

國立勤益科技大學

電子工程系碩士班

碩士論文

PWM 驅動 IC 設計與實現

Design and Implementation of PWM
Driver IC

研究生：郭登淵

指導教授：洪玉城 博士

中華民國 九十九 年 七 月

PWM 驅動 IC 設計與實現

Design and Implementation of PWM Driver IC

研 究 生：郭登淵

指 導 教 授：洪玉城 博士



國立勤益科技大學

電子工程系研究所

碩士論文

Submitted in partial fulfillment of the requirements
For the degree of
Master of Engineering
In
Institute of Electronic Engineering
from the National Chin-Yi University of Technology

July 2010

Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九 年 七 月

國立勤益科技大學
研究所碩士班
論文口試委員會審定書

本校 電子工程系 碩士班 郭登淵 君

所提論文 PWM 驅動 IC 設計與實現

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：陳春僥

委員：陳春僥

許恆壽

謝紹徽

指導教授：洪玉城

所 長：陳文淵

中華民國九十九年六月

PWM 驅動 IC 設計與實現

研究生：郭登淵

指導教授：洪玉城 博士

國立勤益科技大學電子工程系研究所

中文摘要

近年來隨著發光二極體(Light Emitting Diode, LED)的快速發展，使得 LED 的亮度大幅提升且成本逐年的下降，已從過去的指示燈應用逐漸擴展到各種 LCD (Liquid Crystal Display)背光源、室內外裝飾燈、大型廣告顯示器、交通號誌燈、景觀照明、汽車照明、與一般照明等領域。本論文研究採用數位式脈衝寬度調變 (Pulse-Width Modulation, PWM)方式，利用人眼視覺暫留的現象以完成定電流 LED 亮度調整。使用脈衝寬度調變技術控制 LED 亮度能避免色彩偏移(Color Shift)問題且具有線性調光功能。本論文共提出三種新型 CMOS PWM 電路架構，第一型為互補式 PWM 電路，使用互補輸出方式以減少一半延遲元件數與降低多工器複雜度。晶片量測結果顯示，在 10 MHz 頻率運作下功率消耗僅有 0.79 mW，應用於 LED 具有高線性調光能力。第二型為多輸出 PWM 電路，使用硬體共享技巧可同時完成多色 LED 亮度與色彩控制。此電路在三輸出與 3-bit 解析度下可節省 50.4 %的電晶體數，有效降低晶片面積與功率消耗。第三型為高精度 PWM 電路，使用延遲匹配網路與輸出脈寬修正電路以提高 PWM 輸出脈寬準確度，並使用雙緣正反器以增加一倍輸出開關頻率。模擬結果顯示，PWM 輸出脈寬誤差時間僅有 0.2 ns ~ 0.4 ns，穩定性極佳。最後，本論文使用第一型互補式 PWM 晶片成功完成觸控式七段 LED 調光檯燈，作為本論文晶片之實用性驗證，其功能完整無誤。

關鍵詞：脈衝寬度調變、發光二極體、色彩偏移

Design and Implementation of PWM Driver IC

Student: Deng-Yuan Guo

Advisor: Yu-Cherng Hung, PhD

**Institute of Electronic Engineering
National Chin-Yi University of Technology**

Abstract

With the technology development of light emitting diode (LED), the brightness of LED has been enhanced significantly and its cost has been reduced. Various applications of LED such as backlight of liquid crystal display (LCD), decorative lights, advertising displays, traffic lights, automotive lighting, and general lighting are visible everywhere today. The color shift problem of LED brightness can be avoided by using pulse-width modulation (PWM) control, and the PWM technique has capability of linear dimming. In this thesis, we propose three new digital PWM circuits to control LED dimming. The PWM type I circuit is designed as the complementary operation to reduce the number of delay elements and circuit complexity. Measured results show that the power consumption of the chip is 0.79 mW@10 MHz and with capability of linear dimming control. The PWM type II has advantage of multiple outputs by using the hardware sharing techniques. The circuit is with three outputs and 3-bit resolution each. The number of transistor in type II is reduced to 50.4 % of conventional design. The design of PWM type III, is a high-precision duty cycle control by using the delay match network and pulse width correction techniques. In type III, the double-edge- triggered flip-flop is also adopted to double the output frequency. Simulation results show that the error time shifting of output pulse width is ranged of 0.2 ns - 0.4 ns. Finally, a prototyping system for LEDs touching lamp is achieved to verify the functionality of our experimental chip.

Keywords: PWM, LED, Color Shift

誌謝

本論文能順利完成首先要感謝指導教授 洪玉城老師，在這兩年的時間內細心指導與協助，讓我在專業知識及技能上受益良多，使我對於人生有更長遠的規劃，並確立未來的目標。同時也感謝口試委員陳春僥、許恒壽、謝韶徽三位教授給予的建議與指導，在此致上最深的敬意與謝意。

同時也要感謝實驗室同學，俊宏、明恩、威修、翰均、桂菁與學弟，承翰、明家、陽哲、威誠、柏全、祺堯、翔峻在這兩年時間研究生生活中留下許多美好的回憶。特別感謝學弟，承翰與陽哲在本論文研究、實驗、與實作上的協助，讓本論文能順利完成。

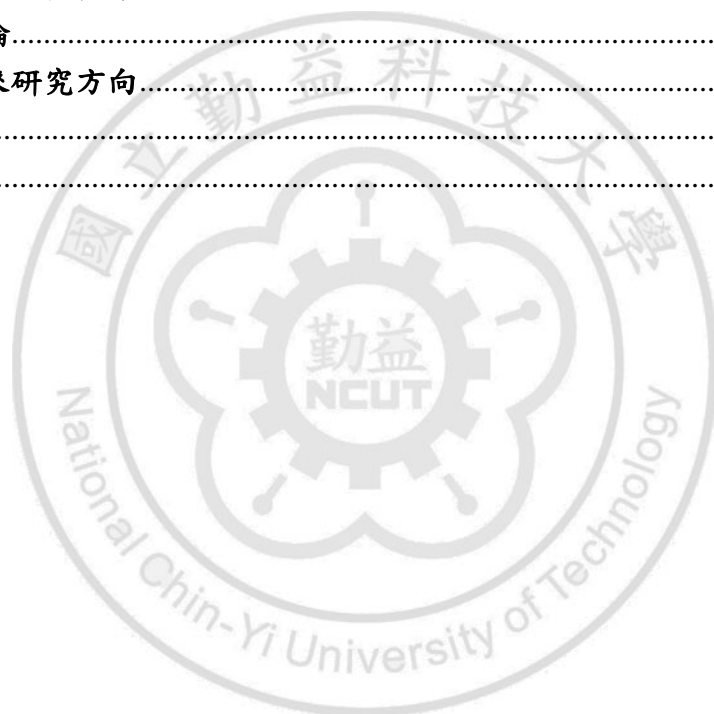
在此感謝台積電(TSMC)與國家晶片系統設計中心(CIC)提供相關製程技術與模擬環境，並協助本論文電路模擬與晶片製作。同時感謝下線評審委員建議與讚賞以及相關作業人員的辛苦。

最後感謝我生命中最重要的家人，在這幾十年來無私的奉獻及照顧，讓我在兩年的求學過程中能夠專心致力於研究工作，願將此份喜悅與榮耀分享給最愛的父母。

目錄

中文摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
第一章 緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的與方法.....	1
1.3 論文架構.....	2
第二章 LED 背景.....	3
2.1 LED 歷史發展.....	3
2.2 白光 LED 的發光原理.....	4
2.3 LED 元件的特性.....	5
2.4 LED 應用市場.....	9
2.5 LED 驅動方式.....	12
2.5.1 定電壓驅動.....	12
2.5.2 定電流驅動.....	14
2.6 LED 調光方式.....	15
2.6.1 類比式調光.....	15
2.6.2 PWM 調光.....	16
第三章 先前相關 PWM 電路研究.....	17
3.1 類比式架構.....	17
3.2 數位式架構.....	18
3.2.1 快速時脈計數法.....	18
3.2.2 延遲線法.....	19
3.2.3 混合型.....	20
第四章 新型 PWM 電路設計.....	23
4.1 互補式電路 (Type 1).....	23
4.1.1 互補式輸出工作原理.....	24
4.1.2 互補式電路模擬結果.....	26
4.2 多輸出 PWM 電路 (Type 2).....	29
4.2.1 三輸出 PWM 電路模擬結果.....	30
4.3 高精確度 PWM 電路設計 (Type 3).....	33
4.3.1 雙緣觸發電路 (DET).....	34
4.3.2 延遲匹配網路.....	36

4.3.3	佈局誤差修正電路設計.....	37
4.3.4	三輸出 SET 與 DET 比較.....	39
4.3.5	高精確度電路模擬結果.....	40
第五章	晶片量測與 LED 實驗結果	44
5.1	晶片量測結果.....	44
5.1.1	互補式 PWM 晶片量測結果	44
5.1.2	三輸出 PWM 晶片量測結果	48
5.2	LED 調光實驗結果	50
第六章	晶片實體應用.....	53
6.1	觸控式 PWM 調光架構	53
6.2	觸控式 LED 檯燈	55
第七章	結論與未來研究方向	59
7.1	結論.....	59
7.2	未來研究方向.....	59
參考文獻	60
自傳	62



表目錄

表 1	白光 LED 製作方式	5
表 2	高功率 LED 發展與傳統光源比較	8
表 3	互補式 PWM 晶片規格	27
表 4	3-bit 互補式 PWM 硬體共享比較	30
表 5	三輸出 PWM 晶片規格	31
表 6	電路模擬與理論值之對應表	37
表 7	誤差修正對照表	39
表 8	SET 與 DET 架構比較	40
表 9	高精確 PWM 規格表	41
表 10	互補式晶片特性	45
表 11	三輸出晶片特性	49



圖目錄

圖 1	各式 LED 造型	4
圖 2	彩色 LED	7
圖 3	並聯恆壓驅動.....	13
圖 4	5mm 白光 LED V-I 曲線	13
圖 5	串聯恆流驅動.....	14
圖 6	峰值電流調光.....	15
圖 7	白光 LED 發光效率	16
圖 8	PWM 調光	16
圖 9	類比式電路架構.....	17
圖 10	快速時脈計數法 (a)電路架構 (b)工作原理.....	19
圖 11	延遲線 (a)電路架構 (b)工作原理	20
圖 12	4-bit 混合型 (a)電路架構 (b)工作原理.....	22
圖 13	3-bit 互補式電路架構.....	24
圖 14	互補式電路工作原理	25
圖 15	互補式 PWM 核心佈局圖	27
圖 16	互補式 PWM 佈局模擬結果	28
圖 17	三輸出 PWM 電路架構.....	29
圖 18	三輸出 PWM 核心佈局圖	31
圖 19	三輸出 PWM 佈局模擬結果	32
圖 20	5-bit 雙緣觸發與延遲匹配架構	33
圖 21	DET 架構工作原理	34
圖 22	傳統 DFF 電路架構 (a)SET (b)DET	35
圖 23	延遲匹配範例.....	36
圖 24	高精確 PWM 電路	38
圖 25	誤差修正範例.....	38
圖 26	高精確三輸出 PWM 架構	40
圖 27	高精確 PWM 核心佈局圖	41
圖 28	高精確電路模擬結果	42
圖 29	高精確 PWM 輸出誤差	43
圖 30	高精確 PWM 功率消耗分佈	43
圖 31	互補式晶片微影圖.....	45
圖 32	互補式晶片量測結果 (a)最小責任週期 (b)最大責任週期.....	47
圖 33	互補式晶片功率消耗分佈	47
圖 34	三輸出晶片微影圖.....	48
圖 35	三輸出晶片量測結果	50
圖 36	光通量量測儀器.....	51

圖 37	LED 調光量測架構	51
圖 38	定電流 LED 發光亮度量測	52
圖 39	串並聯 LED 實體拍攝圖	52
圖 40	觸控式 LED 調光架構	54
圖 41	雛型電路板 (a)觸控式 PWM 電路 (b)串並聯白光 LED 陣列	55
圖 42	觸控式 LED 檯燈裝配 (a)LED 燈板 (b)控制面板	56
圖 43	完整觸控式 LED 檯燈雛型	57
圖 44	LED 檯燈實體展示 (a)最大亮度 (b)最小亮度.....	58



第一章 緒論

1.1 研究動機

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)為固態照明元件，相較於傳統白熾燈泡(Incandescent Lamp)和螢光燈(Fluorescent Lamp)具有操作壽命長(可長達十萬小時)、反應速度快、控制方便、體積小、耐震、省電、安全(低電壓)、不含汞(無污染)、及可平面封裝等優點，符合現今節能減碳與環保的概念，被喻為 21 世紀的「綠色照明光源」。因此，可攜式電子產品大多採用白光 LED 作為背光光源，例如：手機、PDA (Personal Digital Assistants)、數位相機等應用。近年來，隨著 LED 價格的下降與發光效率的提升，已逐步取代傳統照明與顯示器應用，例如：檯燈、手電筒、路燈、大型顯示看板、交通號誌燈、室內與汽車照明等應用，使得 LED 成為日常生活中不可或缺的元件。

1.2 研究目的與方法

發光二極體與傳統光源最大不同處是具有調光(Dimming)功能，可藉由操作電壓或電流方式以改變 LED 的發光亮度。但 LED 的 V-I 曲線為非線性關係，使用電壓控制方式無法線性調整 LED 亮度，且易受電壓漂移與環境溫度影響，穩定性差。因此，使用恆定電流方式

驅動 LED 為目前最有效之方法。

本論文研究採用數位式脈衝寬度調變(Pulse-Width Modulation, PWM)方式，利用人眼視覺暫留的現象以完成定電流 LED 亮度調整。脈衝寬度調變技術為在固定週期時間內，改變 LED 順向電流之責任週期(Duty Cycle)而不改變 LED 順向電流峰值。此方法能避免類比式電流調整的色彩偏移(Color Shift)問題[1-5]，且具有線性調光功能並能有效降低電路整體功率消耗。

1.3 論文架構

本論文共分為七 chapters，第一章為序論，說明研究動機與目的。第二章為探討 LED 的歷史發展、白光發光原理、元件特性、市場、驅動方式、與調光方法。第三章為先前相關 PWM 電路之研究，分析各種數位與類比式電路之優缺點與電路特性。第四章為本論文提出的三種新型 PWM 電路架構。第五章為本論文晶片量測與 LED 調光實驗結果。第六章為實體晶片應用，使用本論文第一型互補式 PWM 晶片成功完成觸控式七段 LED 調光檯燈。最後，第七章為本文的結論與未來研究方向。

第二章 LED 背景

2.1 LED 歷史發展

發光二極體(Light Emitting Diode, LED)是一種將電能轉化為光能的半導體發光元件。在 20 世紀 60 年代人們發明了第一顆可見紅光 LED，但元件在 20 mA 電流下發光效率僅有 0.1 lm/W。因此，LED 最初只能用於指示燈和儀表顯示器使用。到了 20 世紀 70 年代，LED 產品的類型開始拓展，並出現各式各樣的造型與應用範圍，例如：七段顯示器、文字點矩陣、背景圖案、與線條圖陣列等。如圖 1 所示(圖片經由網路搜索彙整合成)，LED 已廣泛使用於日常生活中的各種裝置與顯示應用上。到了 20 世紀 80 年代早期，LED 技術出現重大突破，使得紅光 LED 的發光效率達到 10 lm/W。其中砷化鎵與磷化鋁的使用更促使了第一代高亮度 LED 的誕生，首先是高亮度紅光 LED，接著是高亮度黃光 LED，最後是高亮度綠光 LED。到了 20 世紀 90 年代更出現了第一顆具有歷史意義的高亮度藍光 LED，而高亮度藍光 LED 更是日後白光 LED 的核心元件[1]。

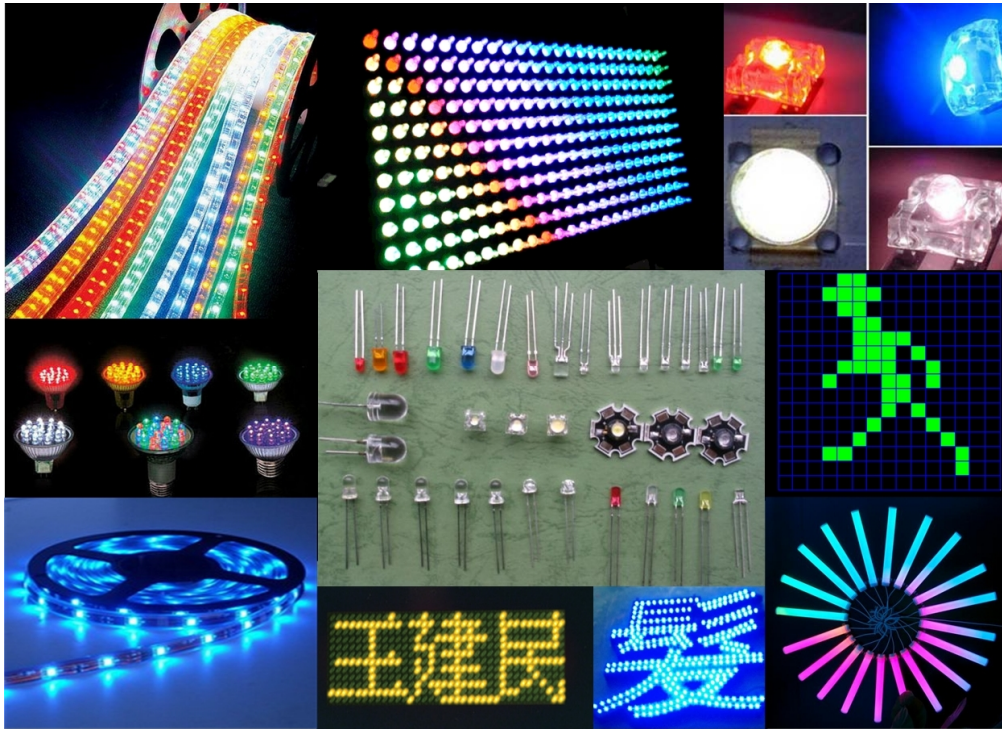


圖 1 各式 LED 造型

2.2 白光 LED 的發光原理

由於LED元件只能發出單色光或單一波長，而人眼所見的白光至少包含二波長或三波長以上。因此，為了讓LED能夠發出白光必須混合兩種以上的光或波長。常見的做法可分為單晶片與多晶片兩種方式，如表 1所示[1]。一般常見的白光LED即是使用藍光LED製作而成，當黃光螢光粉受到藍光激發後會產生黃光，並與原先用於激發的藍光互補而發出白光。而紫光LED產生白光原理與藍光LED一樣，當RGB螢光粉受到紫光激發後即可產生三原色光並混合成白光。上述兩種發光方式有一共同缺點，即是發光亮度受到螢光粉的轉換效率限

