

國立清華大學 電機工程學系

實作專題研究摘要

3D Printing of Low-cost Terahertz
Device—Transmission Diffraction Gratings

低成本3D 列印太赫茲元件—
穿透式繞射光柵

專題領域：光電領域

組 別：A311

指導教授：楊尚樺

組員姓名：盧柏鈞

研究期間：111年7月1日至112年4月30日止，共10個月

摘要

近年來太赫茲科技在國際上受到相當廣泛的關注，因為其可做到無損檢測，針對化學藥劑、藥物、空氣品質、有毒氣體、爆裂物及生化機構提供相當完整的識別，而對於醫療透視影像及軍事探測上更有極大的影響，同時 6G 通訊也是其一大發展重點。然而，現今太赫茲系統大多僅可見於實驗室。原因在於系統最重要的部份：太赫茲發射源普遍存在有低太赫茲輸出功率、極低轉換效率、以及高成本且結構複雜等問題。本研究專題著重於研發以低成本、高輸出量的 3D 列印技術，實現可與太赫茲發射源整合的 3D 列印太赫茲元件及系統。

在本次專題中，經過閱讀文獻資料及考量實驗可行性後，我分別以實驗室現有的光固化樹脂(UV curing resin)以及聚丙烯(PP)作為 3D 列印材料，設計並印製適用於 0.2 THz 的兩種穿透式繞射光柵--二元相位光柵(binary phase grating)及閃耀光柵(blazed grating)，以太赫茲相機量測其相關特性及分析處理量測數據，並加以比較不同材料及光柵種類的量測結果，成功得到與預期相符的結果，且已有足夠能力設計並製造出適用其他波長範圍或分光角度的太赫茲光柵，期待未來能加以運用於相關實驗，甚至整合成一系統，達到**方便、低成本、快速製造**太赫茲元件的目的。

一、 研究動機與目的

近年來太赫茲科技在國際上受到相當廣泛的關注，因為其可做到無損檢測，針對化學藥劑、藥物、空氣品質、有毒氣體、爆裂物及生化機構提供相當完整的識別，而對於醫療透視影像及軍事探測上更有極大的影響。然而，現今太赫茲系統大多僅可見於實驗室。原因在於系統最重要的部份：太赫茲發射源普遍存在有低太赫茲輸出功率、極低轉換效率、以及高成本且結構複雜等問題。本研究專題著重於研發以低成本、高輸出量的3D 列印技術，實現可與太赫茲發射源整合的3D 列印太赫茲元件及系統。

光柵是光電領域使用相當廣泛的光學元件之一，除了一般的光學實驗外，可用於如傅立葉轉換紅外光譜(FTIR)系統，從物質成分分析；以及光學成像系統，以光柵達到空間濾波、線性編碼等；也可運用於通訊系統中波長分波多工(WDM)。

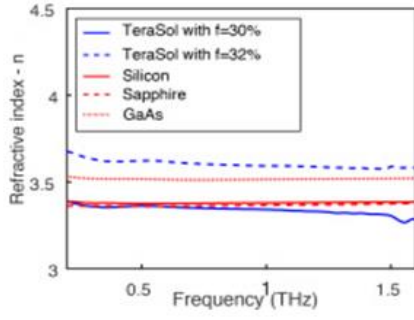
繞射光柵透過有規律的結構，使入射光的振幅或相位（或兩者同時）受到週期性空間調製，常作為分光器件，此色散元件在太赫茲光譜領域十分重要，市面上卻很少生產太赫茲波段適用的繞射光柵，且材料單一，而因為3D 列印技術的進步，其精度可達微米等級，又因為太赫茲的長波長性質(0.1~1 毫米左右)，尺度和3D 列印的精度相符，以及易於件模等特性，以3D 列印自製太赫茲光柵，能達到**低成本、快速、高效、高解析度、高尺寸及材料自由度**等好處，是值得加以研究並運用的技術。

