

高速罐型封裝光模組

High-Speed TO-Can Packaged Optical Modules

施天從、周肇基

Tien-Tsorng Shih, Jau-Ji Jou

為了實現高速且低成本的光纖通訊系統，需要發展低成本的光收發模組。罐型封裝光模組有成本低、體積小、製程簡單與適合大量生產等優點。本文利用三維電磁模擬軟體，分析低成本的罐型封裝基座的高頻特性，並使用特製 K 型接頭，實驗量測罐型封裝基座的 S 參數與眼圖，證實 TO-46 罐型封裝基座的操作速率可達 25 Gb/s。本文也製作 25 Gb/s 的 TO-46 罐型封裝垂直共振腔面射型雷射模組，以應用於高速光纖數據傳輸。

For high-speed and low-cost optical fiber communication systems, development of low-cost optical transceiver modules is necessary. TO-Can packaged optical modules have the advantages of low cost, compact size, and simple assembly process for mass production. In this paper, the high frequency characteristics of a TO-Can header were simulated through a three dimensional full wave electromagnetic simulator. The S-parameters and eye diagrams of a TO-Can header also were measured using our special K type adaptors. It has been verified that the TO-46 header can be operated at 25 Gb/s. The 25 Gb/s TO-46 vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) module has been also fabricated. The 25 Gb/s TO-46 VCSEL module is potential to be applied in high-speed optical data-link networks.

一、前言

光纖通訊具有傳輸容量大與傳輸距離遠的優點。目前已經被廣泛使用在長距離的骨幹網路、中距離的都會網路以及短距離的區域網路等服務。近幾年許多國家更開始建置被動光纖網路，紛紛推動光纖到家 (fiber-to-the-home, FTTH) 的服務，更可顯示出光纖通訊的重要性。而光纖通訊的資料傳輸速率也越來越高，Gb/s 速率的網路已經被佈建及使用，如 EPON 和 GPON 等。在 2009 年，IEEE 802.3 av 的 10 G-EPON 規範也已經被提出⁽¹⁾，目前 100 GE LAN 的規範也已開始被研議⁽²⁻³⁾，甚至 400 GE 的架構也開始被探討⁽⁴⁾。除了在網路通訊中採

用光纖傳輸，為了應付資料傳輸速率越來越高的電腦週邊、影音設備等，還有在雲端資料中心伺服器之間的資訊傳輸，其高速傳輸介面也逐漸採用光纖傳輸。

為了實現高速且低成本的光纖通訊系統，使用低成本的光收發模組有其需要。目前常使用的幾種高速雷射模組封裝有：蝶型 (butterfly)、小型雙排 (mini-dual in line, mini-DIL) 與罐型 (TO-Can) 等封裝方式，如圖 1 所示。蝶型與小型雙排雷射模組封裝在結構與操作速度上有不錯的特性，但製作成本高，一直無法大量生產與普及化。罐型封裝有成本低、體積小、製程簡單、適合大量生產的優點，但目前普遍使用於較低操作速率的應用或邊射型雷射

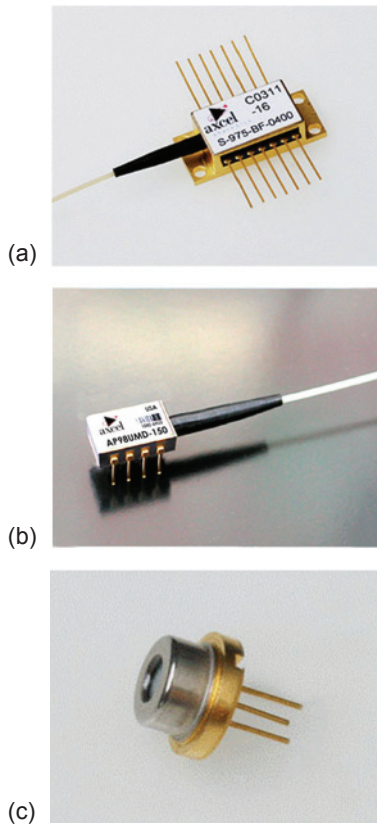


圖 1. (a) 蝶型、(b) 小型雙排、與 (c) 罐型封裝外觀圖 (資料來源：Axcel Photonics Inc.)。

封裝中⁽⁵⁻⁸⁾。因此，本文將探討 TO-46 罐型封裝的高頻特性，透過三維電磁模擬軟體的分析與實驗量測的結果，驗證低成本的罐型封裝仍具有良好的高頻響應，適用於面射型雷射封裝以應用於高速光纖數據傳輸系統。

