

用於次 25 奈米極紫外光曝光機之新穎反射型衰減式相位移光罩

A Novel Structure of Reflective Type Attenuated-Phase-Shifting-Masks for Sub-25 nm Extreme Ultraviolet Exposure Tools

陳學禮、鄭旭君、洪鶯玲、朱鐵吉

Hsuen-Li Chen, Hsu-Chun Cheng, Ying-Ling Hong, Tieh-Chi Chu

相位移光罩 (phase-shifting-mask) 是目前一種極為重要的解析度增益技術，它將被應用於未來的極紫外光 (EUV) 微影術中，以製作 25 nm 以下的圖案。在本文中，根據 Fabry-Perot 結構並結合一般極紫外光微影光罩材料，展示了一種新穎的反射型衰減式相位移光罩結構。此光罩結構在極紫外光波段不僅可達到 180° 相位移與高反射率，而且在深紫外光 (DUV) 波段有高檢視對比度 (inspection contrast)。此光罩結構表層有良好的導電性，可以消除光罩製作過程中電子束曝光所造成的電荷累積效應 (charging effect)。藉由選擇不同膜堆底層材料與調整膜厚，可以調控吸收區與反射區的反射比從 32.6% (TaN/SiO₂/Mo) 到 4.4% (TaN/SiO₂/TaN)。檢視對比度也可以提升至 99%，並且有相當大的厚度誤差容許度。

Phase-shifting-masks are vital resolution enhance technique that will be used in extreme ultraviolet (EUV) lithography beyond the 25 nm node. In this paper, we demonstrated a novel structure for a reflective type attenuated phase-shifting-mask, which is based on a Fabry-Perot structure with common materials in EUV masks. The mask structure not only performs 180° phase-shift with high-reflectance at EUV wavelength but also has high inspection-contrast at deep ultraviolet (DUV) wavelength. The top layer of mask structures exhibits good conductivity, which can alleviate the charging effect during electron-beam patterning. The reflectance ratio of the absorber stack could be tuned from 32.6% (TaN/SiO₂/Mo) to 4.4% (TaN/SiO₂/TaN) by choosing different bottom layers and thickness. The inspection contrast could be raised to 99% with large thickness-control-tolerance.

一、導論

極紫外光 (EUV) 微影術是未來製作次 50 nm 世代半導體元件的重要技術之一。此技術與現行傳統光學微影技術有很大的不同。由於任何物質在極紫外光波段皆有很大的吸收，因此傳統的透鏡曝光系統與穿透式光罩並不適用，取而代之的為反射式光學系統與反射式光罩。基本上，系統中的反射鏡是以熱膨脹係數小於 30 ppb/K 的低熱膨脹材料 (Ti-doped fused silica) 為基材，交替鍍製 80 層 (40-pairs) 鉬 (Mo) 與矽 (Si) 薄膜而成。而光罩則是再加鍍上覆蓋層 (capping layer)、修復緩衝層 (buffer layer) 與吸收層 (absorber)。覆蓋層主要作為保護底下多層膜之用；緩衝層主要作為聚焦離子束修復光罩時之保護層，厚度皆為 50 nm 以下，考量重點為抗離子束蝕刻能力。至於吸收層主要作用在於吸收入射光，使圖案於曝光波長有高對比度。

根據最近的國際半導體技術藍圖 (International Technology Roadmap for Semiconductor, ITRS) 指出，過去應用於深紫外光微影術中的相位移光罩 (phase-shifting-mask, PSM) 解析度增益技術，在未來 20 nm 技術節點以下的極紫外光微影術中仍是必需的⁽¹⁾。在深紫外光 (DUV) 微影術中，高穿率透衰減式相位移光罩 (high transmittance attenuated phase-shifting-mask, T-APSM) 展現出相較於傳統相位移光罩更好的性能，包括增進景深 (depth of focus) 與解析度 (resolution) 等，因為它能在圖案邊緣造成更強的破壞性干涉⁽²⁾。因此，為極紫外光微影術設計一種高反射率的反射型 APSM 是極其重要的。

在近幾年，為數眾多的吸收層材料與緩衝層材料被評估為可能適用於極紫外光微影光罩的材料⁽³⁾，氮化鉬 (TaN) 及鉻 (Cr) 是吸收材料的首要選擇，而二氧化矽 (SiO₂) 與氮化矽 (Si₃N₄) 則已經廣泛被應用在緩衝層⁽⁴⁾，其中，吸收材料的考量包括光學性質、化學性質及機械性質等。

