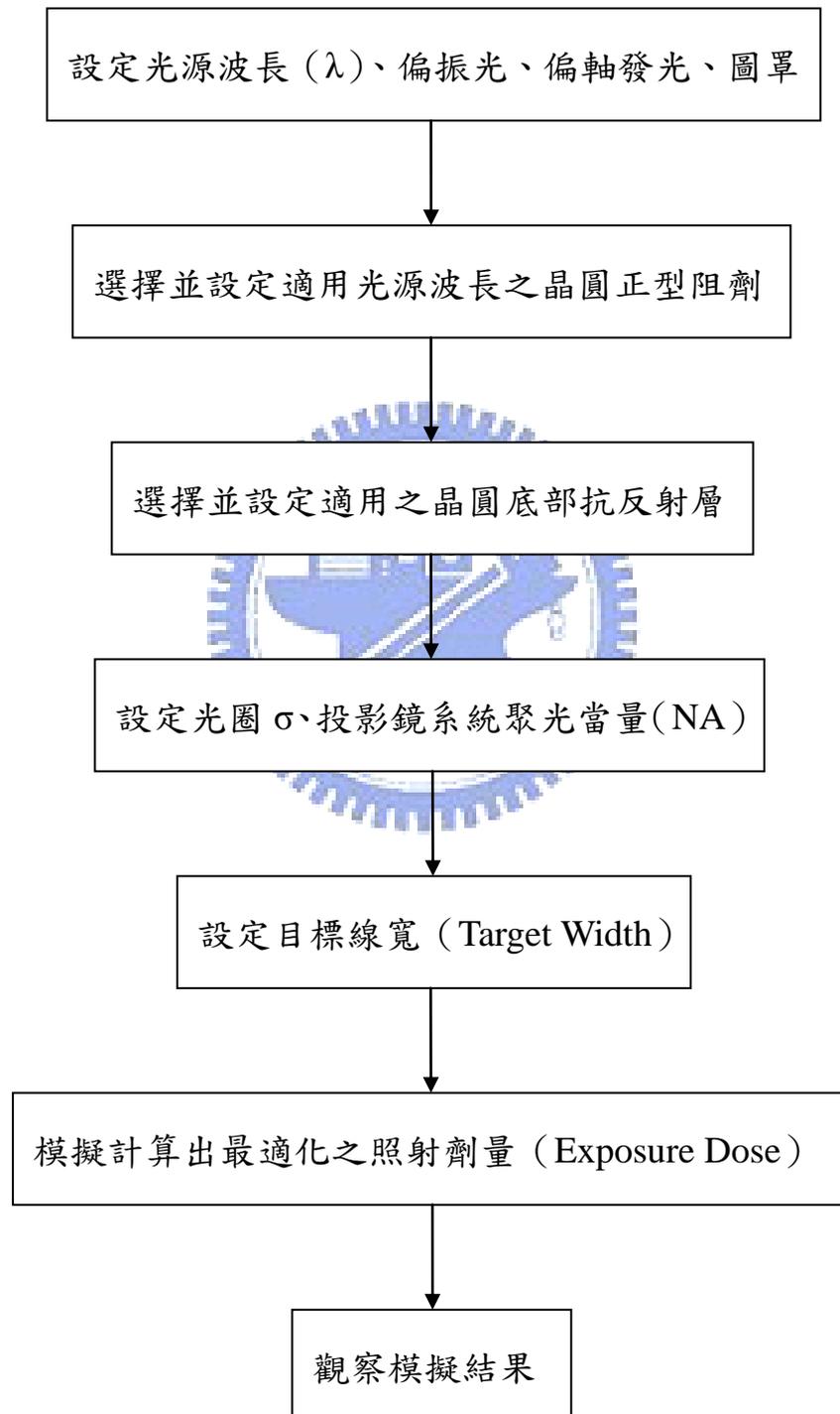
以上述最適化設定配合正偏差法，繪製 22 奈米與 16 奈米線之間距與焦深關係圖並觀察之，再以杜邦第二代濕浸式微影液體（並非純

水而為有機液體，折射率  $n=1.64$ ) 作 12 奈米與 8 奈米線之模擬，探討光學微影的極限。

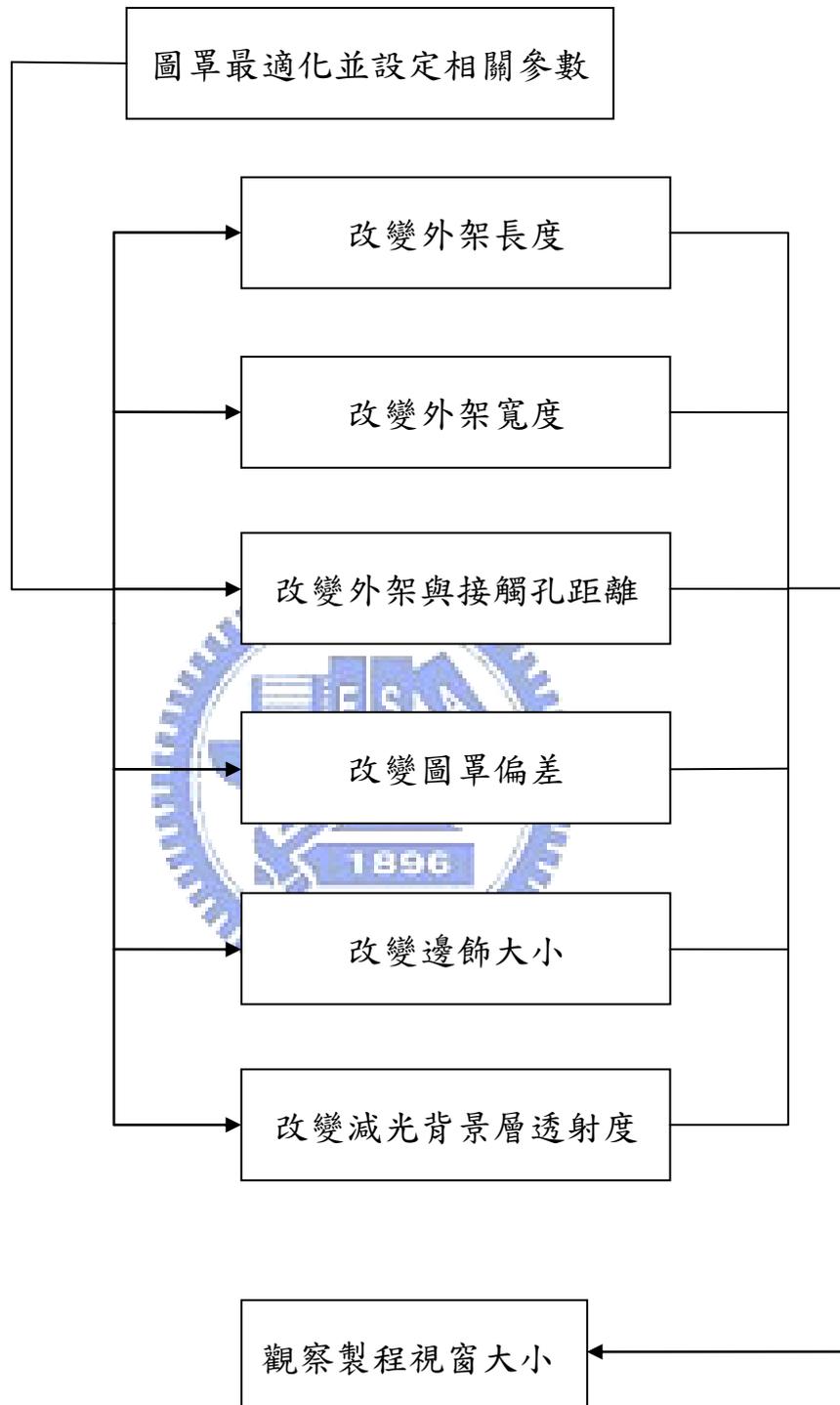


### 3.6 模擬流程規劃

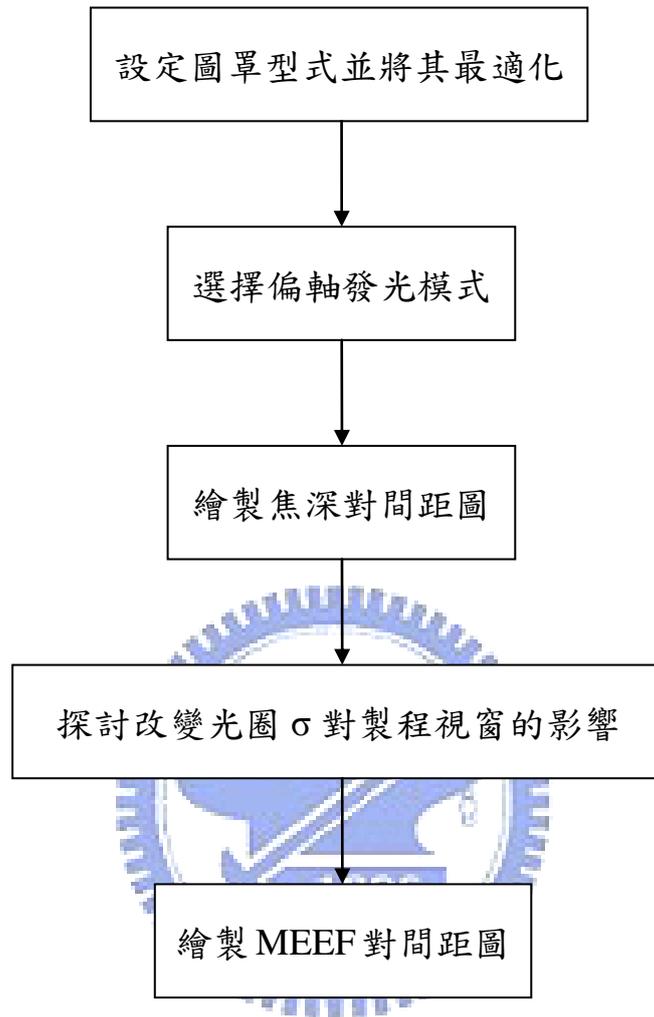
#### (1) 基本模擬設定



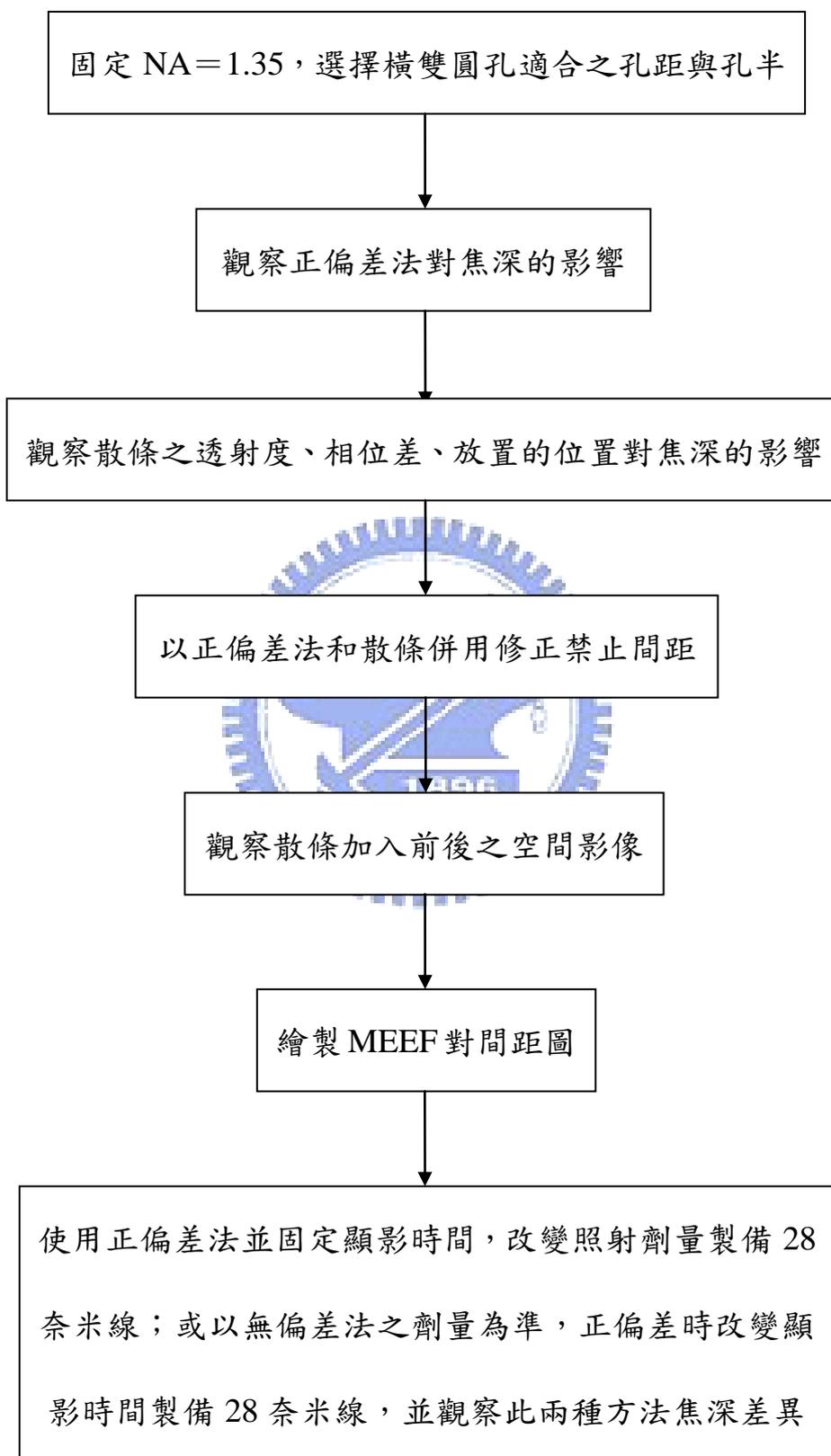
## (2) 55 奈米接觸孔



### (3) 45 奈米接觸孔



#### (4) 28 奈米線



## 第四章 結果與討論

### 4.1 55 奈米接觸孔

#### 4.1.1 探討減光-外架型相移圖罩設計相關參數

55 奈米接觸孔圖罩基本設定使用減光-外架型相移圖罩，NA 固定在 1.2，接觸孔寬度 55 奈米，外架長度 55 奈米，寬度 15 奈米，外架與接觸孔距離 5 奈米，背景減光層透射率  $T\%=6$ ，以下就分別改變圖罩設定其中一項參數來做討論：

##### (1) 改變接觸孔外架長度對製程視窗的影響：

改變外架長度分別為 55、60、65 奈米，並繪製照射寬容度對焦深圖，如圖 4.1 所示，在間距 220 奈米時可發現外架長度愈長， $EL_{max}$  愈大，但  $DOF_{max}$  愈小，但三者差異不大，但間距 300 奈米時因背景減光層增大，透光量增多，導致主亮紋底寬增大，外架長度 55 奈米已無法縮減主亮紋底寬，像比過低，喪失製程視窗，此時外架長度 65 奈米的製程視窗明顯勝出，因此對包含不同間距的圖罩設計而言，外架長度須略長於接觸孔之邊長，較為適合。

##### (2) 改變接觸孔外架寬度對製程視窗的影響：

改變外架寬度分別為 15、20、25 奈米，並繪製照射寬容度對焦深圖，如圖 4.2，在間距 220 奈米時可發現外架寬度愈寬， $EL_{max}$  愈大，

但  $DOF_{max}$  愈小，但在間距 300 奈米時外架寬度 15 奈米已沒有製程視窗，此時外架寬度 25 奈米的製程視窗最大，故在間距較大處，外架寬度宜較寬；外架寬度亦不可過大，如過大，外架將抵銷過多主亮紋光強，導致照射劑量須甚高，亦造成側葉光強甚高，易造成接觸孔外側顯影。

### (3) 改變外架與接觸孔距離對製程視窗的影響：

改變外架與接觸孔距離分別為 2.5、5、7.5、10 奈米，由圖 4.3 可觀察出在外架與接觸孔距離為 7.5 奈米時在間距 220 奈米與 300 奈米皆有良好製程視窗，外架與接觸孔距離甚為重要，距離太近，外架會抵銷太多接觸孔主亮紋光強，反而造成像比變差，製程視窗縮小；距離過遠，便達不到收縮接觸孔主亮紋底寬的效果，此為圖罩設計重要參數。

### (4) 改變接觸孔圖罩偏差對製程視窗的影響：

圖罩偏差為製作接觸孔常用的方法，通常為正偏差，此部份設計圖罩接觸孔邊長各為 55、65、75 奈米，外架長度為 60、70、80 奈米，外架寬度為 15、20、25 奈米，外架與接觸孔距離皆為 7.5 奈米。從圖 4.4 之照射寬容度對焦深圖可觀察出隨著正偏差愈大，製程視窗愈小，接觸孔邊長為 55 奈米時因透光區過小，主亮紋光強不足，導致照射劑量須甚高，接觸孔四周之側葉光強甚強，接觸孔四周阻劑容易

顯影，產生不必要的圖案。正偏差可增加透光區範圍，相當於增加 0 級光（背景光），可增加主亮紋光強，照射劑量可較低，接觸孔外側較不容易顯影，但 0 級光增強使成像光束對稱性降低，導致 0 與 1 級光之光程差增加，造成焦深下降，故正偏差雖為減低接觸孔外側顯影問題必要之設計，但也不可過大，以免造成製程視窗不足。

#### **(5) 改變接觸孔邊飾大小對製程視窗的影響：**

邊飾為常見光學鄰近效應修正方法之一，通常在接觸孔四角加上方形小方塊，此處圖罩設計為接觸孔邊長 65 奈米，外架長度為 70 奈米，外架寬度為 20 奈米，外架與接觸孔距離為 7.5 奈米，比較無邊飾與 5、10 奈米之邊飾的製程視窗，由圖 4.5 可觀察到在間距 220 與 300 奈米此三種設計之製程視窗相差不多，故加入邊飾對減光-外架型圖罩並沒有增進製程視窗之效果，且邊飾過大可能與外架相連，反而增加圖罩製作的困難。

#### **(6) 改變接觸孔減光背景層透射度對製程視窗的影響：**

此項模擬測試圖罩設計與第 5 部份相同，僅改變減光背景層透射度  $T$  (0~1)，分別為 0.04、0.06、0.08 與 0.10，此減光背景層因與接觸孔呈 360 度相位差，相當於 0 度同相位，因此具補光作用，由圖 4.6 可觀察到減光背景層透射度提升，對主亮紋光強補光作用增強，像比提高，在間距 220 與 300 奈米可有效提升焦深， $DOF_{max}$  變大，

但減光背景層透射度太高亦使接觸孔外側因側葉光強增強而顯影，模擬發現減光背景層透射度  $T$  為 0.10 之圖罩已有此現象產生，故此背景層透射度選擇相當重要，實際製程上亦要尋得適合之嵌附層，方有實做之可能。註：透射率  $T\%$  為 0~100。

#### 4.1.2 偏軸發光與 NA 對焦深的影響

模擬發現以圓環發光搭配減光-外架型相移圖罩最為適合，若使用斜四扇面 (Normal Quasar) 發光，學理上，斜四扇面成像在入口光瞳重疊區面積較大，品質較圓環發光佳，但模擬發現以斜四扇面搭配此圖罩時，有相當多禁止間距產生，且各間距所計算出之最適化劑量相差甚多；圓環發光在各間距的焦深較為平均，且照射劑量較為接近，對包含不同間距接觸孔設計之圖罩，修正較為容易。如圖 4.7 所示，以圓環發光， $NA=1.2$  為較佳的選擇，在各間距皆有良好的焦深，故以此條件作為測試減光-外架型相移圖罩設計的基準。

## 4.2 45 奈米接觸孔

45 奈米線幅，密集接觸孔因解像度不足，無法成像，故只能模擬間距 180 (4\*45) 奈米 (含) 以上之孤立接觸孔，本論文以減光-緣邊-外架型、外架型、減光-外架型、緣邊型、減光-緣邊型、與嵌

附式減光型等各式相移圖罩做比較，分別探討使用圓環發光，斜四扇面發光與正四扇面(Cross Quasar)發光，各圖罩製備 45 奈米接觸孔，焦深與製程視窗之優劣情形。此部分模擬所有圖罩接觸孔設計寬度皆為 65 奈米（正偏差 20 奈米），減光-緣邊-外架型相移圖罩之緣邊與外架寬度分別為 2.5 與 22.5 奈米，兩者相加恰好與減光-外架型相移圖罩之外架寬度 25 奈米相等，減光-緣邊型相移圖罩之緣邊寬度為 15 奈米，外架型相移圖罩與緣邊型相移圖罩與其減光型相同，僅將  $T=0.06$  之減光背景層改為不透光之遮光銘膜，由於各種圖罩設計參數眾多，只能儘量做到公平比較的原則，相關圖罩最適化之過程不再贅述。



#### 4.2.1 探討不同圖罩設計，使用圓環發光、斜四扇面發光與正四扇面發光對焦深的影響

如圖 4.8、4.9、4.10 所示，可觀察到減光-緣邊-外架型與減光-外架型相移圖罩最適合製備 45 奈米接觸孔，以圓環發光而言，減光-緣邊-外架型相移圖罩在各間距之焦深皆略高於減光-外架型相移圖罩，主要原因為前者與接觸孔相連之極細緣邊，可進一步縮減主亮紋底寬、增高像比與增大 NILS，故可使焦深提升。

減光-緣邊-外架型與減光-外架型相移圖罩使用斜與正四扇面發

光，焦深在各間距互有優劣，但有甚多禁止間距產生，且各間距間最適化照射劑量差異甚大，修正較困難，因此這兩種相移圖罩較不適用斜與正四扇面發光。

其他四種圖罩除減光-緣邊型相移圖罩在部份間距尚有焦深之外，外架型、緣邊型與嵌附式減光型相移圖罩在 45 奈米線幅已無法提供足夠製程視窗。依據本論文探討結果，減光-緣邊-外架型相移圖罩搭配圓環發光為製備 45 奈米接觸孔之較佳設計，但須注意照射劑量不可過高，以免側葉光強過強而顯影。

#### 4.2.2 探討不同圖罩設計，使用圓環發光、斜與正四扇面發光，固定 $\sigma_{outer}$ 為 0.88，改變 $\sigma_{inner}$ 對製程視窗的影響

$\sigma_{outer}$  為以外徑代表之相擾度（簡稱外徑）； $\sigma_{inner}$  為以內徑代表之相擾度（簡稱內徑）。由前述所做模擬發現外架型、緣邊型與嵌附式減光型相移圖罩在 45 奈米線幅已不敷使用，故只以較有製程視窗的減光-緣邊-外架型、減光-外架型與減光-緣邊型相移圖罩做測試，以間距 240 奈米處，圓環發光、斜與正四扇面發光，只改變  $\sigma_{inner}$  值分別為 0.50 和 0.73，其他參數都不變，如圖 4.11、4.12、4.13，發現  $\sigma_{inner}=0.73$  在三種偏軸發光模式下其  $DOF_{max}$  值皆明顯大於  $\sigma_{inner}=0.50$  之  $DOF_{max}$  值，原因為  $\sigma_{outer}$  與  $\sigma_{inner}$  相減之差值較小者相當於沿軸發光

之光圈  $\sigma$  較小（此為本論文指導教授首創之比照關係），綜合干涉性較強，而此三種圖罩皆屬於相移圖罩，干涉性強對相移圖罩有利，可提升像比，焦深上升。

#### 4.2.3 探討減光-緣邊-外架型、減光-外架型與減光-緣邊型相移圖罩之 MEEF 值

此項模擬使用圓環偏軸發光，圖罩接觸孔寬度為 65 奈米，以最小間距之最適化劑量為準，各間距皆使用相同劑量，然後改變圖罩圖罩接觸孔寬度為 66 奈米，外側緣邊因與接觸孔相連，故只能向外依正偏差比例放大，外架中心位置不變，同步照偏差比例放大，再以相同劑量模擬觀察阻劑關鍵尺寸改變情形，即可求得各間距之 MEEF。

如圖 4.14，可觀察到減光-外架型相移圖罩之 MEEF 甚小，在各間距皆在 1 以下，減光-緣邊-外架型相移圖罩之 MEEF 值稍遜於減光-外架型相移圖罩，但尚在合理之範圍，而減光-緣邊型相移圖罩之 MEEF 甚大。減光-緣邊-外架型相移圖罩之緣邊為 2.5 奈米，減光-緣邊型相移圖罩之緣邊為 15 奈米，可觀察到緣邊與 MEEF 成正比關係，當圖罩設計之緣邊寬度愈大，其 MEEF 愈大，對製程愈不利。

### 4.3 28 奈米線

### 4.3.1 探討橫雙圓孔的 $\sigma_{\text{center}}$ 與 $\sigma_{\text{radius}}$ 對焦深的影響

$\sigma_{\text{center}}$  為光圈中心至圓孔中心距離所代表之相擾度（簡稱孔距），亦見文獻稱為  $\sigma_{\text{offset}}$ （簡稱孔移）； $\sigma_{\text{radius}}$  為圓孔半徑所代表之相擾度（簡稱孔半）。由於 28 奈米線已屬極小線幅，NA 固定在 1.35，此探討僅使用橫雙圓孔偏軸發光，因斜四扇面與圓環發光，已無法提供足夠解像度。圖罩使用 T%=6 之減光型相移圖罩，搭配較小之  $\sigma_{\text{radius}}$ ，干涉較強，有利於相移圖罩。由圖 4.15、4.16，當  $\sigma_{\text{center}}$  趨近於 1 時，由於  $\sigma_{\text{radius}}$  並不為 0，故此時 0 級光有一部份在入口光瞳之外，可視為無效部份， $\sigma_{\text{center}}$  愈大，解像度愈佳（如不考慮像比），但同時也產生愈多禁止間距。

光學微影投影鏡只須收集 0 級光與 1 級光即可成像（雷文生相移圖罩僅須收集 1 級光），當間距縮小，0 級光與 1 級光間的繞射角變大，此時可增加 NA 或  $\sigma_{\text{center}}$ ，兩者皆可增進解像度，但 NA 和  $\sigma_{\text{center}}$  太大皆會造成焦深下降。 $\sigma_{\text{center}}$  愈大，圓心區面積變大，當成像光束進入此區，如同背景光增強，成像光束對稱性降低，使光程差增加，焦深下降，造成禁止間距增加。此處選擇  $\sigma_{\text{center}}=0.7$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.2$  為模擬橫雙圓孔之基本設定，禁止間距較少，有利修正焦深， $\sigma_{\text{radius}}=0.1$  時，0 與 1 級光可重疊區域過小，禁止間距較  $\sigma_{\text{radius}}=0.2$  時多，故此處未採用。

### 4.3.2 探討正偏差法對焦深的影響

在各個間距使用正偏差法修正，如圖 4.17，使用正偏差普遍焦深皆增加。其主要原因為在相同間距下，線變寬，隙變窄，因此 0 級光減弱，成像光束對稱性增加，光程差降低，故焦深增加，28 奈米線已甚細，負偏差甚難實做，依學理來說負偏差會使 0 級光增強，不利焦深，故在此不做討論。

### 4.3.3 探討散條放置的位置與間距對焦深的影響

28 奈米線，以遮光全條散條做修正寬度須甚細，否則極易成像，甚難製備，故本論文只以減光全條散條做修正，先以透射度  $T=0.2$ 、相位差  $\phi=20$  度，寬度 28 奈米之減光全條散條做模擬，搭配正偏差 10 奈米混用。如圖 4.18，間距 170 奈米（含）之後，加入一條中央式減光散條（Center Attenuated Scattering Bar, C-ASB）可有效提升焦深，間距 240 奈米後，因隙增大，加入第二條散條（二條等距式）可有效減弱 0 級光，焦深提升效果比加入一條散條時更好。

間距 170 奈米（不含）之前，只能以正偏差作修正，加入一條中央式減光散條反而使主線條 NILS 下降，像比變差，不具提升焦深效果。間距 100 奈米到 170 奈米（不含）間，加入中央式減光散條無法提升焦深，但若在主線條兩旁加入寬度 10 奈米之緣邊式減光散條

(Rim Attenuated Scattering Bar, R-ASB)，此散條與主線條相連，為本論文首創，可提升主線條像比與 NLS，增加焦深。如圖 4.19，間距 170 奈米（含）之後，與中央式減光散條（一條或二條）併用，在大部份間距皆可再提升焦深，效果比單用中央式減光散條更佳，為求方便製作，中央式散條與緣邊式散條之透射度與相位差皆相同，較符合實際製程須求。此處二條中央式與二條等距式減光散條，雖名稱不同但實質意義相同。