制。另一種常見的方式即是將三色LED直接封裝成白光LED，此方法可避免螢光粉轉換的損失而得到更好的發光效率，但相對成本較高且控制較為困難。

表 1 白光 LED 製作方式

方式	結構	特性
單晶片	藍光 LED 與黃光螢光粉	成本低
	紫光 LED 與 RGB 螢光粉	轉換效率差
多晶片	紅/綠/藍 LED 混光	發光效率高 成本高

2.3 LED 元件的特性

自 1879 年愛迪生發明白熾燈之後，人類的照明技術進入了一個嶄新的時代，並經歷了三個重要發展階段，分別為「白熾燈」、「螢光燈」、與「高強度氣體放電燈」三種。而人們認為「LED」是最有可能發展成第四代照明光源，其元件特性包含：

(1) 低功率消耗、無污染

目前白光 LED 發光效率已達每瓦 80 ~ 100 lm，遠超過普通白熾

燈每瓦 16 lm 的水準。雖然螢光燈具有成本低與發光效率高的優點，但燈管中所含的汞會危害人體健康，且廢棄燈管會造成環境污染。而 LED 為綠色照明元件，廢棄物可以回收不會有汙染問題，未來仍有相當大的發展潛力。

(2) 壽命長、安全性高

LED 的操作壽命可長達十萬小時，相較於傳統白熾燈一千小時或螢光燈一萬小時有過之而不及，且性能更為穩定。LED 為固態光源，可低電壓驅動、不會發熱、耐震、不易破裂等安全性極高。

(3) 色彩鮮豔且多樣性

LED 與傳統光源不同，使用不同的材料可發出各種不同顏色的光，例如，紅色、黃色、藍色、綠色、黃綠色、橙紅色等。如圖 2 彩色 LED 所示(圖片經由網路搜索彙整合成)，色彩純正且無須使用彩色濾光片，發光效率更高。除了現有顏色外 LED 也可透過電路控制方式，將三種或四種以上的色彩進行多色混光，可實現上百種甚至上千種的全彩變化，色彩鮮豔豐富且變化自由。

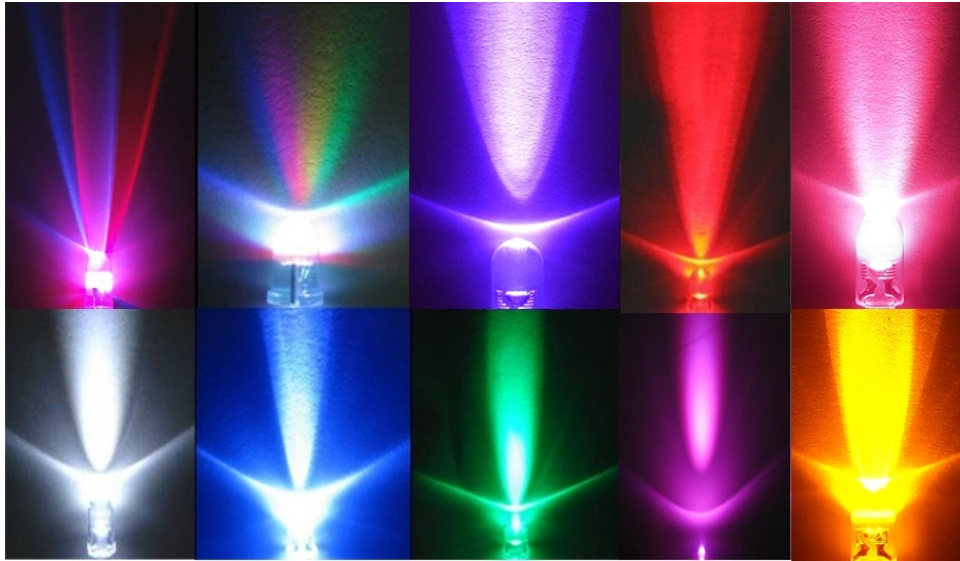


圖 2 彩色 LED

(4) 反應速度快、控制方便

LED 元件反應時間很短通常只有 $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 秒，可使用時序電路控制以達到動態的色彩變化與各種光色效果。驅動白光 LED 非常簡單，僅需使用 3.4 V 電壓與 20 mA 電流即可驅動，並透過電流或電壓調整即可隨意調光。

(5) 運送與維修成本低

LED 相較於傳統光源體積更小、重量更輕、結構更堅固、不易碎裂且運送方便。而 LED 元件壽命為傳統光源的 10 倍以上且可靠性高，無需經常維修或更換，能有效降低人事與維修成本。因此，使用壽命長的 LED 從長遠來看是具有經濟效益的。

目前 LED 照明只能用於一些特殊場合，若要完全取代傳統的白熾燈與螢光燈還須解決一些技術問題。例如，單只 LED 輸出光通亮不夠、高功率 LED 有散熱問題、發光角度過小、單一照明燈具需使用多顆 LED 成本較高等。表 2 為高功率白光 LED 未來發展情況與傳統光源發光效率及成本比較[6,7]，預計在未來 2020 年後將完全取代傳統燈源，且發光效率可望達到 200 lm/W 以上。

表 2 高功率 LED 發展與傳統光源比較

	LED @2002	LED @2007	LED @2012	LED @2020	白熾燈	螢光燈
發光效率 (lm/W)	25	75	150	200	16	85
壽命 (hrs)	20,000	>20,000	>100,000	>100,000	1,000	10,000
單燈光通量 (lm/lamp)	25	200	1,000	1,500	1,200	3,400
單燈功率 (W/lamp)	1	2.7	6.7	7.5	75	40
1000 lm 成本(USD)	200	20	<5	<2	0.4	1.5
市場進入點	低光通量	預期取代 白熾燈	預期取代 螢光燈	預期全面 取代	使用中	使用中

2.4 LED 應用市場

近年來隨著 LED 的快速發展，使得 LED 的亮度大幅提升且成本逐年的下降，已從過去的指示燈應用逐漸擴展到各種 LCD (Liquid Crystal Display) 背光源、室內外裝飾燈、大型廣告顯示器、交通號誌燈、景觀照明、汽車照明、與一般照明等領域。其中超高亮度白光 LED 的出現更使得 LED 應用領域進入了通用照明市場：

(1) 背光光源

LED 具有體積小、低耗電、重量輕、可平面封裝、耐衝擊等優點，早已普遍使用在可攜式電子產品、行動電話、筆記型電腦、LCD 面板等背光光源領域中。隨著行動電話產品的快速成長同時帶動了 LED 元件市場需求，特別是 2003 年彩色液晶行動電話的出現更是推動了白光 LED 市場的快速發展。但隨著近年來行動電話市場趨向穩定與 LED 亮度逐漸提升，使得 LED 在行動電話中的需求量逐漸減緩。在 2005 年使用於為背光光源的 LED 數量超過 12 億只，市場規模超過 15 億元並持續成長當中[1]。

(2) 室內外裝飾與景觀照明

室內外裝飾燈是 LED 另一個常見的應用市場，透過電路控制可

自由規劃 LED 的閃爍、旋轉、與各種光色變化，能有效吸引顧客目光也能作為藝術燈以營造不同的氣氛。常見的裝飾與景觀照明使用範圍包含廣告看板、橋樑、藝術中心、商業中心、休閒娛樂場與旅遊景點等。在 2005 年市內裝飾燈市場規模高達 1.58 億元，而景觀照明市場規模也超過 7 億元[1]。

(3) 汽車照明

汽車照明包含車內與車外兩大部分。車內照明包含儀表板、音響、閱讀燈、指示燈，而車外部份有車頭燈、側燈、煞車燈、方向燈、與車尾燈等。經統計一部汽車照明需用掉100多顆LED，而平均每年在汽車市場需求上高達60億顆LED。這樣的數量相較手機或背光市場還要龐大，顯示汽車應用市場有很大的潛力。目前汽車照明市場規模還不大，但隨著LED成本的下降及發光效率的提高與節能環保車越來越受重視，預期在不久的未來LED將完全取代汽車車燈市場。

(4) 交通號誌與路燈應用

傳統 150 瓦的白熾交通號誌燈除了發光效率低外，平均壽命僅有一千多小時需經常更換或維修，因此人員成本與維修成本相當高。在相同亮度下使用 LED 交通號誌燈僅需 15 瓦即可，且壽命為白熾交通

號誌燈的數十倍，同時具有高亮度、光色佳、省電、維修成本低與可靠性高等優點。若將全國 26 萬盞傳統白熾交通號誌燈全面改用 LED 燈，預計可節省 85 % 以上的用電量。除了交通號誌燈外，若將傳統水銀路燈改為 LED 路燈也能節省 50 % 以上的用電量。雖然 LED 交通號誌燈要價較傳統白熾燈號誌燈貴 3 至 4 倍，不過以長期的投資效益來看，更換 LED 號誌燈與路燈是具有能源效益與低成本優點。

(5) LED 顯示器

LED 顯示器原理為使用軟體或硬體的控制方式，以現有的 R、G、B 三原色進行混光以產生各種色彩，無需使用彩色濾光片可得到更好的亮度與飽和度。隨著 LED 元件不斷開發與性能的提升，使得全彩 LED 顯示器可以滿足戶外全天候的環境條件要求。目前 LED 顯示器已廣泛應用於體育廣場、市政廣場、車站、機場、銀行、證券交易所、醫院等大型顯示看板。在 LED 需求量上，LED 顯示器僅次於 LED 指示燈排名第二，佔到 LED 整體銷量的 23.1 %。由於用於顯示器的 LED 亮度和壽命上的要求高於 LED 指示燈，平均價格都在 LED 指示燈上，因此 LED 顯示器的市場規模達到 32.4 億元，已超過指示燈需求而位居榜首[1]。

(6) 通用照明市場

高亮度白光 LED 是通用照明重要發展，目前已經逐漸取代傳統白熾燈光源，但要取代螢光燈進入通用照明市場仍面臨著許多問題，包含發光效率低、散熱性不佳、成本過高、發光角度小、與 LED 照明產品通用標準未制定等。要完全解決上述問題還需要一段時間，但相較於傳統光源 LED 更具發展潛力，相信在不久的將來 LED 將完全取代所有光源。

2.5 LED 驅動方式

2.5.1 定電壓驅動

圖 3 為 LED 使用並聯恆壓驅動方式[1,8,9]。此驅動方法相當簡單，僅需使用一個電壓源與限流電阻即可，但此方法存在許多問題。首先，相同樣型號的 LED 順向偏壓以及特性參數不完全一樣，使用此方法會使得每顆 LED 上的電壓及電流皆不相同且亮度不一。第二，LED 元件的 V-I 曲線是指數關係，如圖 4 所示[10]，些微的電壓變動都會造成 LED 順向電流很大的變化。因此，使用電壓控式方式穩定度較差，且無法作為線性調光之用。第三，使用此方式必需在每一排 LED 上串聯限流電阻，因此會浪費很多功率消耗在限流電阻。第四，LED

元件為負溫度係數，當溫度升高時LED順向偏壓會降低導致LED驅動電流增加。因此，若直接使用電壓源驅動LED元件，則LED上的順向電流會隨著溫度上升而越來越大，最後導致LED元件損毀。

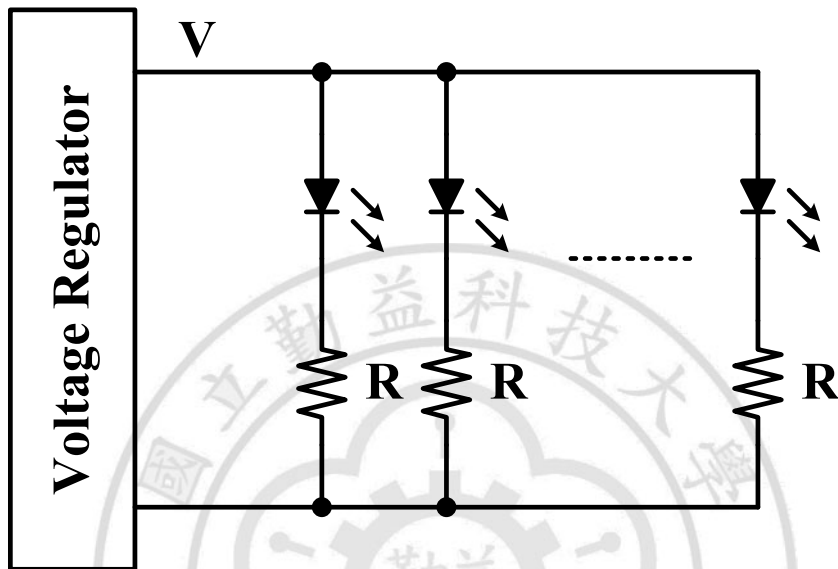


圖 3 並聯恆壓驅動

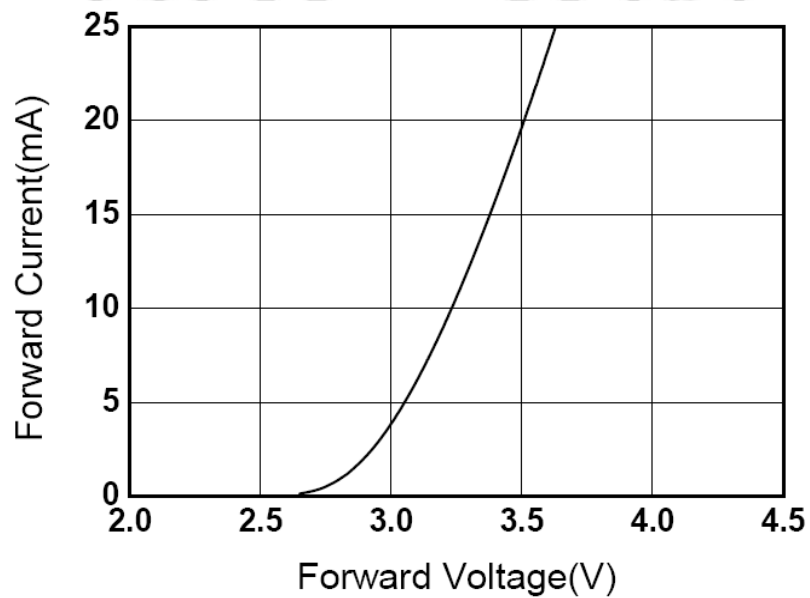


圖 4 5mm 白光 LED V-I 曲線

2.5.2 定電流驅動

圖 5 為 LED 串聯恆定電流驅動方式[1,8,9]，此一方法須使用一個恆定電流的電路，以提供一個穩定的定電流輸出。使用恆定電流輸出方式能有效消除順向電壓偏移所造成的電流與亮度變化，即使每顆 LED 特性參數不一仍能保持一致的順向電流與發光亮度，穩定性極佳。當 LED 元件溫度上升時 LED 的順向電流不會增加，能有效的保護 LED 元件避免損毀。因此，使用恆定電流方式驅動 LED 為目前最有效之方法，且不易受環境與溫度影響。

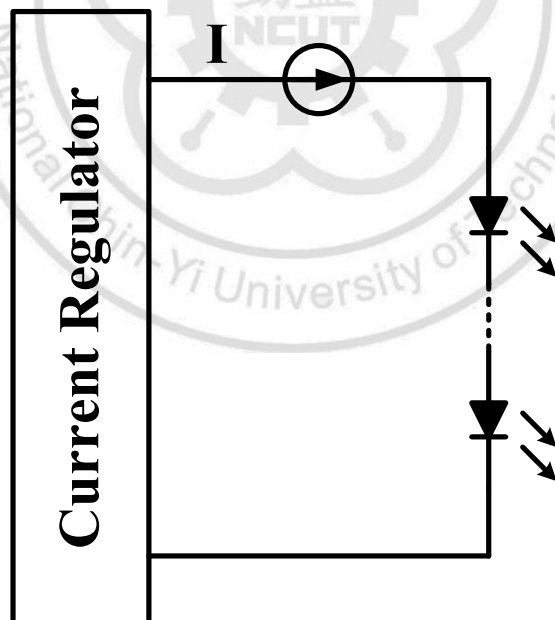


圖 5 串聯恆流驅動

2.6 LED 調光方式

由上述分析得知，使用恆定電流方式驅動 LED 具有許多優點，而大多數的 LED 驅動 IC 也都採用此方法。接下來將介紹如何以恆定電流方式控制 LED 的發光亮度，其方法可分為類比式調整與脈衝寬度調變兩種方式。

2.6.1 類比式調光

類比調光方法即是改變 LED 的順向電流峰值，以達到不同輸出亮度之調整，如圖 6 所示。當 LED 順向電流峰值降低為一半，即可得到相對一半的輸出亮度。但此種方式會造成 LED 顏色偏移(Color Shift)問題[1-5]，且 LED 的電流和輸出光通量是非線性關係如圖 7 所示[10]，因此無法達到線性調光功能。雖然 LED 的光通量會隨著 LED 的電流增加而增加，但每瓦的發光效率卻會越來越低。

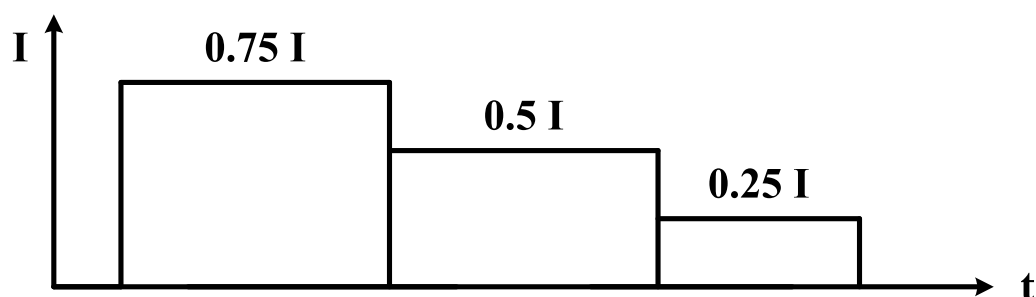


圖 6 峰值電流調光

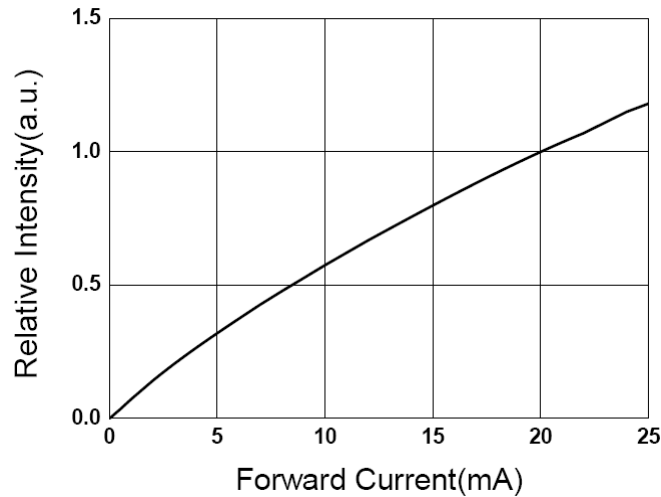


圖 7 白光 LED 發光效率

2.6.2 PWM 調光

PWM 調光技術[4,5,8,11]是利用人眼視覺暫留現象，使用連續開關 ON 與 OFF 方式改變 LED 順向電流的責任週期(Duty Cycle)，而不改變 LED 順向電流的峰值，如圖 8 範例所示。此方法可避免顏色偏移(Color Shift)問題，且具有線性調光之功能。使用 PWM 方式控制 LED 的亮度輸出開關頻率(f_{sw})頻率通常大於 100 Hz [1]，以確保其不會被人眼察覺閃爍現象，而最大工作頻率則需依 LED 反應速度而定。