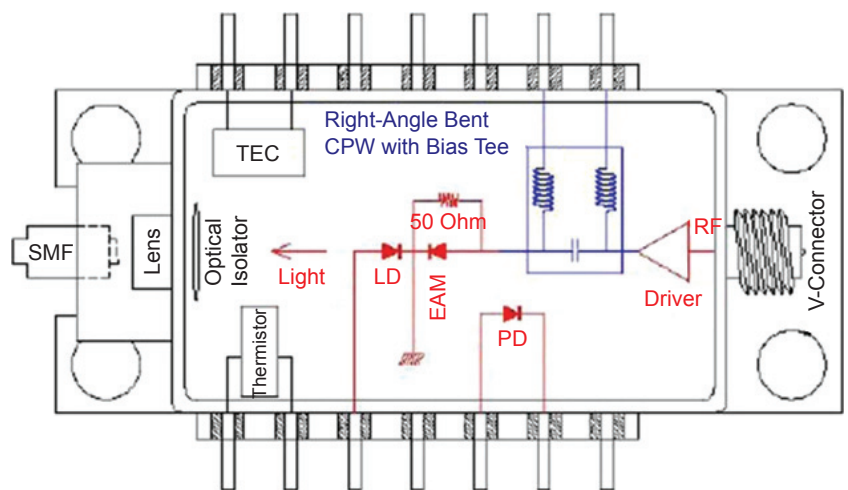
二、文獻回顧

圖 2 為 2007 年 Ho-Gyeong Yun 等人發表的 40 Gb/s 蝶型電吸收調變整合雷射 (electroabsorption modulator-integrated laser, EML) 封裝模組⁽⁹⁾，其設計重點在於蝶型封裝基座搭配設計過的共平面波導 (coplanar waveguide, CPW) 所製成的高頻偏壓器 (bias tee) 與其他被動元件，試圖讓整體輸入阻抗匹配，以減少訊號的損失。蝶型基座內部空間大，所以可使用較複雜的電路結構及較多的被動元件，讓整體的特性達到阻抗匹配，但成本也相對增加，此封裝結構因為結構複雜，也導致不易自動化生產。

圖 3 為 2007 年 Cheng Chen 等人所發表的 10 Gb/s 罐型雷射二極體封裝⁽¹⁰⁾，以傳統的 TO-56 基座作為雷射封裝基座，並量測雷射構裝後的頻率響應。將整體光發射模組分成雷射二極體與雷射封裝兩大部分進行分析，根據量測結果去擬合出光發射模組的等效電路，並討論封裝產生的寄生電感、電容對傳輸的頻寬影響，進而分析雷射封裝結構的最佳化設計。不過，雷射封裝所產生的寄生效應通常都是在封裝的銜接位置或是轉折處，使用等效電路無法完整模擬封裝特性。若能採用三維的模擬，將可完整分析罐型雷射封裝的結構。

圖 4 為 2008 年 Euysik Yoon 等人發表的 10 Gb/s 光發射模組⁽¹¹⁾，雷射封裝基座選用罐型與蝶式基座的組合，並透過 ANSYS 公司的三維模擬軟體 HFSS (high frequency structure simulator) 模擬其電氣特性，建立其等效電路，再進行模組特性探

圖 2. 40 Gb/s 蝶型封裝電吸收調變整合雷射模組⁽⁹⁾。



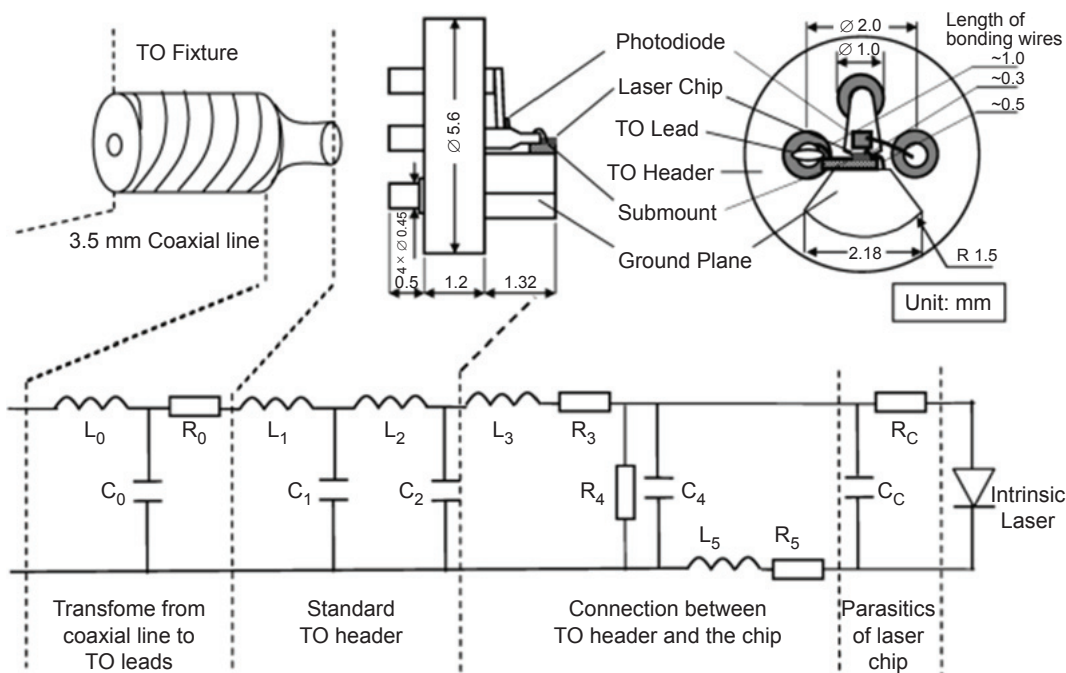


圖 3. 10 Gb/s 罐型封裝雷射模組及其等效電路模型⁽¹⁰⁾。

討。由於射頻訊號經由印刷電路板連接罐型封裝接腳，其頻寬變小，且傳輸損耗大。因此結合蝶式基座，並使用陶瓷基板與共面波導結構，再打線到雷射晶片，保持足夠頻寬，並降低傳輸損耗。此封裝使用陶瓷基板，提高製作成本，而且其結構結合罐型與蝶式基座將不易自動化生產。

圖 5(a) 為 2010 年 J. R. Kropp 發表的 40 Gb/s

光收發射模組，雷射封裝基座選用罐型基座，如圖 5(b) 所示⁽¹²⁾。此模組在高頻訊號饋入處選用特製的 K 型接頭，印刷電路板採用 Rogers 4003 板材，並使用共面波導結構傳輸高頻訊號。雖然量測結果驗證此模組操作速率可達 40 Gb/s，但使用特殊的罐型基座無法適用傳統罐型基座的量產組裝製程，將會提高生產成本。

