

國立交通大學  
應用化學研究所  
碩士論文

模擬探討以散條提升 32 奈米線幅禁  
止間距焦深



The Simulation Studies of Increasing  
Depth of Focus of Forbidden Pitches  
by Scattering Bar for 32 nm Linewidth

研究生：黃志全  
指導教授：龍文安 博士

中華民國九十七年六月

模擬探討以散條提升 32 奈米線幅禁止間距焦深

The Simulation Studies of Increasing Depth of Focus of  
Forbidden Pitches by Scattering Bar for 32 nm Linewidth

碩士生：黃志全

Student: Huang Chih-chuan

指導教授：龍文安博士

Advisor: Dr. Loong Wen-an

國立交通大學

應用化學研究所

碩士論文



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 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

# 模擬探討以散條提升 32 奈米線幅禁止間距焦深

碩士生：黃志全

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 之微影模擬軟體 Prolith v. 9.0，探討以正偏差、遮光全條及減光全條散條消除 32 奈米線幅禁止間距相關問題。

本論文重要發現如下：

1. 在 32 奈米線幅，減光全條利用透射度(T)與相位差( $\phi$ )的調變，其寬度可較遮光全條增加約一倍。在散條寬度 32 奈米、透射度(T)=0.4、相位差( $\phi$ )低於 30 度，可改善禁止間距，且不會成像。
2. 在間距較小時，加入散條易影響主線條空間影像，造成正規化成像對數斜率(Normalized Image Log-Slope, NILS)與像比(Contrast)降低，焦深減少，最大照射寬容度(Maximum Exposure Latitude,  $EL_{max}$ )與最大焦深(Maximum Depth of Focus,  $DOF_{max}$ )皆降低；隨著間距增加，在加入散條的前與後，EL 對 DOF 圖中二條曲線開始出現交點，交點隨著間距增加而升高，若 EL 的設定低於交點值，焦深可增加，所以當交點高於  $EL=6\%$ ，達到論文中設定需求，焦深即可增加，此時  $EL_{max}$  減少， $DOF_{max}$  增加；間距再增加，主線條不受影響，NILS 反而增加，此時  $EL_{max}$  與  $DOF_{max}$  皆增加。
3. 在 32 奈米線幅，間距較小時加入減光全條散條，隙的空間影像，如邊端效應干涉波主極大重疊，相對光強較高，自身較不易成像；間距較大時，如邊端效應干涉波主極大分離，相對光強較低，自身較易成像。

# The Simulation Studies of Increasing Depth of Focus of Forbidden Pitches by Scattering Bar for 32 nm Linewidth

Student: Huang Chih-chuan

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 positive bias, chromium whole scattering bar (CSB) and attenuated whole scattering bar (ASB) were used to study the relative issues of eliminating the forbidden pitches for 32 nm linewidth.

Some important findings of this thesis are reported as following:

1. For 32 nm linewidth, by the modulation of transmittance (T) and phase change ( $\phi$ ) of ASB, the width of ASB can be nearly doubled if compared to CSB. At the ASB width 32 nm, transmittance (T)=0.4, and phase change ( $\phi$ )<30 degree, the forbidden pitches can be improved, and also, image of ASB will not be formed.
2. At the smaller pitches, the adding of scattering bars will easily affect the aerial images of main lines, resulted the decreasing of NILS, contrast and depth of focus (DOF), and decreasing of both maximum exposure latitude ( $EL_{max}$ ) and maximum DOF ( $DOF_{max}$ ). As the pitches increased, before and after the adding of scattering bars, crossing point from 2 curves showed up in the EL vs. DOF plots, rising of position of crossing point followed the increasing of pitches. If the setting of EL is lower than the crossing point, DOF can be increased. So, when crossing points are higher than  $EL=6\%$ , meet the requirement of this thesis, DOF can be increased, under these conditions,  $EL_{max}$  decreased, and  $DOF_{max}$  increased. As the pitches increased further, the aerial images of main lines will not be affected, however, NILS increased, under these conditions, both  $EL_{max}$  and  $DOF_{max}$  increased.
3. For 32 nm linewidth, the adding of ASB at the smaller pitches, if the main maximum of interference formed by edge effect overlapped, the relative intensity of aerial image from space is relatively high, image of ASB itself will not be easily formed. At the larger pitches, if the main maximum of interference formed by edge effect separated, the relative intensity of aerial image from space is relatively low, image of ASB itself will be easily formed.

## 誌 謝

感謝吾師龍文安教授在碩士兩年期間給予指導與鼓勵，不僅讓我對半導體製程有深入的認知，而且在生活禮儀、待人處事方面的教導，讓我獲益良多，在此向老師至上最高的敬意。

感謝口試委員謝宗雍教授與吳建興教授於百忙之中抽空審閱論文，不吝指教，給予寶貴的意見。

感謝台灣積體電路有限公司於給予暑期實習的機會，讓我有實際的機會接觸生產線上的機台，對學習上有了事半功倍的效果，在此期間感謝張克文先生、蔡明和先生、林合汶先生在這段時間給予的協助與鼓勵。

感謝 KLA-Tencor 公司的林智豪先生、陳巧美小姐，幫忙處理 Prolith 模擬電腦的問題，並且協助訓練 Prolith 軟體的使用。

感謝實驗室的學弟及好友建緯、宏豪、昆宜、子漢、彥忠、哲源，陪我度過這兩年的碩士生涯，分享快樂與憂傷。

感謝父母親與我碩士的這兩年對我全力的支持，有了你們做我的後盾，我才能毫無顧忌的努力向學。

感謝大家，有了你們的陪伴，讓我這兩年的生活過的更加有意義，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 .....	ii
誌 謝 .....	iii
目 錄 .....	iv
表目錄 .....	vi
圖目錄 .....	vii
第一章 緒論.....	1
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 解像度.....	4
2.2 焦深.....	6
2.3 偏軸發光.....	9
2.4 禁止間距.....	11
第三章 模擬與設計.....	18
3.1 微影模擬軟體.....	18
3.2 在 45 奈米線幅下探討.....	19
3.3 在 32 奈米線幅下探討.....	20
3.4 模擬流程規劃.....	21

第四章	結果與討論.....	25
4.1	禁止間距產生的原因與相關因素.....	25
4.2	45 奈米線幅.....	25
4.3	32 奈米線幅.....	31
4.4	32 奈米線幅加入散條前後之空間影像對焦深的影響.....	34
4.5	邊端效應對散條的影響.....	38
第五章	結論.....	39
參考文獻	.....	93
自傳	.....	95



## 表 目 錄

表 1.1	2007 年 ITRS 所定義的關鍵性微影需求.....	42
表 3.1	45 奈米線幅，各項模擬參數.....	43
表 3.2	32 奈米線幅，各項模擬參數.....	54
表 4.1	32 奈米線幅，加入散條後，固定散條寬度 32 奈米，在各種 透射度與相位差散條自身成像的間距.....	45





# 圖目錄

圖 2.1	解像度與焦深.....	46
圖 2.2	本論文中用到偏軸發光各類型.....	47
圖 2.3	橫雙圓孔探討禁止間距問題.....	48
圖 2.4	主線條與旁邊的線條產生干涉(a)同相的建設性干涉； (b)破壞性干涉.....	49
圖 2.5	偏差法與散條修正前後空間影像圖與離焦對焦深的影響.....	50
圖 2.6	散條的種類與修正情形.....	51
圖 2.7	各式散條的特色與其放置位置.....	52
圖 2.8	禁止間距修正前後.....	53
圖 3.1	聚焦面的定義.....	54
圖 3.2	線條的設計.....	55
圖 3.3	Y 線性偏振光.....	56
圖 3.4	45 奈米抗反射層厚度的選擇.....	56
圖 3.5	底層抗反射層使用前.....	57
圖 3.6	底層抗反射層使用後.....	57
圖 3.7	照後烤溫度改變對 EL 與焦深的影響.....	58
圖 4.1	32 奈米線幅，偏軸發光 Dipole 與 Quasar 對焦深的影	

	響.....	59
圖 4.2	32 奈米線幅，Quasar $\sigma_{\text{outer}}=0.85$ 、 $\sigma_{\text{outer}}=0.65$ 、Blade Angle=45、NA=1.35，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，加入散條後，其焦深改善情形.....	60
圖 4.3	45 奈米線幅，Dipole $\sigma_{\text{center}}=0.7$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.2$ ，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同 NA，對間距與焦深的影響.....	61
圖 4.4	45 奈米線幅 Dipole、 $\sigma_{\text{radius}}=0.2$ 、NA=1.15，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同 $\sigma_{\text{center}}$ ，對間距與焦深的影響....	62
圖 4.5	45 奈米線幅，Dipole $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.2$ ，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同 NA，對間距與焦深的影響.....	63
圖 4.6	45 奈米線幅，杜邦二代濕浸式液體 $n=1.64$ 與純水 $n=1.44$ ，對焦深與間距的影響.....	64
圖 4.7	45 奈米線幅，負偏差對焦深焦深與間距的影響.....	65
圖 4.8	45 奈米線幅，正偏差對焦深焦深與間距的影響.....	66
圖 4.9	45 奈米線幅，在不同劑量下，加入散條後，焦深與間距的關係圖.....	67
圖 4.10	45 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正後，間距與焦深關係圖.....	68
圖 4.11	45 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正所使用	

	之圖罩線幅寬度與間距關係圖.....	69
圖 4.12	32 奈米線幅，在不同劑量下，加入散條後，焦深與間距關係圖.....	70
圖 4.13	32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=20 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖.....	71
圖 4.14	32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=30 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖.....	72
圖 4.15	32 奈米線幅，加入全條減光(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=40 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖.....	73
圖 4.16	32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.2，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖.....	74
圖 4.17	32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.3，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖.....	75
圖 4.18	32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.4，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖.....	76
圖 4.19	32 奈米線幅，在接近劑量下，加入偏差法之後，圖罩寬度與間距的關係圖.....	77
圖 4.20	32 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正所使用之圖罩線幅寬度與間距關係圖.....	78

圖 4.21	邊端效應.....	79
圖 4.22	邊端效應隨著間距的改變對空間影像的影響.....	80
圖 4.23	證實隙(Space)的光強為邊端效應，非側葉光強.....	81
圖 4.24	未偏振光與偏振光對邊端效應的影響(a)等線隙 250 奈米線條； (b)線條寬度(L)=250 奈米、隙寬度(S)=600 奈米.....	82
圖 4.25	32 奈米線幅、Dipole、間距 160 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	83
圖 4.26	32 奈米線幅、Dipole、間距 162 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	84
圖 4.27	在 Dipole 32 奈米線幅、間距 165 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	85
圖 4.28	32 奈米線幅、Dipole、間距 170 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	86
圖 4.29	32 奈米線幅、Dipole、間距 180 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	87
圖 4.30	32 奈米線幅、Dipole、間距 220 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖.....	88
圖 4.31	NILS、Contrast 與焦深的關係圖.....	89
圖 4.32	散條加入前後(a) Contrast 與間距關係圖；(b) NILS 與間距	

關係圖.....	90
圖 4.33 隙空間影像光強最低點與間距關係.....	91
圖 4.34 左右兩邊端各別產生振鈴效應的干涉波可說明隙空間影像光 強最低光強與間距關係.....	92



## 一. 緒論

自從西元 1947 年貝爾實驗室發明電晶體，電晶體取代了厚重真空管，迄今已過了半個世紀，現今大部分人的生活物品與電晶體密不可分。為了滿足市場的需求與競爭，元件朝著體積更小、速度更快、耗電量更小邁進。科技發展十分迅速，由原本的幾微米尺寸，到現在已經進入 32 奈米技術節點(Technology Node)的時代。隨著線幅縮小，製備難度增加，製程視窗(Process Window)較小、疊對(Overlay)寬容度亦小。美國半導體工業協會(Semiconductor Industry Association, SIA)在西元 1992 年起，發起美國的研究者、學者、企業共同預估未來的演進的路圖，發佈半導體各項技術的規範，為半導體國際技術路圖(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)前身，如表 1-1 即為 ITRS 在西元 2007 所發佈的規範之一。

光學微影解像度為半導體技術重要的指標，為了增進解像度，波長由原先 436 奈米汞弧燈(G-line)縮短到 193 奈米準分子雷射(ArF)，聚光當量(Numerical Aperture, NA)由 0.15 增加到 0.93，光學微影解像度有了驚人的進步。極短紫外光(EUV)微影和電子束直寫可以使線幅縮小，可以增加解像度，但是目前尚有許多技術不完備，不宜用來量產。近年發展出了濕浸式微影，配合解像度增進技術的使用，使光

學微影解像度延伸至 32 奈米甚至 22 奈米。

偏軸發光(Off-Axis Illumination, OAI)是目前常用的解像度增進技術之一，但偏軸發光的使用，常伴隨著禁止間距(Forbidden Pitch)的產生，需對其修正，常用的方法為使用偏差法(Bias)與加入散條(Scattering Bar, SB)。

目前改善禁止間距焦深之散條，量產使用遮光鉻膜，缺點為散條寬度受限，如過寬，散條自身亦將成像於晶圓，在 45-32 奈米線幅節點，散條寬度估計低於 20-15 奈米，故製備困難，遮光鉻膜散條應用將達極限。未來趨勢研判，散條使用具透射度之嵌附層，寬度可較遮光鉻膜大為增加，可克服製備之困難。嵌附層除透射度此參數外，尚有相對於光罩石英基材之相對相位差另一參數(遮光鉻膜無相對相位差)，此方面研究甚為少見。

近年文獻報導禁止間距、焦深、散條相關研究簡述如下：

1. 在各間距最適化劑量下加入散條，只能探討焦深在各間距的趨勢，較無實用價值。
2. 只有單一使用散條或偏差法修正禁止間距，未見合併使用。
3. 探討禁止間距範圍甚窄。
4. 未見在 32 奈米線幅，探討減光全條散條之作用。

本論文探討方法與內容簡述如下：



1. 使用接近劑量，探討大範圍禁止間距，因通常一片圖罩並非單一的間距，且同一片圖罩皆在固定的劑量、固定的聚焦面下照射。
2. 偏差法與散條併用，觀察禁止間距改善情形。
3. 在 32 奈米線幅下，探討遮光與減光散條使用對焦深的影響，進而改善禁止間距。

本論文重點以 Prolith 模擬在 45-32 奈米線幅下，運用不同劑量，探討線幅節點、散條寬度、散條透射度、散條相位差、散條數目（至多二條）等相關重要因子之關係，並將其結果，運用在接近劑量，探討禁止間距改善情形。另外，利用空間影像與焦深對照射寬容度 (Exposure Latitude, EL) 作圖，探討散條加入前後對焦深的影響與邊端效應產生的散條成像問題。





## 二. 文獻回顧:

### 2.1 解像度(Resolution, R):

光經過狹縫會產生繞射，早在約百年前的艾瑞圓盤(Airy Disk)實驗，光經圓孔，產生中央光強旁邊圍繞一些光紋可看出端倪。英國瑞利(Rayleigh)在百年前提出，發光體的繞射峰光強主極大與另一個光源的第一極小產生重合的距離，即為最小可以解像的距離，此即是知名的瑞利規範(Rayleigh Criterion)。將瑞利規範對圓孔理論上最大解像度(R)應用於狹縫，如圖 2.1(a)，可得：

$$R = 0.5 \frac{\lambda}{\sin \beta}$$

其中  $\lambda$  為照射光源的真空波長， $\beta$  為能進入入口光瞳(Entrance Aperture)的光經投影鏡最大的聚焦半夾角，因此  $\beta$  的大小被視為能進入光瞳光量多寡的依據。這個性質被定義為數值孔徑(聚光當量)(Numerical Aperture, NA):

$$NA = n \sin \beta$$

$n$  為光瞳與聚焦平面之間介質的折射率，在真空系統=1.0，由此可看出當 NA 增加，可以增進解像度。

應用在微影系統中，光罩的圖案包含許多的圖案，而非只是單純的狹縫，因此通常把 0.5 用  $K_1$  取代

$$R = K_1 \frac{\lambda}{\sin \beta} \quad 0.25 < K_1 < 0.5$$

$K_1$  代表綜合製程參數，可代表阻劑與製程品質好壞，亦代表解像度指標。

而在實際的製程中，解像度的概念用製程視窗(Process Window)判斷。所謂解像度，是在線寬控制範圍內，經微影所能獲得之最小的線幅的能力，因此其製程視窗要大，才能容忍在製程中發生的曝光劑量與焦距的移動的誤差。

為了滿足市場的需求與競爭，朝著元件更小、速度更快、耗電量更小邁進，因此希望線幅縮小，根據

$$p \sin \theta = N\lambda$$

$p$  代表間距(Pitch)， $\theta$  為 0 級光與 1 級光之間的繞射角，因為是 1 級光，所以  $N=1$ 。由上面公式可得，當間距縮小，繞射角將變大，入口光瞳將很難收集到 1 級光，因此當間距縮小，NA 要放大，才能成像。

為了增進解像度(R)，因此波長從 436 奈米降低到了 193 奈米，NA 亦增大。在真空介質中，目前最大可以到 0.93，但增加 NA 容易造成一項重大的缺陷，就是常會伴隨的焦深(Depth of Focus, DOF)的下降。焦深在微影光學中是相當重要的一項參數，不可忽略，因此在解像度與焦深之間的取捨，對於線幅縮小，相當重要。

## 2.2 焦深(Depth of Focus, DOF)

### 2.2.1 焦深的定義

焦深(DOF)[1]是微影光學中重要的指標。所謂的焦深，即為光經圖罩後，產生繞射，經投影鏡收集後聚焦成像，在聚焦面的上下，能夠離開完美的聚焦面( $\Delta f=0$ )最大可以容許的距離，此距離即為焦深，此即像相機如果離焦後，整個影像會模糊一樣，無法產生需要的線幅，因此焦深不能太小。

根據西元 2004 年林本堅先生的文獻[2]，把焦深區分為繞射焦深(Diffraction DOF)、需要焦深(Required DOF)、可用焦深(Available DOF)，相當的複雜，因此僅簡述。



#### (1) 繞射焦深

光經由透鏡、中間的介質、到阻劑，產生的光的繞射影像，在濕浸式微影系統使用前，人們常只是檢視在真空中的焦深，但實際上應考慮光經過的中間介質與阻劑的折射率，才是實際得到的繞射焦深。光經阻劑會產生折射，在阻劑中的焦深通常會大於在真空中(沒有阻劑)的焦深。

根據林本堅先生導的公式：

$$\text{DOF}_{\text{diffraction}} = K_3 \frac{\lambda}{\sin^2 \frac{\beta}{2}} \quad \text{---- 真空中}$$

$$\text{DOF}_{\text{diffraction}} = K_3 n_{\text{res}} \frac{\lambda}{N\text{HA}^2} \quad \text{----- 阻劑中 (適用於厚阻劑)}$$

$K_3$  為比例常數， $\lambda$  為真空中繞射波長， $n_{res}$  為阻劑折射率，定義數值半孔徑 NHA (Numerical Half Aperture)  $= n_{res} \sin \frac{\beta}{2}$ ， $\beta$  為聚焦半夾角，可以看出當  $\beta$  變小，焦深會增加，但對解像度反而會下降，兩者之間常呈現相反的關係。

實際上決定繞射焦深，由聚焦位置與曝光劑量的矩陣 (Focus-Exposure Matrix, FEM)，設定一個線幅寬度的控制範圍，在能夠容許的照射誤差情況下，能夠達到的最遠離焦距離，即為得到的繞射焦深。

## (2) 需要焦深 (Require DOF)

需要焦深包含著圖罩與晶圓的平坦度、阻劑的寬度、聚焦誤差、成像平面的誤差、疊對誤差、曝光機台上下移動機台產生的誤差等，因此為了不使關鍵尺寸產生偏差，繞射焦深需要大於需要焦深。

## (3) 可用焦深 (Available DOF)

可用焦深為繞射焦深扣除正規化阻劑厚度

$$DOF_{ava} = DOF_{vac} - \frac{t_{res}}{n_{res}}$$

$t$  為阻劑厚度，此公式適用於薄阻劑，較具實務意義。可用焦深概念相當的深奧，在此不去詳述。

### 2.2.2 聚焦面的選取

在真空中，理論上最適化聚焦面應該在阻劑的半高處；而在阻劑

中，因為光經過阻劑會產生折射，一般阻劑折射率約為 1.7。當光經過阻劑，根據史內爾(Snell)定律， $n_{\text{vac}}\sin\gamma=n_{\text{res}}\sin\alpha$ ， $\gamma$  為進入阻劑時的入射角， $\alpha$  為經過阻劑後的折射角，假設經過折射，剛好聚焦在半高處，以阻劑最上方表面設為基準( $d=0$ )，聚焦點的高度應為

$$\frac{d}{0.5} = \frac{\cos\gamma}{\cos\alpha} = \frac{\tan\alpha}{\tan\gamma} \sim \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_{\text{vac}}}{n_{\text{res}}} = \frac{1}{1.7}$$

$$d=0.29$$

所以理論上經過折射之後，聚焦面應在真空中的上方，在歸一化阻劑厚度(以底部為基準)的  $1-0.29=0.71$  之間為最佳的聚焦面。

而如果使用濕浸式微影，根據根據史內爾(Snell)定律，

$n_{\text{water}}\sin\gamma=n_{\text{res}}\sin\alpha$ ，同理：

$$\frac{d}{0.5} = \frac{\cos\gamma}{\cos\alpha} = \frac{\tan\alpha}{\tan\gamma} \sim \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_{\text{water}}}{n_{\text{res}}} = \frac{1.44}{1.7}$$

$$d=0.42$$

所以理論上應該在歸一化阻劑厚度(以底部為基準)的之  $1-0.42=0.58$  為最佳的聚焦面。

### 2.2.3 光程差(Optical Path Difference, OPD)對焦深的影響

焦深亦可用光程差(OPD)的觀點探討，在真空中做討論，如圖 2.1(b)，微影光學要成像需要入口光瞳(Entrance Aperture)收集到繞射的 0 級光、與 +1、-1 級光，然後經投影鏡產生聚焦，因為 +1、-1 級光是對稱的，所以不會因離焦而有光程差，主要的光程差來自於 0 級

光與 1 級光在離焦時產生，而光程差等於  $\lambda/4$  (或  $\pi/2$ )，無建設性干涉，會使成像品質劣化，故設定  $OPD < \frac{\lambda}{4}$  或  $OPD \leq \frac{\lambda}{4}$ ，如圖 2.1(c)。

#### 2.2.4 提升焦深的方法

相移圖罩與偏軸發光皆有降低 0 級光的光強，增加對稱性，減少光程差，增加焦深；線性偏振光則是使光的電向量由原本的雜亂分佈，使電向量平行或接近平行，增加光的干涉性，增加成像品質，因此也會增加焦深；在密集線時，利用正偏差，降低 0 級光，增加焦深；在孤立線時，藉由加入散條，減少 0 級光，增加焦深。

### 2.3 偏軸發光 (Off-Axis Illumination, OAI)

#### 2.3.1 原理[3-4]

主要是針對光圈做改變，在中心處遮光，讓光束與光軸成某個角度振進，斜射進入圖罩，0 級光因中心遮光而減弱，可增進焦深，且如雙圓孔(Dipole)只需要收集到 0、+1、-1 三光束中之 0、+1 或 0、-1 二光束，即能成像，因為斜射於圖罩，相較於沿軸發光，其繞射角可以放大，因此又可以增進解像度。

#### 2.3.2 偏軸發光的種類：

目前比較常見的偏軸發光有(1)雙圓孔發光(Dipole Illumination)；  
(2)扇面發光(Quasar Illumination)；(3)圓環發光(Annular



Illumination)。

### (1) 雙圓孔發光(Dipole Illumination):

發光形狀如圖 2.2-(A)，其又分兩種，一種是 X 方向，另一種為 Y 方向上的雙圓孔，雙圓孔發光對於解像度與焦深的改善皆與圖案的方向有關，對於與光源方向垂直的線條有相當好的改善效果，但對平行的線條則沒有改善的效果。如使用雙圓孔發光，只能用單一種方向的線條，但其解像度極佳，對於線幅越來越小，重要性提升，因此如果搭配兩次曝光技術[5-6]，X 位向雙圓孔先製備 Y 方向線條，然後 Y 位向雙圓孔製備 X 方向線條，可以做出 45 奈米技術節點的線幅，甚至有機會可以挑戰 32 奈米的線幅。



### (2) 四扇面發光(Quasar Illumination);

發光形狀如圖 2.2-(B)，為荷蘭知名微影大廠艾斯摩爾(ASML)所研發。因其設計圖案的關係，使其能夠使 0 級光與+1、-1 重疊面積可以比其他偏軸發光多，因此可以減少 0 級光 1 級光之間的光程差，所以焦深會比其他的焦深高，但因其要顧及橫縱方向的線條，其解像度較差，不易達到較低  $K_1$  值。

### (3) 環型發光(Annular Illumination)

發光形狀如圖 2.2-(C)，環形發光對任何方向、任何圖形皆適用，無方向性，實用性佳，但解像度與焦深改善僅為中等。

## 2.4 禁止間距(Forbidden Pitch) [7-9]

### 2.4.1 產生的原因

當線幅越來越小，利用偏軸發光增進解像度的同時，光源以一個傾斜的角度入射於圖罩，而經圖罩的繞射角大小，根據圖罩間距的大小決定，而偏軸發光的角度會與繞射光的角度對稱，此時光程差最小，焦深最佳；然而這只是在某一個間距所產生的最適化，但很不幸的，大部分圖罩不是只有單一的間距，隨著繞射角的改變，產生不對稱的繞射角分佈，在一些間距常會伴隨產生正規化成像對數斜率 (Normalized Image Log-Slope, NILS)、關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)、照射寬容度(Exposure Latitude, EL)、製程視窗無法滿足需求，特別是焦深不足，產生所謂的禁止間距，因此希望設計者能夠避免把這些間距放進圖罩裡。

根據西元 2003 年 Smith 等人[10]的文獻，以橫雙圓孔探討禁止間距的現象，如圖 2.3，為了說明方便，將在光瞳中的 0 級光兩個圓孔之間的距離定義為圓心區。當間距越變越大時，繞射角會變小，1 級光慢慢往內縮，在與 0 級光重疊時，可以發現此時 NILS 可以達到最高點，如圖中的 B 點；間距再增加，1 級光開始進入圓心區，0 級光與 1 級光的對稱性消失，形同背景光增加，在圖中的 D 點達到背



景光最大，造成 NILS 最低，此時最易產生所謂的禁止間距(Forbidden Pitch)。

之後隨著間距再增大，2 級光也紛紛進入的入口光瞳，造成 NILS 的升高與降低，作用互相競爭，作用強者勝出，亦可能造成禁止間距。從另一個觀點，因為間距增大，線幅固定，隙增大，因此 0 級光越來越強，背景光增強，因此造成禁止間距。

因為造成焦深不足的原因有很多，如解像度的不足與光學鄰近效應等，因此廣義的禁止間距可以定義為無法滿足各線幅的需要焦深之間距，皆可稱為禁止間距。

根據西元2002年Shi等人的文獻[11]，禁止間距的概念亦可由空間影像之間的干涉做解釋，由主線條產生的電場振幅可能與其他旁邊的線條產生同相的建設性干涉，與破壞性干涉，如圖2.4，建設性干涉將可以增加照射寬容度，破壞性干涉會減少照射寬容度，因為破壞性干涉的緣故，使其在密集線的間距的照射寬容度可能較孤立線低，因此造成禁止間距。

## 2.4.2 禁止間距的改善方法

### A. 圖案偏差(Bias)修正法[12-14]


一片圖罩通常共同存在孤立線與密集線，因為光學鄰近效應的關係，如果未經過修正，則無法獲得設計的線幅，而利用加寬(正偏差)

線條或縮窄線條(負偏差)，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，而偏差法修正以密集線為主。

由空間影像探討使用偏差法對孤立線修正情形，如圖 2.5(a)，得經由正偏差修正(編號 3)後，可以降低孤立線(編號 2)隙的光強，使密集線與孤立線，門檻光強接近，但無法如散條修正(編號 4)一樣改變空間影像的斜率與形狀，修正效果較有限。

## B. 散條(Scattering Bars)修正孤立線

### (1)散條的種類



在孤立線兩旁加散條，可修正孤立線與密集線的差異，又稱次解像度輔助特形 (Sub-Resolution Assist Feature, SRAFs)，散條運用於圖罩上如圖 2.6(a)，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、減光陣列三種[15]，根據西元 2007 年 Yoon 等人的文獻[16]尚有與相移圖罩相同透射度與相位差的散條，其製作方便，但其因為有 180 的相位差，比遮光全條散條還易成像，寬度須更小，不適合較小的線幅。

### (2)修正原理

修正的原理根據西元 2001 年 Smith [17] 文獻上的公式

(a) 圖罩之繞射光幅

$$|\text{Mag}|_{0\text{th}} = (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) - E$$

$$|\text{Mag}|_{1\text{st}} = (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{S}{p} \right)$$

$$|\text{Mag}|_{2\text{nd}} = (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{2S}{p} \right)$$

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$$

$s$  : 間隙;  $p$  : 間距 ; 圖罩光幅( $E$ ): 鉻膜  $E=0$  、減光型  $E>0$  ;

Mag : 光幅大小

(b) 加入單一遮光全條或減光陣列散條之修正之繞射光幅

$$|\text{Mag}|_{0\text{th order}} = \left[ (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) - E \right] \times \left[ 1 - (1 - E_{SB}) \left( \frac{b}{S} \right) \right]$$

$$|\text{Mag}|_{1\text{st order}} = \left[ (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{S}{p} \right) \right] - \left[ (1 - E_{SB}) \left( \frac{b}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{b}{p} \right) \right]$$

$$|\text{Mag}|_{2\text{nd order}} = \left[ (1 + E) \left( \frac{S}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{2S}{p} \right) \right] - \left[ (1 - E_{SB}) \left( \frac{b}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{2b}{p} \right) \right]$$

$b$  : 減光散條的寬度;  $E_{SB}$  : 散條之光強; 遮光散條光幅大小  $E_{SB}=0$  ;

減光散條光幅大小  $E_{SB}>0$

由上面的公式(a)可看出 0 級光在孤立線時, 0 級光大大的增加, 而當加入鉻膜與減光陣列散條, 如公式(b), 0 級光之光幅大小降低, 減少背景光, 即減少光程差, 因此可以增加焦深; 另外減光全條尚有另外一個參數, 相對於石英基材的相位差, 因甚是複雜, 因此沒有列出, 但亦會影響焦深。

(3) 散條修正前後的空間影像比較

如圖 2.5(a)的編號 4，即孤立線加入散條，可以看出其空間影像的斜率與形狀皆與密集線的空間影像(編號 1)接近，相較於偏差法，其修正孤立線的效果較好，可以增加製程視窗重疊區，增加焦深與照射寬容度，亦可以由圖 2.5(b)看出加入散條的前後對離焦的影響，其主要的缺點是圖罩設計上比較複雜，且隨著線幅越來越小，散條的製作上更加困難。

#### (4)主要散條的優缺點：

如圖 2.7(a)所示：

##### 1. 遮光全條：

如圖 2.7(a)甲一，其為厚鉻膜，製作比較簡單，為量產最常使用的散條。但缺點因為其不透光，隨著線幅降低，太寬會有散條成像的問題，散條太細，製備較困難，因此才會發展另外兩種散條。



##### 2. 減光全條 [18]：

如圖 2.7(a)甲四，為嵌附層(減光相移層)，透射度 $>0$ 、相位差 $>0$ ，優點為散條有透射度，相對遮光全條，可以使條寬較大而不成像，因此使用減光全條有其優勢。

減光全條之影響，尚有相對於石英基材相對的相位差，缺點為亦會影響到焦深。根據本實驗室學長胡繼仁學長在 90 奈米線幅模擬的結果，在孤立線時，相位差較小( $30^\circ$ )時，大部份可增進焦深，但效

果無遮光全條佳；而相位較大(60°)時，較無規則。一般而言，相位差不可過大，並由公式 $\theta = \frac{2\pi(n-1)d}{\lambda}$ 可得知，相位差( $\theta$ )與相移層厚度( $d$ )有一定的關係，相移層厚度愈小，其相位差會較小，可利用此控制其相位差之影響，並由材料本身之組成與厚度，可控制其透射度與相位差，達到所需要的減光全條。

相位差與相移層的厚度關係，可由美國羅徹斯特理工學院(Rochester Institute of Technology, RIT)，微電子工程系的史密斯(B.W. Smith)所提供開放網(<http://www.microe.rite.edu/research/lithography/>)，計算相關材料之折射率、吸收係數、透射度及換算所得的相位差。

### 3. 減光陣列:

如圖 2.7(a)甲三，把散條蝕刻成陣列的形狀， $T\% > 0$ 、相位差 $= 0$ ，優點為其線幅可以做的比減光全條寬；缺點為蝕刻微細陣列圖案難度高。

#### (4)散條的置放位置 [19-20] :

孤立線依其間距的不同，可以分別加入寬、窄的散條加入 1-3 條散條，如圖 2.7(b)，從間距比較小的半孤立線開始加入改善禁止間距，從最寬且可以符合製程視窗但其本身不產生成像的散條開始加入，而散條放置的位置通常取等距，一條取兩等份(即為中央)，兩條則取三等份，三條取四等份，但亦有在關鍵線條的兩側加入散條的。利用