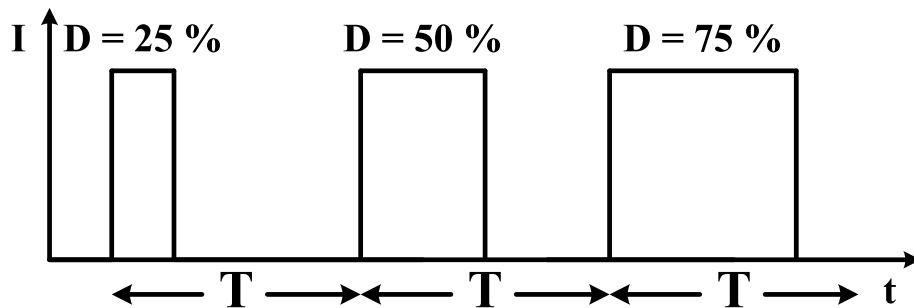


圖 8 PWM 調光

第三章 先前相關 PWM 電路研究

脈衝寬度調變電路可分為類比與數位兩種實現方式[12-19]，其中數位實現方式可概分為計數、延遲、與混合三種運作方式。

3.1 類比式架構

圖 9 為傳統類比式 PWM 電路實現方法[18]。電路使用一個三角波或鋸齒波訊號與輸入參考電壓 V_{IN} 作比較。當輸入參考電壓 V_{IN} 開始增加，輸出責任週期(Duty Cycle)則會越來越大，如圖 9 右圖示工作原理所示。此架構優點為電路簡單且無解析度問題，但電路靜態功率消耗較大，功能易受環境、溫度、與製程等影響，穩定性差且無法準確控制所需輸出責任週期。

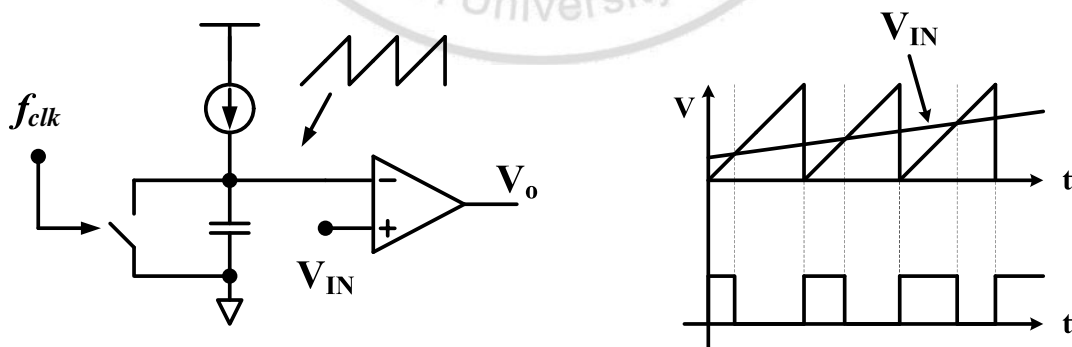
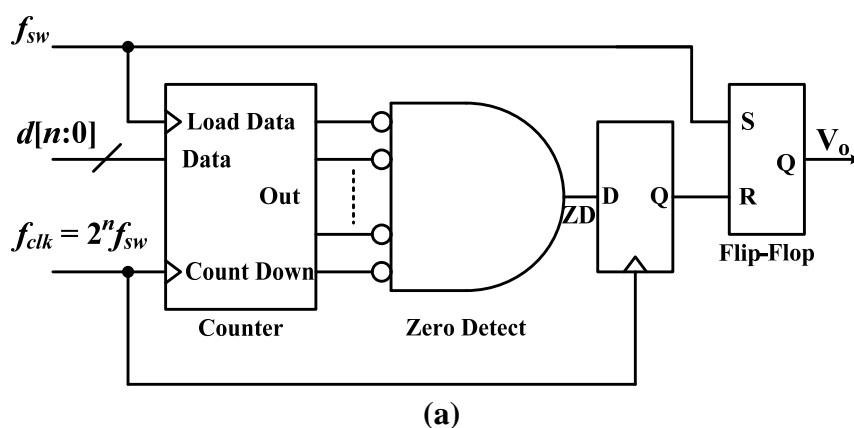


圖 9 類比式電路架構

3.2 數位式架構

3.2.1 快速時脈計數法

圖 10 (a)為G.Y. Wei作者在1996年所提出的快速時脈計數(Fast-Clocked Counters) [12]電路架構，是第一個全數位的PWM實現方法。此電路架構使用計數時脈個數的方式控制所須輸出脈寬寬度，如圖 10 (b)工作原理所示。當輸入訊號 $d[n:0]$ (n 為PWM解析度)經由下數計數器計數至「零」時，零位檢測器(Zero Detect, ZD)將觸發RS正反器使輸出重置(Reset)為Low。此方法可準確控制輸出責任週期與輸出開關頻率(f_{sw})，且佔用晶片面積較小。但由於電路操作頻率(f_{clk})與輸出開關頻率(f_{sw})的關係為 $f_{clk} = 2^n \cdot f_{sw}$ ，因此電路在高位元解析度時所需的功率消耗較大。舉例來說，若需要8-bit解析度與1 MHz的輸出開關頻率(f_{sw})，則電路須在256 MHz頻率下運作，功率消耗大且同時需兩組工作頻率，在系統整合上較為不便。



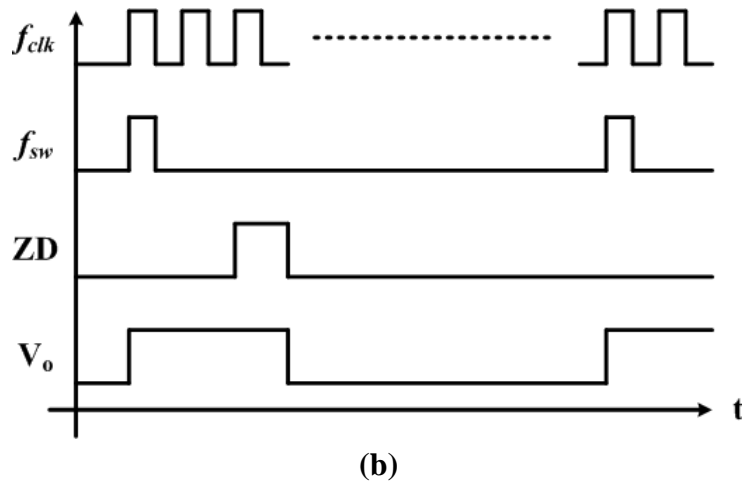


圖 10 快速時脈計數法 (a)電路架構 (b)工作原理

3.2.2 延遲線法

在 1997 年 A.P. Dancy 作者提出使用延遲線(Tapped Delay Line) [13]方式，以解決上述快速時脈計數器頻率過高的問題，並能有效降低功率消耗。電路架構主要由延遲線(Delay Line)與多工器(MUX)所組成，如圖 11 (a)所示。電路先由延遲元件(Delay Cell)產生 2^n 延遲訊號，並經由多工器選擇其一延遲訊號作為 RS 正反器重置(Reset)的時間，以控制所需的輸出責任週期，如圖 11 (b)所示。此電路架構在解析度為 n -bit 時需 2^n 延遲元件與 $2^n:1$ 多工器，因此在高位元解析度時電路佔用晶片面積較大，且需要一個準確的時序延遲匹配網路(Delay Matching Network)。此電路另一缺點為使用延遲元件(Delay Cell)方式易受到製程、環境、溫度、或電源偏移而影響延遲時間，輸出脈寬不易穩定準確度較差。

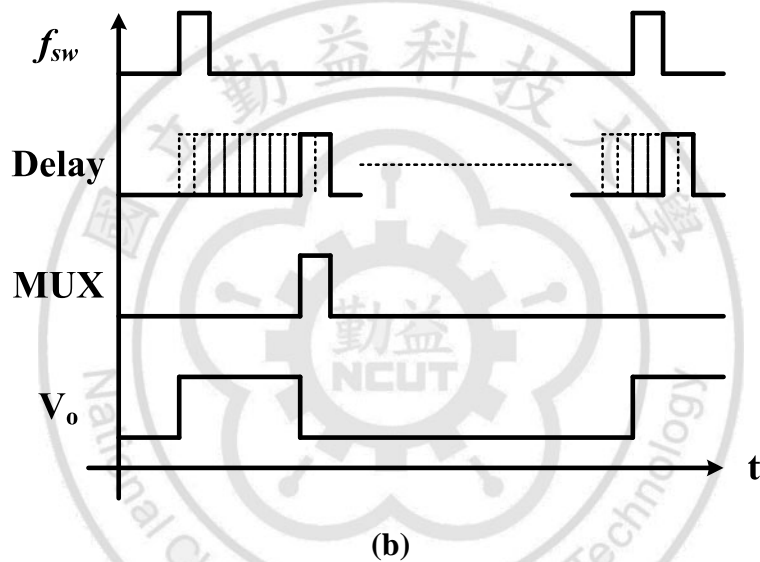
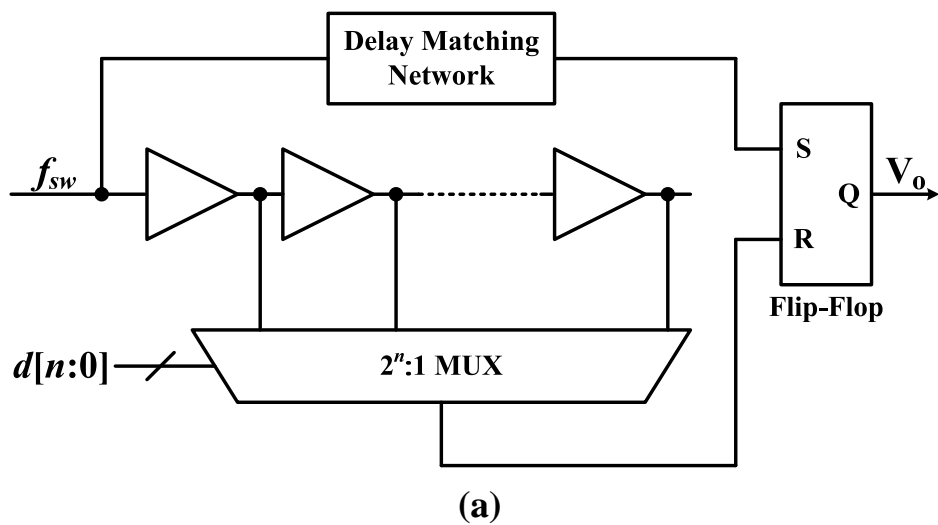
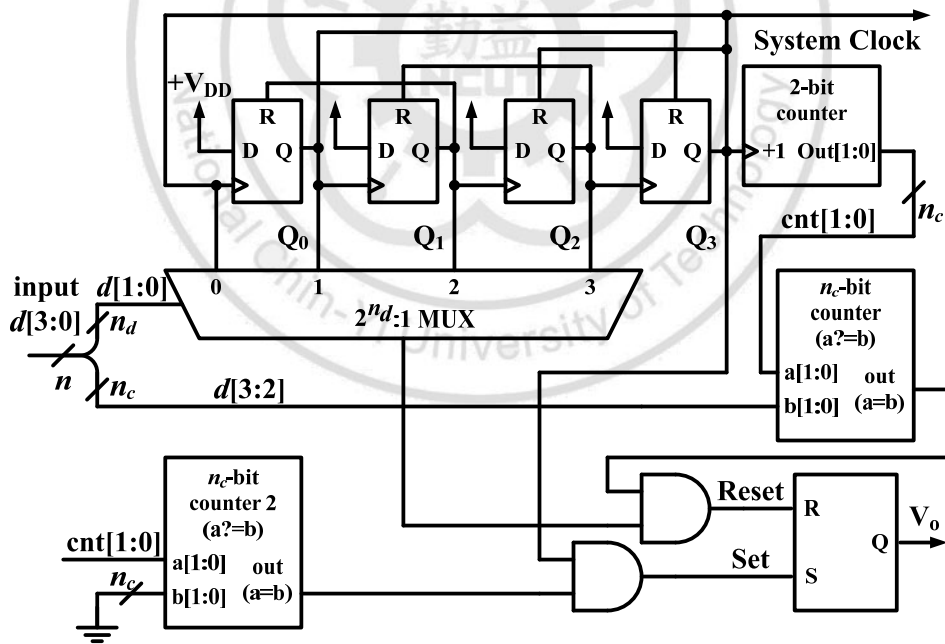


圖 11 延遲線 (a)電路架構 (b)工作原理

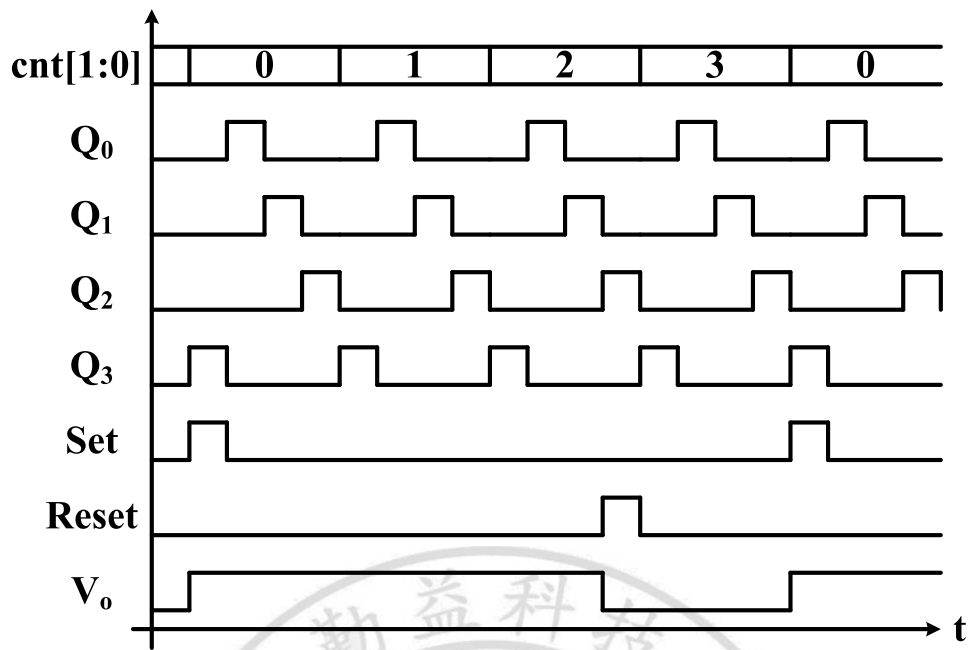
3.2.3 混合型

為了在功率消耗與面積上取得一個平衡，另一種混合型(Hybrid) [15,16]電路架構在 2000 年與 2003 年被提出來，其使用的方法為將計數器與延遲線兩種電路合併使用，如圖 12 (a)電路架構所示。電路將延遲線架構改用環型震盪器取代，並搭配計數器以擴增不同之解析

度。電路架構主要由 2^{n_d} 延遲元件、 n_c -bit 計數器、比較器與 RS 正反器所組成，整體解析度為 n ($n = n_d + n_c$)。圖 12 (b) 為 4-bit 混合型電路架構工作原理，輸入訊號分別控制計數器輸出訊號 $cnt[1:0]$ 與多工器輸出訊號 $Q_0 \sim Q_3$ ，並經由及閘(AND)運算以控制 RS 正反器重置 (Reset) 的時間。此電路架構僅需計數器一半的工作頻率與延遲線一半的延遲元件，因此電路在高位元解析度時較傳統電路更具優勢。但電路架構較為複雜，且 RS 正反器的輸入訊號會發生突波(Glitch)現象，造成 RS 正反器錯誤觸發而產生錯誤輸出責任週期。



(a)



(b)

圖 12 4-bit 混合型 (a) 電路架構 (b) 工作原理

在分析完類比與數位PWM多種實現方法之後，本論文採用數位式脈衝寬度調變的方法以完成定電流LED調光電路設計，使用數位架構的優點包含：

- (1) 可以精確控制責任週期，
- (2) 抗雜訊能力高，
- (3) 穩定度高，
- (4) 易與其他數位電路整合，
- (5) 靜態功率消耗低。

第四章 新型 PWM 電路設計

本論文共提出三種新型 PWM 電路架構，第一型為「互補式 PWM」電路，使用互補輸出方式以減少一半延遲元件數與降低多工器複雜度。第二型為「多輸出 PWM」電路，使用硬體共享技巧可同時完成多色 LED 亮度與色彩控制。第三型為「高精確 PWM」電路，使用延遲匹配網路與輸出脈寬修正電路以提高 PWM 輸出脈寬準確度，並使用雙緣正反器以增加一倍輸出開關頻率。

4.1 互補式電路 (Type 1)

圖 13 為本論文提出的第一型 3-bit 互補式數位脈衝寬度調變 (Complementary DPWM, CDPWM) 電路架構。電路主要分成兩大部分，第一部分為具有重置 (Reset) 功能的強生計數器 (Johnson Counter)，用以產生輸出級所需的參考訊號(方波)。第二部分為輸出級 (Output Stage)，由輸入訊號 C_0 、 C_1 控制多工器 (MUX) 輸出，選擇所需的輸出責任週期，並由 C_2 控制與互斥或閘 (XOR) 選擇是否互補輸出責任週期。

