

## 雷射六十週年系列-

### 砷化鎵與氮化鎵垂直共振腔面射型雷射介紹

# Laser 60th Series-Introduction to GaAs and GaN Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

葉晏瑋 交大光電系 博士生；

許聰基 交大光電系 博士生；陳昱慈 交大光電系 碩士生；

曾顯堯 交大光電系 碩士生；周嘉柔 交大光電系 碩士生；

郭浩中 交大光電系 講座教授；盧廷昌 交大光電系 特聘教授；

王興宗 交大光電系 講座教授；吳肇欣 臺大電機系電子所、光電所 教授

## 前言

半導體異質接面雷射是我們互聯網生活中關鍵的元件，這種雷射的突出特性是將電能轉換為光子放射的效率很高、元件體積小、可調變頻寬、高可靠性和低成本。重要的應用包括光通訊、光存儲、光學傳感，雷射列印、其他雷射的泵浦源以及微創手術。垂直共振腔面射型雷射（Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL）來自幾個研究小組的想法和貢獻。於半導體表面垂直發射的第一個半導體雷射是由 Melngailis 所製作[1]。之後，Soda 等人展示了在 InP 基板上，具有 90 $\mu$ m 共振腔和平面金屬反射鏡的表面發射雷射二極體，在 77 K 下運作，這通常被認為是對 VCSEL 的啟發[2]。從這些關於表面發射的雷射二極體的早期出版期刊以來，許多研究小組為改進 VCSEL 的效能做出了貢獻。我們現在所使用的 VCSEL 元件，包括使用半導體分佈式布拉格反射鏡（Distributed Bragg Reflectors, DBRs）做為反射鏡的開創性想法[3-4]，使用 DBR 的反射鏡形成表面發射雷射[5-8]，使用放置在光學共振腔中光強波腹(Antinodes)處的量子井(Quantum Wells)[9-13]，以及使用氧化孔徑侷限方法製作元件[14-17]。從 1980 年代到現在，許多研究小組在 VCSEL、VCSEL 陣列(Array)和 VCSEL 應用方面做出了許多重要的開

創性貢獻，主要的開創性研究如圖 1 所示。這些貢獻太多了，無法在此詳細處列出及描述。儘管如此，我們還是向那些從 1960 年代至今領導 VCSEL 的傑出研究人員致敬。大約在 1980 年代至今，磊晶生長和元件製程的重大進展也為 VCSEL 的發展做出了重要貢獻。

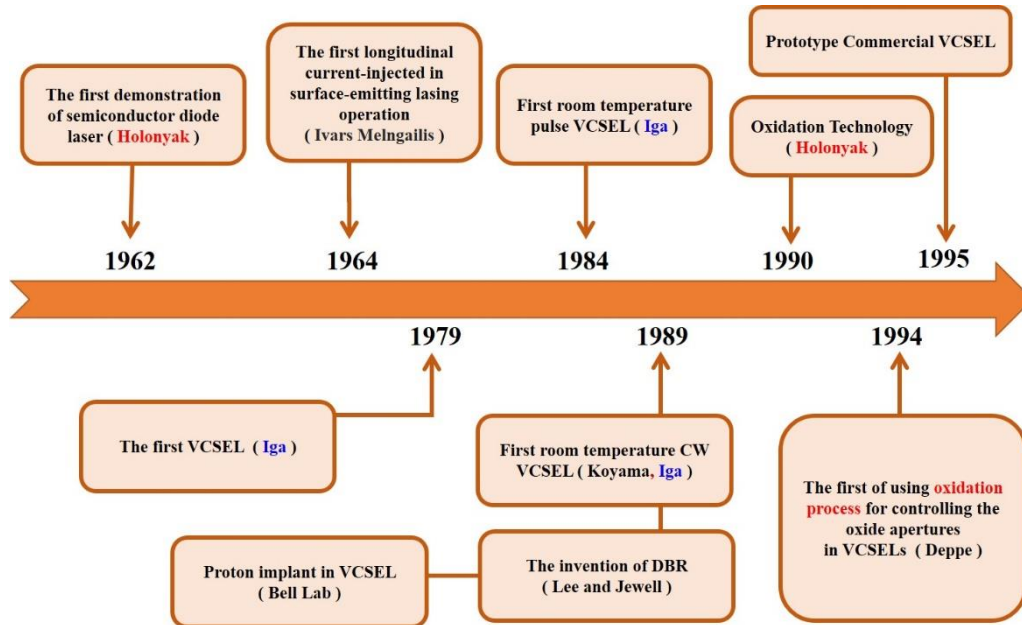


圖 1、VCSEL 主要的開創性研究

現今的 VCSEL 由沿垂直方向(y-axis)排列的兩個 DBR 反射鏡構成，以形成垂直的雷射共振腔，並且雷射沿磊晶生長的垂直方向出光。這種獨特的元件結構與邊射型雷射非常不同，由於 VCSEL 的特殊結構，與其他類型的雷射二極管相比具有許多顯著的優勢和性能，例如：較小的共振腔體積帶來了低閾值電流、高量子效率 and 低電流下的高速調變。VCSEL 的對稱橫向結構和表面發射會產生圓形的輸出光束，非常適合耦合到光纖和其他光學元件。表面發射還可以進行大規模的二維(2D) VCSEL 陣列和晶圓級製造和測試，從而降低了總體的製造成本。

VCSEL 在關鍵的光電子學應用領域經歷了指數級增長，例如，在數據通訊、光學傳感、雷射列印、光檢測、雷射測距 (LiDAR) 以及照明等領域。我們將關注 GaAs VCSEL，它用於數據通信和光學傳感，發射波長為 850-1000 nm 的近紅外光。

短波長的 VCSEL，是以 GaN 材料為主，GaN 是製造藍、藍紫和綠色波段的光電元件的絕佳材料。在之後的內文，我們會回顧 GaN 的 VCSEL 的設計、製造、技術挑戰及應用。

## 一、光通訊(Optical Communication) VCSEL 的工作原理與應用

### (一) 高速(High Speed) VCSEL 工作原理

現今 VCSEL 是由共振腔內的增益介質與兩個高反射率的布拉格反射鏡 (DBR) 垂直構建而成的垂直共振腔面射型雷射。增益區域為發光區域，一般為本質 i 型半導體不做任何摻雜。透過設計雙異質界面結構，利用晶格常數接近但不同折射率的兩種材料，形成縱向光波導以侷限光場，並利用其能隙不同的特性，讓元件在順向偏壓操作下，注入主動區中的載子不易逃脫披覆層的位障束縛，藉由複合產生光子。設計將主動區位於駐波共振中心的波腹上，如此雷射便能在較低的操作電流下，達到高的發光效率[10]。

DBR 結構是由兩種具有折射率差異的材料交錯排列，厚度分別為  $\lambda_0/4n_r$ ，其中  $\lambda_0$  為目標波長、 $n_r$  代表材料折射率。當光子入射經過此多層膜介面時，因材料折射率的改變，會使入射光在介面處部分穿透進入 DBR 中隨後再被反射。設計 DBR 單層的光學厚度需滿足 Bragg 條件，便能使雷射在目標波長發光，其反射的光相位不會受到改變，形成建設性干涉，如此能使得光有效侷限在共振腔中反覆振盪，光子產生居量反轉並達到雷射输出的閾值條件時，於是產生雷射光。

在 VCSEL 的 DBR 設計中，入射光的穿透深度要盡量縮小，需減少自由載子吸收與異質界面光學散射發生的機會。設計不良會使雷射的光學損耗增加與縱向光學侷限因子下降，導致 VCSEL 閾值條件上升，而帶來功耗增加與熱堆積效應，影響雷射的输出特性。

