

具高資料傳輸速率與高效率之可見光通訊驅動晶片

The LED Driver IC of Visible Light Communication with High Data Rate and High Efficiency

李育禎 賴俊良 游爵豪
Yu-Chen Lee, Jyun-Liang Lai, Chueh-Hao Yu

中文摘要

發光二極體(LED)驅動電路為實現可見光通訊系統之一關鍵零組件，主要的挑戰在於如何在高速資料傳輸的同時維持LED固態照明的高效率需求。本論文提出一個結合LED固態照明與可見光通訊技術的白光二極體驅動器，並可支援正交頻分複用技術(OFDM)之資料調變格式。此電路架構採用線性電流調節，並整合直流照明驅動與交流資料信號來控制單一功率元件，以達到高速、高效率及高整合度之目的。本論文提出一降阻技術以提高驅動器控制迴路之電性頻寬，並於驅動器前端使用一階RC前置信號等化器補償發光二極體電光轉換之頻寬限制，以提升整體可見光通訊系統的電光轉換(E/O/E)頻寬。此驅動控制晶片實現在0.5微米高壓製程上，晶片面積為1540um*1250um，使用標準SOP-16封裝，量測結果顯示LED驅動電流在350mA時，光調變頻寬達到10.9MHz，搭配正交頻分複用技術之資料調變格式實際資料傳輸率達50Mb/s。

Abstract

The Light-Emitting Diode (LED) driver is an important part of Visible Light Communication (VLC) systems. The main challenge of the VLC LED driver is to offer a high data transmission rate with high power efficiency. This paper presents the design of a white light LED driver that combines the LED lighting with VLC technology. The proposed LED driver uses linear current regulation and controls the AC current signal and the DC current through a single power device for the purposes of high speed, high efficiency and high integration. It also can support the modulation format of orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). In addition, this paper presents an impedance reduction technique to enhance the bandwidth of the LED driver. And a first-order pre-equalizer is utilized to enhance the electron-optical-electron (E/O/E) bandwidth in the VLC system due to the bandwidth limitation of the phosphor LED. The VLC LED driver is fabricated in a standard 0.5um CMOS technology and the area is 1540um*1250um. It is available in a standard SOP-16 pin package. The experimental results show that the optical modulation bandwidth of 10.9MHz has been achieved with the forward biased LED current of 350mA. By using the OFDM data modulation scheme, the data rate of 50Mb/s is demonstrated.

關鍵詞(Key Words)

可見光通訊 (Visible Light Communication ; VLC)

發光二極體 (Light-Emitting Diode ; LED)

驅動器 (Driver Circuit)

前置信號等化器 (Pre-equalizer)

1 · 前言

高功率發光二極體將成為下個照明世代的主流，其具備高效率、長時間壽命、小體積的特性，使得發光二極體在各領域中持續發展，如照明、車燈、交通號誌、信號顯示面板等。相較於白熾燈與日光燈，發光二極體寬廣的調變頻寬，使其具備高速通訊傳輸條件，且同時具有基本照明或指示功能，以上特點使發光二極體更具未來發展性，因此各界已開始致力於發光二極體為基底的通訊網路研究。其中將可見光通訊技術應用在室內LED固態照明非常具發展潛力，因其具備高隱私性，不需傳統微波傳輸所需的通訊界面，且可直接建立在原有室內照明基礎設施上，並具有低成本的優勢。

然而目前可見光通訊技術的發展上，則多以實現高速資料傳輸為主要目的，在發光二極體驅動電路的設計上多以T型偏壓器(Bias-tee)整合直流照明驅動與交流資料信號[1]-[3]，且在交流信號路徑上同時也需要一個驅動器來驅動發光二極體，此交流信號驅動器通常以一個功率放大級來實現，因此使得驅動器整體轉換效率可能低於50%。也由於T型偏壓器與功率放大級的使用，使得其積體化程度較低且相對成本也較高，對於將可見光通訊技術直接應用在室內LED固態照明上將形成一大阻礙。