各個間距加入散條之後的焦深與 NILS 的變化，評估加入加入散條數量的依據。西元 2008 年 Chin 等人文獻 [21] 的報導，依散條位置模擬，所得 NILS 可分為分建設性區域與破壞性區域，建設性區域焦深較佳。

### 2.4.3 禁止間距修正結果

如圖 2.8，在 65 奈米線幅，其需要焦深為 200 奈米，在修正前，有許多低於焦深 200 奈米的間距，這些即為禁止間距。利用偏差法的正偏差修正密集線與半孤立線，散條修正半孤立線與孤立線，可以將全部間距皆提升到焦深 200 奈米以上，而無禁止間距。



### 三. 模擬設計:

本文主要針對 45、32 奈米線幅，從密集線到孤立線，模擬探討利用偏差法與散條使用，改善禁止間距問題，提升焦深，使用的模擬參數如表 3.1、表 3.2:

首先針對聚焦平面的定義，把阻劑半高處設為參考聚焦面，而實際聚焦面通常是比阻劑半高處高一點的位置，約在阻劑歸一化高度 0.6 處，如圖 3.1，實際聚焦面還是要經由模擬找尋最適化值。

在 45 奈米線幅，阻劑厚度使用 140 奈米，焦深需較阻劑厚度大一點，設定需要焦深 150 奈米為可接受值；在 32 奈米線幅，阻劑厚度用 100 奈米，設定需要焦深 100 奈米為可接受值。

#### 3.1 微影模擬軟體 [22-23]

本論文使用美商 KLA-Tenor 公司的微影模擬軟體 Prolith v. 9.0，相關模擬實驗。


此模擬軟體介面簡單，操作方便，但其模擬結果有一定的準確性，雖然實際製程複雜性高，難以預測，但模擬軟體依舊有其參考性，尤其現在線幅越來越小，先用模擬軟體調整參數，增進準確性，可以減



少很多複雜的製程，節省成本。

此軟體可以設定參數甚多，如：光源波長、光圈形狀、光圈相擾度、數值孔徑、未偏振與偏振光的使用、乾式或濕浸式微影的使用、簡單的圖罩設計、阻劑類型、阻劑相關參數、照後烤時間與溫度、照射劑量、聚焦焦距、門檻光強、光經過繞射後在光瞳的分佈圖等。可以觀測的項目亦不少，如：空間影像(Aerial Image)、阻劑輪廓(Resist Profile)、圖罩偏差增大因子(Mask Error Enhancement Factor, MEEF)、利用製程視窗條件限制求焦深等。

## 3.2 在 45 奈米線幅下探討



使用橫雙圓孔偏軸發光、減光型相移圖罩、搭配濕浸式微影系統、及 Y 偏振光源，如圖 3.2、圖 3.3。因施予相同劑量，在各個間距獲得的劑量卻大不相同，因此分不同劑量與接近劑量探討

### 3.2.1 不同劑量

在不同的間距下，擁有相同的光圈相擾度( $\sigma$ )、NA，進行模擬計算，求出各間距最適化所需之照射能量，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖，探討偏差法使用對焦深的影響，與加入遮光全條、減光全條散條其寬度對改善禁止間距的影響，尋求適合的寬度修正禁止間距。



### 3.2.2 接近劑量

在整個間距，固定所有光學模擬參數，用接近劑量能量(E)=23.3 mJ/cm<sup>2</sup>、聚焦面(F)=+20 奈米，在密集線使用偏差法，在間距 200 奈米時，開始加入散條，藉由偏差法(Bias)和散條(Scattering Bar, SB)調配，維持在接近 23.3 mJ/cm<sup>2</sup>的劑量，盡量不超過 0.1 mJ/cm<sup>2</sup>，以此探討禁止間距修正情形。

## 3.3 在 32 奈米線幅下探討

使用橫雙圓孔偏軸發光、減光型相移圖罩、搭配濕浸式微影系統、及 Y 偏振光源。分不同劑量與接近劑量探討

### 3.3.1 不同劑量

在不同的間距下，擁有相同的  $\sigma$ 、NA，進行模擬計算出各間距最適化所需照射能量，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖，在間距 180 奈米時，開始加入遮光全條和減光全條，探討兩者最大寬度；之後將減光全條固定寬度為 32 奈米寬度，探討相位差與透射度對焦深的影響。

### 3.3.2 接近劑量

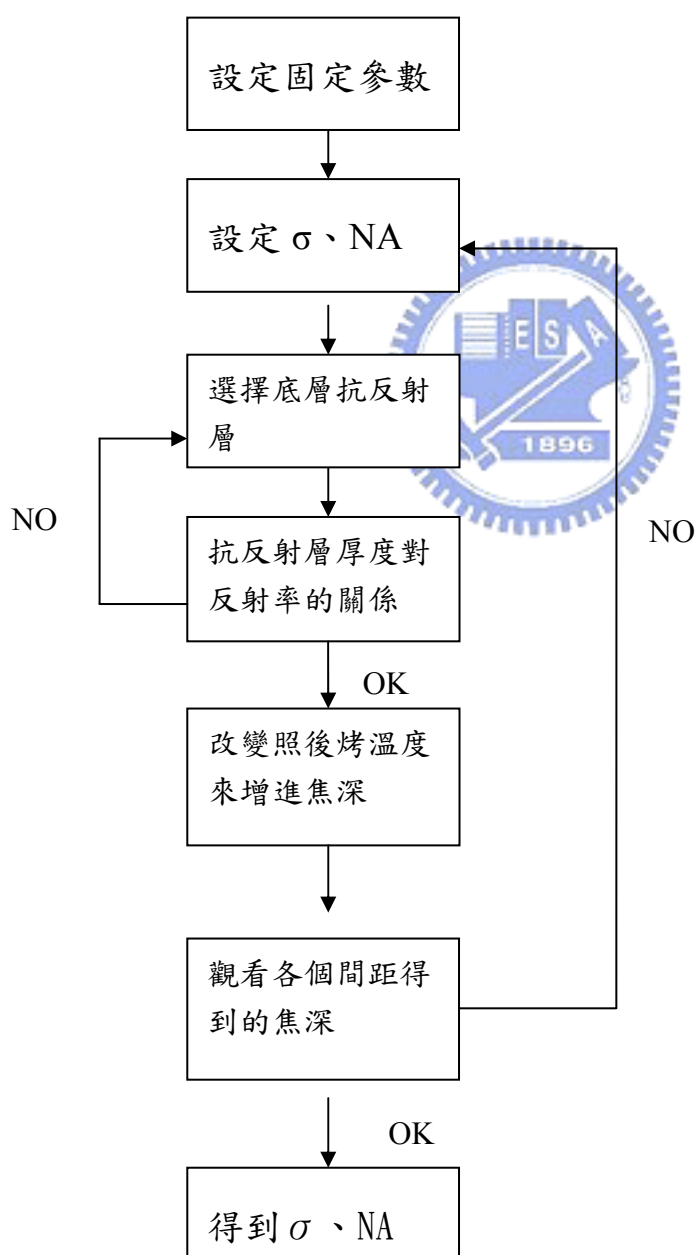
在整個間距，固定所有光學模擬參數，用接近劑量，能量(E)=16.7 mJ/cm<sup>2</sup>、聚焦面(F)=+10 nm，在密集線使用偏差法，在間距 180 奈米

時，開始加入散條，藉由偏差法(Bias)和散條(Scattering Bar, SB)的調配，維持劑量接近，盡量不超過  $0.1 \text{ mJ/cm}^2$ ，判斷能否改善禁止間距。

### 3.4 模擬流程規劃:

模擬規劃步驟流程圖如下頁：

#### (1) $\sigma$ 、NA 的選擇



### 註 1: 設定固定參數:

阻劑厚度、偏振光、濕浸式、圖罩類型、量測範圍與製程視窗重疊條件(線寬控制 $\pm 10\%$ 、阻劑側壁角度 $> 80$ 度、阻劑損失 $< 10\%$ 、照射寬容度 $= 6\%$ )等參數固定不變。

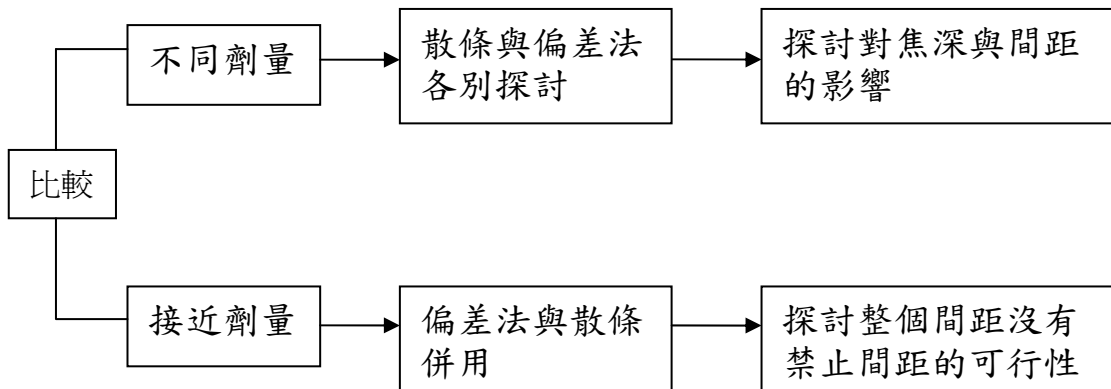
### 註 2: 底層抗反射層厚度的選擇

在光學條件模擬參數設定之後，進行底層抗反射層(Bottom Anti-reflective Coatings, BARC)種類與厚度的選擇，使用基材反射率對抗反射層厚度的改變做圖，如圖 3.4；選擇反射率最低當作抗反射層的厚度，由圖 3.5、圖 3.6 可以看出加入反射層之後的差異，大幅的降低駐波效應；而當線幅縮小，只有一層底層抗反射層，無法完全改善駐波效應，於是在 32 奈米線幅，使用兩層底層抗反射層，大量了減少側壁輪廓的擺動。

### 註 3: 照後烤(Post Exposure Bake, PEB)溫度的選擇

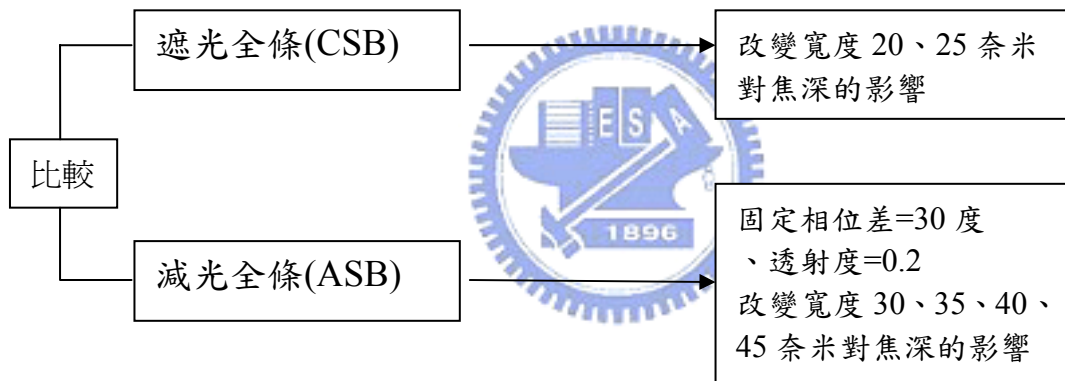
目前 193 奈米阻劑皆是使用光酸阻劑，因此照後烤(PEB)為必要的。因為每種阻劑因其特性、成分不同，藉由改變其照後烤溫度，其 EL 與焦深會產生改變。以 32 奈米使用阻劑 ArF JSR AR165J 為例，如圖 3.7 可看出，當把 PEB 溫度降低， $EL_{max}$  上昇， $DOF_{max}$  下降，在  $EL=6\%$  時，焦深皆上升，但每個阻劑特性不相同，各阻劑有其適合的溫度參數，減少禁止間距的產生。

(2) 禁止間距修正探討:

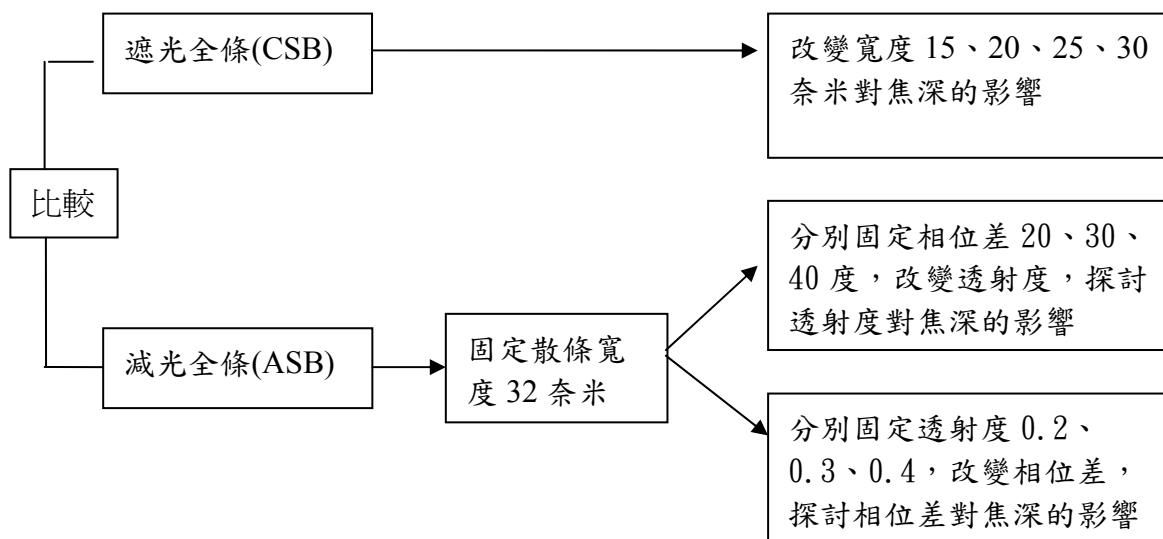


不同劑量

a. 45 奈米線幅散條:



b. 32 奈米線幅散條:



說明:CSB(Chromium Scattering Bar)代表遮光全條散條

ASB(Attenuated Scattering Bar)代表減光全條散條

### (3) 32 奈米線幅加入散條前後之空間影像對焦深的影響

利用空間影像與焦深(DOF)對照射寬容度(EL)作圖，觀察散條加入前後其變化，與空間影像 Contrast 與 NILS 的關係。



## 四. 結果與討論

### 4.1 禁止間距產生的原因與相關因素

當元件愈小，線幅愈來愈細。當線寬(L)固定，而間距(p)增加時，在某些間距會產生正規化成像斜率對數(NILS)、像比(Contrast)、關鍵尺寸(CD)、製程視窗等不符需求之現象，造成焦深不足。這些有問題的間距可稱為“禁止間距”，廣義的禁止間距可以定義為其間距焦深無法滿足需要焦深。廣義禁止間距發生之原因有：

1. 線隙比(L:S)接近 1 時，MEEF 相當高
2. 一級光開始進入圓心區，如同背景光，當達到最圓心區的中心，而二級光尚未進入前最容易造成禁止間距。
3. 高階光在圓心區所佔之面積甚大。

本論文以焦深的變化觀察禁止間距。而製程視窗影響焦深甚大，與製程視窗有關的有四個參數，包括：阻劑線寬、阻劑側壁角度、阻劑損失、照射寬容度。在製程上，這四個參數也是控制焦深的關鍵。使用偏軸發光改善解像度，常伴隨著禁止間距產生，因此利用散條與偏差修正，提升焦深，消除禁止間距。

### 4.2 45 奈米線幅

#### 4.2.1 橫雙圓孔的孔距( $\sigma_{center}$ )與聚光當量(NA)對間距與焦深的關係

本論文使用偏軸發光的橫雙圓孔(Dipole)，因為其他如斜四扇面

(Quasar)與圓環(Annular)應用於 32 奈米線幅，效果皆不好，以 Quasar 為例，如圖 4.1、圖 4.2，對其焦深與間距做圖，加入散條後，無法滿足需要焦深 100 奈米，仍出現許多禁止間距；橫雙圓孔的優點即是解像度高，可以達到較低  $k_1$  的需求。

Dipole 的孔距( $\sigma_{center}$ )、孔半( $\sigma_{radius}$ )與 NA 的條件選取相當重要，須取其最適化值，使間距 90-450 奈米沒有禁止間距。因為參數太多，相互影響相當複雜，因此固定  $\sigma_{radius}$ ，探討其他兩個參數。因為使用相移圖罩，干涉須強， $\sigma_{radius}$  較小，干涉能力較強，有利於解像度，所以固定 0.2 探討，如圖 4.3、圖 4.4、圖 4.5。

固定  $\sigma_{center}$  與  $\sigma_{radius}$ ，改變 NA，探討 NA 對焦深與間距的影響，如圖 4.3，發現 NA 增大，造成焦深降低，禁止間距增加；但若 NA 太小，解像度不足。

接著固定 NA=1.15 與  $\sigma_{radius}$ ，改變  $\sigma_{center}$ ，探討  $\sigma_{center}$  對焦深的影響，如圖 4.4，發現  $\sigma_{center}$  愈大，易造成禁止間距，但  $\sigma_{center}$  的大小亦會影響解像度；因此須對焦深與解像度做取捨，選擇最適當參數。結果使用 Dipole  $\sigma_{center}=0.65$ 、 $\sigma_{radius}=0.20$ 、NA=1.15，其禁止間距在密集線到半孤立線之間較少，而半孤立線、孤立線用散條增進焦深較容易，不過須從間距大於 110 奈米開始，無法適用間距 90 奈米，因為間距再縮小，會造成更多的禁止間距，所以此條件探討。



光學微影投影鏡只須收集到 0 級光與 1 級光即可成像。當間距縮小，0 級光與 1 級光間的繞射角變大，此時應增加 NA 或  $\sigma_{\text{center}}$ ，兩者皆可增進解像度，但  $\sigma_{\text{center}}$  和 NA 太大皆會造成焦深下降。

$\sigma_{\text{center}}$  愈大，進入圓心區的 1 級光相對增加，使光程差增加，焦深下降，造成禁止間距增加，如在  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $NA=1.15$  時，只有 190 奈米處有禁止間距，但在  $\sigma_{\text{center}}=0.70$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $NA=1.15$  時，在 170-190 奈米皆產生禁止間距。

NA 增加，聚焦半夾角會增加，使 0 級光與 1 級光光程差增加，所以會降低焦深。利用杜邦的二代的濕浸式液體的折射率  $n=1.64$  與純水的折射率  $n=1.44$  模擬，如圖 4.6，在相同的 NA 下，解像度相同，而  $NA=n \sin\beta$ ，二代杜邦液體  $n$  增加，相對的聚焦半夾角下降，可以發現，此時焦深是增加的。

#### 4.2.2 在不同劑量下探討散條和偏差法對焦深與間距的影響

雖然施予相同劑量，因為光的繞射與干涉效應，在各個間距得到的劑量卻不相同，得到線條大小會有所不同，因此要得到一樣的線幅，需做適當的修正。利用在各個間距有其各別最適化劑量下，探討偏差法與散條對焦深的影響，將其應用在相同劑量上，改善禁止間距。

##### (1) 偏差法對間距與焦深的影響：

在各個間距使用偏差法修正，如圖 4.7、圖 4.8，可以發現使用



負偏差會降低焦深，而使用正偏差普遍焦深皆增加，其原因為在相同間距下，線(Line)變寬，隙(Space)會變窄，因此 0 級光光強減弱，0 級光與 1 級光光強比較接近，光程差降低，因此焦深會增加，但偏差法在孤立線時，改善效果有限。

## (2) 散條對焦深的影響：

散條只能修正半孤立線與孤立線，因密集線空間不足，且易成像，根據圖 4.9，散條由間距大於 240 開始有提升焦深的作用，分別加入遮光全條與減光全條散條探討

### 1. 遮光全條

為完全遮光的鉻膜散條，利用散條的寬度改變對焦深的影響，探討其適合寬度的散條，寬度越寬越好，因為製作較容易，但需散條不可成像，且可達到焦深的需求。而散條的放置用等分法，使用散條寬度 20 奈米，在間距 240 奈米加入散條開始提升焦深；當焦深明顯下降時，開始加入第二條，約在間距 330 奈米左右。鉻膜散條最寬約能使用到 25 奈米的寬度，但需在間距 270 奈米之後加入，才不會成像；加入兩條散條，要在間距 380 奈米才不會成像，因此一些間距無法提升禁止間距。而 20 奈米寬度散條可以適用的間距 240-450 奈米，比較適合使用，但隨著線幅的降低，鉻膜製備越來越難。

### 2. 減光全條

散條使用具透射度之嵌附層，嵌附層除透射度外，尚有相對於光罩石英基材之相對相位差，利用透射度與相位差的調變，增加散條的寬度，以利線幅縮小的製備，由圖 4.9，在此固定透射度(T)=0.2、相位差( $\phi$ )=30 度，與遮光散條寬度做比較，在此條件下，散條寬度約可達 40 奈米寬度，適用於 240-450 奈米間距，且散條不成像，達到增加焦深的效果，其寬度約可為鉻膜散條的一倍，較易製備。

#### 4.2.3 在接近劑量下探討禁止間距修正情形

因為光學鄰近效應的關係，雖然施予相同的劑量，但會因為繞射、干涉、多重反射的關係，在阻劑獲得的劑量會不相同，經顯影後，使線寬失真。



因此使用偏差法與散條併用維持線幅大小，提升焦深，用接近劑量能量(E)=23.3 mJ/cm<sup>2</sup>、聚焦面(F)=+20 nm。在密集線與半孤立線，利用偏差法；在半孤立線與孤立線，利用兩者併用修正；當照射劑量比特定線幅估算的劑量(Dose to Size)大時，使用正偏差；反之，則使用負偏差，舉例來說，如果固定照射劑量為 20 mJ/cm<sup>2</sup>，而在某間距要得到 45 奈米的線條寬度經過模擬的估算的劑量(Dose to Size)為 15 mJ/cm<sup>2</sup>，為了在劑量 20 mJ/cm<sup>2</sup> 得到 45 奈米的線條，使用正偏差修正達到需求，此時 0 級光減弱，0 級 1 級光的光強比較接近，通常焦深會提升，所以固定照射劑量應找密集線裡面劑量較高的，以此為照

射劑量，有利於焦深。

當間距比較小時，一級光會有部分光在入口光瞳之外，雖然施予相同的劑量，但得到的劑量較少，所以要維持一定的線幅，要比其他間距所需要的照射劑量較大，需用負偏差，易造成焦深下降，造成焦深的不足。

而在半孤立線與孤立線只用偏差法或散條修正很難使線幅維持相同的大小，因此使用偏差法與散條的共用修正，因為 Prolith 無法直接使用固定劑量與聚焦面求其焦深，只能用求在此間距，其最適化的劑量與聚焦面。模擬以密集線中劑量較高的點當做固定劑量，其他間距運用偏差法的寬度與散條的寬度慢慢的逼近，但無法完全一致，因此盡可能不使劑量相差  $0.1 \text{ mJ/cm}^2$  以上，再利用柏桑曲線(Bossung Curve)去驗證，取  $23.3 \pm 1.4 \text{ mJ/cm}^2$  (EL=6%) 的劑量觀察焦深，增加可信度，而由此得到的焦深圖 4.10，其圖單線條寬度如圖 4.11，可以觀察使用偏差法與散條可以修正禁止間距的問題，焦深皆大於 150 奈米，許多間距大於 200 奈米，無論是遮光全條與減光全條皆可以達到，且減光全條可以接近主線條寬度，較易製作。

#### 4.2.4 結論

1.  $\sigma_{\text{center}}$ 、NA 須取其最適化值， $\sigma_{\text{center}}$  太大，造成進入圓心區的光增加，易造成焦深的降低；NA 太大，聚焦半夾角增加，易造成 0

級光與 1 級光的光程差，降低焦深，但兩者皆不能太小，解像度會不足，本文使用  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $\text{NA}=1.15$ 。

2. 偏差法宜使用線條正偏差，可以增進焦深。

3. 減光全條散條在透射度( $T$ )=0.2、相位差( $\phi$ )=30 度時寬度約可在 40 奈米時，提升各間距的焦深，使其不顯影，而使用遮光全條只能約 20 奈米寬度，減光全條散條此時約可增加一倍寬。

4. 固定劑量宜取密集線中劑量較高者，因其他間距可以利用正偏差修正，增加焦深。

## 4.3 32 奈米線幅

### 4.3.1 橫雙圓孔的孔距( $\sigma_{\text{center}}$ )、聚光當量( $\text{NA}$ )的選取

因為 Dipole  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $\text{NA}=1.15$  在 45 奈米線幅可以適用大部分間距，因此放大  $\text{NA}=1.3248$ ，探討 32 奈米線幅，不過只能探討間距大於 90 奈米，但已接近靜態隨機存取記憶體(Static Random Access Memory, SRAM)的設計線幅(線寬約為間距的 $\frac{1}{3}$ )，在此條件下，探討 90-320 奈米間距下散條對焦深的影響。


### 4.3.2 在不同劑量下探討散條對焦深影響

利用在各個間距有其各別最適化劑量下，觀察散條的使用對焦深的影響，改善禁止間距，使各間距達到設計的線寬需求。

## (1) 遮光全條

由圖 4.12 可得，在間距 160 奈米時有禁止間距，此時加入散條無法提升焦深，需用偏差法修正；在鉻膜散條方面，寬度 15 奈米的散條從間距 180 奈米起可以提升焦深，但 20 奈米的散條要從間距 220 奈米才可以使用散條，間距 180-220 奈米之間散條本身會顯影成像，25 奈米的散條則要從間距 260 奈米開始使用，30 奈米的散條則皆會顯影成像，因此要減少禁止間距，以 15 奈米鉻膜散條較適宜，可以提升大部分間距焦深。

## (2) 減光全條



使用減光全條散條，可以利用相位差與透射度的調變，使其達到 32 奈米的寬度，因此就 32 奈米的減光全條討論，因為散條寬度與主線條寬度相同，因此易造成散條自身成像，由表 4.1 可看出，透射度高、相位差小，較不易產生成像。在間距比較小時，散條自身成像現象與邊端效應產生的干涉波有關，會在下面的 4.4 節有較完整的探討。散條透射度( $T$ )=0.4、相位差( $\phi$ )小於 30 度，在 180-320 奈米間距才可達到不成像，寬度為鉻膜散條的一倍，但其提升焦深效果較小，但可達成焦深的需求。

### 1. 透射度對焦深的影響

固定相位差或透射度探討其對焦深的影響，透射度過大，則散條

改善焦深的效果有限，因此只討論到  $T=0.1-0.5$ ；而相位差根據模擬的經驗，相位差不宜太大，因此相位差  $\phi$  取  $10-50$  度討論。

固定相位差( $\phi$ )= $20、30、40$  度，改變透射度( $T$ )，探討透射度對焦深的影響，如圖 4.13、4.14、4.15，焦深在各間距普遍皆上升。可發現透射度低，在大部份間距有較好的焦深，符合學理上加入散條的目的，就是為了降低 0 級光，透射度低，降低較多 0 級光，但透射度降低，易造成散條的自身成像，需多注意。

## 2. 相位差對焦深的影響

固定透射度( $T$ )= $0.2、0.3、0.4$  改變相位差，探討相位差對焦深的影響，如圖 4.16、圖 4.17、圖 4.18，改變相位差較無規則，在有些間距焦深較高，則會在另一段間距焦深較小，但相位差不宜使用太大，會造成間距之間太大的落差。因此在間距  $180-320$  奈米下，相位差小時比較有利，散條較不易成像。

### 4.3.3 在接近劑量下探討禁止間距修正情形

藉由偏差法(Bias)和散條(Scattering Bar, SB)的搭配做修正，維持接近的劑量，使用能量( $E$ )= $16.7 \text{ mJ/cm}^2$ 、聚焦面( $F$ )= $+10 \text{ nm}$ ，使其達到焦深的需求  $100$  奈米，而其偏差法的使用寬度如圖 4.19，散條與偏差法共用後得到的焦深圖詳見圖 4.20，因為在間距為  $160$  奈米時，焦深在各別最適化劑量模擬時，焦深不足，而且此時散條加入無



法改善禁止間距，因此針對此間距去做偏差法的修正，使其能夠符合焦深的需求，所以所需的偏差法的圖罩的線寬會比較寬，在經過偏差法與散條一起修正之後，使間距 90-320 奈米的線幅間距皆能夠符合焦深的需求，而遮光全條與減光全條散條皆適用，減光全條的寬度可接近主線條，約可為遮光全條的一倍。

#### 4.3.4 結論

1. 利用  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $NA=1.3248$ ，經由偏差法與散條的修正，可以使間距 90-320 奈米無禁止間距。

2. 減光全條散條固定寬度 32 奈米，固定相位差，改變透射度，其透射度降低，焦深提升較多，但易造成顯影；固定透射度，改變相位差，對焦深影響較無規則，但相位差如太大，易造成散條成像。

3. 在透射度=0.4、相位差小於 30 度，經由模擬，可以使散條無自身成像問題，其改善焦深效果雖較透射度低的差，但可藉由加入兩條散條改善，達成無禁止間距。

### 4.4 32 奈米線幅加入散條前後之空間影像對焦深的影響

#### 4.4.1 邊端效應

邊端效應(Edge Effect)與產生的空間影像光強有關，其是由複雜



的繞射光束所造成的，會在遮板的邊緣，產生橫向由邊緣遞減的光強，稱為振鈴效應(Ringing Effect)，又稱側紋(Fringe)，此側紋振幅大小與使用的  $\sigma_{\text{radius}}$  大小和縱向距離(d)有關， $\sigma_{\text{radius}}$  小，代表干涉強，側紋較大，如圖 4.21 所示。當間距較小時，因邊端效應產生干涉波重疊，在隙的空間影像，只會出現單一的波峰，如圖 4.22(a)；但隨著間距的增加，干涉波重疊漸漸分開，如圖 4.22(b)，此非側葉 (Sidelobe) 光強，可由圖 4.23 可以證明，在線條中間隨著相移圖罩透射度的增加慢慢增加，其光強增加才是熟悉的側葉。

#### 4.4.2 偏振光與未偏振光對邊端效應的影響

邊端效应在有無偏振光的使用皆有相同的情形，如下面公式簡易的推導

$$\text{根據文獻得 } B(x, z) = \frac{B_{\text{TE}} + B_{\text{TM}}}{2}$$

$$\text{假設 } B_{\text{TE}} = B_{\text{TM}} \text{ 得}$$

$$B(x, z) = \frac{2B_{\text{TE}}}{2} = B_{\text{TE}}$$

$B(x, z)$  為未偏振光在  $x$ 、 $z$  二維平面上的光幅(偏振光的光幅在  $Z$  方向)， $B_{\text{TE}}$  和  $B_{\text{TM}}$  偏振光光幅

在本論文亦做了驗證，如圖 4.24，使用與未使用偏振光，光幅大小接近，如同 NA 極小情況。

#### 4.4.3 間距改變對加入散條前後照射寬容度與焦深的關係

加入散條後的空間影像因邊端效應產生的干涉波，當重疊時，其  $EL_{\max}$  與  $DOF_{\max}$  皆下降，如圖 4.25

在重疊干涉波分離之後，約間距 162 奈米之後，此時加入散條前與後兩條曲線交點接近  $EL=0$ ，如圖 4.26，隨著間距增加，兩者產生交點，且隨著間距增加，交點上升，如圖 4.27、圖 4.28，若  $EL$  的設定低於交點值，即能改善焦深。當交點高於  $EL=6\%$ ，達到論文中設定需求，焦深即可增加，此時  $EL_{\max}$  減少， $DOF_{\max}$  增加。

隨著間距再增大，無論在任何  $EL$  的大小情況下，其焦深皆大於未加散條之前，達到增加焦深的作用，此時  $EL_{\max}$  與  $DOF_{\max}$  皆增加，如圖 4.29、圖 4.30。

#### 4.4.4 對比度(Contrast)和正規化成像對數斜率(NILS)與焦深的關係

##### 1. 對比度(Contrast)C 值的定義

$$C = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$I_{\max}$ : 為空間影像光強最大值  $I_{\min}$ : 為空間影像光強最小值

$C$  介於 0-1 之間， $C$  值的大小影響顯影後成像的品質， $C$  值愈大，影像對比愈佳，因此亦影響到離焦的變化範圍。

##### 2. 正規化成像對數斜率(Normalized Image Log-Slope, NILS)

$$NILS = W \frac{d(\ln I)}{dx}$$

W 為線幅寬度；其光強變化應取圖罩線條邊緣處之光強

NILS 值越大，代表線條邊緣空間影像兩邊斜率越大，因此如果照射劑量改變，其受影響的線寬變化幅度較小，因此在相同所需的線寬控制範圍(CD Control)內，會增加劑量變化的容忍度，反之則相反。同理，當 NILS 較大，其受到劑量改變產生線寬幅度變化較小，在相同 EL 情況下，未達到線寬控制上下限，因此可增加其離焦變化範圍，因此和焦深也有著密切的關係。

亦可由圖 4.31 可以發現，對比度與 NILS 值往往與焦深有著密切的關係，雖非完全正比的關係，但良好的 NILS 與對比度往往有較長的焦深。



#### 4.4.5 討論

由圖 4.32 可以看出，散條加入前後，隨著間距的增加，對比度與 NILS 由開始的減少，有慢慢增加的趨勢。

加入散條的用意即想藉由散條遮光的效果，減低 0 級光的光強，藉此達到增加焦深的效果。

在加入散條後，干涉波重疊分離之前，加入散條往往會大幅影響主線條的對比度與 NILS 值，造成照射寬容度與焦深的減少。

隨著重疊分離之後，加入散條因有足夠的空間，減少影響其對比度與 NILS 值，此時犧牲  $EL_{max}$ ，而增加  $DOF_{max}$ ，隨著間距再增加，