#### 4.3.4 探討緣邊式減光散條寬度對焦深的影響

以正偏差 10 奈米配合不同寬度緣邊式散條，中央式散條寬度固定為 28 奈米，如圖 4.20，若緣邊式散條之寬度較小，提升焦深較高，但整體差異不大，且緣邊式散條寬度若過小，製備不易；寬度過大，與中央式散條併用時可能空間不足，因此緣邊式散條寬度須適中，以符合實際製程須求。

#### 4.3.5 探討散條透射度與相位差對焦深的影響

以正偏差 10 奈米、緣邊式散條 10 奈米與中央式散條 28 奈米依上述模擬方式混用，固定透射度  $T=0.2$ 、 $0.3$ 、 $0.4$ ，改變相位差  $\phi$  分別為 20、30、40 度，如圖 4.21、圖 4.22、圖 4.23，相同透射度下，改變相位差對焦深影響不大。散條透射度愈低，降低較多 0 級光，焦

深提升較多，但散條透射度  $T=0.2$ 、相位差  $\phi=30$ 、 $40$  度在間距  $190$  奈米時散條有成像問題，而散條透射度  $T=0.2$ 、相位差  $\phi=20$  度時在各間距散條皆不會成像；散條透射度  $T=0.3$ 、 $0.4$  時，在不同相位差時各間距散條皆不會成像，故當散條透射度低時，以相位差小較有利，散條較無成像問題。

#### 4.3.6 探討散條相位差和透射度與主線條相同時對焦深的影響

如圖 4.24 所示，假設所有散條與主線條之嵌附層材料相同，透射度  $T=0.06$ ，相位差  $\phi=180$  度，以側面式減光散條 (Side Attenuated Scattering Bar, S-ASB)  $3$  奈米置放於主線條兩側，距離主線條  $2$  奈米，由於側面式散條與主線條之間仍有極小部分透光，故提升焦深效果稍弱於正偏差  $10$  奈米。間距  $170$  奈米 (含) 以後，除原有之  $3$  奈米側面式減光散條，另加入中央式散條  $10$  奈米 (透射度  $T=0.06$ 、相位差  $\phi=180$  度)，與正偏差  $10$  奈米併用中央式散條  $28$  奈米 (透射度  $T=0.2$ 、相位差  $\phi=20$  度) 相比，亦具提升焦深效果，但效果稍差。散條與主線條之嵌附層材料相同之優點是製程簡化，但由於透射度低，散條易成像，以此處模擬為例，透射度  $T=0.06$ 、相位差  $\phi=180$  度之中央式減光散條寬度  $10$  奈米已至極限，若散條寬度再加大即會成像，而側面式減光散條寬  $3$  奈米甚細，以實際製程而言，幾乎無法製備，此為散條與主線條之嵌附層材料相同最主要缺點，但此模擬目的在於驗

證此方法與原本散條與主線條之嵌附層材料不同對於提升焦深有近似效果，故未考慮實際製程的影響。

#### 4.3.7 探討側面式散條與中央式散條加入對空間影像的影響

依本實驗室黃志全學長模擬 32 奈米線所得結果，中央式散條可加入之間距與邊端效應 (Edge Effect) 產生之干涉波有關，如圖 4.25 所示，邊端效應因繞射光束所造成，會在遮光板的邊緣，光強大小產生某種規則性的擺動效應，俗稱為振鈴效應 (Ringing Effect)，又稱側紋 (Fringe)，此側紋振幅大小與使用的  $\sigma_{\text{radius}}$  大小和晶圓表面與遮光板之縱向距離 ( $d$ ) 有關， $\sigma_{\text{radius}}$  小，代表干涉強，側紋較大。當光經圖罩之孤立線、孤立隙時繞射現象在兩邊端發生，而非單一邊端，圖 4.26 為孤立隙左右兩邊端產生兩個振鈴效應之干涉波，A、B、C 點為不同間距時干涉波分離的位置，由 A→B→C 點，重疊之干涉波分離間距由小至大。如圖 4.27 (a)，當間距為 160 奈米時，因邊端效應產生干涉波重疊，在隙的空間影像，只會出現近乎單一的波峰，此時加入中央式散條反而降低主線條像比與 NILS，使焦深降低，但側面式散條因距離主線條甚近，由前述模擬相當於正偏差之效果，可增加主線條之像比與 NILS，對於焦深有提升效果；隨著間距增加至 170 奈米，干涉波重疊漸漸分開，如圖 4.27 (b)，此時加入中央式散條與側面式散條併用，像比與 NILS 提升最高，焦深提升最多。但側面式

散條條寬過細，甚難實作，且焦深提升效果不如正偏差法，實際製程仍以前述模擬之正偏差法，合併緣邊式減光散條與中央式減光散條較易製備，且提升焦深效果較佳。

#### 4.3.8 探討 MEEF 與間距的關係

一般而言，密集線之圖罩偏差增大因子 (MEEF) 以 $\leq 2.0$  為宜。本論文以三種方法探討 28 奈米線在同間距下之 MEEF，方法一圖罩設計以三條線為一單位，量測時將所有線寬同步放大 1 奈米，並以未偏差之相同劑量照射，觀察各間距阻劑線寬改變情形；方法二為圖罩設計以三條線為一單位，並改變中央線寬度來量測 MEEF；方法三圖罩設計與方法二相同，但改變左或右其中一條線之寬度來量測 MEEF (本論文改變右線)，照射劑量以間距 100 奈米處為準，因此處為散條開始加入之間距，劑量較高，各間距使用相同劑量，較符合實際微影製製程，如圖 4.28 所示，此三種方法之 MEEF 大致相同，在間距 90 奈米後，為半孤立線與孤立線，MEEF 皆 $< 2.0$ ，間距 80 奈米時之 MEEF 急速上升，表示超過解像度極限，線寬失真。製程上此三種方法之圖罩偏差情形皆有可能發生，故作此探討。光學微影製備 28 奈米密集線或近密集線，目前以雙成型 (Double Patterning) 技術為主，可得較低 MEEF。

#### 4.3.9 比較使用正偏差法，固定顯影時間，只改變照射劑量製備 28 奈米線；或以無偏差法之劑量為準，正偏差時改變顯影時間製備 28 奈米線對焦深的影響

正偏差法可視為廣義的修剪圖罩 (Trim Mask) 方法，以照射劑量調控阻劑線寬，通常正偏差愈大，照射劑量愈高，如圖 4.29 所示，製備 28 奈米線，固定顯影時間為 25 秒時，正偏差愈大，最適化照射劑量愈高；若以無偏差法在各間距之照射劑量為準，並固定此劑量，正偏差愈大，顯影時間須愈長。上述兩方法皆可製備 28 奈米線，且此兩種方法以正偏差 5 奈米與 10 奈米比較在各間距焦深差異不大，證明此兩種方法可互相替換。以學理上來說，正偏差時若照射劑量與顯影時間皆固定，亦可改變顯影液濃度，或是顯影液濃度不變，改變顯影溫度，亦可達到相近效果，但此處以 ProLith 方便模擬為主，其他相關參數設定由於太過複雜，故在此未做探討。

### 4.4 以 22 奈米以下線幅探討光學微影之極限

#### 4.4.1 探討 22 與 16 奈米線

依解像度通式  $R = K_1 \frac{\lambda}{\sin \beta}$ ，使用雙成型技術，193 濕浸式微影解像度極限約在 22~28 奈米範圍，但此解像度 R 所指為半間距 (Half Pitch) 或密集線所能製備之線幅，孤立線並無公式可用，不受此通式

之束縛，線幅可向下縮小，如圖 4.30、4.31，分別嘗試 22 與 16 奈米線，由於此時隙甚大，故 0 級光甚強，正偏差法能減弱 0 級光，減少光程差，可增進焦深，圖中焦深最大處為橫雙圓孔之 0 級光與 1 級光相互重疊，故光程差最小，焦深最大。16 奈米線因較難製備，故將照射寬容度 (EL) 設為較低之 4%，通常對焦深較有利，較易觀察到焦深改變之情形。

#### 4.4.2 探討 12 與 8 奈米線

如圖 4.32、4.33，嘗試模擬 12 與 8 奈米線，此時以  $T=0.06$  之減光型相移圖罩已無製程視窗，因此須將主線條嵌附層透射度  $T$  提高至 0.15 與 0.20，可提升像比與 NILS。同時亦使用杜邦第二代 ( $n=1.64$ ) 濕浸式液體，將 NA 放大至 1.50，搭配正偏差法，線幅愈小，正偏差須愈大，主線條嵌附層透射度須愈高，因 12 與 8 奈米線幅甚小，故將 EL 設為 2%，方可觀察到大小不等之焦深。

## 第五章 結論

1. 製備 55 奈米接觸孔，使用減光-外架型相移圖罩，發現如外架長度稍大於圖罩上接觸孔邊長，可得較大製程視窗；使用正偏差法可降低側葉光強，但亦會使焦深下降，故偏差法不可太大，以免製程視窗不足；邊飾對此型圖罩並無明顯效用，且亦增加圖罩製作困難；減光背景層透射率不可太高，以免側葉光強太強導致接觸孔外側因側葉顯影而有不必要之圖案產生。

2. 製備 45 奈米接觸孔，使用本論文首創之減光-緣邊-外架型相移圖罩，並搭配圓環發光，在各間距之焦深最佳，且 MEEF 亦近於 1，甚為理想。此搭配缺點為緣邊極細，不易製備，且照射劑量甚高，接觸孔外側容易因側葉光強過強造成顯影，而產生不必要之圖案。

3. 製備 28 奈米線，模擬發現間距 100 奈米至 170 奈米（不含）加入本論文首創之緣邊式散條可提升主線條 NILS，焦深增加；間距 170 奈米（含）之後，緣邊式散條與中央式散條併用，在大部份間距皆可再提升焦深，效果比單用中央式散條更佳。

4. 製備 28 奈米線，若減光散條與主線條之嵌附層材料相同( $T=0.06$ ，相位差  $\phi=180$  度)，優點是製程簡化，缺點為透射度低，散條易成像，故散條寬度須甚細，不易製作。正偏差法與加入側面式減光散條此二

法對提升焦深有近似效果。

5. 製備 28 奈米線，由隙之空間影像觀察，當邊端效應產生之干涉波重疊開始分離時，方可加入中央式減光散條，若尚未分離，加入中央式減光散條反而破壞主線條之像比與 NILS，造成焦深降低。

6. 製備 28 奈米線，使用正偏差法，以固定顯影時間 25 秒，改變照射劑量；或以無偏差法之劑量為準，正偏差時將顯影時間增加，兩種方法所得焦深差異不大，證明此兩種方法可互相替換。

7. 製備孤立線，不受半間距解像度通式  $R = K_1 \frac{\lambda}{\sin \beta}$  束縛，固定  $NA=1.35$ ，合併正偏差法可製備 22 與 16 奈米孤立線；12 與 8 奈米孤立線須使用杜邦第二代高折射率液體， $NA$  放大至 1.50，並提高主線條嵌附層透射度  $T$  至 0.15 與 0.20，且正偏差幅度須甚大， $EL$  減少至 2%，才可得到大小不等之視窗焦深。

表 1.1 ITRS 定義 2007~2015 年之微影技術路圖規範

Year of Production	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	65	57	50	45	40	36	32	28	25
DRAM and Flash									
DRAM ½ pitch (nm)	65	57	50	45	40	36	32	28	25
Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly)	54	45	40	36	32	28	25	23	20
Contact in resist (nm)	72	62	55	50	44	39	35	31	28
Contact after etch (nm)	65	57	50	45	40	36	32	28	25
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	13	11.3	10.0	9.0	8.0	7.1	6.4	5.7	5.1
CD control (3 sigma) (nm) [B]	5.6	4.7	4.2	3.7	3.3	2.9	2.6	2.3	2.1
MPU									
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	68	59	52	45	40	36	32	28	25
MPU gate in resist (nm)	42	38	34	30	27	24	21	19	17
MPU physical gate length (nm) *	25	23	20	18	16	14	13	11	10
Contact in resist (nm)	84	73	64	56	50	44	39	35	31
Contact after etch (nm)	77	67	58	51	45	40	36	32	28
Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] **	2.6	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.0
Chip size (mm <sup>2</sup> )									
Maximum exposure field height (mm)	26	26	26	26	26	26	26	26	26
Maximum exposure field length (mm)	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Maximum field area printed by exposure tool (mm <sup>2</sup> )	858	858	858	858	858	858	858	858	858
Wafer site flatness at exposure step (nm) [C]	63	54	50	45	40	32	29	22	17
Number of mask levels MPU	33	35	35	35	35	35	35	37	37
Number of mask levels DRAM	24	24	24	26	26	26	26	26	26
Wafer size (diameter, mm)	300	300	300	300	300	450	450	450	450
NA required for Flash (single exposure)	1.01	1.20	1.35	1.52	1.70	1.91			
NA required for logic (single exposure)	0.91	1.04	1.20	1.38	1.54	1.73	1.94		
NA required for double exposure (Flash)	0.72	0.86	0.96	1.08	1.22	1.36	1.53	1.72	1.93
NA required for double exposure (logic)	0.62	0.72	0.82	0.95	1.06	1.19	1.34	1.50	1.68

Manufacturable solutions exist, and are being optimized

Manufacturable solutions are known

Interim solutions are known

Manufacturable solutions are NOT known



表 1.2 ITRS 定義 2016~2022 年之微影技術路圖規範

Year of Production	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	22	20	18	16	14	13	11
DRAM and Flash							
DRAM ½ pitch (nm)	23	20	18	16	14	13	11
Flash ½ pitch (nm) (un-contacted poly)	18	16	14	13	11	10	9
Contact in resist (nm)	25	22	20	18	16	14	12
Contact after etch (nm)	23	20	18	16	14	13	11
Overlay [A] (3 sigma) (nm)	4.5	4.0	3.6	3.2	2.8	2.5	2.3
CD control (3 sigma) (nm) [B]	1.9	1.7	1.5	1.3	1.2	1.0	0.9
MPU							
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ pitch (nm)	23	20	18	16	14	13	11
MPU gate in resist (nm)	15	13	12	11	9	8	8
MPU physical gate length (nm) *	9	8	7	6	6	5	4
Contact in resist (nm)	28	25	22	20	18	16	14
Contact after etch (nm)	25	23	20	18	16	14	13
Gate CD control (3 sigma) (nm) [B] **	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5
Chip size (mm <sup>2</sup> )							
Maximum exposure field height (mm)	26	26	26	26	26	26	26
Maximum exposure field length (mm)	33	33	33	33	33	33	33
Maximum field area printed by exposure tool (mm <sup>2</sup> )	858	858	858	858	858	858	858
Wafer site flatness at exposure step (nm) [C]							
Number of mask levels MPU	39	39	39	39	39	39	39
Number of mask levels DRAM	26	26	26	26	26	26	26
Wafer size (diameter, mm)	450	450	450	450	450	450	450
NA required for Flash (single exposure)							
NA required for logic (single exposure)							
NA required for double exposure (Flash)							
NA required for double exposure (logic)							

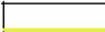
Manufacturable solutions exist, and are being optimized   
 Manufacturable solutions are known   
 Interim solutions are known   
 Manufacturable solutions are NOT known 

表 3.1 55 奈米接觸孔模擬各項參數

55 nm Contact Hole	
Wavelength	193 nm
Polarized Illumination	S-Polarized
Aperture	Annular 0.93/0.73
Immersion Liquid	Water n=1.44
NA	1.2
Mask Type	Att-Outrigger (Mask Enhancer, ME)
Photoresist	ArF JSR AR165J, t=110 nm
Barc	Shipley AR19, t=45 nm
Process Window	CD±10%, EL=4% Resist Loss<10% Sidewall Angle>80°

表 3.2 45 奈米接觸孔模擬各項參數

45 nm Contact Hole	
Wavelength	193 nm
Polarized Illumination	S-Polarized
Aperture	(1) Annular 0.88/0.73 (2) Normal Quasar 0.88/0.73/20° (3) Cross Quasar 0.88/0.73/20°
Immersion Liquid	Water n=1.44
NA	1.23
Mask Type	(1) Att-Rim-Outrigger (2) Att-Outrigger (Mask Enhancer, ME) (3) Att-Rim (4) Att-PSM (5) RIM (6) Outrigger
Photoresist	ArF JSR AR165J, t=90 nm
Barc	Shipley AR19, t=38 nm
Process Window	CD±10%, EL=4% Resist Loss<10% Sidewall Angle>80°

表 3.3 28 奈米線模擬各項參數

28 nm Line Width	
Wavelength	193 nm
Polarized Illumination	Y-Polarized
Aperture	X-Dipole 0.7/0.2
Immersion Liquid	Water n=1.44
NA	1.35
Mask Type	T%=6 Att-PSM, Y-Orientation
Photoresist	ArF JSR AR165J, t=85 nm
Barc	Shipley AR19, t=40 nm
Process Window	CD±10%, EL=6% Resist Loss<10% Sidewall Angle>80°

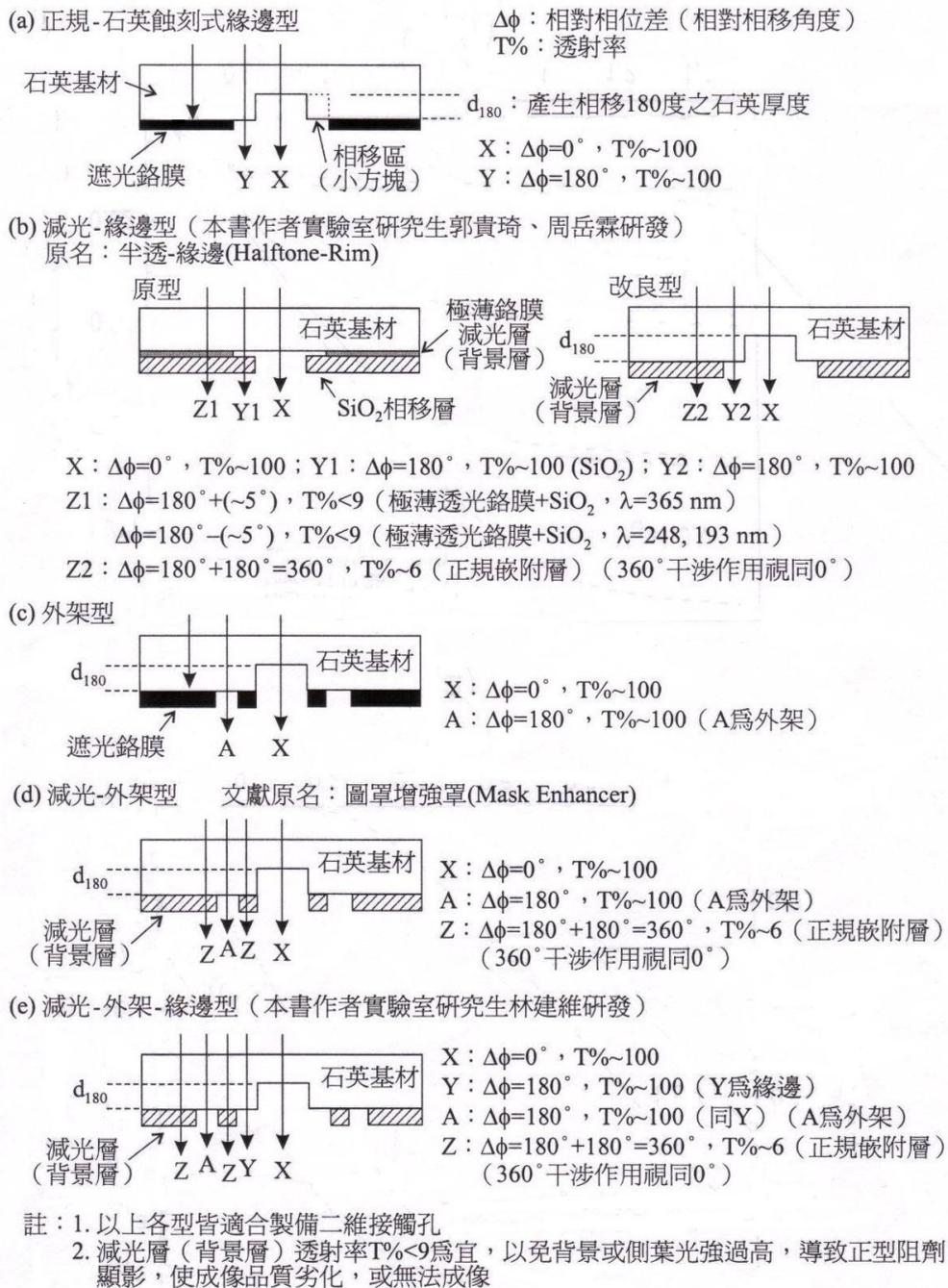


圖 2.1 二維接觸孔之圖罩設計

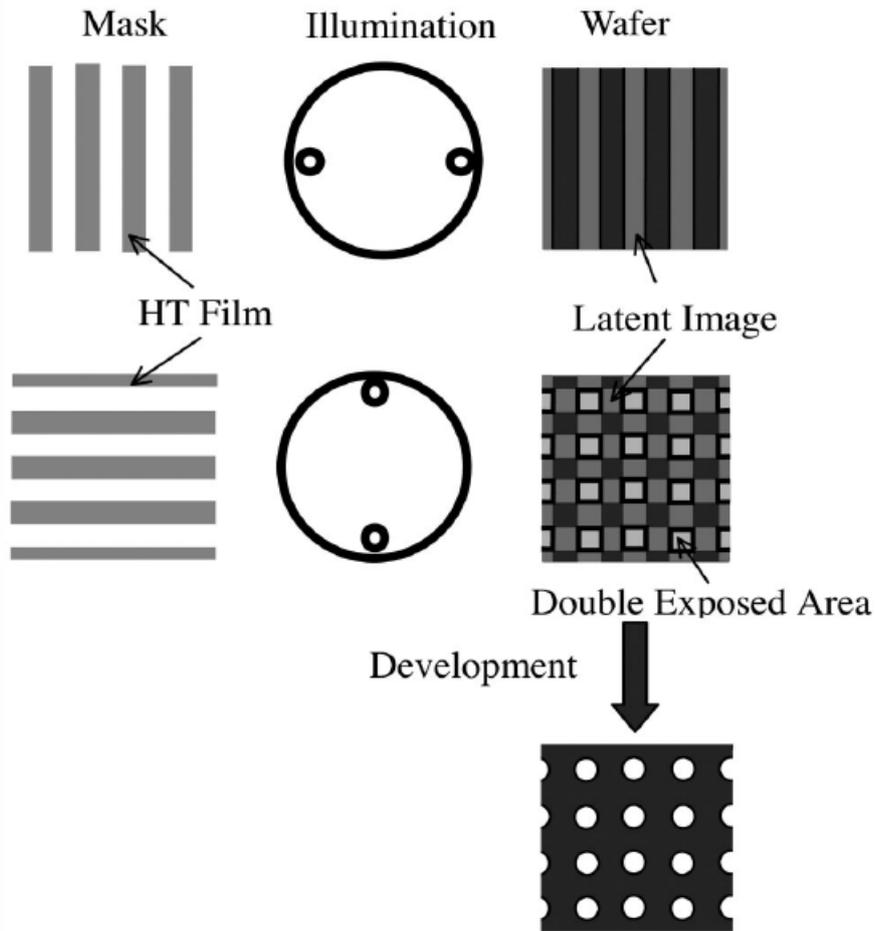


圖 2.2 雙重線隙製備接觸孔方法[18]

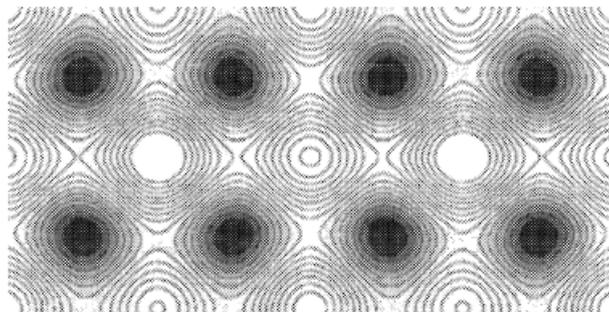
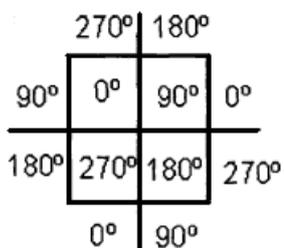


圖 2.3 漩渦式圖罩設計與空間影像[20]

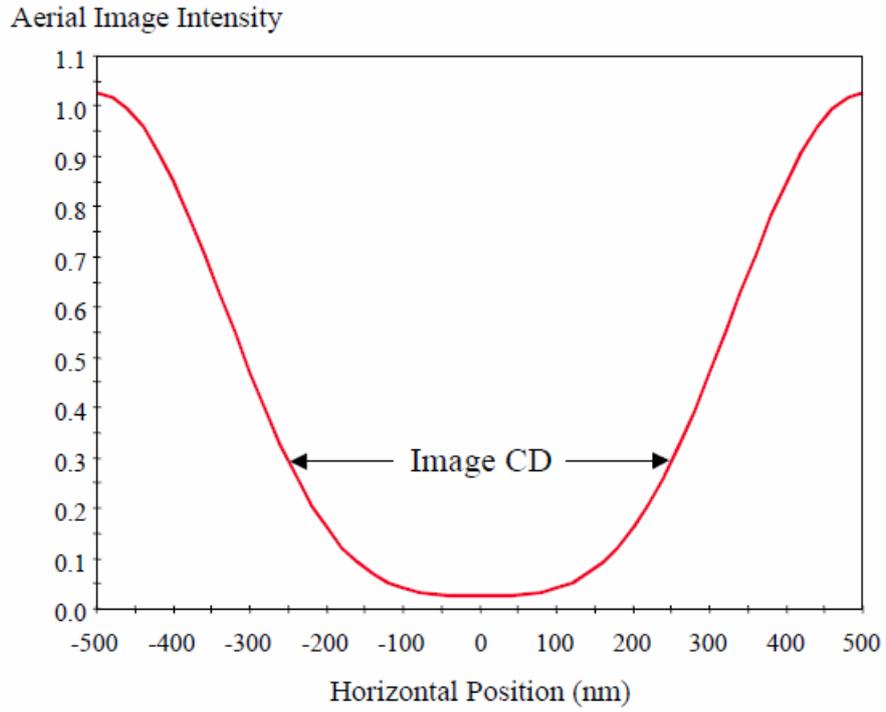


圖 2.4 由門檻光強的選擇決定空間影像 CD 值[22]

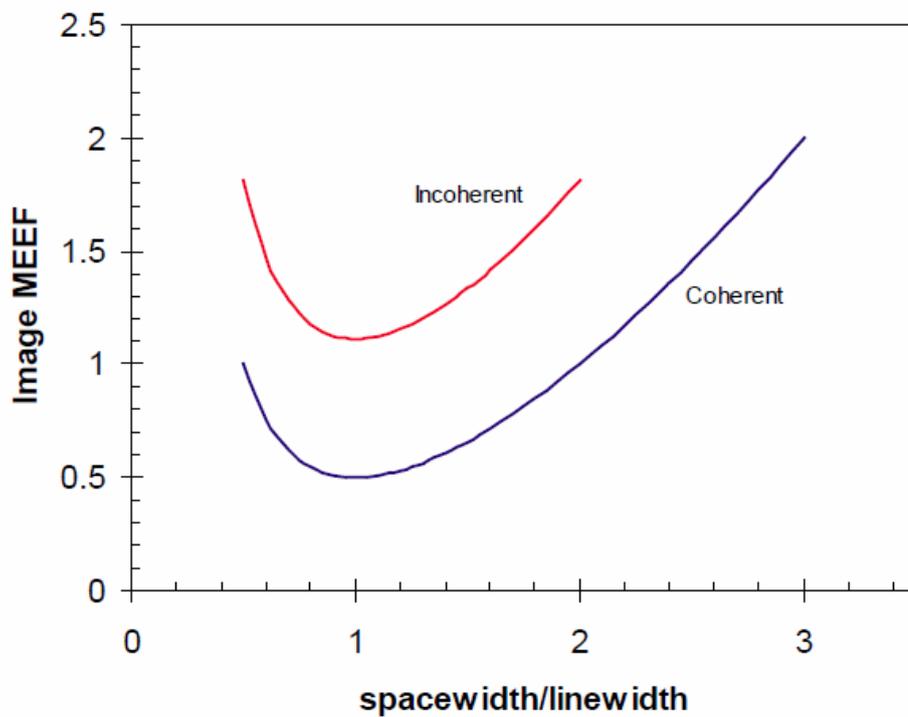


圖 2.5 同調與不同調發光在不同隙寬與線寬比下之 MEEF 值[22]