另外一般室內LED照明的白光源產生的方式有兩種，第一種為使用紅、藍、綠三單色光混合出白光。第二種方法為使用藍光激發黃色螢光粉產生黃光，再與原本的互補色藍光混合出白光。目前後者為業界較成熟的技術，在成本、可靠度、壽命、亮度上皆佔有優勢。然而螢光粉型的白光二極體需要較長的反應時間，使其調變頻寬相較於使用紅、藍、綠三色混光的白光源窄，一般市售的黃色螢光粉型白光二極體-3dB電光轉換(E/O/E)頻寬通常小於2MHz[4]，因此限制了可見光通訊系統整體的資料傳輸率。

由於上述的原因使得將可見光通訊技術實際應用到室內LED固態照明上將面臨成本、效率、以及傳輸速度上彼此相互牽制的挑戰，因此本論文提出一個結合固態照明與可見光通訊技術的白光二極體驅動器，此電路架構採用線

性電流調節，並整合直流照明驅動與交流資料信號來控制單一功率元件，以達到高速、高效率及高整合度之目的，同時提出一降阻技術以提高驅動器控制迴路之電性頻寬，並於驅動器前端使用一階RC前置信號等化器補償發光二極體電光轉換之頻寬限制，以提升整體可見光通訊系統的電光轉換頻寬。實驗結果顯示將白光二極體串驅動在350mA下，整體系統-3dB電光轉換頻寬由原本的1.3MHz提升至10.9MHz，同時也提高了可見光通訊的資料傳輸率。在搭配正交頻分複用技術(OFDM)之資料調變格式下實際量測資料傳輸率達到50Mb/s。

本文將在章節二詳細介紹所提出應用於可見光通訊系統之發光二極體驅動電路架構與設計；章節三為晶片驗證與系統量測結果。最後，將在章節四做一個總結。

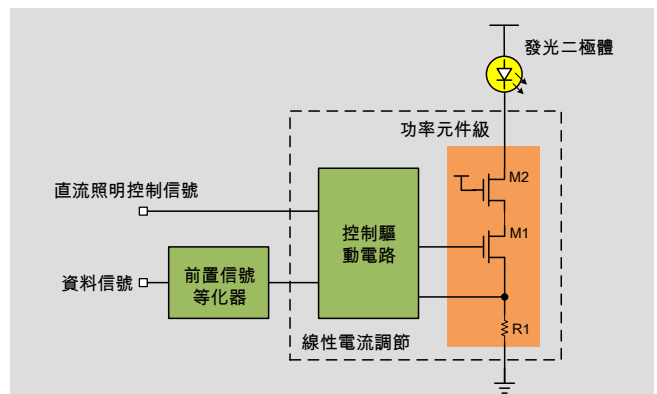


圖 1 可見光通訊LED驅動器電路架構

2 · LED驅動器電路架構與設計

本論文提出的可見光通訊驅動器採用線性電流調節控制，並整合直流照明驅動與交流資料信號來控制單一功率元件，以達到高速、高效率及高整合度之目的，電路架構如圖1所示，主要分為三個部分，包含功率元件級設計、控制驅動電路設計、以及置於驅動器前端的一階RC前置信號等化器，在本章節中將分別對這三個主要區塊做詳細的介紹。

2.1 線性電流調節控制

線性電流調節控制如圖2所示，藉由線性控

制驅動晶片與功率元件M1形成一閉迴路控制系統，以產生一個精確的控制電流 I_{LED} 來驅動發光二極體，此驅動電流 I_{LED} 將等於 $V_{CS}/R1$ ，其中 V_{CS} 為驅動電路的輸出控制電壓，R1為一電流感測電阻。因 I_{LED} 與 V_{CS} 為一線性關係而非二次曲線關係，因而達到線性電流調節之目的。

同時線性控制驅動電路提供了整合直流照明驅動與交流資料信號來控制單一功率元件M1的功能，其輸出控制電壓 V_{CS} 將會等於直流照明控制信號 V_{LD} 加上交流資料信號 V_{IS} ，也就是說發光二極體驅動電流 I_{LED} 將同時包含了照明控制與傳輸資料信號的控制命令，因此將可避免T型偏壓器與功率放大級的使用，以達到高速、高效率及高整合度之目的。