高速面射型雷射都以微型化的腔體為目標前進，主要原因為低閾值電流，但有上述所提過的問題，因此在限制電流方面，面射型雷射的電極也研究出許多構

造，有環型電極型、質子注入型、嵌入型、空氣柱型、選擇氧化層型和氧化 DBR 型，另外在限制光構造方面，也有許多可行方法，例如常見的氧化限制型、Fabry-Perot 共振腔型、增益波導型、反波導型和嵌入式折射率波導型等，現今高速 VCSEL 皆以氧化限制(Oxide-Confined)型為主，氧化孔徑是藉由高鋁含量的砷化鎵鋁(AIGaAs)層高溫濕氧化而形成，該氧化層的厚度通常在 20 至 30 奈米，可有效的限制電流和做為良好的光侷限構造，可有效的降低閾值電流及降低光損耗並提高 VCSEL 的轉換效率。雷射光的產生必須符合穩腔條件使光在共振腔中來回(round trip)振盪後，其振幅方面滿足增益等於損耗，相位方面滿足相位差為  $2\pi$  的整數倍，達到上述的條件才能使雷射光模態穩定存在於共振腔中。藉由縮短共振腔腔長能有效增加縱向模態間距(longitudinal mode spacing,  $\Delta\nu$ )形成單縱模態，VCSEL 便具有此優異特性，以利於雷射達到單一縱模操作。VCSEL 其光場振盪方向垂直於磊晶生長方向，所以共振腔長度比傳統邊射型雷射要短的多，其優點是具有很大的模態間距，使材料增益頻譜內僅包含單一模態輸出，利於光通訊傳輸。

## (二) 動態特性

VCSEL 的調變頻率主要受到阻尼效應、熱效應和寄生電容所限制，可將此頻率響應由轉移函數  $H(\omega)$  來表示[18]：

$$H(\omega) \equiv \frac{\omega_r^2}{\omega_r^2 - \omega^2 + i\omega\gamma} \quad (1)$$

$\omega_r = 2\pi f_r$  是角度弛豫振盪頻率(angular relaxation resonance frequency)， $\gamma$  是阻尼常數(damping factor)， $f_r$  是振盪頻率。轉移函數  $H(\omega)$  為二階齊次線性微分方程式的解，其形式就如同一個阻尼彈簧振盪系統，受到小訊號輸入的擾動，而產生頻率上的變化，最後因阻尼常數使振盪的振幅迅速衰減至穩態，此為弛豫振盪(relaxation oscillation)。定義半導體雷射的弛豫頻率(relaxation frequency)的公式為：

$$f_r = D\sqrt{I - I_{th}} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\eta_i \Gamma V_g}{q V_a} \cdot \frac{\partial g}{\partial n}} \quad (3)$$

其中 $D$ 是 $D$ 因子(D-factor)， $I$ 是電流(current)， $I_{th}$ 是閾值電流(threshold current)， $\eta_i$ 是內部量子效率(internal quantum efficiency)， $\Gamma$ 是光學限制因子(optical confinement factor)， $V_g$ 是群速度(group velocity)， $q$ 是基本電荷(elementary charge)， $V_a$ 是主動區的體積(volume of the active region)， $\frac{\partial g}{\partial n}$ 是微分增益(differential gain)，當雷射操作於此頻率時有最大的共振振幅，且伴隨相位的劇烈變化。阻尼的存在會使系統振盪的振幅迅速衰減，導致調變響應的表現趨於平緩，因此阻尼因子 $\gamma$  (damping factor)與弛豫頻率會共同限制半導體雷射頻寬的大小，而頻率響應是VCSEL用於數據傳輸的重要參考值，會間接影響眼圖張開程度及誤碼率的結果。阻尼常數表示如下：

$$\gamma \approx K \cdot f_r^2 + \gamma_0 \quad (4)$$

$$K = 4\pi^2 \left( \tau_p + \frac{\varepsilon}{v_g (\partial g / \partial n)} \right) \quad (5)$$

其中 $K$ 是 $K$ 因子(K-factor)， $\gamma_0$ 是阻尼因子偏移值(damping factor offset)， $\tau_p$ 是光子壽命(photon lifetime)， $\varepsilon$ 是增益壓縮因子(gain compression factor)，當VCSEL在高功率輸出時， $\varepsilon$ 增加會使 $K$ 參數變大，阻尼因而增大，會減緩雷射響應速度。為了定義雷射何時趨近於穩態，將輸出小信號振幅降為低頻振幅的一半時，此頻率範圍稱為雷射的操作頻寬 $f_{3dB}$ 。

由上述得知，要提升雷射的調變速度，須提升 $D$ 因子與降低 $K$ 因子，在主動區材料選擇中，加上多重量子井(MQW)與分離侷限異質結構(Separate confinement heterostructure, SCH)的設計會提升微分增益 $\frac{\partial g}{\partial n}$ 與增益壓縮因子 $\varepsilon$  [19-20]，因而增加主動層光場與電場的侷限能力。除此之外，雷射共振腔與反射鏡的結構設計、接面處能帶的變化、摻雜的分布等皆會影響元件的寄生RLC等校電路效應、產生熱效應以及載子的傳輸效應等[21]。而實際上，阻尼因子 $\gamma$ 與弛豫頻率 $f_r$ 並不會隨著 $f_r^2$ 與 $\sqrt{I - I_{th}}$ 增加而線性增加，因為在高電流時會有熱效應和其

他損耗機制產生[22]。

高功率操作下雷射的頻率響應，會嚴重受到 RC 時間常數(time constant)所限制，故需優化異質介面的接面電阻、DBR 中的串聯電阻以及絕緣層與半導體間的寄生電容。DBR 材料可分成半導體材料與介電質材料兩種形式，磊晶成長 DBR 目前被廣泛應用於 VCSEL 結構中，原因在於其導電與導熱效果都較介電質 DBR 優異，且製程相對簡單。缺點在於兩半導體材料間折射率差異較小，需要多層疊加才能達到足夠的反射率。在針對近紅外光 AlGaAs 材料系統，因 GaAs 與 AlAs 兩材料的晶格常數十分匹配，所以 DBR 磊晶品質高並具有極好的表現。DBR 可透過摻雜降低其串聯電阻。有些設計為達到更好的散熱效果，會保留數對砷化鎵鋁(AlGaAs)的 n-type DBR，其餘的 n-type DBR 用砷化鋁(AlAs)，加強元件散熱並降低元件內部產生的熱效應。

另一方面，在高頻電極下使用低介電係數的厚絕緣材料如聚酰亞胺(polyimide, PI)或苯並環丁烯(Benzocyclobutene, BCB)進行平坦化製程可降低接面電極寄生電容。另外也採用多對氧化層或離子佈值來達到降低平臺(mesa)的寄生電容，以降低 VCSEL 內的 RLC 寄生效應[23]。

### (三)光通訊傳輸 PAM4 應用

光通訊相較於傳統高頻電纜具備質量輕、體積小、低延遲與訊號穩定性高不易受干擾等優勢，商用 850 nm VCSEL 元件目前磊晶與製程技術較為成熟，早在 1996 年由 Honeywell 首先推出商用化的 VCSEL 傳輸模組，便開啟 VCSEL 於短距離光纖通訊的發展。VCSEL 具備響應速度快、低功耗、低成本與壽命長等優異特性，作為資料中心中傳輸模組的發射源，能滿足現今高速寬頻網路的迫切需求。不同於昔日遠洋通訊的光通訊模組，只用於架設海底光纜與骨幹光纖網路，未來將建立起 FTTx 全光纖網路環境，讓光纖連結每個用戶端。提高資料傳遞速度與加大傳輸距離為目前開發光通訊模組 VCSEL 發射源的主要研發方向，國內