然而此時會面臨另一個問題，雖然 TaN 及 Cr 在極紫外光波長 (13.4 nm) 有高吸收特性，但是在深紫外光檢視波長 (257 nm 或 365 nm) 卻有相反的高反射特性。這個結果將導致多層膜反射鏡與吸收層膜堆之間的檢視對比度下降，產生圖案缺陷判斷

不易的窘境。因此，藉由降低吸收層膜堆在檢視波段的反射率以增進檢視對比度是必要的。在過去，介電材質的單層抗反射層 (antireflective coatings, ARC) 如 Si₃N₄ 薄膜，被用於增加檢視對比度⁽⁵⁾。

此外，極紫外光微影光罩圖案的製作方式是採用電子束曝光方式進行。首先於光阻上定義圖案，之後以活性離子蝕刻方式將圖形轉移至吸收層，去除光阻作第一次檢視，以聚焦離子束作修補並確認無誤之後，再以吸收層為蝕刻罩幕層，將底下的緩衝層移除，經最終檢視無誤後，才告完成。

在電子束曝光過程中，入射電子在基板上會累積而產生電場，導致後來電子因為排斥而偏折，致使曝光圖案失真。這個問題將會隨著光罩線寬縮小而愈趨嚴重⁽⁶⁾，尤其是當線寬小於 200 nm 以下時，而極紫外光微影光罩正是如此。因此，為解決這個問題，基板必須有好的導電性，能將電子及時導出。但是一般單層的 ARC 多為介電材料，導電性不佳，較不適合作為電子束曝光的基板。

本文中，我們根據 Fabry-Perot 結構並結合一般極紫外光微影光罩材料，展示了一種新穎的反射型衰減式相位移光罩結構。此光罩結構在極紫外光波段不僅可達到 180° 相位移與高反射率，而且在深紫外光波段有高檢視對比度 (inspection-contrast)。此光罩結構頂層有良好的導電性，可以消除光罩製作過程中電子束曝光所造成的電荷累積效應 (charging effect)，且吸收區與反射區的反射比可以藉由選擇不同膜堆底層材料與調整膜厚來調控。檢視對比度可以提升至 99%，並且有相當大的厚度誤差容許度。吸收層膜堆的總厚度亦維持於膜堆厚度規格需求內，並不會造成幾何上的遮影效應 (shadow effect)。

二、模擬

我們以光學的多層薄膜理論模擬反射型 APSM 的光學行為⁽⁷⁾。Mo、Si、TaN、Cr、SiO₂、Si₃N₄ 在極紫外光及深紫外光波長時的光學常數可以從 Henke 表⁽⁸⁾ (參考文獻 9 中網路也適用) 及 Palik 等固體光學常數⁽¹⁰⁾，利用線性內插 (linear interpolation) 方法獲得。表 1 顯示極紫外光微影光罩材料

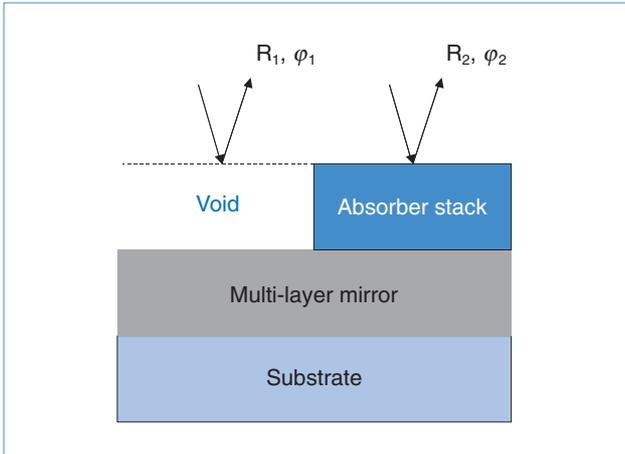


圖 1. 反射型衰減式相位移光罩的概念示意圖。

在 13.5 nm 曝光波長及在 257 nm 檢視波長的光學常數。

為描繪反射行為，我們假設多層 (ML) 反射鏡包含 40 對 (共 80 層) 的 Mo、Si 薄膜，厚度各為 2.8 nm 及 4.1 nm。Mo/Si 多層反射層是沉積於低熱膨脹係數基板上，再覆蓋緩衝層及吸收層，設定緩衝層的厚度為 60 nm，以符合聚焦離子束 (focus ion beam) 修補製程的要求。多層膜區在修補製程檢視階段 (緩衝層去除前) 及成品檢視階段 (緩衝層去除後) 的反射率皆控制在 60%。

