

九十年度行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

半導體雷射陣列之模擬分析及其相關熱機構效應之研究

The Simulation of Semiconductor Laser Diode Array and Its Thermomechanical Effects

計畫編號：NSC 90-2215-E-034-002

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

執行機關：中國文化大學 電機工程系

主持人：林嘉全 副教授 E-mail: jclin@faculty.pccu.edu.tw

一、摘要

(一) 中文摘要

本計畫以一年的時間，進行雷射二極體陣列封裝的熱傳與其驅動電路的設計規劃。

『半導體雷射二極體』由於體積小且操作方便，同時具有相當高的電-光轉換率，目前在醫療手術、雷射印表機及精密機械加工等方面深受矚目，逐漸取代傳統雷射光源。然而，半導體雷射在功率上始終略嫌不足；因此，近年有『高功率雷射二極體陣列 (High power laser diode array)』技術的開發發展，使得雷射二極體有突破性的進展。但是，如此小體積且高功率的組合，使得該元件在構裝上產生散熱的難題。其中，熱傳與驅動電路設計是關鍵性課題。

本計畫發展出一套針對『高功率雷射二極體陣列封裝及驅動電路設計』的模擬模型。透過此模擬系統的深入分析與研究，我們歸納並整理出該模組的設計準則，並提供適當的分析數據。在熱傳規劃方面，主要是在結構元素間接合面溫度與溫度梯度的控制；在驅動電路設計方面，採用 SPICE 軟體模擬所設計的驅動電路及放大電路對雷射二極體的控制。經過此模擬系統的分析，將可減少嘗試錯誤的成本。

尤其本計畫所研製的雷射二極體陣列封裝，內部熱組的散熱情形顯得格外重要，必須藉理論模擬分析建立新的製造準則。另外，接面熱阻與外殼熱阻也是本計畫在封裝散熱研究中重要考慮因素之一。透過完整的模擬分析預期將能萃取出高功率雷射二極體陣列的結構參數，提高該模組的可靠度與穩定度。

本計畫之結果期能建立一個精確的理

論模型與驅動電路系統，作為進一步開發最佳化模組技術的基礎。

關鍵詞：雷射二極體、封裝、陣列、模擬

(二) 英文摘要

The use of high-power semiconductor laser diode to implement laser printer, laser pointer, and ultra-small mechanical skill, etc. has attracted lots of attention recently. Due to the advantages of small size, convenient operation, and high optic-electric transfer efficiency, the high power semiconductor laser diode array module with control circuit has now become the most promising candidate for laser applications.

In addition, advancements in high power laser diode array technique have made it possible to perform a high-power, small-size, high-performance, and temperature-insensitive module based on the semiconductor laser diodes. In view of the increasing component density on laser diode array for high power and larger scale of integration, the power density on the chip surface increases. On the other hand, the operating temperature of chip is limited within a certain range for acceptable system reliability. Hence, it is important to study the thermal properties of the device packages and device chip in order to get a better thermal layout.

In the study, the advanced packaging designs of high-power laser diode modules are proposed. We have developed a packaging skill for high thermal dissipation, major in the design and implement of power controller, and focus on the thermal analysis and simulation.

A simulation program for the packaging design is presented. This program would offer more realistic simulation results for the optimum

design of high-power laser diode array and will be very important for future study on related optic-electronics.

Keywords: Laser Diode, Array, Simulation, Thermal Effect, Driver Circuit

二、計畫緣由與目的

由於『高功率半導體雷射二極體』目前已成為工業界及學術界爭相研究的對象[1]-[4]。而目前我國雖已有生產雷射二極體的能力,但對於高功率雷射二極體陣列的封裝技術方面仍屬起步階段。尤其,國內在半導體的研發經費上,一直偏重前段磊晶製程的研究,對於後段封裝製程則較少投入;因此本計畫以一年時間進行高功率雷射二極體陣列封裝技術的研究。進行『雷射二極體陣列』封裝(Package)的熱傳與驅動電路的規劃。

在雷射二極體陣列封裝技術的開發過程,熱傳規劃、驅動電路設計是不可或缺的;畢竟,在高性能及高穩定性的前題下,還要兼具高功率、小體積的要求,熱能的流散方式、尺寸大小及相關問題是很重要的考量[5]-[7]。