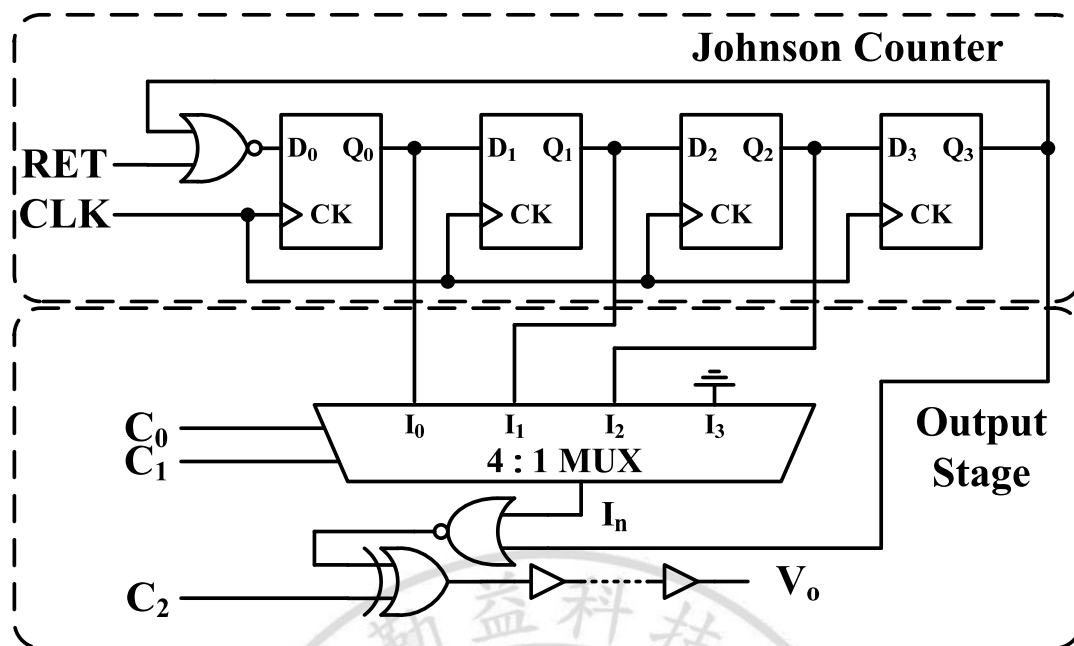


圖 13 3-bit 互補式電路架構

4.1.1 互補式輸出工作原理

強生計數器(Johnson Counter)原為除 $2N$ (N 為正反器個數)的電路架構，其特性為每一級輸出皆為相同週期的方波，且每一級波形皆會延遲 1 個時脈(Clock)時間。本論文將利用此特性以產生所需參考波形(方波)，並以互斥或閘(XOR)互補產生另一半輸出責任週期，以節省一半延遲元件與多工器電路架構。圖 14 為本論文 CDPWM 電路工作原理，電路先經由反或閘(NOR)作重置(RESET)動作，當 RET 控制訊號為 1 時，所有正反器被重置為 Low。當 RET 控制訊號為 0 時 Q_3 的輸出訊號將反相(INV)至 D_0 輸入訊號，此時電路會轉成強生計數器(Johnson Counter)架構，並產生四個相同時間週期的方波($Q_0 \sim Q_3$)，做

為本論文電路的基礎參考訊號。

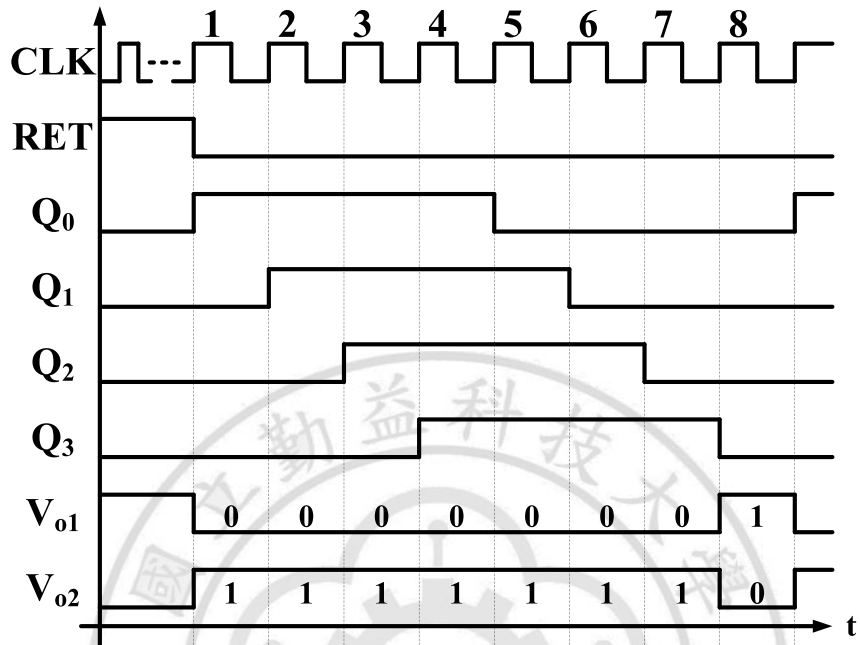


圖 14 互補式電路工作原理

圖 14 中 V_{o1} 與 V_{o2} 分別為輸出級(Output Stage)在不同輸入設定下所產生的輸出責任週期範例。電路經由多工器(MUX)選擇其一參考波形($Q_0 \sim Q_2$)與 Q_3 作反或閘(NOR)運算，並以互斥或閘(XOR)作為最後輸出。例如，當輸入訊號為 $C[2:0] = [000]$ 時，互斥或閘(XOR)相當於一個傳輸閘(Transmission Gate)，此時多工器選擇 Q_0 與 Q_3 作反或閘(NOR)運算並產生 $D = 1/8$ 的責任週期，如圖 14 中 V_{o1} 波形所示。相反的，當輸入訊號為 $C[2:0] = [100]$ 時，互斥或閘(XOR)相當於一個反相器(INV)，輸出將反相 $D = 1/8$ 責任週期而互補出 $D = 7/8$ 的輸

出責任週期，如圖 14 中 V_{o2} 波形所示。因此，本電路設計採用互補式技巧可節省更多電晶體數，且電路僅需使用 2^{n-1} 延遲元件與 $2^{n-1}:1$ 多工器。

本論文電路另一優點為電路運作不會任意產生突波(Glitch)現象。在數位邏輯電路中，最常發生突波問題在於輸入訊號同時轉態但遲延時間不同而產生突波，以致增加額外功率消耗或導致錯誤輸出結果。本論文電路設計上每一時脈僅有一個參考波形($Q_0 \sim Q_3$)會發生轉態(上升或下降)，如圖 14 所示。因此，在訊號 $Q_0 \sim Q_3$ 後之電路將不會有突波發生之機會，此設計能有效的降低整體電路動態功率消耗，與避免產生錯誤輸出。

4.1.2 互補式電路模擬結果

本項工作所使用的模擬環境為台積電提供的 TSMC 0.35 μm CMOS Mixed-Signal 2P4M Polycide 3.3/5V 製程完成，模擬軟體為 HSPICE，驗證軟體為 Calibre。圖 15 為 3-bit 互補式 DPWM 電路核心(Core)佈局圖，核心電路面積為 $69 \times 27 \mu\text{m}^2$ ，共使用 90 顆電晶體數。在 3.3 V 工作電壓下平均功率消耗為 0.35 mW@100 MHz，表 3 為晶片規格。

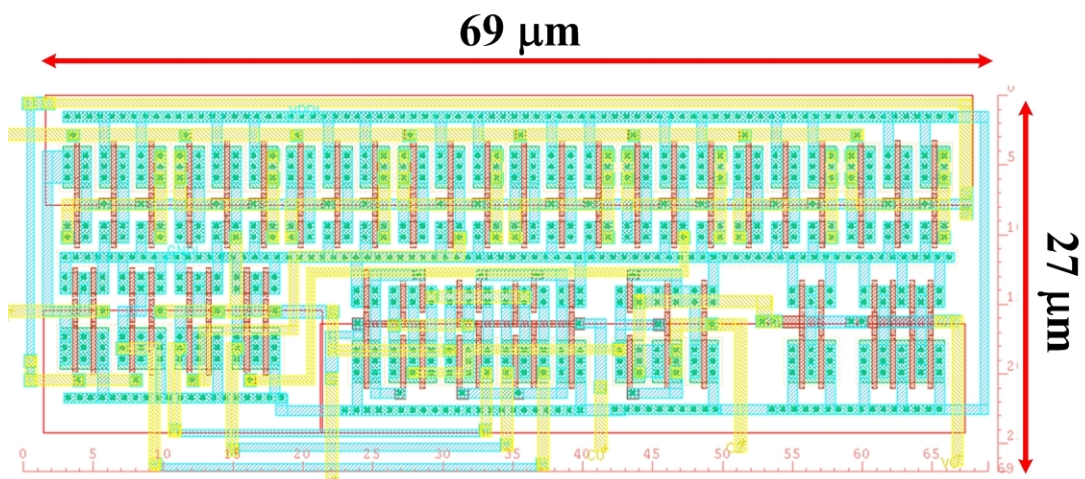


圖 15 互補式 PWM 核心佈局圖

表 3 互補式 PWM 晶片規格

製程技術	TSMC 0.35 μm
核心電路面積	$69 \times 27 \mu\text{m}^2$
解析度	3-bit
電晶體數	90
工作電壓	3.3 V
輸入/輸出頻率	100 MHz / 12.5 MHz
平均消耗功率	0.35 mW@100 MHz

圖 16 為互補式 PWM 核心電路佈局模擬(Post-Layout Simulation)

結果，工作電壓為 3.3 V。第一個輸入訊號為時脈頻率 100 MHz。第二的輸入訊號為重置訊號 RET，時間長度為四個時脈週期。第三至第十個輸出波形分別為輸入訊號 C [2:0] 在不同設定下所對應的輸出責任週期，模擬結果顯示所有輸出狀態皆完整無誤(包含 Corner)。

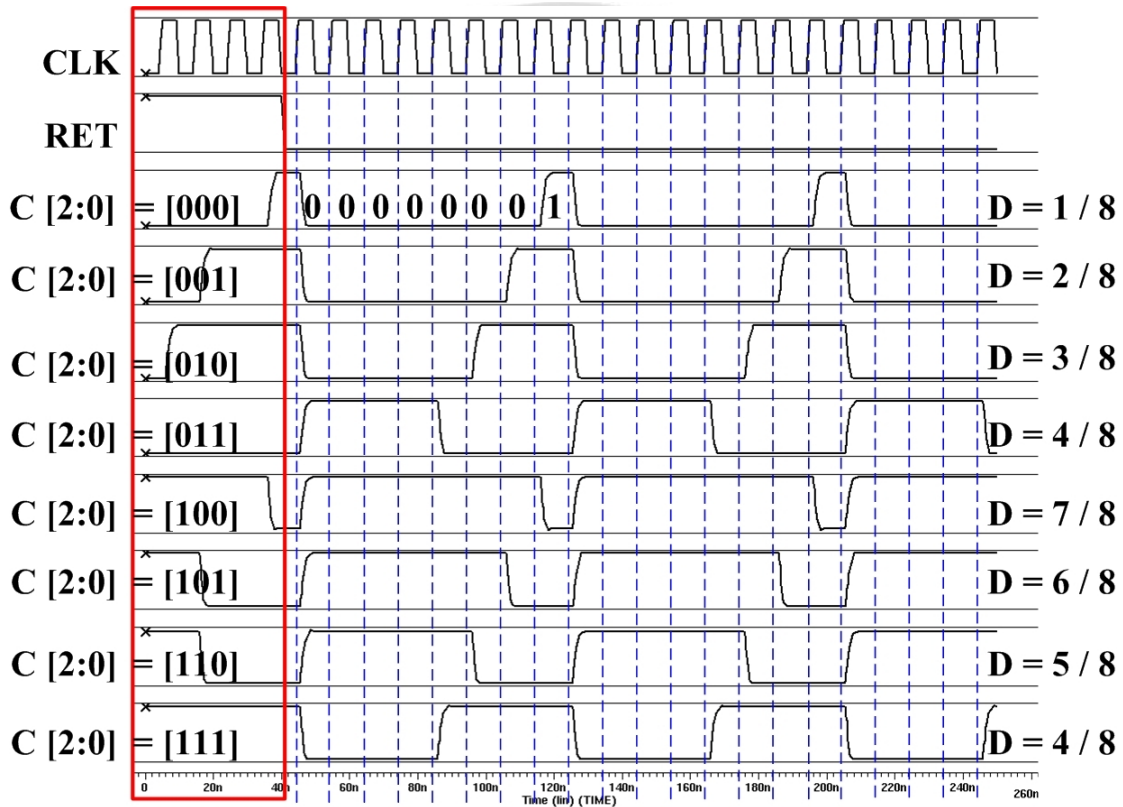


圖 16 互補式 PWM 佈局模擬結果

4.2 多輸出 PWM 電路 (Type 2)

本論文使用硬體共享技巧共用一組強生計數器(Johnson Counter)之參考訊號($Q_0 \sim Q_3$)，僅需增加輸出級(Output Stage)的個數即可擴充多個相同解析度之 PWM 輸出訊號。圖 17 為具有三輸出與 3-bit 解析度之 PWM 電路架構，能同時產生三組相同解析度的 PWM 輸出訊號，以完成紅、綠、藍三色 LED 之亮度控制與 $7 \times 7 \times 7$ (343)種色彩變化。表 4 為互補式 PWM 電路在 3-bit 解析度下使用共享與非共享之電晶體數比較，結果顯示在三輸出情況下可節省電晶體數高達 50.4%。因此，此電路設計方法能有效的減少電晶體與功率消耗，且電路簡單無須增加其他控制電路，亦不會增加電路設計的複雜度

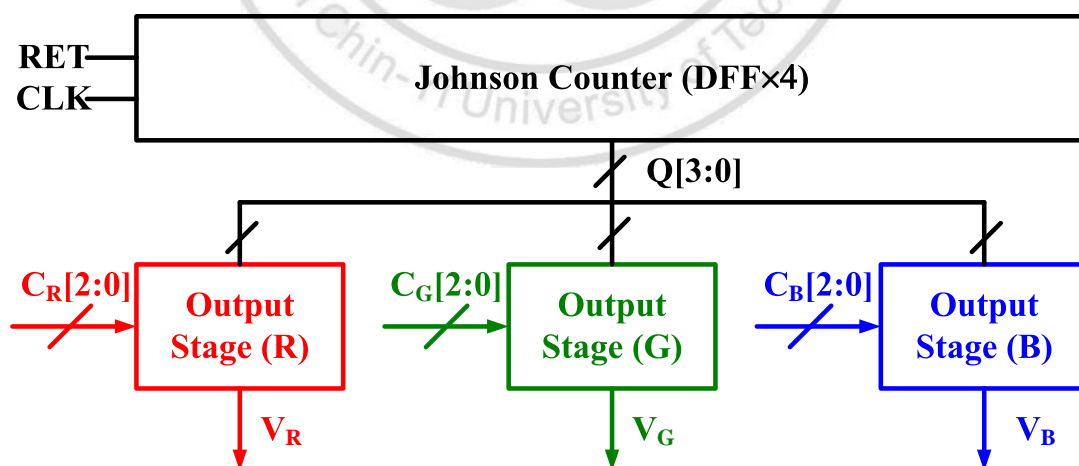


圖 17 三輸出 PWM 電路架構

表 4 3-bit 互補式 PWM 硬體共享比較

	二組輸出	三組輸出	四組輸出	五組輸出
獨立架構 之所需電晶體	148	222	296	370
共享架構 之所需電晶體	92	110	128	146
電晶體數比較	- 37.8 %	- 50.4 %	- 56.7 %	- 60.5 %

4.2.1 三輸出 PWM 電路模擬結果

本項工作所使用的模擬環境為台積電提供的 TSMC 0.18 μm CMOS Mixed-Signal RF 1P6M 1.8/3.3 V 製程完成，模擬軟體為 HSPICE，驗證軟體為 Calibre。圖 18 為具三輸出與 3-bit 解析度的互補式 DPWM 控制 IC 之核心(Core)佈局圖，核心面積為 $55.99 \times 20.67 \mu\text{m}^2$ ，使用 110 顆電晶體數。電路共有三組控制訊號 $C_R [2:0]$ 、 $C_G [2:0]$ 、與 $C_B [2:0]$ ，分別可產生 V_R 、 V_G 、與 V_B 三組 PWM 輸出波形。電路在 1.8 V 工作電壓下平均消耗功率 0.4 mW@100 MHz，表 5 為晶片規格表。

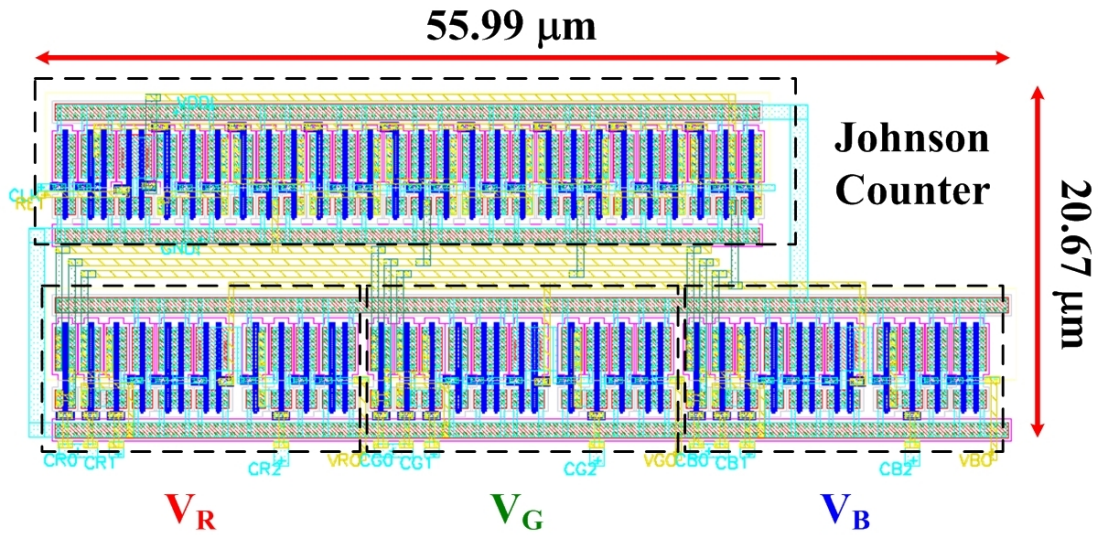


圖 18 三輸出 PWM 核心佈局圖

表 5 三輸出 PWM 晶片規格

製程技術	TSMC 0.18 μm
核心電路面積	$55.99 \times 20.67 \mu\text{m}^2$
解析度 / 輸出級	每組3-bit / 共3組
總電晶體數	110
工作電壓	1.8 V
輸入/輸出頻率	100 MHz / 12.5 MHz
平均消耗功率	0.4 mW@100 MHz

圖 19 為三輸出互補式 PWM 電路核心(Core)佈局模擬(Post Layout Simulation)結果，電路工作電壓為 1.8 V。第一個波形為輸入時脈頻率 100 MHz，第二個波形為重置訊號 RET。第三至第五個波形分別為輸入控制訊號在 $C_R [2:0] = [000]$ 、 $C_G [2:0] = [011]$ 、 $C_B [2:0] = [100]$ 設定下，分別產生最小($D = 1/8$)、中等($D = 4/8$)，與最大($D = 7/8$)三種責任週期輸出，模擬結果驗證本論文多輸出功能完整無誤(包含 Corner)。