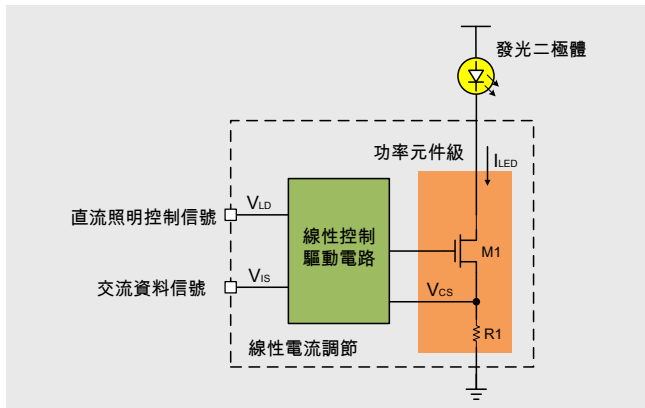


圖 2 線性電流調節控制

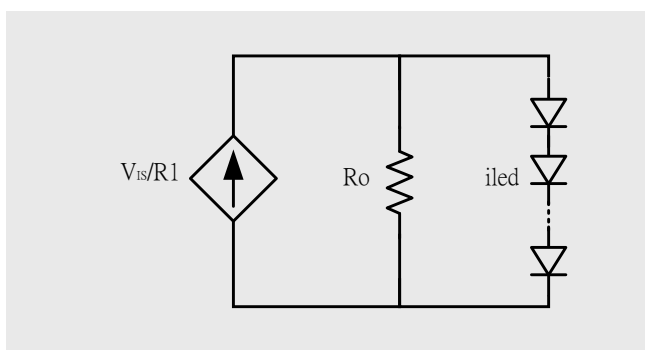


圖 3 LED電流驅動電路之小信號等效模型

從小信號的觀點來看，如圖3，驅動電路的輸出阻抗 R_O 超過千歐姆等級，而發光二極體串的小信號阻抗約為十幾至幾十個歐姆等級，因此整個驅動電路可視為一個電壓控制電流源，可有效以線性調節方式控制流經二極體的電流，達到發光二極體恆流驅動，並同時注入交

流資料信號作為可見光通訊之用。

2.2 功率元件級設計

功率元件級主要由功率電晶體與電流感測電阻構成，其設計在於可以提供發光二極體高驅動電流，然而高驅動電流通常伴隨著高閘極等效輸入電容，因而造成迴路頻寬降低且前端控制驅動電路要耗費更多的輸出驅動電流來驅動功率電晶體本身，也因此造成系統速度、效率、及線性度的惡化。本設計採用如前述之線性電流調節控制之驅動器架構作發光二極體電流調節控制，同時提出一降阻技術可大幅降低控制驅動電路輸出端所看到的功率電晶體閘極等效輸入電容值。實驗比較之電路架構如圖4所示，實驗之發光二極體採用柯銳(Cree)公司的MX-3白光二極體，功率電晶體採用威世(Vishay)公司的Si3456DDV N型管功率電晶體。

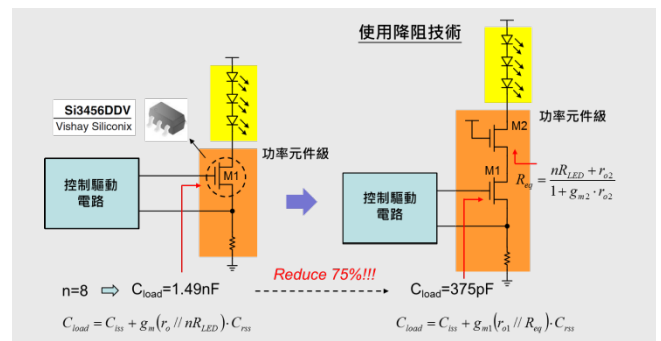


圖 4 LED驅動電路架構比較

在未使用降阻技術之功率元件級設計如圖4(左)所示，其閘極等效輸入電容值為小信號輸入電容(C_{ISS})以及小信號反向傳輸電容(C_{RSS})所產生之米勒電容效應的總和，而此米勒電容大小則與功率電晶體汲極端所看到之等效輸出阻抗有倍數關係。同時為了達到室內照明需求，LED燈具通常包含數顆至十幾顆串接發光二極體元件，而功率電晶體汲極端所看到之等效輸出阻抗則隨著白光二極體串接顆數(n)等比例上升，進而增加了電晶體閘極等效電容值，當驅動八顆白光二極體於350mA條件下，電晶體閘極有1.49nF等效電容，因此限制了輸入信號的頻寬。