我們除了針對高功率雷射二極體陣列主體進行軟體模擬之外,對於其週邊驅動電路也是我們模擬的重點,可望移轉至工業界作為其研發之參考。

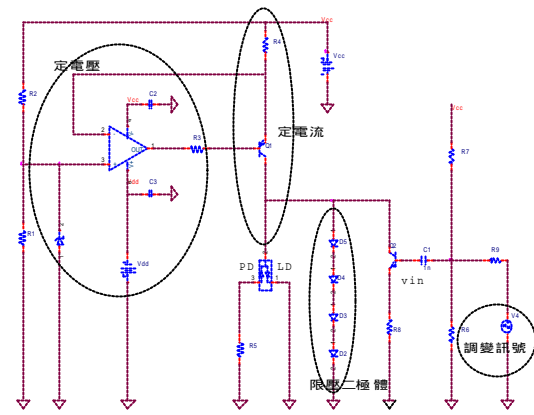
三、研究方法與成果討論

本計畫針對『高功率雷射二極體陣列』進行封裝設計及其熱傳與電性規劃模擬,以此模擬系統為基礎,進行模組最佳化的研製工作。

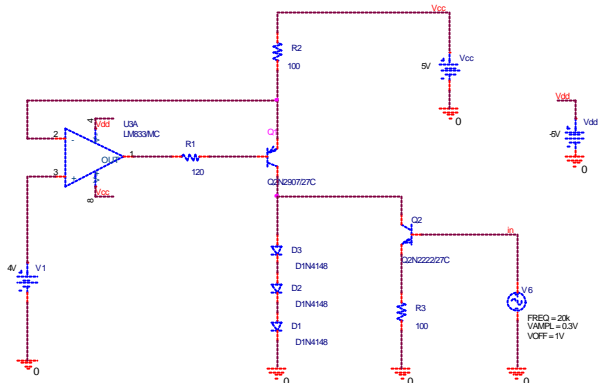
茲將本計畫的研究方法與成果列敘如下:

A、驅動電路設計方面:

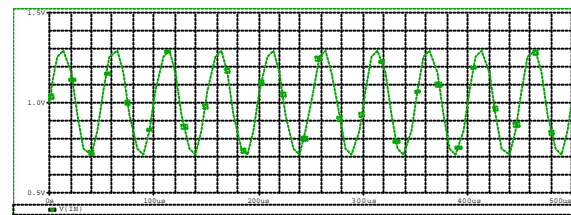
本計畫進行『高功率雷射二極體陣列』的相關模擬,為兼顧熱傳導[10]、元件材料特性[9]、電路佈局對散熱能力的影響、溫度穩定度[8][14],一個好的功率控制電路是必須的。圖一至圖五是調變電路的電路圖及動應之模擬結果。此為設計適當的高功率雷射二極體模組的基礎,以提升高功率模組的可靠度與穩定度。



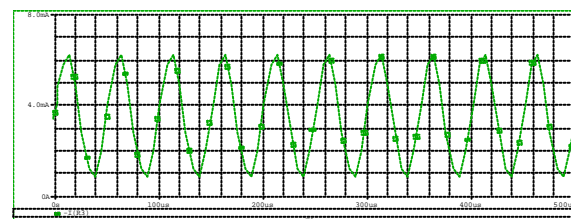
圖一 雷射二極體的調變電路



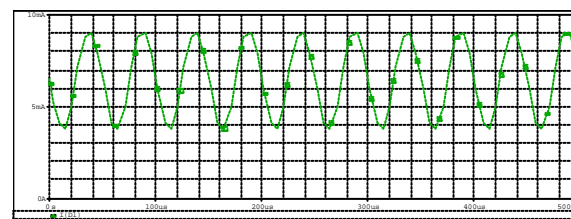
圖二 雷射二極體調變電路等效電路模型



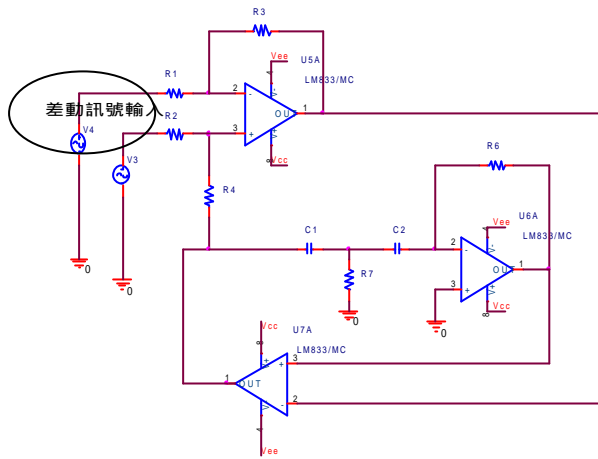
圖三 PSPICE 模擬輸入調變電壓波形



圖四 PSPICE 模擬 Q2E 之調變電流波形



圖五 PSPICE 模擬 Q1C 之調變電流波形



圖六 後級放大濾波電路

B、熱傳導模型方面：

相關研究結論可細分為下列幾項：

(一)、熱源分佈的研究：

一個高功率模組的封裝必需同時考慮晶粒與接腳間及與散熱片間的焊線問題、封膠及封蓋等問題；以及散熱片 (Heat Spreader) 的材質及其熱傳送方式等問題。而在高功率的模組元件中，熱源的分佈十分重要，畢竟導線及封膠/封蓋的材料選取受限於晶粒、包裝及導線的熱承載能力，如能在材料超過熱承載能力前使熱散逸則許多相關問題可迎刃而解。