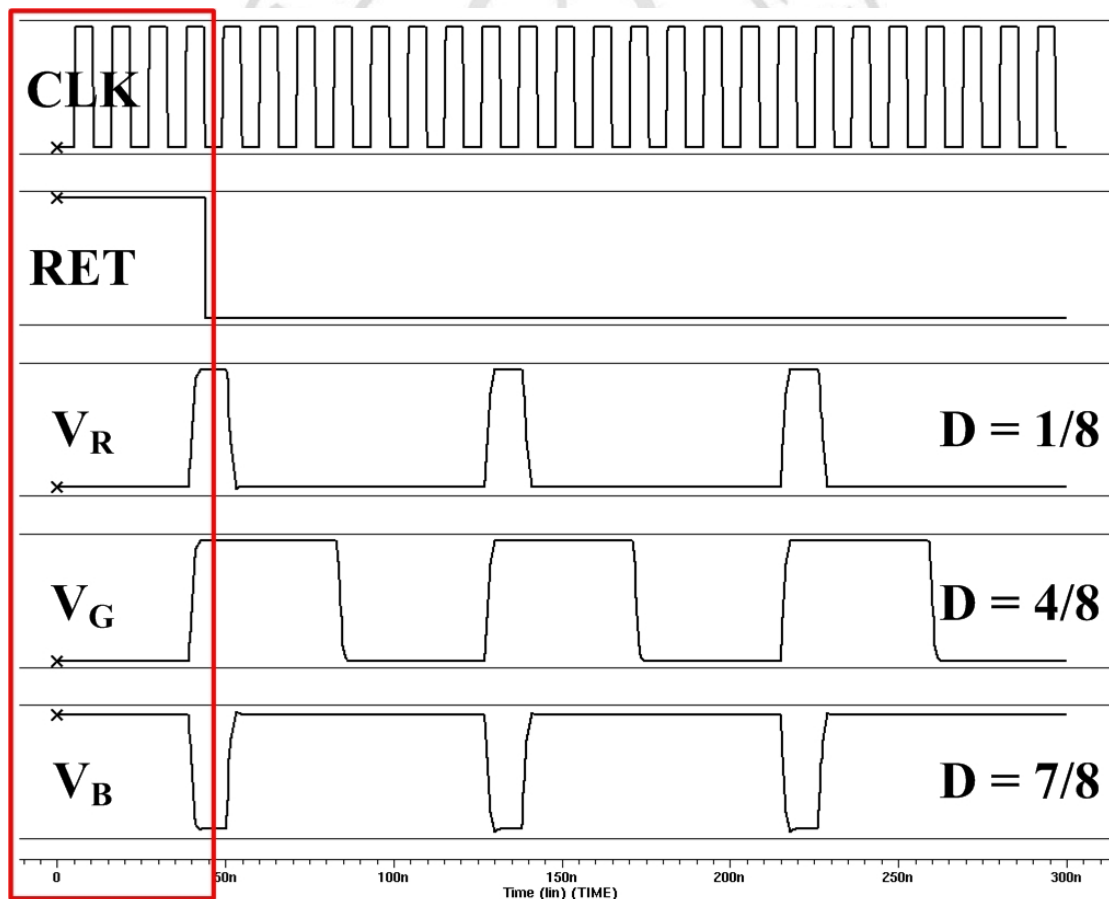


圖 19 三輸出 PWM 佈局模擬結果

4.3 高精確度 PWM 電路設計 (Type 3)

由於上述互補式電路架構在高位元解析度時，仍需在相當高的脈頻率下工作 $f_{clk} = 2^n f_{sw}$ 。因此，本論文使用雙緣觸發方式設計強生計數器(Johnson Counter)電路架構，以提高一倍輸出開關頻率(f_{sw})或降低一半所需輸入時脈頻率(f_{clk})。電路並加上延遲匹配網路(Delay Match)以提高 PWM 輸出的準確度，如圖 20 雙緣觸發與延遲匹配電路架構所示。

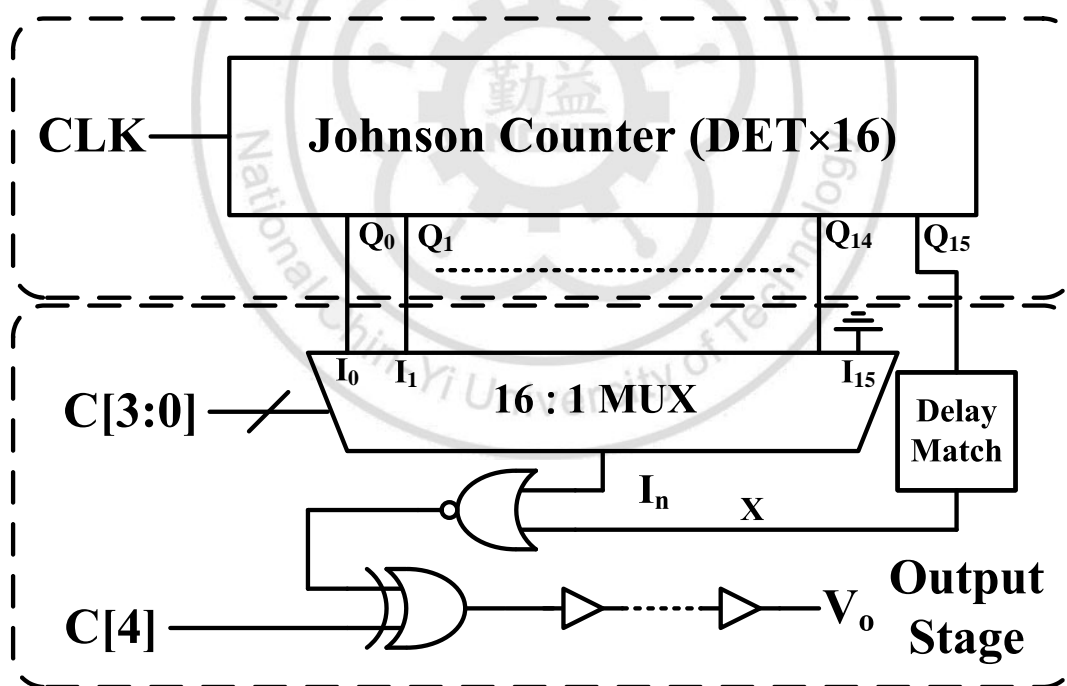


圖 20 5-bit 雙緣觸發與延遲匹配架構

4.3.1 雙緣觸發電路 (DET)

本論文採用雙緣觸發(Double-Edge-Triggered, DET)正反器設計方式，僅需使用 16 個時脈週期即可完成 32 階解析度設計，如圖 21 工作原理所示。電路經由雙緣觸發的強生計數器(Johnson Counter)產生 16 個方波($Q_0 \sim Q_{15}$)作為輸出級之參考訊號，並由輸入訊號 $C [4:0]$ 控制多工器(MUX)與互斥或閘(XOR)以產生所須輸出責任週期。圖 21 中 V_{o1} 與 V_{o2} 分別為輸入訊號 $C [4:0] = [00000]$ 與 $C [4:0] = [10000]$ 設定下，所產生最小($D = 1/32$)與最大($D = 31/32$)輸出責任週期範例。

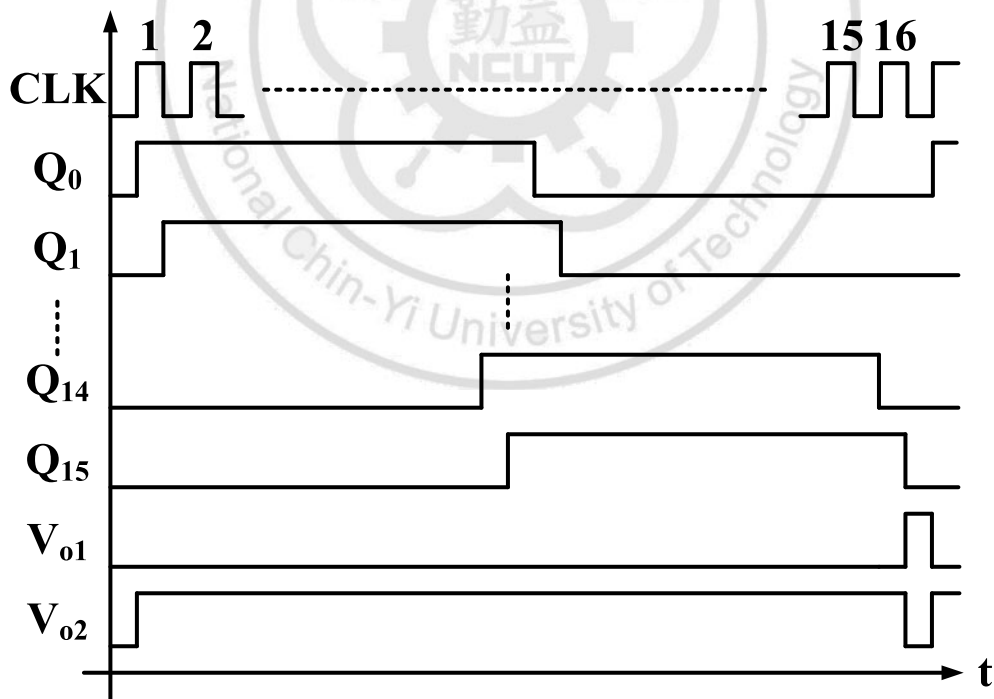


圖 21 DET 架構工作原理

圖 22 (a)與(b)分別為傳統單緣觸發(Single-Edge-Triggered, SET)與雙緣觸發(DET)正反器電路架構[20,21], 所需電晶體數分別為 12 與 16 顆。換句話說, 我們只增加 4 電晶體數即可增加一倍的輸出開關頻率(f_{sw})。

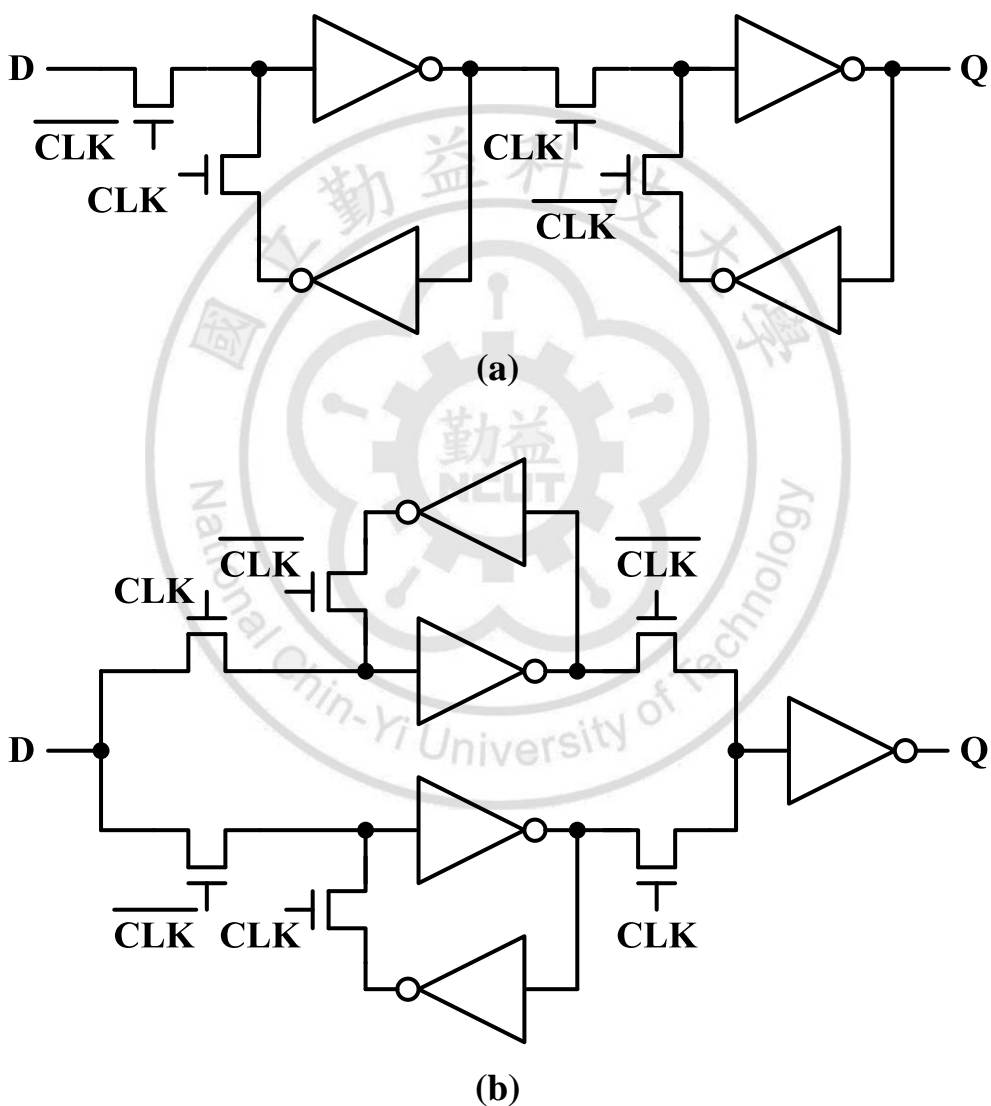


圖 22 傳統 DFF 電路架構 (a)SET (b)DET

4.3.2 延遲匹配網路

為了提高 PWM 輸出脈寬的準確度，我們新增延遲匹配網路設計如圖 20 中 Delay Match 方塊所示，以匹配 I_n 與 X 因訊號延遲路徑不同所產生之誤差。本論文使用 PTL (Pass-Transistor Logic) 方式設計多工器(MUX)電路，圖 23 為 4:1 多工器延遲匹配範例。從圖 23 電路中得知，所有輸出訊號路徑都須經過 2 顆 NMOS 電晶體，因此在 4:1 多工器情況下 Q_{15} 須加上 2 顆 NMOS 電晶體作為延遲匹配電路，以平衡訊號延遲時間提高 PWM 輸出脈寬的準確度。

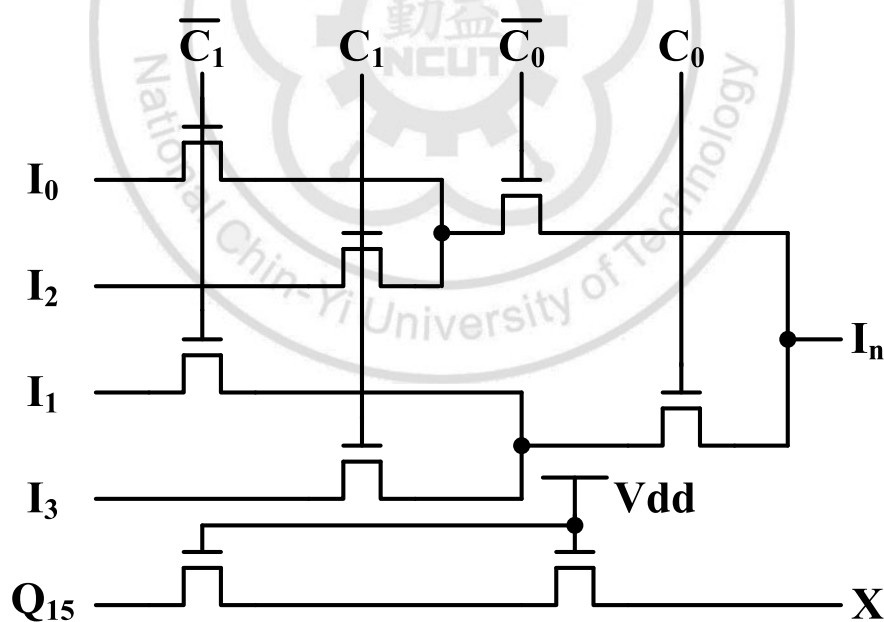


圖 23 延遲匹配範例

表 6 為電路經延遲匹配設計後佈局模擬(Post Layout Simulation)數據，分別顯示最小($D = 1/32$)、中等($D = 16/32$)、與最大($D = 31/32$)三種理論與模擬值之誤差。從表中初步可看出最小輸出責任週期誤差最大且高達 29.4%，且最大誤差時間為 1 ns。此誤差來自(1)實際佈局繞線長度不同，(2)上升下降時間為非理想且時間不一。

表 6 電路模擬與理論值之對應表

延遲匹配電路($f_{clk} = 200$ MHz)			
責任週期	理論	模擬結果	誤差
1/32	3.125 %	2.2 %	29.6 % (err = 0.7 ns)
16/32	50 %	48.75 %	2.5 % (err = 1 ns)
31/32	96.875 %	97. %	0.13 % (err = 0.1 ns)

4.3.3 佈局誤差修正電路設計

由於實際波形的上升與下降時間無法避免，因此本文在此以修正實際佈局繞線距離不同所造成之誤差。此方法為在互斥或閘(XOR)輸出上加上一級正反器作為最後輸出級，以修正佈局繞線之誤差，如圖 24 中 DET-DFF 方塊所示。圖 25 為最小($D = 1/32$)輸出責任週期修正範例，圖中 V_o 為訊號 Y 經由正反器修正佈局誤差後所產生的輸出波

形，所有輸出波形會延遲半個時脈週期，但不影響輸出責任週期比例且能有效修正 PWM 輸出脈寬寬度。表 7 為修正前與修正後佈局模擬之對照表，結果顯示修正後最小($D = 1/32$)輸出責任週期誤差降為 13%，且最大誤差時間最大僅有 0.4 ns，此誤差在實際應用上乃是極為微小。