為解決功率電晶體汲極端所看到之等效輸

出阻抗隨著白光二極體串接顆數上升問題，本論文提出一降阻技術，實現方法如圖4(右)，在原功率電晶體(M1)上疊接(Cascode)另一功率電晶體M2，使得M1電晶體汲極端看到之等效輸出阻抗(R_{eq})減少一個 $(1+g_m r_o)$ 的倍率，進而有效減小M1電晶體的閘極等效輸入電容值。在驅動八顆白光二極體於350mA條件下，此降阻技術有效減少了75%的閘極等效容值，即從圖(左)的1.49nF降至圖(右)375pF。因此本論文採用疊接電晶體之降阻技術，使驅動器同時達到高驅動電流和高頻寬的需求，並有效減少前端控制驅動電路電流消耗的需求。

2.3 控制驅動電路設計

本節將詳細介紹白光二極體控制驅動電路之電路設計，此控制驅動電路主要功能在提供直流照明驅動與交流資料信號之整合，並用來控制外部單一功率元件，提供足夠之驅動能力，以及高的控制迴路頻寬與穩定性，以達到高資料傳輸率之需求。內部主要電路方塊如圖5所示，主要包含誤差放大器(Error amplifier)、電壓加法器(Voltage adder)、電壓調節器(Voltage regulator)、和偏壓電路(Bias)。

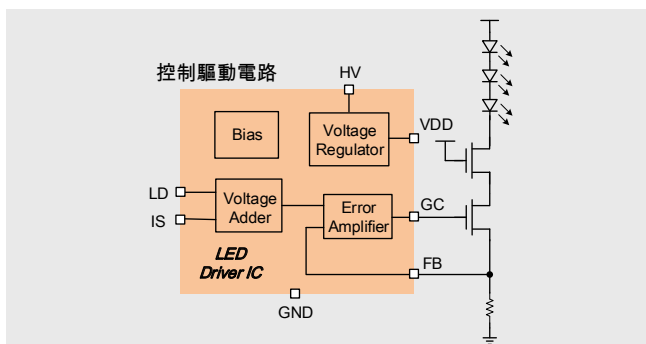


圖 5 控制驅動電路內部方塊圖

2.3.1 誤差放大器設計

控制驅動電路中誤差放大器設計(Error amplifier)採用摺疊疊接放大器(Folded cascode amplifier)並配合AB類輸出級(class AB output stage)[5]來達到高增益、高驅動能力、以及高線性度之需求。電路圖如圖6所示。由於電流感測電阻回授之電壓為參考於地之低

電壓範圍，因此摺疊疊接放大器輸入採用P型管差動輸入對。其總增益為此摺疊疊接放大器增益A1和AB類輸出級增益A2的乘積，其中 $A_1 = g_{m1} \{ (g_{m4c} r_{o4c} r_{o4}) // [g_{m6c} r_{o6c} (r_{o6} // r_{o1})] \}$ ， $A_2 = (g_{mpo} + g_{mno})(r_{opo} // r_{ono})$ 。

