應用於三維感測的垂直共振腔面 射型雷射陣列

The Application of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSELs) Array for 3D Sensing

許晉瑋 Jin-Wei Shi

在本文中我們對垂直共振腔面射型雷射陣列在三維感測,其姿勢監測的應用做一簡單的 回顧。我們也對此種元件和其主要的競爭對手:側面發射的高功率分佈式回饋的雷射,就其 工作原理和特性表現做一分析比較。除此之外,我們也對同調和非同調的雷射陣列做了介 紹。文章的最後也闡明了我們研發團隊所開發的鋅擴散和氧化掏離技術,並展示了利用此種 技術所製造的高性能近同調垂直共振腔面射型雷射陣列。

In this paper, we briefly review the applications of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) array for 3D sensing and gesture monitoring. We compare its working principles and device performances with those of the edge-emitting high-power distributed feedback (DFB) laser, which is the major competitor of VCSEL array for the above-mentioned applications. Besides, we discuss the difference between coherent and non-coherent VCSEL array. In the end of this article, we illustrate the Zn-diffusion and oxide-relief techniques developed by our research group and demonstrate the high performance quasi-coherent VCSEL array based on these two techniques.

一、前言

在自然用戶界面 (natural user interface, NUI) 中,姿勢監測系統在人和機器的溝通上扮 演了非常重要的角色。其中最成功的例子便是「Kinect」(體感控制器),其為微軟 X-box one 中的重要配件。現今,由於智慧型手機的普及,許多手機製造商已經嘗試將姿勢監測系統 整合入手機之中,以增強手機 NUI 的使用環境。智慧型手機的下一步,將會能夠提供使用 者三維-互動式螢幕 (3D-interactive display)。目前蘋果公司已經傳出將在 2019 年的 iPhone 採用多點懸浮觸控 (multi-hovering) 技術,並搭配虛擬實境 (virtual reality, VR) 與擴增實境 (augmented reality, AR)影像拍攝來讓使用者體會三維-互動式螢幕的第一步。



圖 1. 結構光系統用於手部位置辨識的示意圖。

然而要實現此種系統,有兩種可能的做法。其一就是使用紅外光雷射來監測使用者的身 體姿式和動作而另一種即是使用毫米波⁽¹⁾。和紅外光相比,毫米波最大的好處就是能夠將所 有功能單晶片整合,使得整個模組體積很小⁽¹⁾。然而因為其波長遠大於紅外光,所以,若要 有除了姿勢監測外更進一步高品質的成像和精細的臉部辨識,紅外光為較好的選擇⁽²⁾。

此種微光學系統主要是由紅外光半導體雷射 (波長在 0.8-0.9 μm) 和微光學繞射元件所 組成,目前有兩種主要的方法來達成深度的感測和 3D 成像。其中一種是結構光 (structure light),圖 1 所示為其概念圖示,我們須要將紅外光 (Infrared, IR) 雷射的輸出利用整合的微 光學元件投影成數百萬光點的網格狀或是線狀圖型 (IR 投影機),當這些光點碰觸到 3D 物 體時,紅外光攝影機中的每個圖素 (pixel)所看到的紅外光點就會產生形狀和強度的變化, 在經過影像處理的演算法後即可建立出物體的 3D 影像。

另外一種方法稱之為飛時測距 (time of flight, ToF)⁽²⁾,圖 2 所示為其概念圖示,我們須 要將紅外光雷射的輸出,透過微光學繞射元件稱之為漫射屏 (diffuser) 將雷射光展開成接近 完美的平面波。在 3 維 (3D) 成像時,雷射需要脈衝式的操作,而當此平面波脈衝打到物體 反射回接收端時,藉由每個畫素所量測到的入射和反射信號的時間差,我們即可得到深度資 訊並建立物體 3D 影像。

為了能夠將此光學系統和下世代的智慧型手機作整合,在紅外光雷射方面將有許多的限制和需求:例如說低功耗和足夠的輸出功率,小的共振腔體積,高可靠度,和高品質的輸出光束(單模態和窄發散角)。這些特性能夠有效的減少封裝時所須要的透鏡數目和所需空間,也可達成最小化的體積以利封裝於手機。和邊射式雷射相比,垂直共振腔面射型雷射(vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL)擁有較低的消耗功率和較好的圓形對稱輸出模態除此之外,能夠有高品質的(接近)單模輸出光源,才能確保有高品質且穩定的繞射圖形。然而,若要實現單模的邊射式雷射,就必須使用分佈式回饋布拉格光柵(distributed



