

國立交通大學

光電工程研究所

碩士論文

白光消色差相移干涉術量測三維表面輪廓

White-light Achromatic Phase Shifting Interferometry  
for Three Dimension Surface Profile Measurement

研究生：陳建丞

指導教授：陸懋宏教授

中華民國 九十三年 七月

# 白光消色差相移干涉術量測三維表面輪廓

White-light Achromatic Phase Shifting Interferometry  
for Three Dimension Surface Profile Measurement

研究生：陳建丞

Student : Chien-Cheng Chen

指導教授：陸懋宏

Advisor : Mao-Hong Lu



A Thesis

Submitted to Institute of Electro-Optical Engineering  
College of Electronic Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

In partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master

in

Electro-Optical Engineering

July 2004

HsinChu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十三年 七月

# 白光消色差相移干涉術量測三維表面輪廓

研 究 生：陳建丞

指 導 教 授：陸懋宏

國立交通大學 光電工程研究所

## 摘 要

本論文主要是研究白光相移干涉術進行三維表面量測的能力。架設 Linnik 式干涉顯微鏡，並使用旋轉波片的消色差相移法。

使用的白光光源是石英鹵素鎢絲燈，涵蓋可見光範圍(400~700 nm)的光源。理論上光源被要求是高斯功率光譜分佈，然而實際上石英鹵素鎢絲燈不是很好的高斯光譜分佈。因此分別加入兩個不同中心波長(589.5nm 與 629.5nm)的窄帶濾波片，來得到較佳的高斯分佈。最後將量測結果與使用 Zygo 儀器(NewView5000)所量測的結果進行比較。

論文中將相移架構分別放在輸入端與輸出端進行比較。比較結果可知輸入端在量測精度、對比度和重複性上都比輸出端優良，同時輸入端可避免在相移架構中波片旋轉所造成干涉條紋成像飄移的問題。使用相移法通常可達非常精密的縱向解析，但還是有著縱向深度量測範圍的限制。如能考慮白光同調長度短的特性，再結合最大強度位置掃描，將可大大提升縱向深度量測範圍。

# White-light Achromatic Phase Shifting Interferometry for Three Dimension Surface Profile Measurement

Student: Chien-Cheng Chen

Advisor: Mao-Hong Lu

Institute of Electro-Optical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

This work focuses on the abilities of white-light phase-shifting interferometry (WLPSI) in 3-D surface profile measurement. We set up a Linnik type interferometric microscope in which an achromatic phase-shifting method with rotating waveplate is used.

A quartz tungsten-halogen(QTH) lamp, covering the visible spectral range 400~700 nm, is used as the white-light source. In this theory the light source is required to have a Gaussian spectral power distribution. However, the QTH lamp does not have a good Gaussian spectral distribution. Two narrowband band-pass filters with central wavelength at 589.5nm and 629.5nm are used in order to get better Gaussian distribution. The measured results are compared with those measured by a Zygo instrument(Newview5000).

In this work, the phase-shifting module is placed at input and output ends for comparison. The comparison shows that the input end case has better performance than the output end case in the measurement accuracy, contrast and repeatability. In the input end case the shift of interference pattern at the image plane can be avoided when the waveplate rotates in the phase-shifting module. Although phase-shifting method usually gives very good vertical resolution, it still suffers from a limited measurement range in the vertical direction. If we consider the characteristics of the short coherence length of white-light, this method combined with a vertical scanning of maximum intensity position can increase the vertical depth measurement range greatly.

# 誌 謝

碩士班兩年的日子也告一個段落了，回想兩年來生活上的種種，心裡感觸很多。本論文能順利完成，要感謝很多人。首先要感謝我的指導教授 陸懋宏老師，在這兩年中給予的指導與建議，讓我在實驗過程得到許多啟發，實力也漸漸培養出來，同時在為人處事方面也是獲益良多，在此感謝老師的指導。

感謝高清芬學姐在實驗儀器支持及經驗分享上不遺餘力的幫助，若不是她我想此論文不可能順利完成。林暉雄學長在實驗儀器提供和加工上的幫助。桑競存、施至柔、林育正、洪文明和朱淑君學長姐在實驗架設上的指導和經驗的傳授，特別是林育正學長在干涉儀架設上入門的傳授。徐得銘學長給予的討論和指教。王俊勛學長在生活中的關心和幫助，以及張維中學長給予的建議。