二、 研究方法與步驟

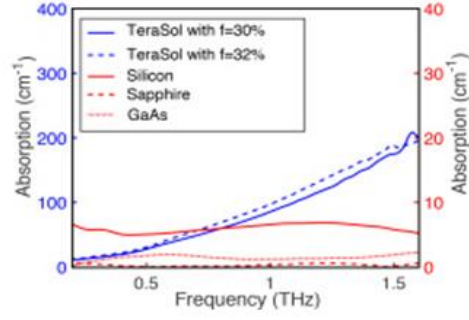
1. 相關文獻探討

了解實驗室現有及相關論文中提及之各樣材料於太赫茲波段的折射率(refractive index)以及吸收係數(absorption coefficient)等數據，使我們能依照需求、可行性選擇材料，由圖1可得常見基底材料，如矽(Si)、砷化鎵(GaAs)、藍寶石(Sapphire)，其折射率皆大於3，相比之下，由圖2可得3D 列印適用之材料，如樹脂(resin)和聚乳酸(PLA)等材料於0.2 THz的吸收皆相當小，但樹脂和聚乳酸的折射率僅約為1.7。

為了確認實驗室現有材料自製太赫茲適用之光柵的可行性，以實驗室現有折射率和聚乳酸接近且吸收係數更小的樹脂做為3D 列印材料，試著仿照所參考的論文，自製穿透式繞射光柵，並比較相關結果。另外選取聚丙烯(PP)來做為對照組，雖此材料並非3D 列印常見材料，且折射率較小，但其在更高頻率下，有別於他種3D 列印材料吸收係數會大幅上升的情況，聚丙烯對太赫茲的吸收還是趨近於0，以此材料來驗證使用不同材料(不同折射率下)，製作的光柵效果。

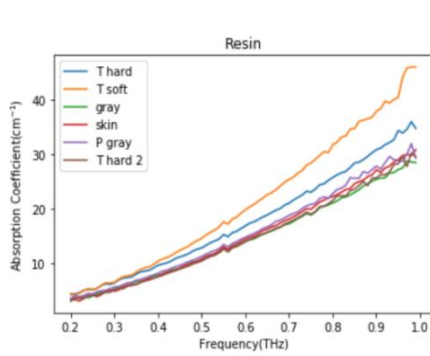


(a)

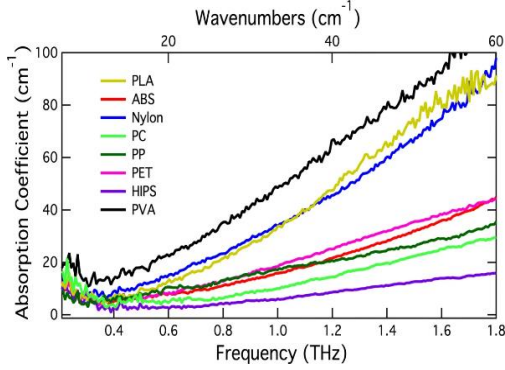


(b)

圖1、常見基底材料的(a)折射率(b)吸收係數



(a)



(b)

圖2、(a)樹脂吸收係數(b)聚乳酸、聚丙烯等塑料吸收係數

2. 光柵設計

根據繞射理論，可得二元相位光柵，如圖3，可由以下式子表示

$$f(x) = \left\{ \left[\text{rect}\left(\frac{2x}{d}\right) \otimes \delta(x) \right] + \left[\text{rect}\left(\frac{2x}{d}\right) \otimes \delta\left(x - \frac{d}{2}\right) \right] \exp(i\phi) \right\} \otimes \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right)$$

而閃耀光柵，如圖4，可由以下式子表示

$$f(x) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{d}\right) \exp\left(\frac{i\phi x}{d}\right) \right\} \otimes \text{comb}\left(\frac{x}{d}\right)$$