圖 1 顯示來自圖形結構中兩個不同區域的反射相位， ϕ_1 及 ϕ_2 ，光程差 (OPD) 即為光線行經空間及吸收膜堆之後的相位差， R_1 及 R_2 各為 ML 反射鏡及吸收膜堆的反射率。我們引進薄膜干涉理論來分析反射率及相差，模擬所使用的條件為 13.5 nm 曝光波長、s 偏振及 5 度入射角。

表 1. EUVL 光罩材料在 13.5 nm 曝光波長及在 257 nm 檢視波長的光學常數。

	13.5 nm		257 nm	
	n	k	n	k
SiO ₂	0.97818	0.01077	1.50410	0.00000
Si	0.99932	0.00183	1.64026	3.91824
Mo	0.92125	0.00642	1.71573	3.74531
Si ₃ N ₄	0.97343	0.00932	2.24752	0.00234
TaN	0.92600	0.04363	2.49674	1.52568
Cr	0.93246	0.03888	0.86040	2.11620

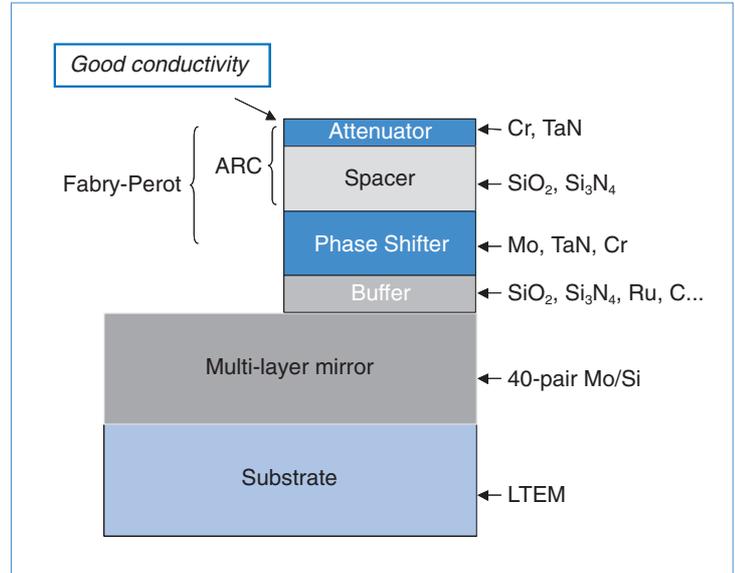


圖 2. Fabry-Perot 型式衰減式相位移光罩的結構示意圖。

三、結果與討論

1. 吸收膜堆

如圖 2 所示，此新式的吸收膜堆結構包含緩衝層、相差層、間隔層及衰減層。緩衝層可以避免底下的 ML 反射鏡在蝕刻製程及聚焦離子束修補製程中被破壞。相差層的折射率在極紫外光波長與空間折射率 ($n = 1$) 有很大的差值，是造成光程差的主要部分，適合材料是 Mo、TaN 及 Cr。間隔層主要是用來控制檢視波長的反射率，因此間隔層必須在深紫外光檢視波長時是弱吸收的，SiO₂ 及 Si₃N₄ 是最一般的材料，符合此項要求。衰減層是薄金屬層，如 TaN 及 Cr，亦須有適當的光學常數以搭配間隔層在深紫外光檢視波長造成破壞性干涉。基於上述概念，我們以 TaN/SiO₂/Mo 膜堆組成的高反射率 APSM，及 TaN/SiO₂/TaN 膜堆組成的一般反射率 APSM 為例子，說明比較其光學行為。

2. 吸收層在極紫外光波長範圍的反射率及相差

圖 3 顯示 TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆在波長 13.5 nm 的反射率及相位差，TaN 層及 SiO₂ 層的厚度設計固定在 4.4 nm 及 27.2 nm，以維持好的深紫外光