未偏振光，橫雙圓孔偏軸  
 雙光強（鉻膜）圖罩，線條為縱向  
 由A至F，間距 $p$ 漸增，繞射角 $\theta$ 漸減  
 0級繞射光束位於中央且位置不變

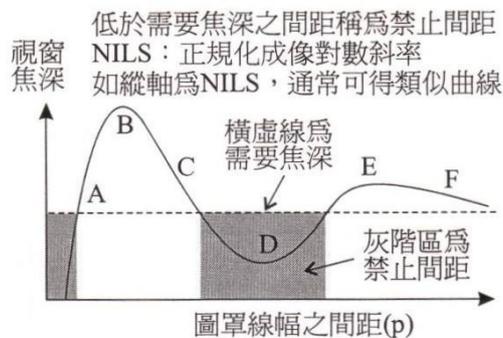
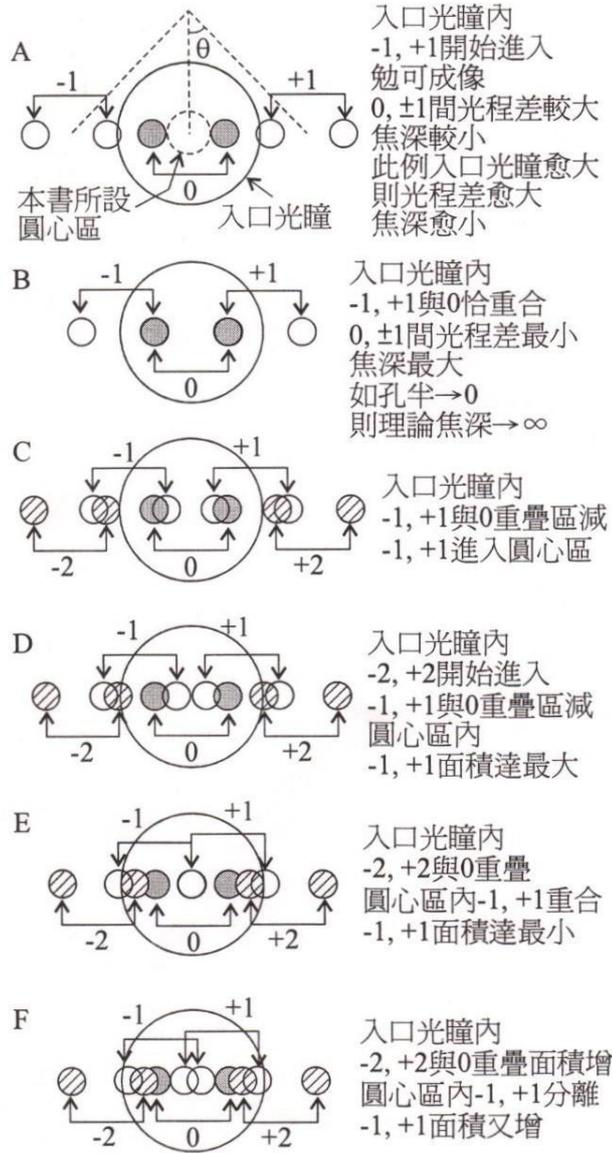
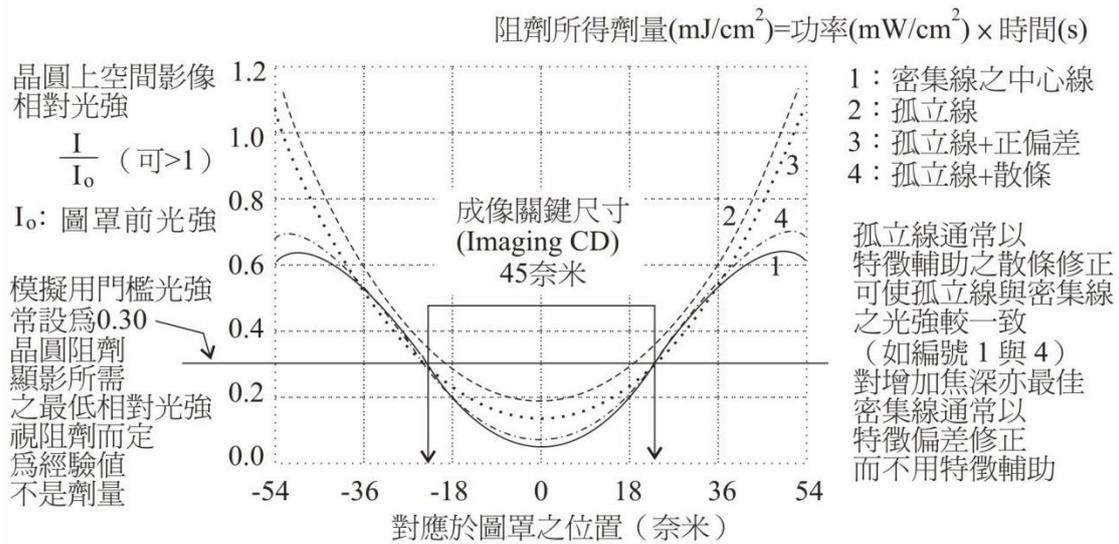


圖 2.6 利用橫雙圓孔探討禁止間距產生的原因

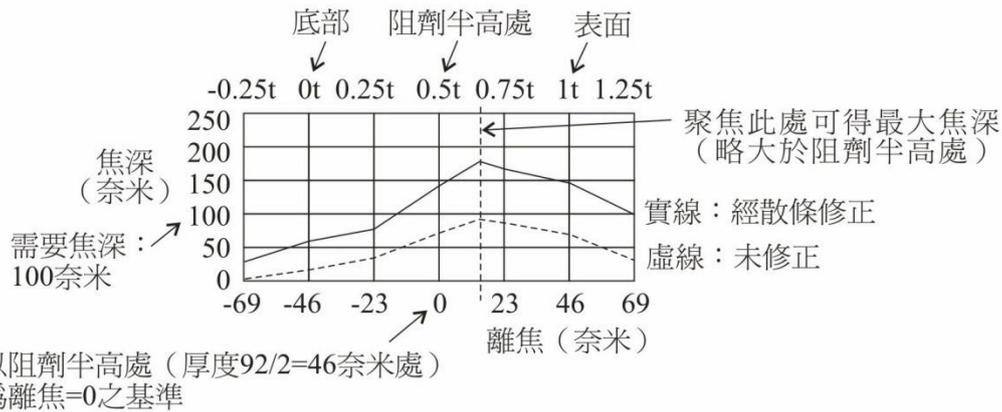
(a) 光源波長 $\lambda=193$ 奈米，Y偏振光，橫雙圓孔，6%減光型相移圖罩，NA=1.40（濕浸式）  
 門檻光強=0.30，設計線幅45奈米（以密集線之中心線為基準）模擬示例



註：設計線幅32奈米密集線(S=L)，上述條件模擬無法成像，僅孤立線(S $\gg$ L)可成像

(b) 離焦對焦深影響示例：

設計線幅32奈米（間距200奈米，孤立線），阻劑厚度  $t=92$  奈米（略低於需要焦深）

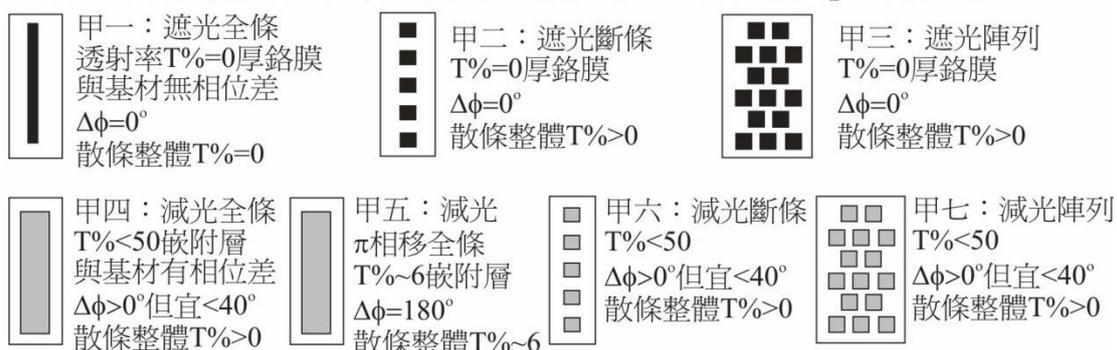


註：需要焦深(Required DOF)包含晶圓平坦度、阻劑平坦度、聚焦誤差等所需之寬容值，  
 晶圓上阻劑厚度宜略低於需要焦深，以確保阻劑成像品質

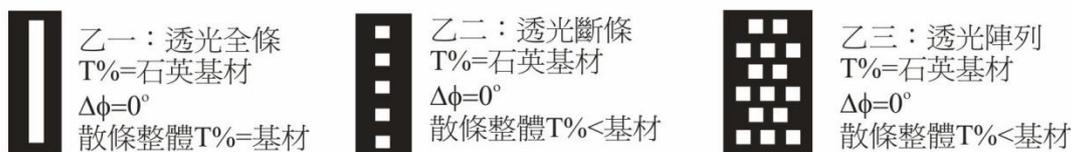
圖 2.7 偏差法與散條修正前後空間影像圖與離焦對焦深的影響

(a) 各式散條示意圖

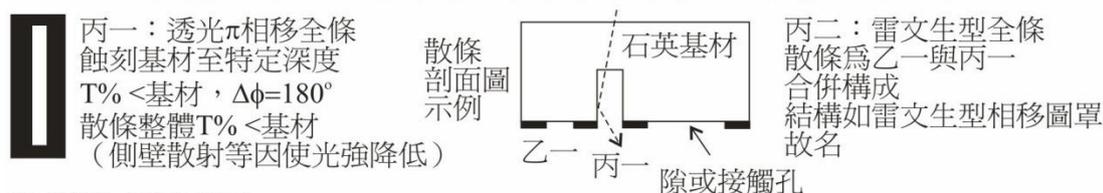
甲類：適用於明場圖罩（基材為石英），功能為對主暗紋「減光」，目前主流



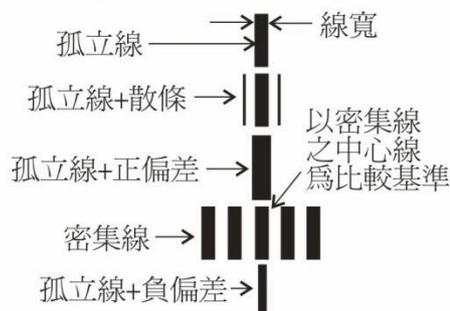
乙類：適用於暗場圖罩或相移圖罩，功能為對主亮紋「增光」，故亦稱「反式散條」



丙類：特殊散條，功能為對空間影像之波谷（主暗紋）「減光」，以增大像比



(b) 明場圖罩之修正



重要說明：

1. 散條自身須為次解像 (Sub-resolution)，即不可成像於晶圓上。散條如影武者、藏鏡人，只可隱居幕後，不可現身台前也
2. 散條亦常見稱為次解像輔助特形 (Sub-resolution Assist Feature, SRAF)
3. 上列散條亦可用於接觸孔光強修正，形狀亦配合由長條形修正為方形
4. 為便於說明，上列遮光、減光、透光命名，特指散條材質自身性質，而非散條整體性質

(c) 以下各式散條屬於甲類，功能為減光

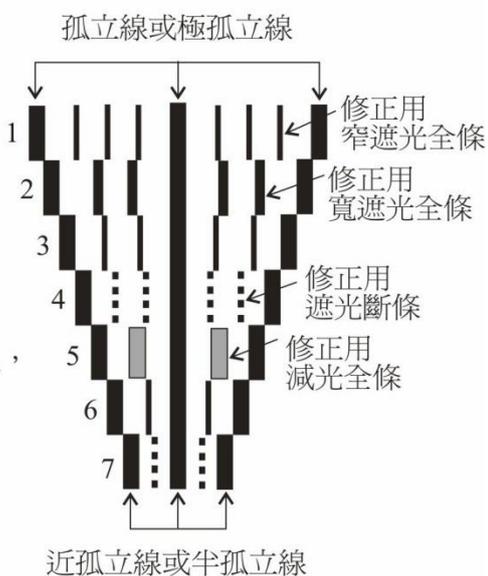
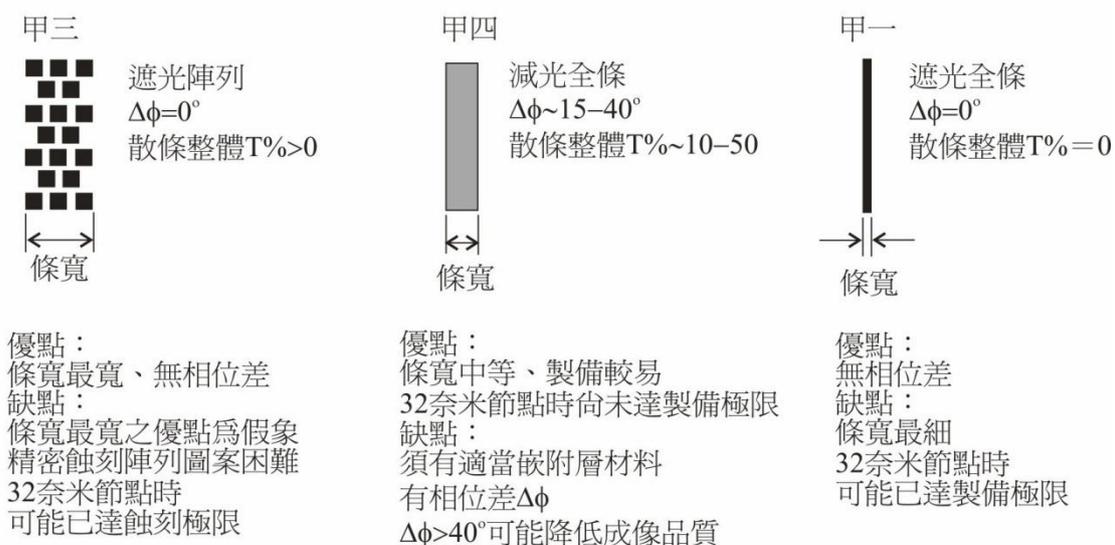


圖 2.8 散條的種類與修正情形

(a) 甲類明場圖罩使用之散條，條寬比較（特殊情況不計）：甲三 > 甲四 > 甲一



重要說明：1. 本書作者評估，甲四「減光全條」較符合未來32奈米以下節點需求  
2. 乙、丙類使用之各型散條，應用範圍較小，重要性較低

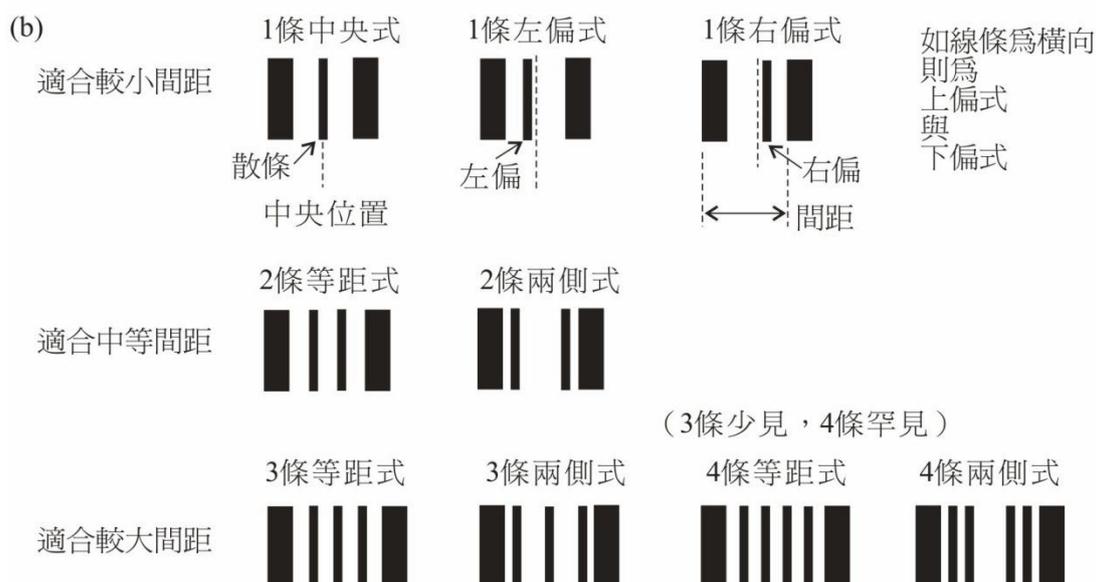


圖 2.9 各式散條的特色與其放置位置

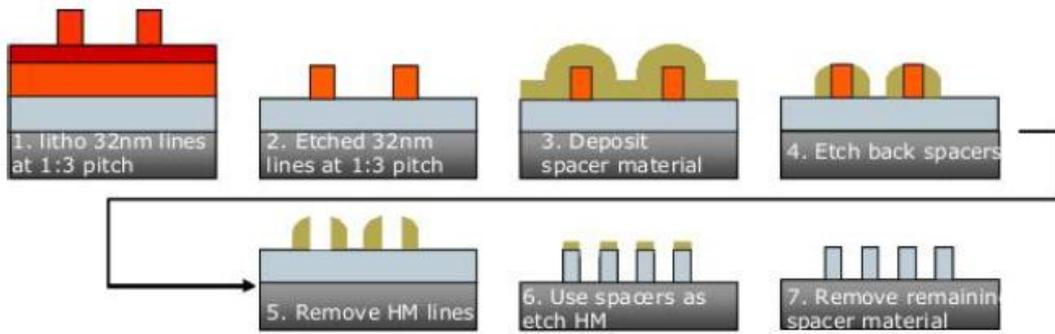


圖 2.10 側壁間隙層製備 32 奈米密集線流程圖 [36]

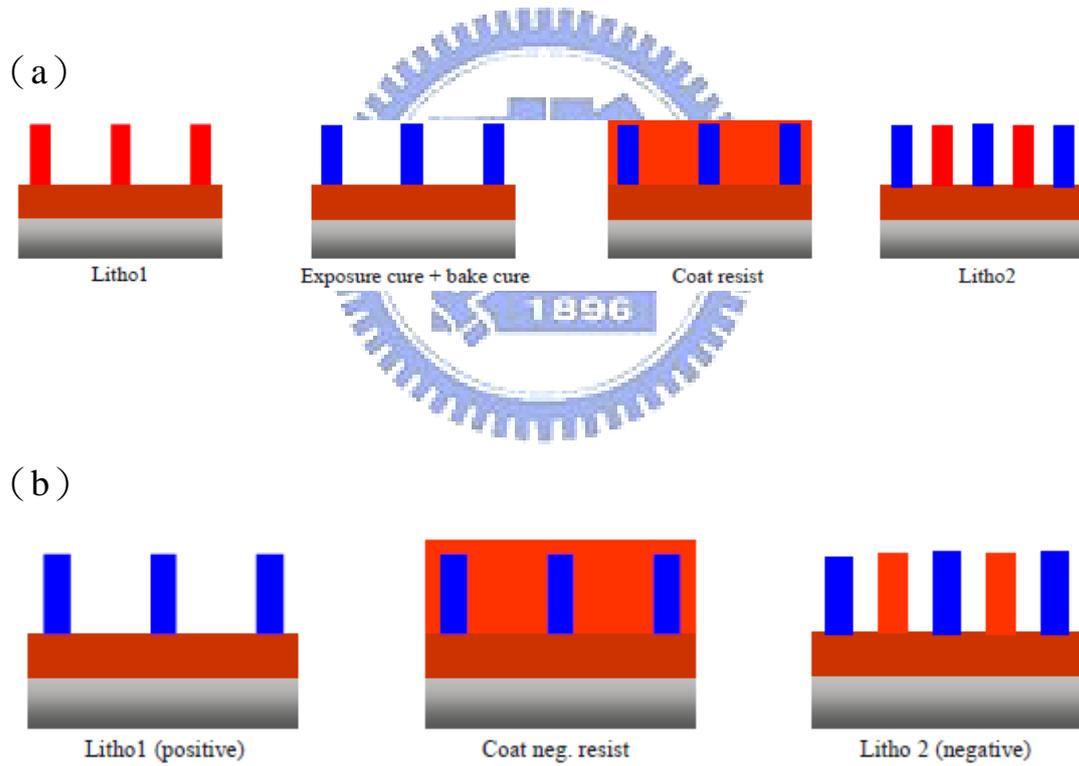


圖 2.11 改良式雙成型製程：(a) 特殊阻劑固化 (b) 正與負型阻劑交替使用（第一次正型，第二次負型） [36]

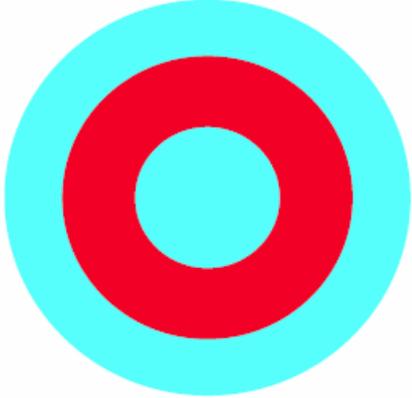
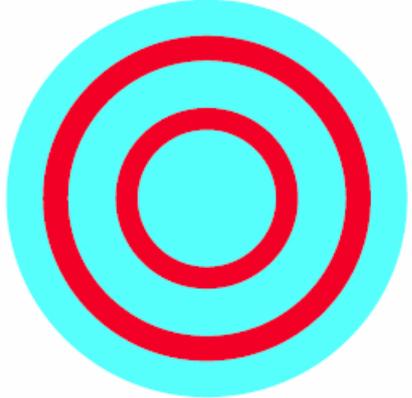
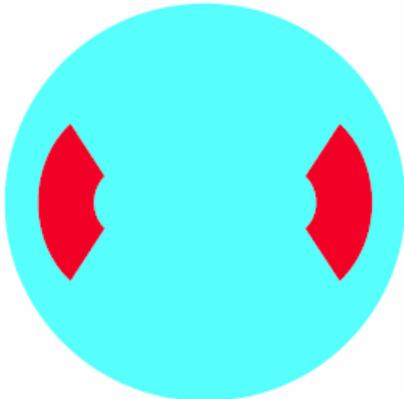
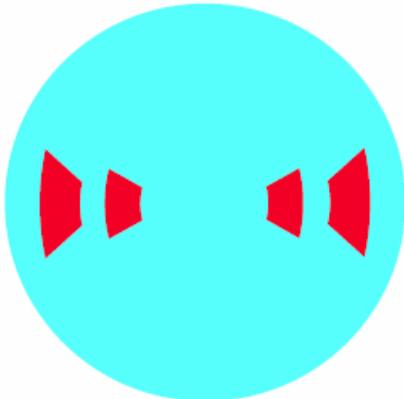
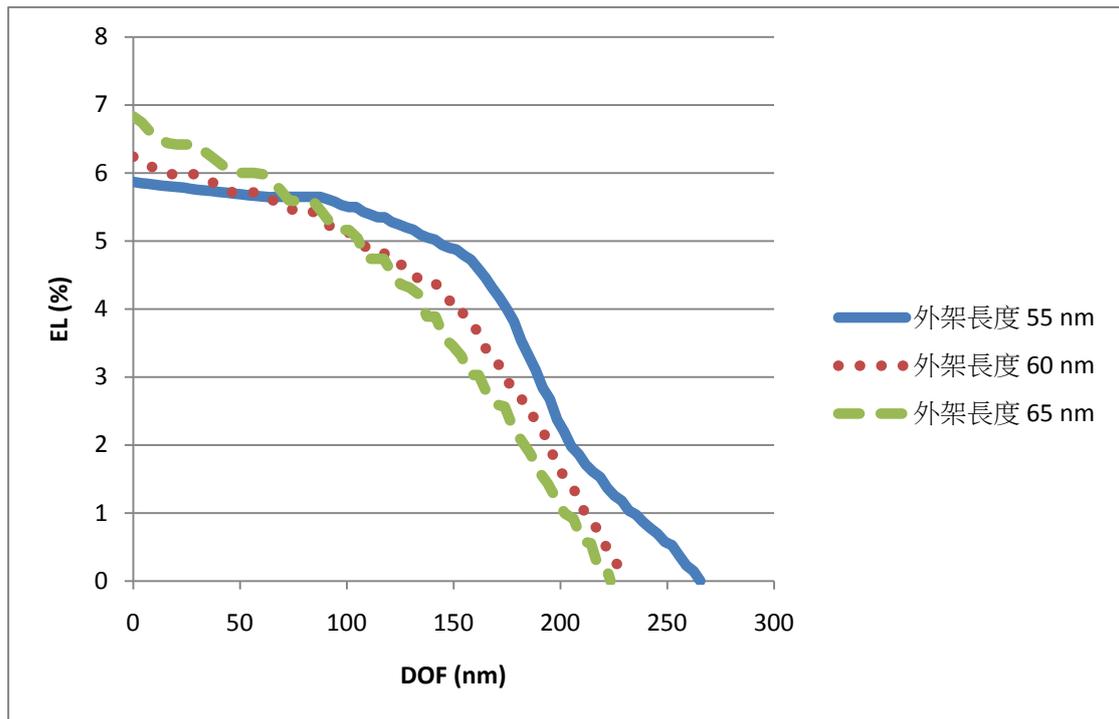
Normal off axis illumination	Proposed modification
<b>Annular</b>	
	
<b>Dipole</b>	
	

圖 2.12 雙重圓環與雙重橫雙扇面發光



(a)



(b)

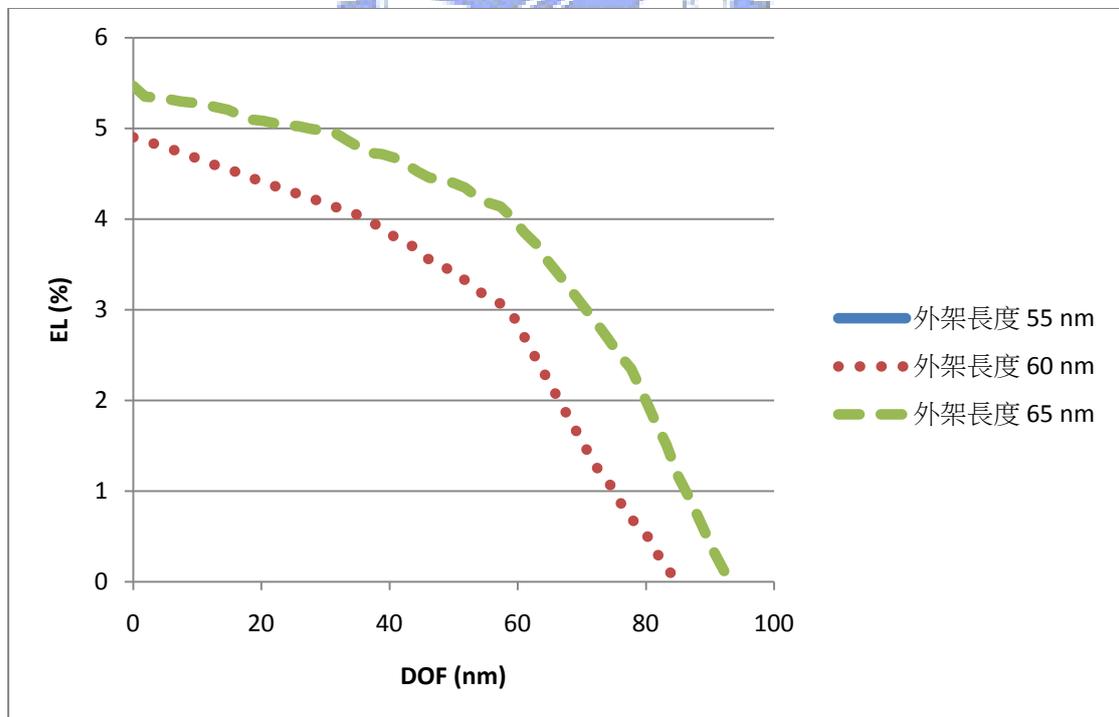
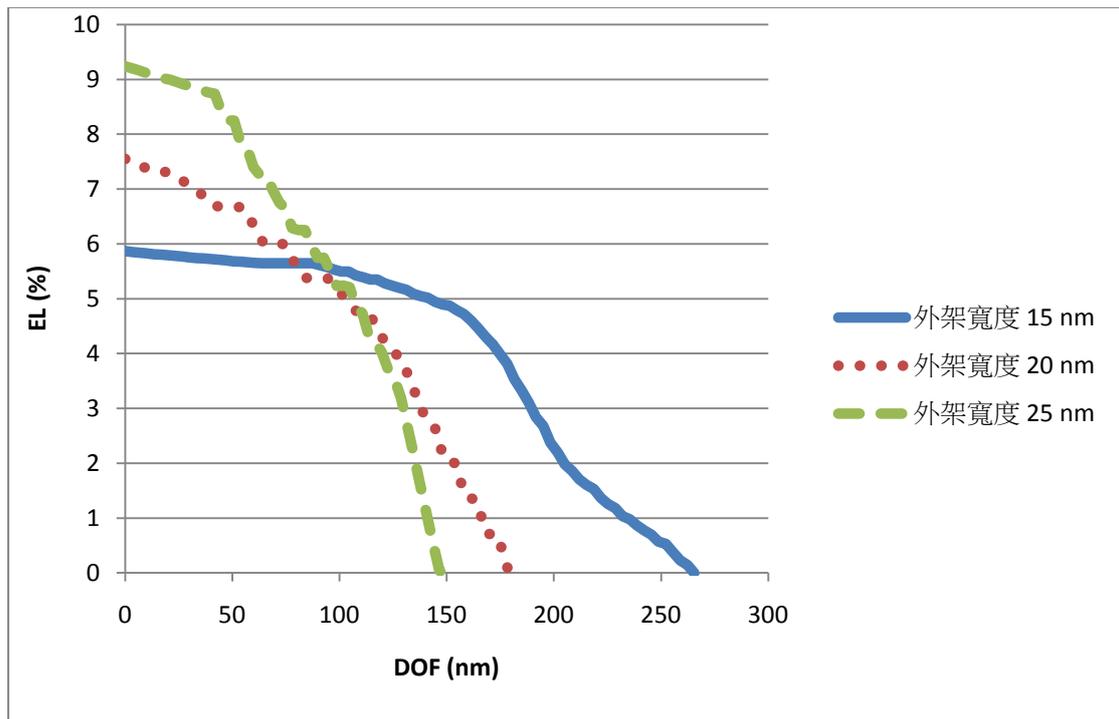