主線條完全不受影響，此時 NILS 反而會增加，使焦深和照射寬容度皆增加。

## 4.5 邊端效應對散條成像的影響

邊端效應亦影響散條自身的成像，如表 4.1，以透射度( $T$ )=0.3、相位差( $\phi$ )=20 度為例，使用正型阻劑，加入寬度 15 奈米的散條，在間距小於 200 奈米時，散條自身不會成像，反而在間距 200 奈米到 210 奈米之間，散條會成像，可由圖 4.33 解釋，其為透射度( $T$ )=0.3、相位差( $\phi$ )=20、30、40 度的隙空間影像光強，可以看出在 190-230 奈米間距是光強相對較低的區域，此時由表 4.1 的圖對照，是最容易產生成像的部分，此現象可由邊端效應重疊解釋，如圖 4.34，當在間距 162 奈米時，加入散條，兩邊端產生的振鈴效應(Ringing Effect)接近 A 點時產生重疊分離，所以隙的空間最低光強相較於其他間距，光強較高。然後隨著間距增加，由 A→B→C 點，此時在接近 C 點時產生分離，此時隙的空間最低光強到達最低，是最容易成像的間距，約在 210-220 奈米，由於此因素，所以在間距 180-190 奈米時加入散條，雖然間距較小，但不會產生散條自身成像的狀況，而在間距較大的 200-220 奈米之間，易產生成像。

## 五. 結論

1. 偏軸發光可以增進解像度與焦深。橫雙圓孔在解像度需求較高的 32 奈米線幅，其焦深較斜四扇面效果好，能改善禁止間距問題。
2. 橫雙圓孔的  $\sigma_{\text{center}}$  與 NA 增加皆能增進解像度，但太大皆會造成焦深不足，產生禁止間距。 $\sigma_{\text{center}}$  太大，易造成圓心區的光增加；NA 增加，聚焦半夾角增加，增加光程差。本論文 45 奈米線幅使用  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $\text{NA}=1.1500$ ；32 奈米線幅使用  $\sigma_{\text{center}}=0.65$ 、 $\sigma_{\text{radius}}=0.20$ 、 $\text{NA}=1.3248$ 。
3. 正偏差修正法，可以提升焦深，因為線隙比增加，可以減低 0 級光；反之，負偏差修正法，降低焦深。
4. 用接近劑量時，當照射劑量比特定線幅經估算的劑量(Dose to Size)劑量大時，使用正偏差修正，反之，則使用負偏差修正。因此應選擇密集線範圍之中劑量較高者，為照射劑量，有利於焦深。
5. 相關的文獻僅限於在各個間距下，使用各別不同的最適化劑量，只能探討焦深在各間距的趨勢。通常一片並非圖罩單一の間距，但同一片圖罩皆在固定的劑量、固定的聚焦面下照射。本論文提出了利用偏差法與散條作修正，使各間距劑量接近，因軟體的限制，無法固定

劑量與聚焦面，僅能使用接近劑量，再利用柏桑曲線(Bossung Curve)，驗證焦深是否正確，達成無禁止間距的要求。

6. 在 45 奈米與 32 奈米線幅，遮光全條較寬容易成像，太細很難製備。減光全條優點可以利用其透射度(T)與相位差( $\phi$ )的調變，使散條寬度可以接近主線條寬度，寬度較遮光全條約可增加一倍，對於 32、22 奈米線幅或更細的線幅，重要性將顯著提升。

7. 在 32 奈米線幅，減光全條透射度(T)較低，焦深通常增加，但易成像；相位差( $\phi$ )對焦深的影響，較無規則，但相位差如太大，易造成散條成像。模擬顯示，減光全條寬度 32 奈米、透射度(T)=0.4、相位差( $\phi$ )低於 30 度，180-320 奈米間距皆無禁止間距，且不會成像。

8. 空間影像對比度(Contrast)與正規化成像對數斜率(NILS)直接影響焦深大小，但非絕對成正比的關係。因模擬可以快速得到空間影像 NILS，求出間距中相對 NILS 最低點附近模擬得其焦深，可以快速判斷在此條件是否有禁止間距。

9. 在間距較小時，加入散條易影響主線條空間影像，造成 NILS 與 Contrast 降低，焦深減少， $EL_{max}$  與  $DOF_{max}$  皆降低；隨著間距增加，在加入散條的前與後，EL vs.DOF 圖中二條曲線開始出現交點，交點隨著間距增加而升高，若 EL 的設定低於交點值，焦深可增加，所以當交點高於  $EL=6\%$ ，達到論文中設定需求，焦深即可增加，此時  $EL_{max}$



減少， $DOF_{max}$  增加；間距再增加，主線條不受影響，NILS 反而增加，此時  $EL_{max}$  與  $DOF_{max}$  皆增加。

10. 在 32 奈米線幅，間距較小時加入減光全條散條時，隙的空間影像，如邊端效應干涉波主極大重疊，相對光強較高，自身較不易成像；間距較大時，如邊端效應干涉波主極大分離，相對光強較低，自身較易成像。





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
<i>DRAM and Flash</i>									
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
<i>MPU</i>									
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
<i>Chip size (mm<sup>2</sup>)</i>									
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
<i>NA required for Flash (single exposure)</i>									
NA required for Flash (single exposure)	1.01	1.20	1.35	1.52	1.70	1.91			
<i>NA required for logic (single exposure)</i>									
NA required for logic (single exposure)	0.91	1.04	1.20	1.38	1.54	1.73	1.94		
<i>NA required for double exposure (Flash)</i>									
NA required for double exposure (Flash)	0.72	0.86	0.96	1.08	1.22	1.36	1.53	1.72	1.93
<i>NA required for double exposure (logic)</i>									
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

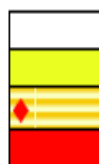


表 1.1 2007 年 ITRS 所定義的關鍵性微影需求

45 nm Linewidth	
Wavelength	193 nm
Polarized Illumination	Y- Polarized
Aperture	X-Dipole, $\sigma_{\text{center}}=0.65$ , $\sigma_{\text{radius}}=0.20$
Immersion Liquid	Water n=1.44
NA	1.15
Mask Type	T=6% Att-PSM, Y-Orientation
Photoresist	ArF Clariant AX1050=140 nm
Barc	Shipley AR2=50 nm
Process Windows	CD $\pm$ 10%, EL=6% Resist loss<10% sidewall angle>80

表 3.1 45 奈米線幅微影模擬各項參數

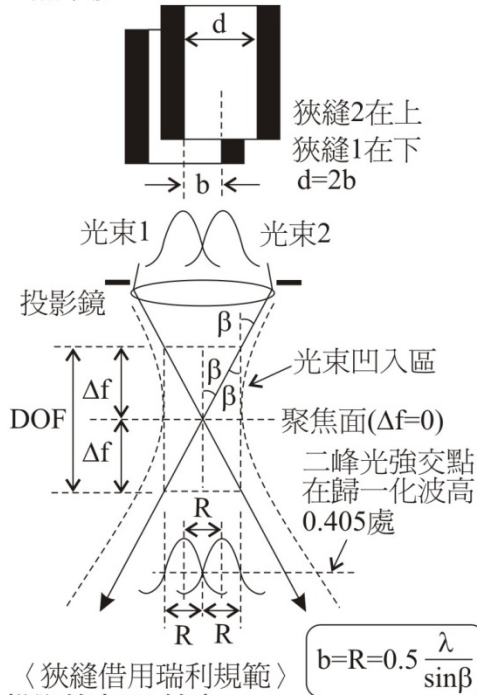
32 nm linewidth	
Wavelength	193 nm
Polarized Illumination	Y- Polarized
Aperture	X-Dipole, $\sigma_{\text{center}}=0.65$ , $\sigma_{\text{radius}}=0.20$
Immersion Liquid	Water n=1.44
NA	1.3248
Mask Type	T=6% Att-PSM, Y-Orientation
Photoresist	ArF JSR AR165J=100 nm
Barc	Shibley AR19=20 nm Shibley AR5=30 nm
Process Windows	CD $\pm$ 10%, EL=6%  Resist loss<10%  sidewall angle>80

表 3.2 32 奈米線幅微影模擬各項參數

透射度(T)	相位差( $\phi$ )	散條會自身成像的間距(nm)	透射度(T)	相位差( $\phi$ )	散條會自身成像的間距(nm)
0.1	10	180-260	0.2	10	190-230
	20	180-260		20	190-230
	30	180-270		30	190-230
	40	180-270		40	190-240
	50	180-280		50	190-250
0.3	10	200-210	0.4	10	沒有
	20	200-210		20	沒有
	30	190-220		30	沒有
	40	190-220		40	200-210
	50	190-230		50	200-210

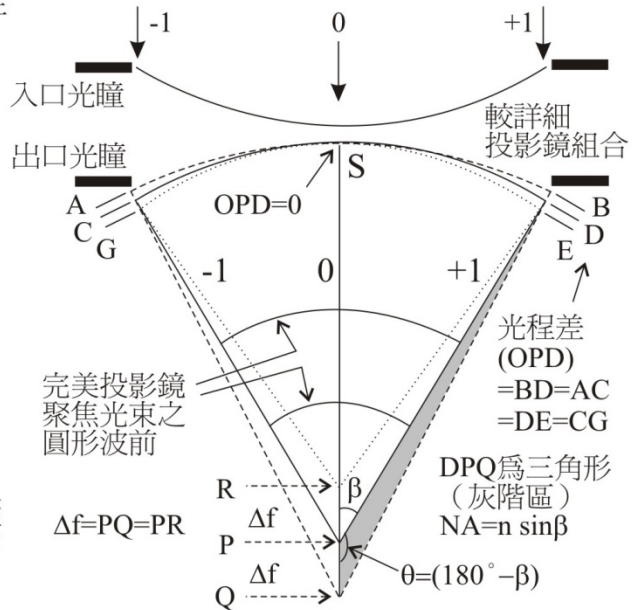
表 4.1 32 奈米線幅，加入散條後，固定散條寬度 32 奈米，在各種透射度與相位差散條自身成像的間距

(a) 二獨立光束各自經寬度 $d$ 之狹縫  
(非經圖罩產生之繞射光束)  
 $\sigma \rightarrow \infty$ , 相位獨立, 具空間不同調性  
無干涉



〈狹縫借用瑞利規範〉  
投影鏡之NA較小  
主極大與鄰峰第一極小重合  
如二繞射峰距離 $<R$ 即無法解像  
二狹逢中心距離 $b$ 為解像極限

(b) 同一點光源經圖罩、後聚焦鏡產生之繞射光束  
 $\sigma \rightarrow 0$ , 相位同調, 具空間同調性, 干涉甚強



由P下移至Q, 希望ASB, 實際仍為CSD  
CP=SP=DP, AQ=SQ=BQ, DP> $\gg$ Δf  
OPD=BD=BQ-DQ=(SP+Δf)-DQ=DP+Δf-DQ  
OPD= $\lambda/4$ 或相位差 $\Delta\phi=\pi/2$ 或 $90^\circ$ 時  
SQ與DQ正交, 二光束無干涉, 如同相位獨立  
成像品質劣化, 為離焦極限  
已知NA $\rightarrow 0$ ,  $\beta \rightarrow 0$ , OPD $\rightarrow 0$ ,  $\Delta f \rightarrow \infty$

真空中繞射焦深DOF= $\pm\Delta f=2\Delta f$   
光程差為 $\lambda/4$ 之相位同調二光束=相位獨立二光束  
由(a)與(b)可導出相同結果, 世界真奇妙!

$$\text{極限}\Delta f = \frac{\lambda}{2 \sin^2 \beta}$$

(c) 〈狹縫借用瑞利規範〉相位「同調」二繞射峰之干涉, 僅繪出甲、乙二極大間之變化

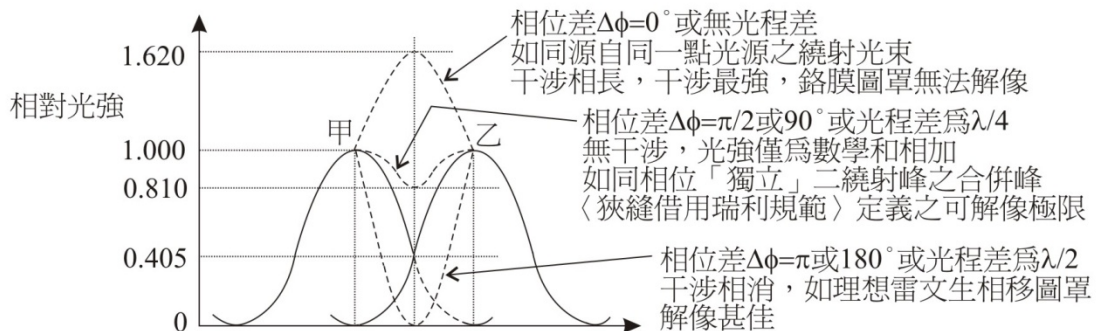
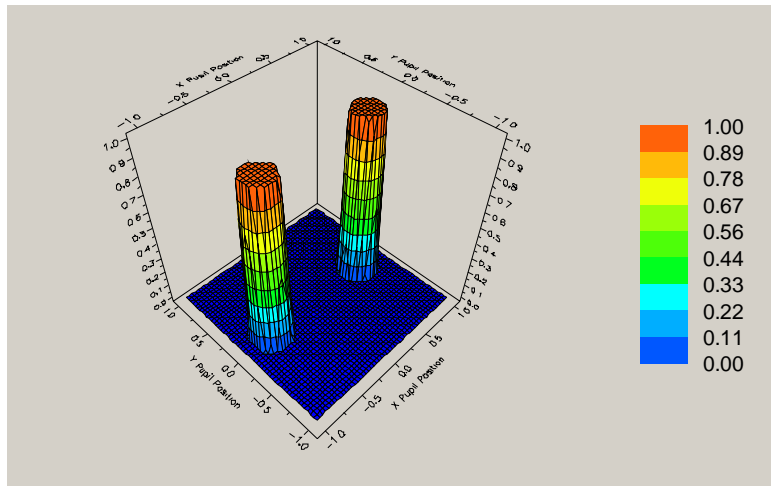
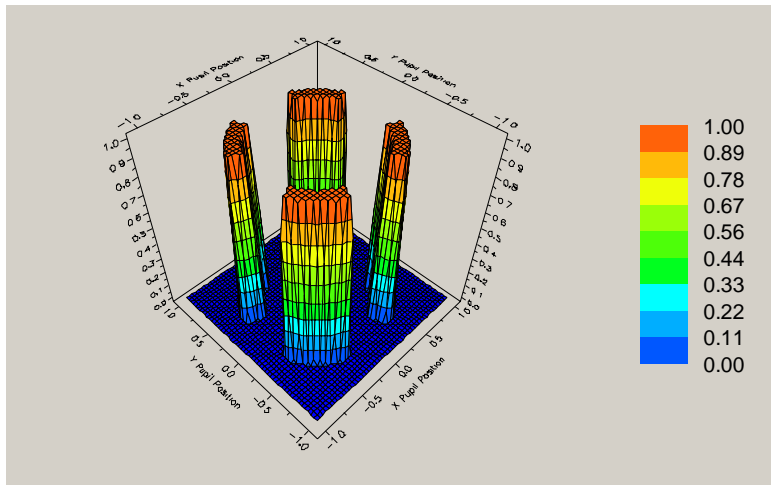


圖 2.1 解像度與焦深

(A) Dipole



(B) Quasar



(C) Annular

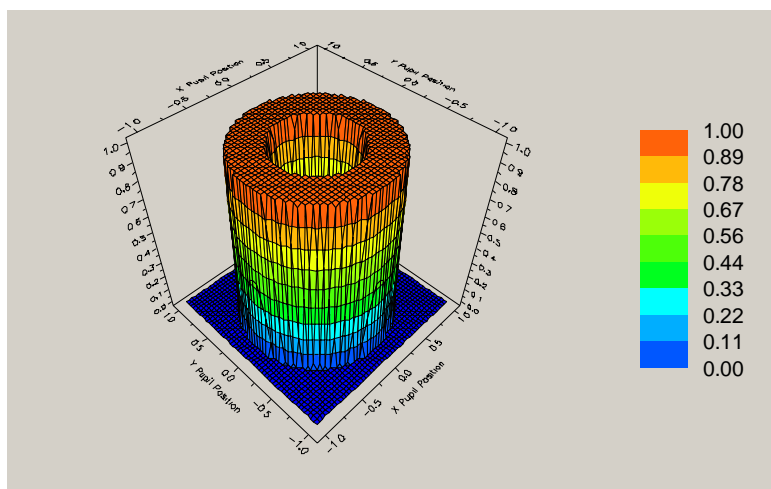
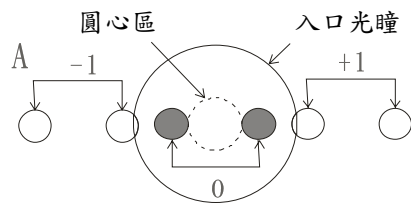
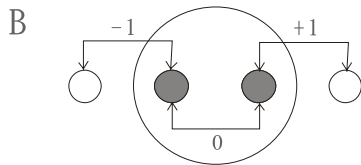


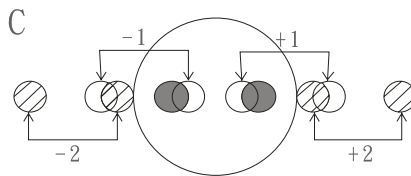
圖 2.2 本論文中用到偏軸發光各類型



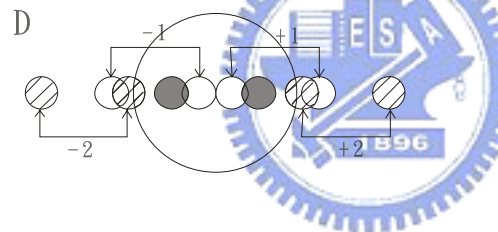
入口光瞳內  
+1,-1 進入  
恰可成像



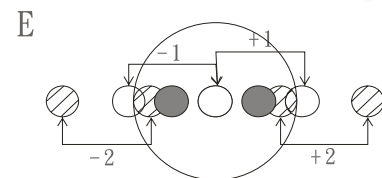
入口光瞳內  
-1,+1 與 0 重疊  
圓心區無 -1,+1



入口光瞳內  
重疊區減少  
-1,+1 進入圓心區



入口光瞳內  
-2,+2 進入  
圓心區 -1,+1 面積達最大



入口光瞳內  
圓心區  
-1,+1 重合  
-1,+1 面積達最小

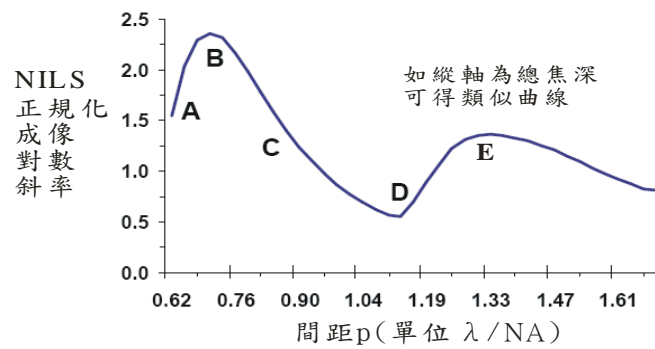
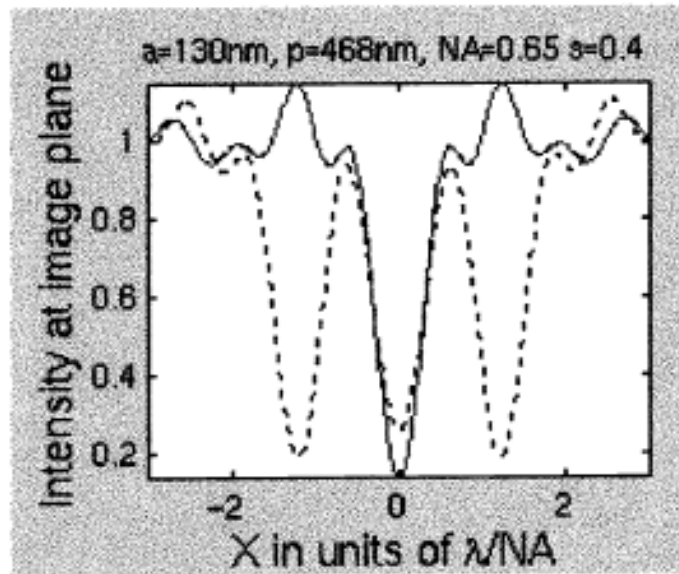


圖 2.3 利用橫雙圓孔探討禁止間距產生的原因



(a)



(b)

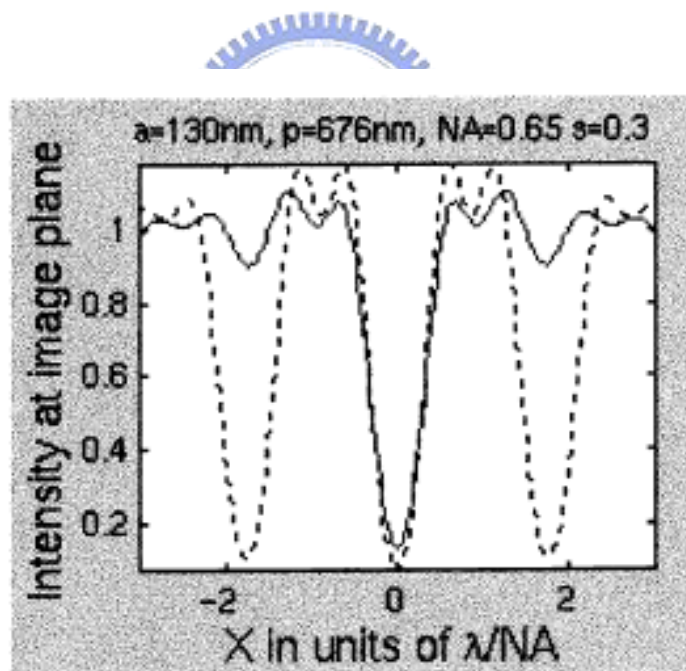
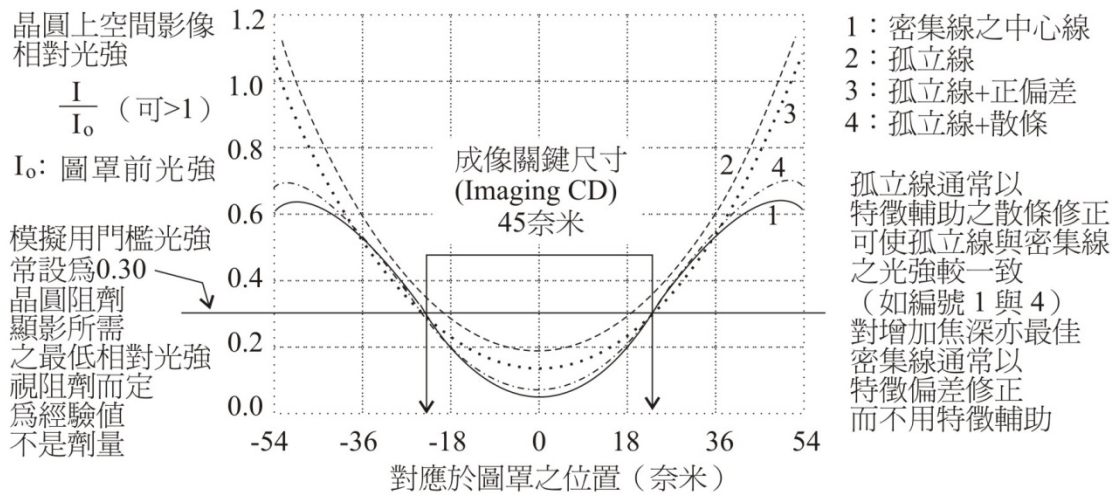


圖 2.4 主線條與旁邊的線條產生干涉(a)同相的建設性干涉；(b)破壞性干涉

(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

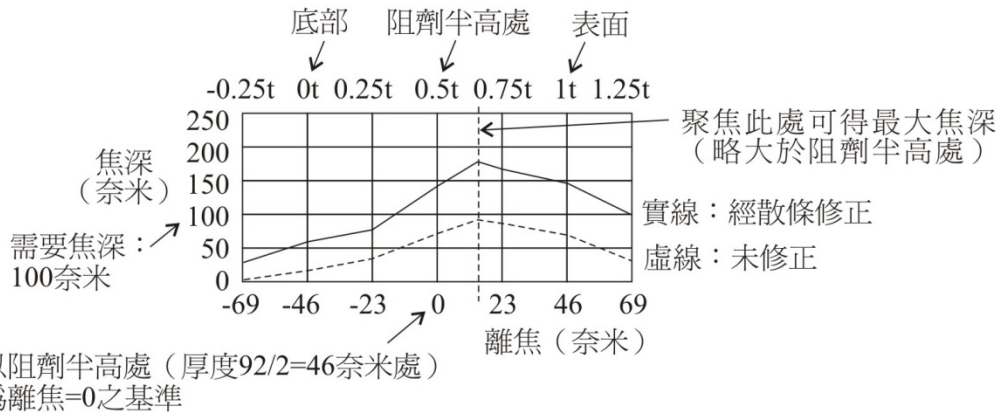
$$\text{阻劑所得劑量}(\text{mJ}/\text{cm}^2) = \text{功率}(\text{mW}/\text{cm}^2) \times \text{時間}(\text{s})$$



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）

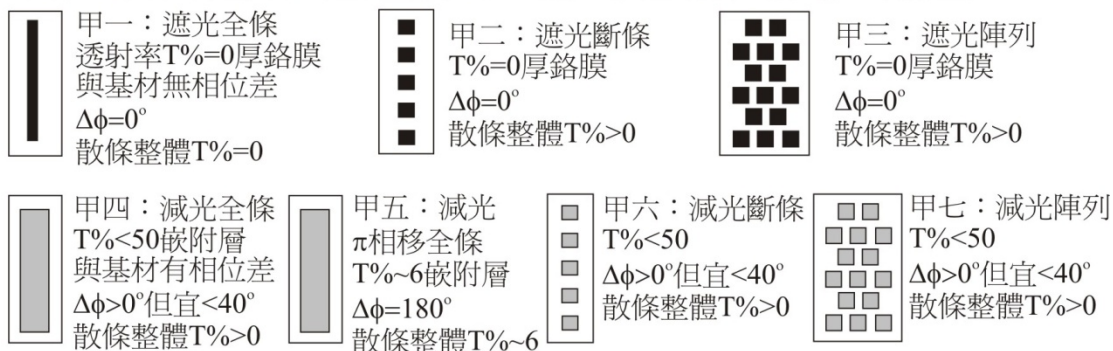


註：需要焦深(Required DOF)包含晶圓平坦度、阻劑平坦度、聚焦誤差等所需之寬容值，  
 晶圓上阻劑厚度宜略低於需要焦深，以確保阻劑成像品質

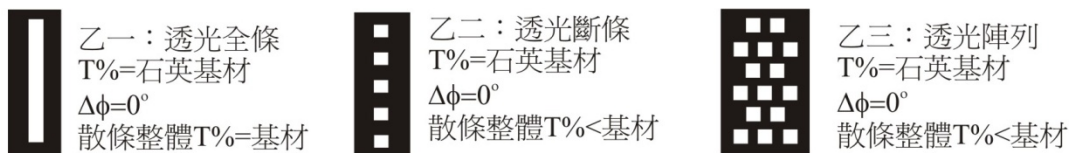
圖 2.5 偏差法與散條修正前後空間影像圖與離焦對焦深的影響

(a) 各式散條示意圖

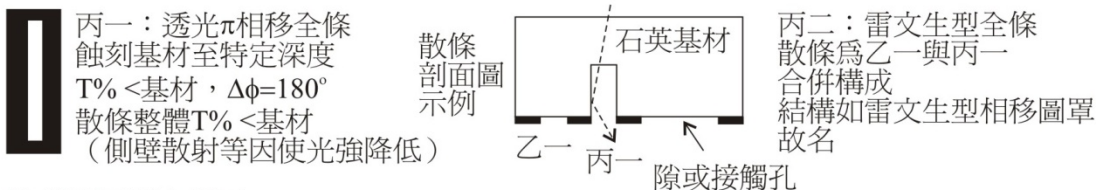
甲類：適用於明場圖罩（基材為石英），功能為對主暗紋「減光」，目前主流



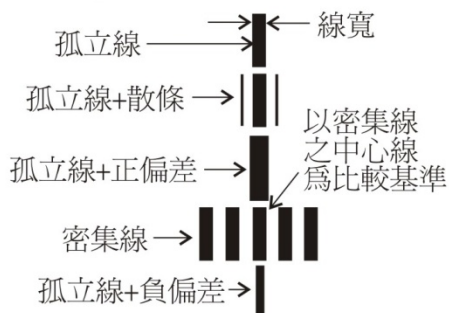
乙類：適用於暗場圖罩或相移圖罩，功能為對主亮紋「增光」，故亦稱「反式散條」



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

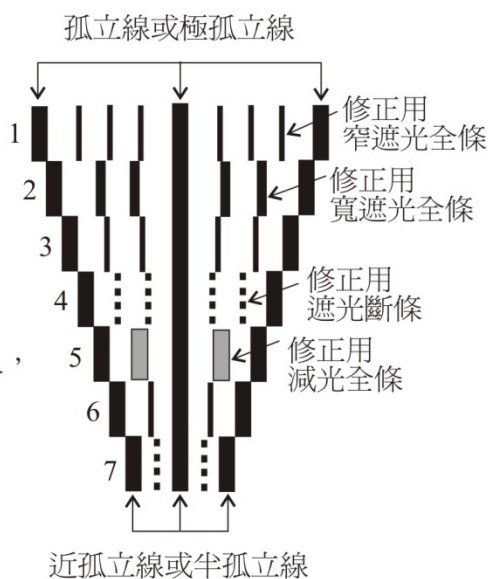
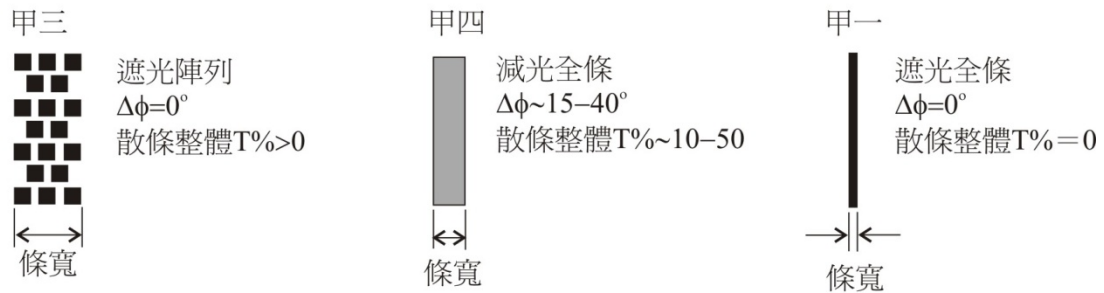


圖 2.6 散條的種類與修正情形

(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



優點：  
 條寬最寬、無相位差  
 缺點：  
 條寬最寬之優點為假象  
 精密蝕刻陣列圖案困難  
 32奈米節點時  
 可能已達蝕刻極限

優點：  
 條寬中等、製備較易  
 32奈米節點時尚未達製備極限  
 缺點：  
 須有適當嵌附層材料  
 有相位差 $\Delta\phi$   
 $\Delta\phi>40^\circ$ 可能降低成像品質