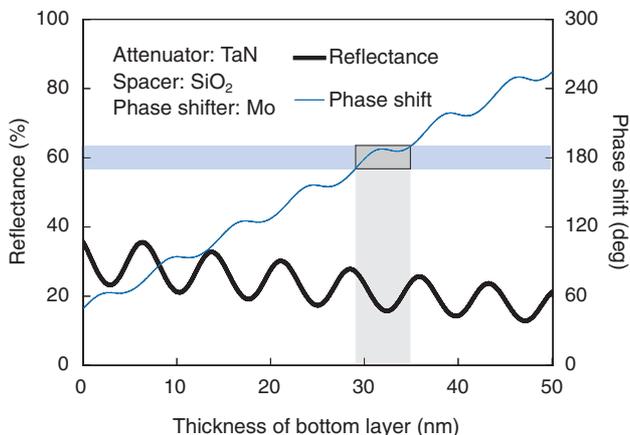


圖 3. TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆在波長 13.5 nm 的反射率及相位差。

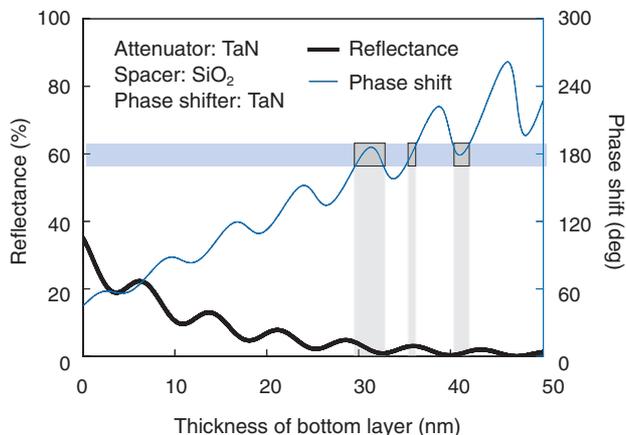


圖 4. TaN/SiO₂/TaN 吸收層膜堆在波長 13.5 nm 的反射率及相位差。

檢視對比。隨鉬層厚度增加，吸收膜堆的反射率呈現正弦曲線變化且緩慢遞減，膜堆與空間區域相對的相差呈增加趨勢。在 180° 相差時，鉬層的厚度是 30.1 nm，而此時的反射率比 (R_2/R_1) 是 32.6%，結構滿足高反射率 APSM 的要求。圖 3 也顯示當鉬層厚度控制在 29 nm 到 35 nm 之間，相差可以控制在 $180^\circ \pm 10^\circ$ 之內⁽¹⁰⁾。

同樣的，圖 4 顯示 TaN/SiO₂/TaN 吸收層膜堆 (一般反射率 APSM 結構) 在波長 13.5 nm 的反射率及相位差。頂層 TaN 層及 SiO₂ 層的厚度固定為 1.9 nm 及 31.8 nm，以得到好的深紫外光檢視對比。隨底層 TaN 厚度增加，吸收膜堆的反射率相較前者迅速降低，與之前的高反射率 APSM 不同，這是因為在極紫外光區 TaN 的消光係數比 Mo 的消光係數大一個級數；不過兩種 APSM 相差增加趨勢是一致的。在達到 180° 相差時，底部 TaN 層的厚度是 30.4 nm、35.7 nm 及 40.7 nm，且在 13.5 nm 波長時的相對反射率比是 4.4%、4.3% 及 0.9%。

3. 吸收層在深紫外光檢視波長範圍的反射率

在深紫外光檢視波長時，ML 反射鏡的反射率大約是 60%，沒有抗反射處理的吸收膜堆 (如 TaN 或 Cr) 的反射率則超過 30%，依此換算，檢視對比度不到 30%，此將使影像難於辨識，圖案缺陷不易檢測。因此，為增加對比度，降低吸收膜堆在深紫外光檢視波長的反射率是唯一的方法。本 APSM