(二)、熱傳導模型的建立及其熱阻的探討：

本計畫針對『高功率半導體雷射元件模組』建立『熱傳導模型』以利進一步的模擬分析。結果顯示，溫度與二極體的冷卻器、材料的傳導係數、冷卻劑、冷卻劑的流速、以及雷射二極體的結構有關係。

為求雷射二極體陣列能夠具有高效率、高明亮度、體積小、穩定的操控、溫度時效性，而經由本研究發現，效率通常與溫度成反比，溫度上升，常常造成能量散逸，而導致效率下降，因此溫度跟效率可說兩者一體。另外，散熱片及封裝外殼的材料選擇也是非常重要的，不同材料，將會有不同的熱效應。

雷射二極體封裝的重要的參數為熱阻，熱阻的單位為 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。而參考熱阻單位 cm^2/W 。功率 P_d 在元件介面處產生後，由熱源 T_j 流經熱阻 R_{th} 到達環境中的 T_a 。若定義 $R_{th,jc}$: 介面到封裝外殼的熱阻值, $R_{th,ca}$: 封裝外殼到環境的熱阻值, 則

$$R_{th} = R_{th,jc} + R_{th,ca}。$$

熱阻的形成功率 P_d 在元件介面處產生

後，功率變產生熱能，而避免溫度過度升高，熱必須由介面轉移至封裝而散逸至環境。熱的轉移方式，就是由熱阻來完成。所以相同介面下熱阻越低可以散逸較大功率。

藉由 Fourier 熱導定律可推導得

$$P_{tot} = S_{th} \times \frac{dT}{dx}$$

其中 P_{tot} : 散逸的功率, S_{th} : 材料的熱導率, dT : 熱源改變, dx : 延熱流路徑

長的變化, 兩邊積分可得 $\frac{P_{tot} \times x}{S_{th} \times A} = \Delta T$ 而

$\frac{x}{S_{th} \times A}$ 即為熱阻 R_{th} , 可得 $P_{tot} \times R_{th} = \Delta T$,

此為溫度梯度 T 和散失功率及熱阻關聯。為了求得不同材料熱阻 R_{th} 值的簡單方程式, 作了熱由內而外以 45° 角傳播的假設, 熱源假設為長方形, 邊長為 a 及 b 且溫度均勻, 可得熱阻為

$$R_{th} = \frac{1}{S_{th}} \times \int \frac{dx}{A}$$

對於一個邊長為 a 及 b 的長方形熱源, 不計 S_{th} 對溫度的變化我們得到

$$R_{th} = \frac{1}{2S_{th}(b-a)} \times \ln\left(\frac{b^2x + \frac{a^2}{2}}{a^2x + b^2}\right)$$

由此結果, 雷射二極體降低熱阻的方式, 可由幾方面著手: 包括結構, 包裝方式, 冷卻裝置, 降低熱傳導係數。

(三)、熱彈性應力及熱振動與金屬熱阻抗：

由於在封裝過程中, 許多過程必需在高溫環境下進行, 每一部份材料的熱彈性應力與相對應的機械應力變得很重要, 應避免『熱振動 (Thermal Shock)』或『熱循環 (Thermal Cycle)』, 甚或『熱破裂 (Thermal Fatigue)』, 是相當必要的。此問題可藉由低烘烤溫度, 以減低熱破壞的機率。

由於大部分的熱阻抗是來自於二極體中的微細金屬, 容積的熱能能以 $q = \frac{d}{K_b A}$ 表

示, q 為熱能量, d 為冷卻劑和熱源的距離, K_b 為微細金屬的傳導係數, A 為傳導熱的總面積。而邊界的熱能方程式表示為

$$q = \frac{d}{k_c a A},$$

為冷卻劑邊界的厚度, k_c 為冷卻劑的熱傳導係數, a 為多摺因素近似於 H/W , 其中 H 為鰭狀高度, W 為通道寬度, A 為裝置的面積。最後為冷卻劑中產生

的熱電容 $q = \frac{1}{r_c f A}$, r_c 為熱電容大小 , f

為冷卻劑的流速 , 流速 $f = PD^3 a / 8\Phi mL^2$, 其中 , P 為壓力 , D 為水壓的通道直徑 , 為標準衝突因素通常為 19 23 , μ 為冷卻劑的黏度 , L 為通道的長度。

(四)、模型驗證測量 :