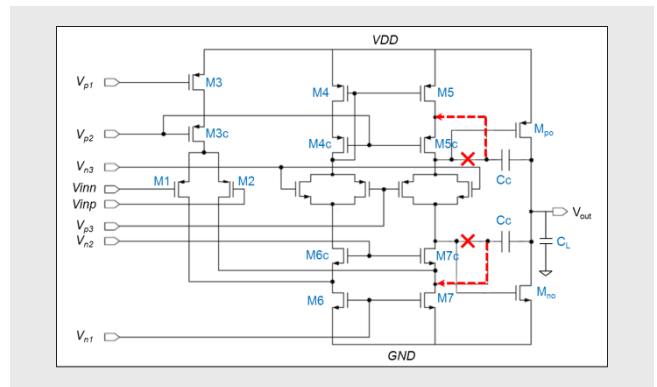


圖 6 誤差放大器電路圖

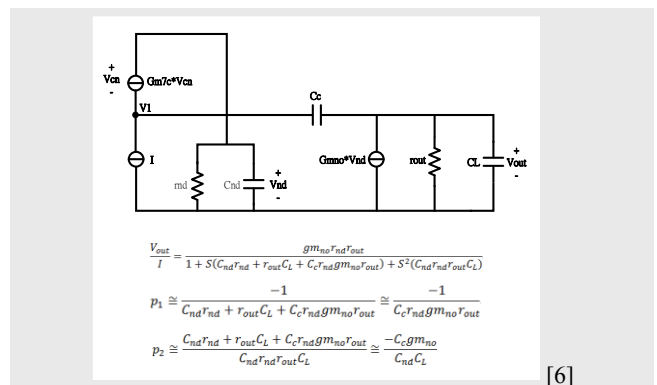


圖 7 Cascode米勒補償小訊號分析

放大器迴路補償使用Cascode米勒補償，其小訊號電路分析如圖7所示，相較於一般的米勒補償，其主極點位置(dominant pole, p_1)並沒有改變，而次級點位置(non-dominant pole, p_2)則相較於一般米勒補償多乘上一個 C_c/C_{nd} ，且 $C_c > C_{nd}$ 。因此可以將次極點推往更高頻的位置以增加整體迴路的高頻特性，並提升迴路穩定性。且由於補償電容的左端接到的是一個低輸入阻抗，所以可以再降低其信號失真度，得到一個比較好的線性度。最後，搭配前述功率元件級模擬驅動器迴路特性，電性頻寬達到32MHz，輸入共模電壓範圍0-3V，消耗電流14mA。

2.3.2 電壓加法器設計

電壓加法器(Voltage adder)電路主要負責整合直流照明控制信號 V_{LD} 與交流資料信號 V_{IS} ，並提供適當的訊號大小給後端誤差放大器使用。如圖8所示，電壓加法器採取非反向加法器架構，整合直流控制訊號(V_{LD})與交流資料訊號(V_{IS})，由於兩者輸入端電阻相等， V_x 電位為兩者訊號相加除於二，透過非反向放大器架構整合訊號，最後 V_{MIX} 端輸出電壓將得到 $(1+\alpha)(V_{LD}+V_{IS})/2$ 電壓信號，設計上若將 α 設計為1，則可以得到輸出電壓 V_{MIX} 等於 $V_{LD}+V_{IS}$ 。

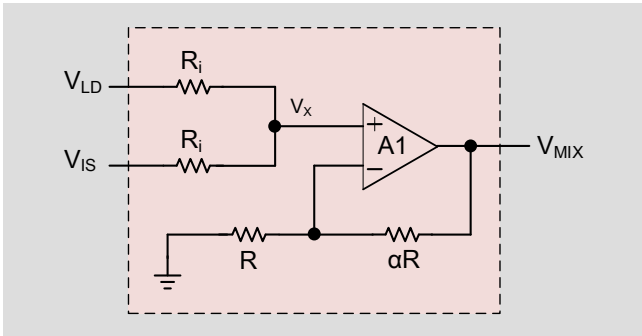


圖 8 電壓加法器電路架構

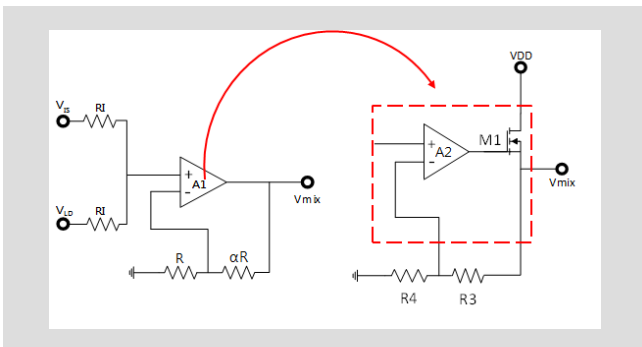


圖 9 放大器電路圖

電壓加法器內部之放大器A1使用二級放大器架構，如圖9所示，由於後端誤差放大器輸入位準為參考於地之低輸入電壓範圍，因此第二級輸出級使用N型管電晶體(M1)與回授電阻 R_4 與 R_3 ，形成源極隨耦器(Source follower)，可得到最佳之線性度。設計之信號頻寬為50MHz，輸入共模電壓範圍0-1V，整消耗電流360uA。