優點：  
 無相位差  
 缺點：  
 條寬最細  
 32奈米節點時  
 可能已達製備極限

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

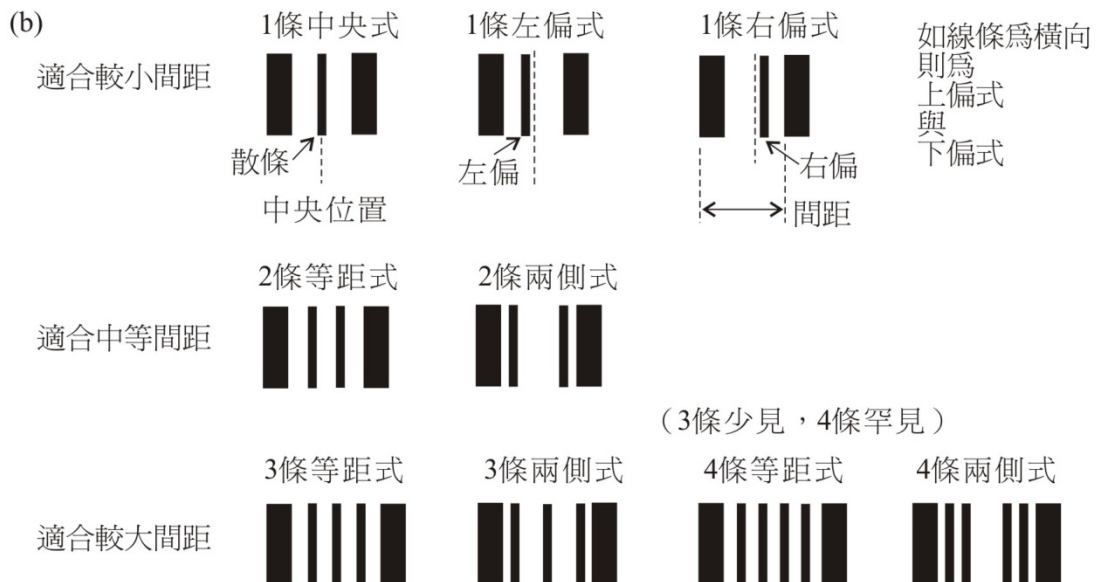
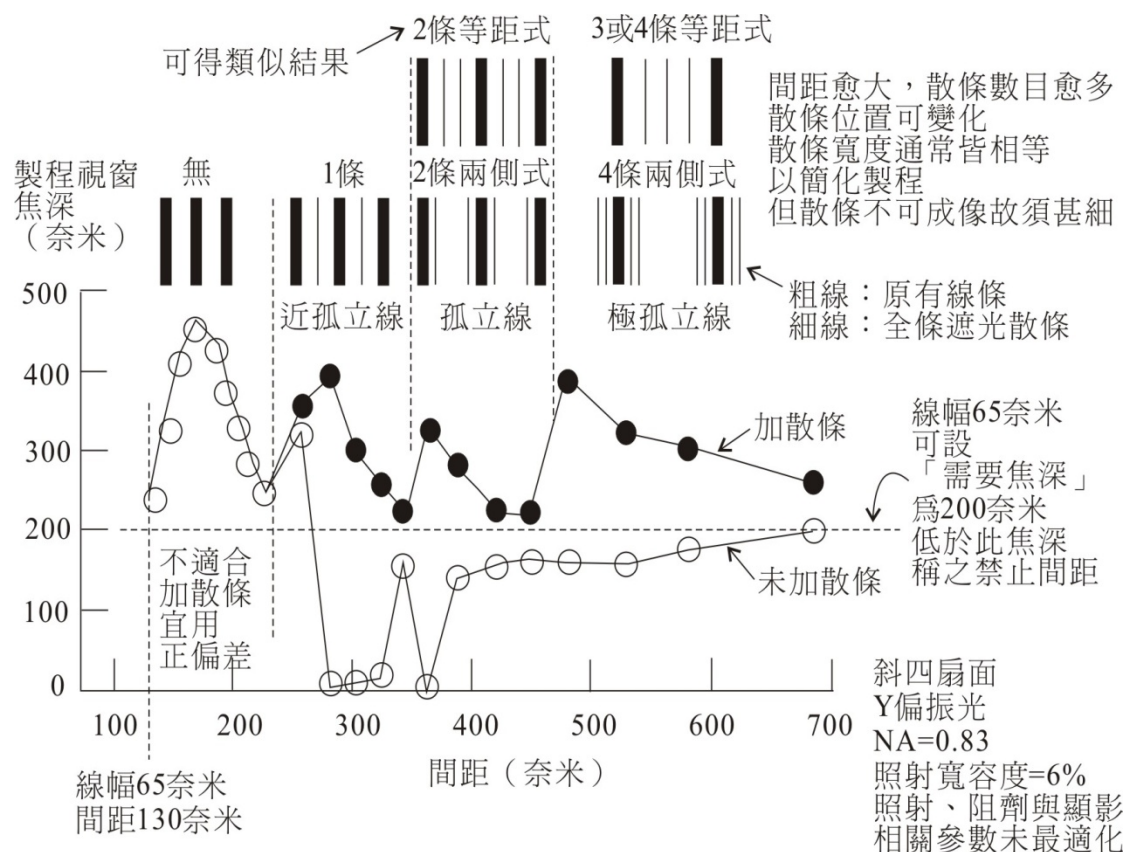


圖 2.7 各式散條的特色與其放置位置





註：「需要焦深」大於「真空中繞射焦深」  
 線幅45奈米可設「需要焦深」為150奈米  
 線幅32奈米可設「需要焦深」為100奈米

圖 2.8 禁止間距修正前後

### 第三章

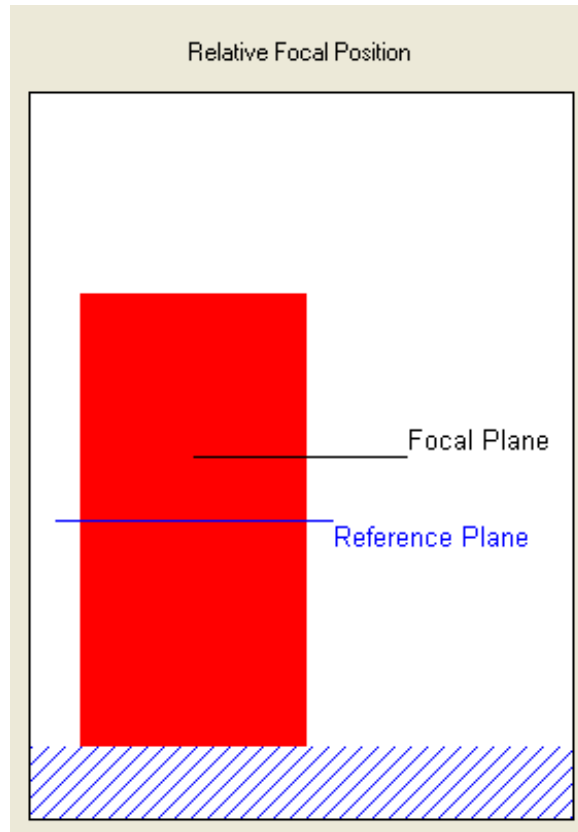
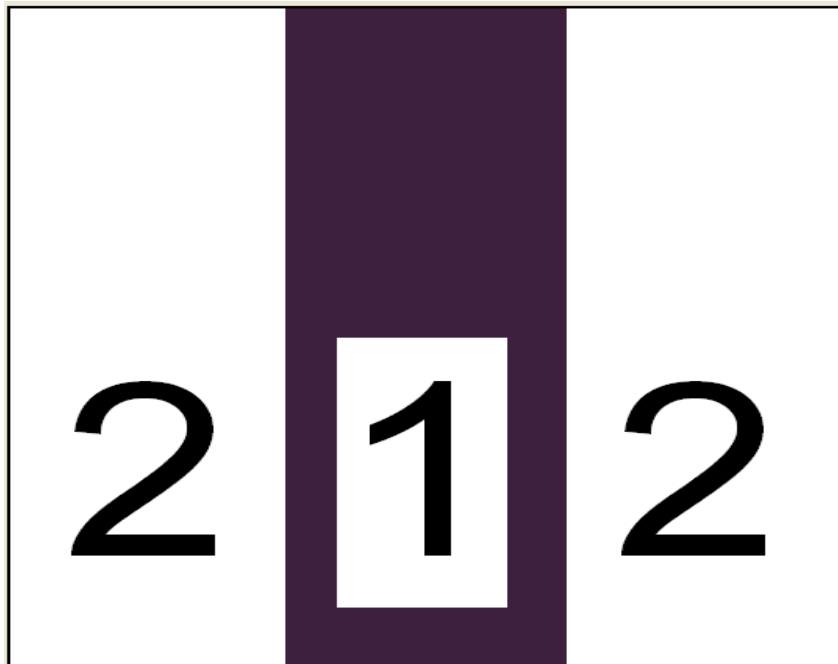


圖 3.1 聚焦面的定義

(a)



(b)

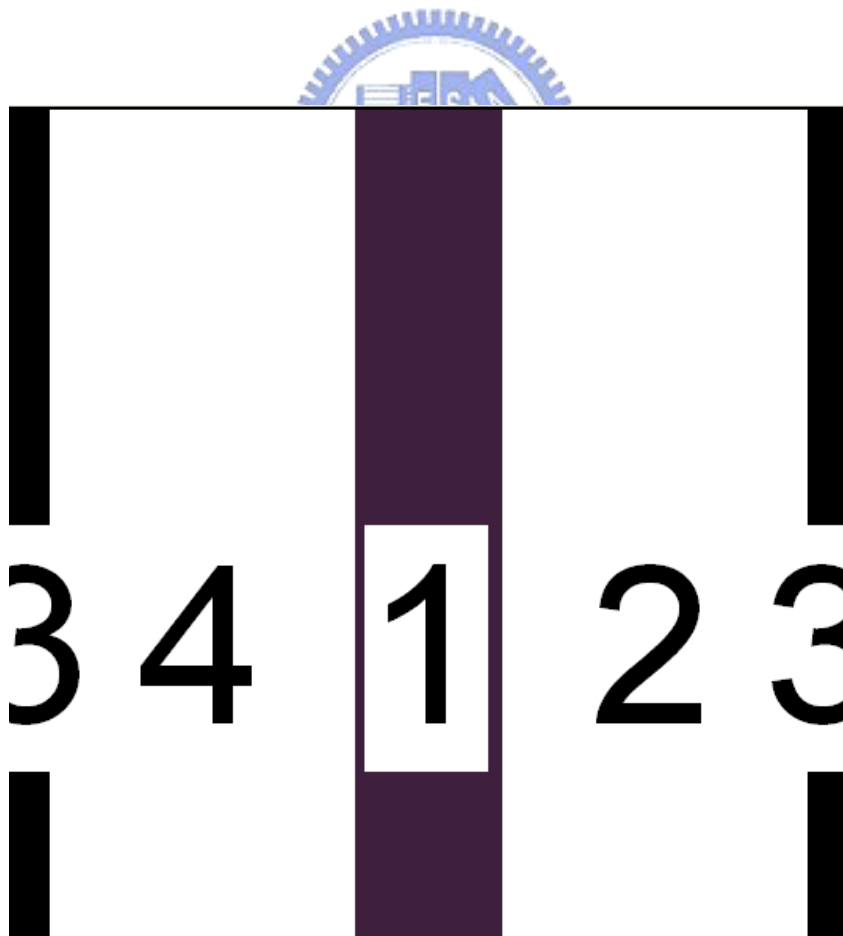


圖 3.2 線條的設計(a)未加散條；(b)加入單一散條



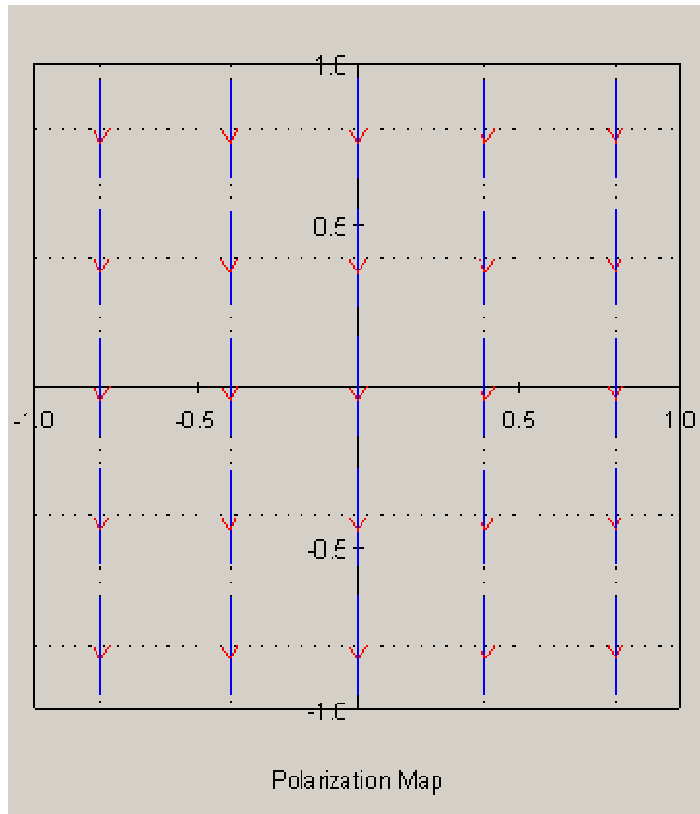


圖 3.3 Y 線性偏振光

Custom #1

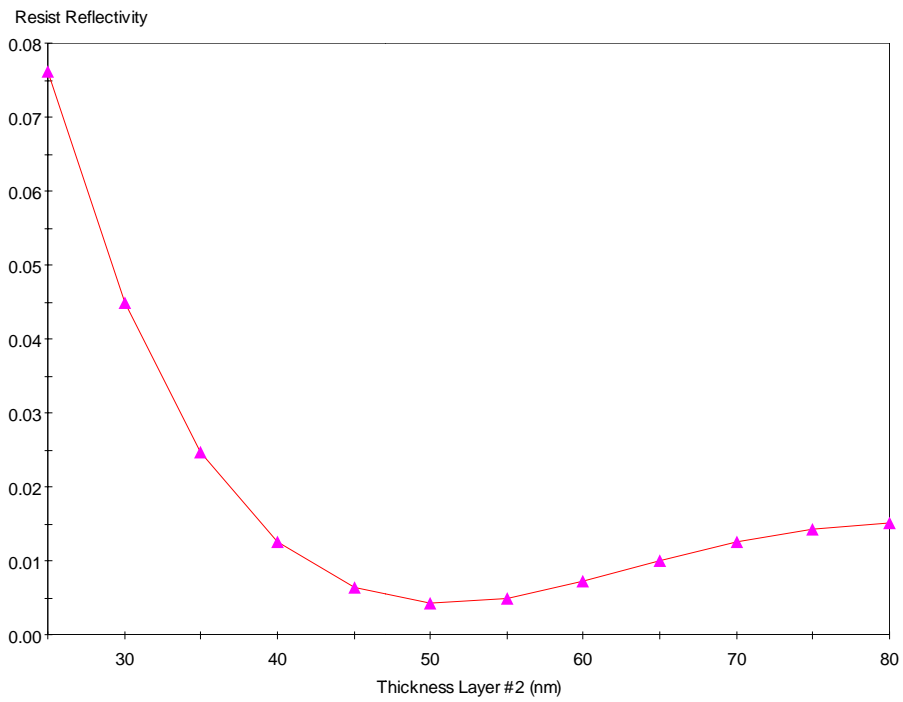


圖 3.4 45 奈米抗反射層厚度的選擇

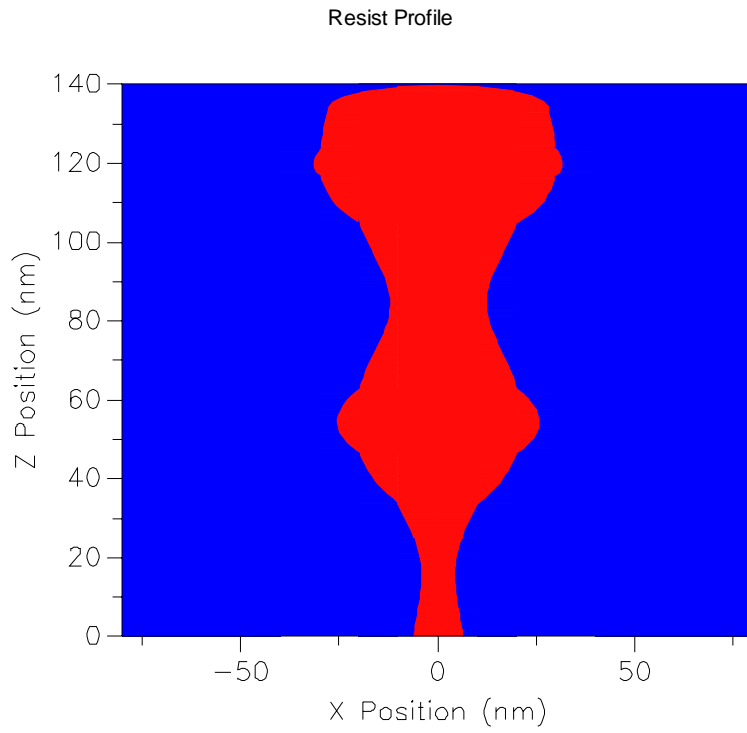


圖 3.5 底層抗反射層使用前

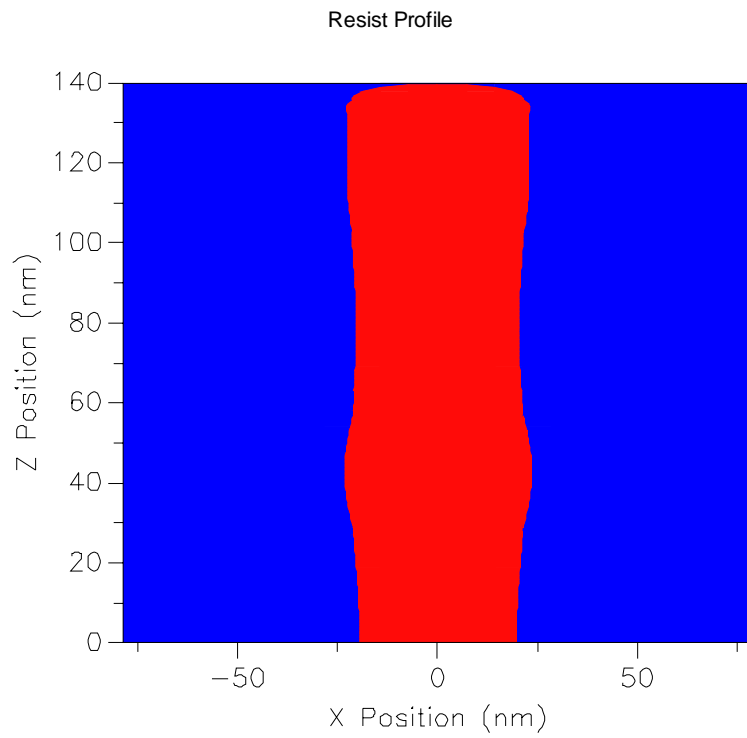
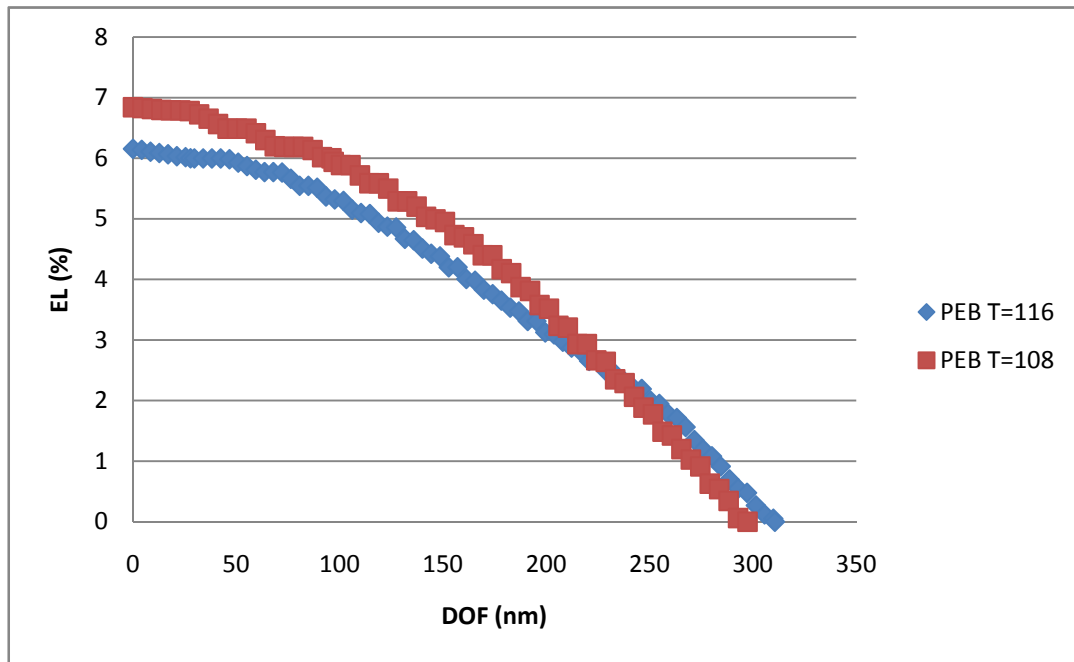


圖 3.6 底層抗反射層使用後

(a)



(b)

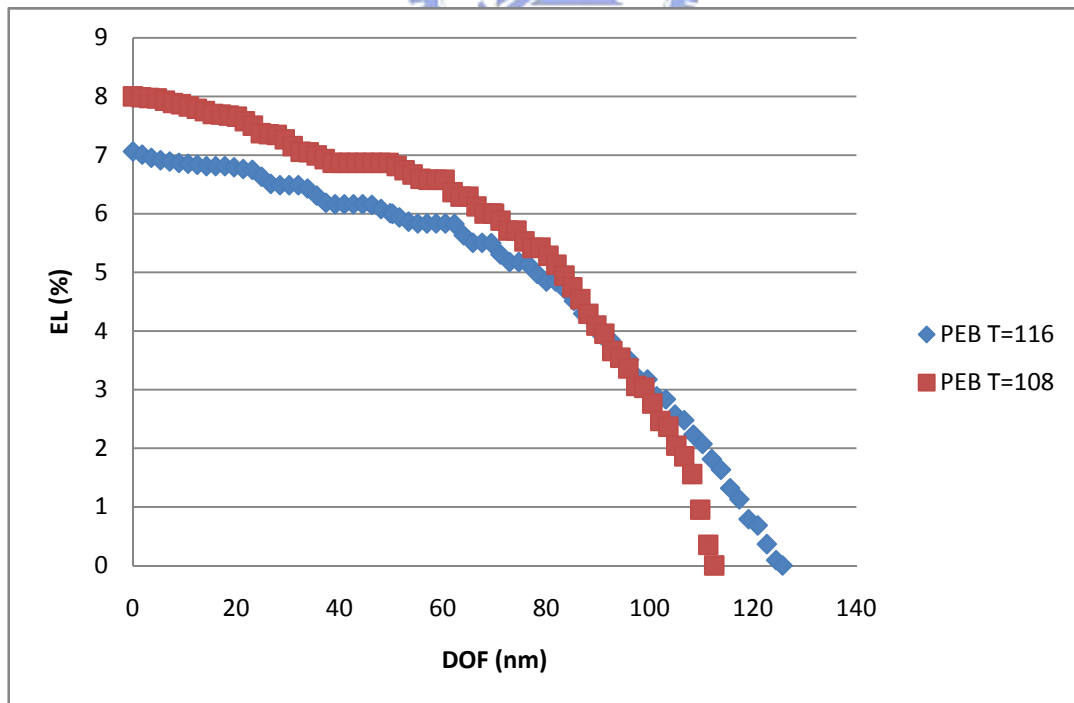


圖 3.7 照後烤溫度改變對 EL 與焦深的影響。(a) 密集線；(b) 半孤立線

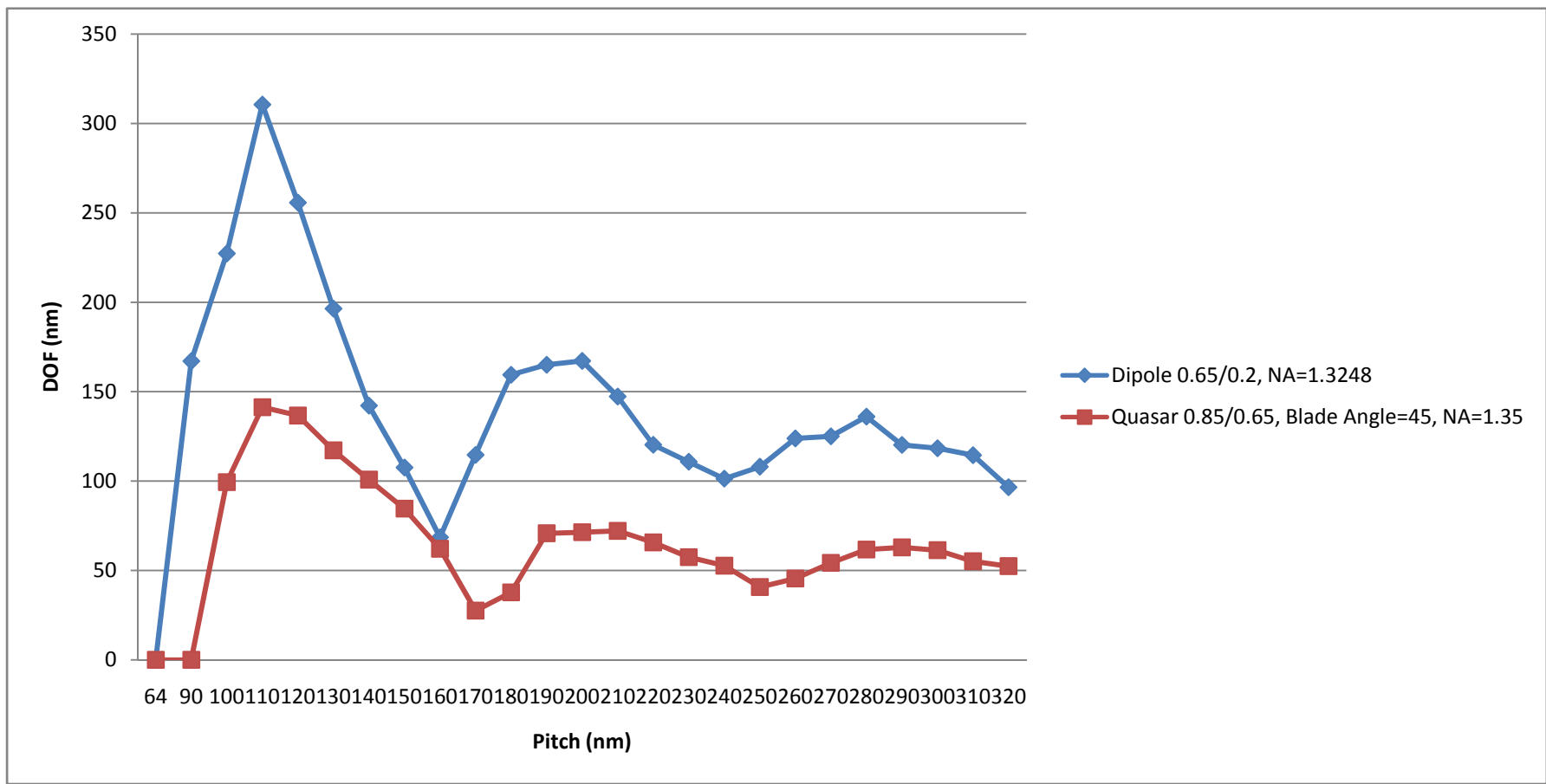


圖 4.1 32 奈米線幅，偏軸發光 Dipole 與 Quasar 對焦深與間距的影響

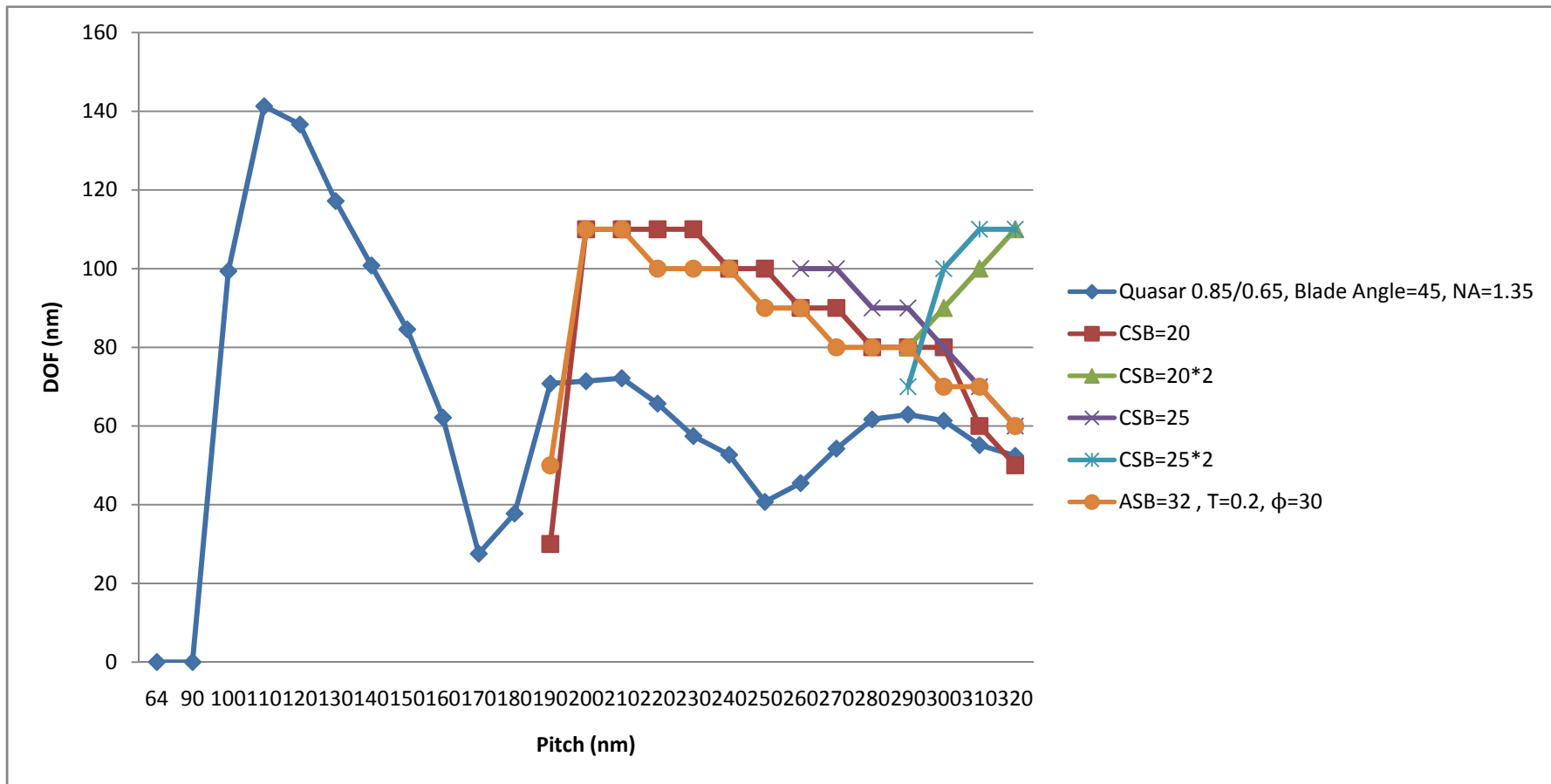


圖 4.2 32 奈米線幅，Quasar  $\sigma_{outer}=0.85$ 、 $\sigma_{outer}=0.65$ 、Blade Angle=45、NA=1.35，Y 線性偏振光，6%減光型相移

圖罩，其焦深與間距的關係

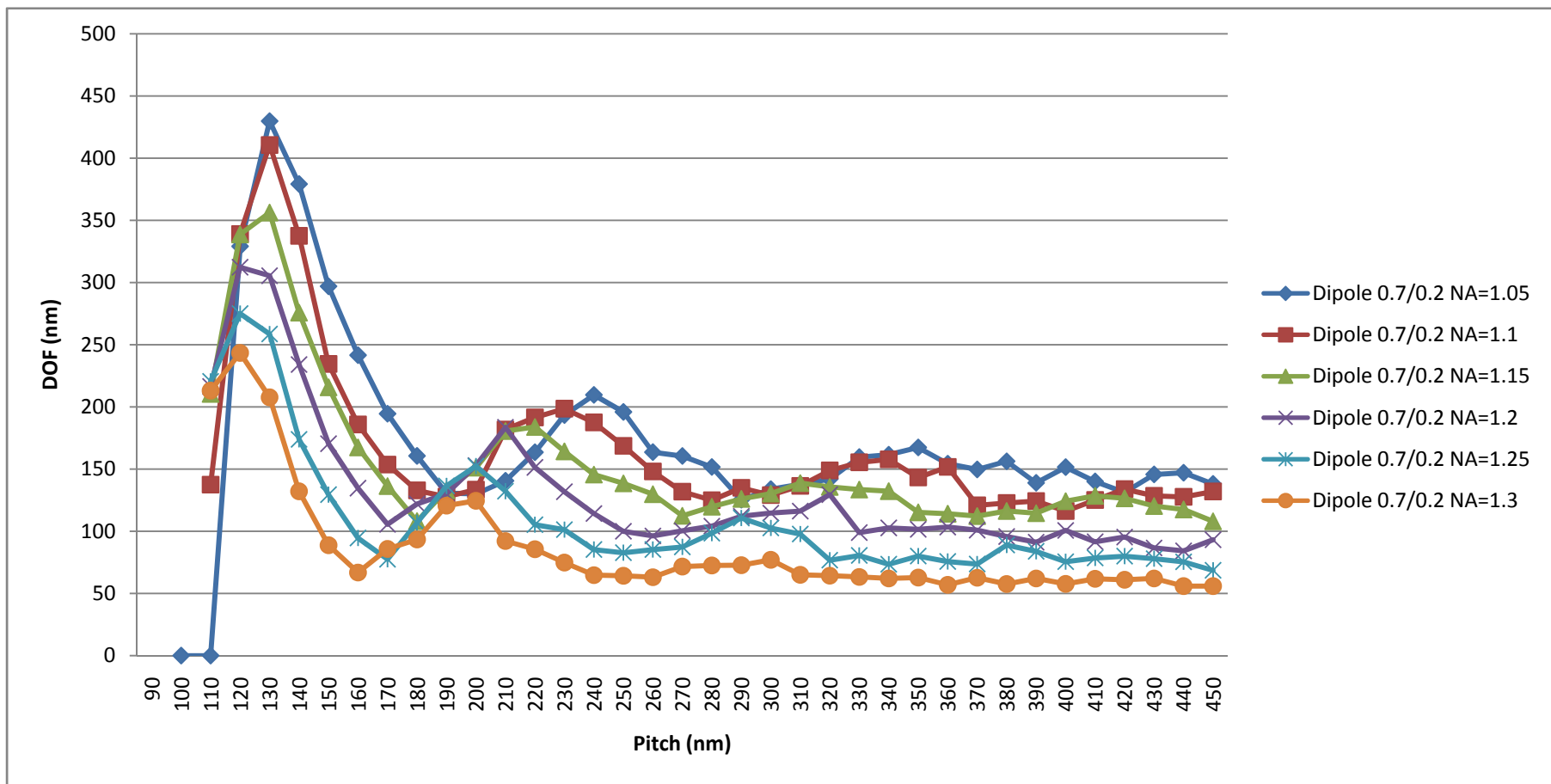


圖 4.3 45 奈米線幅，Dipole  $\sigma_{center}=0.7$ 、 $\sigma_{radius}=0.2$ ，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同 NA，對間距與焦深的影響