此外感謝實驗室同學馮致華、陳慶勳、呂怡瑱在這兩年中生活上的陪伴、課業上的討論與互相幫助。還有學弟們盧俊瑋、李廷彥、戴銘成為實驗室帶來新的活力。實驗室外，國科會精儀中心廖俚境先生在量測上的幫助，王夢偉學長在生活及實驗上所提供的寶貴意見，林榮祥、余俊德同學在機台訓練上的幫忙，以及陳明彰同學在量測上的幫忙，室友陳思成在生活及論文上的幫助。

感謝在大學中帶我做專題的學長姐陳榮池、黃彥淳、蔡慧娟、林至軒，因為他們讓我知道如何去做研究，非常謝謝過去他們給予的幫助。還有過去大學宿舍幫的同學們，特別是銘顯、長勳、彥邦、凱鈞、書豪等…，這些一同伴我成長的好朋友。

感謝英慧對我的支持與鼓勵，因為妳的出現，使我的生活豐富起來，不再是以往單調的感覺，在研究的路上也走的更有信心。

最後，我要特別感謝我的父母親，沒有他們就沒有今天的我，在大學六年生活中因為他們我才能安心順利完成學業，要說的感謝太多，在此僅以此論文獻給我敬愛的父母、師長、英慧以及愛護關心我的每一位朋友。同時我會懷念那張陪伴我度過無數夜晚的光學桌。每當黎明破曉獨自一人踏出實驗室，在關上大門那一刻心裡的感覺實在是非言語能形容。

建丞

于 風城交大

2004年7月

凌晨 7:20

# 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
誌謝 .....	III
目錄 .....	V
表目錄 .....	VIII
圖目錄 .....	IX
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 前言 .....	1
1.2 研究動機 .....	2
<b>第二章 白光干涉術理論與方法 .....</b>	<b>6</b>
2.1 干涉理論 .....	6
2.1.1 簡介 .....	6
2.1.2 白光干涉理論 .....	7
2.1.3 干涉顯微鏡的基本型態 .....	9
2.2 零階干涉條紋鑑定法 .....	10
2.3 相移干涉術 .....	13
2.3.1 推動相移的方法 .....	14
2.4 消色差相移法 .....	16
2.4.1 輸出端消色差相移法 .....	16
2.4.2 輸入端消色差相移法 .....	17
2.5 波片組 Jones 矩陣計算 .....	18
2.5.1 Jones 向量 .....	18

2.5.2	Jones 矩陣 .....	19
2.5.3	輸出端消色差波片組 Jones 矩陣計算 .....	21
2.5.4	輸入端消色差波片組 Jones 矩陣計算 .....	28
2.6	消色差相移演算法 .....	32
2.7	相位重建技術 .....	36
2.8	相位重建技術—細胞自動機械法 .....	37
<b>第三章 系統架構與量測步驟 .....</b>		<b>42</b>
3.1	實驗系統的架構 .....	42
3.1.1	輸出端消色差相移的系統架構 .....	42
3.1.2	輸入端消色差相移的系統架構 .....	48
3.1.3	系統對光部份 .....	50
3.2	量測步驟 .....	53
3.2.1	輸出端消色差相移量測步驟 .....	53
3.2.2	輸入端消色差相移量測步驟 .....	56
<b>第四章 量測結果 .....</b>		<b>58</b>
4.1	白光光源性質的量測 .....	58
4.2	矽晶片上對準鍵量測 .....	61
4.2.1	輸出端消色差相移的量測結果 .....	61
4.2.2	輸入端消色差相移的量測結果 .....	65
4.3	矽晶片八階量化繞射元件量測 .....	68
4.3.1	輸出端消色差相移的量測結果 .....	68
4.3.2	輸入端消色差相移的量測結果 .....	72
4.4	矽晶片八階量化濾波元件量測 .....	74
4.4.1	輸出端消色差相移的量測結果 .....	75
4.4.2	輸入端消色差相移的量測結果 .....	78