ϕ 為相位差

$$\phi = (2\pi h/\lambda)(n - 1)$$

h 為光柵高度，令二元相位光柵中

$$h = \lambda/2(n - 1)$$

令閃耀光柵中

$$h = \lambda/(n - 1)$$

d 為結構週期，實驗設計光柵適用在在頻率 f 為0.2 THz下，即波長 $\lambda = 1.5$ 毫米

選擇 $d = 2\lambda = 3$ 毫米

此光柵高度和結構週期經計算能使太赫茲光源一級繞射峰位於30度位置

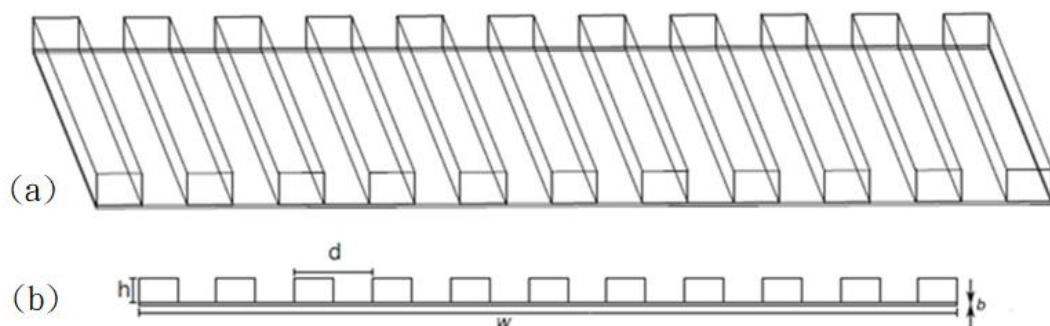


圖3、二元相位光柵示意圖，(a)俯視圖(b)側視圖

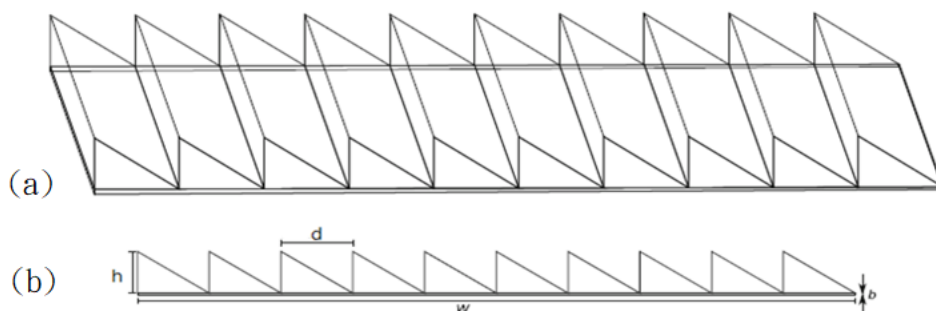


圖4、閃耀光柵示意圖，(a)俯視圖(b)側視圖

3. 光柵製造

i. 樹脂二元相位光柵

以光固化Phrozen Sonic Mini 8K 3D列印機打印繞射光柵，配備雙Z軸，使列印過程穩定並確保列印品質，其精度為22微米(1152 ppi)，材料為紫外線環氧樹脂(UV curing resin)。

經量測，此樹脂折射率 $n = 1.7$ ，得光柵高度 $h = 1.07$ 毫米，取光柵長 $L = 20$ 毫米，寬 $W = 37.5$ 毫米毫米 (12.5個週期)，如圖5(a)

ii. 樹脂閃耀光柵

3D列印相關資訊同i，得光柵高度 $h = 2.14$ 毫米，取光柵長 $L = 20$ 毫米，寬 $W = 27$ 毫米 (9個週期)，如圖5(b)

iii. 聚丙烯二元相位光柵

以Roland SRM-20桌上型3軸CNC雕刻機切割聚丙烯，其精度可達0.01毫米，選用刀具直徑為1毫米。

經過量測，聚丙烯折射率 $n = 1.56$ ，得光柵高度 $h = 1.34$ 毫米，取光柵長 $L = 20$ 毫米，寬 $W = 31.5$ 毫米 (10.5個週期)，如圖5(c)

將光柵加印於一直徑50毫米圓形底板，使其大小與實驗室透鏡鏡座等光學架大小相符，其厚度 $b = 1.5$ 毫米，此厚度能使光柵有足夠支撐，不會彎曲或斷裂，且易於安裝，方便後續實驗操作。