圖 4.1 改變接觸孔外架長度之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

(a)



(b)

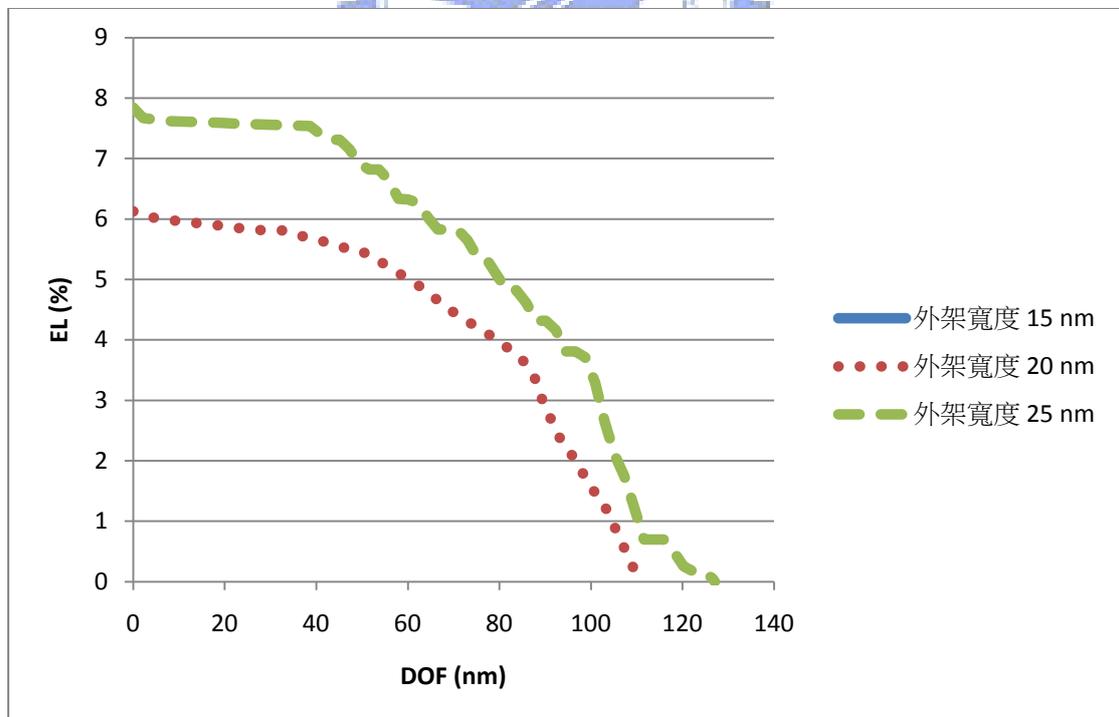
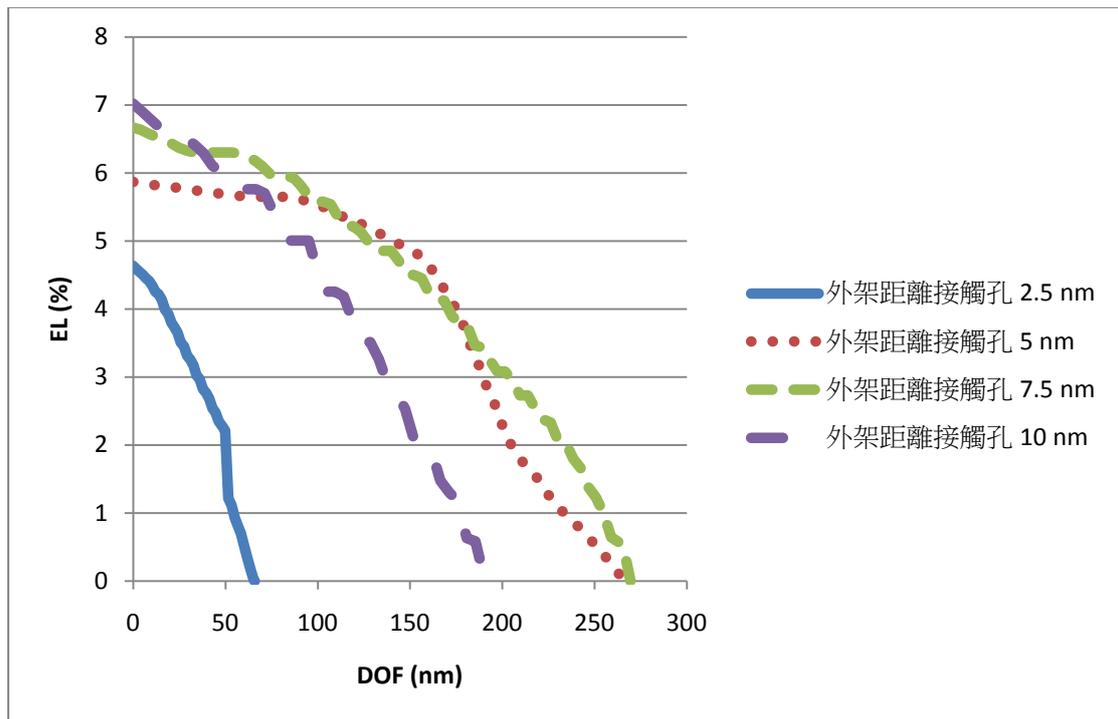


圖 4.2 改變接觸孔外架寬度之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

(a)



(b)

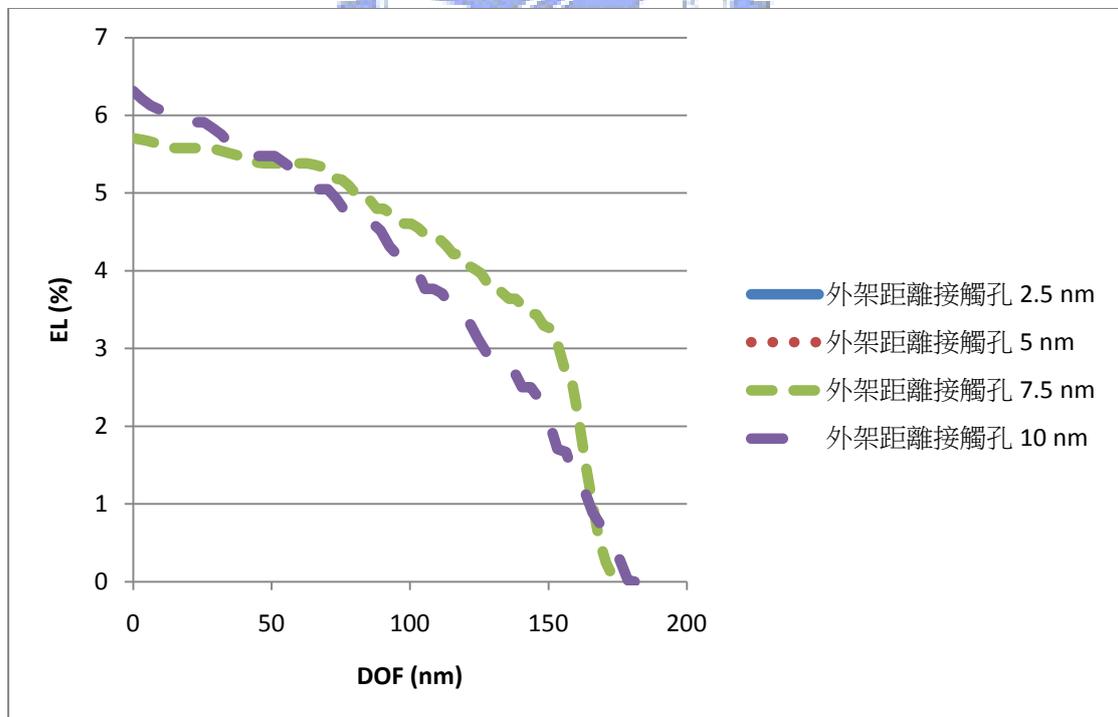
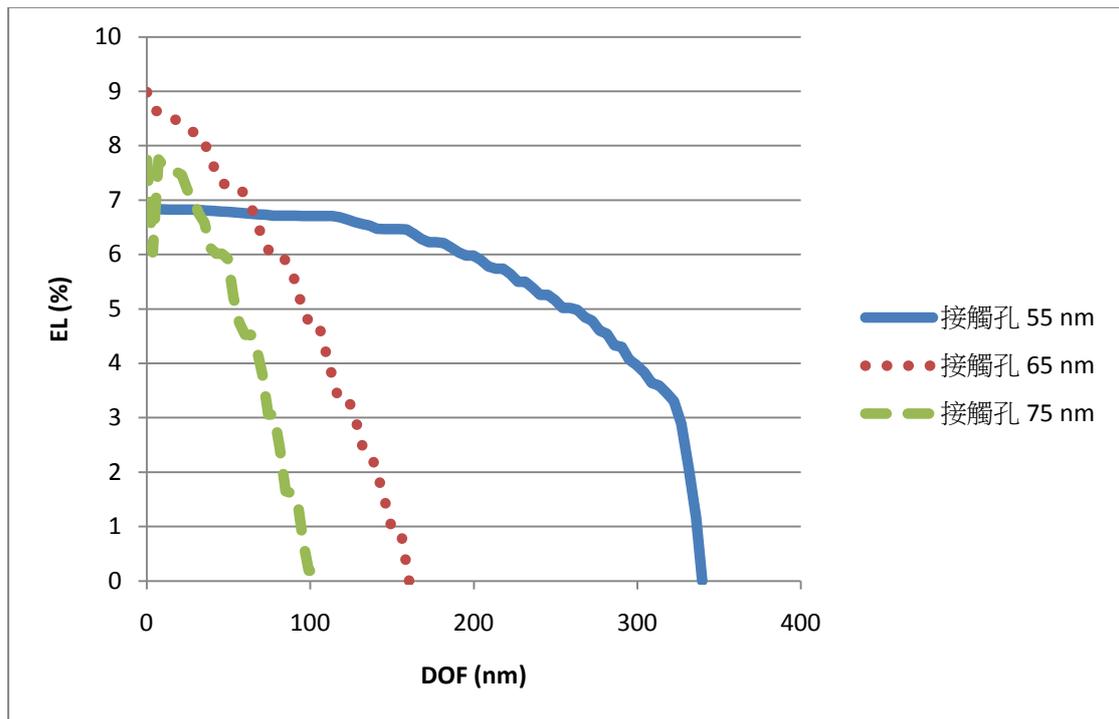


圖 4.3 改變外架與接觸孔距離之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

(a)



(b)

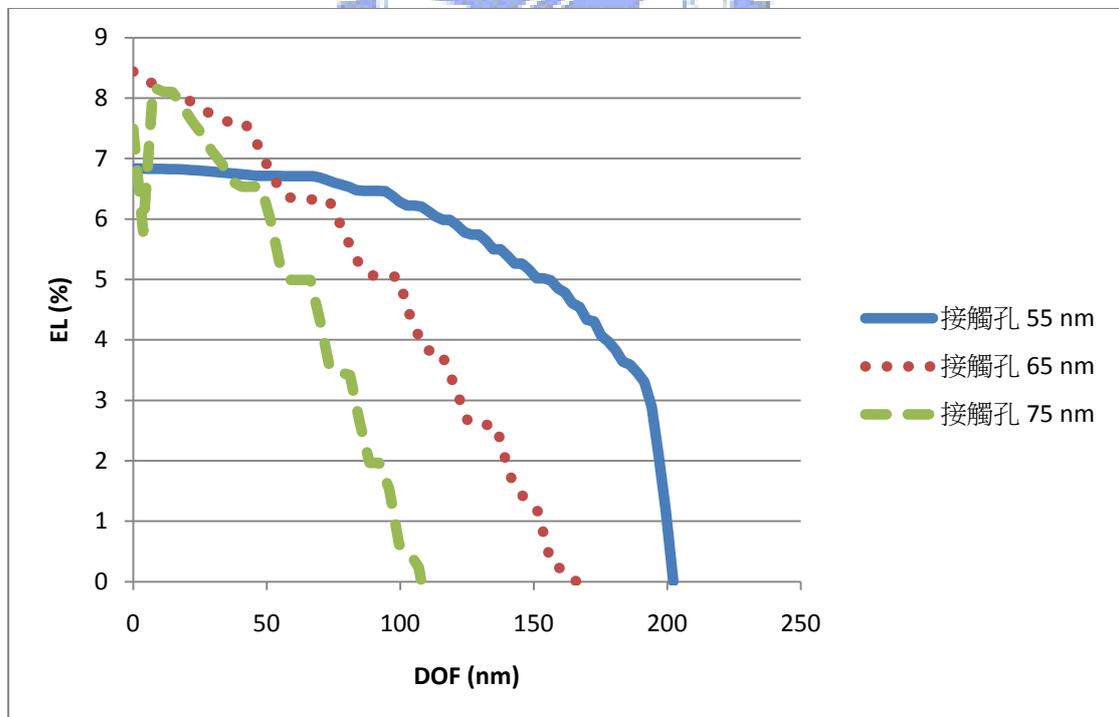
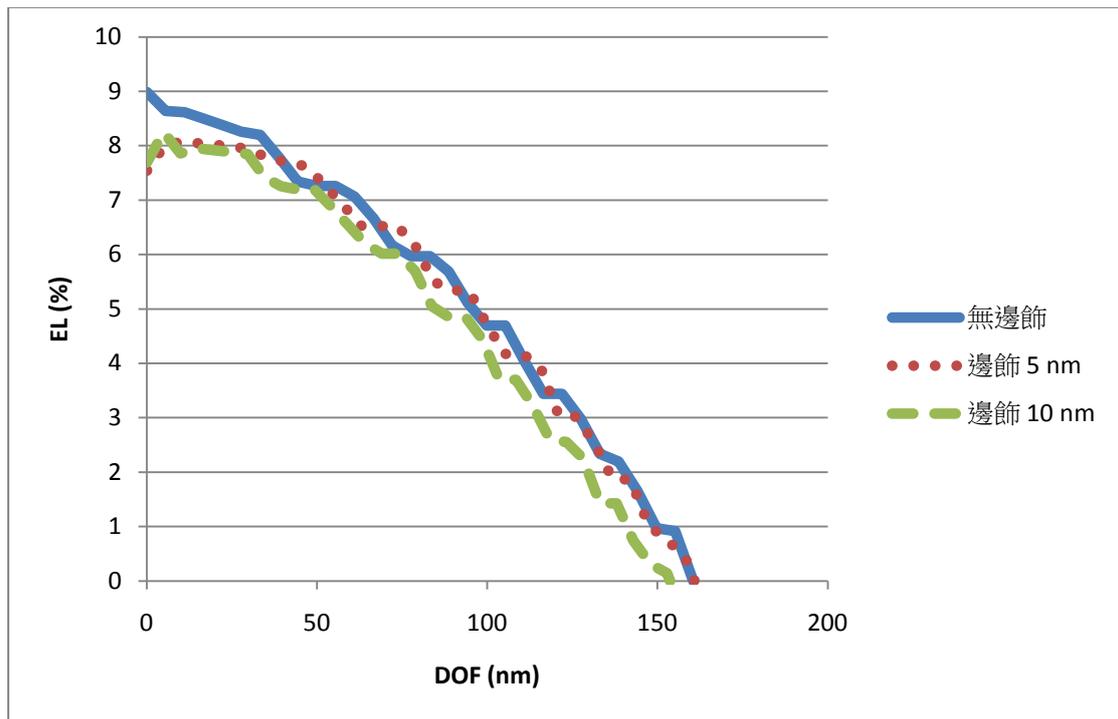


圖 4.4 改變接觸孔圖罩偏差之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

(a)



(b)

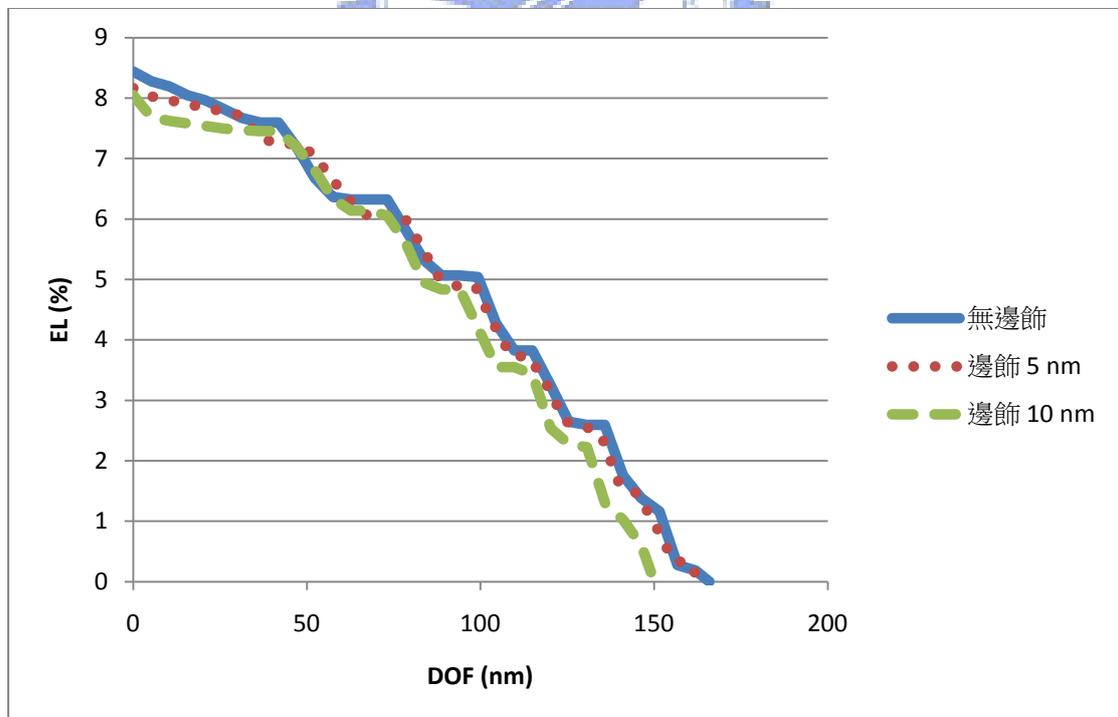
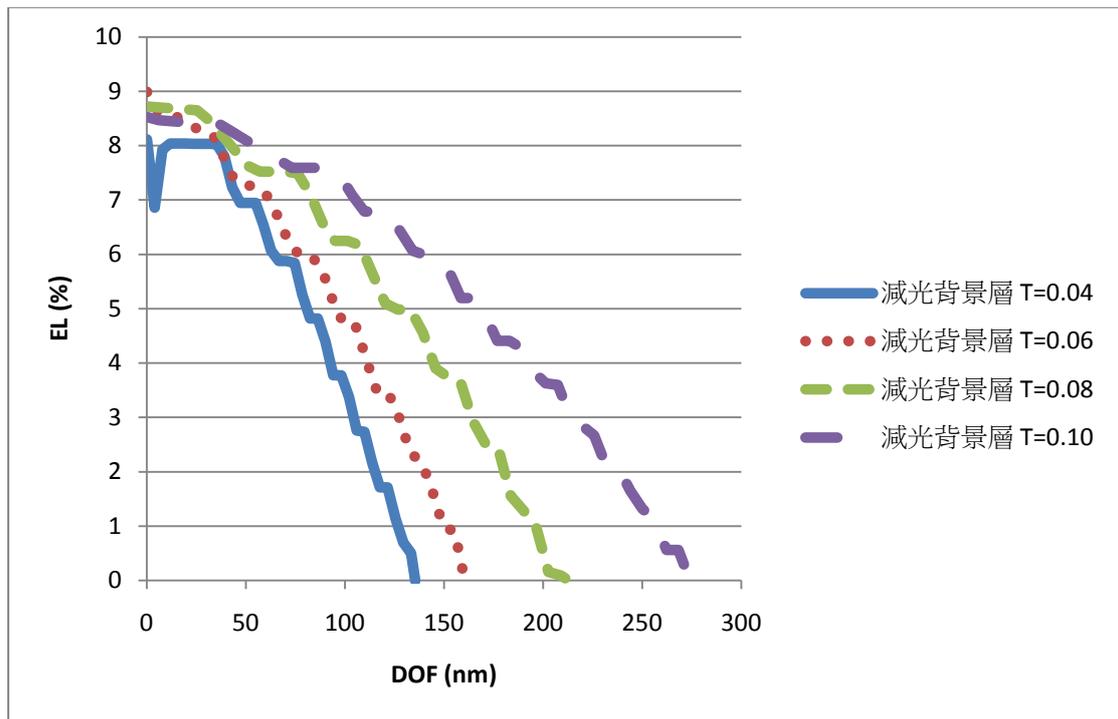


圖 4.5 改變接觸孔邊飾大小之照射寬容度對焦深圖：(a) 間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

(a)



(b)

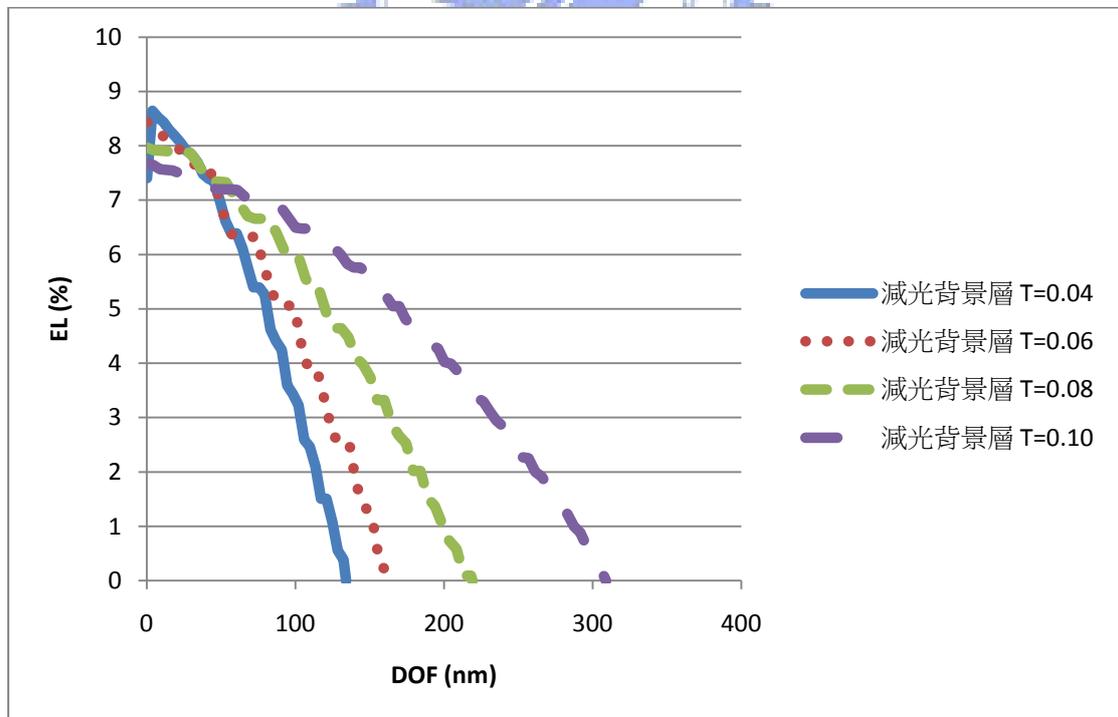


圖 4.6 改變接觸孔減光背景層透射度  $T$  之照射寬容度對焦深圖：(a)