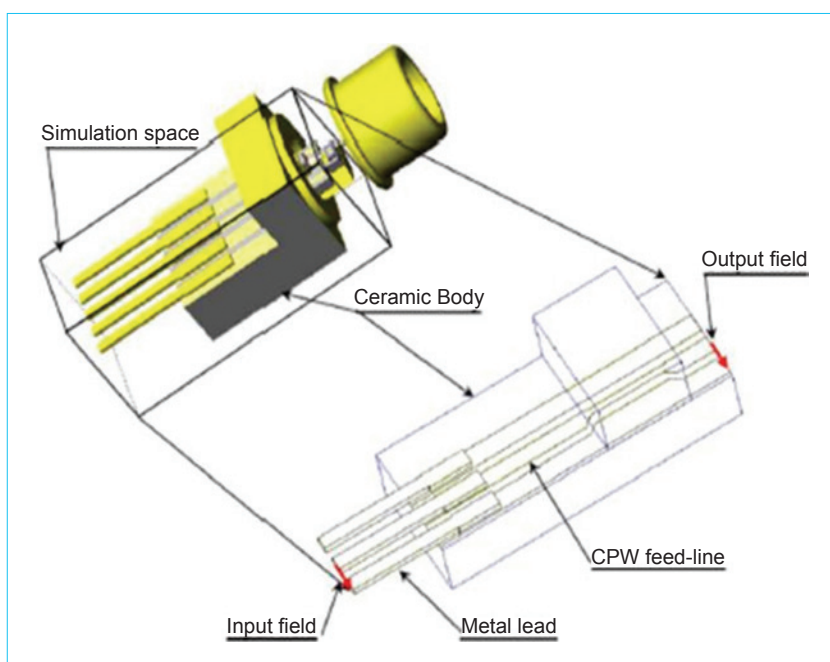


圖 4. 10 Gb/s 罐型與蝶式組合封裝雷射模組⁽¹¹⁾。

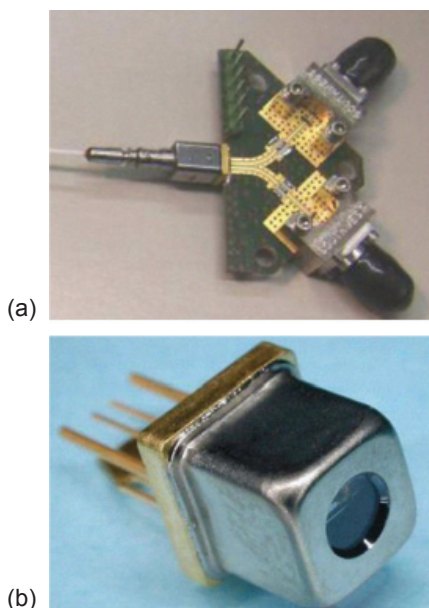


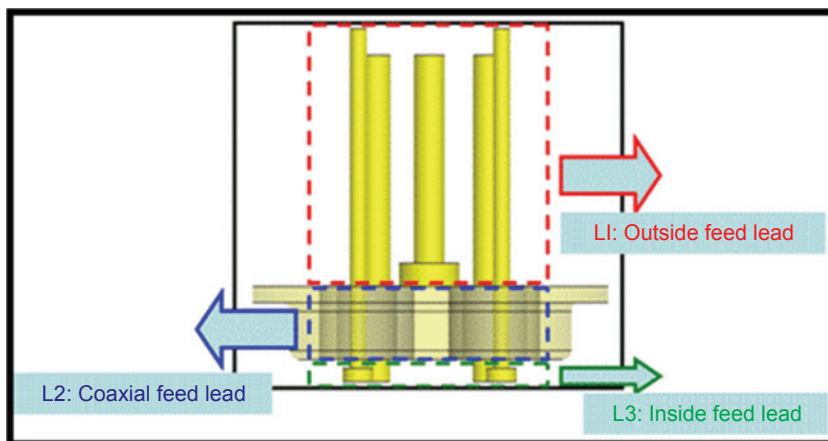
圖 5. (a) 40 Gb/s 罐型光發射與光接收次模組；(b) 罐型基座⁽¹²⁾。

上述列舉的相關文獻，除了介紹光發射次模組的發展，也簡述一些可改善之處，本文將針對可適用在自動化機台量產的低成本罐型基座封裝進行分析，以用其來製作高速光發射次模組。

三、罐型封裝結構分析

圖 6 為傳統罐型基座結構，並非單純的傳輸線結構，由外至內可區分為三個部分，分別為外部饋入引線 (outside feed lead)、同軸饋入引線 (coaxial feed lead)，以及內部饋入引線 (inside feed lead)。

圖 6. 傳統罐型基座結構。



1. 外部饋入引線

外部饋入引線可分成訊號饋入線與接地線兩部分。若為雙線訊號饋入，則饋入線的特性可利用平行雙線結構來分析；若為單線訊號饋入，則饋入線的特性可利用單一圓柱導線結構分析。光發射次模組的印刷電路板，軟性電路板 (flex printed circuit, FPC) 已被廣泛使用，而使用軟性電路板必須將外部饋入引線剪短，因此結構的分析可簡化成導線插入軟性電路板對傳輸頻寬之影響，但本文不探討軟性電路板的設計，只考慮外部饋入引線對傳輸頻寬的影響。

饋入引線越長所產生的寄生電感會越大，將造成訊號在饋入引線傳輸過程中的功率損耗增加，影響整體罐型雷射基座傳輸頻寬。單一訊號饋入引線的寄生電感 (L) 可由公式 (1) 推算出。其中， l 為外部引線長度、 a 為外部引線半徑、 μ_0 為自由空間的導磁常數⁽¹³⁾。