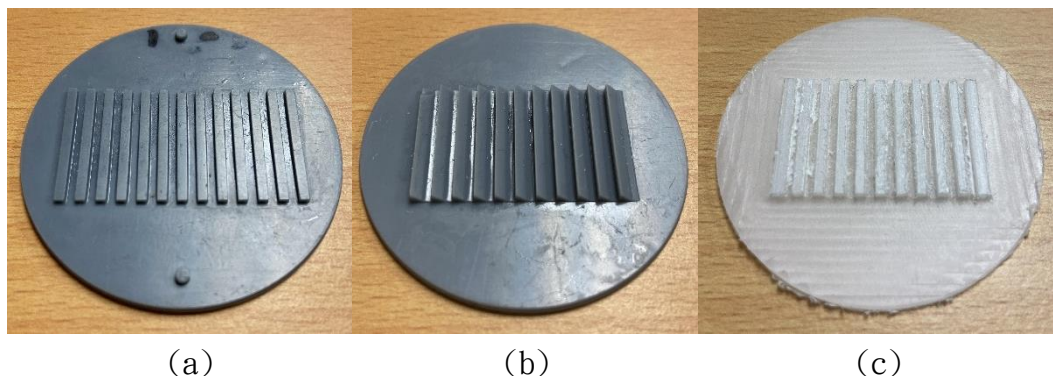


圖5、(a)樹脂二元相位光柵(b)樹脂閃耀光柵(c)聚丙烯二元相位光柵

4. 太赫茲光源

由四通道可調式雷射(Four Channels Wavelength Tunable Laser Source) TLG-200，如圖6(a)，產生33.33 GHz雷射，再連接上倍頻器(Frequency Multiplier)，將頻率放大6倍，產生出0.2 THz光源，其所生成光源為高斯光束(gaussian beam)，可視為一平行光源，其光束直徑約為10毫米。



圖6、(a)四通道可調式雷射發射源(b)太赫茲相機

5. 量測工具

量測工具為MICROXCAM-384I-THZ太赫茲相機，如圖6(b)，為一幅射熱紅外線感測器(uncooled microbolometer FPA)，適用頻率範圍為4.25~0.094 THz，其解析度為384 x 288相素，相素大小為35微米。

6. 實驗系統架設

於滑軌架設太赫茲光源、光柵、太赫茲相機，將光柵安裝於動態光學調整架(kinematic mount)，能微調光柵傾角，使其確保與入射光呈現垂直，光柵和太赫茲光源固定距離 D ，以電動精密旋轉平台(motorized precision rotation stage)控制太赫茲相機使其能以光柵為圓心，與其保持固定距離 R 旋轉，改變接收角度 θ ，以測量各個角度下的太赫茲訊號，如圖7。