相關學術研發單位包括台灣大學、交通大學與中央大學等都有做此類高速元件的研究並發表期刊論文。

光傳輸技術是將外部訊號注入載波使載波的振幅、頻率或相位發生變化，此方法稱為調變或調製(modulation)，可分為直接調變與外部調變兩大類，半導體雷射直接調變特性能解決外部調變成本高的考量。時間常數 $\tau$ 是決定半導體雷射調變頻寬的主要參數，元件中存在的串聯電阻與寄生電容會降低雷射動態響應下的截止頻率，接下來，我們將說明如何透過 VCSEL 磊晶與製程上的改良來提高 VCSEL 的調變速度。VCSEL 短共振腔結構雖然具備低功耗與高速的特點，但需要成長多對高折射率差異的 DBR 反射鏡以達到足夠的增益值，DBR 材料介面明顯的能隙差異會阻礙電流於內部的傳輸，這也是造成 VCSEL 元件內部串聯電阻增加的原因。利用化合物含量漸變方式與在駐波節點處做局部重摻雜在 DBR 介面處，都有助於降低磊晶片中的串聯電阻。而改變共振腔間電極的設計，可避免注入電流流經電阻較高的 DBR 與基板也能有效降低電阻的產生。另一方面，VCSEL 通常會採用蝕刻柱狀結構同時達到增益波導與折射率波導的效果，但為避免元件蝕刻後的高低落差會在後續元件封裝打線時導致金屬電極斷裂，因此需要平坦化製程以填補被移除的半導體材料，而塗佈的介電質材料如聚乙醯胺 (polyimide, PI)、苯並環丁烯 (benzocyclobutene, BCB) 或旋塗玻璃 (spin-on glass, SOG) 等具備較低介電常數 (low-k) 且厚度遠大於濺鍍或沉積法成長的介電質薄膜，有助於減少元件電極的寄生電容，目前我們已成功作出 40Gbps 的高速 VCSEL，頻寬如圖 2 所示，在室溫下最大的調變頻寬在電流 5.3 mA 操作下可達到  $f_{3dB}$  為 21.2 GHz， $f_{3dB}$  定義為元件有效操作在高頻操作下輸出光功率為直流操作時的一半。

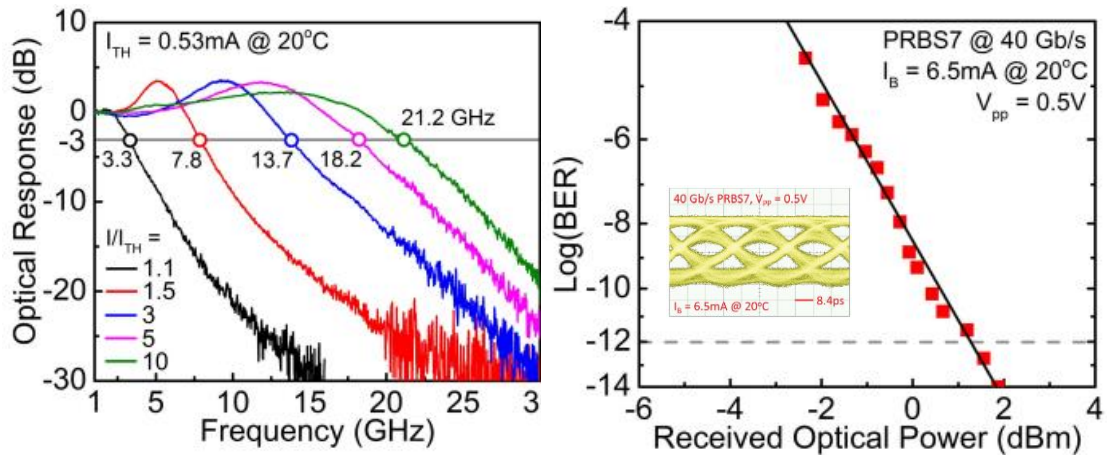


圖 2、VCSEL RF 特性與 Bit Error Rate(BER)量測圖

在光通訊的量測上，光纖通訊的收發模組需要傳遞快速的數位脈衝訊號，而半導體雷射操作導通的延遲時間與弛豫振盪皆會使輸出的雷射脈衝波訊號在經過一段距離傳輸後，因色散效應引起譜線寬度增加，在接收端失真的疊加訊號導致位元錯誤率(bit-error-rate, BER)上升。因此，透過眼圖(eye diagram)觀察在特定調變速度下經過一段距離的光傳輸後，雷射光信號在時間中的抖動(jitter)行為或眼圖，如圖 2 所示，開口大小為判別傳輸品質是否能清楚還原初始電訊號。

目前 850 nm VCSEL 光源主要應用於資料中心內部傳輸系統，結合色散補償多模光纖延長光訊號傳輸的距離。在元件開發的進程中，量子井材料應力的調變、氧化侷限結構與驅動電流的增加，都將提升主動層中載子密度達到高寬頻元件的特性。並採用氧化孔徑以侷限電流，圖 3 為氧化製程後，元件氧化孔徑上視圖，磊晶過程中些微的 Al 含量變化會導致氧化速率發生顯著改變，一般氧化層的 Al 莫爾分率會設定在 98%，厚度小於 50 奈米，其氧化速率適中能避免熱應力的生成並降低因氧化層造成的光場散射效應。磊晶層從  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  氧化成為  $\text{Al}_x\text{O}_y$  後，折射率大約從 3 減少至 1.6，形成 VCSEL 的側向波導結構。另外，多重氧化層設計、DBR 能帶工程(band engineering)與摻雜分布的調變與鋅擴散製程抑制高階輸出模態等技術，都將有助於降低元件內部寄生電阻電容效應、增加元件邊模抑制比(side mode suppression ratio, SMSR)等，達到高頻低雜訊的光傳輸品質，最後，利用原子層沉積(Atomic Layer Deposition, ALD)技術，在側壁形成緻密的鈦



化層，如圖 4 所示，有效地阻絕水氣及濕氣的進入，並且提升元件的可靠度 (Reliability)。

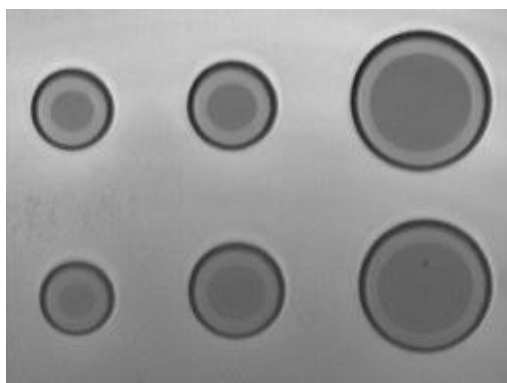


圖 3、濕氧化製程後所形成的氧化孔徑圖

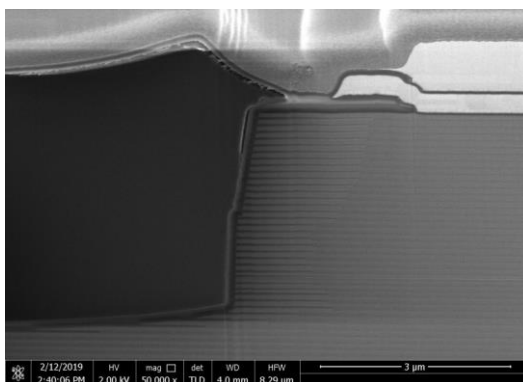


圖 4、氧化侷限(Oxide-Confined) VCSEL 在  
掃描電子顯微鏡下的剖面圖(Cross-Section SEM)

在近年來光通訊的快速發展上，單顆 VCSEL 傳輸速率已經超越 50 Gbps，然而為了因應無線行動通訊邁入 5G 時代，採用四階脈衝振幅調變模式 (four-level pulse amplitude modulation, PAM-4) 編碼技術進一步提升傳輸位元率，同時能大幅降低成本[24]。與開-關鍵控調變模式 (On-Off Keying, OOK) 相比，PAM-4 是一種通過使用不同的信號級別在串行通道上，在相同的時間上，發送更多位元的方法，如圖 5 所示。PAM-4 具有四個不同的級別，可以對每個符號的兩位數據進行編碼，使連接的數據傳輸速率加倍。於 2015 年有相關報導指出利用 PAM-4 直接調變 VCSEL 晶片，在 2 公尺以及 50 公尺傳輸距離下，其傳輸位元率分別可達至 60Gbps 以及 50Gbps。若採用 4 種不同波長元件搭配四通道接口 (quad small form-factor pluggable, QSFP) 的收發模組可望進一步使傳輸速度提升至 400 Gbps。