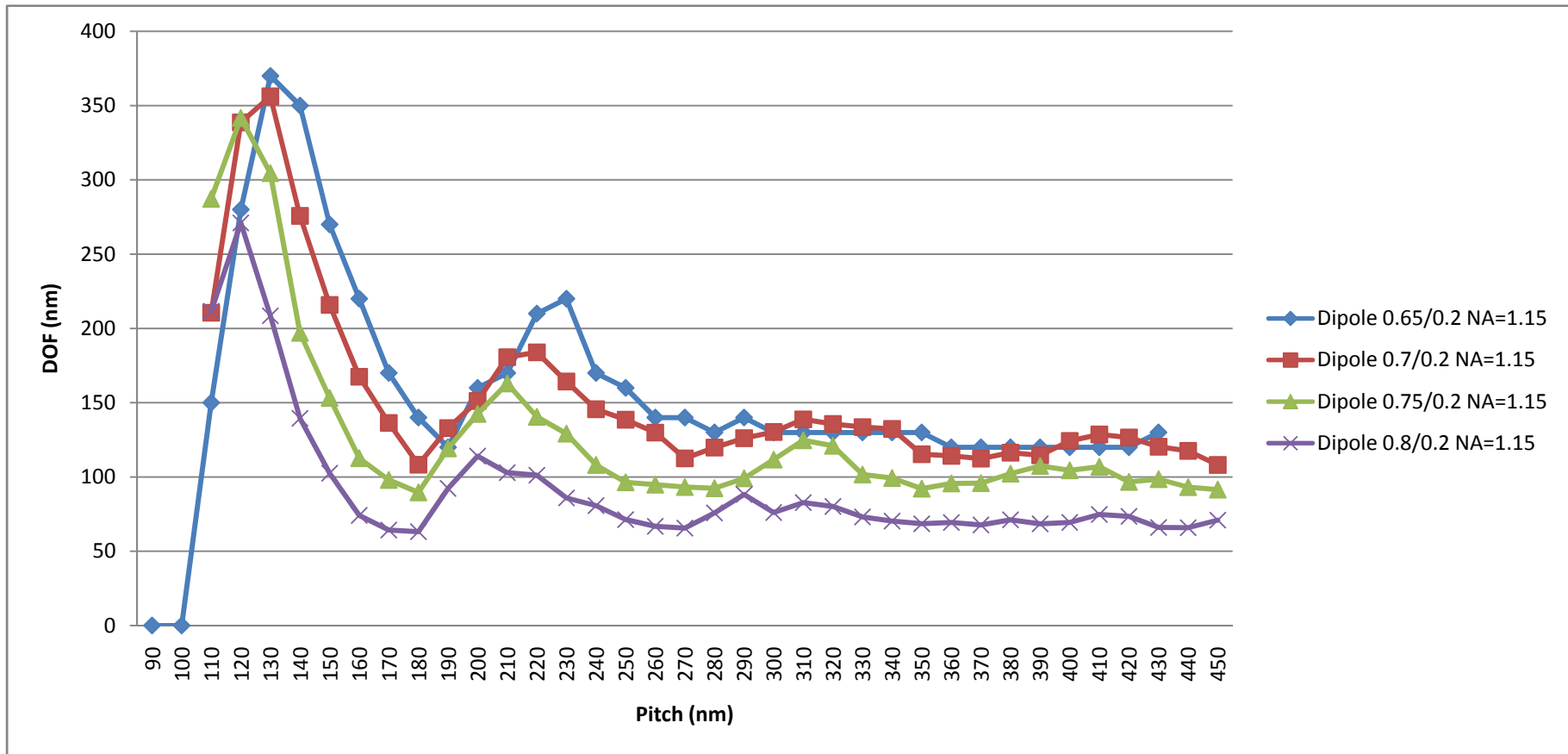


圖 4.4 45 奈米線幅 Dipole、 $\sigma_{radius}=0.2$ 、 $NA=1.15$ ，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同  $\sigma_{center}$ ，對間距與焦深的影響



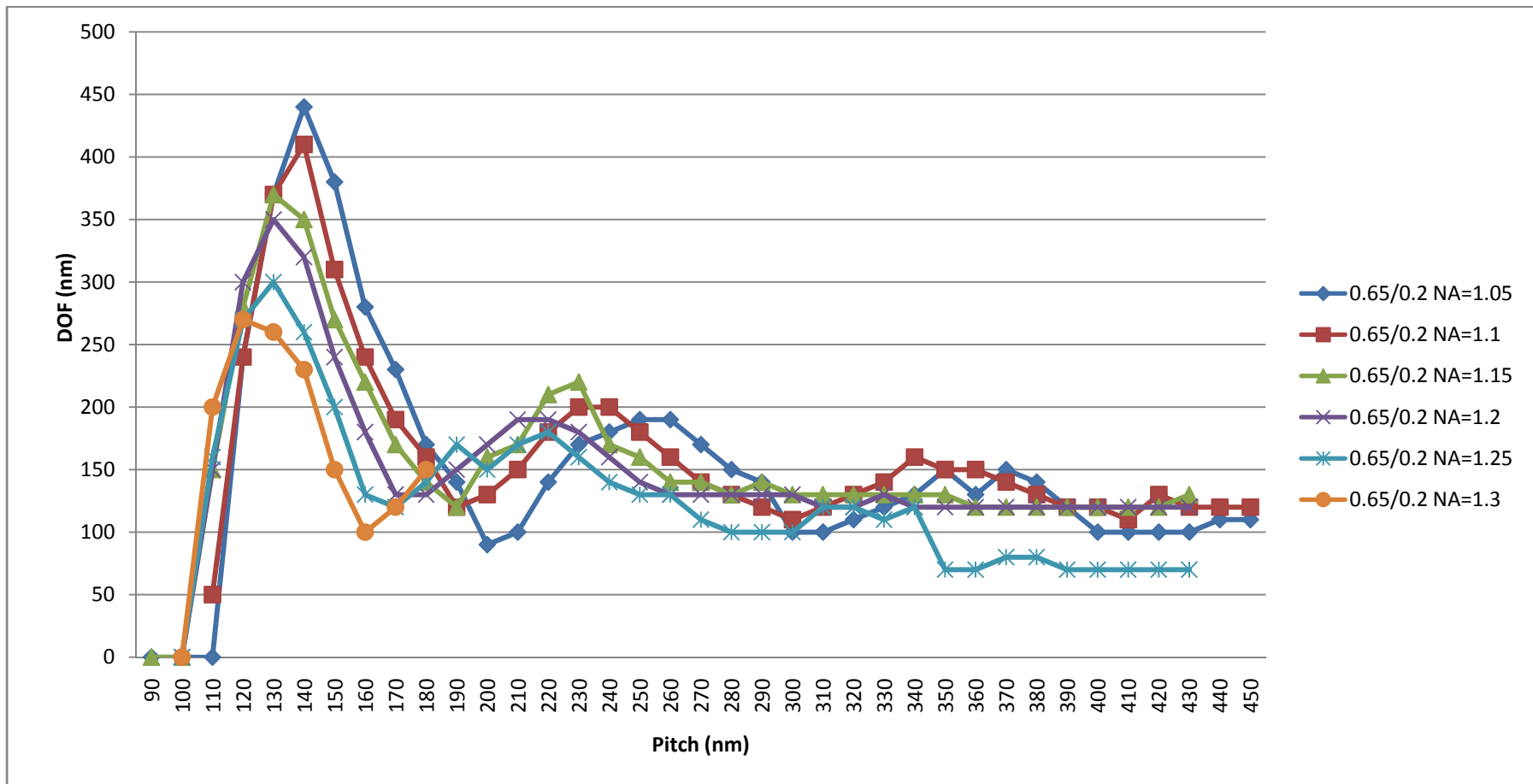


圖 4.5 45 奈米線幅，Dipole  $\sigma_{center}=0.65$ 、 $\sigma_{radius}=0.2$ ，Y 線性偏振光，6%減光型相移圖罩，在不同 NA，對間距與焦深的影響