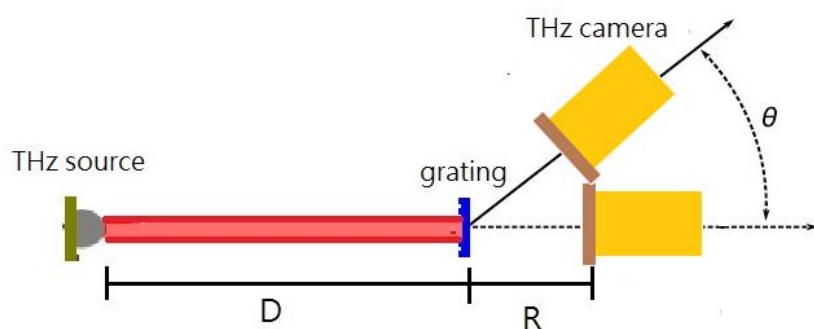


圖7、實驗裝置

三、 實驗結果分析

1. 太赫茲相機原始圖片

太赫茲光源和光柵固定距離50公分，光柵和太赫茲相機距離10公分，旋轉太赫茲相機得到通過各光柵於各角度之原始圖片，見圖8、圖9、圖10。

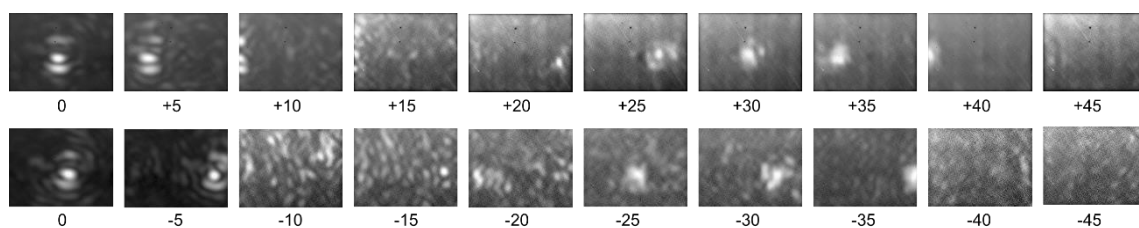


圖8、樹脂二元相位光柵之太赫茲相機原始圖片，數值為旋轉角度

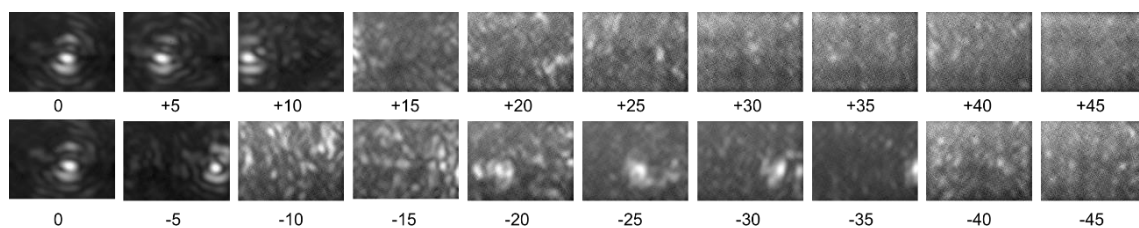


圖9、樹脂閃耀光柵之太赫茲相機原始圖片，數值為旋轉角度

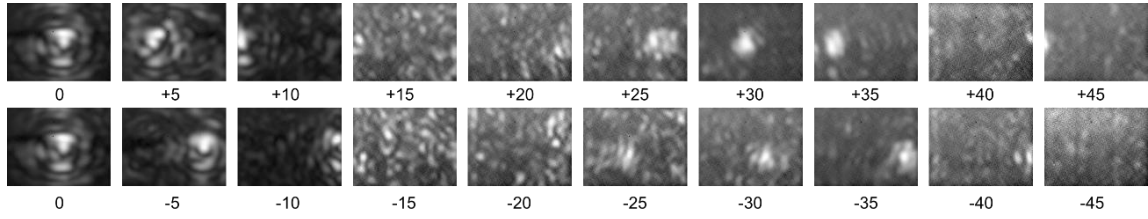


圖10、聚丙稀二元相位光柵之太赫茲相機原始圖片，數值為旋轉角度

由太赫茲相機所得相片可明確發現所設計的二元相位光柵在旋轉正負30度及閃耀光柵負30度附近位置有明顯聚焦效果，與預期結果相符，而受限於太赫茲相機無法由原始數據得到絕對強度之相關數值，僅能在一張相片比較出相對強度，且由於太赫茲相機的成像原理，易受背景輻射熱影響，形成雜訊，每次經過旋轉後，背景皆有所變化，因此須以其他檢測器測量，才可得每個繞射角度下之相對於無光柵強況下之強度，圖11為兩種光柵以聚乳酸製造之相關論文所得預期結果。

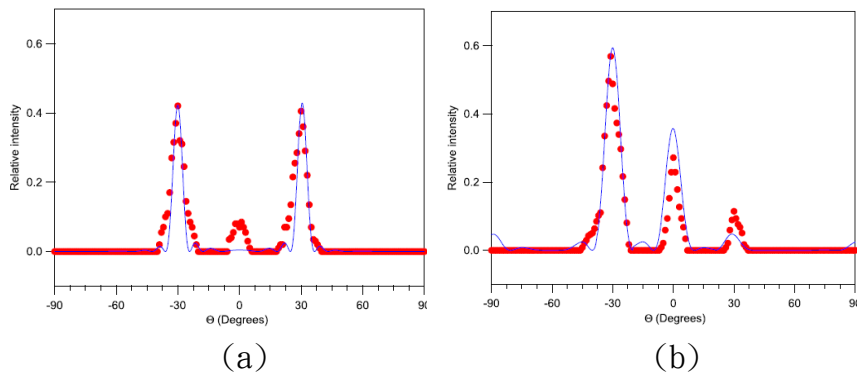


圖11、聚乳酸製造之(a)二元相位光柵(b)閃耀光柵太赫茲相對強度

而聚丙稀所得之原始圖片可看出聚焦效果較為差，可能是因聚丙稀是由CNC雕刻機切割而成，其切割所形成之毛邊及不平整的表面等誤差帶來之影響，後續可由打磨等處理優化此問題。