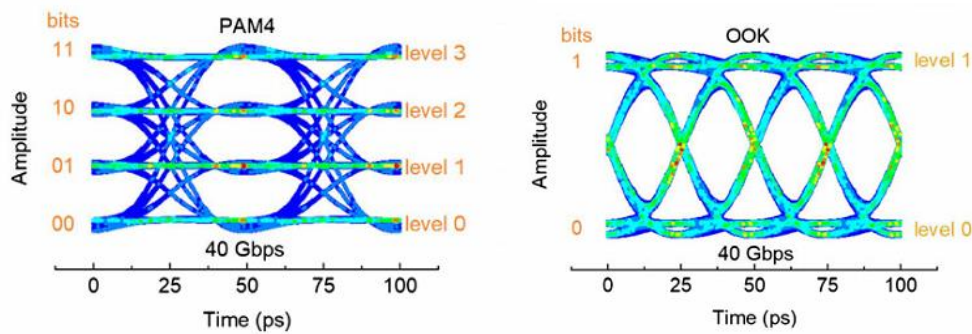


圖 5、在調變頻率 20Gbps 下模擬 40 Gbps 的 PAM-4 和 OOK 之眼圖

## 二、 3D 感測(3D Sensing) VCSEL

VCSEL 於消費性電子感測市場上的應用最早始於 2000 年光學滑鼠中的追蹤系統，採用雷射自混合干涉(self-mixing interferometry, SMI)技術，將物體表面反射的雷射光與雷射光源本身的強光場相互耦合，依照都卜勒頻率偵測移動中的物體所發生的相位改變。SMI 傳感器以氧化侷限型 VCSEL(Oxide-Confined)作為主動光源可確保元件達低閾值電流、少模態操作與提高陣列元件密集度，滿足電子產品中低功耗、低雜訊與高解析度等要求。然而，若以縮小氧化孔徑控制 VCSEL 模態穩定性非常不利於製程上良率的提升，現今已有許多研究團隊提出各種方法例如表面的環型淺蝕刻、表面蝕刻週期性光子晶體缺陷微結構、表面鍍上高折射率材料或光吸收層、上反射鏡以離子佈值或鋅擴散形成邊模光吸收區或是表面製作週期性高折射率差光柵(high contrast grating, HCG)結構等，都能有效抑制高階模態產生，達到單模態 VCSEL 的輸出效果。

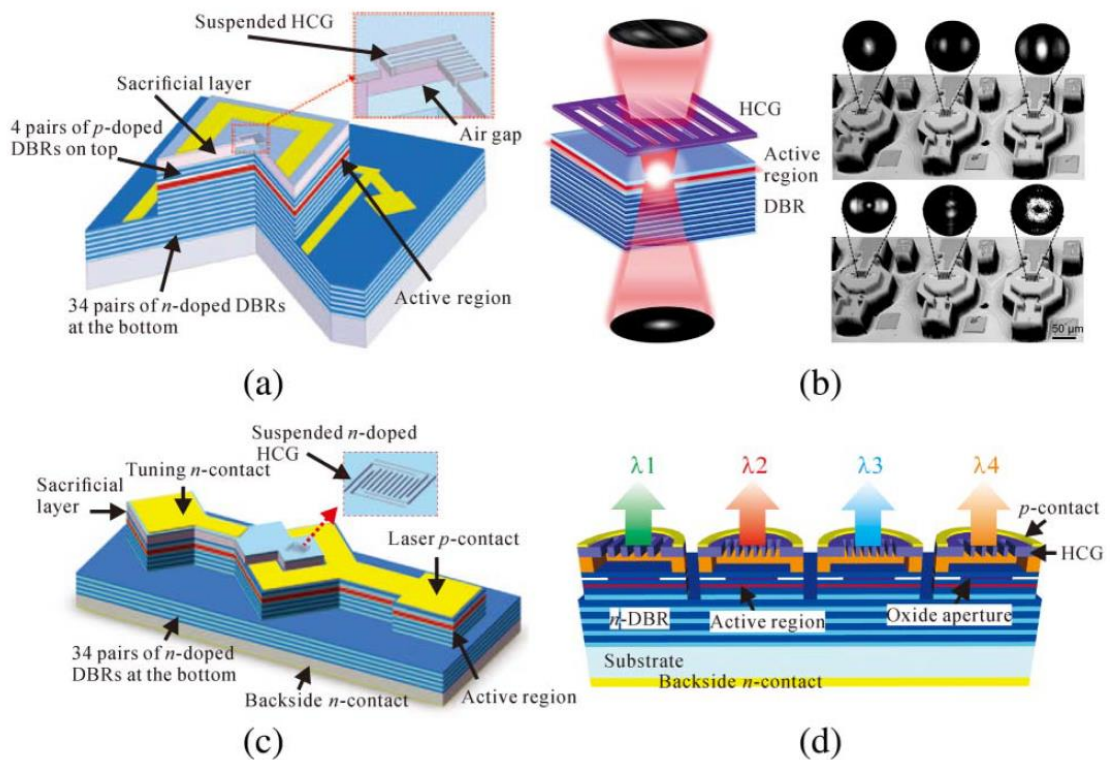


圖 6、HCG-VCSEL 結構示意圖[25-27]

圖 6 所示為 HCG-VCSEL 結構的示意圖，新穎的 HCG 光子晶體反射鏡技術是由加州大學常瑞華教授研究團隊於 2007 年提出，利用微奈米製程技術於 VCSEL 發光區域製作週期性光柵結構，HCG 設計會透過嚴格的耦合波分析 (rigorous coupled wave analysis, RCWA) 方法來優化結構參數，此結構的高折射率對比的特性有助於提高禁止帶的反射率與優化單橫模輸出功率，減少 VCSEL 所需 DBR 對數能同時降低磊晶時間與串聯電阻。在實驗上，HCG-VCSEL 即使面對大的氧化孔徑，仍舊可以展現出優異的模態選擇性和偏振控制。

2013 年於消費性電子產品上生物辨別技術的開發以指紋辨識為主，自 2017 年 Apple 公司於 iPhone X TrueDepth 前置相機中導入 3D 感測技術，開啟 VCSEL 於智慧型手機應用的龐大商機，圖 7 所示為智慧型手機包含 VCSEL 元件的感測模組。紅外光光學測距不同於過去毫米波感測系統，使用較短波段光源有助於高品質姿勢監控成像與精細的臉部辨識模組開發。由 940 nm VCSEL 陣列發射連續

紅外光波會先經過光學繞射元件並投射出特定點陣圖案於物體表面上，透過軟體技術整合分析從物體表面擷取的光斑資訊進行編碼(light coding)，藉由演算法重建場景得 3D 影像，實現手勢識別、臉部辨識、眼球運動追蹤以及 3D 攝影與自動對焦等功用。VCSEL 光源相較於紅外光 LED 具備較窄帶寬(Spectral Width)、高解析度與功率穩定的優勢，但結構光 3D 感測模組的技術發展仍須面臨繞射光學元件設計、複雜演算法開發、雷射光衰問題與降低成本等挑戰，主要的 3D 模組設計與供應商包含 Lumentum、AMS 與意法半導體等公司。

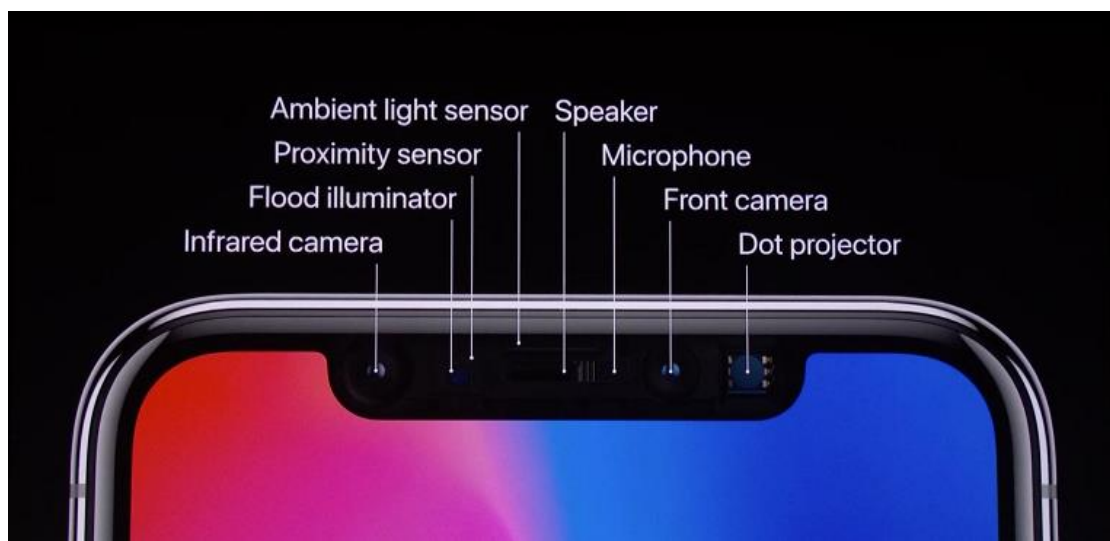


圖 7、智慧型手機 VCSEL 感測模組 (Source：APPLE)