圖 2. ToF 系統概念示意圖。

feedback Bragg grating, DFB)。此製程難度和成本均非常高,較難在~900 nm 波段實現。在 此篇文章中我們將介紹高功率 VCSEL 陣列和其在 3D 感測的應用。它在光學系統所扮演的 角色如同人類的眼睛般一樣重要。透過文章的介紹,我們將會了解此種雷射和邊射型雷射技 術的差異和其本質上的優點與最新發展。

二、VCSEL vs. DFB 雷射

一般來說半導體雷射依其光學共振腔方向可分為兩種:一種是光學共振腔方向垂直於 晶片表面的 VCSEL,另一種是光學共振腔方向平行於晶片表面 (in-plane laser)。圖 3(a) 和 (b) 分別是 VCSEL 和邊射式 DFB 雷射 (in-plane DFB laser) 的結構示意圖⁽³⁾。我們可以清楚 看到 VCSEL 和 DFB 的共振腔均包覆著週期性結構。此結構分別是VCSEL中的分佈式布拉 格反射鏡 (distributed-Bragg Reflector, DBR) 和 in-plane laser 中的 DFB。然而,此兩種週期性 結構扮演著截然不同的角色。在 VCSEL 中因為光學共振腔長度受限於磊晶的厚度,通常只 能達數個微米。此種長度大概是 DFB laser 共振腔長度的百分之一到千分之一。所以,為了 能夠讓光子能夠在這樣短的腔體產生足夠的增益,勢必要讓它多走幾趟了。在 VCSEL中, DBR 結構的目的就是要提供一接近 100% 的鏡子反射率,以增加光子在腔内振盪的次數並 產生增益。在另一方面,DFB laser 因為共振腔長度遠大於波長,所以腔內存在了無數的模 態。為了能夠讓雷射單模操作,壓抑掉多餘的模態,DFB laser 的 DFB 光柵就有如同濾波 器的作用,能夠將想要起振的波長挑出。在 3D 感測的應用中,如果要增加檢測距離或是提 高解析度,高輸出功率目模態穩定的光源是非常重要的。如同上述,和 VCSEL相比,DFB laser 因為其較長的共振腔,所以天生就有較大的輸出功率。只要其將腔長更進一步增加到 公分等級,數瓦的紅外光輸出功率是可能的。相對來說只用一顆電流激發的 VCSEL 要達 到數瓦的紅外光輸出是非常難以達成。然而,VCESL 天生因為出光方向垂直於晶片表面, 所以我們可以將許多 VCSEL 做成 2D 陣列狀的排列,讓每顆 VCESL 的輸出功率在自由空 間能夠匯集 (free space power combing),以達成大輸出功率。和高功率 DFB laser 相比,2D VCSEL 陣列最大可能的優勢為較低的製造和檢測成本⁽²⁾。問題是在 2D VCSEL 陣列中有多 達數百個出光孔,這對微光學設計的工程師來說是個挑戰,不過蘋果公司已掌握了此技術的 專利而且也成功推出產品 (iPhone 10),我們將在後面的段落詳細的介紹此種雷射陣列技術。



圖 3. VCSEL 和 in-plane DFB 雷射橫截面示意圖⁽³⁾。

三、二維 VCSEL 陣列

在 3D 感測中,如果要增加檢測距離或是提高解析度,高輸出功率的光源是非常重要的。要有效增加 VCSEL 的輸出功率最直接的方法就是增加出光孔徑的直徑。然而如下圖 4 所示,當孔徑增加,雷射輸出很容易變成如同甜甜圈形狀般的多模形式。這種模態的遠場隨著電流和外界溫度有明顯變化,非常不適合 3D 感測的應用,除此之外在大孔徑的 VCSEL 中要達成電流均匀分布是非常困難的。為了能夠有近似高斯的光場分佈,並讓電流盡可能的均匀分布,使用許多小孔的 VCSEL 做成 2D 陣列狀的排列並讓每顆 VCESL 的輸出功率在自由空間能夠匯集 (free space power combing),若是當觀測點離雷射陣列的距離遠大於光波波長時,其遠場仍可視為單一點光源並具有和單一 VCSEL 非常相近的遠場分佈。而其總輸出總功率即為每個單一 VCSEL 輸出功率的加總。此種陣列結構為一解決上述大孔徑 VCSEL 問題的有效方法。