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot l \cdot \left\{ \ln \left(\frac{l}{a} + \sqrt{\left(\frac{l}{a} \right)^2 + 1} \right) - \sqrt{\left(\frac{l}{a} \right)^{-2} + 1} + \left(\frac{l}{a} \right)^{-1} \right\} \quad [\text{H}] \quad (1)$$

2. 同軸饋入引線

同軸饋入引線的部分，在傳輸線分析中視為同軸結構，可利用公式 (2)、(3) 及 (4) 計算出電容 (C)、電感 (L)、及特性阻抗值 (Z_0)。其中， ϵ_0 為自

由空間的介電常數、 ϵ_r 為材料的相對介電常數、 b 為同軸外圍半徑、 a 為同軸內圍半徑、 l 為同軸長度⁽¹⁴⁾。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r \cdot l}{\ln \frac{b}{a}} \quad [\text{F}] \quad (2)$$

$$L = \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \right) \cdot l \quad [\text{H}] \quad (3)$$

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{b}{a} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\epsilon_r}} \quad [\Omega] \quad (4)$$

3. 內部饋入引線

內部饋入引線若為雙線訊號饋入，同樣可利用平行雙線結構來分析饋入線的特性，可利用公式 (5)、(6)、(7) 計算出電容 (C)、電感 (L) 及特性阻抗值 (Z_0)。若為單線訊號饋入，可利用接地平面上方的單導線結構分析，其電容 (C) 值為公式 (5) 的兩倍，而電感 (L) 及特性阻抗值 (Z_0) 為公式 (6) 與 (7) 的一半。其中， a 為內部引線半徑、 D 為內部引線雙線間距、 l 為內部引線長度⁽¹⁴⁾。

$$C = \frac{\pi\epsilon_0}{\cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right)} \cdot l \quad [\text{F}] \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right) \cdot l \quad [\text{H}] \quad (6)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{D}{2a} \right) \quad [\Omega] \quad (7)$$

四、高速罐型封裝模擬與量測

TO-46 罐型基座是一種常使用在垂直共振腔面射型雷射 (vertical cavity surface emitting laser, VCSEL) 和光偵測器封裝的基座結構，可以有不同的接腳數，一般常見的有 2 至 6 個接腳。高速光發射次模組若能採用 TO-46 垂直共振腔面射型雷射模組，將可提供一種低成本的模組封裝解決方案。因此，本文針對 TO-46 罐型基座進行模擬分析與實驗，探討其高頻特性。

1. TO-46 罐型基座的高頻特性模擬

根據 TO-46 罐型基座的尺寸與材料建構三維電磁模型，如圖 7。其中同軸處介質材料為玻璃，相對介電常數為 5.5，基座及引線的材料則為冷軋鋼板，並在 TO-46 罐型基座表面上鍍一層約 $1 \mu\text{m} - 2 \mu\text{m}$ 厚度的金。由於集膚效應，在高頻下導體內的電流只會存在於表面，當電磁場深入導體內部達一個穿透深度時，場的振幅大小會開始衰減，經計算在 40 GHz 頻率範圍內的集膚深度約為 $0.393 \mu\text{m}$ ，低於一般 TO-46 罐型基座鍍金的厚度，所以建立三維模型計算其高頻特性時，在考慮的頻率範圍內，基座及引線的材料可設定為鍍金。

利用 ANSYS 公司的三維模擬軟體 HFSS，根據圖 7 的結構進行 TO-46 罐型基座的電氣特性模擬，並利用 HFSS 模擬的高頻特性結果建立 TO-46 罐型基座的等效電路模型，如圖 8。利用 HFSS 軟體與等效電路模擬 TO-46 罐型基座的 S 參數，如圖 9(a) 至 (c)，圖 9(a) 為反射損耗 S11，圖 9(b) 與 (c) 為插入損耗 S21 及其相位，兩者的模擬結果相當吻合，證明此 TO-46 罐型基座的等效電路模型的適用性。

2. TO-46 罐型基座的高頻特性量測

為了量測 TO-46 罐型基座的高頻特性，並且儘可能將基座以外的影響降低，例如：電路板微帶

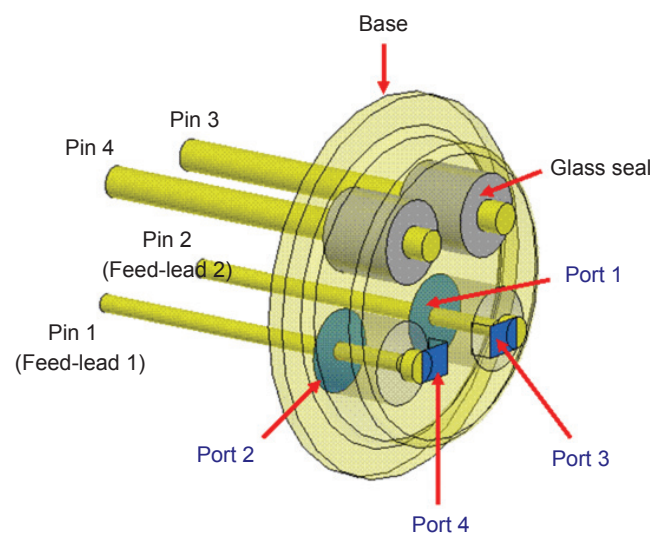
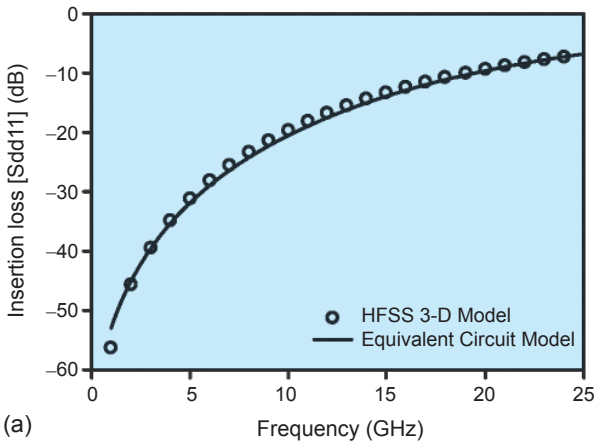
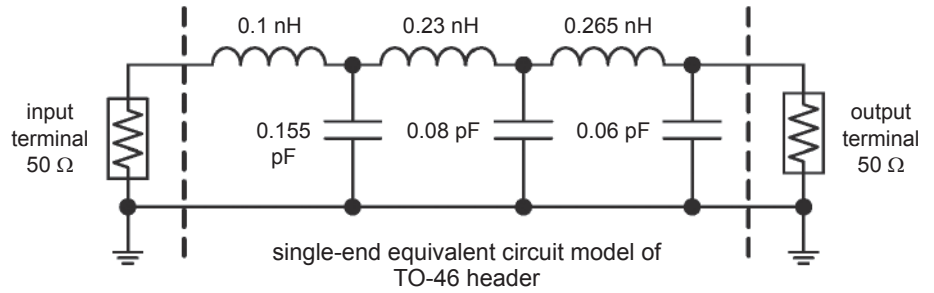