深度感測除了前述的結構光(structured light)之外，另一種技術具備反應速度快與長距離偵測的特點，稱為飛行時間測距法(time of flight, ToF)，此技術較符合車用市場的需求，將大量導入先進駕駛輔助系統(ADAS)中光學雷達(LiDAR)的開發，目前主要的光達生產與設計公司包含 AEye 與 Luminar，將致力發展長於 1400 奈米長波長紅外光 LiDAR 產品，追求對人眼更為安全、感測距離遠與訊號不受環境光干擾的 ToF 模組。現階段光達技術主要分為掃描模式與全固態模式兩種，由驅動電路發送指令至紅外光雷射元件，使其發射短脈衝光束於擴散片(diffuser lens)上，將光束整形成上下對稱的垂直可視角度(vertical field of view)並結合微機電(microelectromechanical system, MEMS)單軸掃描鏡進行目標物的水平方向掃

描，再以線性感光二極體陣列(photodiode array)接收反射的回波訊號，測量雷射光往返時間差，建構出高解析度的三維深度信息，如圖 8 所示。掃瞄型光達系統透過不斷旋轉雷射光線方向，達到大範圍掃描的目的，現今大多採用 MEMS 系統模式以內部鏡面微動來改變光線的投射角度完成掃描，取代傳統機械迴轉 (mechanical rotation)法，實現體積輕巧、視角精準與低成本的车載感測模組設計。

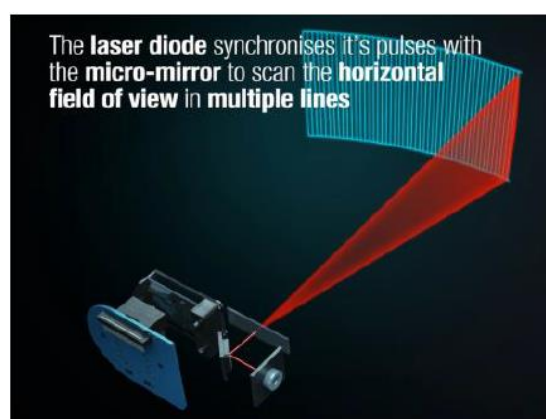


圖 8、脈衝光源由微型反射鏡(micro-mirror)整形後以水平掃描擴大感測範圍

其次，沒有任何掃描元件如全固態光達模式，具反應速度快、可控性佳與體積極小等優勢，成為光達業者開發的終極目標。全固態光達可大致分為兩種操作模式，其中最受矚目的是光學相控陣列(optical phased array, OPA)技術，由多個獨立的雷射光點與光學相位調變元件組成陣列，使雷射光束能在特定的空間方位上形成干涉效果，達到大範圍感測目的。此方法以電訊號改變雷射光相位較機械掃描的速度更快，最為知名的 OPA 光達製造商是成立於 2012 年的美國新創企業 Quanergy，但該技術目前仍在產品改良階段，期盼未來能拉長感測距離與降低模組的熱產生問題。此外，另一個全固態模式的發展方向為快閃光達(flash LiDAR)技術，如同閃光燈一般能快速進行重複動作，搭載於自駕車的紅外線雷射矩陣同時照射周圍物體產生距離資訊。此方法缺點在於需要較高的光脈衝功率，但其探測距離與視野範圍皆低於掃描型 LiDAR，目前該領域較知

名的廠商為成立於 2007 年的加拿大光達開發商 Leddar Tech。

降低 VCSEL 陣列雷射光點的空間相干性、提高光輸出功率、開發長波段光源以確保人眼安全性與降低產品成本為目前 3D 感測光源研發的主要方向。此外，光達感測仰賴獨立的多個發射與接收單元在短時間內蒐集龐大的數據資訊，大幅增加電腦解析時間與運算成本。未來需要智慧化的軟硬體技術整合以有效減少採樣的資訊量並提升自駕車反應速度，勢必將融合多重的感測技術將是一項具備高度挑戰的工作。

### 三、 GaN VCSEL 研究歷程、應用及展望

#### (一) GaN VCSEL 研究歷程

很長一段時間裡，可見光光譜範圍內除了紅光之外皆尚未能實現 VCSEL 技術。究其原因主要因素：一是缺乏一個同時具備高折射率差異及能以磊晶成長 (Epitaxial Growth) 技術製備於相應短波長的基板上的材料系統；二是增益介質的材料系統本身的難以選定。一直到 1990 年代，都還很難得到高品質低缺陷的藍、綠和紫外光波長範圍的直接能隙 (Direct Band-Gap) 材料。當時，有三種材料獲得大家的關注，分別是碳化矽 (6H-SiC)、二六族的硫化鋅 (ZnS) 和三五族的氮化鎵 (GaN)。每個材料系統都有其短處，如 SiC 的間接能隙 (In-direct Band-Gap) 明顯降地其在高亮度光電元件的應用性；ZnS 和 GaN 雖然是直接能隙 (Direct Band) 材料，當時卻還很難得到單晶塊材或基板，P 型材料也很難做出來。到 1989 年，Akasaki 和 Amano 才利用低能電子束活化的方式製備出 Mg 摻雜的 P 型 GaN，首度實現了以磊晶成長方式製備出 P-GaN 薄膜 [28]，並於 1992 年實現了第一個同質 P-N 界面發光二極體 (Light Emitting Diode, LED)。並很快地於 1994 年由 Nakamura 展示了第一個雙異質界面 InGaN/GaN LED [29]。現代照明科技的材料基礎從此奠定。由於他們早期的傑出貢獻，因而於 2014 年將諾貝爾物理獎頒給了 Akasaki、Amano 和 Nakamura 三人。

因為缺乏晶格匹配的單晶塊材，大部分的 GaN 薄膜都是成長在異質基板上，如 SiC 和 Sapphire。可是，GaN、SiC 與藍寶石(Sapphire)基板間存在有比較大的晶格常數差異，即所謂的晶格失配(Lattice Mismatch)及熱膨脹係數差異，導致所生長的薄膜有較多的差排缺陷密度，也就是較差的晶體品質，如圖 9 所示。對 LED 自發放射(Spontaneous Emission)的發光機制而言，缺陷密度或許影響不大，有較高的容忍度。然而，對如雷射二極體(LD)的激發放射(Stimulated Emission)發光機制而言，如此高的缺陷密度在增益介質中卻是致命的，甚至最終導致激發放射機制的終結。1996 年，Nakamura 的研究團隊使用了雙噴流有機金屬化學氣相沉積方式(Two-Flow Metalorganic Chemical Vapor Deposition)生長了氮化銦鎵的多重量子井結構(InGaN Multiple Quantum Wells)成功展示了第一個由 GaN 材料系統做成的半導體雷射，波長為 408.3nm、半高寬(Full-Wave-Half-Maximum, FWHM)為 0.2nm。該雷射雖可在室溫下連續操作，不過當時僅僅維持了 1 秒鐘，其失效的主要原因是熱效應[30]。兩年後的 1998 年，使用側向磊晶成長技術(Epitaxial Laterally Overgrowth, ELO)降低了 GaN 中的缺陷密度，所製成的雷射二極體(Laser Diode)在量測下，可以連續在室溫下連續波操作超過 10,000 小時[31]，後來更進一步將輸出功率增強到 420mW[32]。但若要進一步提高雷射特性，共振腔反射鏡的結構必須做更多的改善，因而衍生混合型介電質 DBRs 反射鏡的結構。