圖 5 為此陣列概念的示意圖。然而此種 VCESL 陣列的每個發光孔都是獨立發光,彼 此光場相位的同調性相當低。若能夠將陣列中每個 VCSEL 單元的光場同相位雷射起震 (lasing),整個陣列便可以視為一單一大孔徑的出光口,而其特性便可以更進一步驚人的提 升⁽⁴⁾。例如說:同相位的光場其在自由空間匯集後,所得到的總功率正比於陣列單元個數的 平方倍而不是像非同調陣列的線性增加。此外因為同相位 lasing 的關係,整個陣列可視為單 一的大面積出光孔,其對應的發散角和單一 VCSEL 相比可以大幅縮小。圖 6 為此陣列概念 的示意圖。在日本的京都大學研究團隊,他們已利用光子晶體陣列展示了登峰造極的大面積 同調雷射的超高亮度表現⁽⁵⁾。然而,要利用 VCSEL 實現這種同調陣列非常困難,這是因為 每個 VCSEL 光場耦合時的基本模態為非同相 (out-of-phase) lasing 的模態。這是因為 out-ofphase 才能有最低的電場總和與最低的能量。然而此種 out-of-phase lasing 又會造成遠場有許 多峰值造成其實際應用上的困難⁽⁶⁾。





圖 7. 商品化的非同調 VCSEL array⁽⁶⁾。

綜上所述,在目前實際 3D 感測的 VCSEL 陣列應用上因為同相位陣列很難實現,所以 幾乎所有的供應商都是用非同調陣列的設計^(7,8)。圖 7 所示為一商品化的 VCSEL 陣列俯視 圖⁽⁸⁾。圖中非常厚的金屬環是為了能夠讓夠讓陣列有較好的散熱。除此之外,在非同調陣列 的設計上,我們會對每個單一 VCSEL 的結構特殊設計以達成接近單模的輸出。然而,目前 市面上大量生產的單一單模 850 nm 波段 VCSEL 其最大輸出功率通常小於 2 mW 。此功率 實在不足以應用在 3D 感測。為了克服此項限制,有許多方法被發表。例如說:表面浮雕結 構 (surface-relief structures)^(9,10),三角孔洞結構 (triangular holey structures)⁽¹¹⁾,和抗共震反射 波導結構 (anti-resonant reflecting optical waveguide structures)⁽¹²⁾。下圖 8 所示為這些例子的示 意圖。

然而這些方法需要極精密的對準^(9,10)和蝕刻圖形⁽¹¹⁾ (e-beam lithography),或是再磊晶成長⁽¹²⁾。這使得這些結構的大量生產面臨困難。除此之外,這些單模技術到目前為止都沒有辦法運用在大面積的 2D VCSEL 陣列。



圖 8. 各種發表 850 nm 單模 VCSEL 的結構⁽⁷⁻¹⁰⁾。



圖 9. 單一鋅擴散 VCSEL 的橫截面示意圖和 SEM 照片。

我們的研究團隊在近十年來已開發出的兩種核心技術:(1) 鋅擴散 (Zn-diffusion) 技術,和 (2) 氧化層掏離技術。此兩技術可以控制 VCESL 的模態分布,降低功耗,增加元件可靠度⁽¹³⁻¹⁵⁾,並已成功實現在大面積的單模陣列^(16,17),其單一元件橫結面示意圖如圖 8 所示。此圖清楚的解釋了鋅擴散 VCSEL 的工作原理。從圖 9 中我們可以清楚看到,鋅擴散區域的 DBR 結構會被破壞 (disorder),如此便會有效消除電流流動的障礙並可以下降接觸電阻。此外,由於鋅擴散所造成的 Intra-cavity loss,可達成模態侷限的效果,進而達成單模 (single-mode) 的操作。和其它發表過的單模 VCSEL 技術⁽⁹⁻¹²⁾ 相比,我們的技術不但可以免除極精密的對準和蝕刻圖形,更可以降低操作電阻,此特性對高功率操作尤其重要。