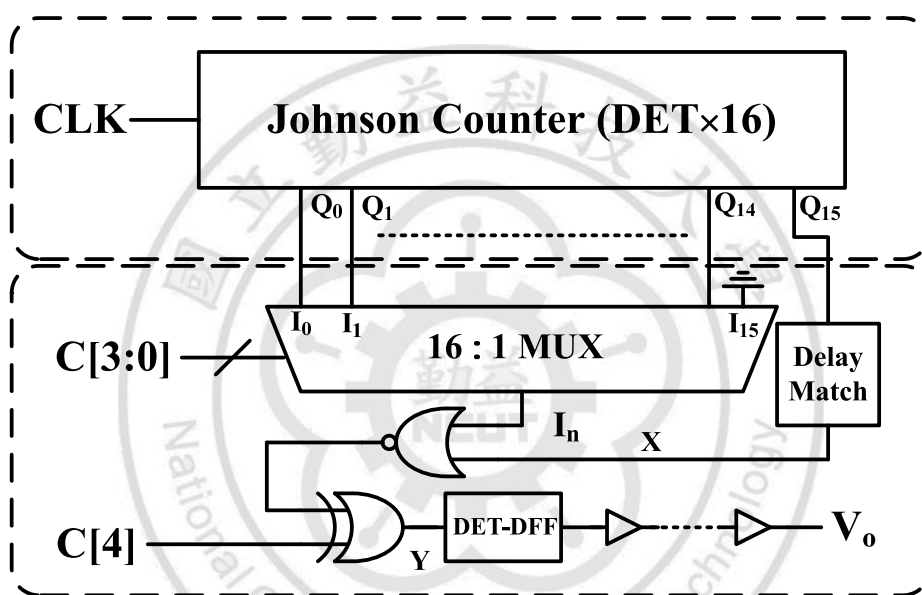


圖 24 高精確 PWM 電路

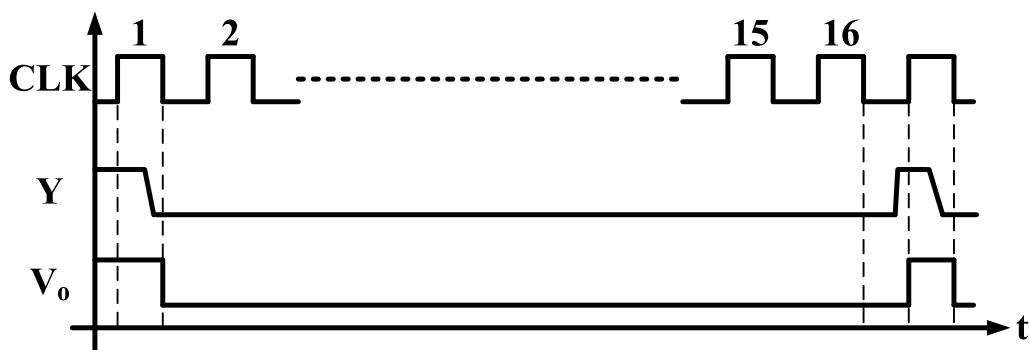


圖 25 誤差修正範例

表 7 誤差修正對照表

誤差修正電路($f_{clk} = 200 \text{ MHz}$)				
	責任週期	理論值	模擬結果	誤差
修正前	1/32	3.125 %	2.2 %	29.6 % (0.7 ns)
	16/32	50 %	48.75 %	2.5 % (1 ns)
	31/32	96.875 %	97 %	0.13 % (0.1 ns)
修正後	1/32	3.125 %	2.713 %	13 % (0.3 ns)
	16/32	50 %	49.5 %	1 % (0.4 ns)
	31/32	96.875 %	96.5 %	0.4 % (0.3 ns)

4.3.4 三輸出 SET 與 DET 比較

我們沿用硬體共享技巧設計一個具有三輸出與 5-bit 解析度之三色 LED 調光電路，可產生 $31 \times 31 \times 31$ (29,791)種的色彩變化，如圖 26 架構所示。表 8 為相同架構下使用 SET-DFF 與 DET-DFF 之電晶體數、功率消耗、與輸出頻率之比較，結果顯示在輸入頻率 200 MHz 下使用 DET 電路架構增加了 16 % 電晶體數與 64 % 功率消耗，但增加一倍輸出開關頻率(f_{sw})。

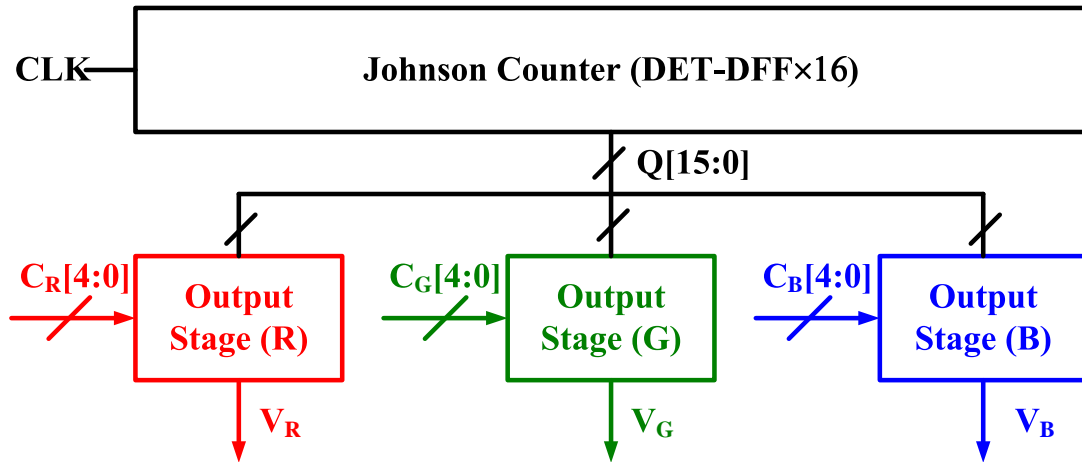


圖 26 高精確三輸出 PWM 架構

表 8 SET 與 DET 架構比較

高精確三輸出與 5-bit 電路 ($f_{clk} = 200 \text{ MHz}$)			
	電晶體數	平均功率消耗	輸出頻率
SET	426	0.75 mW	6.25 MHz
DET	494	1.23 mW	12.5 MHz
DET vs. SET	+ 16 %	+ 64 %	+ 100 %

4.3.5 高精確度電路模擬結果

本項工作所使用的模擬環境為台積電提供的 TSMC 0.18 μm CMOS Mixed-Signal RF 1P6M 1.8/3.3 V 製程完成，模擬軟體為 HSPICE，驗證軟體為 Calibre。圖 27 為具三輸出與 5-bit 解析度的高

精確互補式 PWM 控制 IC 之核心(Core)佈局圖,核心面積為 $280 \times 52.5 \mu\text{m}^2$, 共使用 494 顆電晶體數。電路共有 $C_R [4:0]$ 、 $C_G [4:0]$ 、與 $C_B [4:0]$ 三組控制訊號, 分別可產生 V_R 、 V_G 、 V_B 三組 PWM 輸出。電路在 1.8 V 工作電壓下平均消耗功率 1.37 mW@200 MHz, 表 9 為晶片規格表。

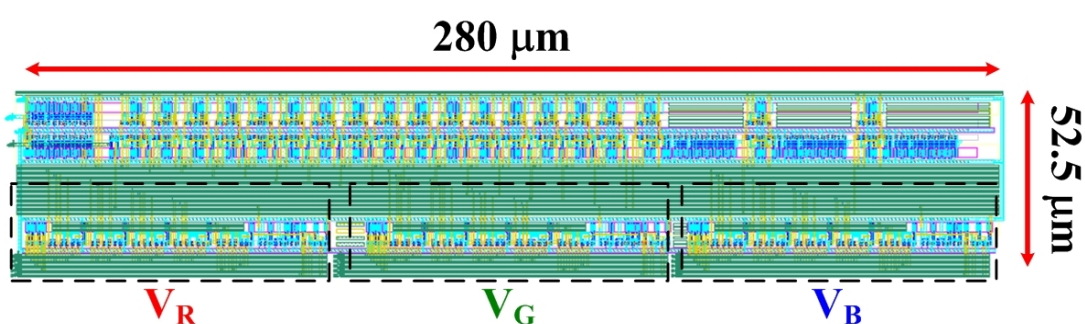


圖 27 高精確 PWM 核心佈局圖

表 9 高精確 PWM 規格表

製程技術	TSMC 0.18 μm
核心電路面積	$280 \times 52.5 \mu\text{m}^2$
解析度/輸出級	5-bit / 3組
總電晶體數	494
工作電壓	1.8 V
輸入/輸出頻率	200 MHz / 12.5 MHz
平均消耗功率	1.37 mW@200 MHz

圖 28 為高精度 PWM 電路核心(Core)佈局模擬結果(Post Layout Simulation)。第一個波形為輸入時脈 200 MHz；第二到第四個波形分別為輸入訊號在 $C_R [4:0] = [00000]$ 、 $C_G [4:0] = [01111]$ 、與 $C_B [4:0] = [10000]$ 設定下，所產生最小($D = 1/32$)、中等($D = 16/32$)、與最大($D = 31/32$)三種輸出責任週期。模擬結果驗證電路功能完整無誤(包含 Corner)。

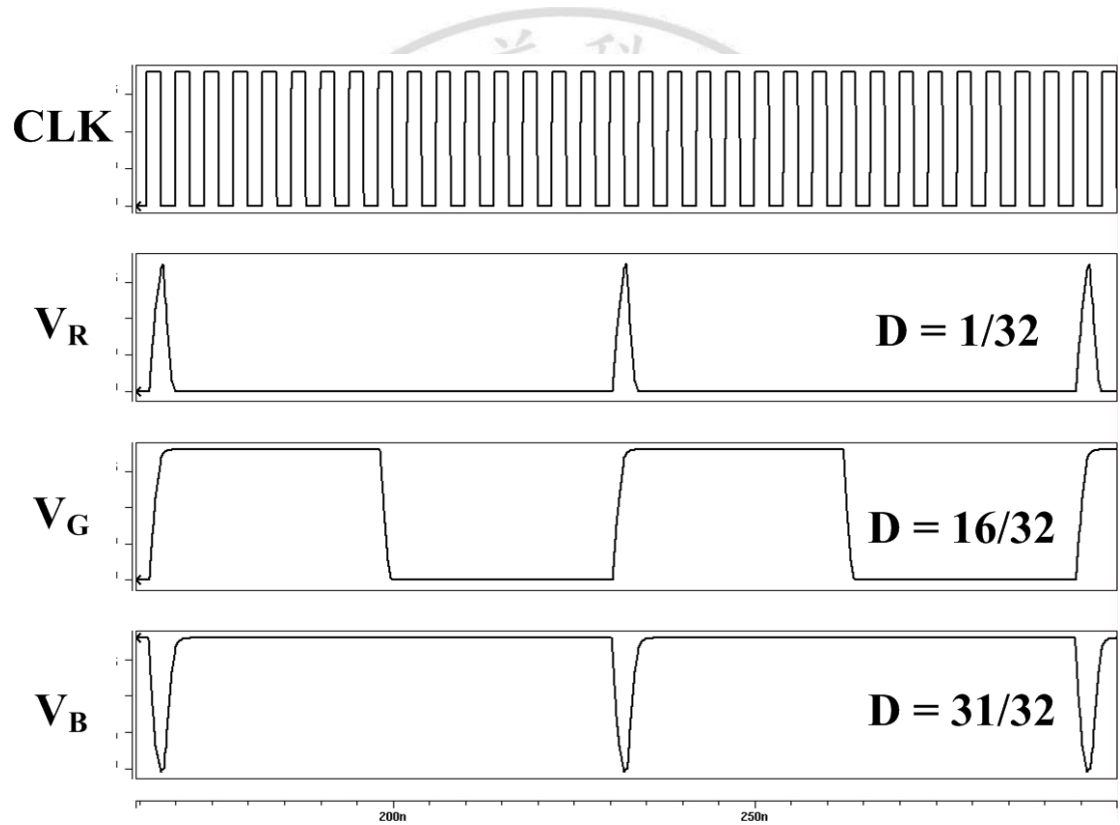


圖 28 高精度電路模擬結果

圖 29 為輸出脈寬不同頻率下之模擬誤差時間，其中三條曲線分別顯示最小($D = 1/32$)、中等($D = 16/32$)、與最大($D = 31/32$)三種責任週期。模擬結果顯示在不同頻率下其誤差時間介於 0.2~0.4 ns，電路

穩定性佳。圖 30 為不同頻率下之功率消耗分佈，可依工作環境與規格自行規劃。

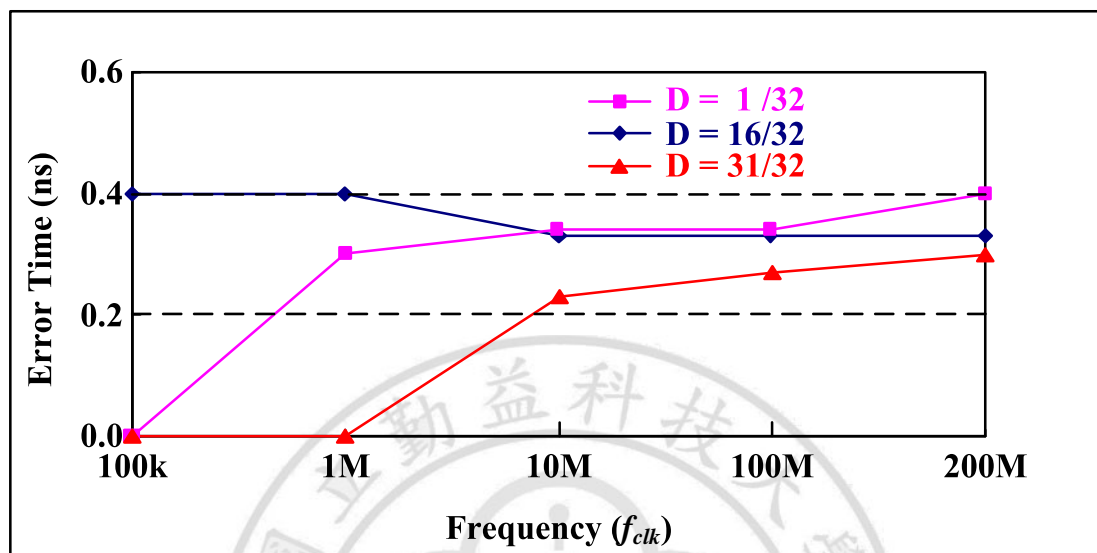


圖 29 高精確 PWM 輸出誤差

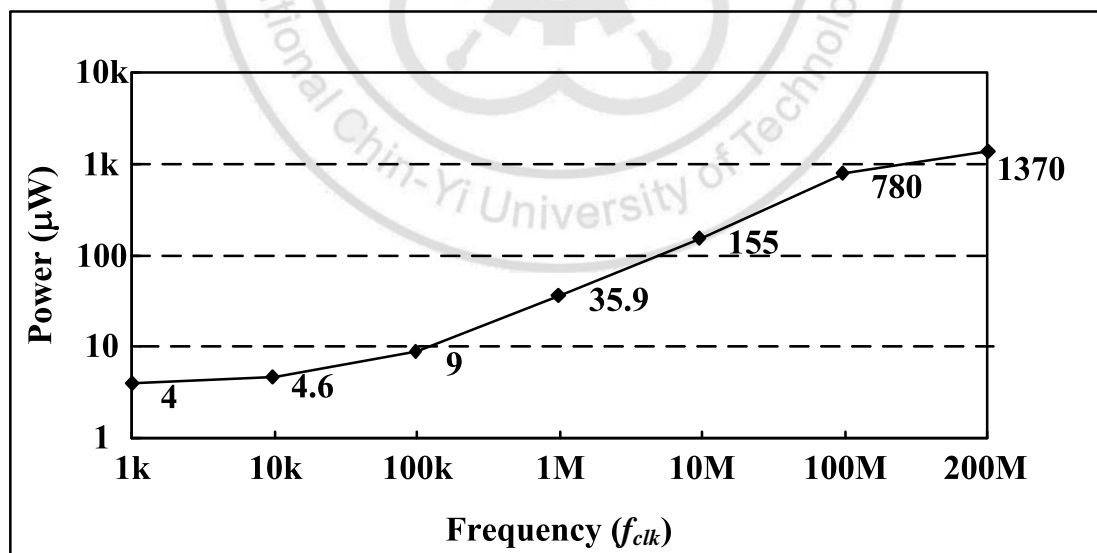


圖 30 高精確 PWM 功率消耗分佈

第五章 晶片量測與 LED 實驗結果

本論文研究共完成兩顆晶片實體製作，分別為第一型「互補式 PWM」與第二型「三輸出 PWM」電路架構，並使用第一型互補式 PWM 晶片驗證 LED 調光實務之可用性。

5.1 晶片量測結果

5.1.1 互補式 PWM 晶片量測結果

圖 31 為互補式 PWM 晶片微影圖，經由台積電提供的 TSMC 0.35 μm CMOS 2P4M 3.3/5V 製程下線製作完成，晶片面積為 $0.958 \times 0.958 \text{ mm}^2$ (包含 I/O PAD)。晶片共有 8 支接腳包含 VDD、GND、CLK、C [2:0]、RET 與輸出 V_o，其中 C [2:0] 為責任週期 (Duty Cycle) 控制訊號。表 10 為晶片特性，電路解析度為 3-bit 可產生 1/8 ~ 7/8 責任週期，量測結果顯示在 10 MHz 頻率下功率消耗僅有 0.79 mW。

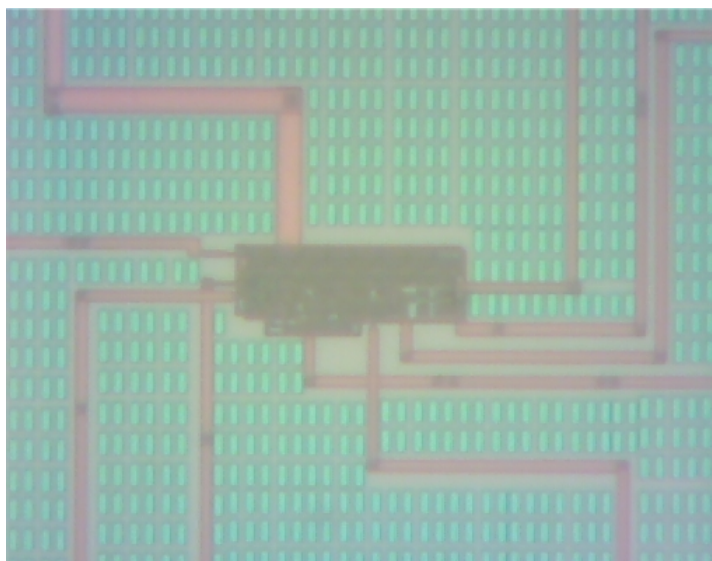
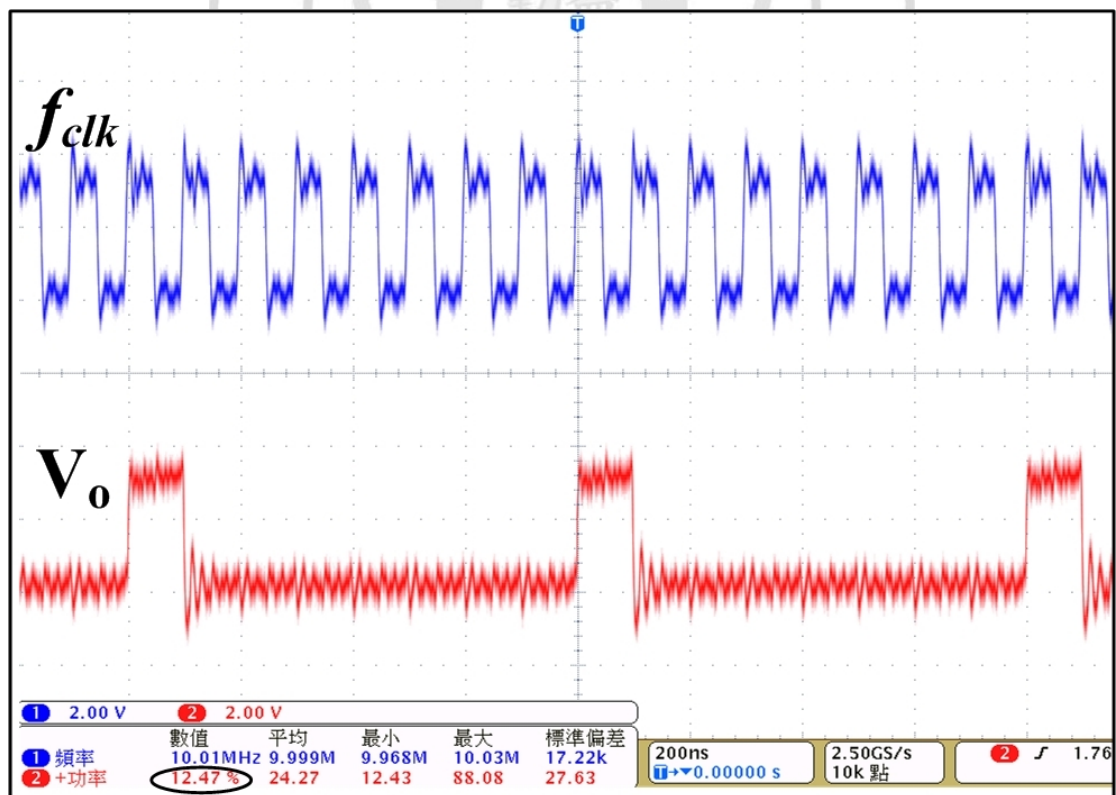