間距 220 奈米 (b) 間距 300 奈米

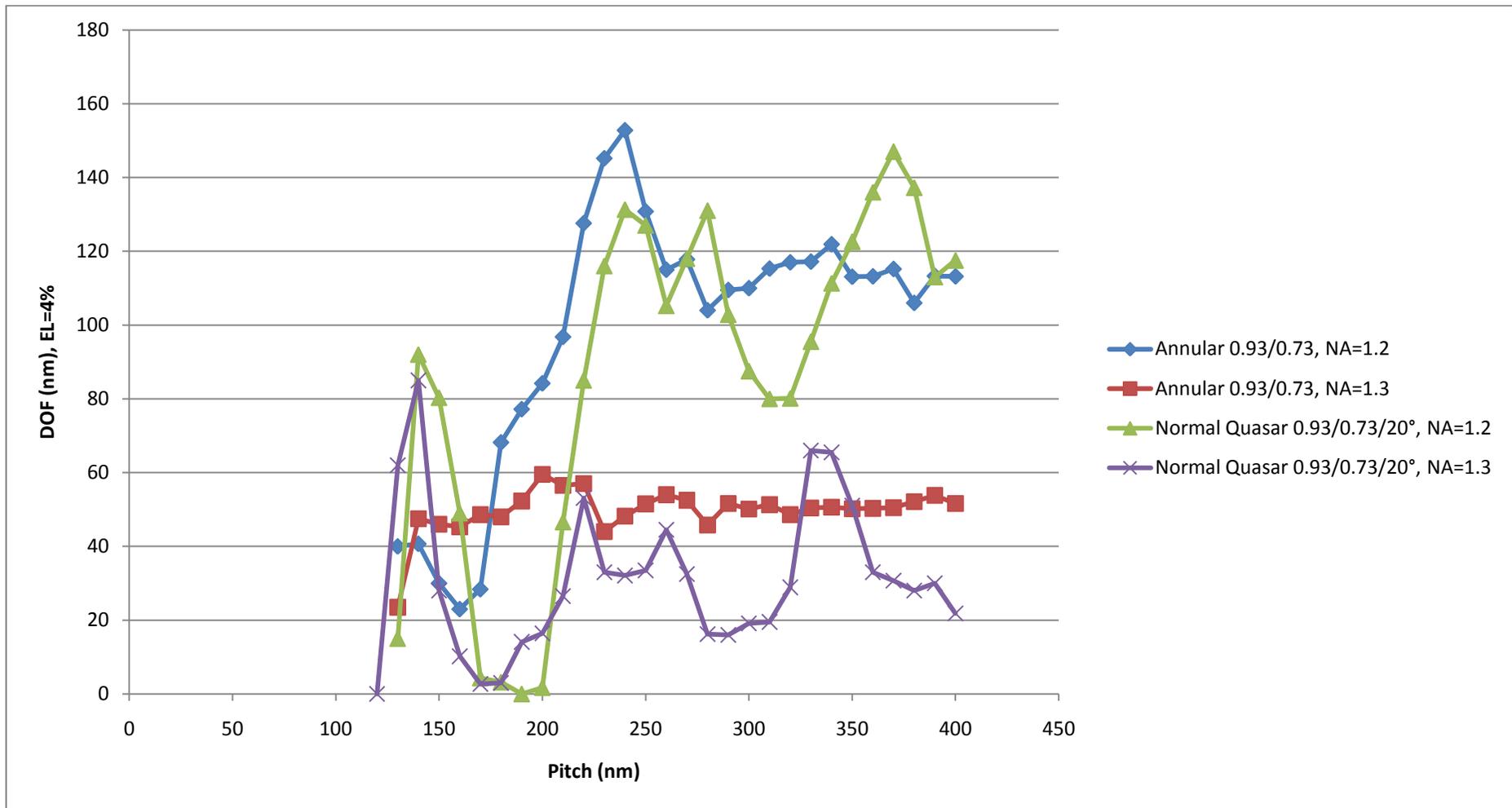


圖 4.7 55 奈米接觸孔，改變 NA 與偏軸發光模式之間距與焦深關係圖

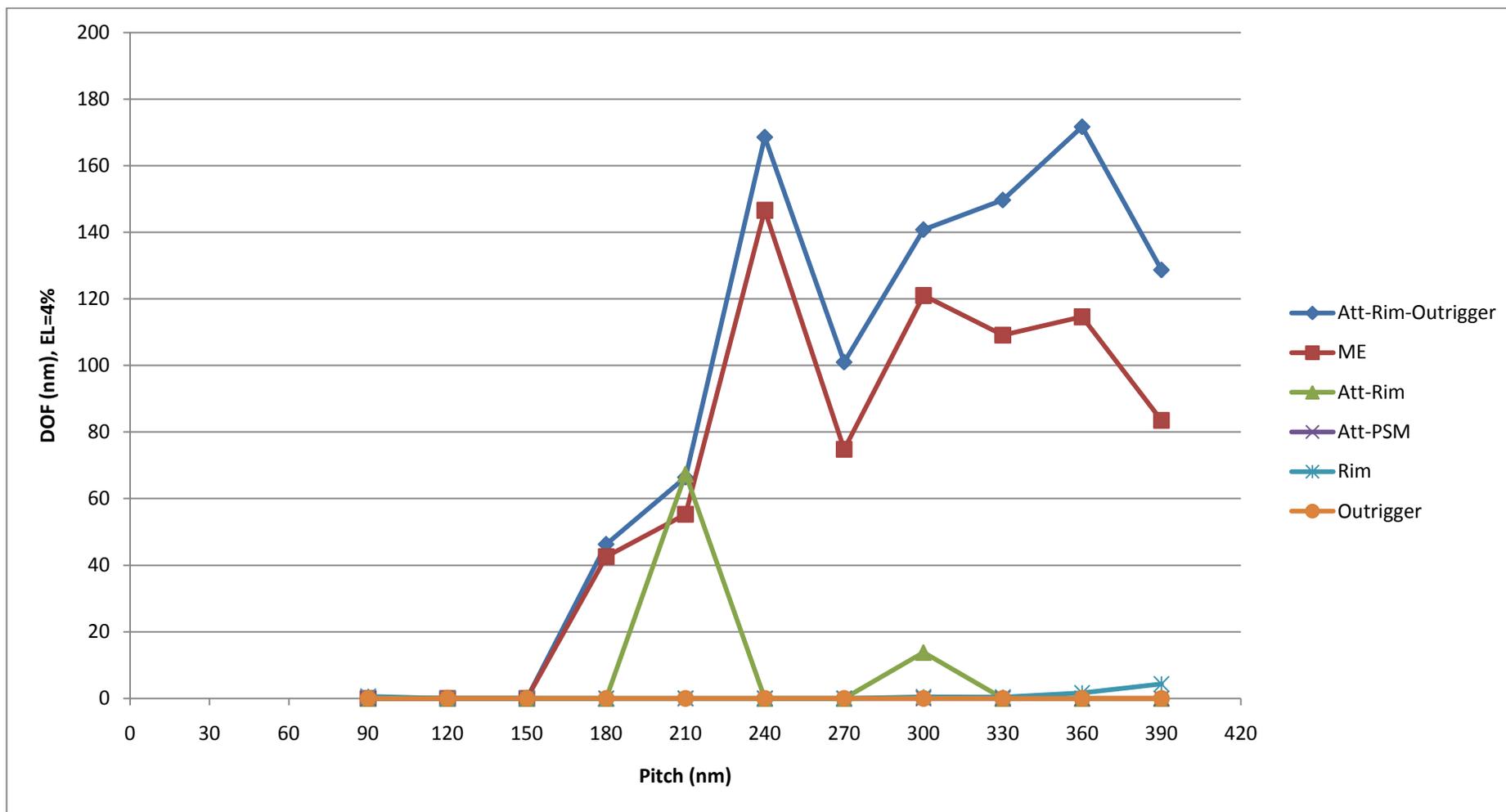


圖 4.8 45 奈米接觸孔，圓環發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖

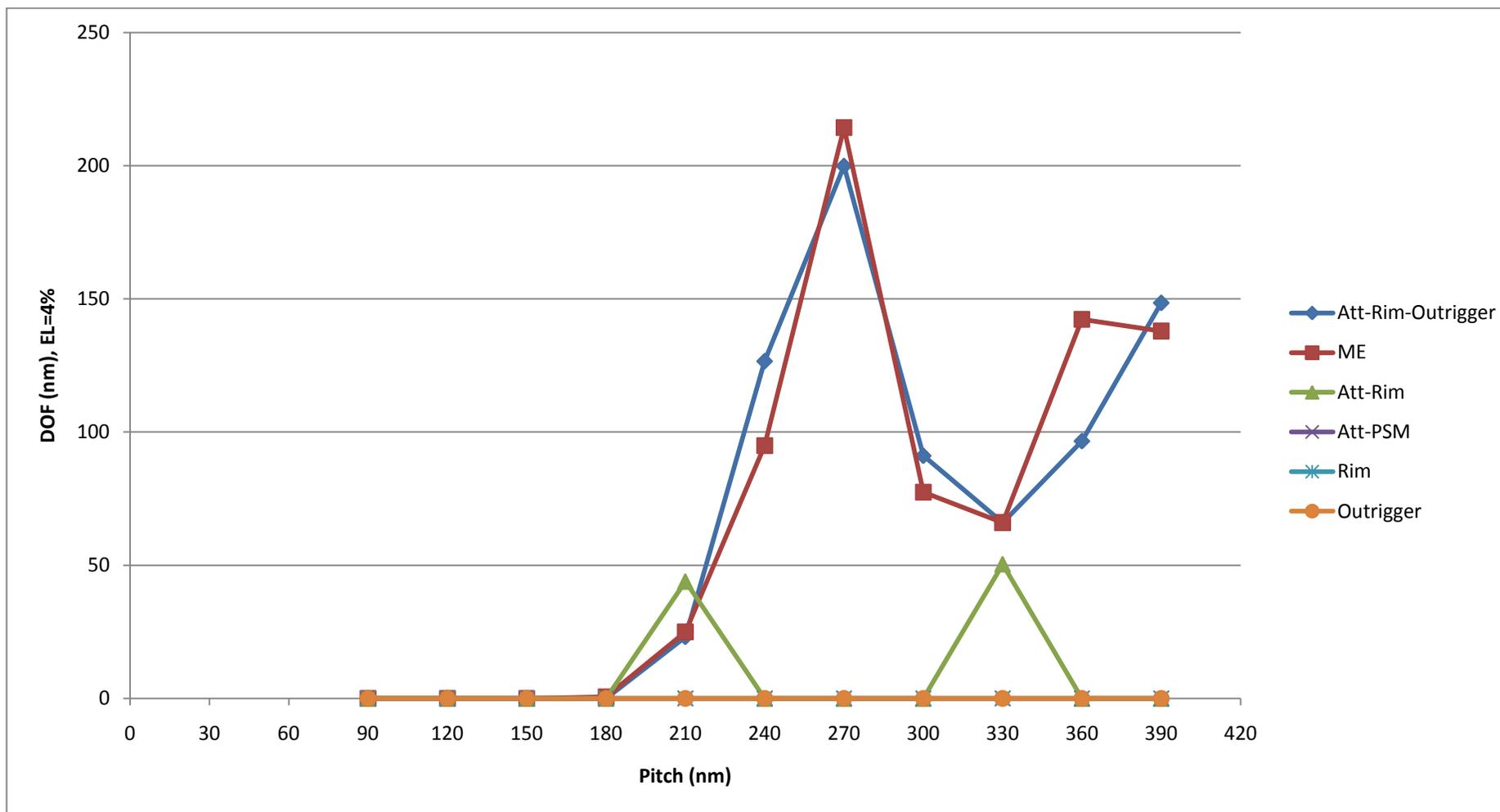


圖 4.9 45 奈米接觸孔，斜四扇面 (Normal Quasar) 發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖

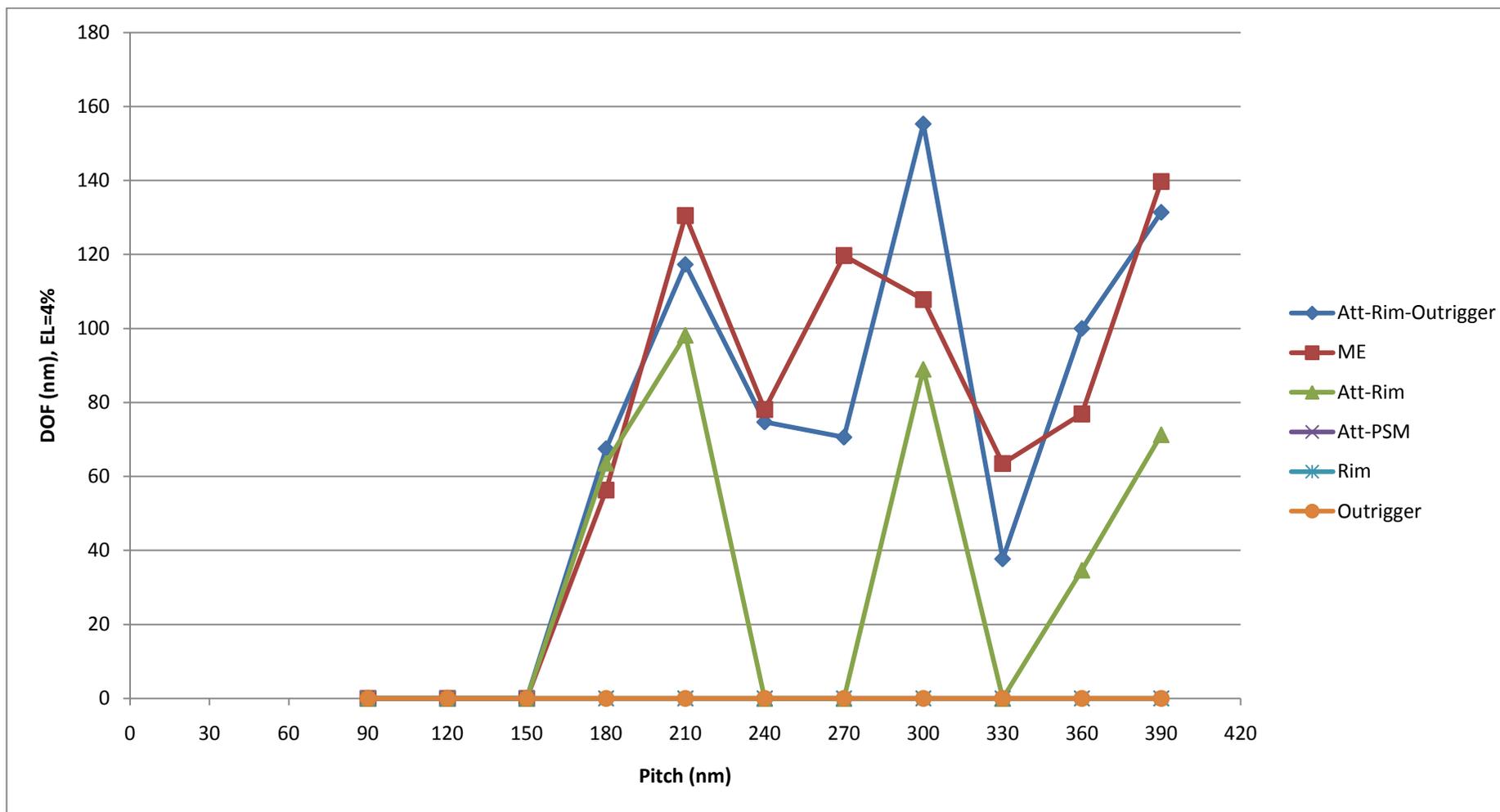
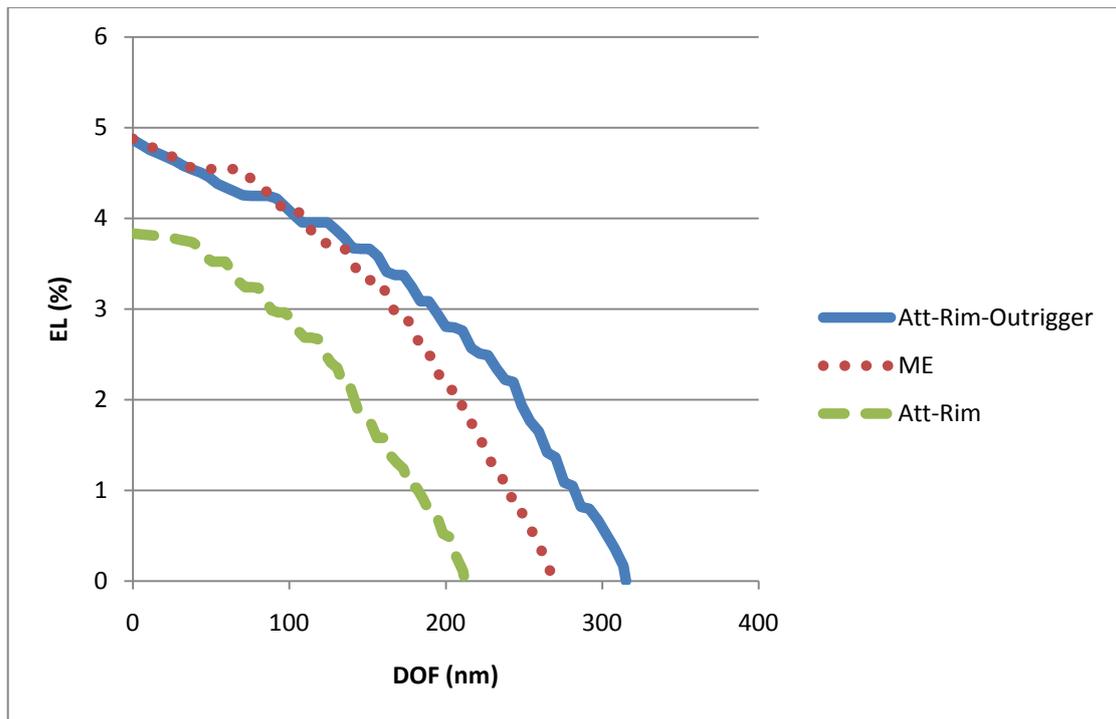


圖 4.10 45 奈米接觸孔，正四扇面（Cross Quasar）發光，不同圖罩設計之間距與焦深關係圖

(a)



(b)

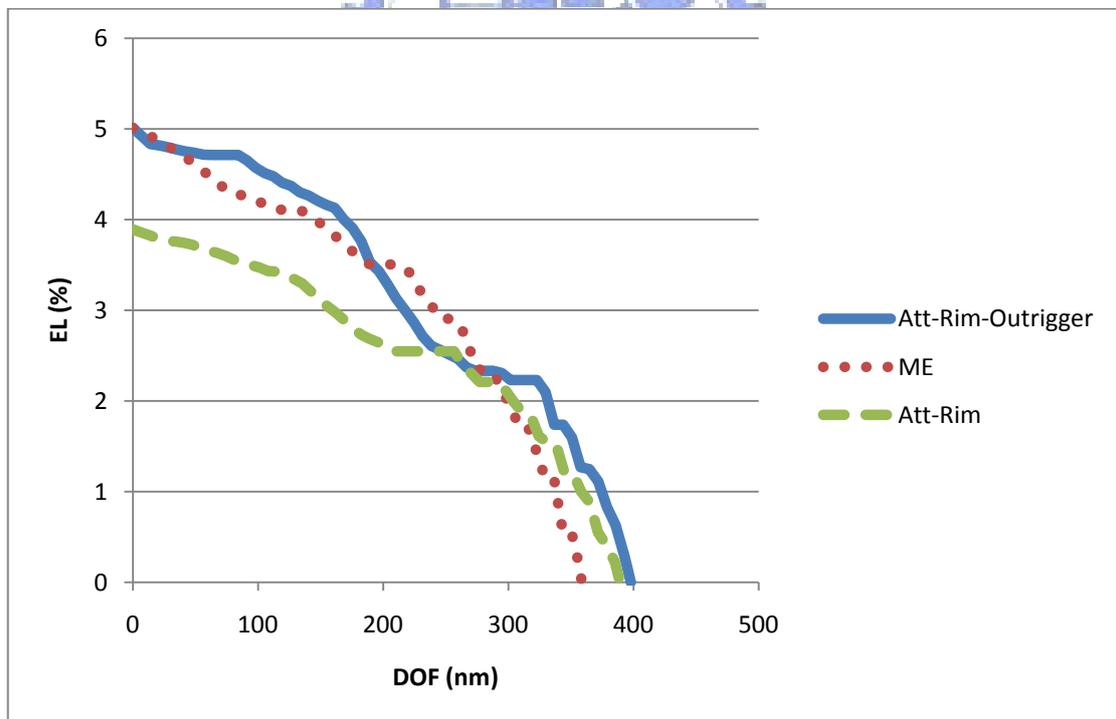
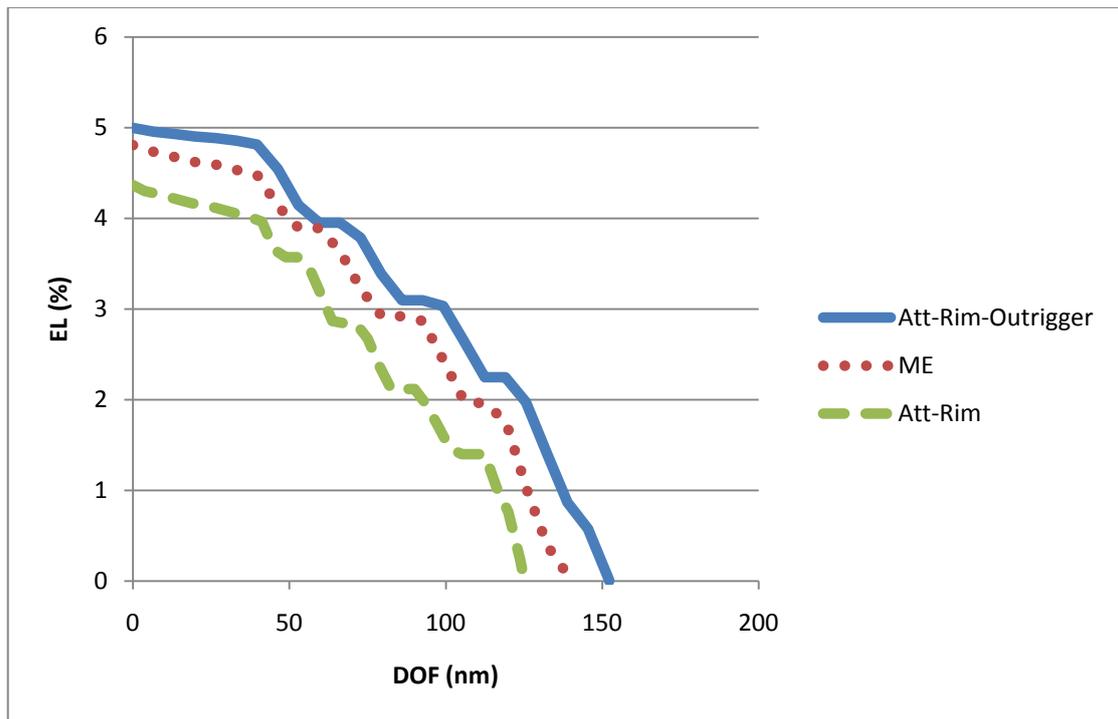


圖 4.11 45 奈米接觸孔，圓環發光，固定間距 240 奈米，固定  $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，  
改變  $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對焦深圖：(a)  $\sigma_{\text{inner}}=0.50$  (b)

$$\sigma_{\text{inner}}=0.73$$

(a)



(b)

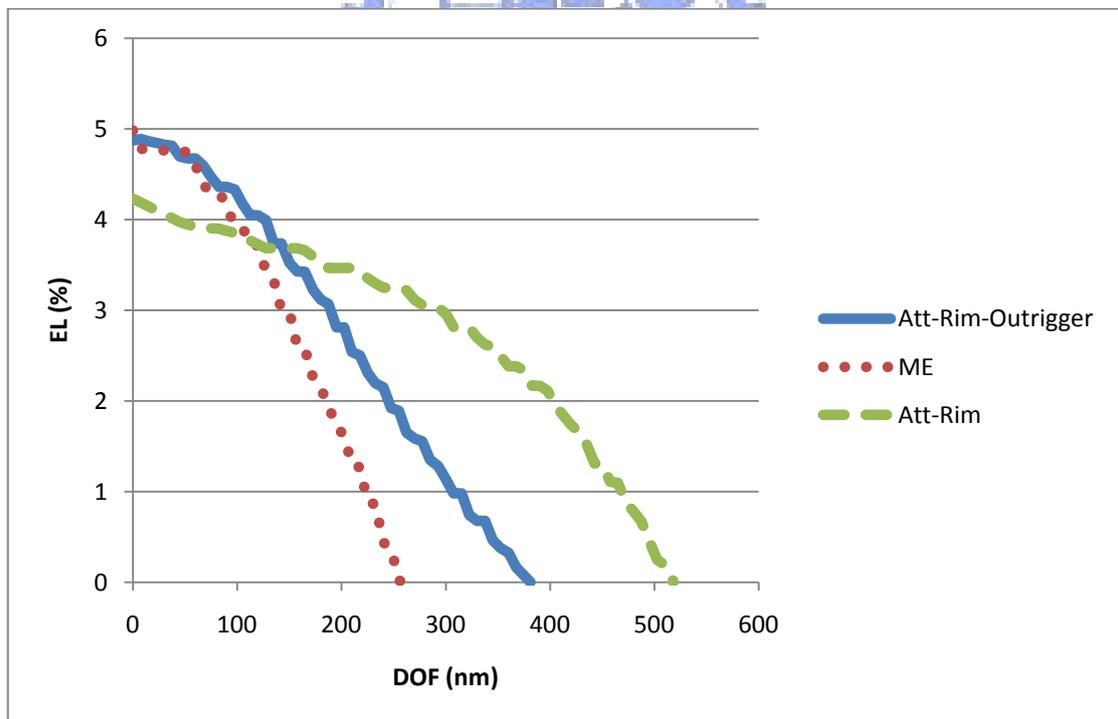
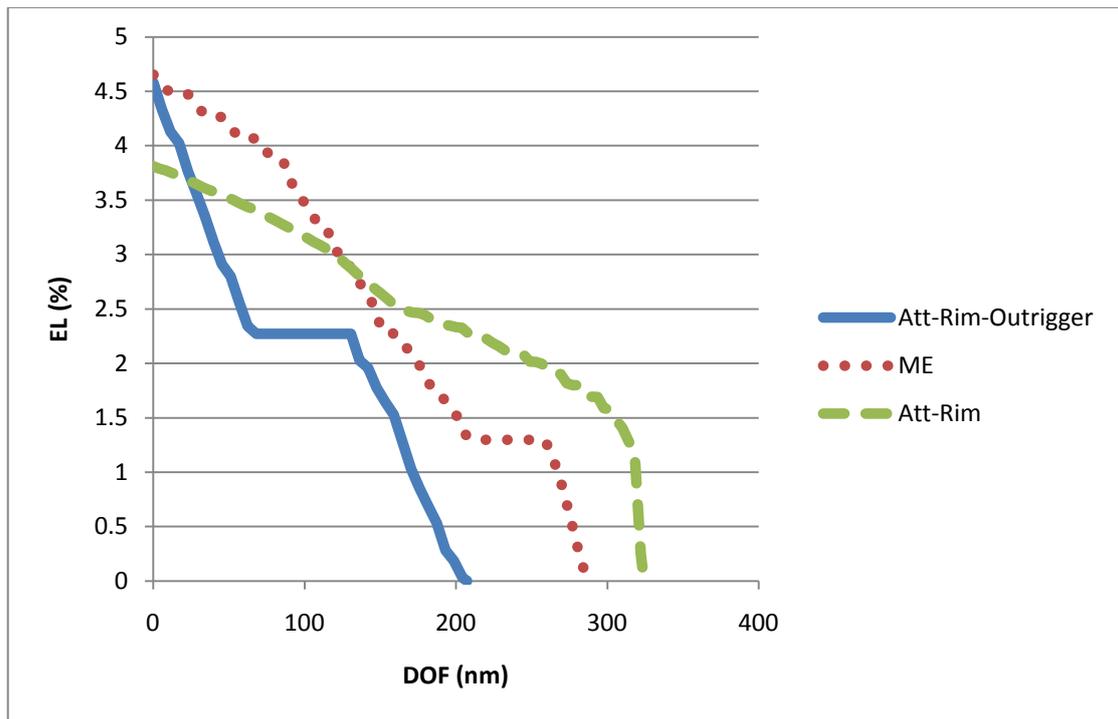


圖 4.12 45 奈米接觸孔，斜四扇面發光，固定間距 240 奈米，固定扇角為  $20^\circ$ ，固定  $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，改變  $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對

焦深圖：(a)  $\sigma_{\text{inner}}=0.50$  (b)  $\sigma_{\text{inner}}=0.73$

(a)



(b)

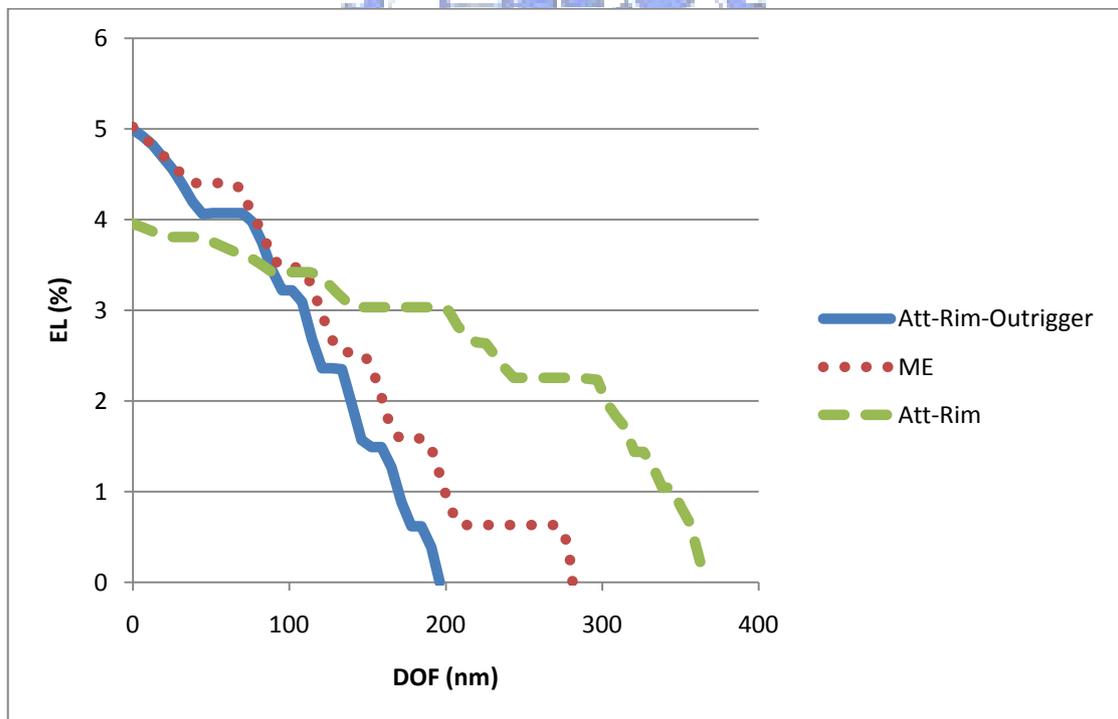


圖 4.13 45 奈米接觸孔，正四扇面發光，固定間距 240 奈米，固定扇角為  $20^\circ$ ，固定  $\sigma_{\text{outer}}=0.88$ ，改變  $\sigma_{\text{inner}}$ ，不同圖罩之照射寬容度對