2.4 前置信號等化器設計

如圖1所示，使用提出之降阻技術同時搭配控制驅動電路設計有效提升了白光二極體之驅動電流頻寬達到32MHz，然而電流信號流經白光二極體轉換成光信號過程中，由於受限於前述白光二極體較長的反應時間，此過窄的二極體電光轉換頻寬，使得在光接收端量測到的信號頻寬較發射端電流頻寬小，通常受限於2MHz以下，即一般市售高功率白光二極體的調變頻寬。為解決此問題，本論文於驅動器前端加入一階RC前置信號等化器[7]，補償流經白光二極體之電流信號轉為光信號過程中的頻寬衰減。一階RC信號等化電路如下圖10所示，由一個 R_1 並聯 C_1 後串接 R_2 組成，其轉換函數如圖10公式所示。

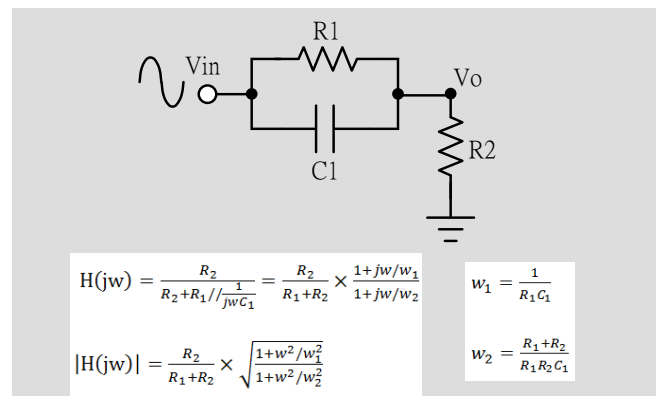


圖 10 一階RC信號等化器

針對可見光通訊系統的接收端頻譜結果設計零點 w_1 與極點 w_2 位置，以及等化器信號從高頻至低頻的增益衰減量。本論文將零點設計再白光二極體的-3dB電/光/電頻寬上，極點則設計在最終欲設計的-3dB頻寬上，即可補償從發射端驅動器至接收端的光信號頻寬。

3. 晶片與系統驗證結果

本論文提出的控制驅動晶片實現在0.5微米高壓製程上，主要電路方塊佈局如圖11所示，包含誤差放大器(Error amplifier)、電壓加法器(Voltage adder)、電壓調節器(Voltage regulator)，晶片面積為1540um*1250um，並使用標準SOP-16封裝。

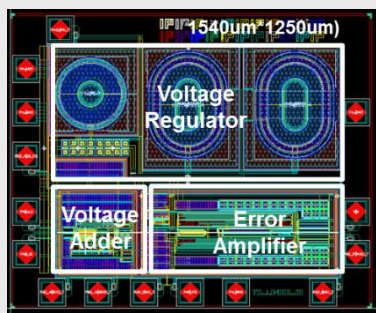


圖 11 LED驅動晶片圖

白光二極體驅動模組驗證平台如圖12所示，其中包含控制驅動晶片(紅框標示處)、功率電晶體(Vishay Si3456DDV)、以及前置信號等化器。驗證條件為驅動八顆串接的白光二極體(Cree MX-3)，供給直流電流350mA、交流電流 $\pm 100\text{mA}$ 、高壓(HV)上電30.6V，量測輸出交流電流對輸入信號的變化。經由掃描頻率量測，輸出電流對輸入信號-3dB頻寬為31.3MHz，接近模擬結果的32MHz。