圖 31 互補式晶片微影圖

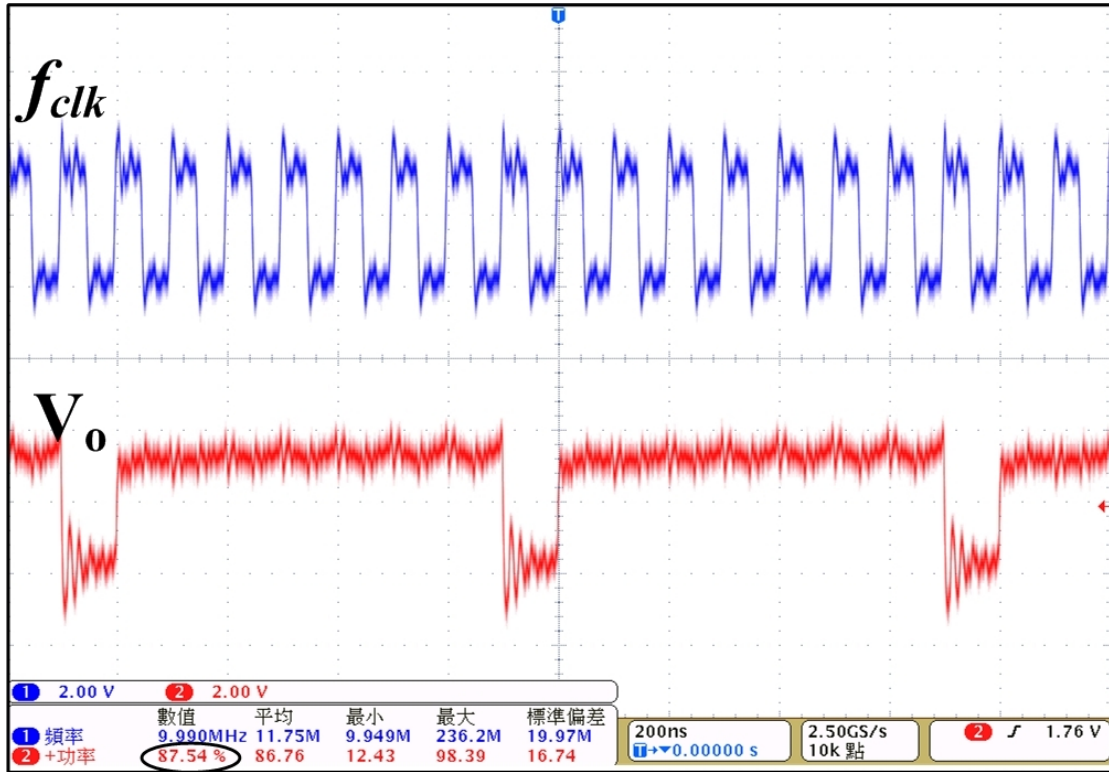
表 10 互補式晶片特性

製程技術	TSMC 0.35 μm
晶片面積	$0.958 \times 0.958 \text{ mm}^2$
解析度	3-bit
電晶體數	90
工作電壓	3.3 V
輸入/輸出頻率	10 MHz /1.25 MHz
平均功率消耗	0.79 mW@ 10 MHz

圖 32為互補式PWM晶片在3.3 V電源下功能量測結果，其中第一個波形為輸入時脈頻率 $f_{clk} = 10 \text{ MHz}$ ，第二個波形為晶片輸出訊號 V_o 。圖 32 (a)與(b)分別為輸入訊號 $C [2 : 0] = [000]$ 與 $C [2 : 0] = [100]$ 設定下，所產生的最小($D = 1/8$)與最大($D = 7/8$)兩種輸出責任週期。量測結果顯示，輸出責任週期分別為12.47 %與87.54 %與理論值近似，電路功能完整無誤。圖 33為互補式PWM晶片在3.3 V電源下不同輸入頻率所量測之平均消耗功率，量測結果顯示若操作頻率不大於1 MHz其消耗功率僅有0.1 mW，非常適用於可攜式電子元件或低功耗電路運用。



(a)



(b)

圖 32 互補式晶片量測結果 (a)最小責任週期 (b)最大責任週期

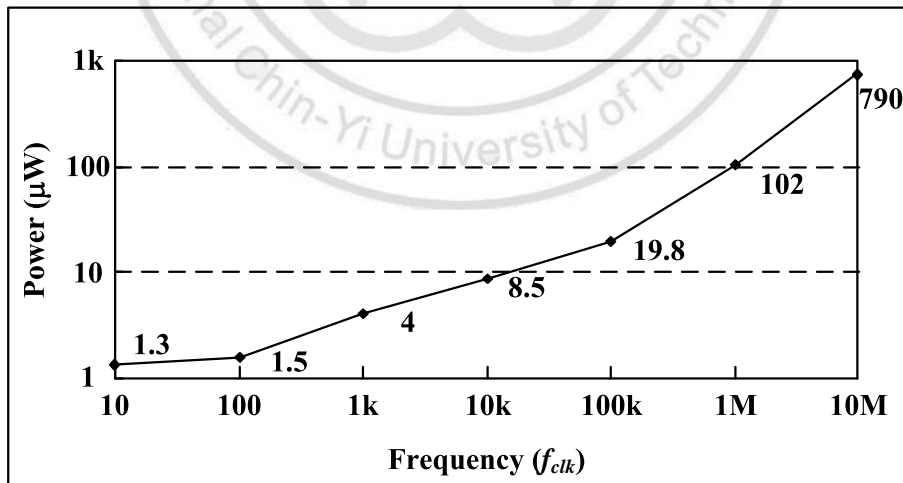


圖 33 互補式晶片功率消耗分佈

5.1.2 三輸出 PWM 晶片量測結果

圖 34為具有三輸出與3-bit解析度之互補式PWM晶片微影圖，經由台積電提供的TSMC 0.18 μm CMOS Mixed-Signal RF 1P6M 1.8/3.3 V製程下線製作完成，晶片面積為 $0.502 \times 0.502 \text{ mm}^2$ (含I/O PAD)，共使用110顆電晶體數。晶片共有16支接腳包含VDD、GND、CLK、RET、 $C_R [2:0]$ 、 $C_G [2:0]$ 、 $C_B [2:0]$ 與 V_R 、 V_G 、 V_B 三組輸出訊號。表 11為三輸出PWM晶片特性。

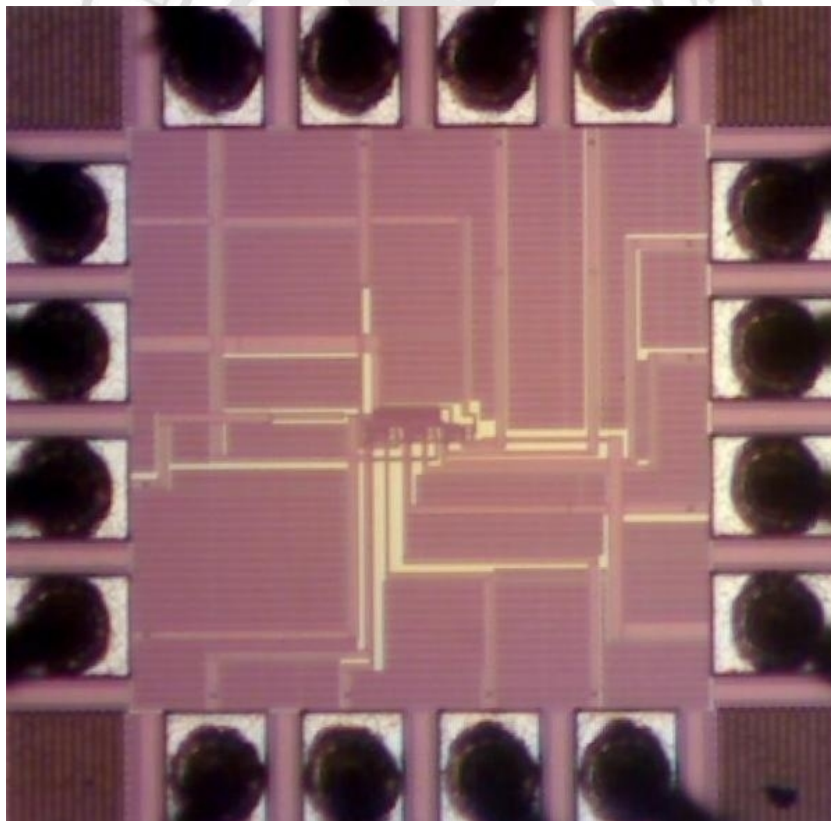


圖 34 三輸出晶片微影圖

表 11 三輸出晶片特性

製程技術	TSMC 0.18 μm
晶片面積	$0.502 \times 0.502 \text{ mm}^2$
解析度/輸出級	3-bit / 3組
總電晶體數	110
工作電壓	1.8 V
輸入/輸出頻率	10 MHz / 1.25 MHz
平均功率消耗	4.6 mW@10 MHz

圖 35為三輸出互補式PWM晶片在1.8 V電源下功能量測結果。其中第一個波形為輸入時脈10 MHz，第二到第四個波形分別輸入訊號在 $C_R [2:0] = [000]$ 、 $C_G [2:0] = [011]$ 、與 $C_B [2:0] = [100]$ 設定下，所產生最小($D = 1/8$)、(中等 $D = 4/8$)、與最大($D = 7/8$)三種輸出責任週期。量測結果顯示 V_R 、 V_G 、 V_B 輸出責任週期分別為12.86 %、50.2 %、與87.36 %，晶片功能完整無誤。

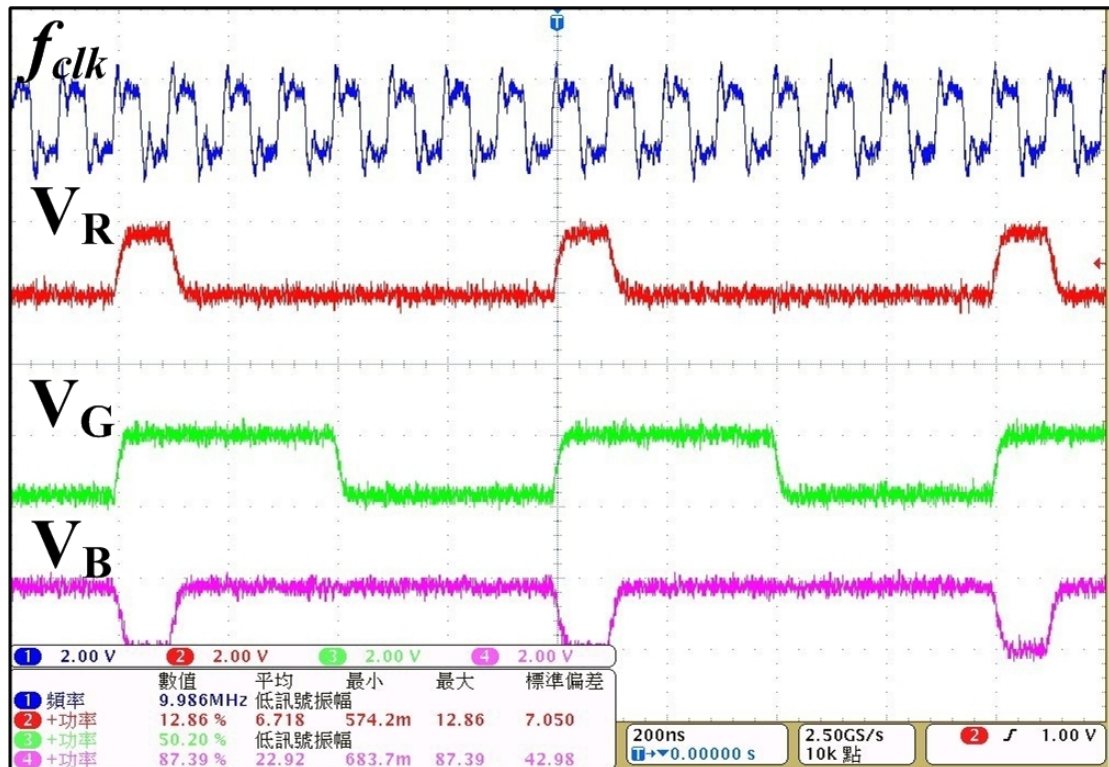


圖 35 三輸出晶片量測結果

5.2 LED 調光實驗結果

圖 36 為光通量(Luminous Flux)量測儀器積分球，量測單位為流明(lm)。圖 37 為定電流 LED 調光量測架構，將一顆白光 LED 置於積分球內並經由本論文第一型互補式 PWM 晶片作為控制，藉以量測 LED 在不同責任週期下光通量的變化與調光的線性度。量測環境為 IC 電壓 3.3 V、輸入頻率 100 kHz、與 LED 電流 20 mA，同時觀察示波器輸出責任週期是否正常與光度計之 LED 亮度變化並紀錄於圖 38 中。量測結果顯示，使用本論文 PWM 電路方式具有非常線性調光