焦深圖：(a)  $\sigma_{\text{inner}}=0.50$  (b)  $\sigma_{\text{inner}}=0.73$

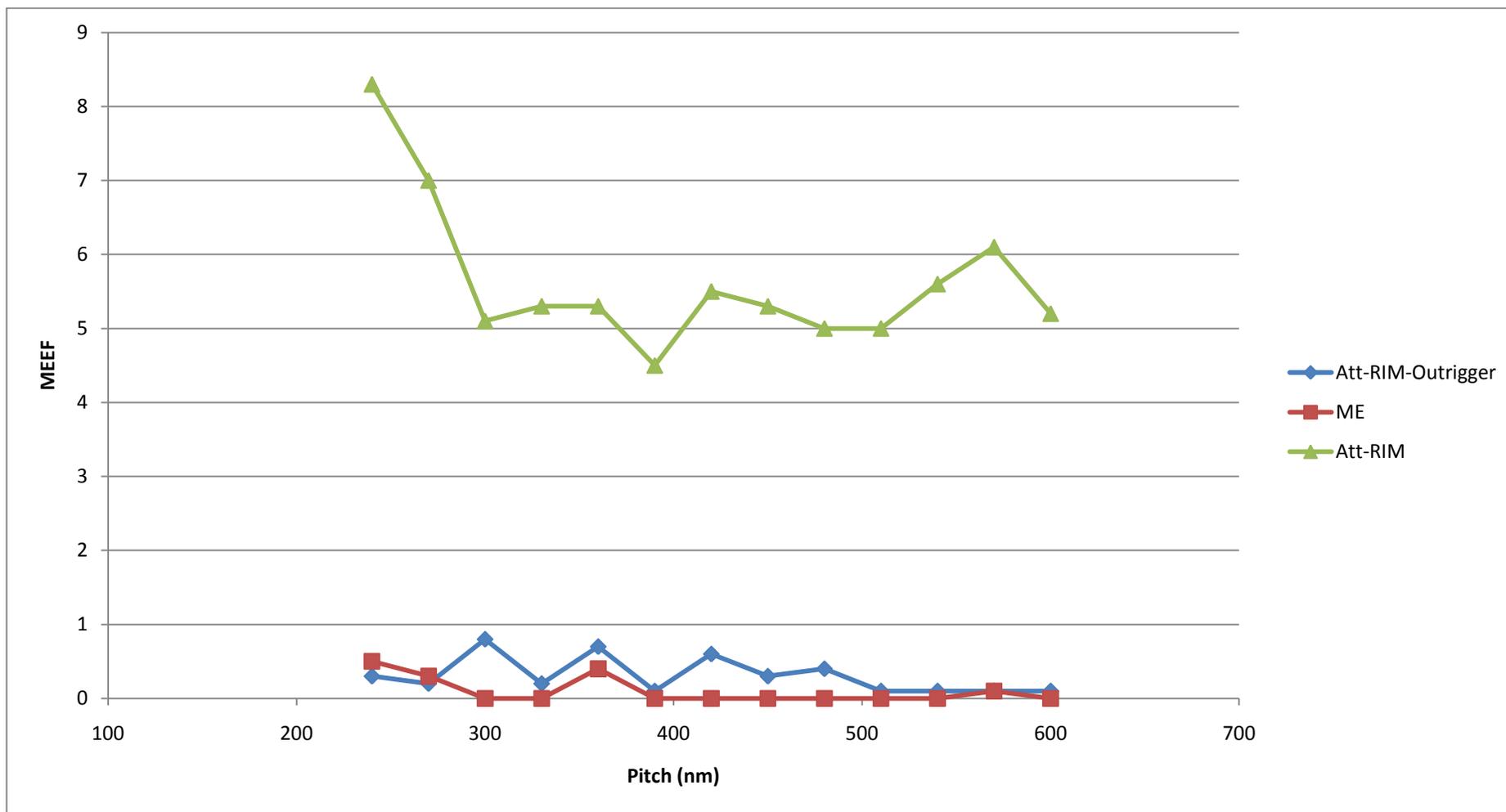


圖 4.14 45 奈米接觸孔，圓環發光， $\sigma_{outer}=0.88$ ， $\sigma_{inner}=0.73$ ，不同圖罩設計之 MEEF 對間距關係圖

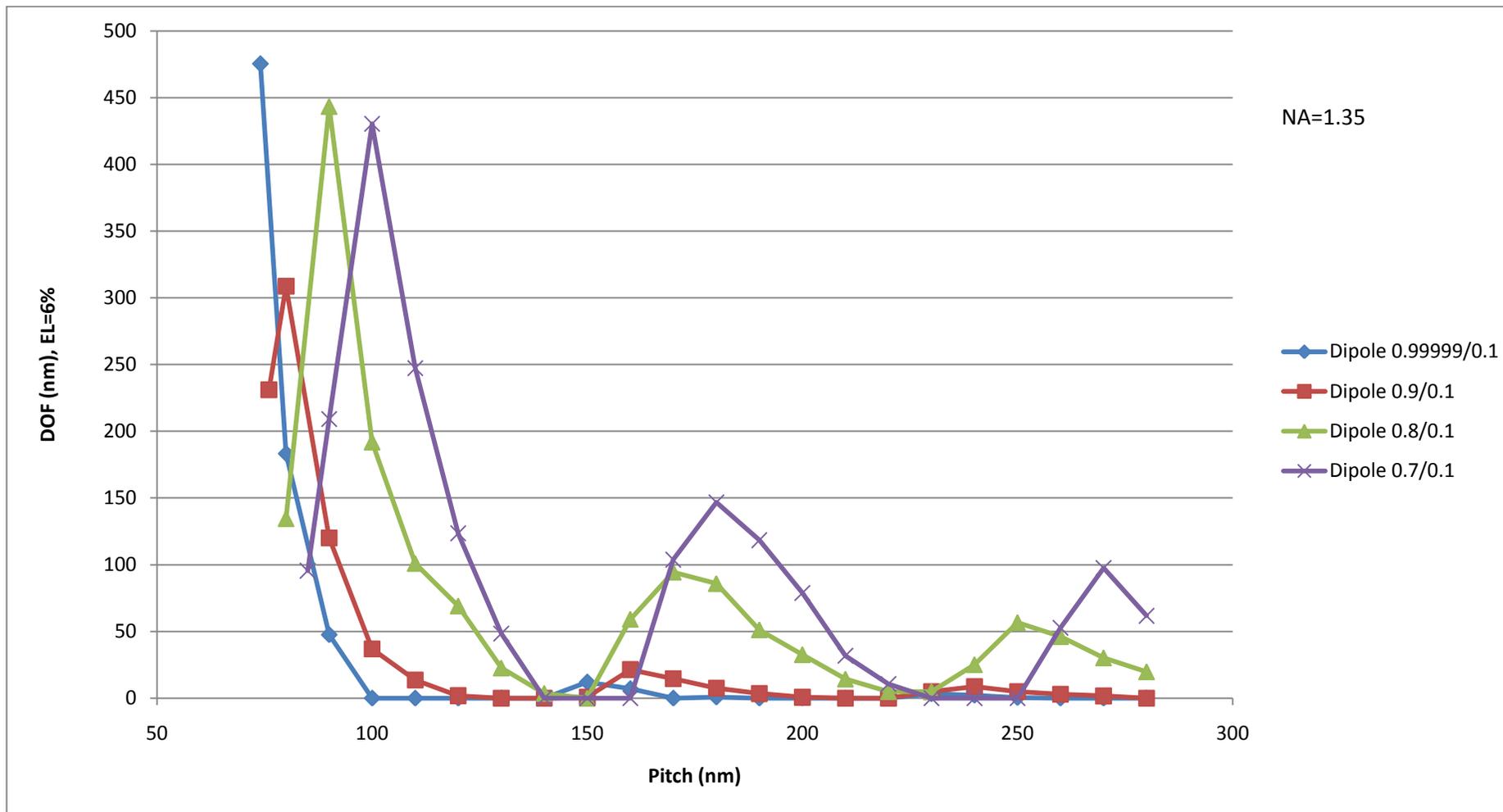


圖 4.15 28 奈米線，橫雙圓孔發光，固定 NA=1.35， $\sigma_{radius}=0.1$ ，改變  $\sigma_{center}$  之焦深與間距關係圖

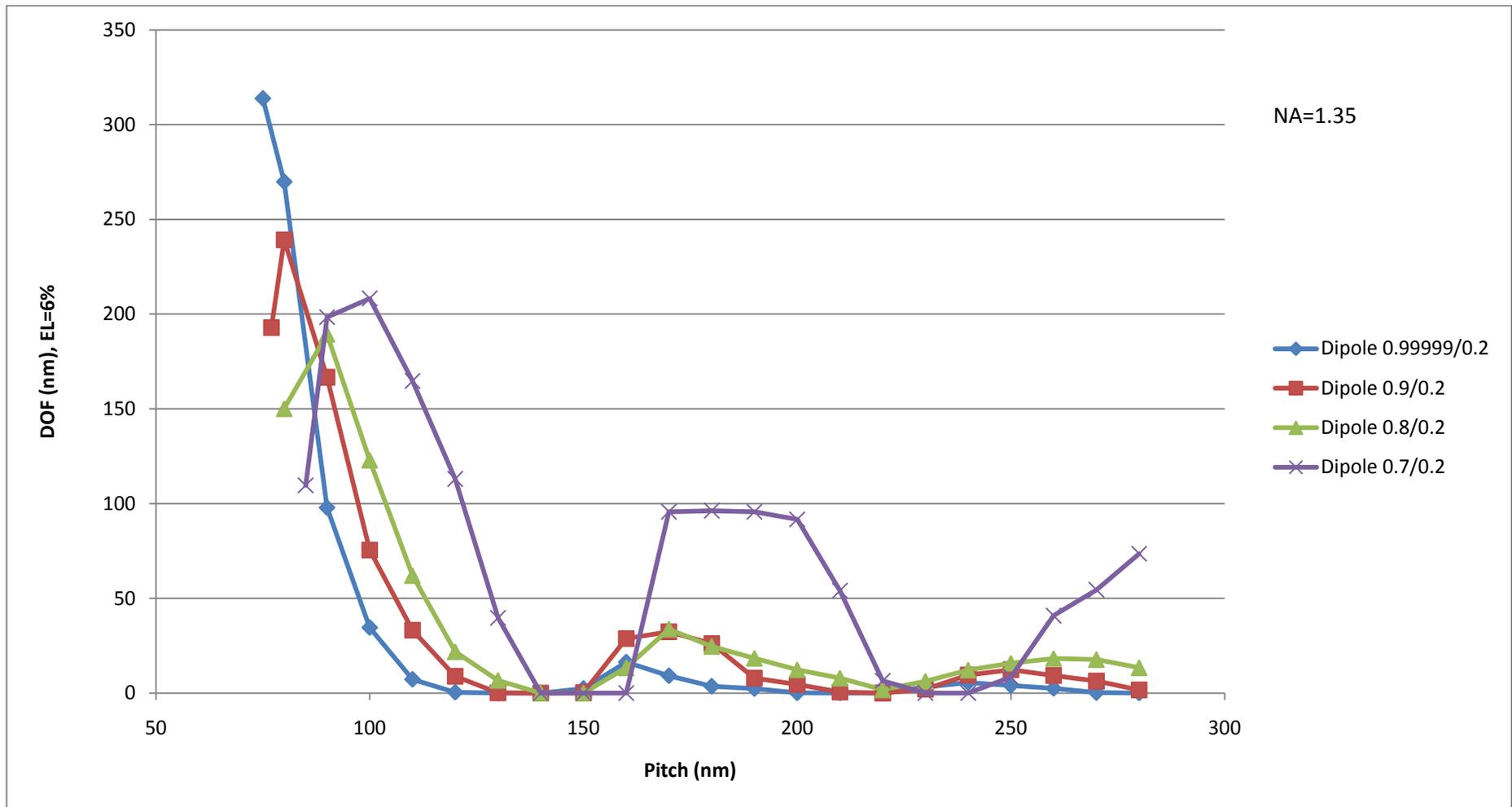


圖 4.16 28 奈米線，橫雙圓孔發光，固定 NA=1.35， $\sigma_{radius}=0.2$ ，改變  $\sigma_{center}$  之焦深與間距關係圖

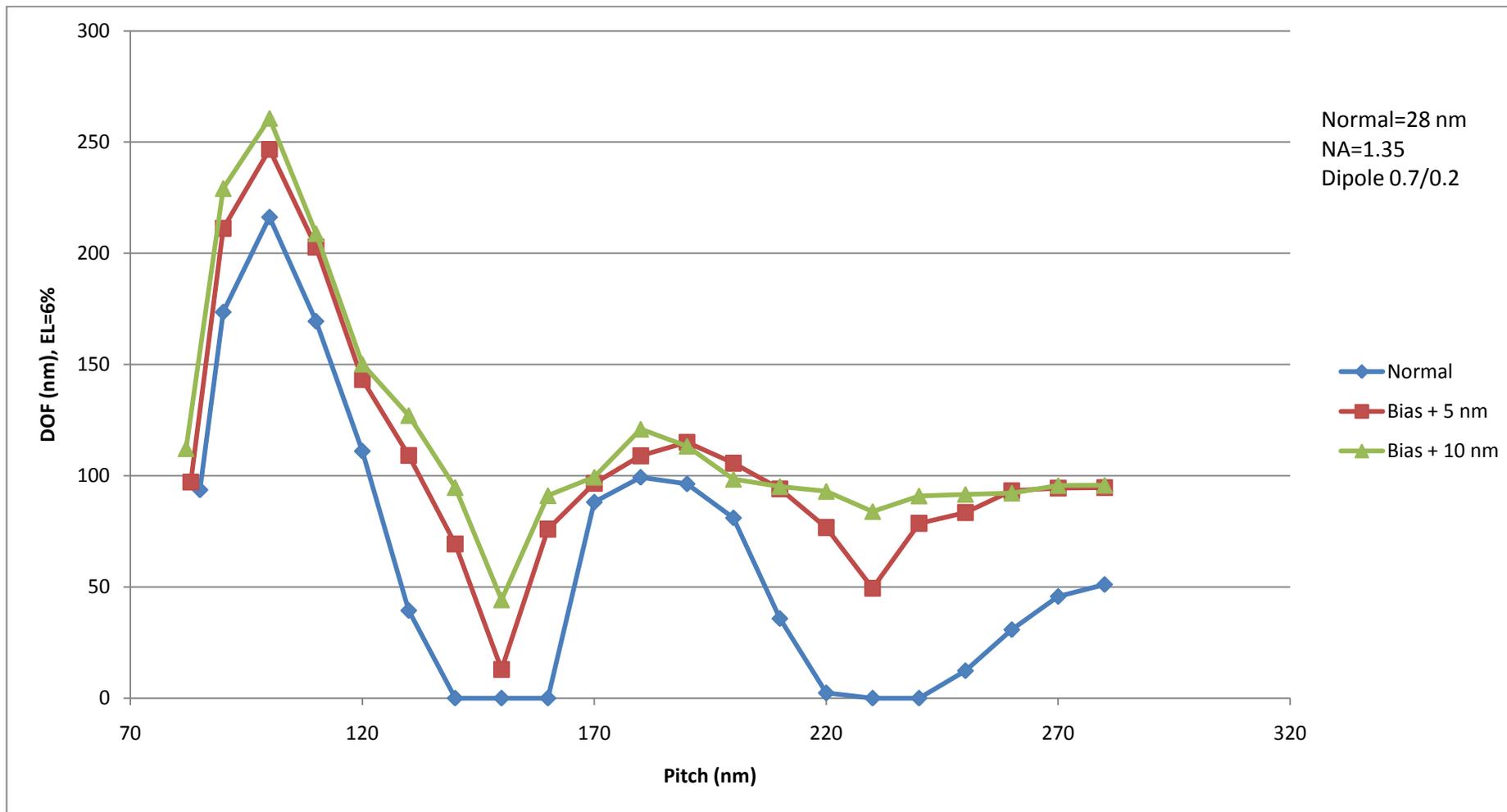


圖 4.17 28 奈米線，正偏差對焦深的影響

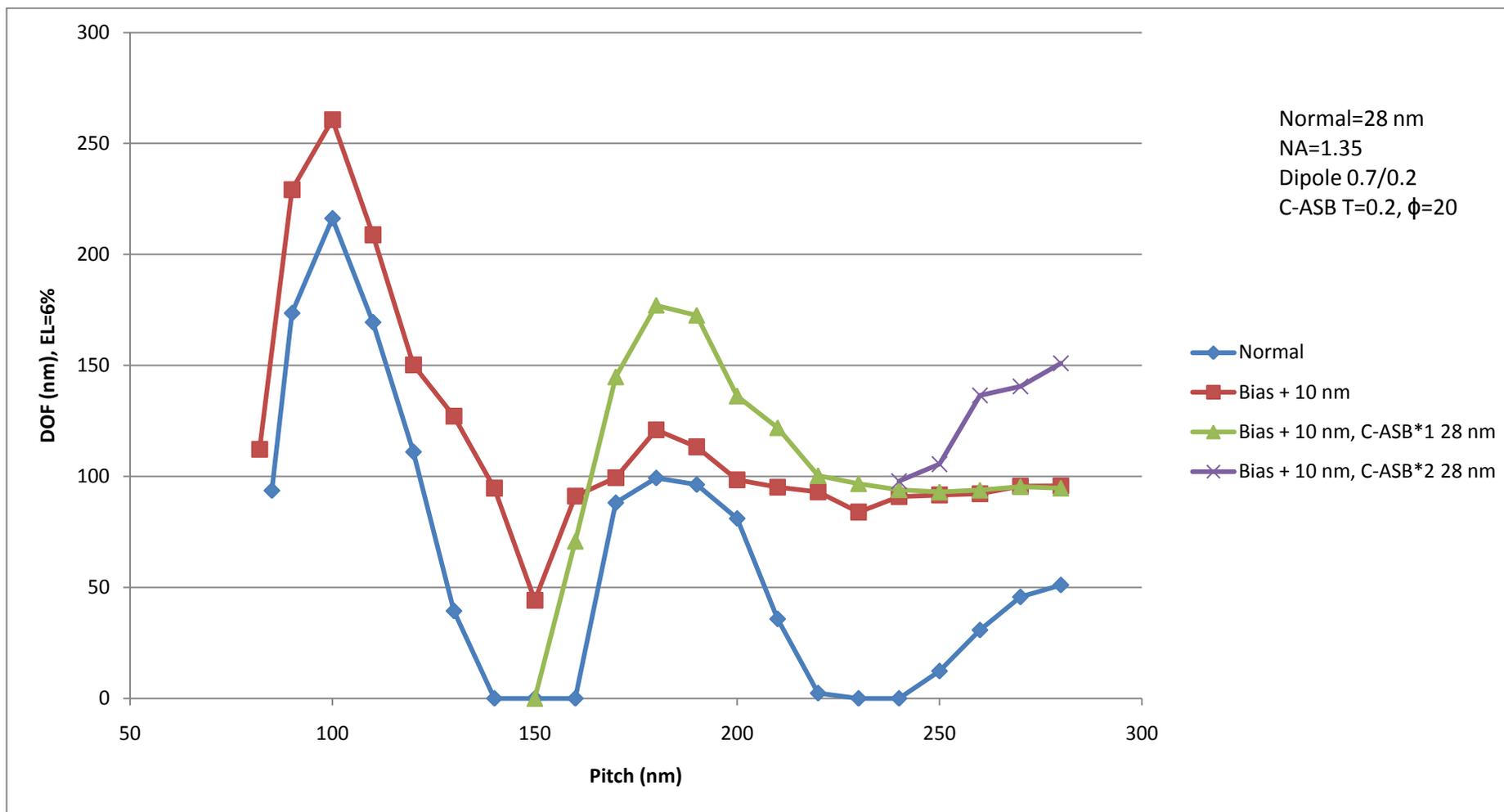


圖 4.18 28 奈米線，加入中央式全條減光散條對焦深的影響

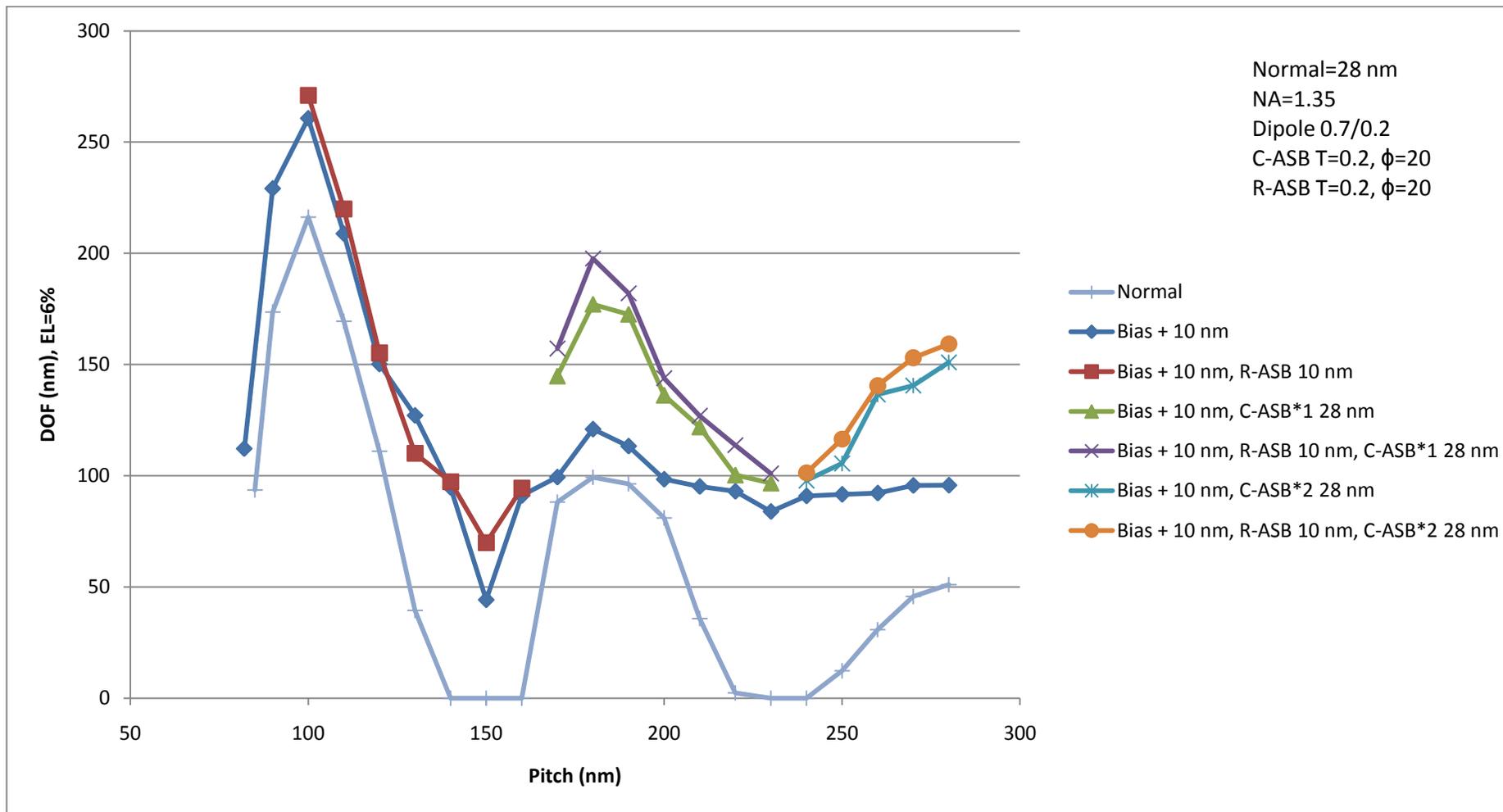


圖 4.19 28 奈米線，加入緣邊式與中央式全條減光散條對焦深的影響

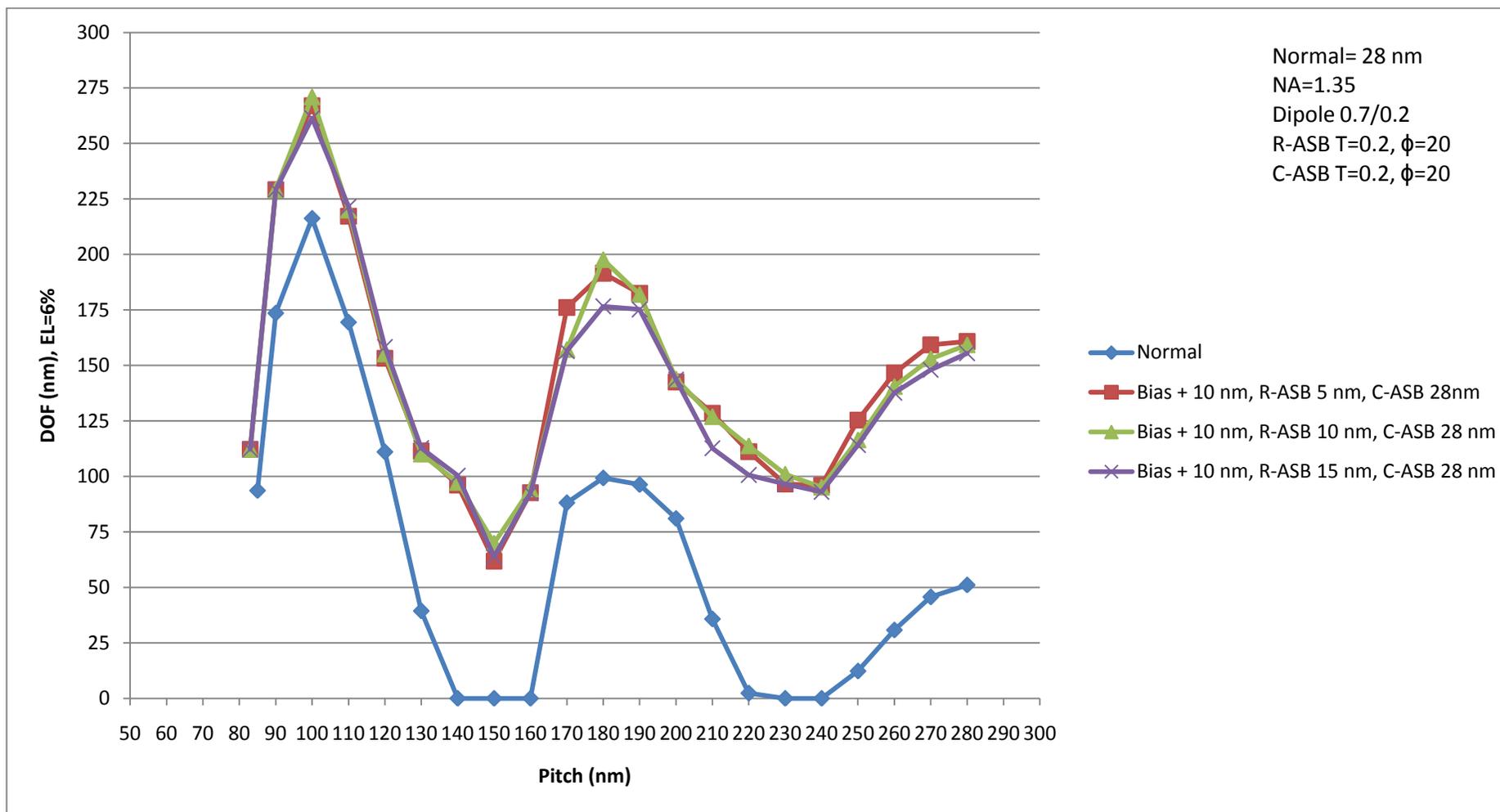


圖 4.20 28 奈米線，緣邊式全條減光散條寬度對焦深的影響

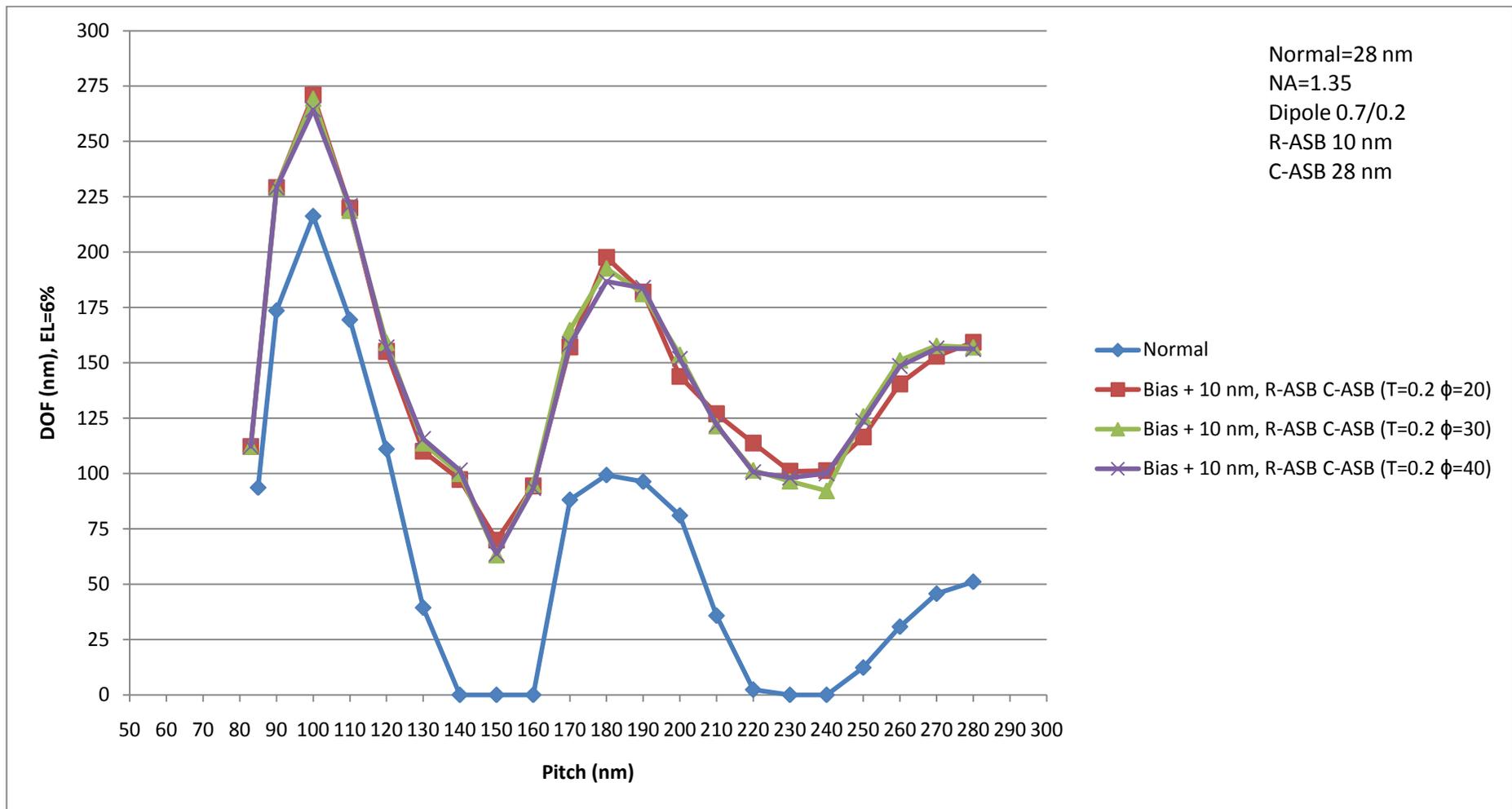


圖 4.21 28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度  $T=0.2$ ，改變相位差  $\phi$  對焦深的影響