4.5	步階深度量測值的重複性 .....	81
<b>第五章</b>	<b>分析與討論 .....</b>	<b>83</b>
5.1	輸出端成像飄移問題 .....	83
5.2	波片組組裝誤差 .....	85
5.3	輸出端與輸入端消色差相移的比較 .....	86
5.3.1	精確度比較 .....	86
5.3.2	對比度比較 .....	86
5.3.3	重複性比較 .....	88
5.3.4	架構比較 .....	88
5.3.5	相移的準確度比較 .....	89
5.4	三維表面輪廓誤判 .....	92
5.5	系統討論與誤差分析 .....	93
5.5.1	振動及空氣擾動 .....	93
5.5.2	訊號量化的誤差 .....	95
<b>第六章</b>	<b>結論 .....</b>	<b>97</b>
	<b>參考文獻 .....</b>	<b>99</b>
	<b>附錄 A 消色差波片組校正 .....</b>	<b>101</b>
	<b>簡歷 .....</b>	<b>104</b>

# 表 目 錄

表 1.1	三維形貌量測在各產業上的主要用途 .....	1
表 1.2	表面輪廓測量方法 .....	4
表 2.1	一些偏極態之 Jones 向量表示式 .....	19
表 2.2	常用光學元件之 Jones 矩陣表示式 .....	20
表 2.3	各波長輸出振幅與相位差 .....	24
表 2.4	各波長對於水平線偏入射，旋轉偏極片角度與相位關係 .....	25
表 2.5	各波長對於垂直線偏入射，旋轉偏極片角度與相位關係 .....	26
表 2.6	各波長在不同角度 $\theta$ 的相位差 .....	27
表 2.7	各波長在不同角度 $\theta$ 的相移改變量 .....	27
表 2.8	各波長輸出振幅與半波片 $\theta$ 角關係 .....	29
表 2.9	各波長在不同角度 $\theta$ 的相位差 .....	31
表 2.10	各波長在不同角度 $\theta$ 的相移改變量 .....	31
表 3.1	白光量測系統的光學元件表 .....	46
表 4.1	輸出端七次步階深度量測值 .....	82
表 4.2	輸入端七次步階深度量測值 .....	82
表 5.1	輸出端與輸入端精確度比較 .....	86
表 5.2	輸出端相移量偏差對深度誤差的影響 .....	91
表 5.3	輸入端相移量偏差對深度誤差的影響 .....	91
表 5.4	光強度數據量化對深度誤差的影響 .....	96
表 A.1	波片校正的元件表 .....	102

# 圖 目 錄

圖 1.1	三維輪廓儀的量測範圍與解析度	2
圖 2.1	干涉顯微鏡基本型態	10
圖 2.2	商業上常用 Mirau 干涉儀架構	11
圖 2.3	常見白光光源光程差與強度關係	12
圖 2.4	化學蝕刻的矽樣品表面輪廓圖	13
圖 2.5	相移干涉術基本原理示意圖	14
圖 2.6	干涉儀中四種相移的方法	15
圖 2.7	輸出端消色差波片組架構圖	17
圖 2.8	輸入端消色差波片組架構圖	18
圖 2.9	旋轉半波片 $\theta$ 角與通過波片組之偏極關係圖	29
圖 2.10	細胞自動機械法的相位重建方法	38
圖 2.11	細胞自動機械法流程圖	41
圖 3.1	輸出端消色差相移的系統架構圖	44
圖 3.2	輸出端消色差波片組架構圖	44
圖 3.3	Linnik 式干涉顯微鏡架構照片	45
圖 3.4	白光干涉系統架構照片	45
圖 3.5	輸入端消色差相移的系統架構圖	49
圖 3.6	輸入端消色差波片組架構圖	49
圖 3.7	綠光氦氖雷射對光光路圖	51
圖 3.8	白光干涉量測光路圖	51
圖 3.9	綠光氦氖雷射對光實際照片	52
圖 3.10	白光干涉量測實際照片	52
圖 3.11	影像擷取的操作介面	53
圖 3.12	旋轉平台的控制介面	54