若以單一光柵於不同太赫茲頻率下進行量測，其相對強度量測結果應可得如圖12，考量到各材料在不同頻率對太赫茲吸收的變化不一，實際所得結果會因材料有所不同。

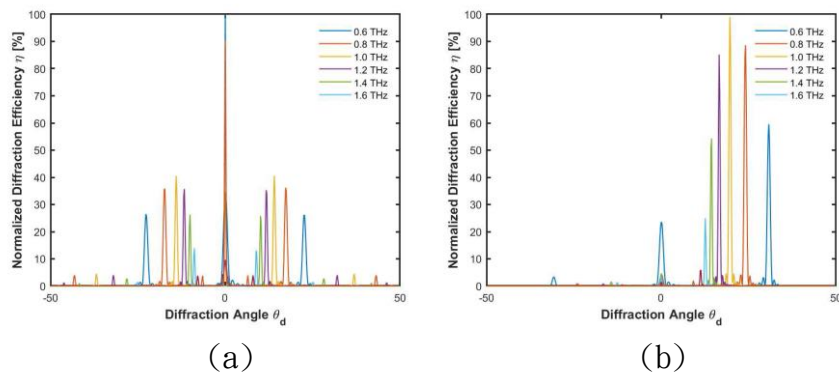


圖12、模擬不同頻率下(a)二元相位光柵(b)閃耀光柵太赫茲相對強度

2. 改變光柵和太赫茲光源距離D及光柵和太赫茲相機距離R

為了知道所製造的光柵於系統中所適用距離，分別改變光柵和太赫茲光源距離D及光柵和太赫茲相機距離R，比較結果如圖13，取感興趣的位置，即0度及正負30度位置。

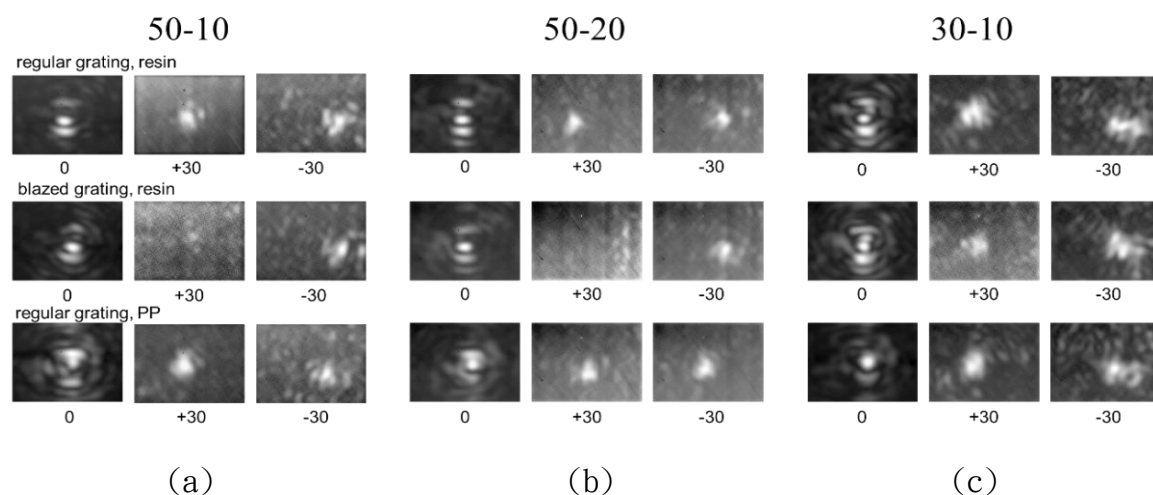


圖13、不同D及R之原始相片，上方數字表D-R(公分)

不同距離下，除了受光源所偏折之位置影響外，量測結果也會受到太赫茲相機本身焦距及太赫茲被空氣吸收等因素影響，由圖13，可看出當光柵和太赫茲光源距離30公分時，對樹脂閃耀光柵而言，即可於正30度可看出有聚焦效果，且其強度應比負30度低，符合如圖11之預期；而將光柵和太赫茲相機距離調整至20公分時，可看出其光斑較為聚集，但詳細強度須以其他檢測器作進一步比較。

3. 問題

由太赫茲相機原始圖片於0度等位置可看出太赫茲光並不能完美聚焦，於上下兩側會形成月暈般形狀，其成因為愛里斑(Airy disk)，點光源通過太赫茲相機之透鏡成像時，由於繞射而在焦點處形成的光斑，會呈現同心環的效果，因太赫茲光通過所設計之週期性光柵，水平(左右)方向之愛里斑變為較不明顯，且中心聚焦光斑強度相對下降，因此垂直(上下)之愛里斑變為更加明顯。圖14分別為在沒有光柵情況下及太赫茲光通過光柵於0度位置，將強度作標準化之相片。