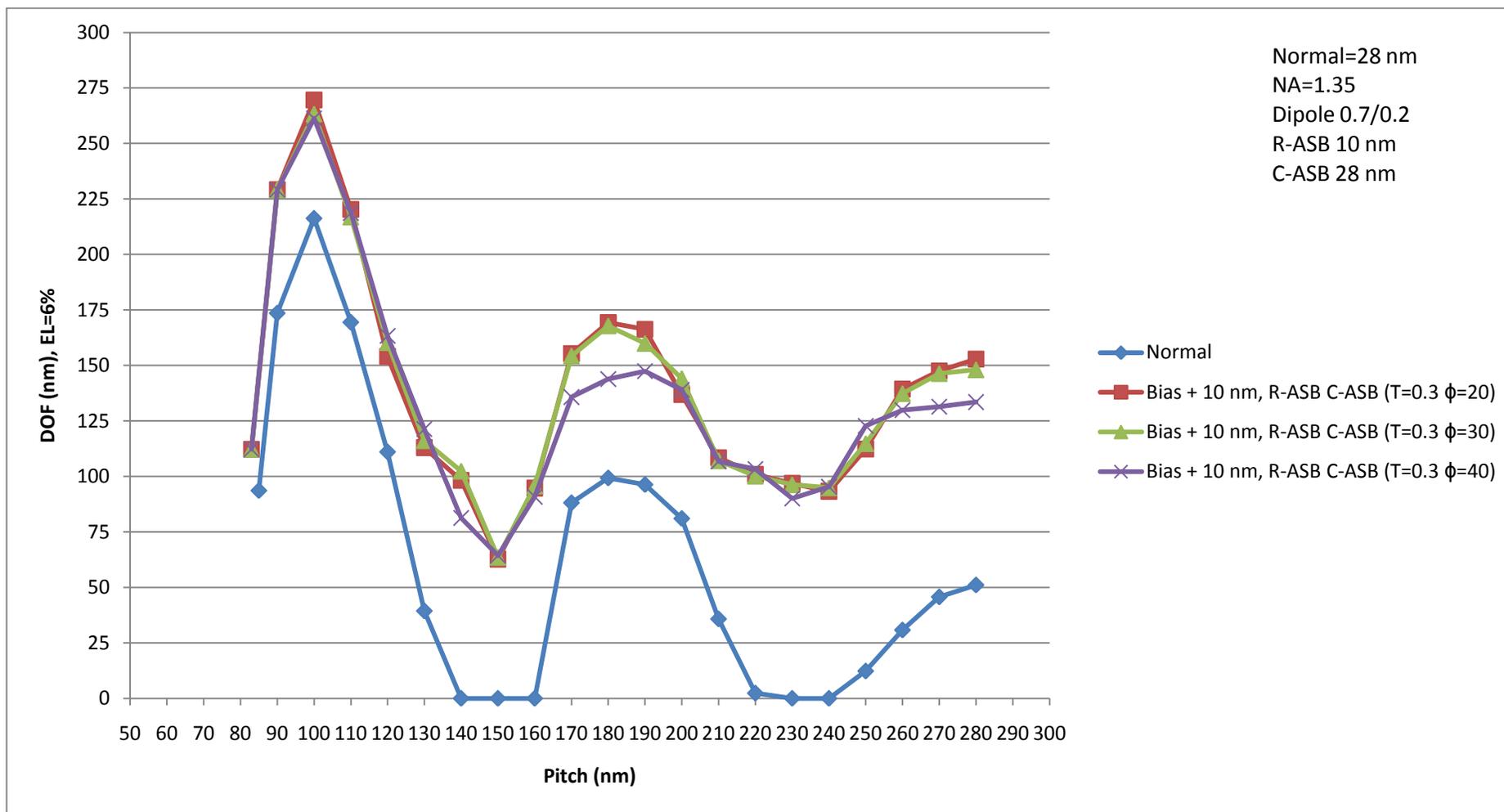


圖 4.22 28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度  $T=0.3$ ，改變相位差  $\phi$  對焦深的影響

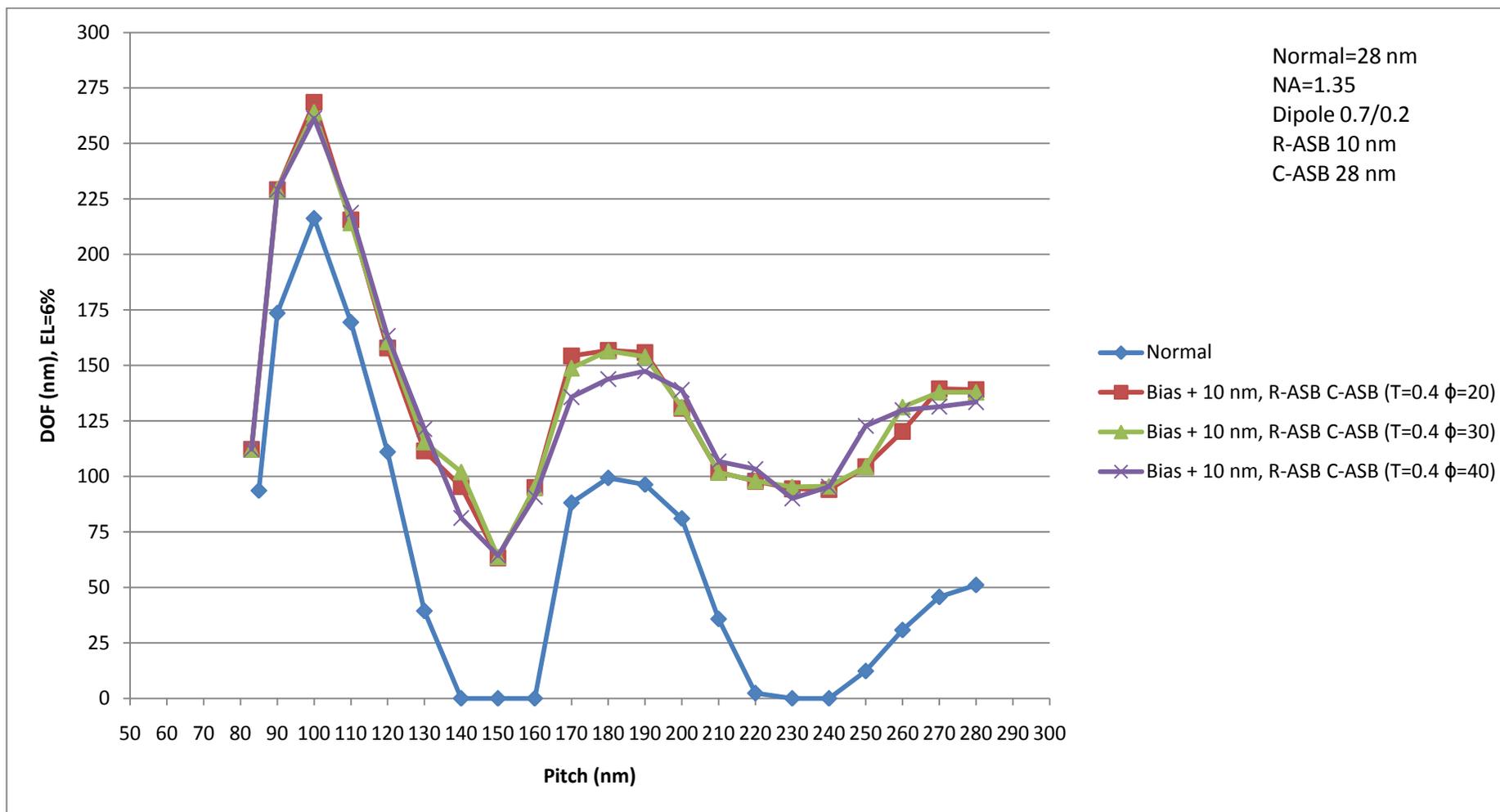


圖 4.23 28 奈米線，加入全條減光散條，固定透射度  $T=0.4$ ，改變相位差  $\phi$  對焦深的影響

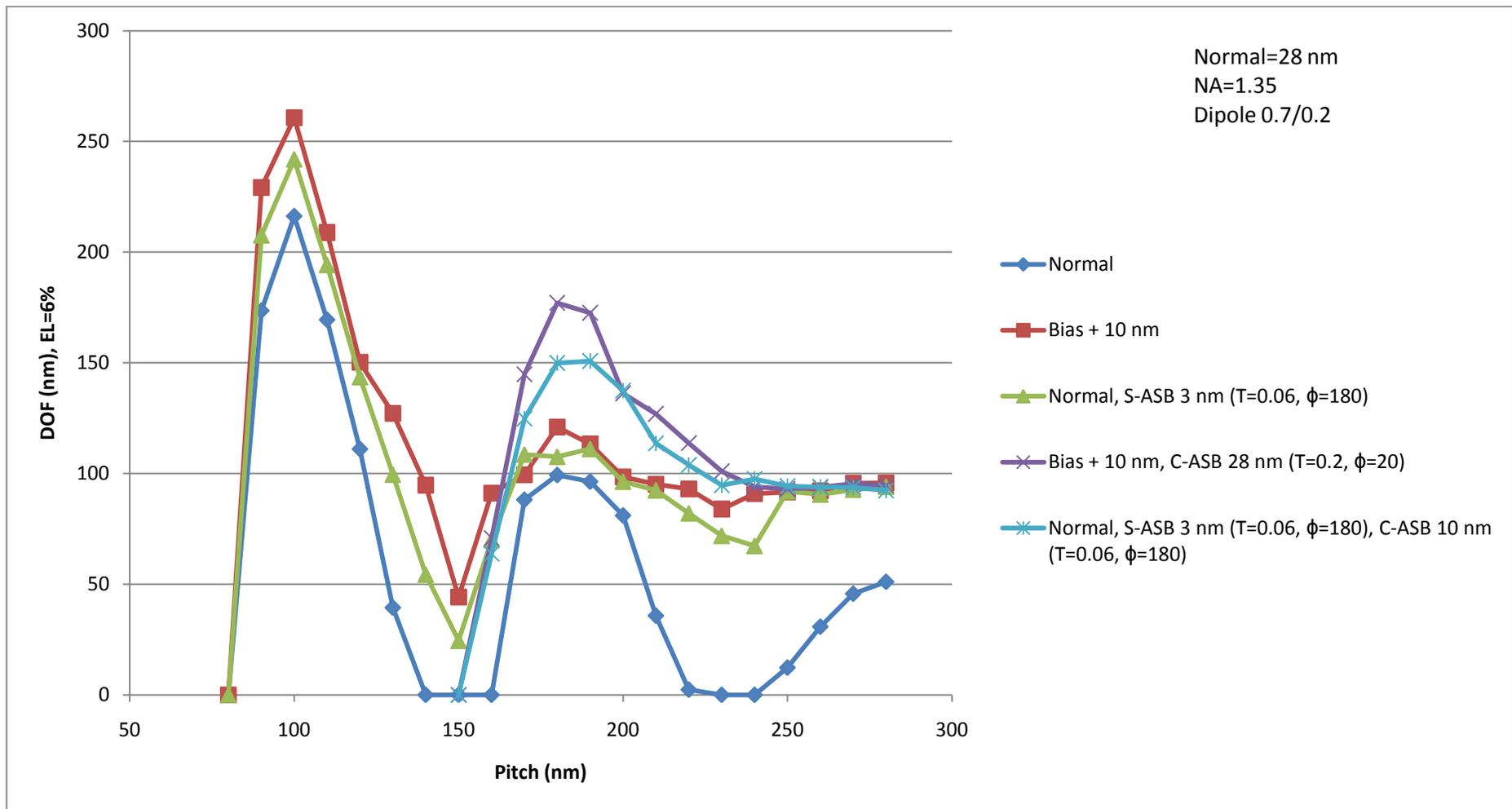


圖 4.24 28 奈米線，加入與主線條相同透射度與相位差之側面式散條與中央式散條對焦深的影響

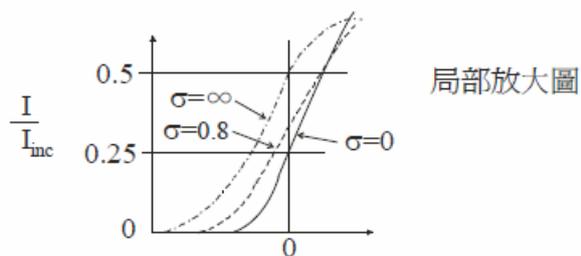
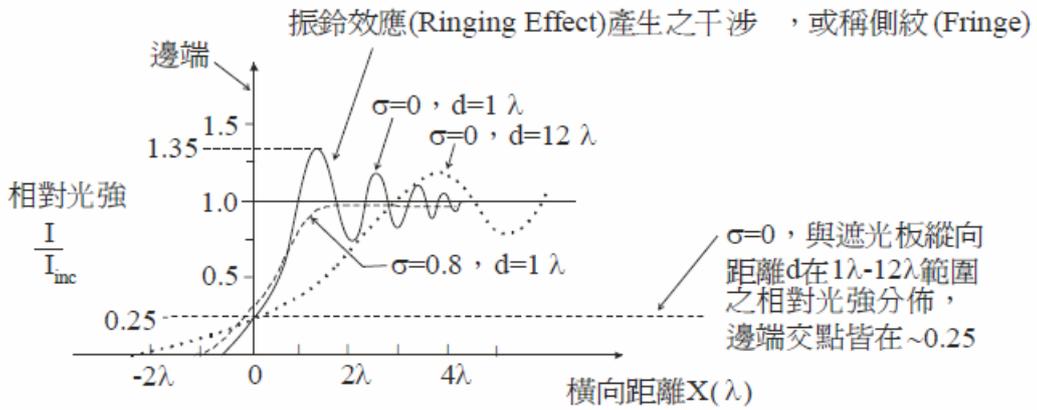
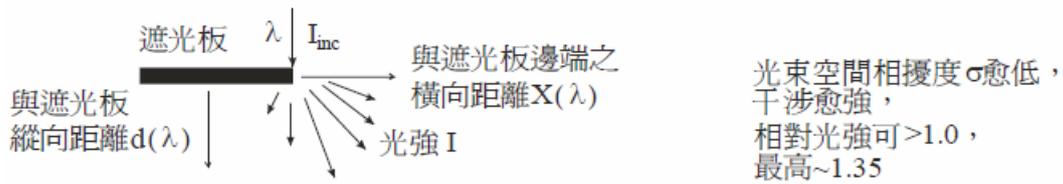


圖 4.25 邊端效應 [30]

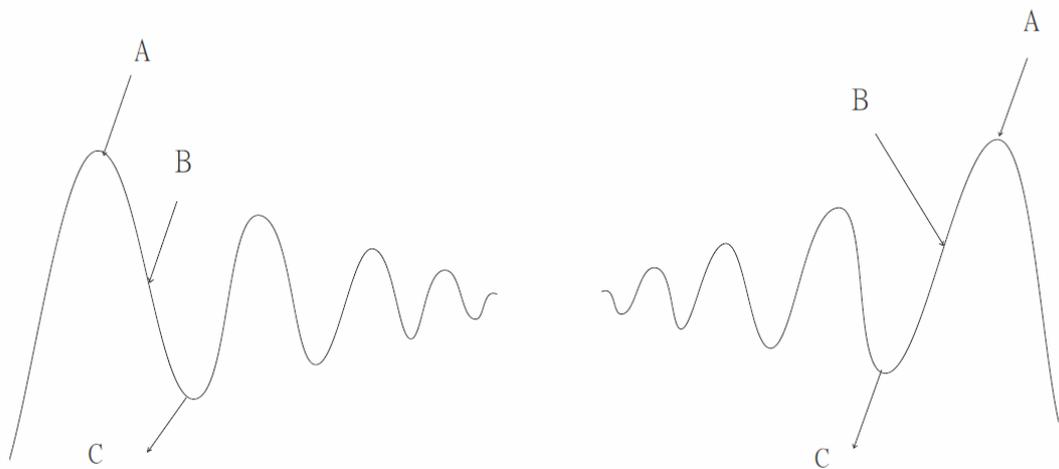
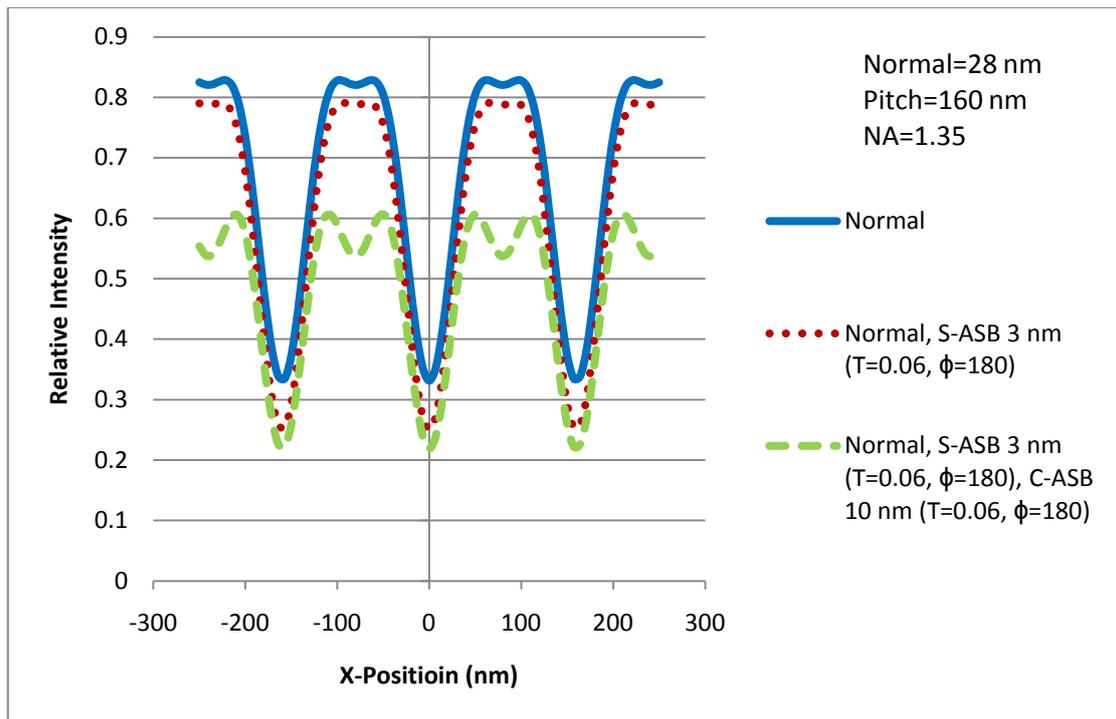


圖 4.26 隙左右兩邊產生振鈴效應之干涉波

(a)



(b)