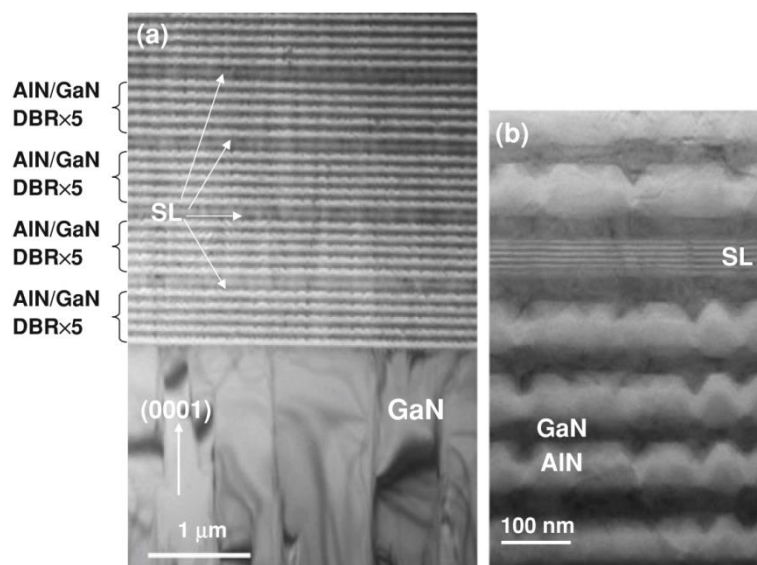


圖 9、因為晶格失配嚴重，AlN/GaN DBR 界面不是很平整，  
反射率因而難以與介電質鍍膜 DBRs 相比擬。

相較於技術較為成熟 AlGaAs/GaAs DBRs，包含 AlN/GaN、AlGaIn/GaN、AlInN/GaN 和 AlGaIn/AlN 等異質界面結構，其折射率差異相對較小而且晶格失配(Lattice Mismatch)也相對較大，兩者是造成氮化鎵材料系統難以全磊晶方式成長 DBRs 的兩大因素。於是，就會有以高折射率差異(High Refractive Index Difference)的介電質材料製作 DBRs 系統的想法，如  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$  和  $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ ，並期望能夠以較少的 DBR 對數來獲得足夠高的有效反射率。

目前，氮化鎵仍難以磊晶方式生長在介電質材料上，僅能以磊晶方式先形成下層 DBRs，再將主動層在堆疊其上。如果我們將磊晶方式形成上下層 DBRs 的 VCSEL 稱為第一型 GaN VCSEL(Type I GaN VCSEL)[33]，分別以磊晶及介電質材料形成的 DBRs 的稱為第二型 GaN VCSEL(Type II GaN VCSEL)[34]，如圖 10 所示。若雷射剝離技術(Laser Lift-Off, LLO)及化學機械研磨(Chemical-Mechanical Polishing, CMP)技術能成功應用在 GaN VCSEL 製作，使得上下層 DBRs 反射鏡都是介電質材料的 VCSEL，則此類為第三型 GaN VCSEL(Type III GaN VCSEL)[35]。就目前文獻發表的結果來看，特性最好的是 Type II 的 GaN VCSEL。



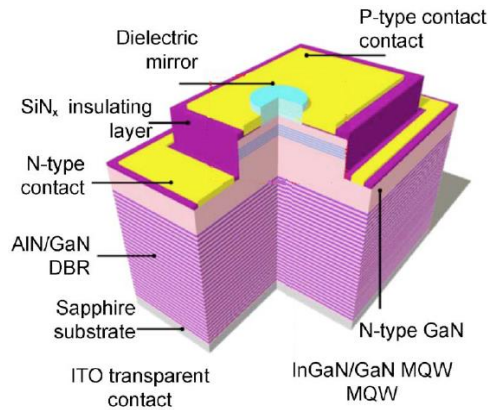


圖 10、混合型 DBRs GaN-VCSEL 結構圖

## (二) GaN VCSEL 的應用

GaN-VCSEL 在藍綠光到紫外光波段光譜範圍與 GaAs 和 InP 的紅光到紅外波段形成互補。未來在高解析度列印、照明和顯示、可見光光通訊、微型原子鐘、軍事和醫藥方面都有很多的應用。Fuji Xerox 於 2003 年發布了世界第一個以 GaAs VCSEL 陣列的雷射列表機，DocuColor 1256 GA，當中的雷射光源即是 780nm 單模的 GaAs VCSEL 二為陣列，而氮化鎵的的波長更短，理論上可以得到更高的列印解析度。

在固態照明(Solid-State-Lighting, SSL)當中，可見光商用的LED一直有嚴重的效率減低(Efficiency Drop)的問題。需要太多的LED晶粒才能製作一盞燈，導致成本難以進一步下降。然而，若以雷射為螢光粉激發光源，在雷射模式下即便在高電流運作下仍保持極高的量子效率，從而避開自發放射模式的效率下降問題。由於GaN VCSEL光譜涵蓋了綠光到紫外的範圍，與GaAs VCSEL搭配便涵蓋了全部可見光光譜，使的未來的微型投影機、抬頭顯示器和近眼顯示器(Near-Eye Displays)更能普及。固態照明技術的環保、節能訴求仍會是最重要的驅動力，促使這一切不斷地向前發展。

對於傳輸距離要求不高、有較多成本考量的應用中，塑膠光纖無疑是一個可行的方案。然塑膠光纖在長波長的衰減率比較高，氮化鎵的藍綠光波段剛好適合在這個範圍。目前應用LED進行可見光光通訊(Visible Light Communication, VLC)

已經逐步商業化。然而，受到自發放射的基本特性所限，LED在頻寬及響應速度上的表現都不及VCSEL。GaN VCSELS可以使目前的VLC應用更上一層樓，讓各類設備間的資料傳輸應用，如汽車及個人電腦更物美價廉。

原子鐘可被大致分成兩大類別，一種是微波原子鐘，另外一種是光學原子鐘。即利用微波源或光源照射原子粒子，使其發射電磁波，藉由量測電磁波的頻率來”讀秒”計時。其中微波源或光源的微小化是使原子鐘微小化的關鍵技術之一。375nm GaN VCSEL可以與鐿(Yb)原子搭配形成微型原子鐘，可比現在使用的鉀(Rb)氣體搭配近紅外光GaAs VCSEL有更高的精準度。當原子鐘可以做到內建於可攜設備時，全世界時間同步的過程將會徹底的改變，人人都可以輕易擁有標準時間，雖然一般人不會覺得有何差別，但與時間標準有關的相關產業將會起重大的變化。

短波常可見光雷射(400-500 nm)在軍事上也能有廣泛的應用，由於藍綠光波段(470~504 nm)在海水中傳播的損耗是其它波段的 1%以下，因此可應用在深海探勘或水下通訊。在醫療方面，藍光雷射可被運用在外科手術中，而紫外光雷射可以對早期的癌症進行治療。在醫學診斷方面，皮膚癌和食道癌可以直接使用410nm 波長雷射激發病灶部位螢光來定位，而無需做切片採樣檢驗。

### (三) GaN VCSEL 的展望

首個氮化鎵基混合 DBR (分佈式布拉格反射鏡) VCSEL(垂直共振腔面射雷射)在 77K CW(連續波)電泵浦的條件下，在 2008 年由交大光電實現[36]，在同一年 Nichia 也展示了在室溫下的 CW 電泵浦 GaN 基介電質 DBR VCSEL [37]。目前學術研究領域已經實現了紫外光(~400nm)，藍光(~450nm)和綠光(~500nm) RT&CW(連續波室溫下操作)雷射，如 Meijo University 做出了 3mW RT CW GaN VCSEL 的雷射。但大多數元件的輸出功率低於 1mW，且鮮少提及元件的壽命，除了 Nichia 提到藍寶石基板的元件在 2 分鐘內，雷射操作停止，使用 GaN 基板可以減少材料中的缺陷密度，元件可以持續 10 min。但是，使用 GaN 基板仍然