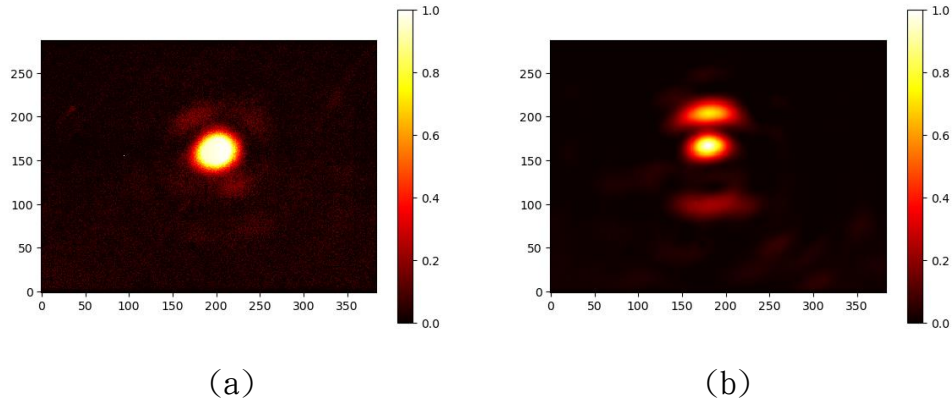


圖14、(a)無光柵(b)二元相位光柵於0度位置，標準化後圖片

此外，對閃耀光柵來說存在另一問題—陰影效應(shadow effect)，使閃耀光柵整體效率降低，分別由基底(substrate)斜角面(teeth)入射太赫茲波，可得不同強度分布結果，模擬如圖15(a)，其所得成項結果分別模擬如圖15(b)、圖15(c)，其成因為此結構為週期密集之光柵，類似kinoform，光進入光柵受材料內部反射及全反射影響，產生-1級繞射，如圖15(d)。

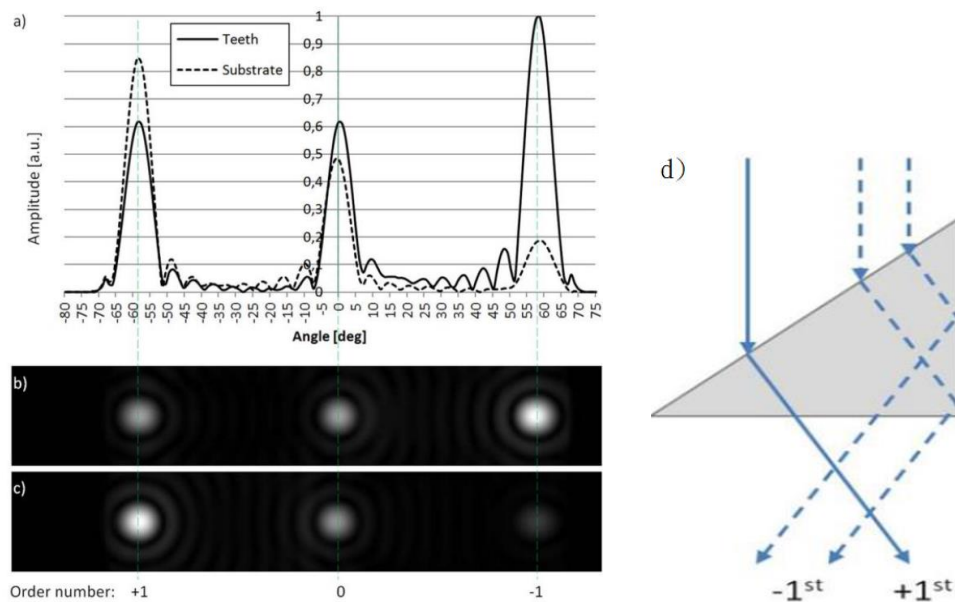


圖15、(a)斜角面或基底面入射太赫茲波強度分布模擬圖

(b)斜角面入射光強度相片模擬圖

(c)基底面入射光強度相片模擬圖

(d)陰影效應示意圖

四、 結論

此實驗僅有太赫茲繞射光柵效果之初步驗證，其精確度及相對強度等相關成效皆可進一步進行更好的分析。由實驗結果可得知，以現有3D列印技術製造太赫茲光柵等光學元件是可行且具有發展性的，3D列印**低成本、快速、高效、高解析度、高尺寸及材料自由度**等特性使我們能輕鬆自行製造出所需光學元件。歸功於3D列印技術，我們不必煩惱需一次訂購多種市售之昂貴光學元件，或受到現有的元件影響整體系統的設計，能於實驗室自行製造各式所需光學元件。

以目前而言若想得到更佳的结果，可更加精確量測材料的折射率或提高3D列印的解析度等方式來更精準製造出所需元件，有了初步成果，我們能加以延伸，如設計出反射式繞射光柵等原理類似之光學元件，達到波束控制(*beam steering*)等需求，或者在不限於3D列印技術的情況下，能進一步設計出可變式光柵，以加壓方式改變光柵週期等，以適用於不同系統中，但就目前已知研究，受到3D列印材料本身特性影響，要達到較為複雜的結構及功能，材料上還是以金屬為主。