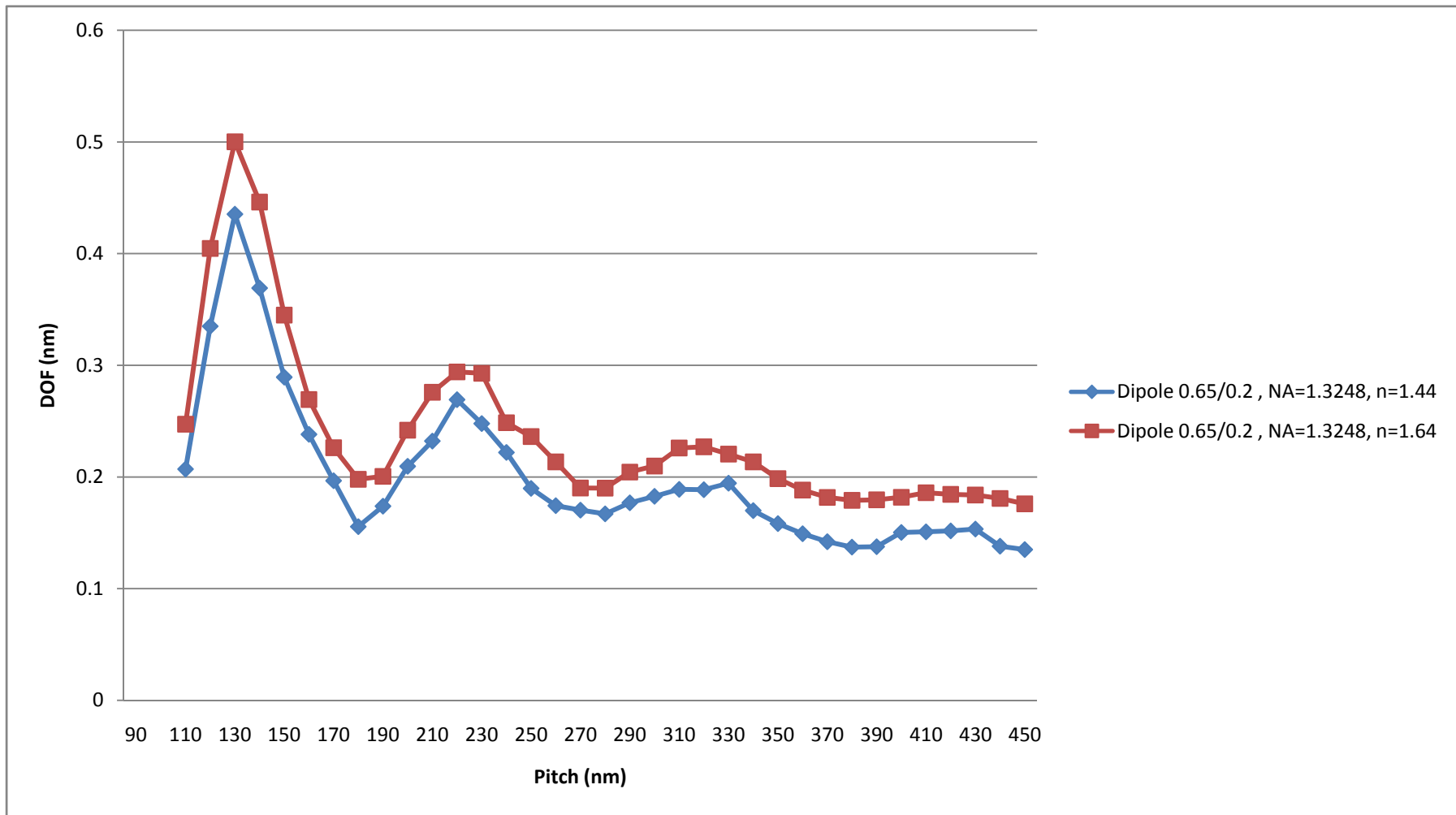


圖 4.6 45 奈米線幅，杜邦二代濕浸式液體  $n=1.64$  與純水  $n=1.44$ ，對焦深與間距的影響

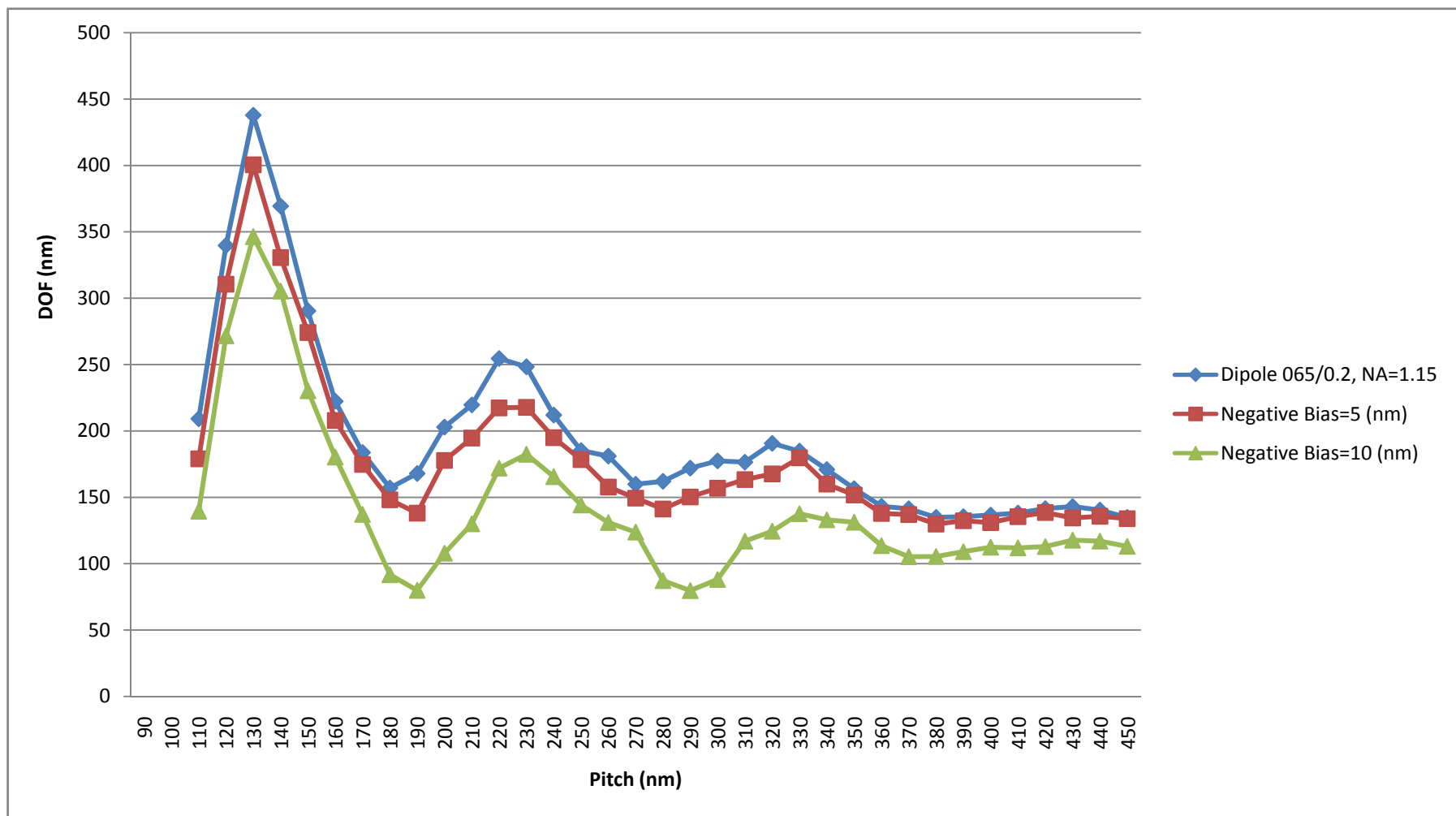


圖 4.7 45 奈米線幅，負偏差對焦深與間距的影響

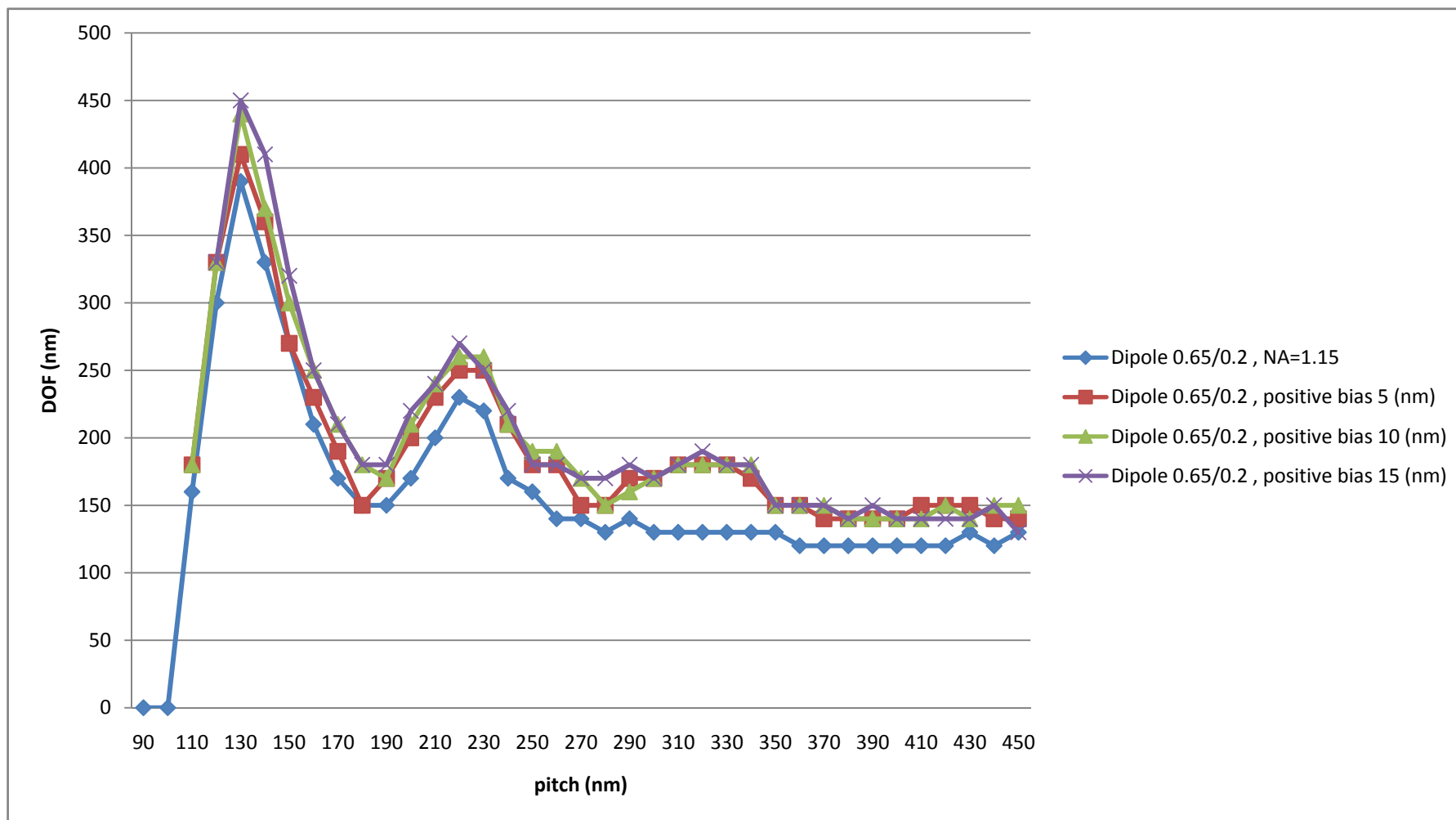


圖 4.8 45 奈米線幅，正偏差對焦深與間距的影響

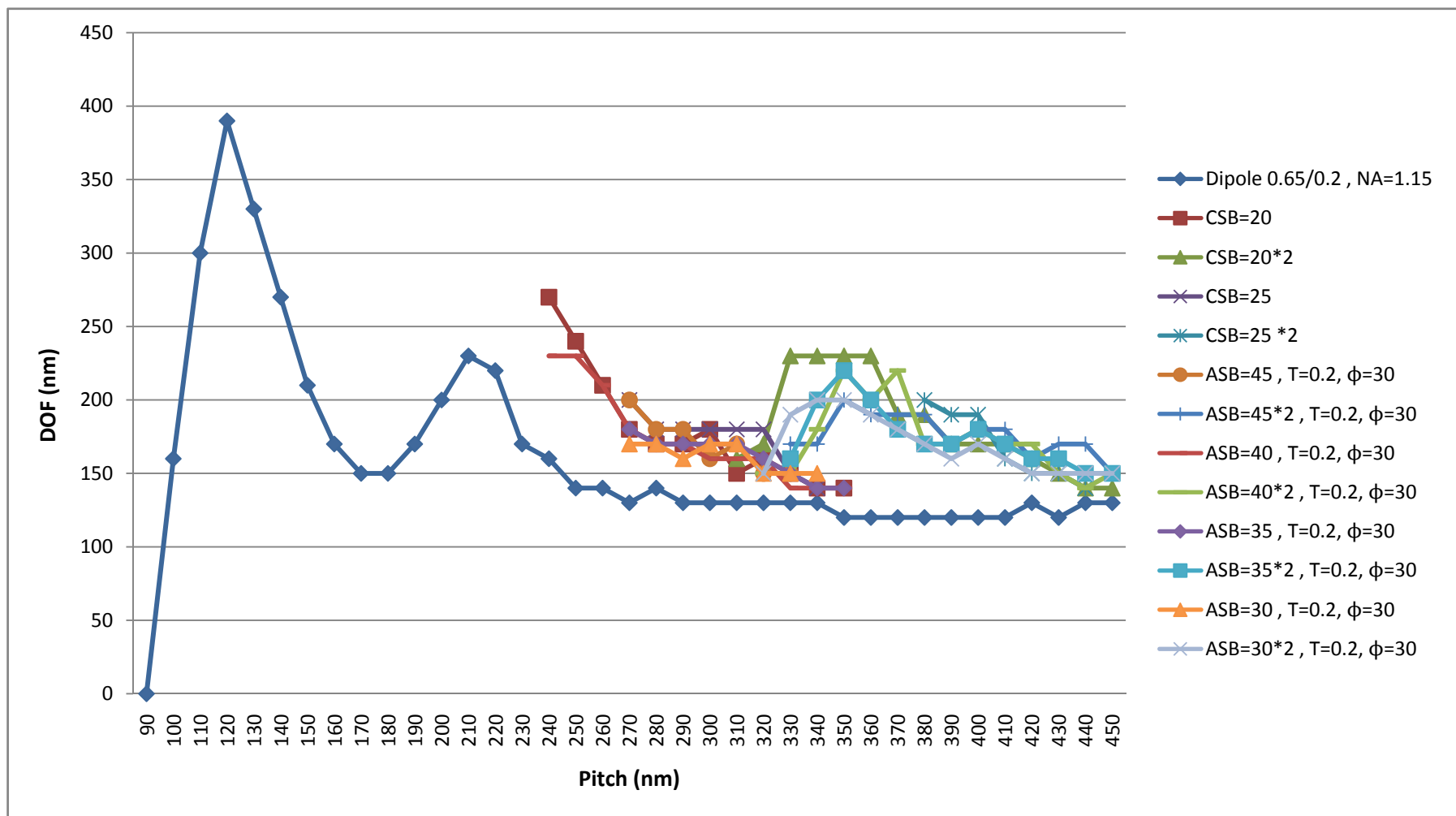


圖 4.9 45 奈米線幅，在不同劑量下，加入散條後，焦深與間距的關係圖

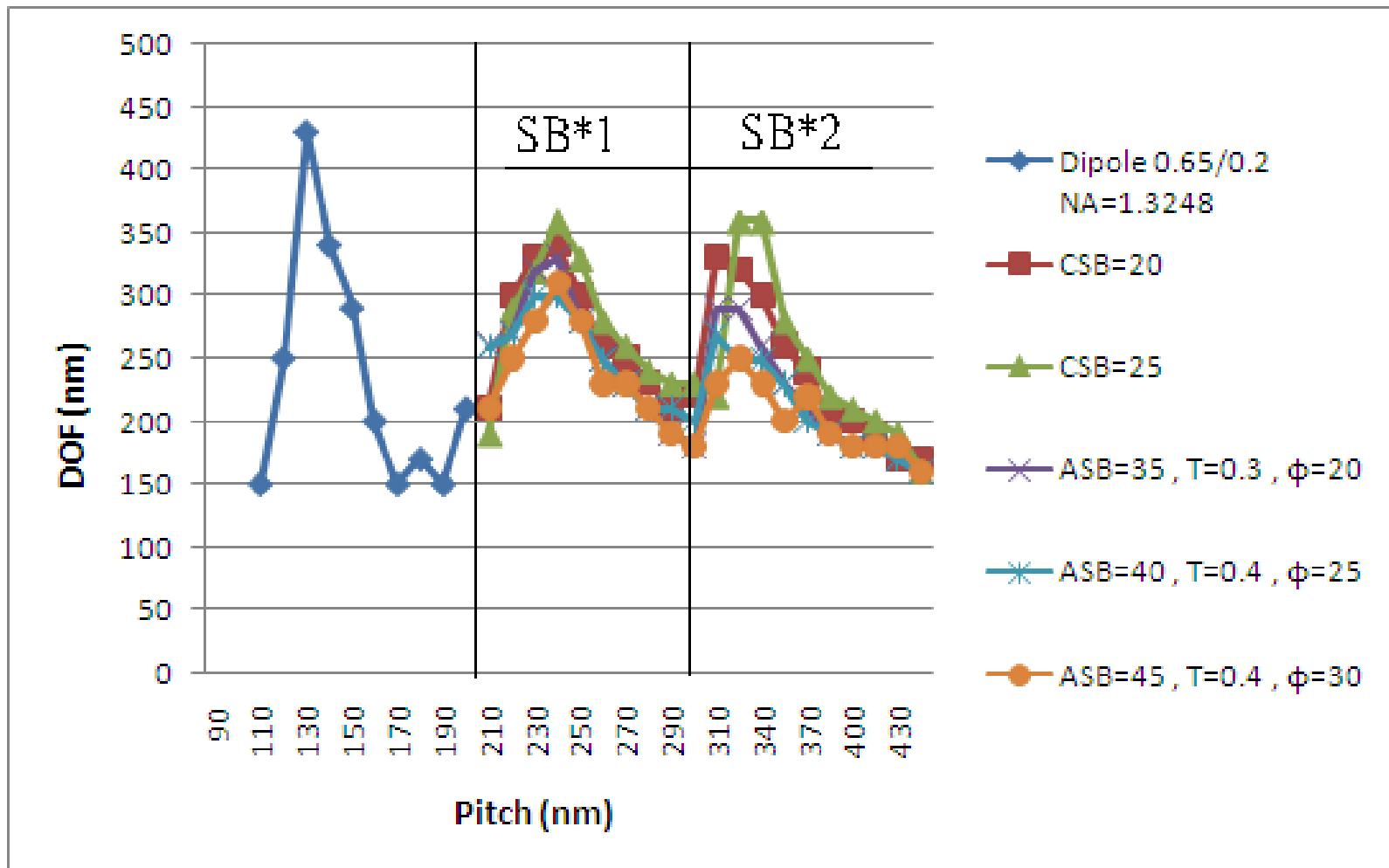


圖 4.10 45 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正後，間距與焦深關係圖

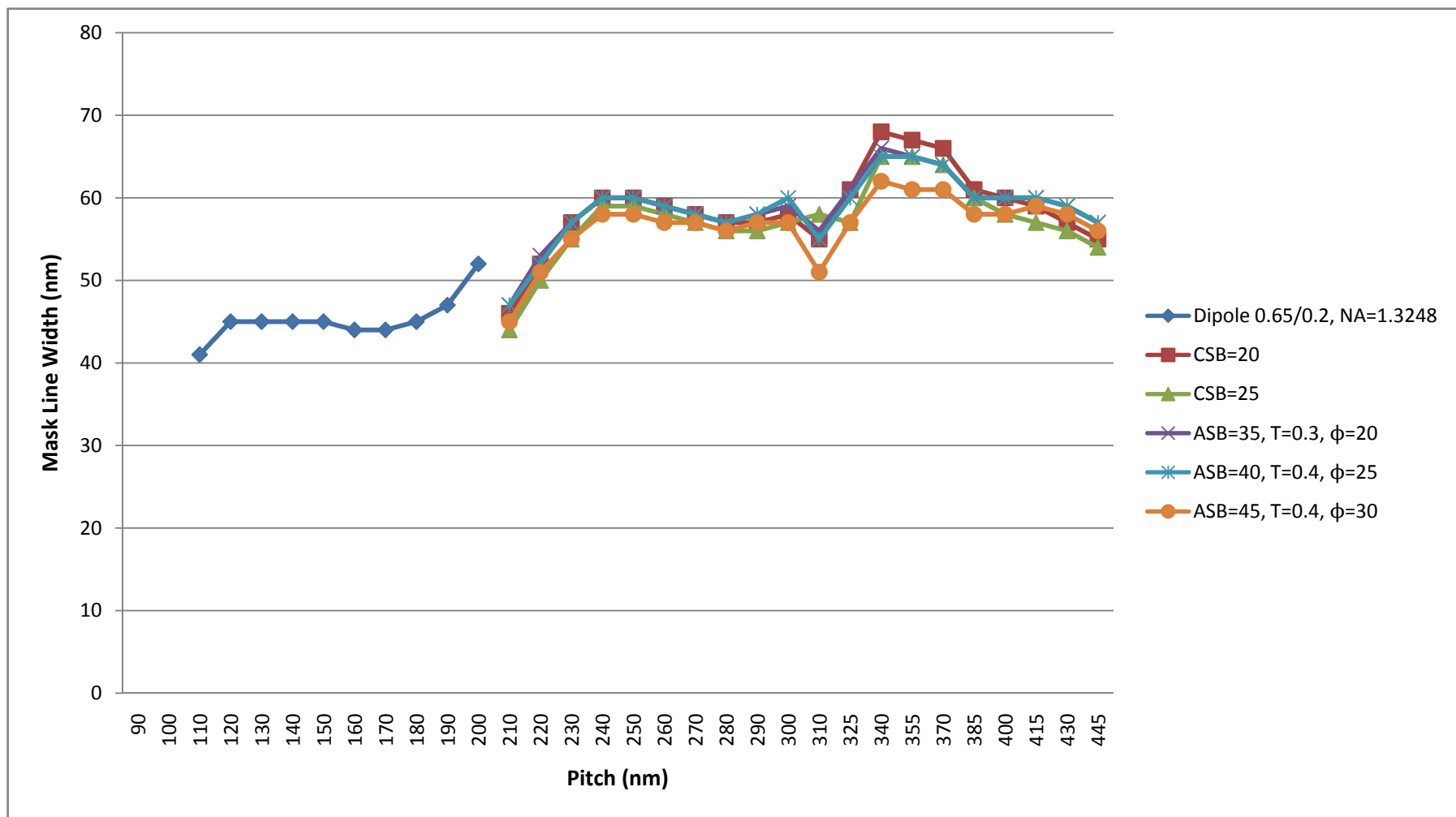


圖 4.11 45 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正所使用之圖罩線幅寬度與間距關係圖



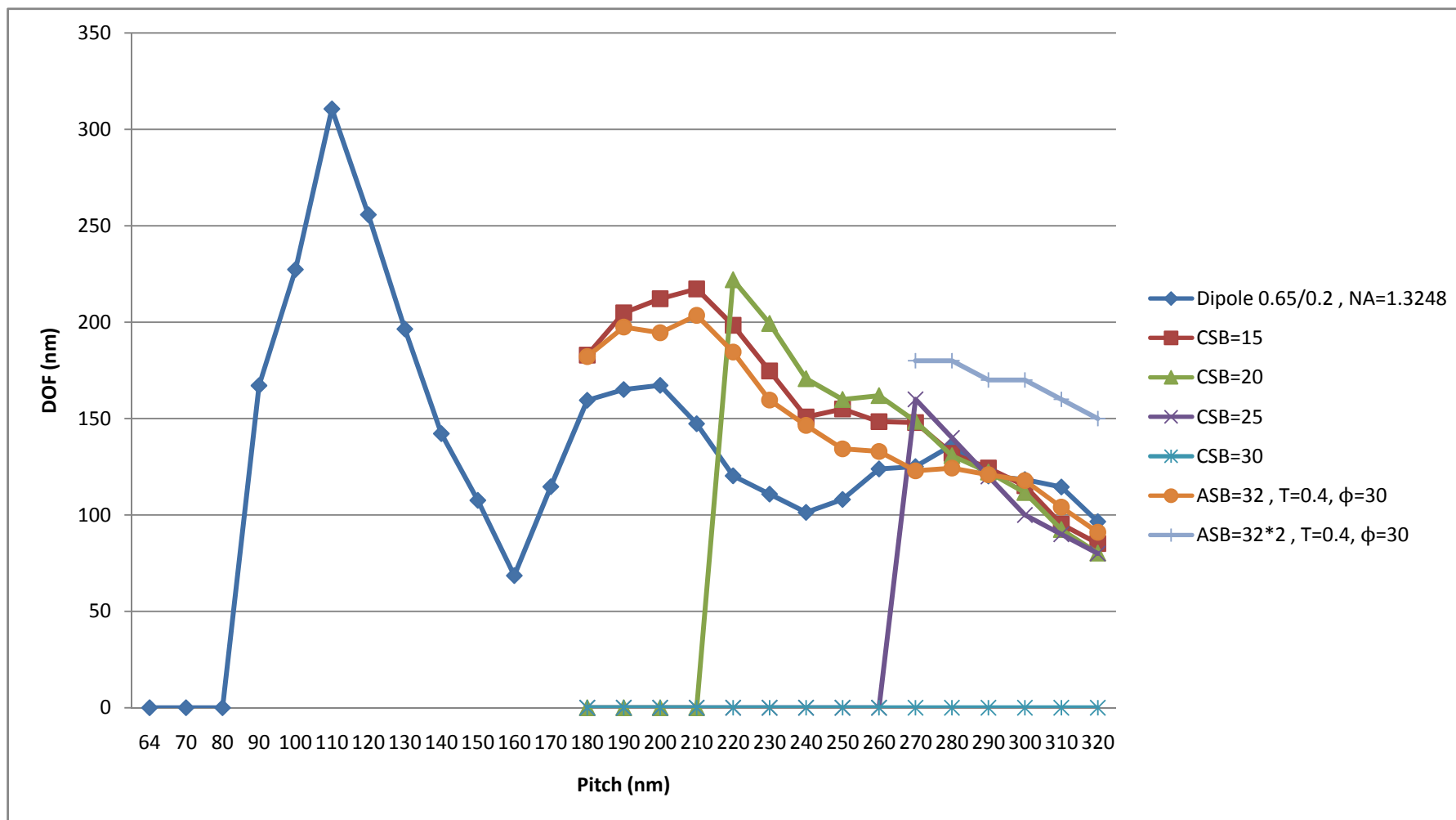


圖 4.12 32 奈米線幅，在不同劑量下，加入散條後，焦深與間距關係圖

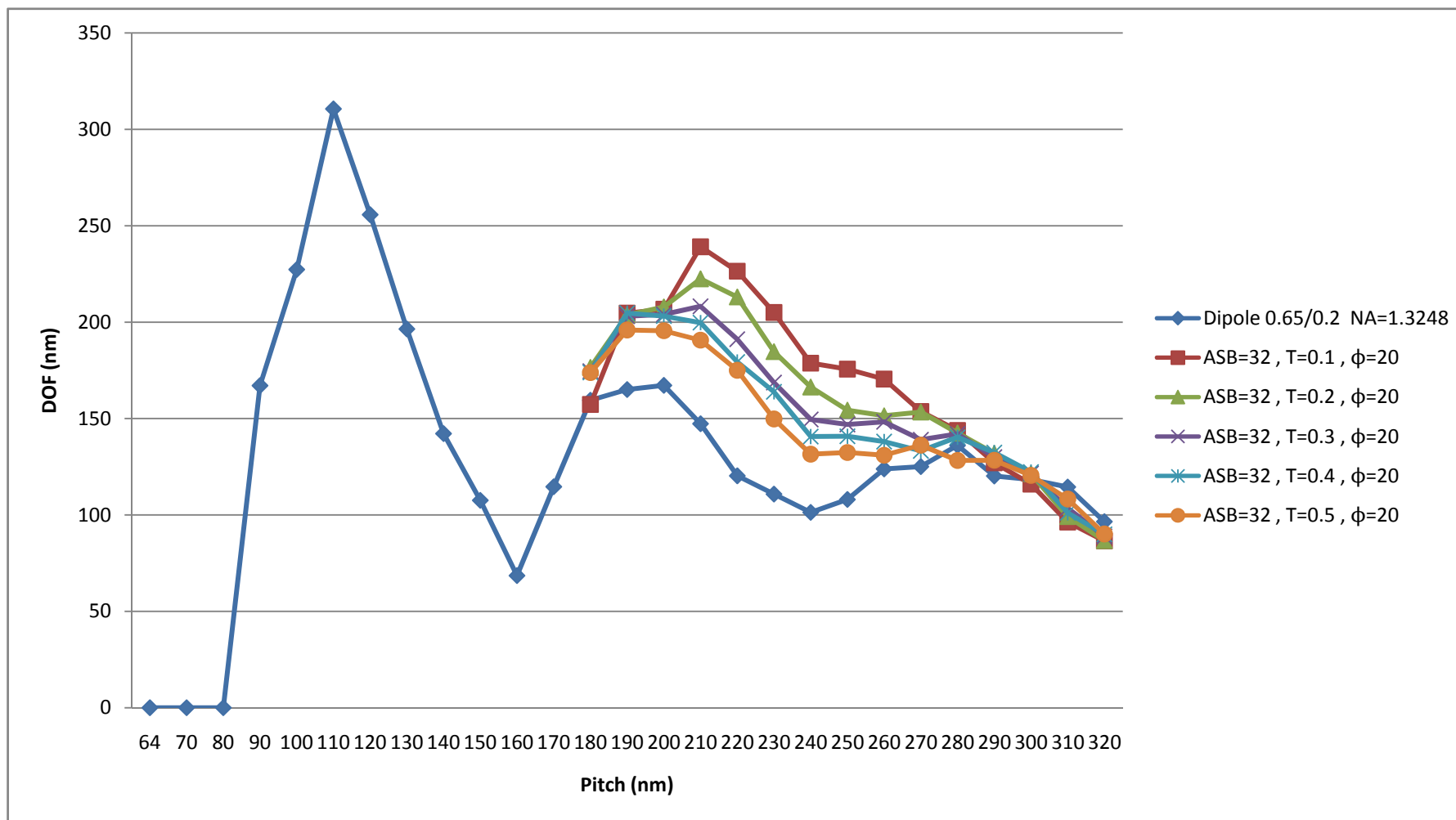


圖 4.13 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=20 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖

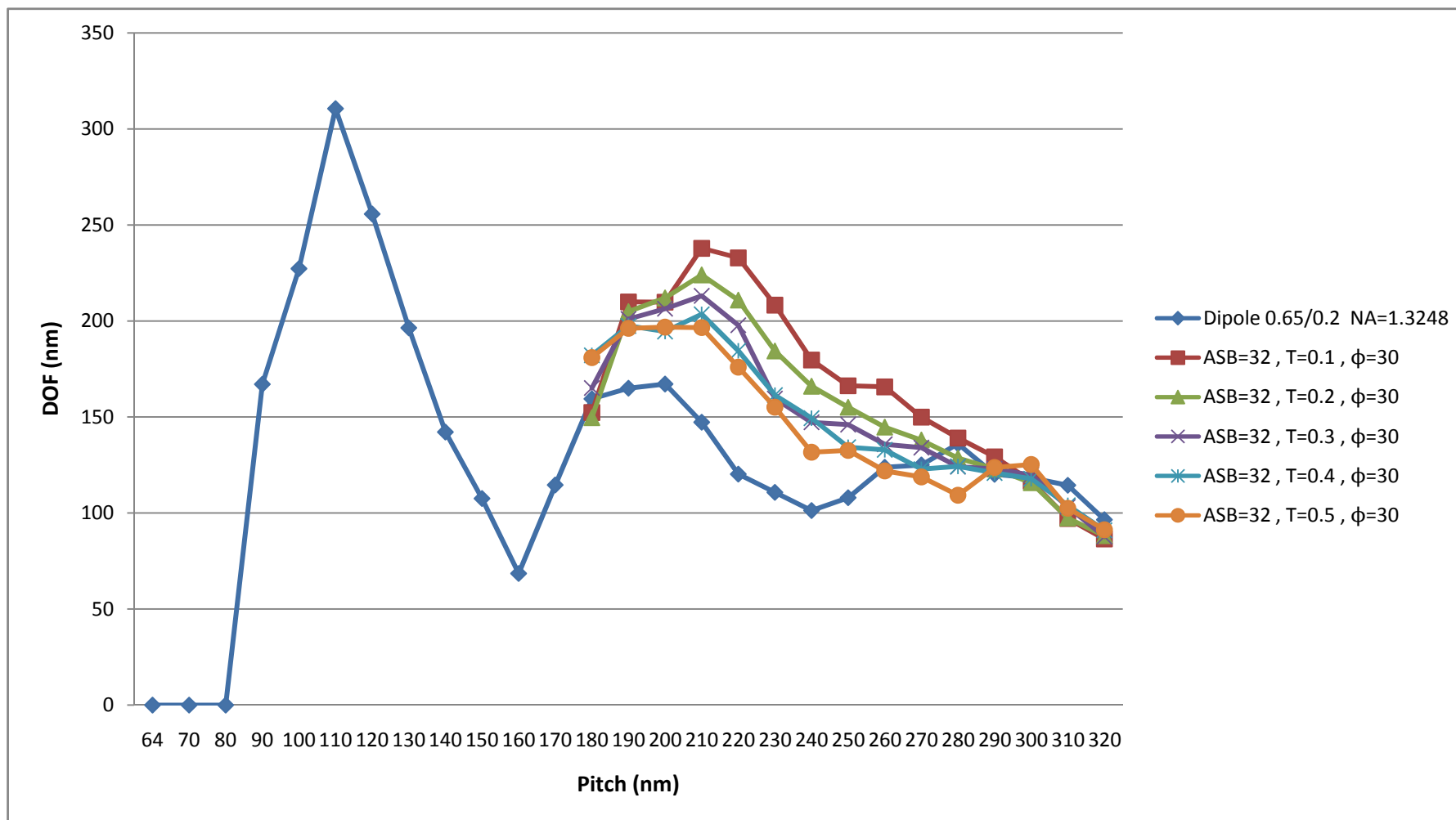


圖 4.14 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=30 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖

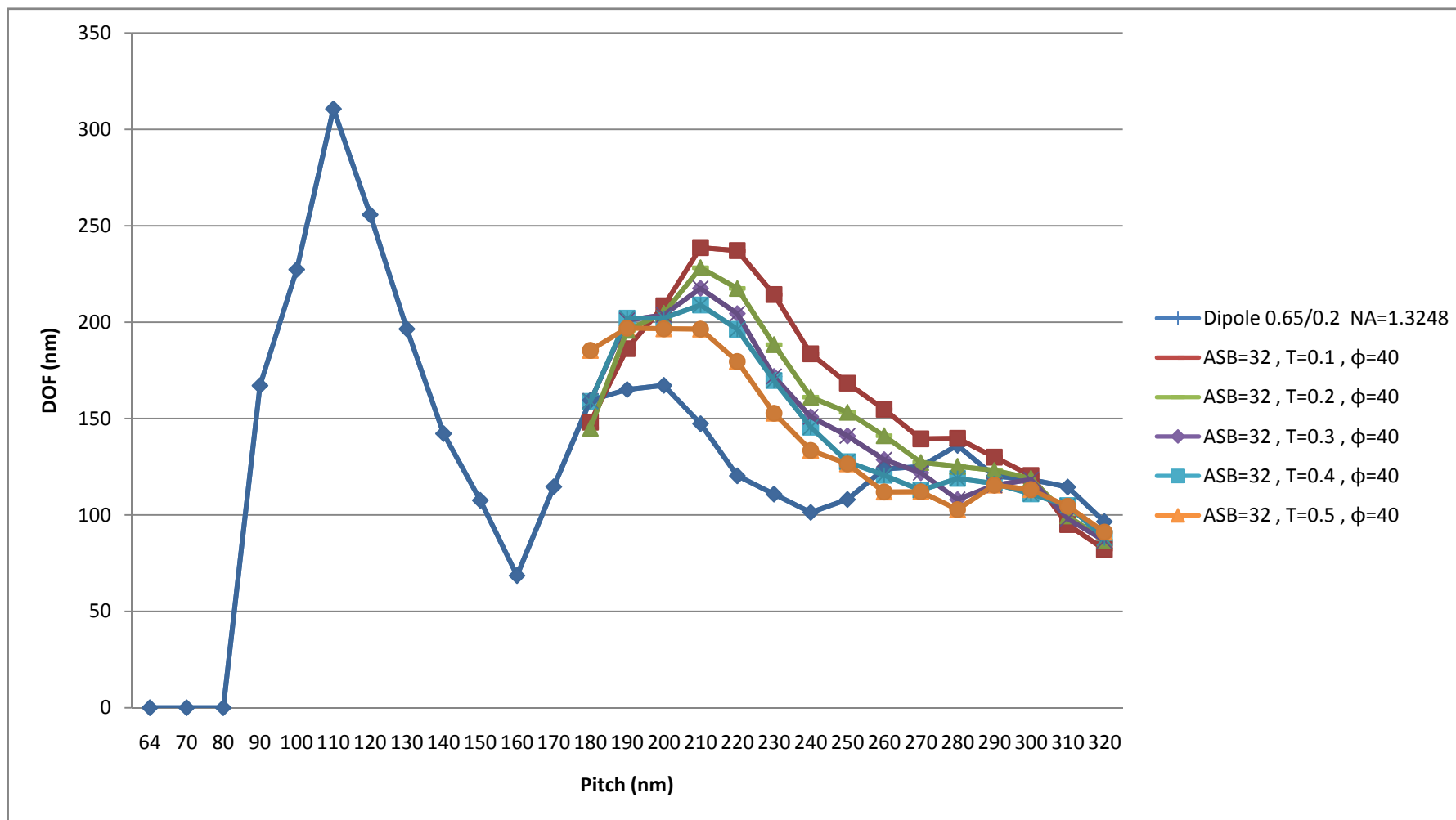


圖 4.15 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定相位差( $\phi$ )=40 度，改變透射度(T)，焦深與間距的關係圖

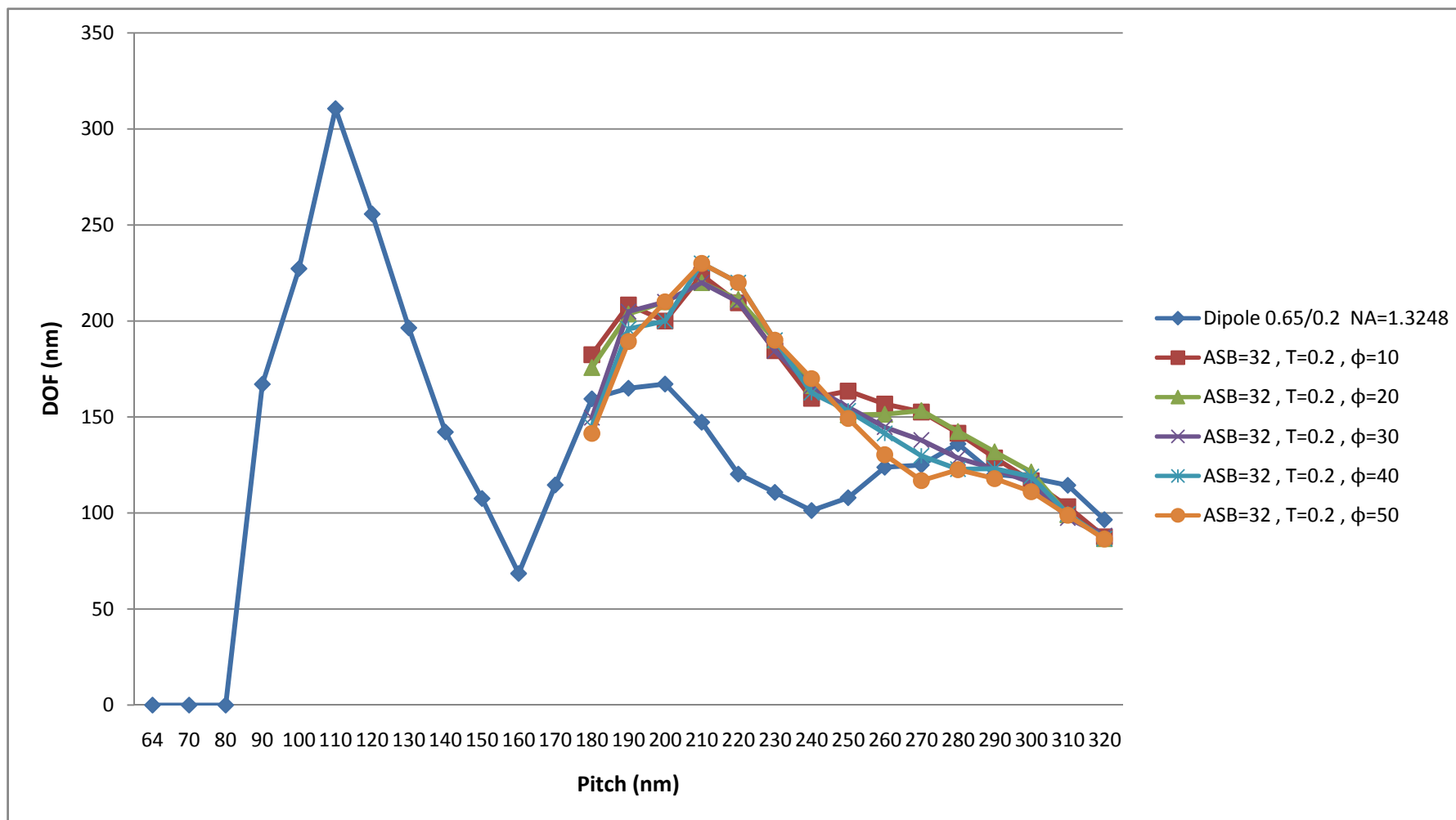


圖 4.16 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.2，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖

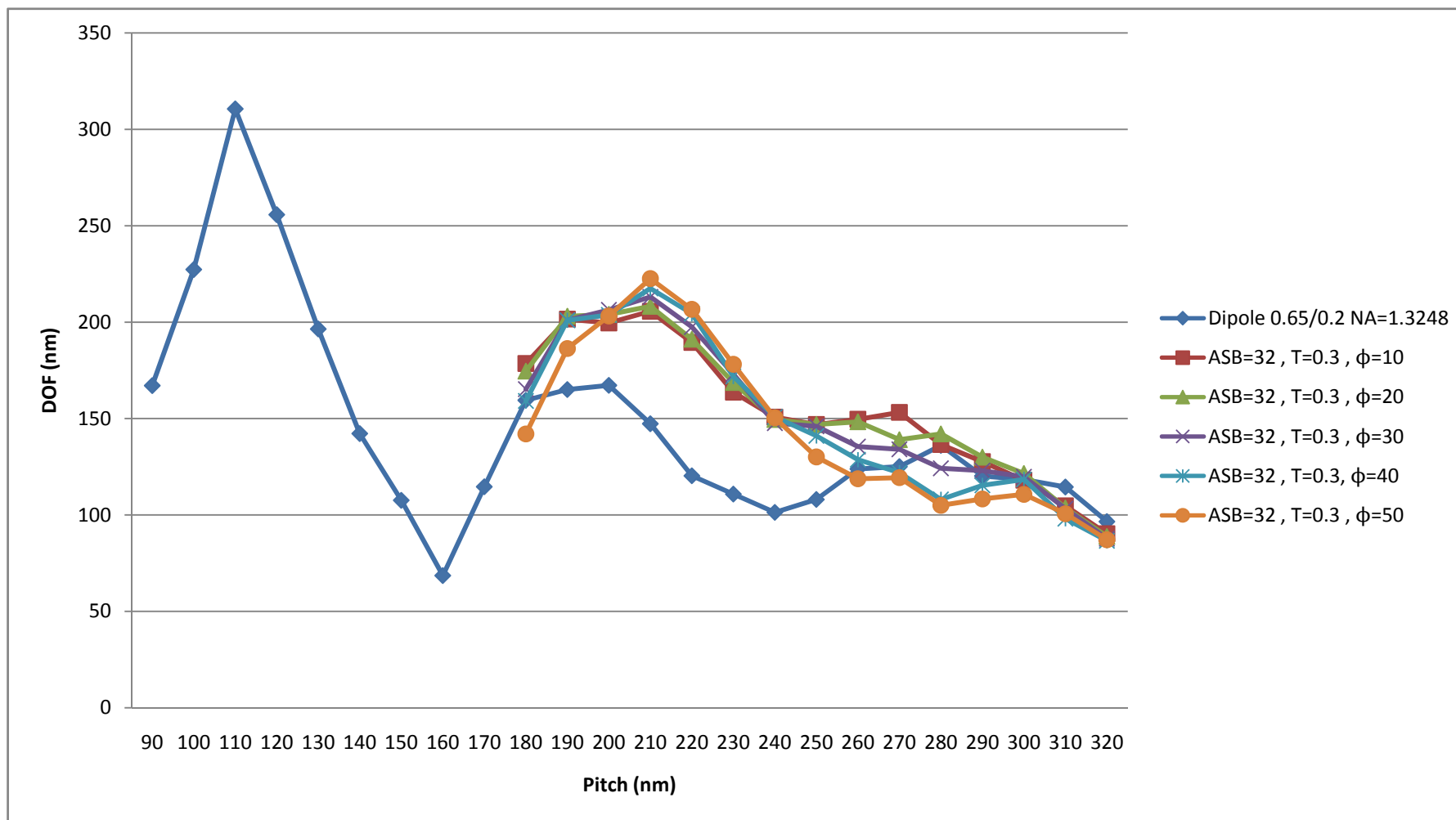


圖 4.17 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.3，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖

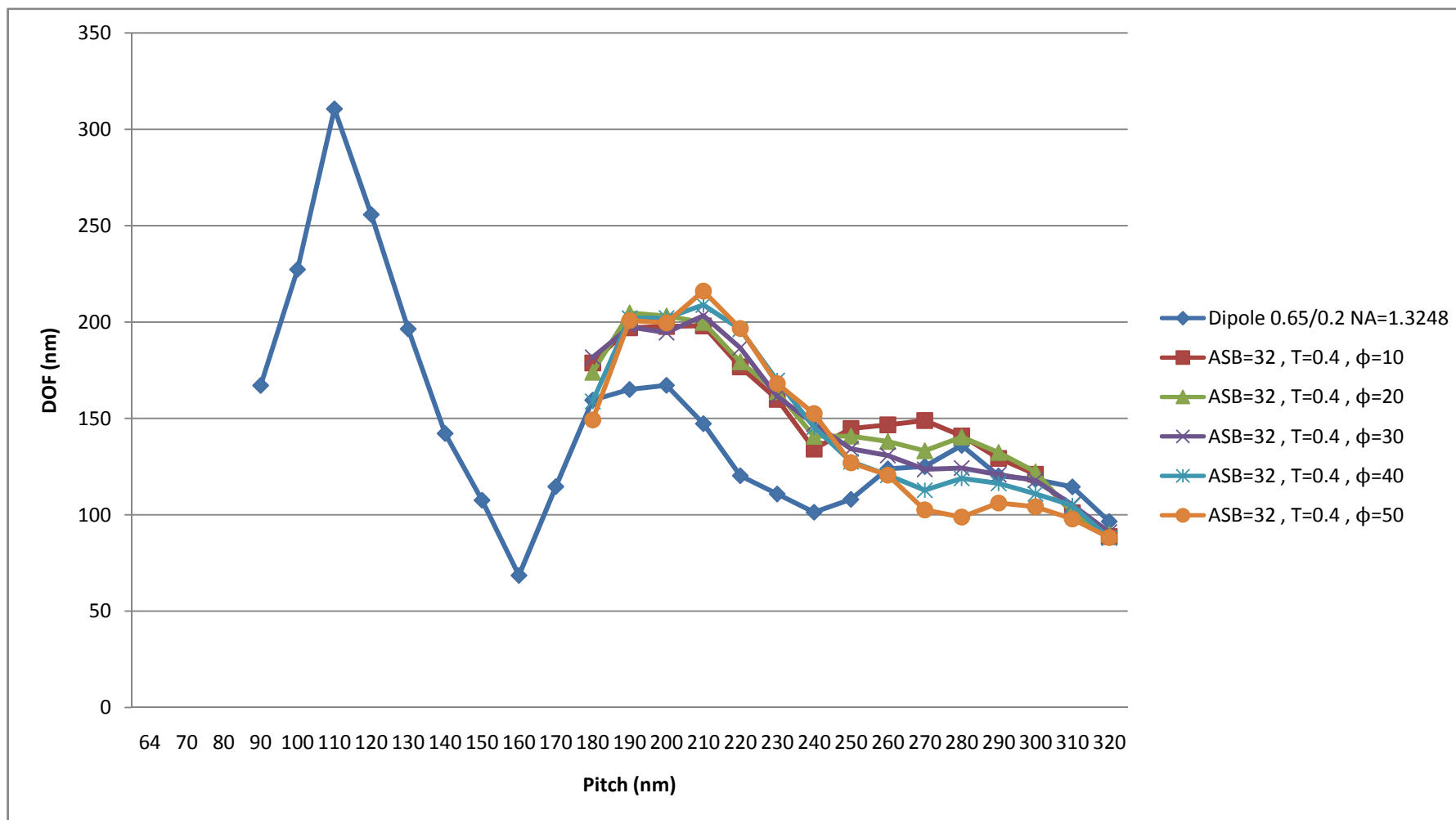


圖 4.18 32 奈米線幅，加入減光全條(ASB)，固定透射度(T)=0.4，改變相位差( $\phi$ )，焦深與間距的關係圖



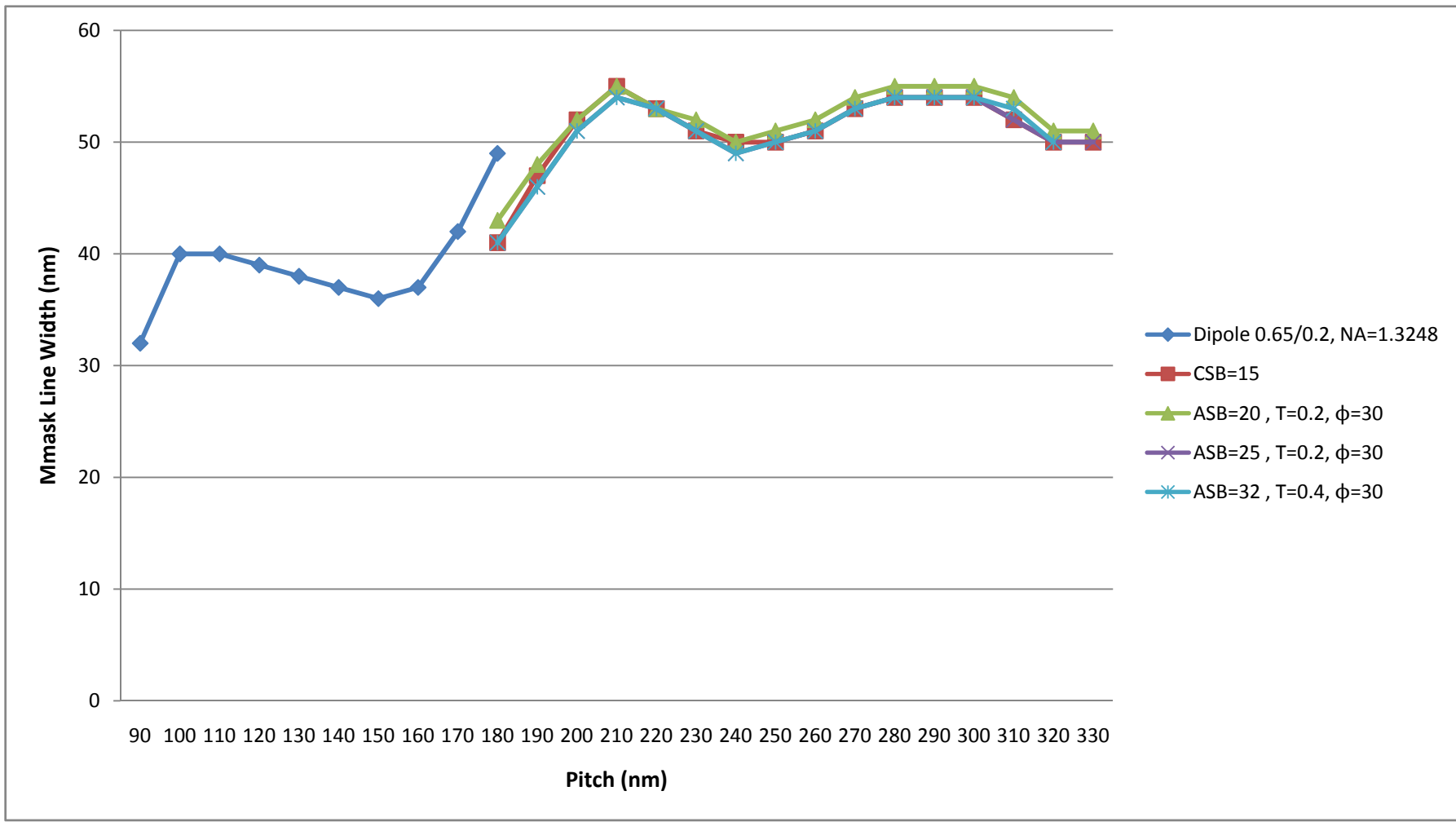


圖 4.19 32 奈米線幅，在接近劑量下，加入偏差法之所使用之圖罩線幅寬度與間距的關係圖

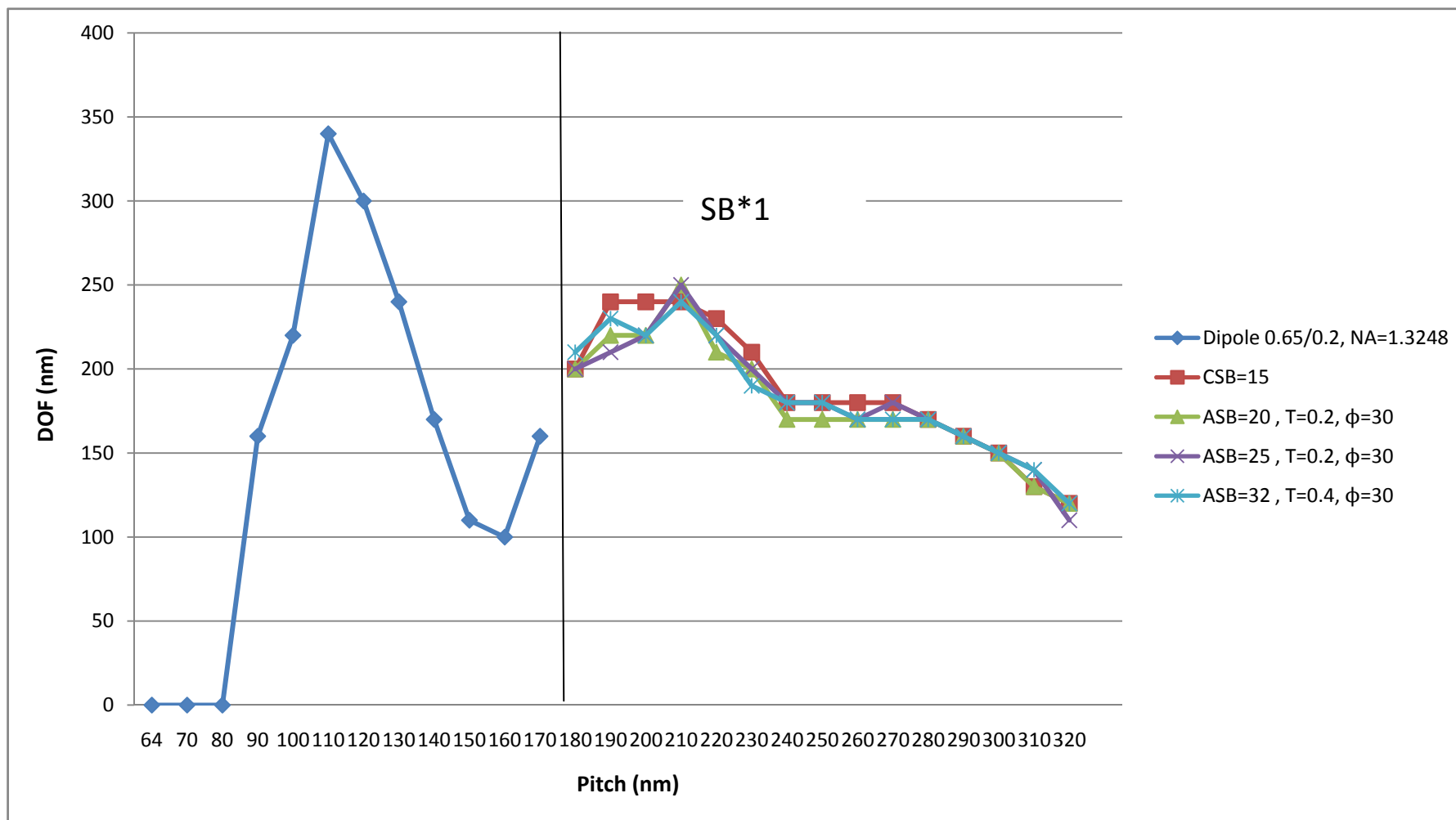


圖 4.20 32 奈米線幅，在接近劑量下，使用偏差法與散條修正後，間距與焦深關係圖

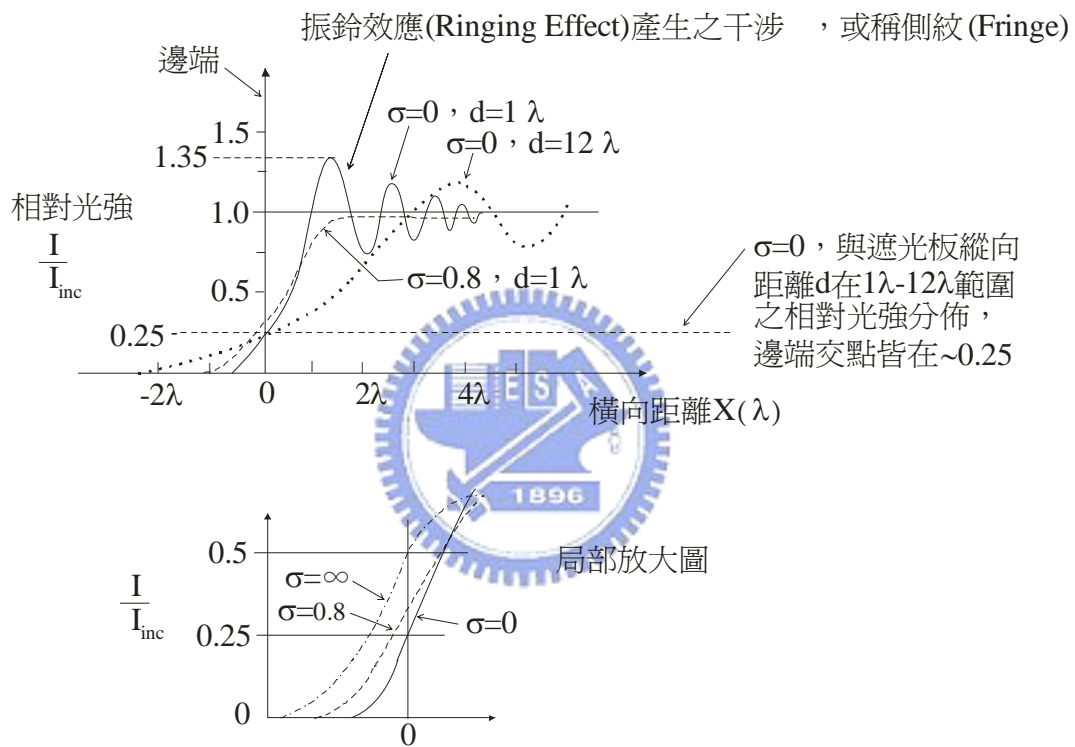
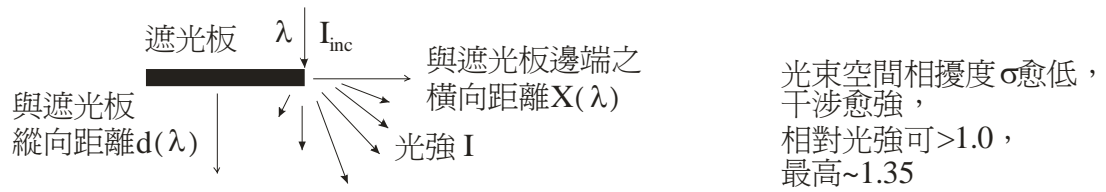
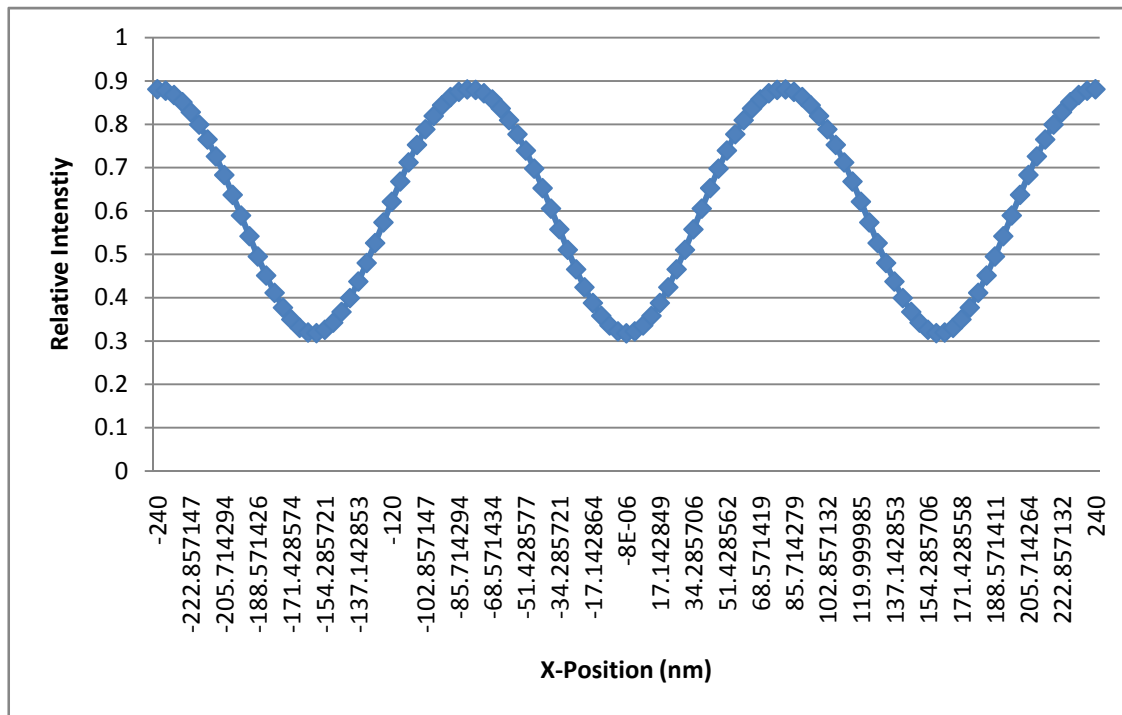


圖 4.21 邊端效應

(a)



(b)

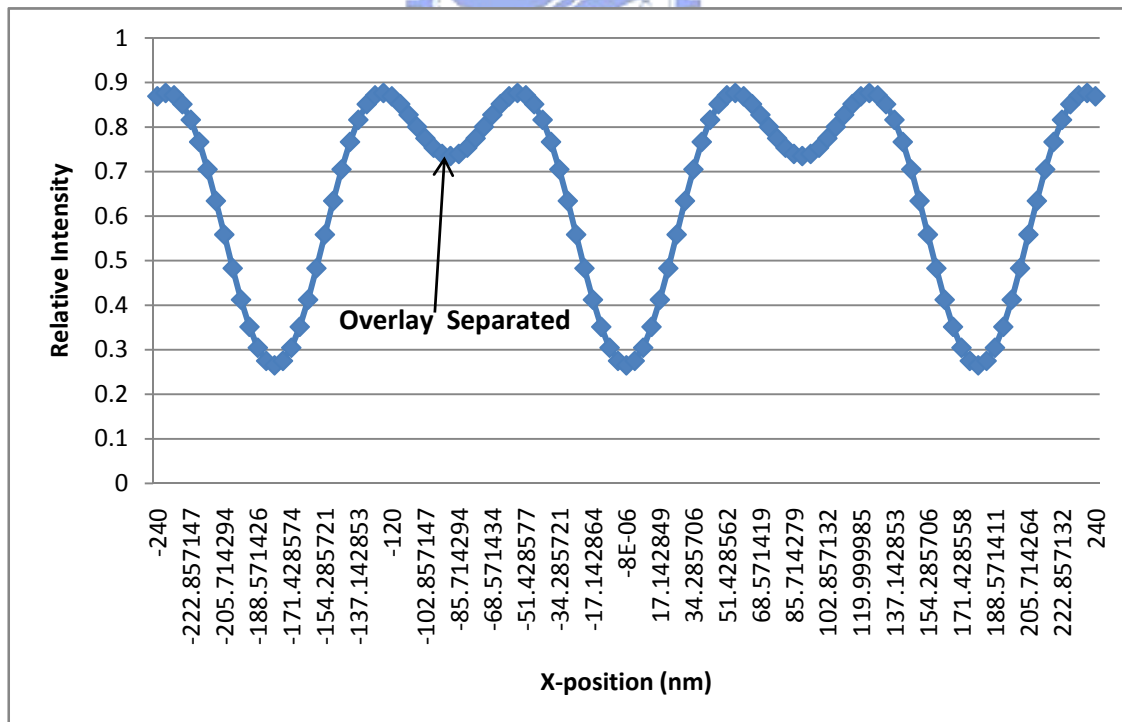
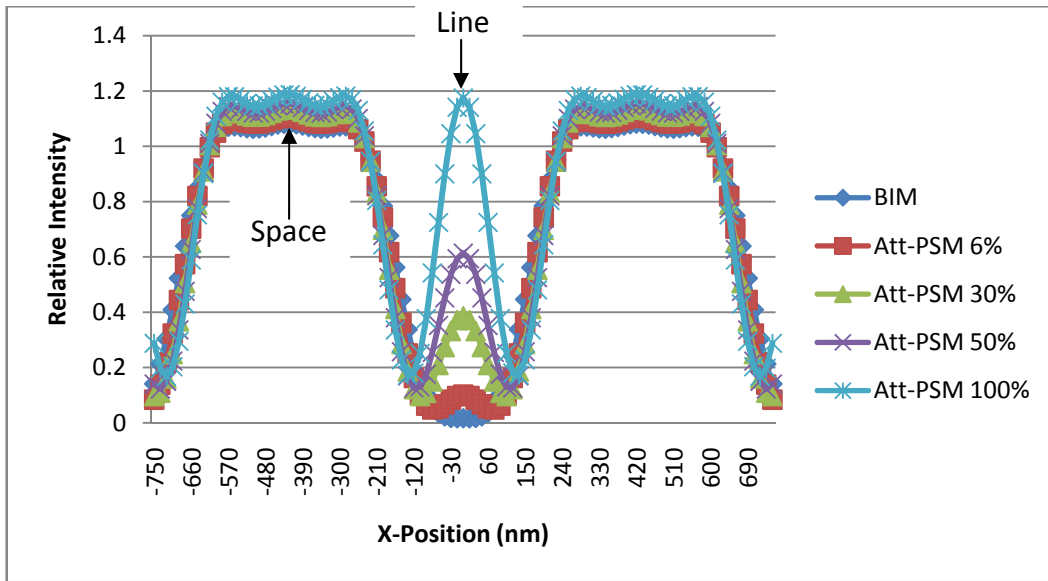


圖 4.22 邊端效應隨著間距的改變對空間影像的影響。(a) 間距 160

奈米時；(b)間距 180 奈米時。

(a)



(b)

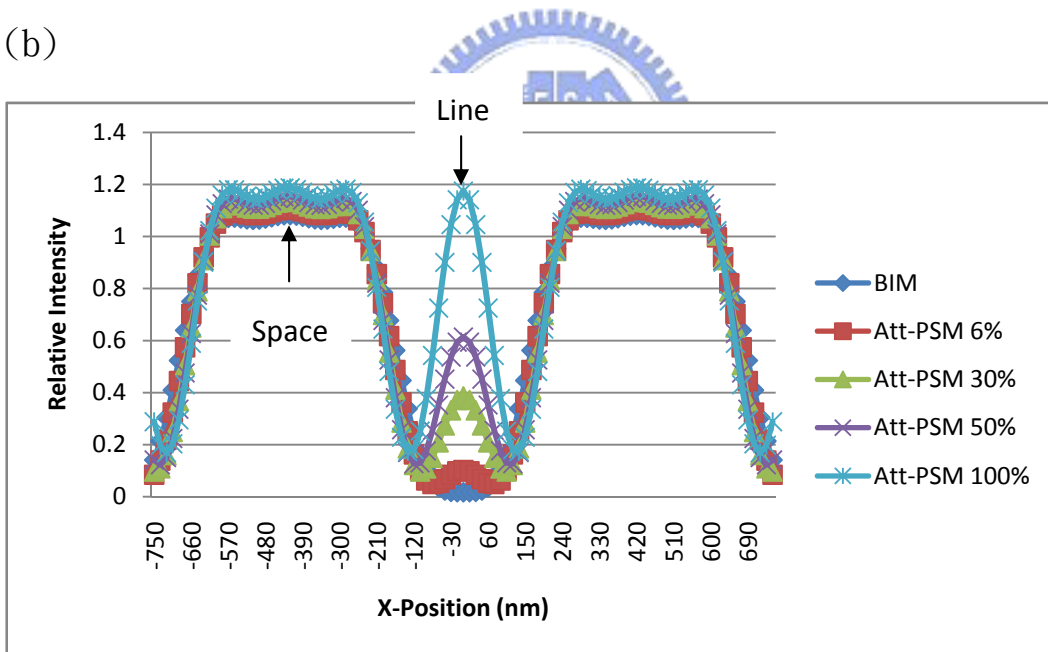
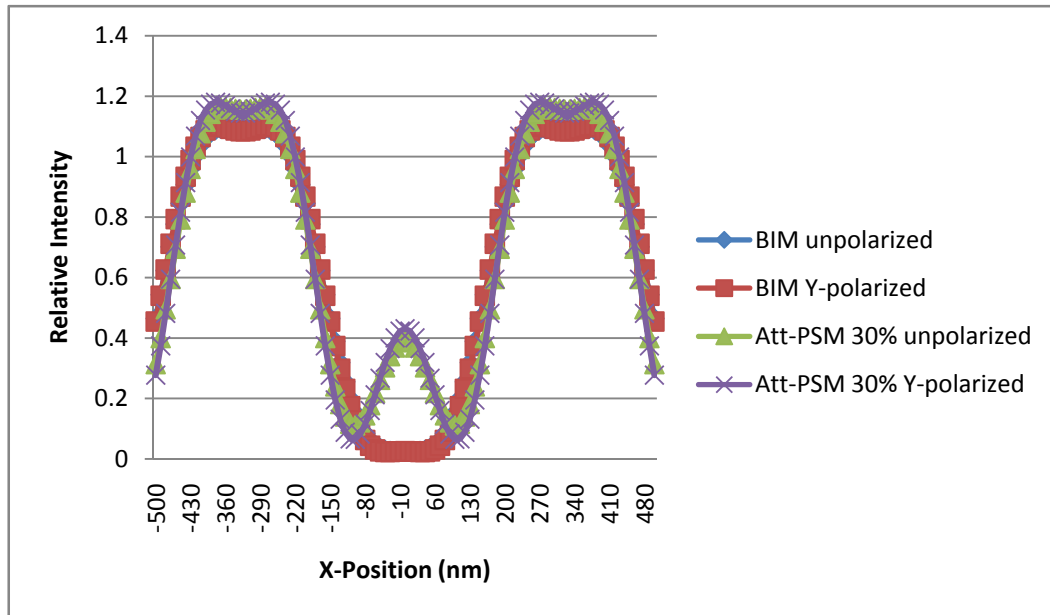


圖 4.23 證實隙(Space)的光強為邊端效應，非側葉光強，使用  $\sigma=0.7$ ， $NA=0.7$ ，(a)等線隙 250 奈米線條；(b)線條寬度(L)=250 奈米、隙寬度(S)=600 奈米

(a)



(b)

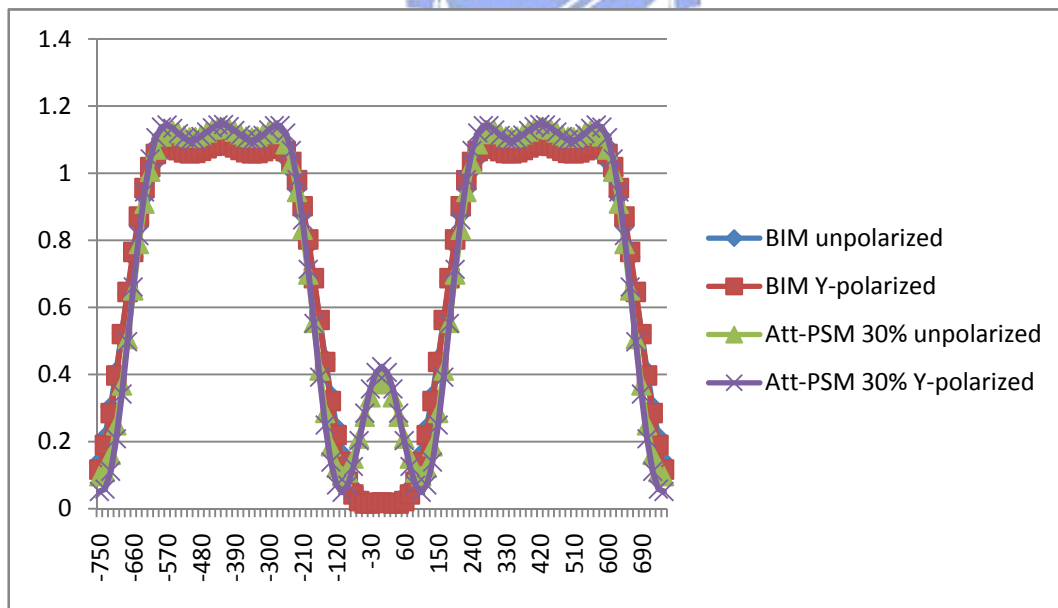
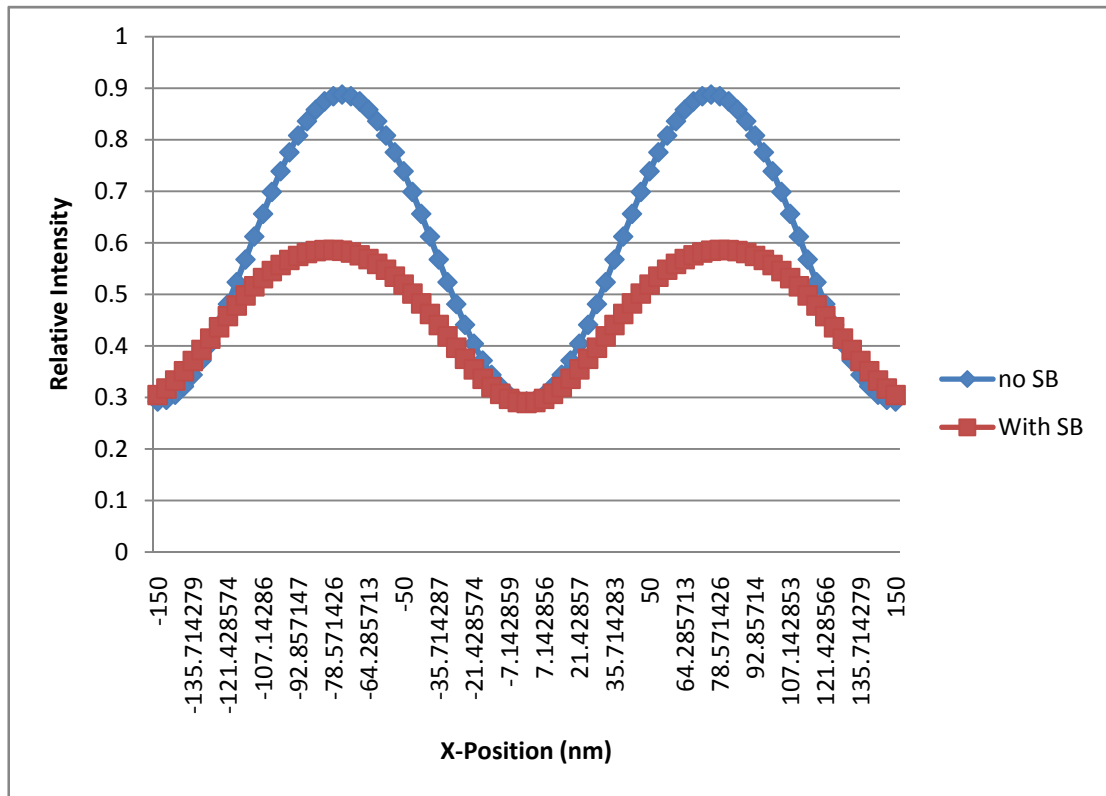


圖 4.24 未偏振光與偏振光對邊端效應的影響(a)等線隙 250 奈米線

條； (b)線條寬度(L)=250 奈米、隙寬度(S)=600 奈米

(a)



(b)

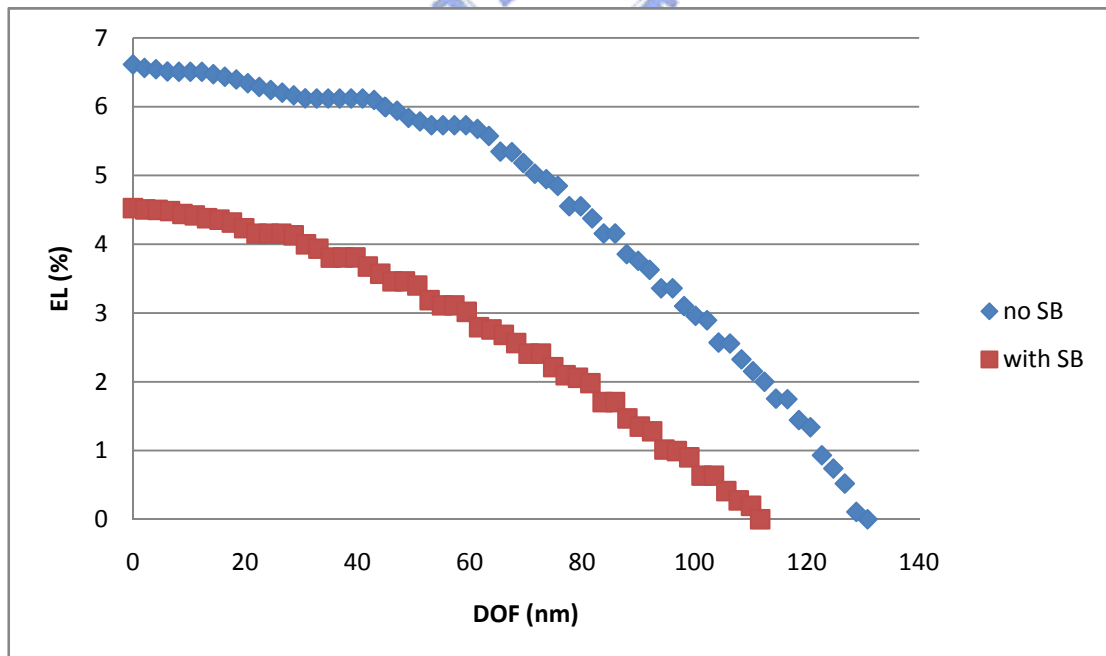
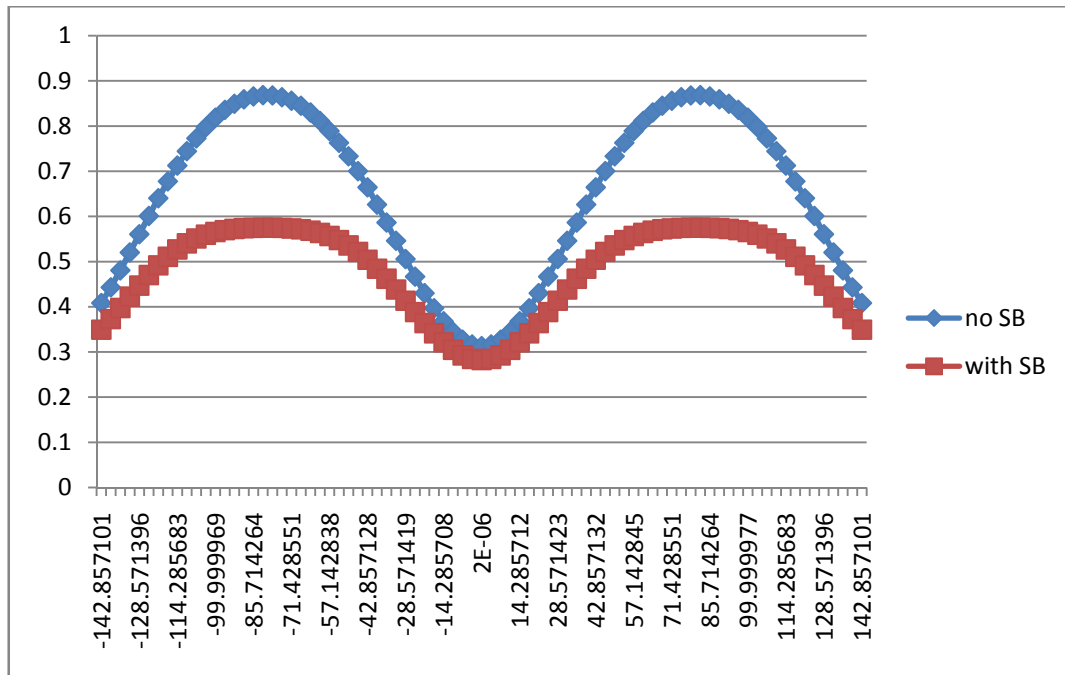


圖 4-25 32 奈米線幅、Dipole、間距 160 奈米下(a)空間影像圖；

(b) EL vs. DOF 圖

(a)



(b)

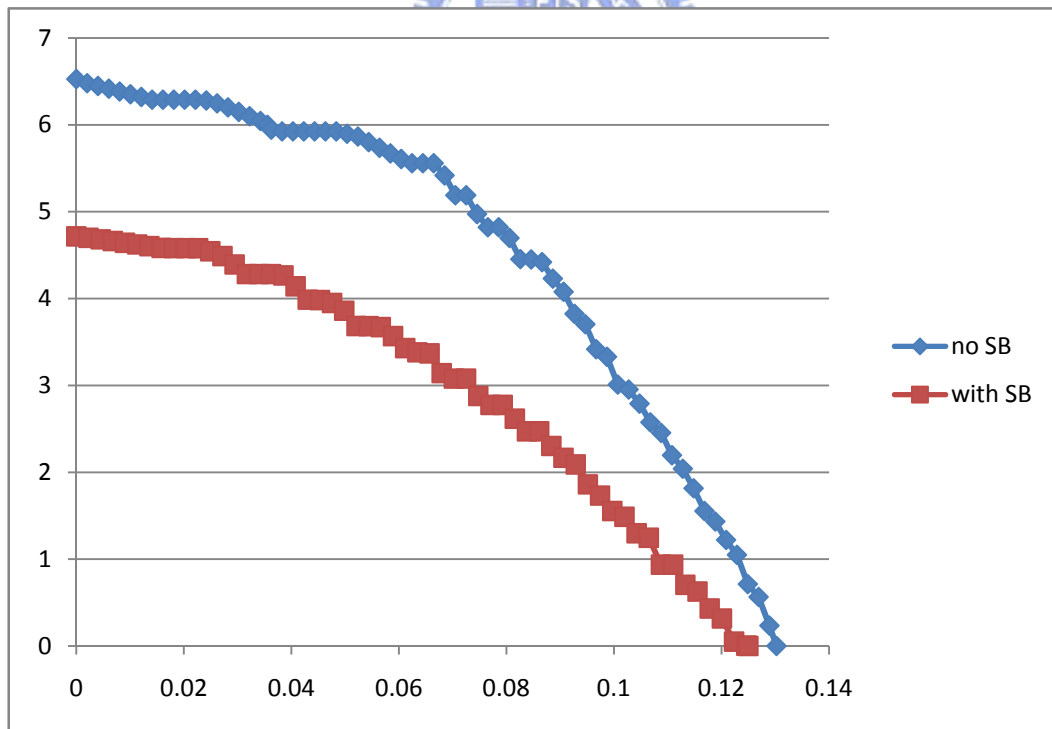
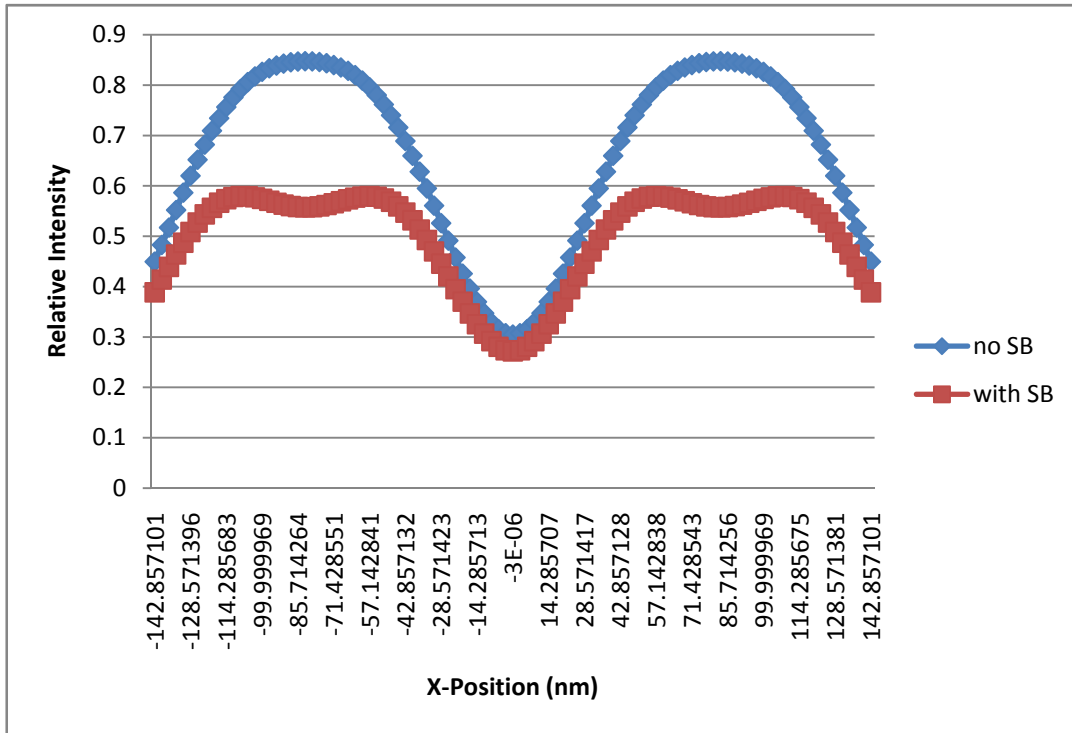


圖 4.26 32 奈米線幅、Dipole、間距 162 奈米下(a)空間影像圖；

(b) EL vs. DOF 圖



(a)



(b)

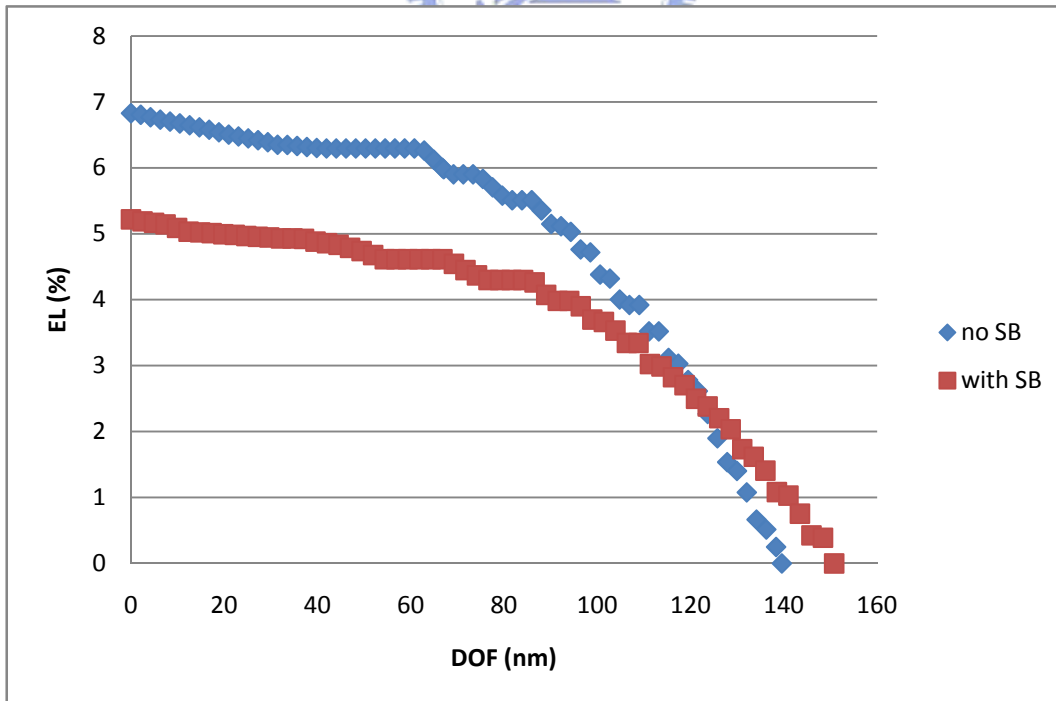
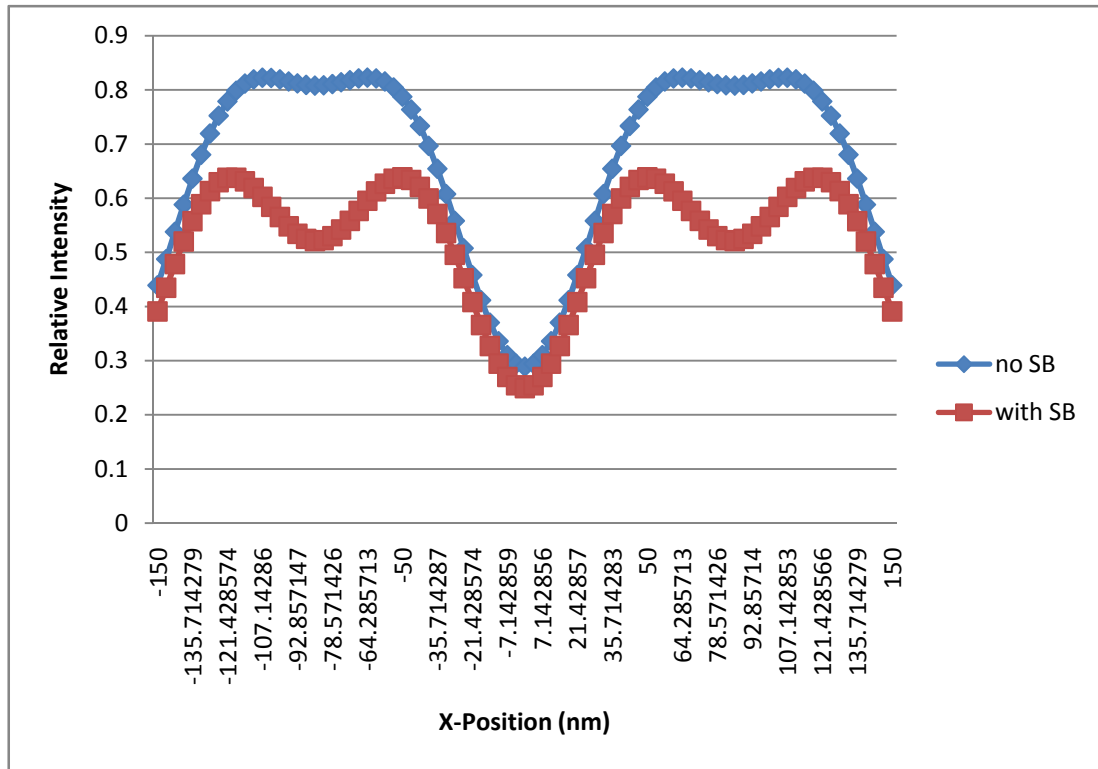