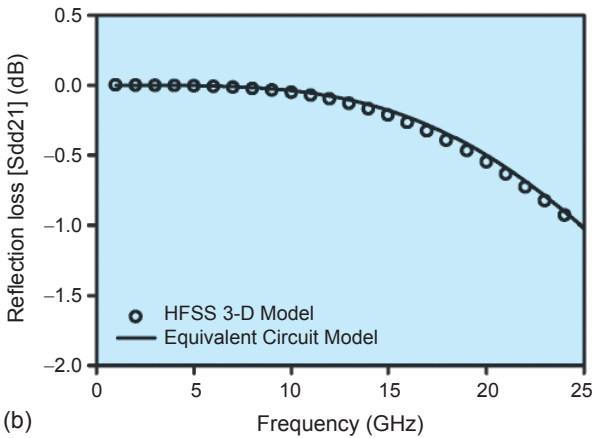
圖 7. TO-46 罐型基座三維模型。

圖 8.

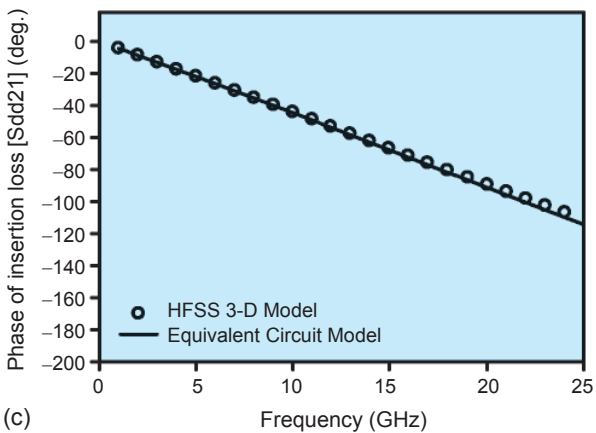
TO-46 罐型基座等效電路模型。



(a)



(b)



(c)

圖 9. TO-46 罐型基座高頻特性模擬結果，(a) 反射損耗，(b) 插入損耗，(c) 插入損耗相位。

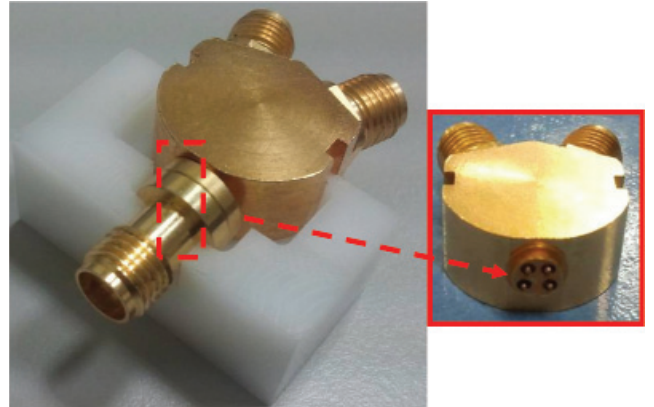


圖 10. TO-46 罐型基座高頻特性量測架構。

線、板材、焊接等。因此我們設計一組特性阻抗為 50 歐姆的特製 K 型接頭，包含一個單端饋入的 K 型接頭及一個雙端饋入的 K 型接頭，雙端輸入的設計是為了饋入差動訊號，兩個 K 型接頭與 TO-46 罐型基座以接觸的方式連結，如圖 10 所示。將 TO-46 罐型基座內部饋入引線插入到單端饋入 K 型接頭，TO-46 罐型基座外部饋入引線接腳插入雙端饋入 K 型接頭，並製作可以嵌入整體結構的凹槽治具，以固定整體結構，避免量測時接合面的空隙影響高頻特性。

我們也建構兩個 K 型接頭與 TO-46 罐型基座連結的三維電磁模型，利用 HFSS 模擬整體結構的高頻特性，以了解所設計 K 型接頭對高頻特性的影響，也與量測結果相互驗證正確性。量測與模擬的反射損耗 S11 與插入損耗 S21，如圖 11(a) 與 (b) 所示，量測與模擬的結果相當吻合；在 25 GHz 的頻率範圍內，反射損耗均小於 -10 dB，插入損耗的 -3 dB 頻寬超過 25 GHz。利用相同的量測架構，也進行大訊號眼圖的量測，圖 12(a) 與 (b) 為操作速率 25 Gb/s 的輸入與輸出眼圖量測，輸入與輸出眼圖的 Q 值分別為 11.77 及 9.95。根據高頻 S