無法實現更高的功率輸出。Green VCSEL 方面，由於較大的極化電場，量子侷限史塔克效應(Quantum-Confined Stark Effect, QCSE)所造成的空間上電洞和電子波函數分離，導致較低的內部量子效率(IQE)和增加閾值電流。最近，Xiamen University 及 NCTU 團隊以 InGaN Quantum Dots 形成主動層來克服了這個問題，破紀錄地將發射波長擴展到 565.7nm，涵蓋大部分“Green Gap”的波長範圍[38]，最後，我們將 GaN VCSEL 一些重要的研究成果整理於圖 11。迄今為止的研究表明，GaN VCSEL 比 GaAs 和 InP VCSEL 更具挑戰性。未來，研究人員將更加關注各波段的高性能和實用的 GaN VCSEL。但是，要進一步提高元件性能仍然存在一些挑戰，材料中的缺陷密度是增加元件的閾值電流並引起熱效應的關鍵原因。因此，有必要改進磊晶生長的技術，以減少材料的缺陷。重要的是，在 GaN VCSEL 的設計中應該考慮幾個問題，包括良好的電流擴展接觸結構，降低載子注入層的光損耗，增強 p-GaN 層的導電性和量子井主動區的均勻性，改善散熱以提高輸出功率，提升 DBRs 的反射率以降低閾值電流等都是實現高性能 GaN VCSEL 可以採用的方法。此外，深紫外和紅色的 GaN VCSELs 的研究將成為下一個熱門話題。與藍色和綠色的 VCSEL 相比，顯然相對不成熟且會更加困難。截至目前為止，這方面的研究尚未有相關的報導，是一個極待開發的新領域。

Time	Wavelength (nm)	Operation environment	Threshold current density (kA/cm <sup>2</sup> )	Polarization	Research group
2008	462	First 77 K CW	1.8	80%	NCTU
2008	414	RT CW	8.9	-	Nichia Corporation
2010	412	First RT CW	12.4	55%	NCTU
2011	451, 503	RT CW/Pulsed	3.0, 28	-	Nichia Corporation
2012	411.9	RT Pulsed	89	72%	University of California
2012	420	RT Pulsed	140	-	École Polytechnique Fédérale de Lausanne
2012	380-420	RT CW	<0.64	-	Panasonic Corporation
2014	405-435	RT CW	1.2	71%	Xiamen University
2014	408	RT Pulsed	22.7	100%	UCSB
2015	405	RT Pulsed	12	100%	UCSB
2016	453.9	RT CW	59.6	-	SONY
2016	413.5	RT CW	7.5	-	Meijo University
2016 QD-VCSEL	492-565	First Green RT CW	0.78	94%	Xiamen U/NCTU

圖 11、GaN-VCSELs 的重要研究成果

#### 四、 結論

在過去的十年中，實現節能和高傳輸速度的數據通訊已取得了令人矚目的進展。基於對元件物理和高速調變方式的深入研究，新穎的元件設計已被用於提高 VCSEL 的性能。並已展示了以開-關鍵控調變 (On-Off Keying) 方式的數據速率 (Data rate) 超過 50 Gb/s。對於較小的氧化孔徑 VCSEL，在 25°C 時的能量效率 (energy efficiency) 據先前報導已接近 50 fJ/bit。還展示了在 90°C 下，速率為 50 Gb/s 資料無錯誤傳輸 (error-free transmission)。為了增加多模光纖 (Multi-Mode Fiber, MMF) 的容量，採用了 PAM-4 調變方式，在單通道中產生 100 Gb/s 的數據速率。通過短波長分波多工 (Shortwave wavelength division multiplexing, SWDM) 轉換也達到 400 Gb/s。VCSEL 將成為數據中心中主要的傳輸源，並且可能會滲透到相鄰元件，甚至相鄰元件內的光互連。頻譜寬度 (Spectral Width) 減小的單模 (Single Mode) VCSEL 對於通過數據中心進行遠距離傳輸將引起很大的興趣。諸如用於高速 VCSEL 傳輸的無載波幅度相位 (carrierless amplitude phase, CAP) 或分

離複頻變調技術(discrete multi-tone, DMT)之類的先進調變方式有望以較高的頻寬將傳輸數據速率提高到 100 Gb/s 以上[39-40]。VCSEL 和積體光學(Photonic Integrated Circuit, PIC)之間的低損耗和直接耦合仍然具有挑戰性。通過結構設計將 VCSEL 與 PIC 整合在一起，可以使晶片元件緊湊且具有高度效能。這種利用 VCSEL 的積體晶片在光互連、光學傳感器和消費電子產品中具有重要的應用。VCSEL 在目前較矽光子技術成熟，而矽光子技術是當前的熱門話題[41]。VCSEL 具有更低的成本、更低的功耗(1.8 pJ/bit)和更小的發射面積（直徑約為 8 $\mu$ m 的發射面積），可實現較大的頻寬密度，而矽光子的發射光源則由一個連續波(continuous wave, CW)半導體雷射和一個 Mach-Zehnder 調變器在 25 Gb/s 時，能耗要求為 10 pJ/bit。對於短距離光互連可用的數據通道，VCSEL 將繼續是成本最低及能量轉換效率最高的傳輸源。具有 VCSEL 的傳感器在消費電子、汽車市場、物聯網及原子感測等領域具有廣泛的應用，其具有低能耗、小的發射面積和易於形成陣列的優勢，VCSEL 無疑將成為這些應用和許多其他應用的主要雷射光源。GaN VCSEL 未來在高解析度列印、照明顯示、可見光光通訊、微型原子鐘、軍事和醫藥方面都有很多的應用。VCSEL 對於我們日常生活中的各種傳感器應用必不可少，因此它們將越來越受到產業界和學術界的關注。

## 五、市場分析

在應用領域方面，VCSEL 從產生起就成為新一代的光存儲和光通信應用的核心器件，應用在光學識別及數據中心的傳輸源等領域。通過製程及材料技術改進，VCSEL 元件在性能、製造成本和散熱等優勢開始顯現，逐步轉變工業加熱、環境監測和醫療設備等商業應用以及 3D 感測用於消費性電子產品。

未來，智能化的世界將持續進步，VCSEL 將廣泛應用在消費性電子 3D 感測成像、物聯網、數據中心、雲端計算和自動駕駛等領域。其中，VCSEL 在消費電子領域發揮越來越重要的作用，VCSEL 可用於進行智能手機的人臉識別，無

人機避障、VR/AR 和掃地機器人等。消費性電子產品 3D 感測成像：VCSEL 是消費電子視覺成像和三維感測(3D Sensing)的必要原件，預估今年，僅智能手機就能為 VCSEL 市場貢獻超過 20 億美元的收入；物聯網：VCSEL 是物聯網的重要傳輸元件，預計到 2025 年，全球將有數十億個設備接收物聯網，全球物聯網市場有望超過 30 兆美元；數據中心及雲端計算：VCSEL 用於數據中心，預估今年，全球 VCSEL 數據通訊的市場規模將達到 1000 億美元；自動駕駛：VCSEL 做為自動駕駛中通訊傳輸及傳感器等，預計到 2030 年，激光雷達(Lidar)的使用數量將超過 30 億顆。

VCSEL 國外廠商主要有 Broadcom、Lumentum、Finisar、II-VI、Philips Photonics、ams 及 Osram 等，中國大陸的廠商主要有江蘇華芯、武漢光迅科技、山東太平洋、深圳源國、國星光電、華工科技、三安光電、乾照光電、華燦光電以及睿熙科技等，台灣的廠商主要有穩懋、華立捷、全新光電、光環科技、聯亞光電和晶元光電等，大部分都是來自於光通訊元件的企業；也正是 VCSEL 有了在光通信領域的經驗，消費性電子的感測應用變得順理成章，兩種產品都具備很強的技術延展性。

如果 VCSEL 能夠擴大光譜範圍，需求量將會更高。如今市面上商業化的產品也僅限於紅光雷射和紅外光雷射。如果 VCSEL 能發射藍光和綠光，就能夠用於高分辨率列印、高密度光學數據存儲以及生物傳感等領域。更重要的是，紅光、綠光和藍光 VCSEL 的結合使這些芯片用於全色顯示和照明成為可能。儘管 VCSEL 的輸出功率因應用及需求而異，但一般為幾個 mW，該功率足以用於擴增實境(AR)設備、投影系統和顯示器等。經過十多年來行業研究和學術實驗的努力，加上元件結構和製程技術的改善及創新，藍光 VCSEL 現已達到這一基準，綠光 VCSEL 的輸出功率落後於藍光 VCSEL。但要達到商品化，仍需要更多的投入。幾年後，VCSEL 光源跨越更寬的光譜範圍，並為更多的應用提供服務。