圖 4.27 32 奈米線幅、Dipole、間距 165 奈米下(a)空間影像圖；

(b) EL vs. DOF 圖

(a)



(b)

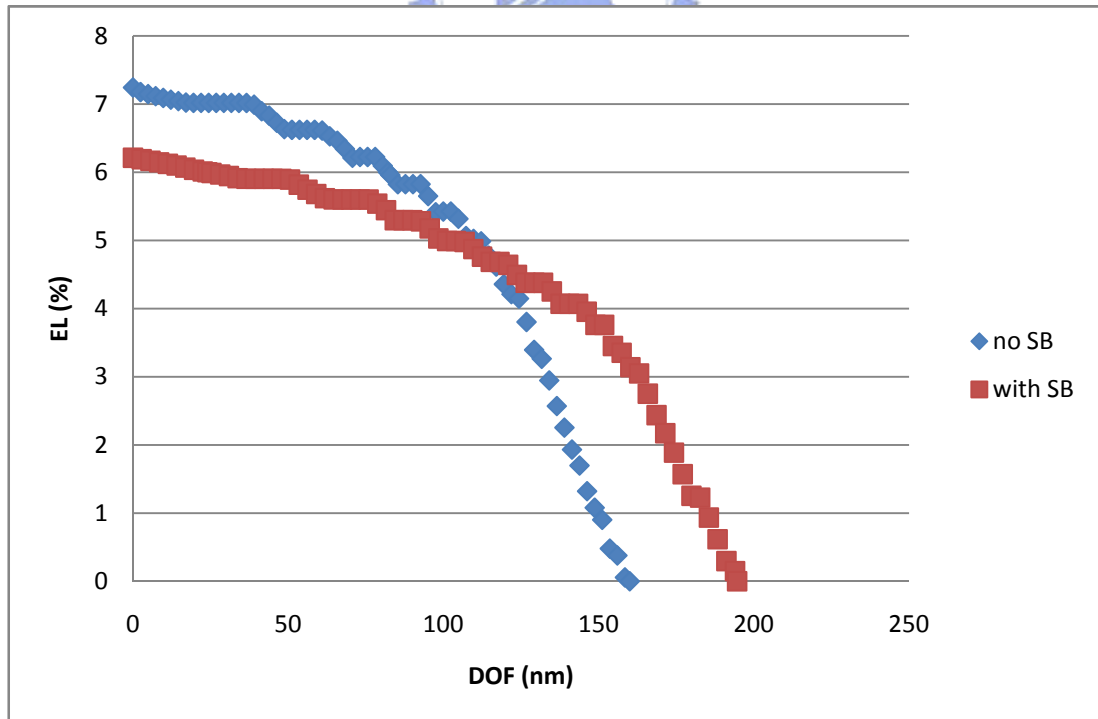
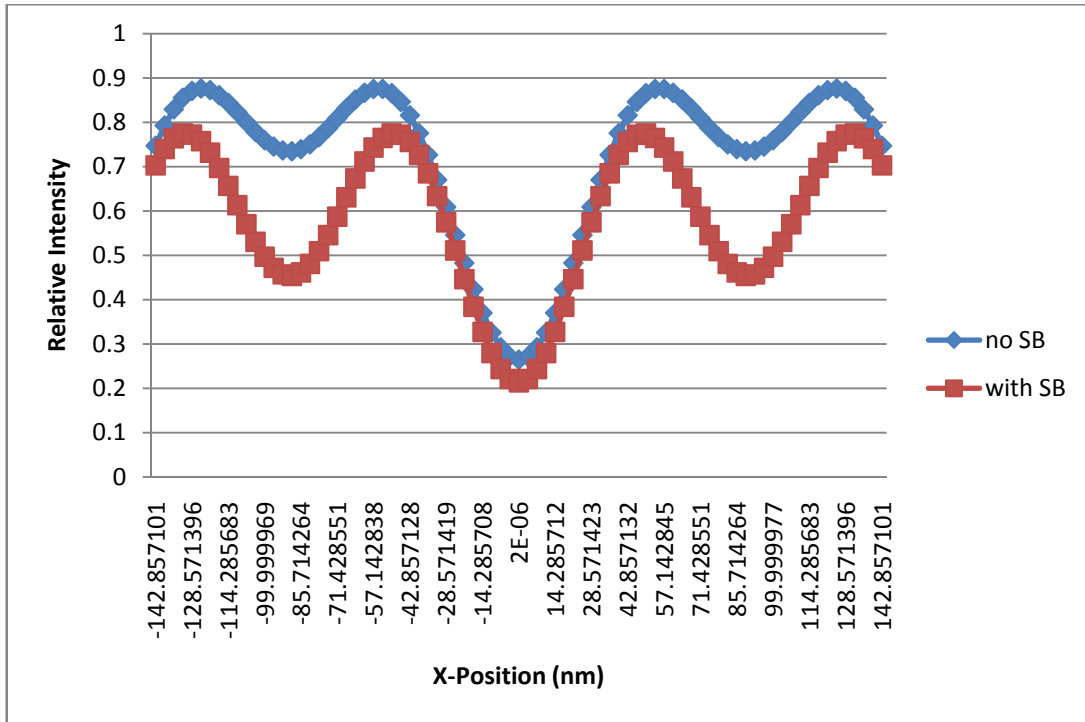


圖 4.28 32 奈米線幅、Dipole、間距 170 奈米下(a)空間影像圖；

(b) EL vs. DOF 圖

(a)



(b)

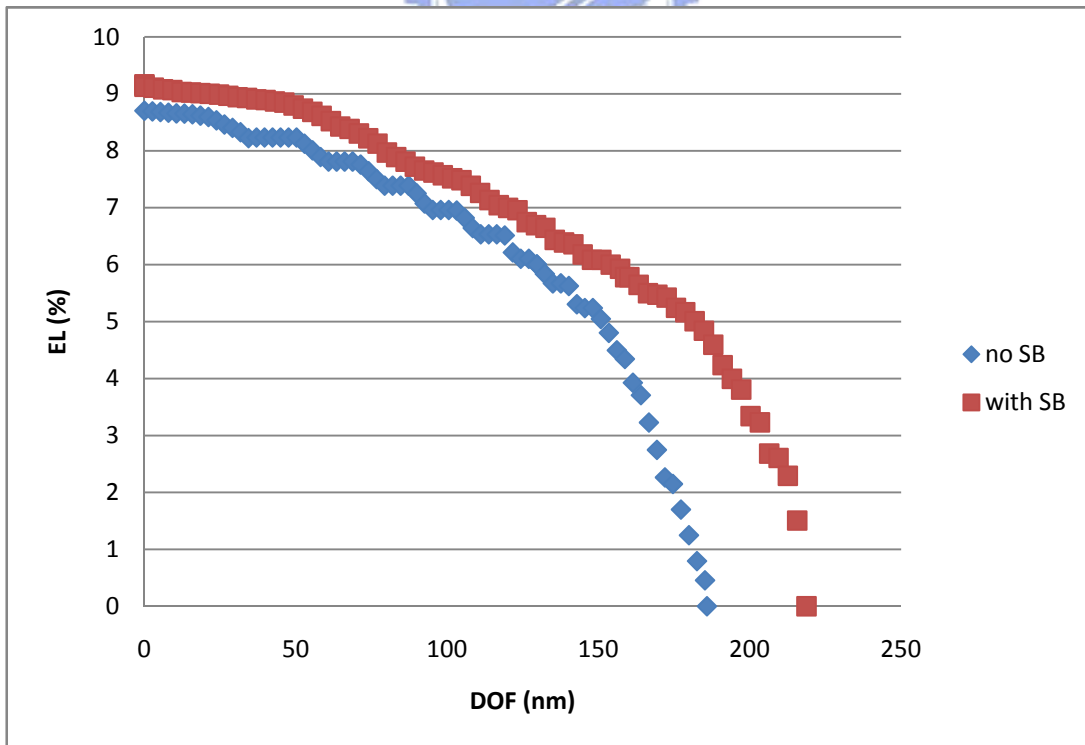
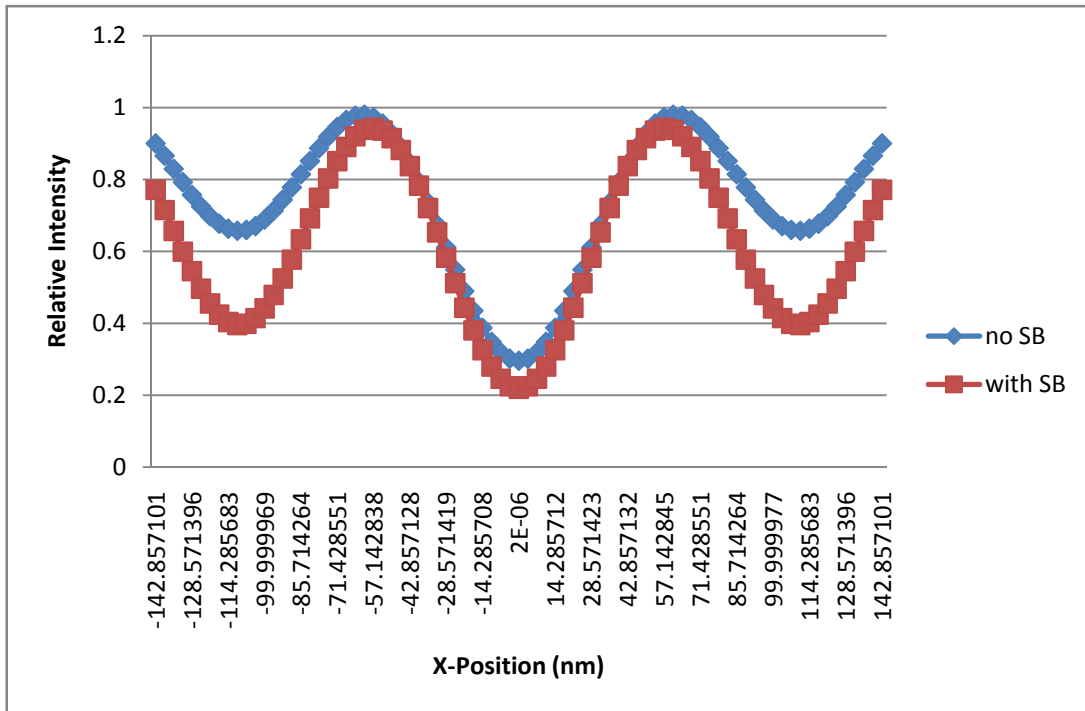


圖 4.29 Dipole 32 奈米線幅、Dipole、間距 180 奈米下(a)空間影像圖； (b) EL vs. DOF 圖

(a)



(b)

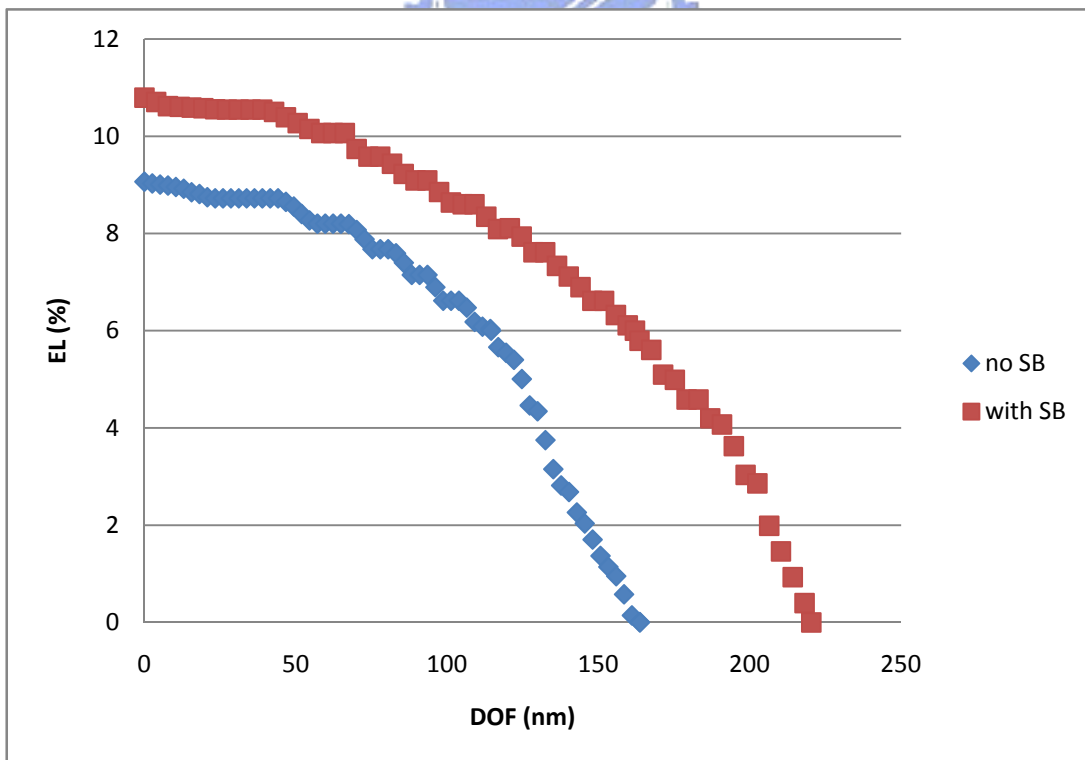


圖 4.30 32 奈米線幅、Dipole、間距 220 奈米下(a)空間影像圖；

(b) EL vs. DOF 圖

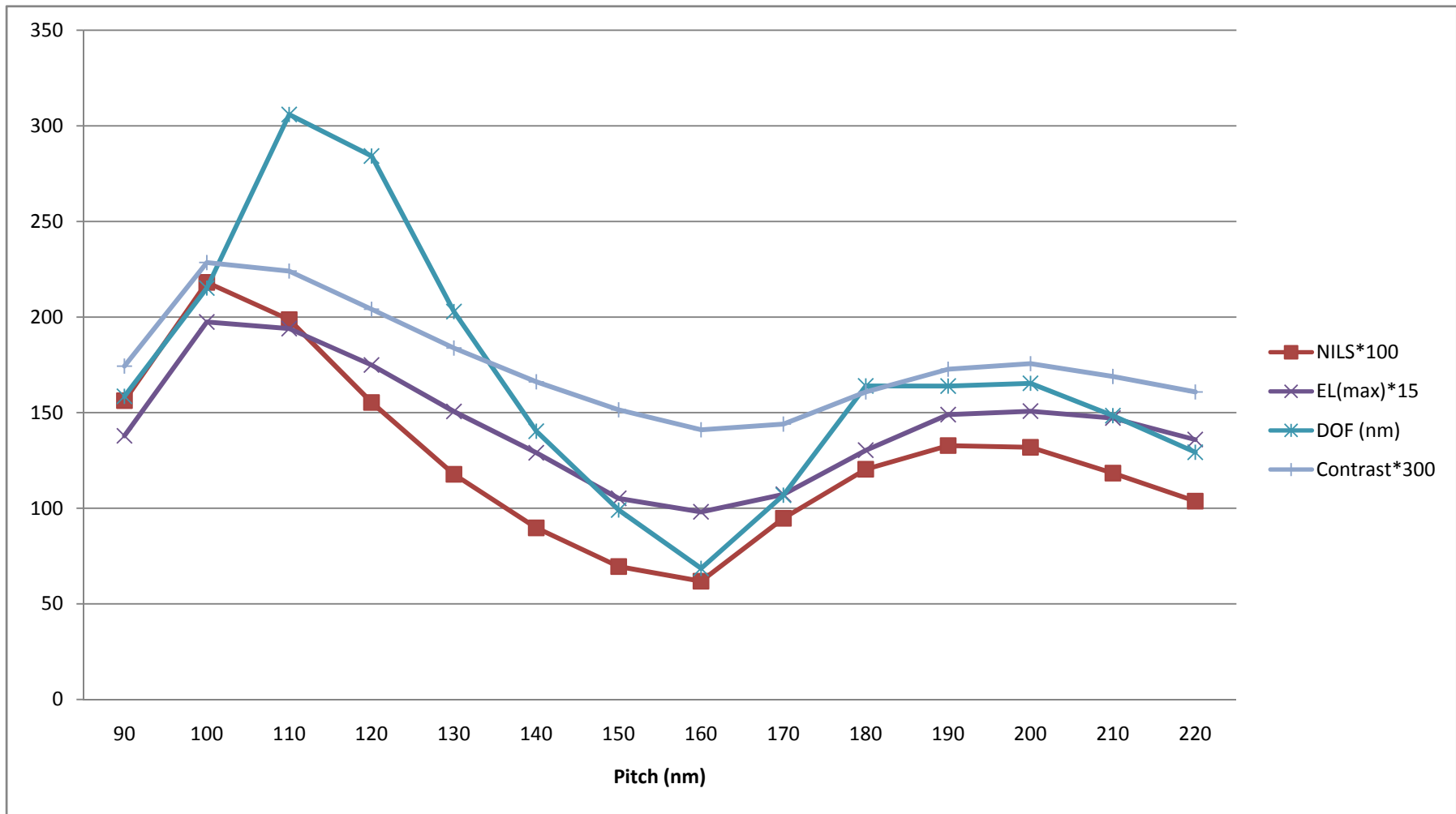
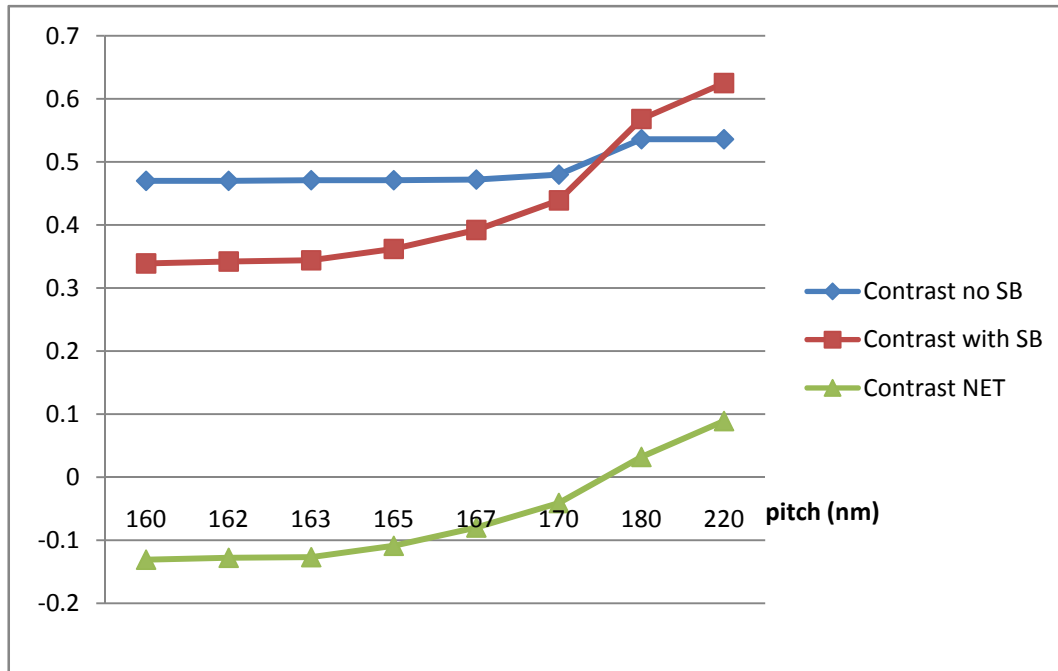


圖 4.31 NILS、Contrast 與焦深的關係圖

(a)



(b)

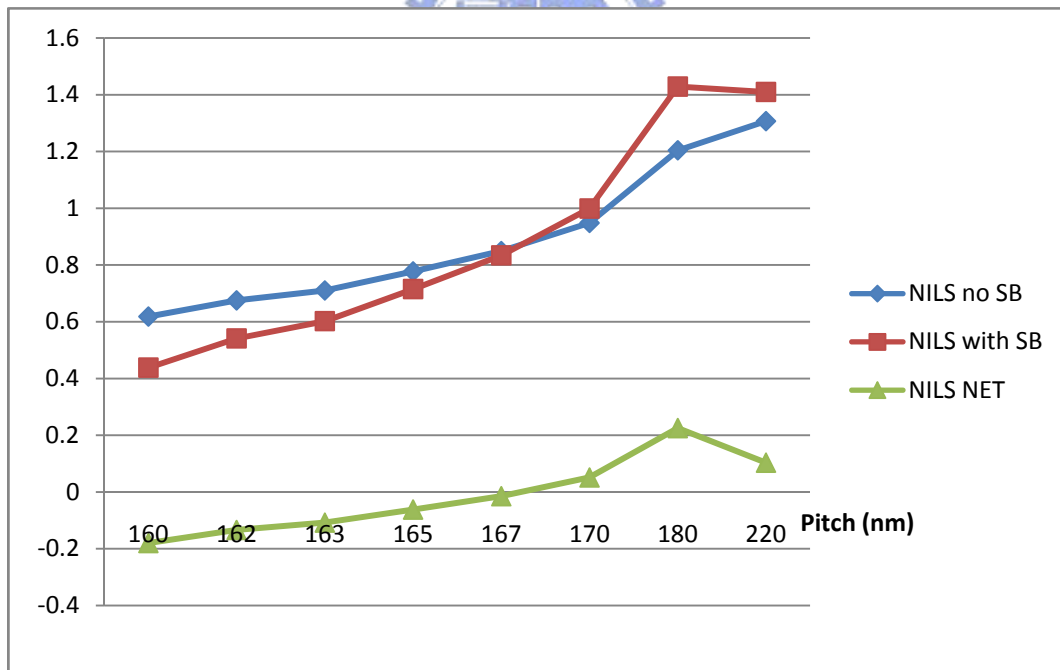


圖 4.32 散條加入前後(a) Contrast 與間距關係圖；(b) NILS 與間距關係圖

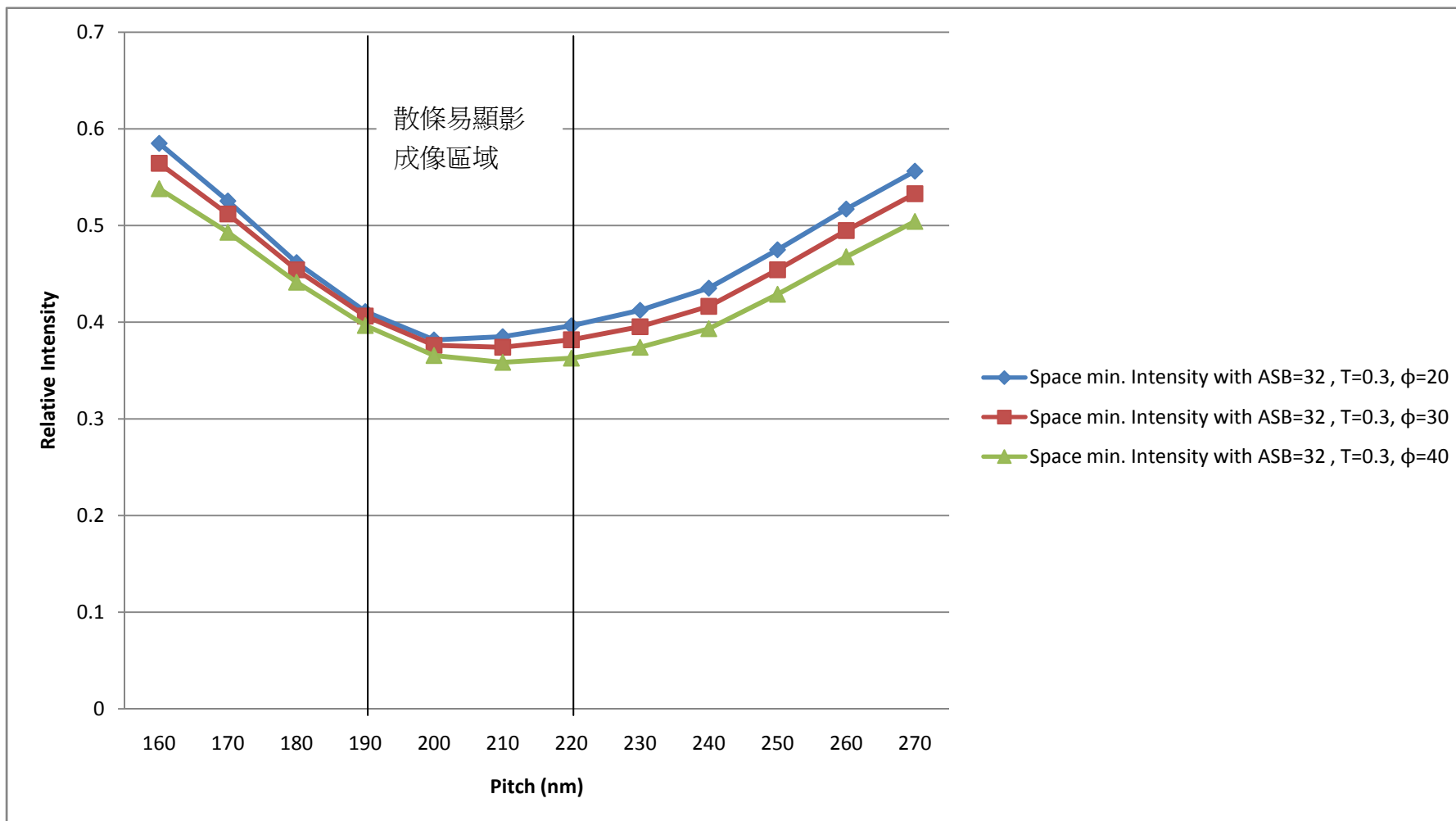
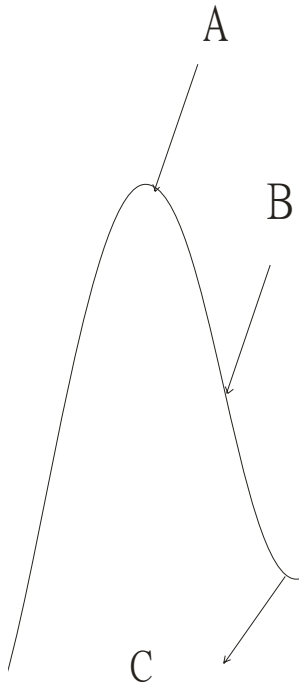


圖 4.33 隙空間影像光強最低點與間距關係

(a)



(b)

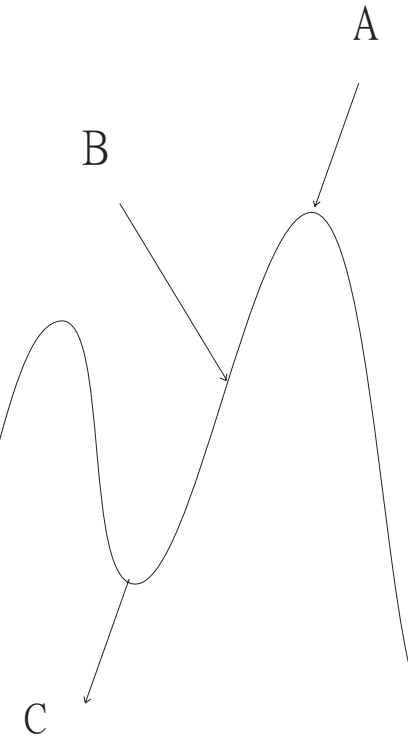
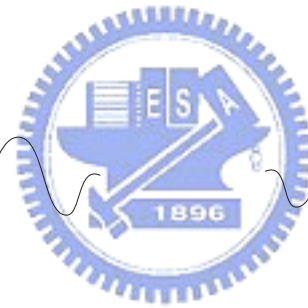


圖 4.34 左右兩邊端各別產生振鈴效應的干涉波可說明隙空間影像光強最低光強與間距關係



## 參考文獻

1. C. A. Mack, “Understanding Focus Effects in Submicrometer Optical Lithography: a Review”, *Optical Engineering*, Vol. 32, p. 2350 (1993).
2. B. J. Lin, “Depth of Focus in Multilayered Media—along-Neglected Phenomenon Aroused by Immersion Lithography”, *Proc. SPIE*, Vol. 3, p. 21 (2004).
3. B. J. Lin, “Off-Axis Illumination -- Working Principles and Comparison”, *SPIE*, Vol. 1927, p. 89 (1993).
4. M. Ling et al., “Customized illumination shapes for 193nm immersion lithography”, *Proc. SPIE*, Vol. 6924, p. 692435 (2008).
5. G. S. Chua et al., “Dipole Options for 90nm Lithography Technologies and below”, *Proc. SPIE*, Vol. 5040, p. 1284 (2003).
6. S. V. Postnikov et al., “Assessment of Complementary Double Dipole Lithography for 45 nm and 32 nm Technologies”, *Proc. SPIE*, Vol. 5754, p. 1478 (2004).
7. R. Socha et al., “Forbidden Pitches for 130nm Lithography and Below”, *Proc. SPIE*, Vol. 4000, p. 1140 (2000).
8. 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).
9. A. Sreedhar et al., “On Modeling and Testing of Lithography Related Open Faults in Nano-CMOS Circuits”, *IEEE*, p. 616 (2008).
10. B. W. Smith, “Forbidden Pitch or Duty Free: Revealing the Cause of Across-Pitch Imaging Differences”, *Proc. SPIE*, Vol. 5040, p. 399 (2003).
11. X. Shi et al., “Understanding the Forbidden Pitch Phenomenon and Assist Feature Placement”, *Proc. SPIE*, Vol. 4689, p. 985 (2002).
12. C. A. Mack, “Mask Bias in Submicro Optical Lithography”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 6, p. 2213 (1988).
13. Y. Kang et al., “Optimum Biasing for 45 nm Node Chromeless and Attenuated Phase Shift Mask”, *Proc. SPIE*, Vol. 6924, p. 692433 (2008).

14. A. Pret et al., “Combined Mask and Illumination Scheme Optimization for Robust Contact Patterning on 45nm Technology Node Flash Memory Devices”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69243B (2008).
15. 龍文安，「半導體奈米技術」，五南，台北市，民95年。
16. G. Yoon et al., “Phase-shifted Assist Feature OPC for Sub-45nm Node Optical Lithography”, Proc. SPIE, Vol. 6520, p. 65201A (2007).
17. B. W. Smith, “Mutually Optimizing Resolution Enhancement Techniques: Illumination, APSM, Assist Feature OPC, Gray Bars”, Proc. SPIE, Vol. 4348, p. 271 (2001).
18. N. Lafferty et al., “Gray Assist Bar OPC”, Proc. SPIE, Vol. 5377, p. 381 (2004).
19. A. Torsy, “Detailed Process Analysis for Sub-Resolution Assist Features Introduction”, Proc. SPIE, Vol. 5377, p. 1172 (2004).
20. V. Farys et al., “Study of SRAF Placement for Contact at 45 nm and 32 nm Node”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69242Z (2008).
21. F. Chin et al., “Understanding and Application of Constructive Destructive SRAF”, Proc. SPIE, Vol. 6924, p. 69242V (2008).
22. C. Mack, “Lithographic Simulation: A Review”, Proc. SPIE, Vol. 4440, p. 59 (2001).
23. C. Mack, “Lithography Simulation in Semiconductor Manufacturing”, Proc. SPIE, Vol. 5645, p. 63 (2005).

## 自傳

黃志全，男，彰化縣人。民國 73 年 5 月 31 日生。家庭成員共 7 人，家人相處和樂。大學畢業於台北市立教育大學自然科學教育學系，主攻化學。於 95 學年度進入交通大學應用化學系。

在研究所時，在龍老師的引領教導下，學習半導體製程技術，如光學微影、相移圖罩、阻劑、銅製程、解像度增進技術等。另外還有旁聽半導體物理與元件，並在碩一暑假去台積電去做暑期實習。在這兩年的碩士學涯過的相當的充實，學習到許多半導體製程的技術。

畢業之後希望能夠學以致用，能夠從事這方面的工作，能夠貢獻一點微薄之力。