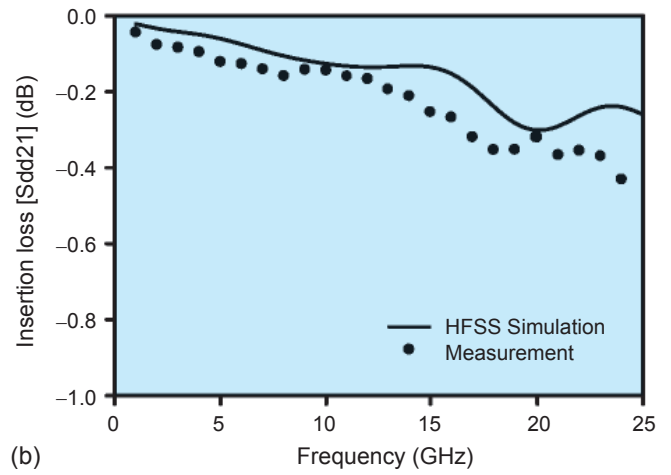
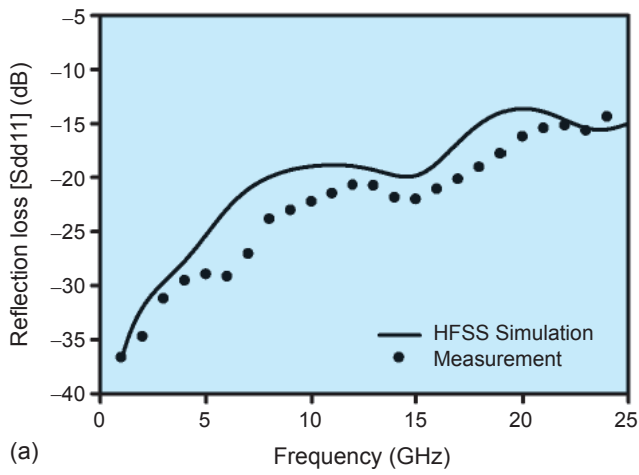
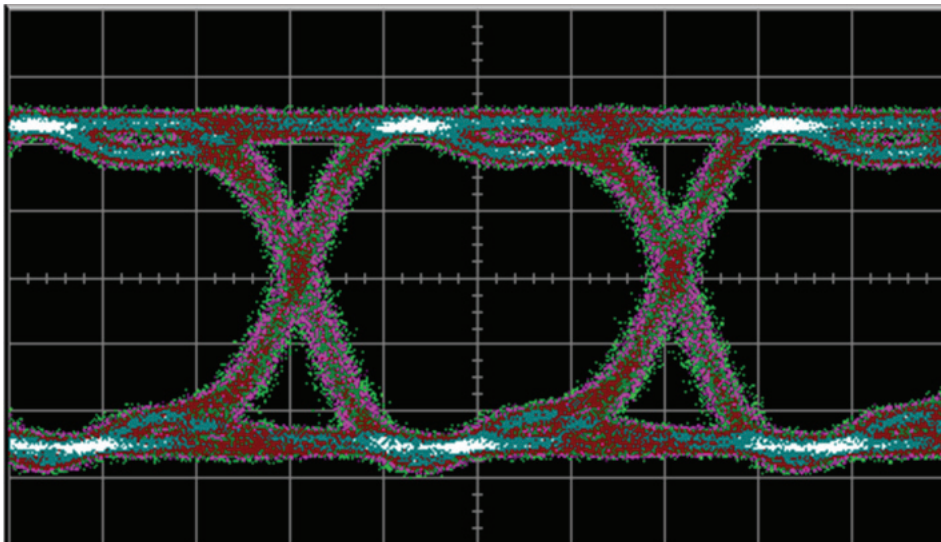
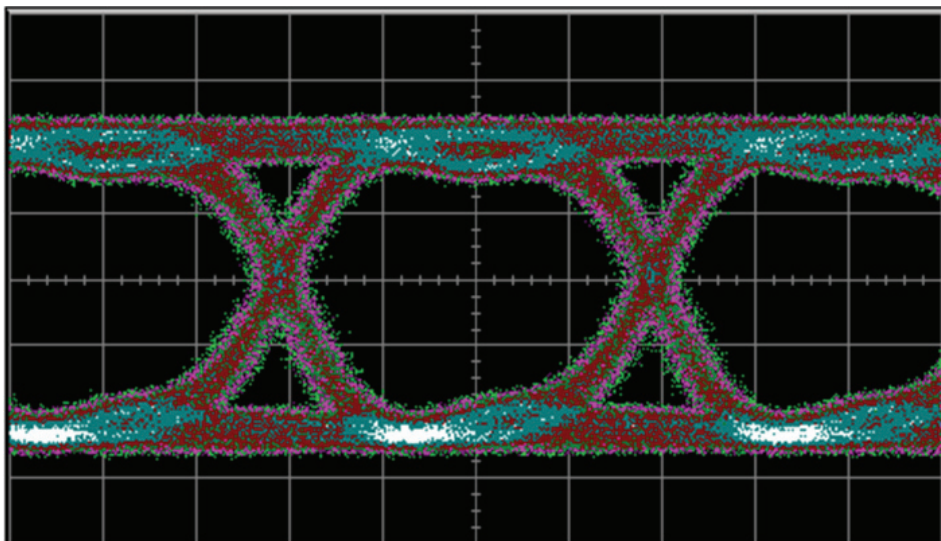