圖 12 LED驅動模組

由前述量測結果顯示，藉由提出之降阻技術功率元件級設計及控制驅動電路設計，使流經白光二極體之電流信號對輸入信號之電性頻寬達31.3MHz。接下來進行可見光通訊系統頻寬量測，驗證方法為使用光接收器(Optical receiver)在接收端將光信號轉為電信號後，測試其對發射端的驅動器輸入信號之頻率響應。量測結果如圖13綠色線所示，在未加入前述之一階RC等化器之前系統頻寬僅為1.3MHz，主要受限於市售黃色螢光粉型白光二極體在電流轉光信號過程的頻寬限制。為補償此頻寬限制，在驅動器前端加入一階RC等化器，其頻率

響應如圖13藍色線，設計上將一階RC等化器的零點設計在1.3MHz，極點設計在10MHz來補償圖13綠色線的頻寬。最終系統頻寬補償結果如圖13紅色線所示，其-3dB頻寬為10.9MHz，即一階RC等化器的設計使光調變頻寬從僅有的1.3MHz提升至10.9MHz，有效提升了可見光通訊系統頻寬受限於黃色螢光粉型白光二極體頻寬的限制。

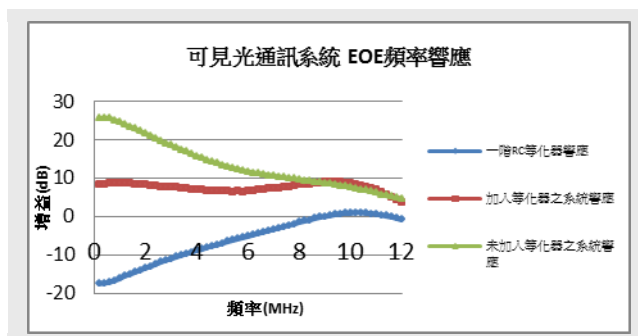


圖 13 前置信號等化器補償頻譜圖

上圖13結果為使用示波器在時域的量測結果，下圖14所示則為在相同量測條件下使用頻譜分析儀在頻域下的量測結果，結果同樣為10.9MHz。

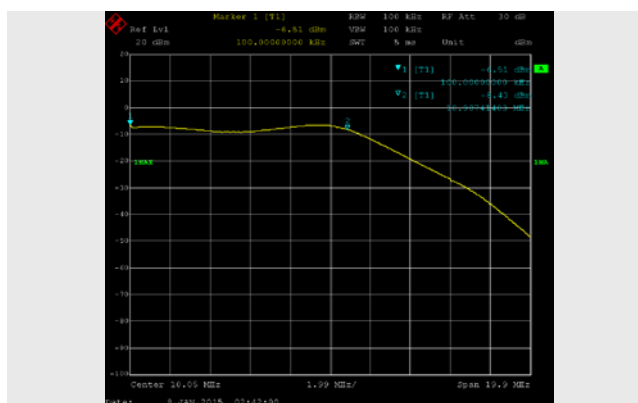


圖 14 可見光通訊系統將收端量測頻譜圖

下圖15為系統實際在接收端看到的示波器波形圖，圖中紅色線為系統在-3dB頻率點下的接收端量測結果。

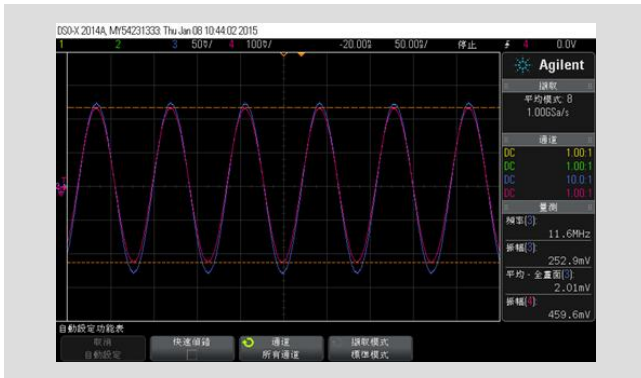


圖 15 可見光通訊系統將收端量測波形圖

綜合以上量測結果，本論文提出的發光二極體驅動電路在LED直流驅動電流為350mA下，實現了可見光通訊系統達到10.9MHz的系統調變頻寬，並搭配使用OFDM資料調變格式傳輸資料，達到50Mb/s資料傳輸率，其系統驗證平台如下圖16所示，發光二極體驅動器在提供照明功能下，同時將正在播放的影片經由可見光通訊系統傳送至接收端播放。