未來研究期望朝著更高頻段發展，因其波長更短，可達更高解析度，因此應用更廣，是我們持續努力的方向，而在提升到更高頻段範圍時，可能會面臨些許問題，雖然以3D列印精度(微米等級)仍然可輕易達到符合波長範圍的需求，但由數據可發現各項3D列印材料對太赫茲波的吸收有隨頻率上升的趨勢，因此所製造的光學元件效果極有可能大打折扣。

而我們實驗室目前嘗試在樹脂中摻雜半導體等別種材料，以此提高3D列印材料之折射率，打印出的元件厚度即可相對應有所縮減(但吸收係數也可能因此上升)，因為尺寸上的縮小，便於我們開發整合整個系統，對未來可攜式太赫茲相關系統的發展目標是一大重點。

五、 參考文獻

- [1] Elena Mavrona, Felice Appugliese, Johan Andberger, Janine Keller, Martin Franckić, Giacomo Scaliari, and Jérôme Faist, "Terahertz refractive index matching solution," *Opt. Express* 27, 14536-14544 (2019)
- [2] Busch, S.F., Weidenbach, M., Fey, M. et al. Optical Properties of 3D Printable Plastics in the THz Regime and their Application for 3D Printed THz Optics. *J Infrared Milli Terahz Waves* 35, 993–997 (2014).
- [3] Squires, A.D., Constable, E. & Lewis, R.A. 3D Printed Terahertz Diffraction Gratings And Lenses. *J Infrared Milli Terahz Waves* 36, 72–80 (2015).
- [4] J. Zhao, K. J. G. Francis, E. Yiwen, J. Murante and X. -C. Zhang, "3D Printed THz Diffraction Gratings and Applications in THz Research," 2022

- [5] Yasuaki Monnai, Kristian Altmann, Christian Jansen, Hartmut Hillmer, Martin Koch, and Hiroyuki Shinoda, "Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings," Opt. Express 21, 2347-2354 (2013)
- [6] Jarosław Suszek, Maciej Sypek, Michał Makowski, Frédéric Garet, Izabela Ducin, Karol Kakarenko, Jarosław Bomba, and Jean-Louis Coutaz, "Evaluation of the shadow effect in terahertz kinoform gratings," Opt. Lett. 38, 1464-1466 (2013)

六、心得感想

這項專題研究在教授及實驗室學長的指導及協助下，主要由我一人完成。我於去年暑假即加入實驗室學習，參與實驗室所舉辦的訓練營以及例行性會議，聆聽學長的報告及研究內容，從中學習該如何從事研究活動，起初因對太赫茲領域完全不熟悉，於暑假的兩個月裡，除了學習各種儀器的操作外，主要目標為在實驗室探索相關領域研究內容，並決定專題研究方向，最終選擇較感興趣的3D列印太赫茲元件作為專題題目，而受到IRMMW會議內容的啟發，和學長及教授討論過後，將研究主軸定在繞射光柵。

在透過大量閱讀相關文獻，深入了解相關研究後，以可行性為主要考量，開始著手製作及量測太赫茲繞射光柵，原本看似簡單的研究目標，預期於上學期完成基本量測，但在進行量測階段遇到很大的難題，接連幾次量測結果與預期並不相符，重新審視整個光柵的設計及製造也沒能得出問題主因所在，此時又面臨春節，研究因此停滯一段時間，而在新的一學期中，在學長的協助及借用其他老師實驗室的儀器下，全部重新進行量測操作，成功得到預期的成效，但因進度有所延後，沒能從事更進一步量測及分析，以及後續相關應用，較為可惜。

非常感謝實驗室學長們的協助，透過定期和教授及學長報告、討論相關研究進度，並從中得到很多建議及回饋，遇到問題的時候，實驗室的大家都十分樂意分享經驗及幫忙想解方，多虧他們，我才能順利完成此次專題。經過此次專題研究經驗，我除了認識太赫茲領域的相關研究內容及各式光學儀器、3D列印機的使用外，最大的收穫是該如何從事科學研究，也了解自己還有很多不足的地方，讓我學習到該如何面對挫折及解決問題，相信這幾個月的實作經驗，能成為我的養分，使我未來從事研究活動上，能保持良好的心態，進而更加順利完成所期望的目標。