圖 11. TO-46 罐型基座高頻特性量測結果，(a) 反射損耗，(b) 插入損耗。



(a)



(b)

圖 12.
TO-46 罐型基座 25 Gb/s 眼圖量測，(a) 輸入眼圖，(b) 輸出眼圖。

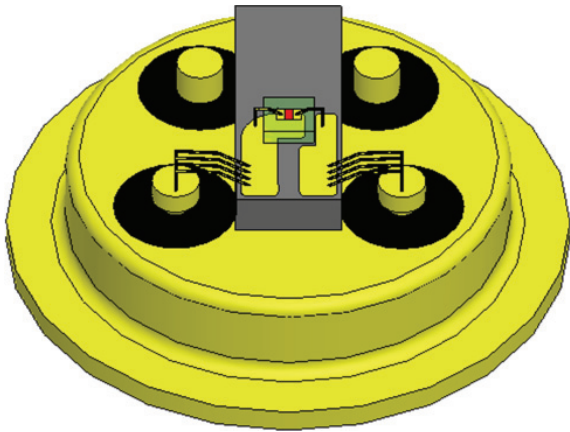


圖 13. TO-46 罐型封裝光次模組結構。

參數與眼圖的量測及模擬，驗證 TO-46 罐型基座本身可適用在 25 Gb/s 的高速率操作，不過，若再加上雷射或光偵測器等元件製成光次模組時，尚有光電元件特性及封裝打線等問題會影響光次模組高頻特性與操作速率。

3. TO-46 罐型封裝的光發射次模組

將氮化鋁 (AlN) 基板放置在 TO-46 罐型基座上，再將垂直共振腔面射型雷射晶片放置在氮化鋁基板上，利用打線將雷射晶片與氮化鋁基板上的微帶線連接，氮化鋁基板上微帶線的另一端也透過打線與 TO-46 罐型基座的內部饋入引線連接，TO-46 罐型封裝光次模組結構如圖 13。我們量測此光次模組操作在 5 Gb/s、10 Gb/s 與 25 Gb/s 的眼圖，分別如圖 14(a) 至 (c)，輸出眼圖的 Q 值分別為 17.97、23.16 與 8.74。根據量測結果，可知 TO-46 罐型封裝光次模組操作在 5 Gb/s 與 10 Gb/s 的速率，有不錯的訊號品質。雖然操作速率 25 Gb/s 的眼圖，訊號品質的確有明顯的劣化，但訊號 0 與 1 仍足以辨識，證實 TO-46 罐型封裝可以被使用在 25 Gb/s 的高速光次模組。

五、結論

本文介紹低成本的罐型封裝光模組應用在高速光傳輸，以 TO-46 罐型封裝光模組為案例，先透過三維電磁模擬軟體模擬與分析 TO-46 罐型基座的高頻特性，並建立其等效電路模型，兩者的模擬

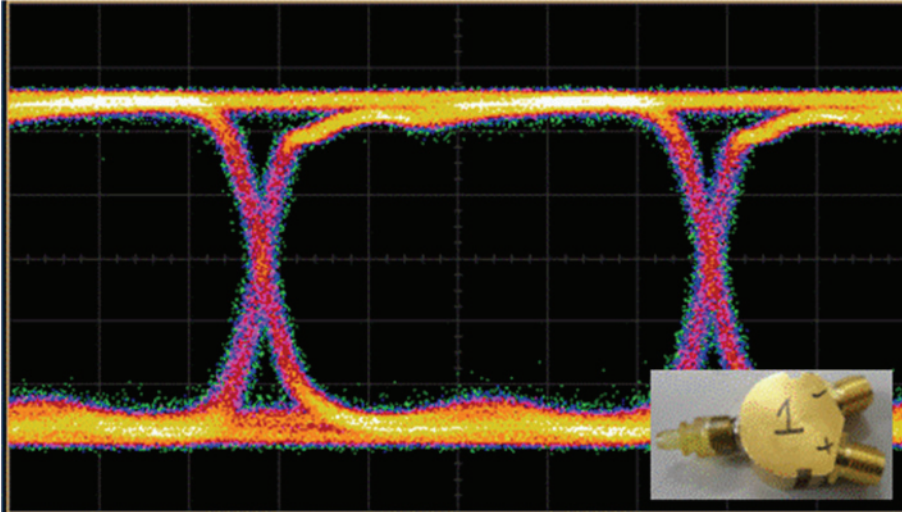
結果相當吻合，也獲得良好的高頻特性，插入損耗頻寬超過 25 GHz。我們也設計一組特殊的 K 型接頭來量測 TO-46 罐型基座的高頻特性，並量測 TO-46 罐型雷射模組的輸出眼圖，證實 TO-46 罐型封裝雷射模組操作速率可達 25 Gb/s。未來若對 TO-46 罐型基座內氮化鋁基板的微帶線結構進行新的設計，將可再提升 TO-46 罐型光模組的高頻特性。罐型封裝可以實現高傳輸速率及低成本的光次模組，將能應用在新世代高速光纖接取網路的發展。