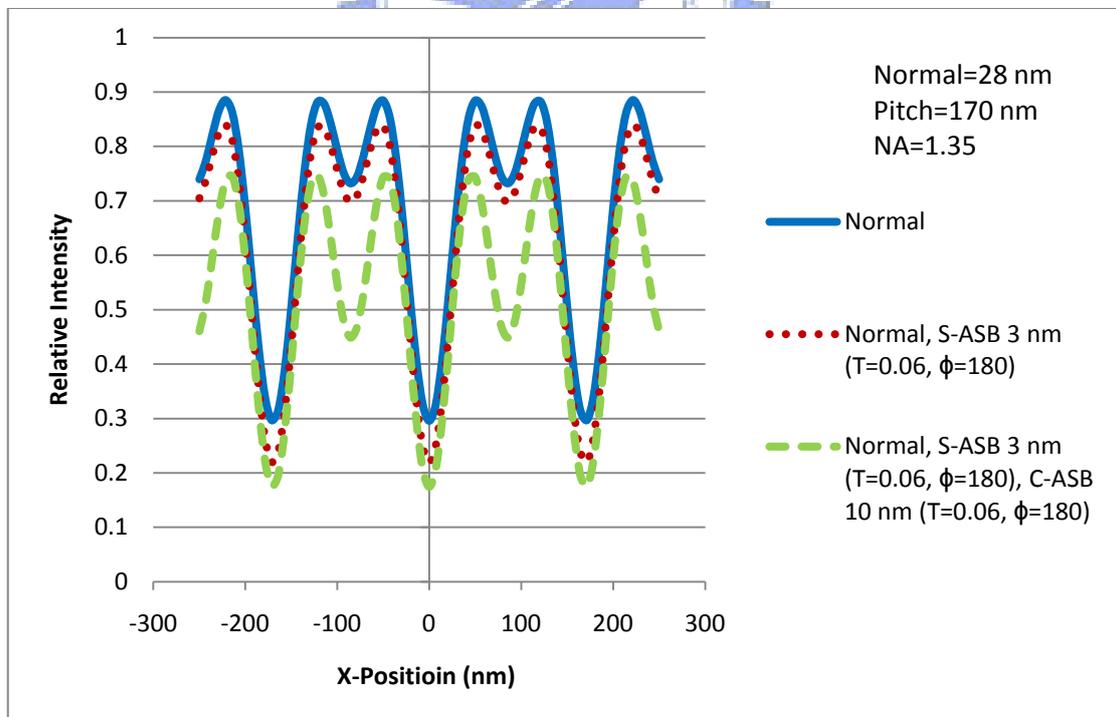


圖 4.27 28 奈米線，加入與主線條相同透射度之側面式散條與中央等距式散條之空間影像：(a) 間距 160 奈米 (b) 間距 170 奈米

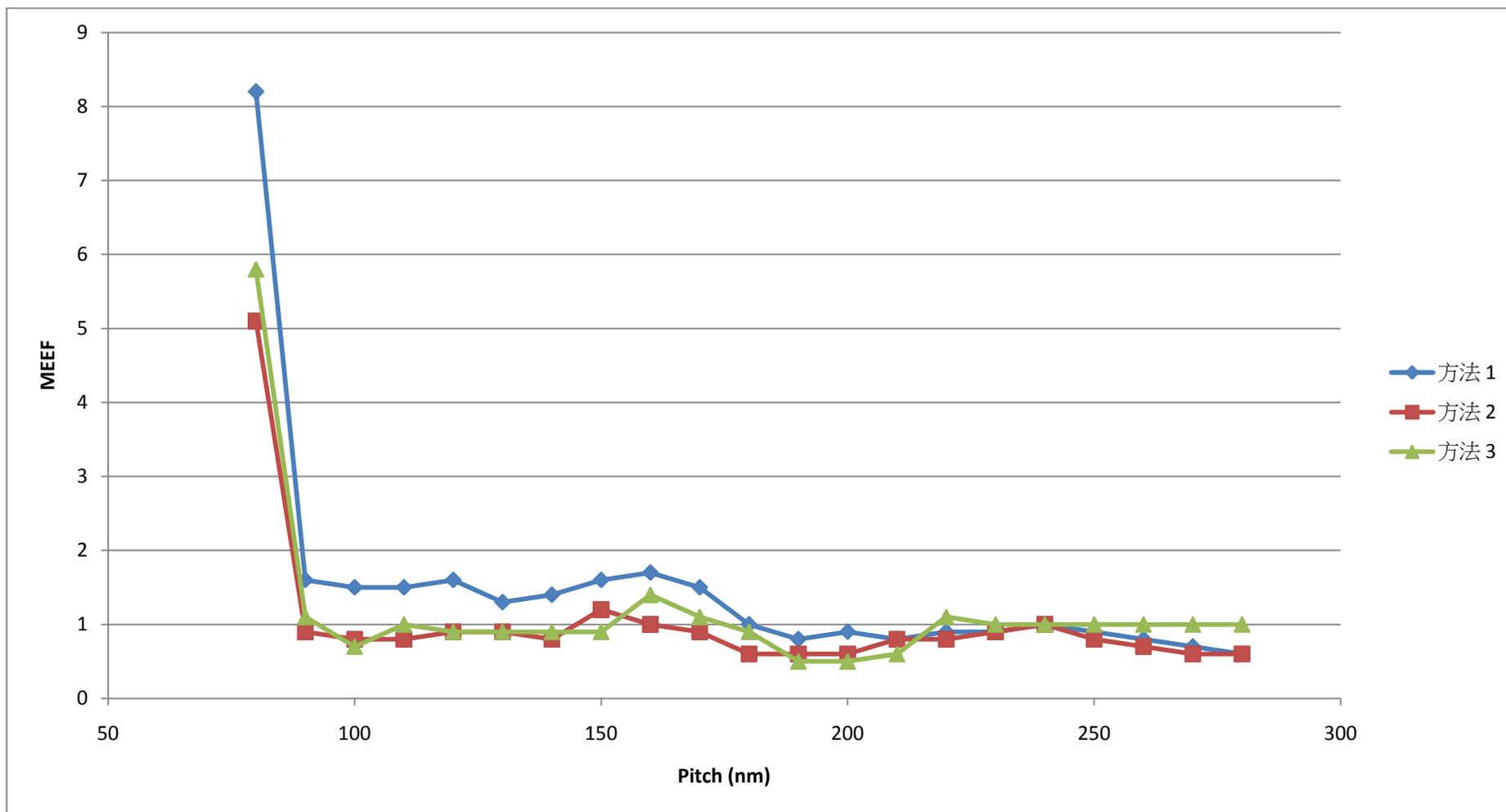


圖 4.28 28 奈米線，以三種不同方法模擬各間距之 MEEF 情形

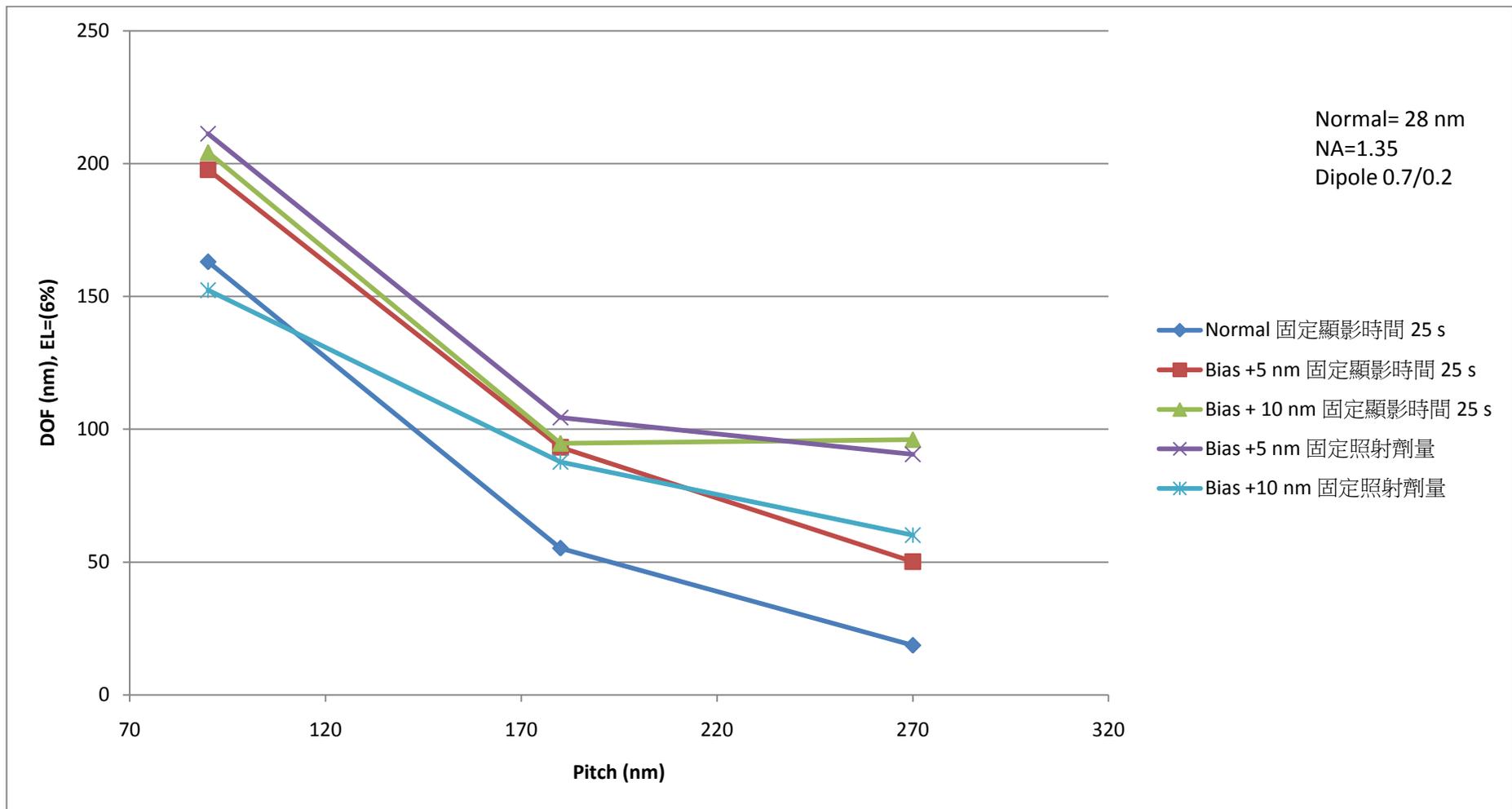


圖 4.29 28 奈米線，正偏差法，固定顯影時間，改變照射劑量與固定照射劑量，改變顯影時間對焦深之影響

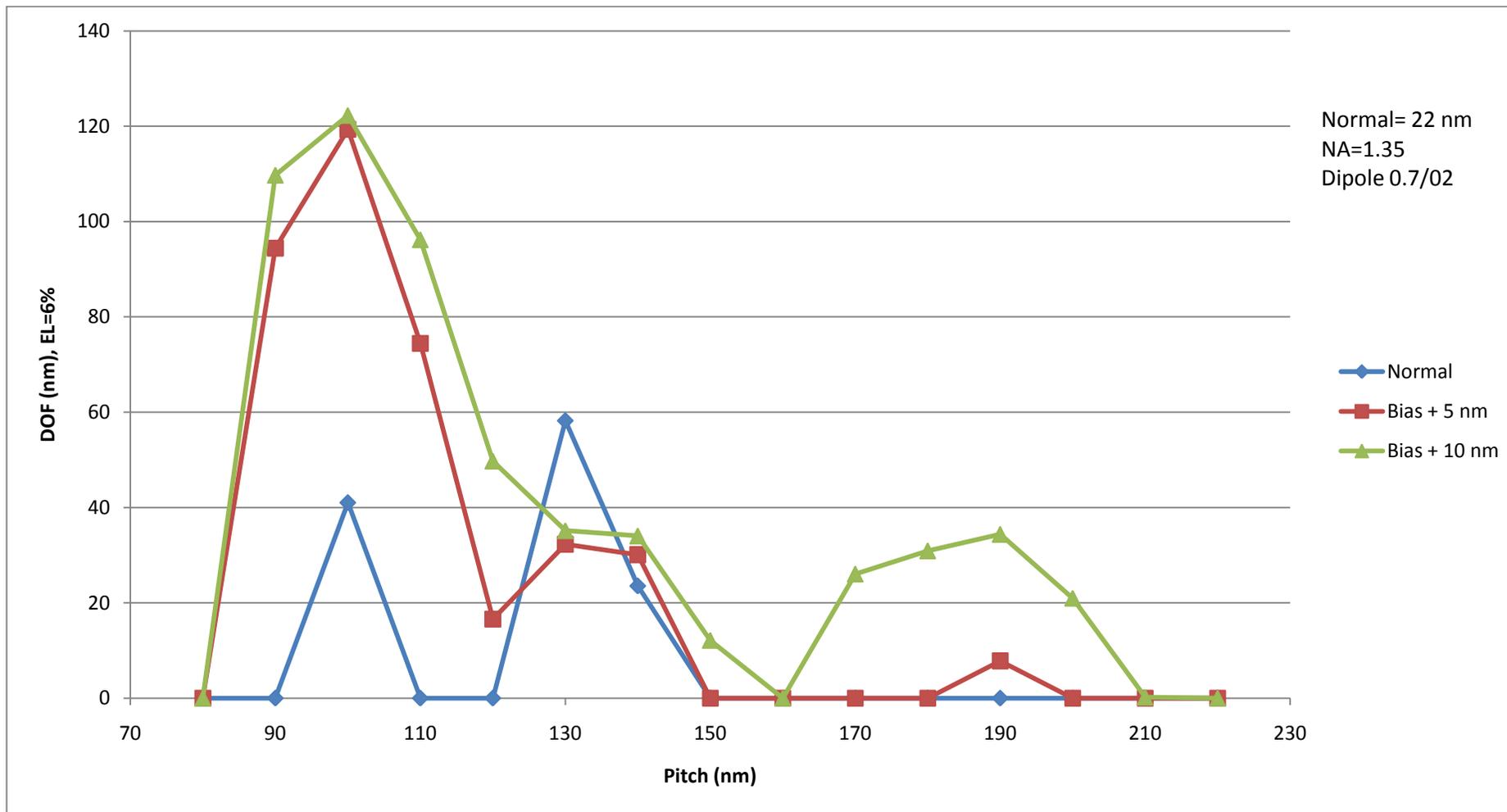


圖 4.30 22 奈米線，正偏差對焦深的影響

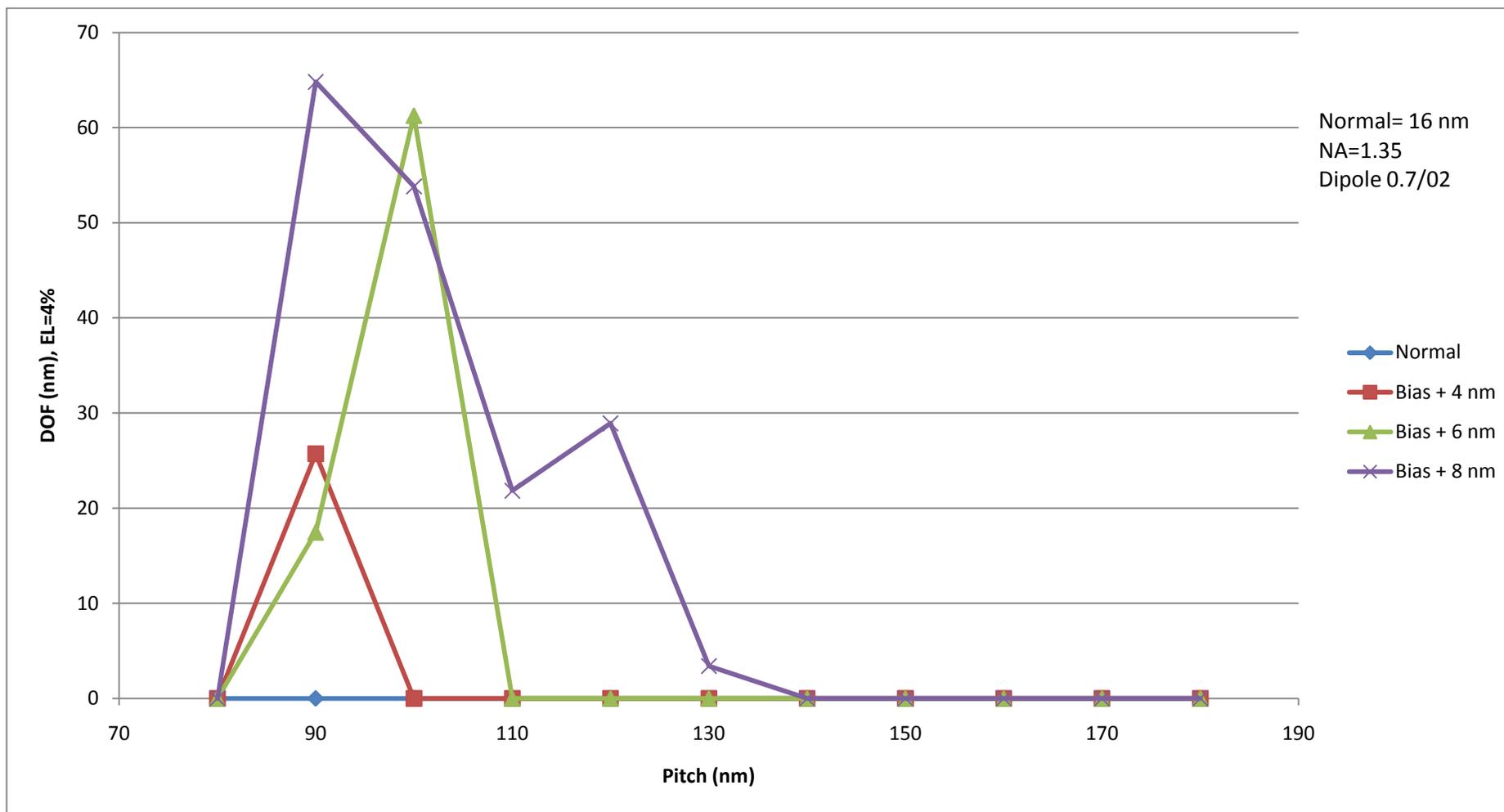


圖 4.31 16 奈米線，正偏差對焦深的影響

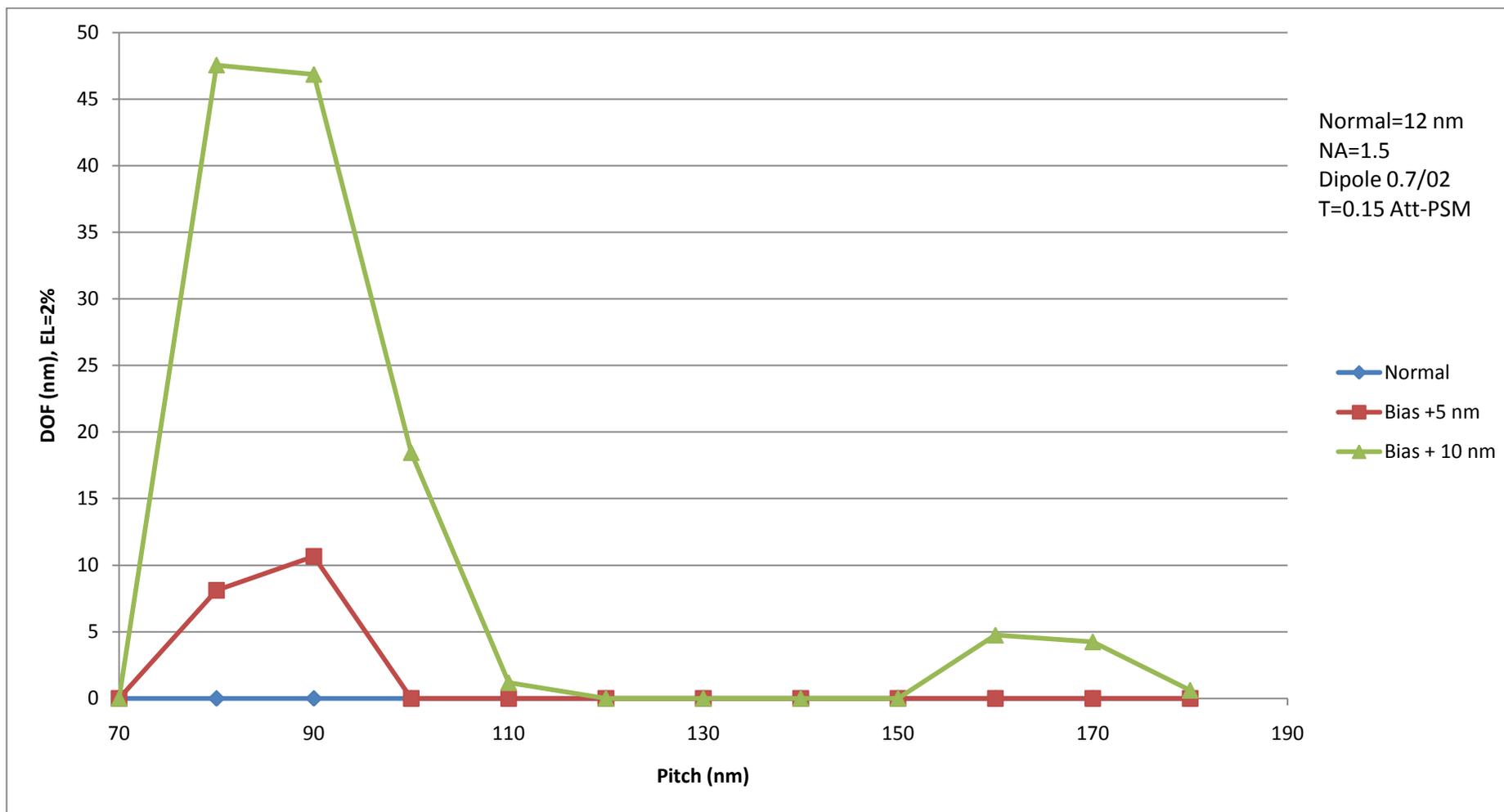


圖 4.32 12 奈米線，正偏差對焦深的影響

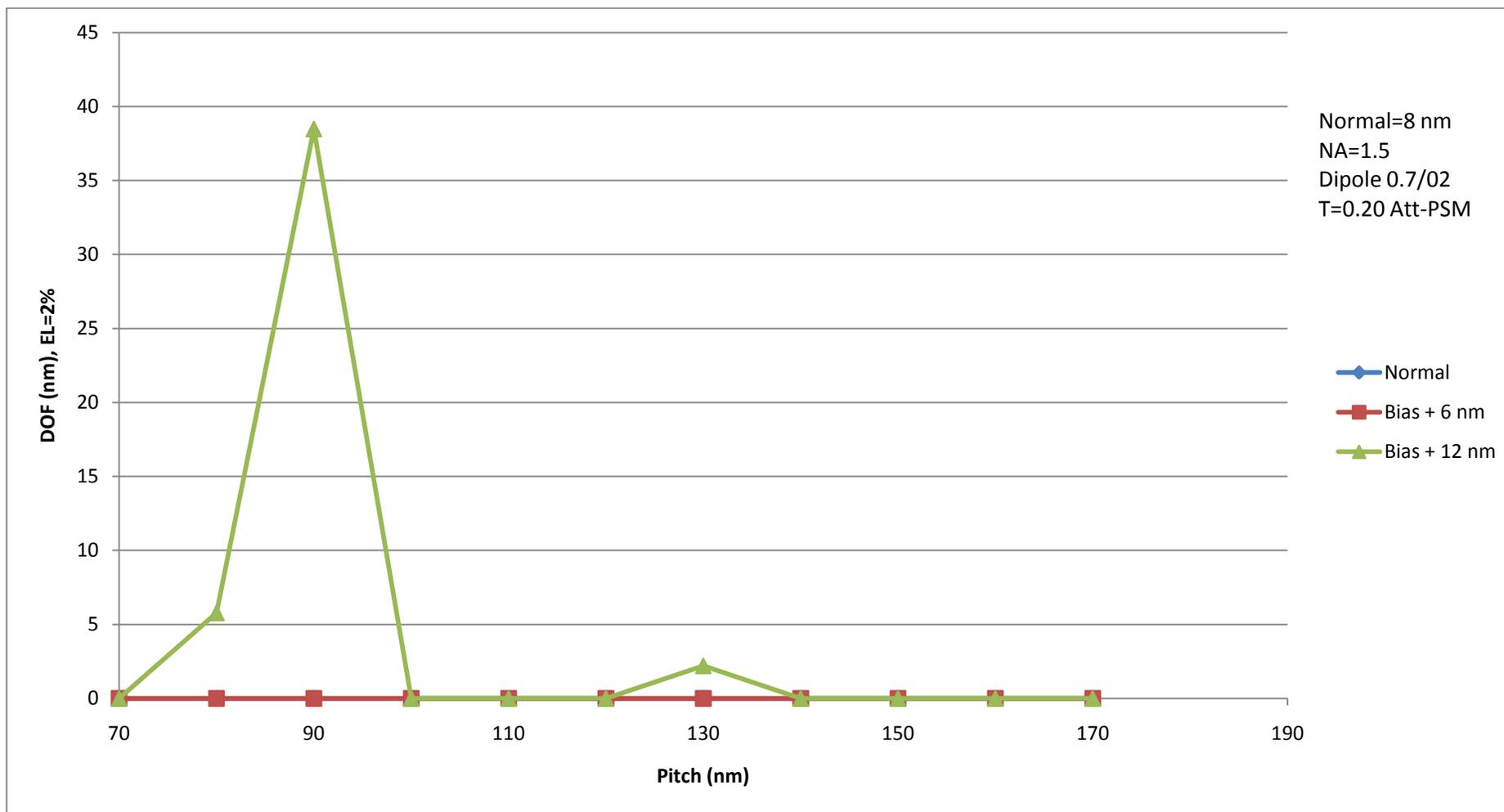


圖 4.33 8 奈米線，正偏差對焦深的影響

## 參考文獻

1. M. Bienert et al., “Imaging Budgets for EUV Optics: Ready for 22 nm Node and Beyond”, Proc. SPIE, Vol. 7271, p. 72711B-1 (2009).
2. O. Wood et al., “Integration of EUV Lithography in the Fabrication of 22 nm Node Devices”, Proc. SPIE, Vol. 7271, p. 727104-1 (2009).
3. J. V. Hermans et al., “Stability and Imaging of the ASML EUV Alpha Demo Tool”, Proc. SPIE, Vol. 7271, p. 72710T-1 (2009).
4. C. Klein et al., “Projection Maskless lithography (PML2): Proof-of-Concept Setup and First Experimental Results”, Proc. SPIE, Vol. 6921, p. 69211O-1 (2008).
5. C. Klein et al., “PML2: The Maskless Multibeam Solution for the 22 nm Node and Beyond”, Proc. SPIE, Vol. 7271, p. 72710N-1 (2009).
6. S. Sun et al., “Demonstration of 32 nm Half-pitch Electrical Testable NAND FLASH Patterns Using Self-Aligned Double Patterning”, Proc. SPIE, Vol. 7274, p. 72740D-1 (2009).
7. J. Finders et al., “Double Patterning Lithography for 32 nm: Critical Dimensions Uniformity and Overlay Control Considerations”, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, Vol. 8, 011002-1 (2009).
8. Y. Yamada et al., “Enabling 35 nm Double Patterning Contact Imaging using a Novel CD Shrink Process”, Proc. SPIE, Vol. 6520, p. 65201F-1 (2007).
9. X. Miao et al., “RET Application in 45 nm Node and 32 nm Node Contact Hole Dry ArF Lithography Process Development”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69242A-1 (2008).
10. M. Fritze et al., “High-Throughput Hybrid Optical Maskless Lithography: All Optical 32 nm Node Imaging”, Proc. SPIE, Vol. 5751, p. 1058 (2005).
11. M. Fritze et al., “Hybrid Optical Maskless Lithography: Scaling beyond the 45 nm node”, J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 23, No. 6, p. 2743 (2005).
12. J. V. Beach et al., “Imaging 100 nm Contacts with High Transmission Attenuated Phase Shift Masks”, Proc. SPIE, Vol. 4889, p. 1242 (2002).
13. Z. Cui et al., “Partial Rim: A New Design of Rim Phase Shift Mask

- for Submicron Contact Holes”, Proc. SPIE, Vol. 2440, p. 541 (1995).
14. W. A. Loong et al., “Simulation and Fabrication of a New Phase Shifting Mask for 0.35  $\mu\text{m}$  Contact Hole Pattern Transfer : Halftone Rim”, Proc. SPIE, Vol. 2087, p. 380 (1993).
  15. A. Misaka et al., “Improved Outline Phase Shifting Mask (OL-PSM) for Reduction of the Mask Error Enhancement Factor”, Proc. SPIE, Vol. 5040, p. 1220 (2003).
  16. T. Yuito et al., ““Mask Enhancer” Technology for 45 nm Node Contact Hole Fabrication”, Proc. SPIE, Vol. 5754, p. 1377 (2005).
  17. T. Yuito et al., ““Mask Enhancer” Technology on ArF Immersion Tool for 45 nm Node Complementary Metal Oxide Semiconductor with 0.249  $\mu\text{m}^2$  Static Random Access Memory Contact Layer Fabrication”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, No. 6B, p. 5396 (2006).
  18. H. Nakamura et al., “Contact Hole Formation by Multiple Exposure Technique in Ultra-Low  $k_1$  Lithography”, J. Microlith., Microfab., Microsyst., Vol. 4, p. 023005-1 (2005).
  19. H. Nakamura et al., “Ultra-Low  $k_1$  Oxide Contact Hole Formation and Metal Filling Using Resist Contact Hole Pattern by Double L&S Formation Method”, Proc. SPIE, Vol. 6520, p. 65201E-1 (2007).
  20. M. D. Levenson et al., “The Vortex Mask: Making 80 nm Contacts with a Twist!”, Proc. SPIE, Vol. 3973, p. 189 (1999).
  21. F. M. Schellenberg et al., “MEEF in Theory and Practice”, Proc. SPIE, Vol. 4889, p. 1293 (2002).
  22. C. A. Mack, “Impact of Mask Errors on Optical Lithography,” Proc. Interface, USA, p. 75 (1999).
  23. F. M. Schellenberg et al., “The Study of Contact Hole MEEF and Defect Printability”, Proc. SPIE, Vol. 5377, p. 930 (2004).
  24. R. Socha et al., “Forbidden Pitches for 130 nm Lithography and Below”, Proc. SPIE, Vol. 4000, p. 1140 (2000).
  25. S. Kundu et al., “Forbidden Pitches in Sub-Wavelength Lithography and their Implications on Design”, J. Computer-Aided Mater. Des., Vol. 14, p. 79 (2007).
  26. B. W. Smith, “Forbidden Pitch or Duty Free: Revealing the Cause of Across-Pitch Imaging Differences”, Proc. SPIE, Vol. 5040, p. 399 (2003).
  27. C. A. Mack, “Mask Bias in Submicron Optical Lithography”, J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 6, No. 6, p. 2213 (1988).
  28. Y. Kang et al., “Optimum Biasing for 45 nm Node Chromeless and

- Attenuated Phase Shift Mask”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 692433-1 (2008).
29. B. W. Smith, “Mutually Optimizing Resolution Enhancement Techniques: Illumination, APSM, Assist Feature OPC, Gray Bars”, Proc. SPIE, Vol. 4348, p. 271 (2001).
  30. 龍文安, 「半導體奈米技術」, 五南, 台北市, 民95年。
  31. A. Torsy, “Detailed Process Analysis for Sub-Resolution Assist Features Introduction”, Proc. SPIE, Vol. 5377, p. 1172 (2004).
  32. V. Farys et al., “Study of SRAF Placement for Contact at 45 nm and 32 nm Node”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69242Z-1 (2008).
  33. X. Miao et al., “Double Patterning Combined with Shrink Technique to Extend ArF Lithography for Contact Holes to 22 nm Node and Beyond”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69240A-1 (2008).
  34. M. Kushibiki et al., “Fabrication of Contact/Via Holes for 32 nm Technology Device Using Cost-Effective RIE CD Shrink Process and Double Patterning Technique”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 692426-1 (2008).
  35. M. Dusa et al., “The Lithography Technology for the 32 nm HP and Beyond”, Proc. SPIE, Vol. 7028, p. 702810-1 (2008).
  36. M. Maenhoudt et al., “Alternative Process Schemes for Double Patterning that Eliminate the Intermediate Etch Step”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69240P-1 (2008).
  37. M. L. Ling, “Forbidden Pitch Improvement Using Modified Illumination in Lithography”, J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 27, No. 1, p. 85 (2009).
  38. M. L. Ling, et al., “Customized Illumination Shapes for 193nm Immersion Lithography”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 692435-1 (2008).
  39. J. C. Yu et al., “Model Based Sub-Resolution Assist Features Using an Inverse Lithography Method”, Proc. SPIE, Vol. 7140, p. 714014-1 (2008).
  40. B. G. Kim et al., “Trade-Off between Inverse Lithography Mask Complexity and Lithographic Performance”, Proc. SPIE, Vol. 7379, p. 73791M-1 (2009).
  41. L. Pang et al., “Considering MEEF in Inverse Lithography Technology (ILT) and Source Mask Optimization (SMO)”, Proc. SPIE, Vol. 7122, p. 71221W-1 (2008).

42. Y. Inazuki et al., “Decomposition Difficulty Analysis for Double Patterning and the Impact on Photomask Manufacturability”, Proc. SPIE, Vol. 6925, p. 69251O-1 (2008).
43. C. A. Mack, “Lithographic Simulation: A Review”, Proc. SPIE, Vol. 4440, p. 59 (2001).
44. C. A. Mack, “Lithography Simulation in Semiconductor Manufacturing”, Proc. SPIE, Vol. 5645, p. 63 (2005).



## 自 傳

林建維，男，屏東縣人。民國 72 年 6 月 28 日生。家中成員共 4 人，家庭生活和樂美滿，在父母教養下，自幼便養成良好的倫理道德與基本禮節。

大學就讀於國立暨南國際大學應用化學系，在那裏我學到了化學領域的基礎知識，也認識了許多好朋友，碩士班就讀交通大學應用化學所，有幸師承龍文安教授，讓我見識到半導體領域的精彩之處，並於碩一升碩二暑假進入台積電實習，讓我更進一步與學校所學做比對印證，對論文實驗有很大的幫助。

自認並非絕頂聰明，故在實驗與研究上一直以誠懇謙虛的態度來鞭策自己，畢業後希望能夠學以致用，持續提升自己能力，為社會貢獻一己之力。