## 六、 参考文献

- [1] I. Melngailis, "LONGITUDINAL INJECTION-PLASMA LASER OF InSb," Applied Physics Letters, vol. 6, no. 3, pp. 59-60, 1965.
- [2] H. Soda, K.-i. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 18, no. 12, p. 2329, 1979.
- [3] J. Van der Ziel and M. Ilegems, "Multilayer GaAs-Al 0.3 Ga 0.7 As dielectric quarter wave stacks grown by molecular beam epitaxy," Applied Optics, vol. 14, no. 11, pp. 2627-2630, 1975.
- [4] M. Ogura, T. Hata, N. J. Kawai, and T. Yao, "GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multilayer reflector for surface emitting laser diode," Japanese Journal of Applied Physics, vol. 22, no. 2A, p. L112, 1983.
- [5] M. Ogura and S. Mukai, "Distributed-feedback, surface-emitting laser diode with lateral double heterostructure," Electronics Letters, vol. 23, no. 14, pp. 758-760, 1987.
- [6] M. Ogura and T. Yao, "Surface emitting laser diode with Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs multilayered heterostructure," Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena, vol. 3, no. 2, pp. 784-787, 1985.
- [7] K. Iga, S. Kinoshita, and F. Koyama, "Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with I<sub>th</sub>= 6 mA," Electronics Letters, vol. 25, pp. S64-S66, 1989.
- [8] T. Sakaguchi, F. Koyama, and K. Iga, "Vertical cavity surface-emitting laser with an AlGaAs/AlAs Bragg reflector," Electronics Letters, vol. 24, no. 15, pp. 928-929, 1988.
- [9] P. Gourley and T. Drummond, "Visible, room-temperature, surface-emitting laser using an epitaxial Fabry-Perot resonator with AlGaAs/AlAs quarter-wave high

- reflectors and AlGaAs/GaAs multiple quantum wells," *Applied physics letters*, vol. 50, no. 18, pp. 1225-1227, 1987.
- [10] J. Jewell et al., "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers," *Electronics Letters*, vol. 25, no. 17, pp. 1123-1124, 1989.
- [11] Y.-H. Lee, J. Jewell, A. Scherer, S. McCall, J. Harbison, and L. Florez, "Room-temperature continuous-wave vertical-cavity single-quantum-well microlaser diodes," *Electronics Letters*, vol. 25, no. 20, pp. 1377-1378, 1989.
- [12] Y.-H. Lee, B. Tell, K. Brown-Goebeler, J. Jewell, and J. Hove, "Top-surface-emitting GaAs four-quantum-well lasers emitting at 0.85  $\mu\text{m}$ ," *Electronics Letters*, vol. 26, no. 11, pp. 710-711, 1990.
- [13] R. Geels, S. Corzine, J. Scott, D. Young, and L. Coldren, "Low threshold planarized vertical-cavity surface-emitting lasers," in *Optical Fiber Communication Conference, 1990: Optical Society of America*, p. PD31.
- [14] J. M. Dallesasse, N. Holonyak Jr, A. Sugg, T. Richard, and N. El-Zein, "Hydrolyzation oxidation of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-AlAs-GaAs}$  quantum well heterostructures and superlattices," *Applied Physics Letters*, vol. 57, no. 26, pp. 2844-2846, 1990.
- [15] D. Huffaker, D. Deppe, K. Kumar, and T. Rogers, "Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers," *Applied Physics Letters*, vol. 65, no. 1, pp. 97-99, 1994.
- [16] K. D. Choquette et al., "Advances in selective wet oxidation of AlGaAs alloys," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, no. 3, pp. 916-926, 1997.
- [17] J. M. Dallesasse and N. Holonyak Jr, "Oxidation of Al-bearing III-V materials: A review of key progress," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 5, p. 5, 2013.
- [18] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, *Diode lasers and photonic*



integrated circuits. John Wiley & Sons, 2012.

- [19] I. Suemune, "Theoretical study of differential gain in strained quantum well structures," *IEEE journal of quantum electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 1149-1159, 1991.
- [20] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, Å. Haglund, M. Skold, A. Joel, and A. Larsson, "High-speed, low-current-density 850 nm VCSELs," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 694-703, 2009.
- [21] S. B. Healy et al., "Active region design for high-speed 850-nm VCSELs," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 46, no. 4, pp. 506-512, 2010.
- [22] A. Larsson, "Advances in VCSELs for communication and sensing," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics*, vol. 17, no. 6, pp. 1552-1567, 2011.
- [23] M. Azuchi, N. Jikutani, M. Arai, T. Kondo, and F. Koyama, "Multioxide layer vertical-cavity surface-emitting lasers with improved modulation bandwidth," in *CLEO/Pacific Rim 2003. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IEEE Cat. No. 03TH8671)*, 2003, vol. 1: IEEE, p. 163 Vol. 1.
- [24] J. Lavrencik et al., "100Gbps PAM-4 transmission over 100m OM4 and wideband fiber using 850nm VCSELs," in *ECOC 2016; 42nd European Conference on Optical Communication, 2016: VDE*, pp. 1-3.
- [25] M. C. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating," *Nature photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 119-122, 2007.
- [26] K. Li, Y. Rao, C. Chase, W. Yang, and C. J. Chang-Hasnain, "Monolithic high-contrast metastructure for beam-shaping VCSELs," *Optica*, vol. 5, no. 1, pp. 10-13, 2018.
- [27] M. C. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, "A nanoelectromechanical tunable laser," *Nature Photonics*, vol. 2, no. 3, p. 180, 2008.

- [28] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, "P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 28, no. 12A, p. L2112, 1989.
- [29] S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh, "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 64, no. 13, pp. 1687-1689, 1994.
- [30] S. Nakamura et al., "Room-temperature continuous-wave operation of InGaIn multi-quantum-well structure laser diodes," *Applied Physics Letters*, vol. 69, no. 26, pp. 4056-4058, 1996.
- [31] S. Nakamura et al., "High-power, long-lifetime InGaIn/GaN/AlGaIn-based laser diodes grown on pure GaN substrates," *Japanese journal of applied physics*, vol. 37, no. 3B, p. L309, 1998.
- [32] S. Nakamura et al., "Violet InGaIn/GaN/AlGaIn-based laser diodes with an output power of 420 mW," *Japanese journal of applied physics*, vol. 37, no. 6A, p. L627, 1998.
- [33] J. M. Redwing, D. A. Loeber, N. G. Anderson, M. A. Tischler, and J. S. Flynn, "An optically pumped GaIn–AlGaIn vertical cavity surface emitting laser," *Applied physics letters*, vol. 69, no. 1, pp. 1-3, 1996.
- [34] T. Someya, K. Tachibana, J. Lee, T. Kamiya, and Y. Arakawa, "Lasing emission from an In<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N vertical cavity surface emitting laser," *Japanese journal of applied physics*, vol. 37, no. 12A, p. L1424, 1998.
- [35] Y.-K. Song et al., "A vertical cavity light emitting InGaIn quantum well heterostructure," *Applied physics letters*, vol. 74, no. 23, pp. 3441-3443, 1999.
- [36] T.-C. Lu, C.-C. Kao, H.-C. Kuo, G.-S. Huang, and S.-C. Wang, "CW lasing of current injection blue GaIn-based vertical cavity surface emitting laser," *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 14, p. 141102, 2008.

- [37] Y. Higuchi, K. Omae, H. Matsumura, and T. Mukai, "Room-temperature CW lasing of a GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser by current injection," *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 12, p. 121102, 2008.
- [38] Y. Mei et al., "Quantum dot vertical-cavity surface-emitting lasers covering the 'green gap' Light: Sci," 2017: Appl.
- [39] R. Puerta et al., "Effective 100 Gb/s IM/DD 850-nm multi-and single-mode VCSEL transmission through OM4 MMF," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 423-429, 2016.
- [40] I.-C. Lu et al., "Very high bit-rate distance product using high-power single-mode 850-nm VCSEL with discrete multitone modulation formats through OM4 multimode fiber," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 21, no. 6, pp. 444-452, 2015.
- [41] D. Mahgerefteh et al., "Techno-economic comparison of silicon photonics and multimode VCSELs," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 2, pp. 233-242, 2016.