誌謝

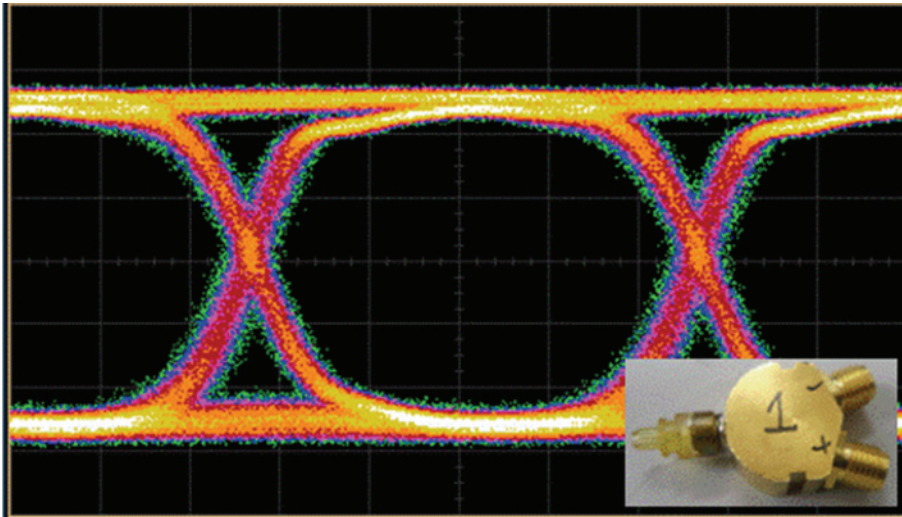
感謝國科會專題研究計畫 (NSC-101-2221-E-151-048 及 NSC-101-2221-E-151-046) 對本文研究提供的預算支持。

參考文獻

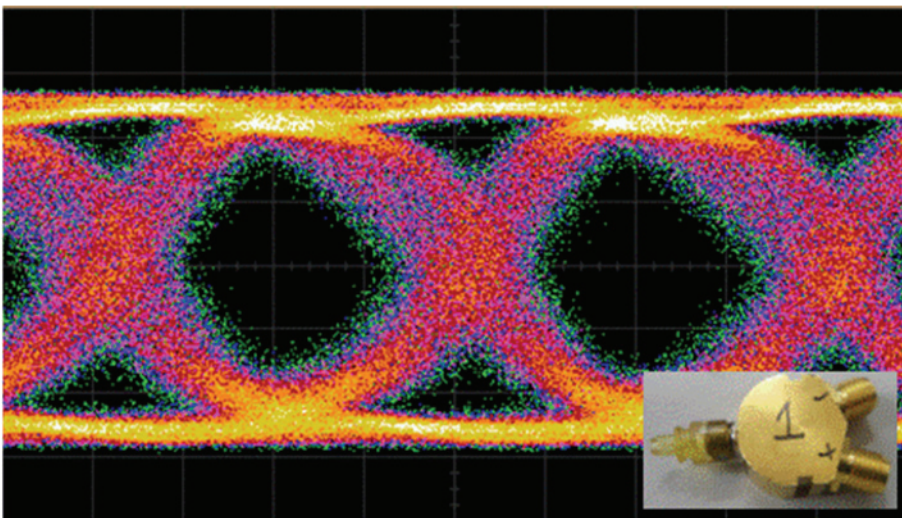
1. K. Tanaka, A. Agata, and Y. Horiuchi, *J. Lightwave Technol.*, **28** (4), 651 (2010).
2. P. Winzer, *IEEE Commun. Mag.*, **48** (7), 26 (2010).
3. E. R. H. Fuchs, R. E. Kirchain, and S. Liu, *J. Lightwave Technol.*, **29** (15), 2319 (2011).
4. C. Cole, *IEEE Commun. Mag.*, **50** (2), s58 (2012).
5. T. T. Shih, M. C. Lin, and W. H. Cheng, *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, **12** (5), 1009 (2006).
6. T. T. Shih, M. C. Lin, P. H. Tseng, C. Y. Li, T. Y. Hung, Y. J. Chiu, and W. H. Cheng, *J. Lightwave Technol.*, **25** (11), 3488 (2007).
7. T. T. Shih, P. H. Tseng, Y. Y. Lai, and W. H. Cheng, *J. Lightwave Technol.*, **29** (17), 2538 (2011).
8. T. T. Shih, P. H. Tseng, Y. Y. Lai, and W. H. Cheng, *J. Lightwave Technol.*, **30** (6), 834 (2012).
9. H.-G. Yun, K.-S. Choi, Y.-H. Kwon, J.-S. Choe, and J.-T. Moon, *Electron. Compon. & Technol. Conf.*, 1994 (2007).
10. C. Chen, N. H. Zhu, S. J. Zhang, and Y. Liu, *IEEE Trans. Adv. Package.*, **30** (1), 97 (2002).
11. E. Yoon, M. Lee, S. Lee, C. Jeong, J. Lee, and J. Jeong, *IEEE Trans. Adv. Package.*, **31** (4), 824 (2008).
12. J. R. Kropp, J. A. Lott, N. N. Ledentsov, P. Otruba, K. Drögemüller, G. Fiol, D. Bimberg, I. Ndip, R. Erxleben, U. Maass, M. Klein, G. Lang, H. Oppermann, H. Schröder, and H. Reichl, *Electron. Sys.-Integration Technol. Conf.*, 1 (2010).
13. H. Nakano, S. Sasaki, M. Maeda, and K. Aiki, *J. Lightwave Technol.*, **5** (10), 1403 (1987).
14. D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetic*, 2nd ed., Addison Wesley (1989).



(a)



(b)



(c)

圖 14.
TO-46 罐型封裝光次模組輸出
眼圖，(a) 5 Gb/s，(b) 10 Gb/
s，(c) 25 Gb/s。



施天從先生為國立交通大學光電工程博士，現任國立高雄應用科技大學電子工程系教授兼任系主任。

Tien-Tsorng Shih received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently a professor and the chairman at the Department of Electronic Engineering of National Kaohsiung University of Applied Sciences.



周肇基先生為國立台灣科技大學電子工程博士，現任國立高雄應用科技大學電子工程系副教授。

Jau-Ji Jou received his Ph.D. in electronic engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently an associate professor at the Department of Electronic Engineering of National Kaohsiung University of Applied Sciences.