圖 16 可見光通訊系統驗證平台

如前言所述，以T型偏壓器整合直流照明驅動與交流資料信號，通常還需要一個額外的功率放大器，除成本與面積考量外，其轉換效率也因此大幅降低。參考使用T型偏壓器為主架構的LED驅動器，再搭配後置等化器及藍光濾波器[1]、或多重共振等化器等架構[4]，可提升可見光通訊系統頻寬至25MHz~50MHz，但文中都未提及驅動器效率，而本篇提出的可見光通訊驅動晶片在維持LED驅動器之固態照明效率下整合可見光通訊功能，且在未加入藍光濾波器下量測系統頻寬至10.9MHz，並維持最高轉換效率在80%以上，為兼具高速、高效率與高電路整合度的可見光通訊驅動器。

4. 結論

本論文提出一個結合固態照明與可見光通訊技術的白光二極體驅動器，有別於大部分採用T型偏壓器驅動的設計，本論文使用線性電流調節電路提供直流電流驅動，並同時注入交流信號達到驅動單一功率電晶體的設計，以提高驅動電路的效率與整合度。而在白光二極體驅動架構上提出一降阻技術來降低離散功率電晶體元件對驅動電流信號之頻寬限制，以達到高電流驅動與高頻寬需求。另外在光調變頻寬限制上以一階RC前置信號等化器置於驅動電路前端補償可見光通訊系統電光轉換頻寬。此驅動控制晶片實現在0.5微米高壓製程上，晶片面積為1540um*1250um，使用標準SOP-16封裝。量測結果顯示LED驅動電流為350mA時，系統光調變頻寬達到10.9MHz，並在使用OFDM資料調變格式傳輸資料下，資料傳輸率達50Mb/s。

參考文獻

- [1] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner and L. Zeng, "100-Mb/s NRZ Visible Light Communications Using a Postequalized White LED," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, pp.1063-1065, Aug.2009.
- [2] C. W. Chow, C. H. Yeh, Y. F. Liu and Y. Liu, "Improved modulation speed of the LED visible light communication system integrated to the main electricity network," *Electron. Lett.*, vol. 47, pp.867-868, July.2011.
- [3] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner and L. Zeng, "80 Mbit/s Visible Light Communications using pre-equalized white LED," *Proc. ECOC*, 2008, pp.1-2.
- [4] H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner and L. Zeng, "High-Speed Visible Light Communications Using Multiple-Resonant Equalization," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, pp.1243-1245, July.2008.
- [5] R. Hogervorst and J. H. Huijsing, Design of

Low-Voltage, Low-Power Operational Amplifier Cells, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[6] Imre Knausz. (2004) [online]. Available: http://www.knausz.com/files/opamp_final_paper2.pdf

[7] H. Li, X. Chen, B. Huang, and D. Tang, "High Bandwidth Visible Light Communications Based on a Post-Equalization Circuit," *IEEE Photonics Technology Letters.*, vol. 26, pp.119-122, Jan.2014.

作者簡介

李育禎



現任工研院資通所綠能電子設計與應用部副工程師。於2012年取得國立清華大學電子工程所碩士學位。2012年起服務於工研院資通所迄今。專長為光通訊網路電路、電源電路及積體電路設計。

[E-mail:YuChenLee@itri.org.tw](mailto:YuChenLee@itri.org.tw)

賴俊良



現任工研院資通所綠能電子設計與應用部副工程師。於2013年取得國立台灣科技大學電機所碩士學位。2013年起服務於工研院資通所迄今。專長為光通訊網路電路、電源電路及積體電路設計。

[E-mail:itriA20306@itri.org.tw](mailto:itriA20306@itri.org.tw)

游爵豪



現任工研院資通所綠能電子設計與應用部副經理。於2002年取得國立中央大學電機所碩士學位。2004-2007服務於工研院系統晶片中心。2008-2011服務於聯詠科技。2011年起服務於工研院資通所迄今。專長為混合式信號電路設計、光通訊網路電路設計、及電源積體電路設計。

[E-mail: chyu@itri.org.tw](mailto:chyu@itri.org.tw)