能力，且能準確控制所需 LED 亮度。圖 39 為串並聯 18 顆 LED 之最大亮度控制之實體拍攝圖。



圖 36 光通量量測儀器

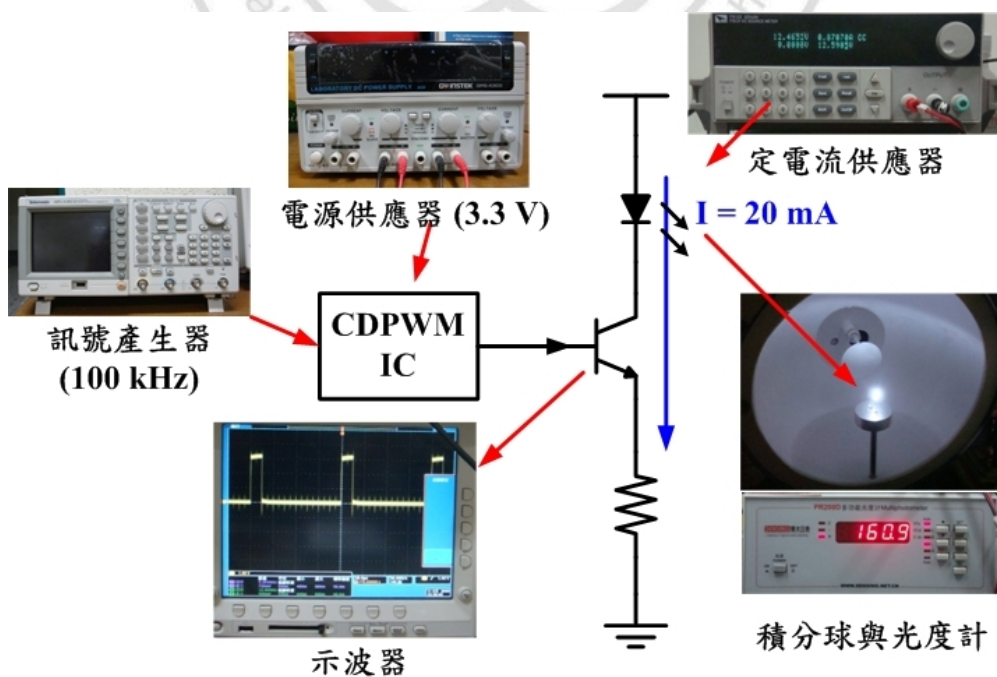


圖 37 LED 調光量測架構

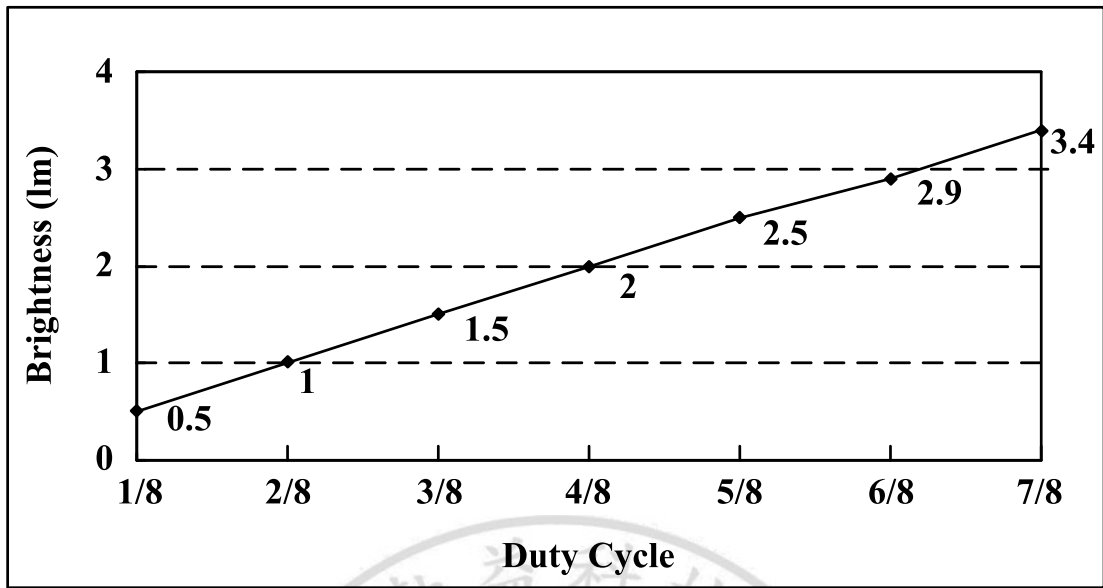


圖 38 定電流 LED 發光亮度量測

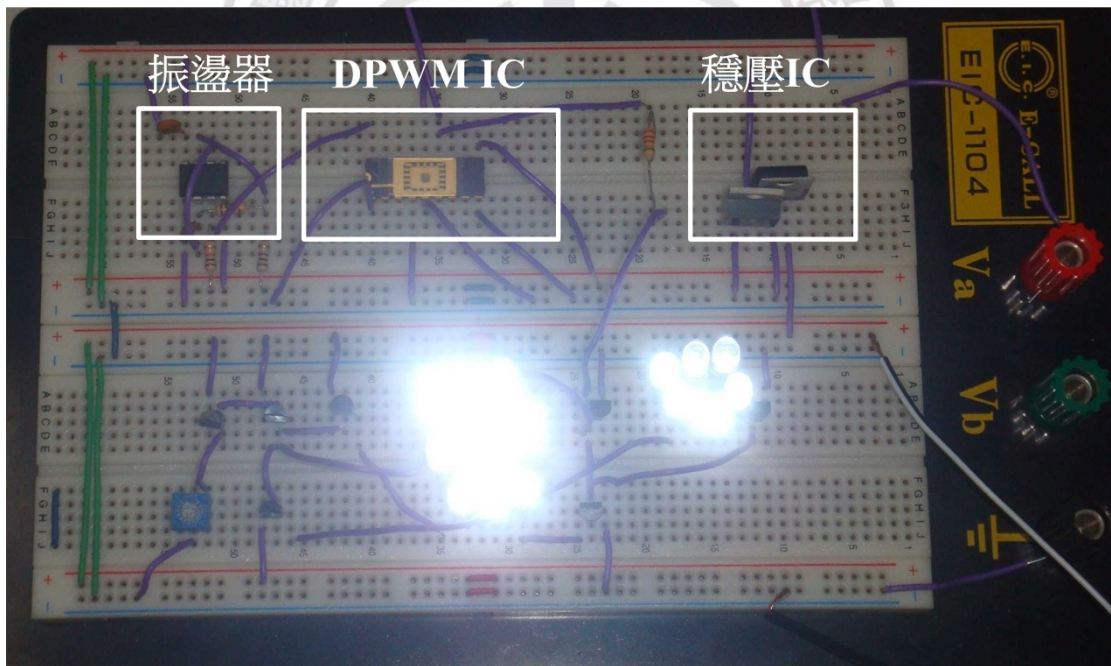


圖 39 串並聯 LED 實體拍攝圖

第六章 晶片實體應用

6.1 觸控式 PWM 調光架構

圖 40 為使用本論文第一型互補式 PWM 晶片所設計的觸控式 LED 檯燈電路架構，電路使用 20 V 電源以提供串連 LED 使用，並透過穩壓 IC 提供 5 V 電源給其他 IC 與電路方塊使用。此電路架構分成兩大部分，第一部分為觸控式 PWM 電路方塊，電路經由人體觸發 (Touch) 後改變 3-bit 計數器 (Counter) 的輸出值，再以 3-bit 計數器的輸出訊號作為互補式 PWM 晶片的輸入控制訊號，以觸控的方式控制互補式 PWM 晶片的輸出責任週期。最後將互補式 PWM 晶片的輸出接至雙載子接面電晶體 (Bipolar Junction Transistor, BJT)，以控制串並聯白光 LED 的發光亮度。第二部分為串並聯白光 LED 陣列 (Array)，使用電流鏡方式以確保每一顆白光 LED 電流大小一致，並將電流大小設定為 20 mA。圖 41 (a) 與 (b) 分別為觸控式 PWM 電路與串並聯 30 顆白光 LED 陣列之雛型電路板實體圖。

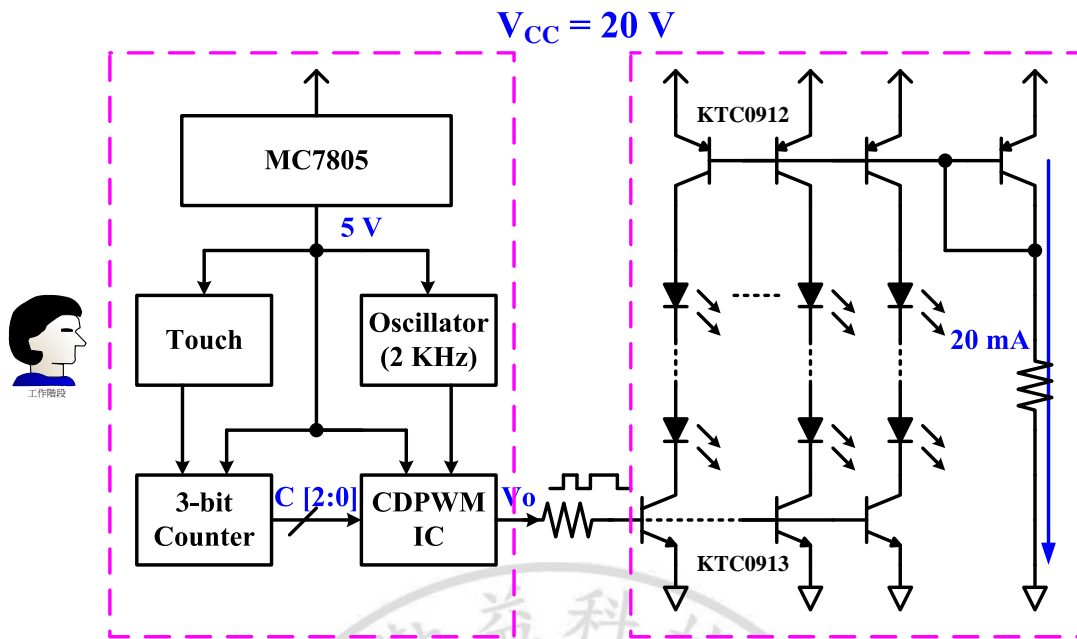
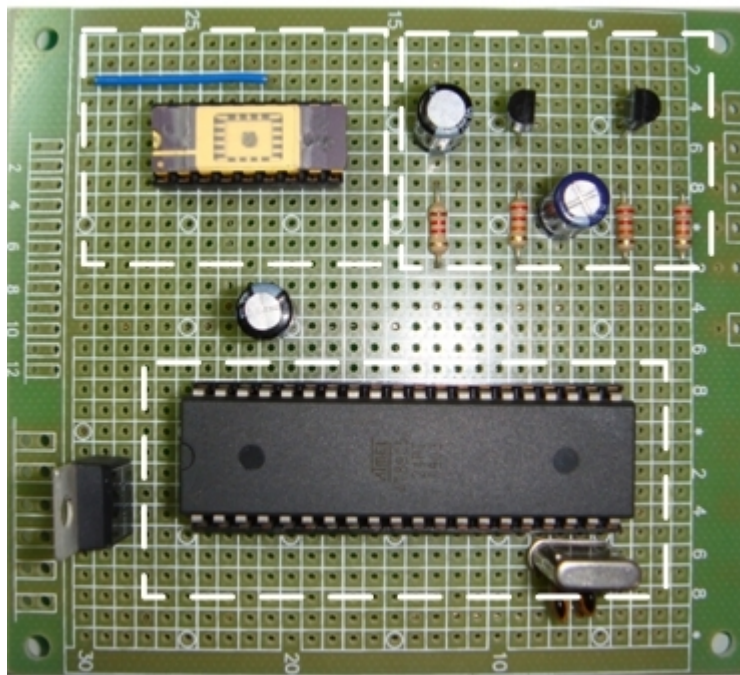


圖 40 觸控式 LED 調光架構

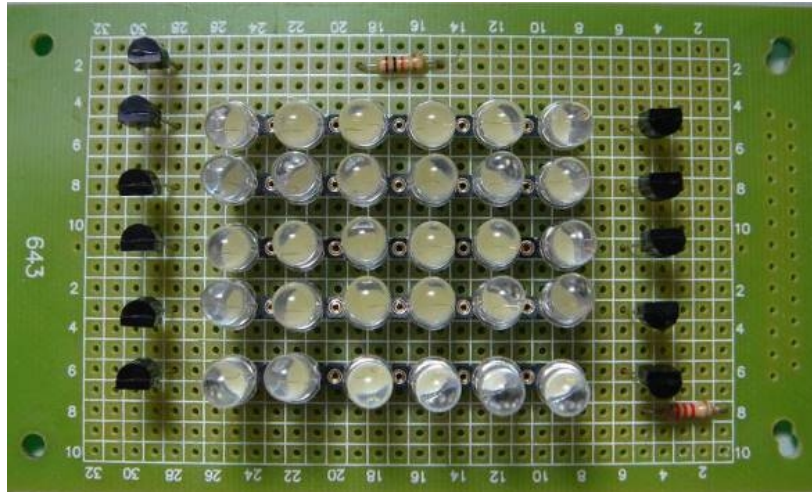
CDPWM IC

Touch



Counter and Clock

(a)

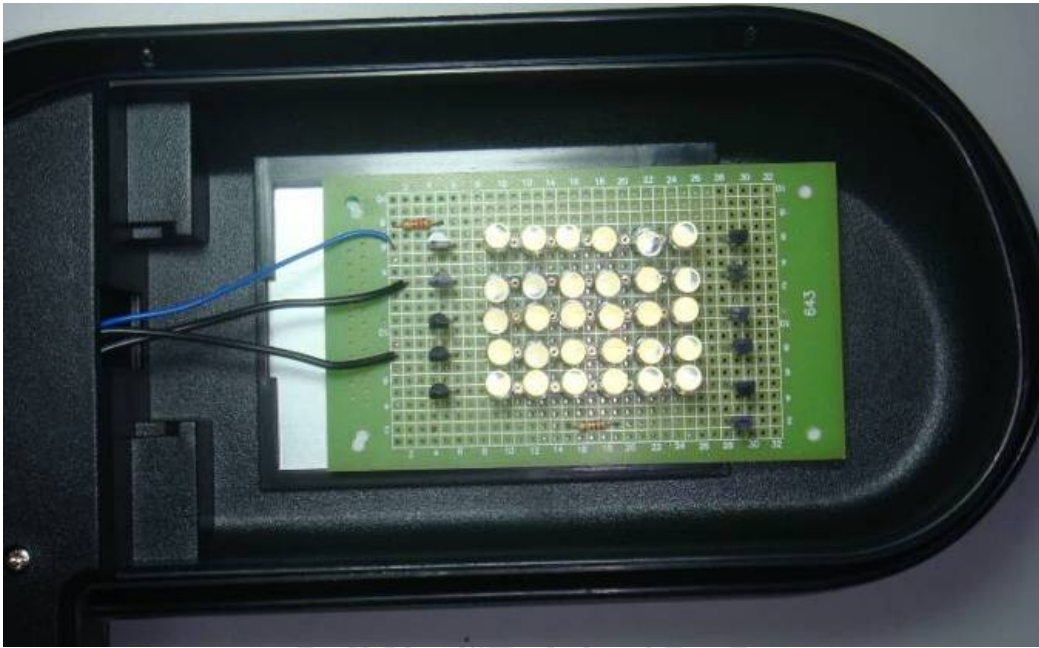


(b)

圖 41 雛型電路板 (a)觸控式 PWM 電路 (b)串並聯白光 LED 陣列

6.2 觸控式 LED 檯燈

圖 42 (a)與(b)分別為觸控式 LED 檯燈之電路板裝配圖，分別將 LED 陣列與觸控式 PWM 電路置於 LED 檯燈燈板與底座，並接上 20 V 電源變壓器、電源開關、與觸控按鍵，如圖 43 完整觸控式 7 段 LED 調光檯燈雛型。電路預設為最大責任週期($D = 7/8$)且每次觸碰開關一次將下降 $1/8$ 責任週期，至最小責任週期($D = 1/8$)後再回到最大責任週期($D = 7/8$)，依此循環。圖 44 (a)與(b)為觸控式 LED 檯燈實體功能展示，分別顯示最大($D = 7/8$)與最小($D = 1/8$)兩種責任週期所產生的亮度。



(a)



(b)

圖 42 觸控式 LED 檯燈裝配 (a)LED 燈板 (b)控制面板



圖 43 完整觸控式 LED 檯燈雛型



(a)



(b)

圖 44 LED 檯燈實體展示 (a)最大亮度 (b)最小亮度



第七章 結論與未來研究方向

7.1 結論

本論文成功完成三種新型的數位 PWM 電路設計，分別為第一型「互補式 PWM」、第二型「多輸出 PWM」、與第三型「高精確 PWM」三種架構。其中第一型與第二型晶片量測結果顯示，使用本論文電路具有高線性調光能力與低功率消耗，且電路功能完整無誤。而第三型電路架構更具有高精確度的絕對(Absolute)脈寬輸出，且能同時具有 $31 \times 31 \times 31$ (29,791)種亮度與色彩變化。模擬結果顯示電路誤差時間僅有 0.2 ~ 0.4 ns，電路穩定性極佳。最後，本論文使用第一型互補式 PWM 晶片成功完成觸控式七段 LED 調光檯燈，作為本論文晶片之實用性驗證，其功能完整無誤。

7.2 未來研究方向

由於本論文研究成果僅提供 LED 調光應用，未來將持續研究切換式電源電路設計與溫度感測電路，並使用高壓製程技術與本論文多輸出 PWM 電路架構做整合，以同時完成電源與調光電路設計，並提供一個穩定和完整的 LED 驅動 IC。同時將研究 LED 的混光方式與色彩的控制方法，並嘗試應用於 LCD 背光或 LED 顯示器中。

參考文獻

- [1] 周志敏、周紀海、紀愛華，LED 驅動電路設計與應用，五南圖書出版股份有限公司，台北，2008 年。
- [2] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman, T. Klein, "Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts Due to Different Dimming Methods," *Proceedings of the SPIE*, vol. 5941, pp. 280-288, 2005.
- [3] X. Xu, X. Wu, "High Dimming Ratio LED Driver with Fast Transient Boost Converter," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 4192-4195, June, 2008.
- [4] 曾偉菁，發光二極體發光特性與其驅動電路之研究，國立成功大學電機工程系碩士論文，2006 年。
- [5] 李祐銘，LED 間斷式驅動對色度表現之影響，國立中央大學光電科學系碩士論文，2007 年。
- [6] 顯示光源研討會，國立中興大學，頁 16，2008 年 11 月 7 日。
- [7] 綠能科技及產業研討會－太陽能電池及 LED 照明，國立成功大學，頁 172，2009 年 10 月 30 日。
- [8] 楊峻泓，以數位脈寬調變技術為主之升壓型白光驅動電路分析與設計，朝陽科技大學資訊工程系碩士論文，2005 年。
- [9] C.H. Wu, C.L. Chen, "High-Efficiency Current-Regulated Charge Pump for a White LED Driver," *IEEE Circuits and Systems Society*, vol. 56, pp. 763-767, October, 2009.
- [10] Technical Data Sheet 5 mm Round White LED (T-13/4).
- [11] 劉軒良，以脈波驅動發光二極體提升發光效能之研究，國立成功大學機械工程系碩士論文，2007 年。
- [12] G.Y. Wei, M. Horowitz, "A Low Power Switching Power Supply for Self-Clocked Systems," *International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 313-317, Aug., 1996.
- [13] A.P. Dancy, A.P. Chandrakasan, "Ultra Low Power Control Circuits for PWM Converters," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pp. 21-27, June, 1997.
- [14] G.Y. Wei, M. Horowitz, "A Fully Digital Energy-Efficient Adaptive Power-Supply Regulator," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, pp. 520-528, April, 1999.
- [15] A.P. Dancy, R. Amirtharajah, A.P. Chandrakasan, "High-Efficiency Multiple-Output DC-DC Conversion for Low-Voltage Systems," *IEEE Transactions on VLSI Systems*, vol. 8, pp. 252-263, June, 2000.

- [16] B.J. Patella, A. Prodic, A. Zirger, D. Maksimovic, "High-Frequency Digital PWM Controller IC for DC-DC Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, pp. 438-446, Jan., 2003.
- [17] Syed, A. Ahmed, E. Maksimovic, D. Dept, "Digital PWM Controller with Feed-Forward Compensation," *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, vol. 1, pp. 60-66, September, 2004.
- [18] A. Syed, E. Ahmed, D. Maksimovic, E. Alarcon, "Digital Pulse Width Modulator Architectures," *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 6, pp. 4689-4695, June, 2004.
- [19] H. Chen, S. Li, Q. Niu, Y. Wu, F. Zhou, "A Multi-Phase Self-Sensing Clock Generator for Hybrid DPWM Application," *ASICON '07. 7th International Conference*, pp. 635-638, January, 2007.
- [20] M.W. Phyu, W.L. Goh, K.S. Yeo, "Low-Power/High-Performance Explicit-Pulsed Flip-Flop Using Static Latch and Dynamic Pulse Generator," *IEE Proceedings Circuits, Devices and Systems*, vol. 153, pp. 253-260, June, 2006.
- [21] Y.H. Shu, M.C. Sun, W.S. Feng, "XNOR-Based Double-Edge-Triggered Flip-Flop for Two-Phase Pipelines," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, pp. 138-142, February, 2006.



自傳

姓名： 郭登淵 Deng-Yuan Guo
出生日期： 民國七十四年九月五日
籍貫： 雲林
學歷： 國立勤益科技大學 電子工程系 碩士班 積體電路組 97.9 ~ 99.7
國立勤益科技大學 電子工程系 93.9 ~ 97.6
私立宜寧高級中學 90.9 ~ 93.6

發表論文：

- [1] Y.C. Hung, D.Y. Guo, "Design of A CMOS Compact Pulse-Width Modulation Core for LED Application," *4th Intelligent Living Technology Conference*, pp. 809-813, 2009.
- [2] Y.C. Hung, D.Y. Guo, "A Modified CMOS Pulse-Width Modulation Circuit," *4th Intelligent Living Technology Conference*, pp. 824-827, 2009.
- [3] Y.C. Hung, D.Y. Guo, "A Compact CMOS Pulse-Width Modulation Core with Multiple Outputs for RGB LED Dimming Control," *International Conference on High-Speed Circuit Design*, pp. 11-16, Oct., 2009.
- [4] Y.C. Hung, D.Y. Guo, "A New 32-Resolution Pulse-Width Modulation Design with Multiple Outputs for LED Dimming," *5th Intelligent Living Technology Conference*, pp. 748-752, 2010.

參加競賽：

- [1] 97 學年度大學校院積體電路設計競賽
- [2] 98 學年度大學校院積體電路設計競賽
- [3] 勤益科技大學電子系 2008 第二屆聖誕樹(燈)創意設計比賽(最佳設計獎)
- [4] 2008 全國 LED 創意設計競賽(入圍決賽)

下線晶片：

1.

晶片名稱：應用於戶外行動 LED 之精簡型數位脈寬調變電路設計

晶片功能：PWM 電路

晶片製程：TSMC 0.35um Mixed-Signal 2P4M Polycide 3.3/5 V

晶片下線梯次/日期：D35_98C / 98 年 05 月 11 日

CIC_IC 編號：30

2.

晶片名稱：具多輸出能力之硬體共享型三色 LED 調光脈寬調變電路

晶片功能：多輸出 PWM 電路

晶片製程：TSMC 0.18 μm CMOS Mixed-Signal RF 1P6M 1.8/3.3 V

晶片下線梯次/日期：T18_98D / 98 年 8 月 24 日

CIC_IC 編號：179