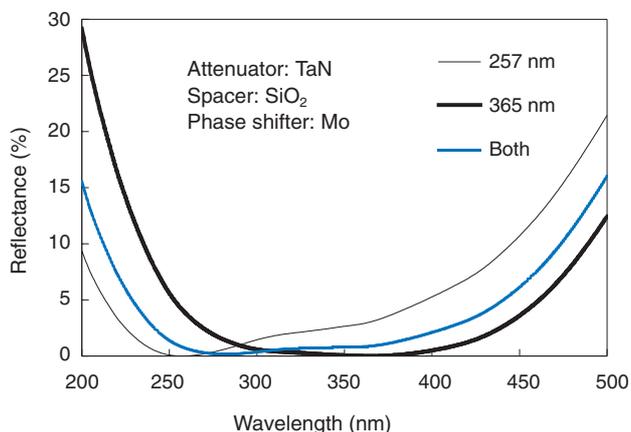


圖 5. TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆在 DUV 檢視波長範圍的反射率。

結構是利用控制間隔層及頂部衰減層的厚度，以降低吸收膜堆的反射率，最好條件下可以使反射率低於 1%。

圖 5 顯示 TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆在深紫外光檢視波長範圍的反射率，當頂部 TaN 層的厚度為 4.4 nm、配合 SiO₂ 層厚度為 27.2 nm 時，在 257 nm 波長的反射率能降至 1% 以下。當檢視波長改變時，我們一樣可以調變 SiO₂ 層及頂部 TaN 層的厚度，以調整最小反射率區落於 365 nm 或其他所需波長位置。此做法僅需改變膜層厚度，結構排列不需調整，相當適合於實際製作流程。

相同的，圖 6 顯示 TaN/SiO₂/TaN 吸收膜堆在

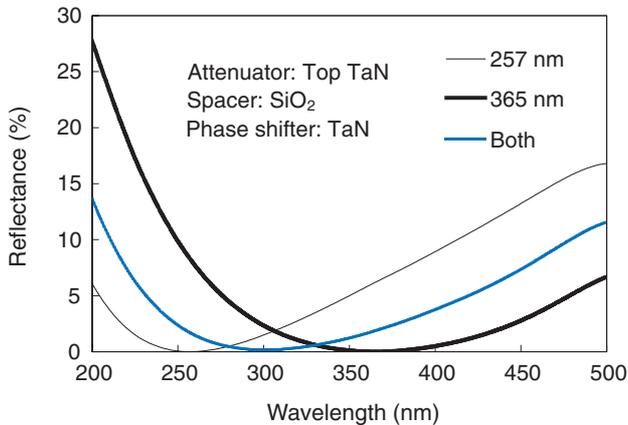


圖 6. TaN/SiO₂/TaN 吸收膜堆在 DUV 檢視波長範圍的反射率。

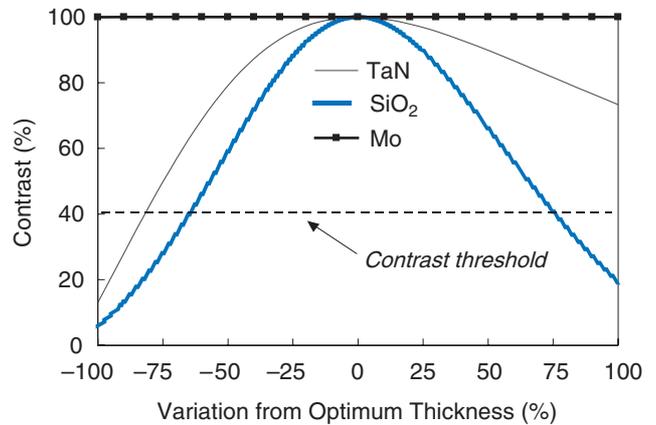


圖 7. 檢視對比與 TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆厚度變化的關係。

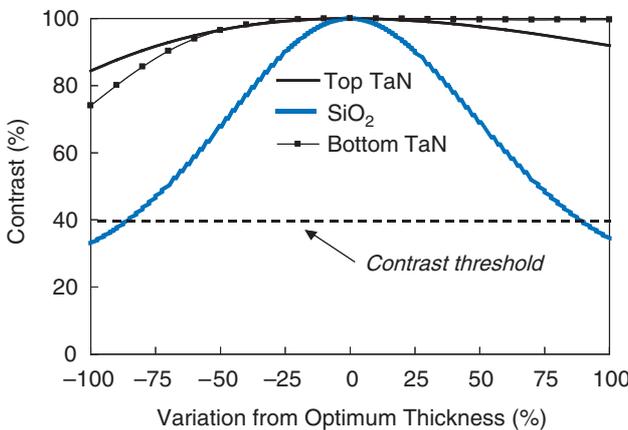


圖 8. 檢視對比與 TaN/SiO₂/TaN 吸收膜堆厚度變化的關係。

檢視波長範圍的反射率。當頂部 TaN 層的厚度為 1.9 nm 且 SiO₂ 層厚度為 31.8 nm 時，在 257 nm 波長的反射率低於 1%。厚度同樣可調整使最小反射率區落於 365 nm 或其他所需波長位置。