為驗證本計畫理論模擬的正確性 , 與業界已知之相關測量實驗數據進行比較驗證。我們把封膠部份以『化學蝕刻法』[7]蝕一小洞 , 藉紅外線偵測器直接度量表面溫度。同時 , 本研究發線在不同晶面溫度的情況下 , 雷射模組的輸出功率與光電特性將隨溫度而變。另外 , 在封裝體的正下方置放溫度熱偶計 (Thermocouple) 以得外殼溫度 , 因為晶片為於該位置正上方 , 通常該位置是封裝體殼的最熱點 , 也是溫度變化最大之處。該處的測量溫度作為重要設計參數。其中 , 本計畫中高功率半導體雷射元件主要由業界提供支援 , 相關部份參數是由業界實驗數據中萃取而出。作為前述高功率雷射二極體陣列驅動電路的設計依據。

本研究探討了雷射二極體陣列驅動電路的設計以及相關熱效應。本研究承蒙國科會支持 (NSC 90-2215-E-034-002) , 使計畫得以順利完成 , 特此誌謝。

四、計畫成果自評

(一)、完成的成果及創見

本計畫之部份研究成果目前正在整理投稿中。其重點與創見在於高功率半導體雷射元件的模擬與驅動電路的設計。

(二)、內容與原計畫相符程度 : 相符

(三)、是否有未完成之項目 : 否

(四)、是否具有專利申請項目 : 尚未成熟

(五)、是否有創新或改進之技術推介至產業界 , 並請列出可推介之業界廠商 : 尚需繼續研究

(六)、是否適合在學術期刊發表 : 是

(七)、本計畫有無經費補助赴國外或大陸從事研究或出席國際學術會議 : 無

(八)、本計畫達成預期目標情況 :

本計畫已完成之工作項目與具體成果 :

本計畫以一年時間進行『高功率雷射二極體陣列封裝』的模擬 , 包括熱傳導的分析計算與驅動電路的設計 , 作為封裝設計準則。其預期完成之工作項目與具體成果如下 :

A、學術研究及實際應用方面 :

(一) 建立雷射二極體陣列封裝熱模型。

(二) 建立高功率晶片封裝熱傳模型。

(三) 建立封裝模組熱流理論及結果驗證。

(四) 闡明各熱阻係數與散熱特性的影響。

(五) 建立封裝技術模擬程式以及製作準則。

(六) 建立驅動電路之設計。

B、參與研究人員之訓練與獲益方面 :

(一) 參與研究之人員接受封裝製程之訓練。

(二) 培養參與研究人員於熱流分析技術。

(三) 培養研究人員數值模擬分析理論探討。

(四) 培養人員於設計穩壓穩流電路方面。

(五) 讓研究人員獲得模組參數分析經驗。

(六) 使研究人員熟悉電腦模擬程式之撰寫。

本計畫結果可作為雷射二極體陣列封裝技術的基礎。可對封裝產業有所助益。

五、參考文獻

1. J. E. Bowers, B. R. Hemenway, A. H. Gnauck, and D. P. Wilt, High-Speed InGaAsP Constricted-Mesa Lasers, *J. Quant. Electron.*, QE-22, p. 833, 1986.
2. Y. Arakawa and H. Skaki, Multidimensional Quantum Well Laser & Temperature Dependence of Its Threshold Current, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, p. 939, 1982
3. B. M. Guenin, R. C. Marrs, and R. J. Molnar, Analysis of a Thermally Enhanced Ball Grid Array Package, *IEEE Tran. On Comp. Packaging and Manufact. Tech. - Part A*, vol. 18, no. 4, 1995.
4. T. Kobayashi and G. Iwane, Three Dimensional Thermal Problems of Double-Hetero-structure Semiconductor Lasers, *Japan. J. Appl. Phys.*, vol. 16, pp. 1403-1408, 1977.
5. C. Mitchell and H. M. Berg, Thermal Studies of Plastic Dual-in-Line Package, *IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technol.*, vol. CHMT-2, no. 4, pp. 500-511, 1979.
6. K. E. Manchester and D. W. Bird, Thermal Resistance: A Reliability Consideration, *IEEE Trans. Component, Hybrids, and Manufacturing Technol.*, vol. CHMT-3, no. 4, pp. 580-587, 1980.
7. C. A. Lidback, Scanning I. R. Microscopy Techniques for Semiconductor Thermal Analysis, *Proc. 17th Ann. Conf. Reliability Physics*, pp. 183-189, 1979.
8. W. H. Schroen and J. L. Spencer Reliability Test and Stress in Plastic IC, *Proc. 19th Ann. Conf. Reliability Physics*, pp. 81-87, 1981.
9. S. P. Zarlingo and R. J. Scott, Lead Frame Materials for Packaging Semiconductors, *1st Ann. Int. Packaging Soc. Conf.*, 1981.