利用此種技術我們已經展示輸出具世界紀錄高輸出功率 (~7 mW)的單模 850 nm VCSEL ⁽¹³⁻¹⁵⁾ (單一元件)。下圖 10 所示為量測到的 L-I 曲線和頻譜。我們可以清楚看到即使在飽和 電流操作下 (~7 mW 輸出功率),此元件依然能維持 SMSR > 30 dB 的單模輸出。圖 11 所示 為其所量測到的遠場和發散角。此角度 (5-6°) 和一般的單模 VCSEL (8-10°) 相比之下小了



圖 10. 鋅擴散單模 VCSEL 的 L-I curve (a) 和輸出頻譜 (b)。



圖 11. 單一鋅擴散單模 VCSEL 的 1-D, 2-D 輸出遠場和發散角。



圖 12. 鋅擴散單模 VCSEL6×6(a) 和 10×10, (b) 陣列的 L-I curves。

許多。此高功率且窄發散角的特性對系統應用將有許多的優點。因為我們鋅擴散製程的穩定 性和再現性,我們也展示了單模的高功率 VCSEL 陣列^(16,17)。圖 12 和圖 13 為所量到的 L-I 曲線和遠場發散角與陣列的 top-view。我們可以清楚看到 ~200 mW 輸出功率和 ~40 的窄發 散角能夠更進一步達成。若是能夠更進一步增進陣列面積和使用脈衝電流源激發來降低熱效 應,更高的輸出功率是可以被預期的。

四、結論

這篇文章,以簡單扼要的方法介紹了 VCSEL 陣列應用在 3D 感測的優缺點和商品化的 關鍵。希望讀者讀後,能夠在享受 3D 感測所帶來生活上的便利時,可以心中對這個偉大的 發明和投入這個領域無數的工程師、科學家,都能有一絲敬意和懷疑之心。以期讓這個發明 有更多新的突破,更多新的應用,創造出更多的工作。



圖 13.10×10 鋅擴散單模 VCSEL 陣列的輸出遠場,發散角,和元件俯視圖與電激發頻譜。

參考文獻

- 1. Please refer to the web site:http://technews.tw/2016/06/24/google-project-soli/
- 2. Please refer to the web site:
- https://www.osa-opn.org/home/articles/volume_30/february_2019/features/semiconductor_lasers_for_3-d_sensing/
- L. A. Coldren and S. W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits," chapter 3, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- 4. S. Noda, Journal of the Optical Society of America B, 27, B1(2010).
- 5. M. Yoshida, et al., Nature Materials, 18, 121(2019).
- 6. M. Orenstein, E. Kapon, J. P. Harbison, L. T. Florez, and N. G. Stoffel, Applied Physics Letters, 60, 1535 (1992).
- 7. J.-F. Seurin, et al., Proc. SPIE, Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers XII, 6908, 690808-1 (2008).
- 8. H. Moench, et al., Proc. SPIE, Vertical-Cavity Surface Emitting Lasers XX, 9766, 97660A (2016).

- 9. F. Mederer, et al., IEEE Trans. on Advanced Packaging, 24 (4), 442(2001).
- 10. Å. Haglund, J. S. Gustavsson, P. Modh, and A. Larsson, IEEE Photonics Technology Letters, 17, 1602 (2005).
- 11. A. Furukawa, et al., Applied Physics Letters, 85, 5161 (2004).
- 12. D. Zhou, and L. J. Mawst, IEEE Journal of Quantum Electronics, 38, 1599 (2002).
- 13. J.-W. Shi, C.-C. Chen, Y.-S. Wu, S.-H. Guol, and Ying-Jay Yang, IEEE Photonics Technology Letters, 20, 1121 (2008).
- 14. Jin-Wei Shi, Jhih-Cheng Yan, Jhih-Min Wun, Jason (Jyehong) Chen, Ying-Jay Yang, *IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electronics*, **19**, 7900208 (2013).
- 15. Jin-Wei Shi, et al., IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 31, 4037 (2013).
- 16. Jin-Wei Shi, et al., IEEE Photonics Journal, 5 (6), 1502508 (2013).
- 17. Jia-Liang Yen, Kai-Lun Chi, Jia-Wei Jiang, Ying-Jay Yang, and Jin-Wei Shi, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **50**, 787 (2014).

作者簡介

許晉瑋先生為國立台灣大學光電工程所博士,現為國立中央大學電機工程學系教授。

Jin-Wei Shi received his Ph.D. in Graduate Institute Photonics and Optoelectronics form National Taiwan University. He is currently a professor in the Department of Electrical Engineering at National Central University. (email: jwshi@ee.ncu.edu.tw)