4. 檢視對比及厚度變化容忍度

之前的討論可知增加檢視對比度的最佳厚度如何決定。但是在實際製程中，薄膜沉積的厚度總是會有些微的誤差，會導致對比度的降低，所以必須事先考量薄膜厚度誤差的容忍度。

在沒有覆蓋抗反射層時，ML 反射鏡與 TaN 或 Cr 吸收膜堆間之檢視對比小於 30%，然而缺陷辨識的檢視對比應該大於 40%⁽¹¹⁾。圖 7 顯示檢視對比

與 TaN/SiO₂/Mo 吸收膜堆厚度的關係，明顯可見隨著最佳厚度的誤差增加，檢視對比下降。在吸收層結構中，SiO₂ 層（間隔層）是對檢視對比最敏感的一層，但是即使 SiO₂ 層的厚度偏差達 -63% 或 75%，檢視對比依然可以維持 40% 以上。

相同的，檢視對比隨 TaN/SiO₂/TaN 厚度的變化如圖 8 所示，厚度誤差容忍度由 -85% 到 88%。因此，我們可以針對最大的厚度誤差容忍度來調整吸收結構的厚度，以符合反射率比的要求，以及在極紫外光波長時反射型式 APSM 對相位差的要求。

四、結論

在本文中，我們展示了反射型衰減式相位移光罩的最新結構，是以 Fabry-Perot 結構為基礎概念，且使用一般的極紫外光微影光罩材料。這種光罩不僅可以在極紫外光波長產生高反射率的 180° 相位差，也在深紫外波長具有高檢視對比。而光罩結構頂層的導電性高，可以改善電子束曝光時的電荷累積效應。選擇不同的底部層材料及底部層厚度時，吸收膜堆對 ML 反射鏡的反射率比變化可以從 32.6% (TaN/SiO₂/Mo) 到 4.4% (TaN/SiO₂/TaN)。檢視對比度最高可提升到 99%，且具有高厚度控制容忍度。而我們可以針對高厚度容忍度來調整吸收結構的厚度，以符合反射率比的要求，以及針對不同

反射型式 APSM 在極紫外光波長的相差之要求。吸收膜堆的總厚可控制在 80 nm 以內，符合膜堆高度的要求，可避免嚴重的幾何遮影效應。

參考文獻

1. Semiconductor Industry Association, *International Technology Roadmap for Semiconductor 2004 Updated*, (SIA Publication, 2004).
2. F. D. Lai, C. M. Chang, L. A. Wang, and T. S. Yih, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **2**, 3062 (2003).
3. P. Y. Yan, G. Zhang, A. Ma, and T. Liang, *SPIE*, **4343**, 409 (2001).
4. K. H. Smith, J. R. Wasson, P. J. S. Mangat, W. J. Dauksher, and D. J. Resnick, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, 2906 (2001).
5. S. I. Han, J. R. Wasson, P. J. S. Mangat, J. L. Cobb, K. Lucas, and S. D. Hector, *SPIE*, **4688**, 481 (2002).
6. B. Lu, J. R. Wasson, E. J. Weisbrod, Z. Masnyj, P. J. S. Mangat, K. Nordquist, and D. Resnick, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **20**, 3029 (2002).
7. H. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters 2nd*, Adam Hilger Ltd. (1986).
8. B. L. Henke, E. M. Gullikson, and J. C. Davis, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **54** (2), 181 (1993).
9. http://www.cxro.lbl.gov/optical_constants/
10. E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press (1998).
11. S. Hector and P. Mangat, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19**, 2612 (2001).

-
- 陳學禮先生為國立台灣大學光電博士，現任國立台灣大學材料系助理教授。
 - 鄭旭君先生為國立清華大學原子科學系碩士，現任國家實驗研究院國家奈米元件實驗室助理研究員。
 - 洪鶯玲小姐為國立交通大學物理碩士，現任國家實驗研究院國家奈米元件實驗室助理研究員。
 - 朱鐵吉先生為日本東北大學原子物理博士，現任元培科技學院放射技術系教授。
 - Hsuen-Li Chen received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Taiwan University. He is currently an assistant professor in the Department of Materials Science and Engineering at National Taiwan University.
 - Hsu-Chun Cheng received his M.S. in atomic science from National Tsing Hua University. He is currently an assistant researcher in the National Nano Device Laboratories.
 - Ying-Ling Hong received her M.S. in physics from National Chiao Tung University. She is currently an assistant researcher in the National Nano Device Laboratories.
 - Tieh-Chi Chu received his Ph.D. in atomic physics from Tohoku University, Japan. He is currently a professor in the Department of Radiology Technology at Yuanpei Institute of Science and Technology.