圖 3.13 輸出端消色差相移法量測流程圖 .....	55
圖 3.14 輸入端消色差相移法量測流程圖 .....	57
圖 4.1 150W 石英鹵素鎢絲燈光源光譜圖 .....	59
圖 4.2 加入 589.5nm 濾波片的光譜圖 .....	59
圖 4.3 加入 629.5nm 濾波片的光譜圖 .....	59
圖 4.4 沒加濾波片的同調長度圖 .....	60
圖 4.5 加入 589.5nm 窄帶通濾波片的同調長度圖 .....	61
圖 4.6 加入 629.5nm 窄帶通濾波片的同調長度圖 .....	61
圖 4.7 旋轉線偏 45 度相移的五幅干涉圖形 .....	62
圖 4.8 對準鍵三維表面輪廓圖 .....	63
圖 4.9 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 178.7234nm) .....	63
圖 4.10 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 175.5319nm) .....	64
圖 4.11 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 178.7234nm) .....	64
圖 4.12 Zygo 所測之對準鍵三維表面輪廓圖 .....	64
圖 4.13 Zygo 所測之對準鍵截面輪廓圖(高度差 181.424nm) .....	65
圖 4.14 旋轉半波片 22.5 度相移的五幅干涉圖形 .....	66
圖 4.15 對準鍵三維表面輪廓圖 .....	67
圖 4.16 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 181.9149nm) .....	67
圖 4.17 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 182.9787nm) .....	67
圖 4.18 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 181.9149nm) .....	68
圖 4.19 旋轉線偏 45 度相移的五幅干涉圖形 .....	69
圖 4.20 八階繞射元件三維表面輪廓圖(中心部份) .....	70
圖 4.21 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 479.7297nm) .....	70
圖 4.22 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 486.4865nm) .....	70
圖 4.23 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 472.973nm) .....	71
圖 4.24 Zygo 所測之八階繞射元件三維表面輪廓圖 .....	71

圖 4.25 Zygo 所測之八階繞射元件截面輪廓圖(高度差 480.314nm)	71
圖 4.26 旋轉半波片 22.5 度相移的五幅干涉圖形	72
圖 4.27 八階繞射元件三維表面輪廓圖(中心部份)	73
圖 4.28 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 479.7297nm)	73
圖 4.29 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 479.7297nm)	74
圖 4.30 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 476.3514nm)	74
圖 4.31 旋轉線偏 45 度相移的五幅干涉圖形	75
圖 4.32 八階濾波元件三維表面輪廓圖(中心部份)	76
圖 4.33 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 500nm)	76
圖 4.34 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 496.6216nm)	77
圖 4.35 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 506.7568nm)	77
圖 4.36 Zygo 所測之八階濾波元件三維表面輪廓圖	77
圖 4.37 Zygo 所測之八階濾波元件截面輪廓圖(高度差 499.612nm)	78
圖 4.38 旋轉半波片 22.5 度相移的五幅干涉圖形	79
圖 4.39 八階濾波元件三維表面輪廓圖(中心部份)	80
圖 4.40 沒加濾波片的截面輪廓圖(高度差 500nm)	80
圖 4.41 加入 589.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 496.6216nm)	80
圖 4.42 加入 629.5nm 濾波片的截面輪廓圖(高度差 500nm)	81
圖 5.1 成像飄移示意圖	83
圖 5.2 OptiAngle 儀器外觀	84
圖 5.3 輸出端波片組有誤差的五幅干涉圖	85
圖 5.4 輸出端所測三維輪廓的灰階圖	87
圖 5.5 輸入端所測三維輪廓的灰階圖	87
圖 5.6 輸出端未加濾波片對所有畫素點相移角度的分佈	89
圖 5.7 輸出端加 589.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈	89
圖 5.8 輸出端加 629.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈	89

圖 5.9 輸入端未加濾波片對所有畫素點相移角度的分佈 .....	90
圖 5.10 輸入端加 589.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈 .....	90
圖 5.11 輸入端加 629.5nm 濾波片對所有畫素點相移角度的分佈 .....	90
圖 5.12 波片順時針旋轉所得結果 .....	92
圖 5.13 波片逆時針旋轉所得結果 .....	93
圖 A.1 輸出端消色差波片組架構圖 .....	101
圖 A.2 半波片校正圖 .....	103
圖 A.3 四分之一波片校正圖 .....	103

