

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

71-76 GHz 無線模組及電路技術--子計畫四:E-頻段功率放大器之研製(1/2)
期中進度報告(完整版)

計畫類別：整合型
計畫編號：NSC 96-2219-E-002-019-
執行期間：96年08月01日至97年07月31日
執行單位：國立臺灣大學電信工程學研究所

計畫主持人：林坤佑

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 97年05月22日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

71-76 GHz 無線模組及電路技術—子計畫四：

E-頻段功率放大器之研製(1/2)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 96-2219-E-002-019

執行期間：2007年8月1日至2008年7月31日

計畫主持人：林坤佑

共同主持人：

計畫參與人員：謝繼開，黃智宇，鄭伊佐，呂彥儒，高堃堯

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學電信工程學研究所

中華民國 97 年 5 月 22 日

71-76 GHz 無線模組及電路技術—子計畫四:

E-頻段功率放大器之研製(1/2)

Research and Development of E-band Power Amplifiers

計畫編號: NSC 96-2219-E-002-019

執行期限: 96 年 8 月 1 日至 97 年 7 月 31 日

主持人: 林坤佑 國立台灣大學電信工程學研究所助理教授

E-mail : kunyou@ntu.edu.tw

計畫參與人員: 謝繼開, 黃智宇, 鄭伊佐, 呂彥儒, 高堃堯

一、中文摘要 (關鍵詞: E 頻段, 功率放大器, 單晶毫米波積體電路)

本研究計畫將開發 E 頻段功率放大器, 主要操作頻率為 71 至 76 GHz。本計畫將使用的單晶毫米波積體電路(MMIC)技術來設計此功率放大器。採用的積體電路製程技術包括砷化鎵假形高電子移動率電晶體(GaAs pHEMT)與互補式金氧半導體(CMOS)等製程技術。功率放大器為無線收發機中一重要之元件, 主要功用為將欲發射之信號放大至高功率, 進而提高信號傳播距離。在毫米波頻段, 由於高頻損耗的原因, 功率放大器不易設計, 因此設計毫米波功率放大器是一個重要的研究課題。

在此二年計畫中, 將包含元件模型、電路設計與佈局、晶片製作與量測評估。第一年, 我們將進行功率放大器之設計與電路佈局, 並且設計相關所需的測試電路, 包括單一電晶體與並聯電晶體之測試電路。在第二年, 我們將進行功率放大器與測試電路之量測評估。藉由量測結果, 建立元件模型並利用新建立之元件模型重新設計功率放大器。

在第一年的計畫中, 我們已經完成使用系統晶片中心所提供之 0.15 微米高電子移動率電晶體(pHEMT)製程設計操作於 71~76 GHz 之功率放大器, 並已送至代工廠製作。

Abstract (Keywords: E band, power amplifier, MMIC)

This project proposes the research and

development E-band power amplifiers with an operating frequency of 71 to 76 GHz using GaAs pHEMT and CMOS monolithic millimeter-wave integrated circuit (MMIC) technologies. Power amplifier is an important component in a wireless transceiver to amplify the transmitting signal to higher power level and obtain longer transmitting distance. In millimeter-wave frequencies, it is difficult to design a power amplifier due to the high-frequency loss. Therefore, to design a millimeter-wave power amplifier is an important research topic.

In this three-year project, device modeling, circuit design and layout, chip fabrication, measurement and evaluation will be exercised. In the first year, the power amplifier design and chip layout will be completed and the related test circuits including the single transistor and combining transistor will also be designed. In the second year, the circuit measurement and evaluation will be performed. According the measurement results, the device model will be built and we will re-design the power amplifier using the new model.

In the first year, the 71 ~ 76 GHz power amplifier was designed by using 0.15- μ m pHEMT provided by CIC. These two circuits have been taped out to the foundries

for fabrication.

二、計畫緣由與目的

近年來無線通訊的高度發展，目前已經有許多無線通訊的產品應用於微波與毫米波的頻帶。例如全球衛星定位系統(GPS)、行動電話、無線區域網路(WLAN)、無線個人區域網路(WPAN)、無線電識別系統(RFID)、微波遙測(remote sensing)、衛星通訊、汽車防撞系統等。各種應用的快速發展發展使得頻帶的需求也日益殷切，也因此促使通訊系統向更高的頻段發展。現代的數位產品強調個人化及移動性，諸如智慧型手機、MP3 隨身碟、數位相機與可攜式電腦都是高度整合的數位產品。隨著各類型的行動式無線通訊的普及，對於硬體的需求也更朝向輕薄短小的目標發展。為了達到系統輕薄短小的要求，並且降低硬體製造成本，提高電路的可靠度，使用單晶毫米波積體電路(MMIC)的方式來實現是較佳的選擇[1]-[3]。

在無線通訊系統中，功率放大器(power amplifier)是中非常重要的元件。在無線收發機中，訊號經由天線發射出去之前，必須要經過此功率放大器來提高發射訊號的功率，如此才能使訊號傳送的夠遠。因此我們為了能增加通信傳輸的距離，就必須設法增加發射器(transmitter)中功率放大器的輸出功率(output power)。然而在毫米波頻段，功率放大器並不容易達到，因為在毫米波的頻段，增加輸出功率的代價與花費是相當高的。毫米波的功率放大器與其他收發機元件相較起來，其設計的難度較高。因此，毫米波之功率放大器之設計與研究仍是一相當重要的課題。

目前文獻上操作頻率高於 70 GHz 之單晶功率放大器大多數是應用於 77 GHz 汽車防撞雷達系統[4]-[7]，所需要頻寬約為 1 GHz，為較窄頻之設計，所採用的積體電路製程技術為 0.1 或 0.15 微米砷化鎵假型高電子移動率電晶體(GaAs pHEMT)，砷化鎵基板厚度為 80 或 100 微米。而寬頻的毫米波

功率放大器則僅有較少文獻提及[8]-[9]，其製程技術則是採用 0.1 微米砷化鎵假型高電子移動率電晶體，而砷化鎵基板厚度則為 50 微米。使用較薄的基板(50 微米)可使功率放大器在設計阻抗匹配網路時所需要的低阻抗傳輸線佔用面積較小，並且所設計之功率放大器之散熱效果較佳，提供了較多設計上的彈性。此外，近年來由於矽基(Si-based)單晶積體電路技術的進步，如互補式金氧半導體(CMOS)、矽鍺雙極性互補式金氧半導體(SiGe BiCMOS)，使用矽基單晶積體電路技術所設計之微波及毫米波電路已有許多成果[10]-[20]。在 70 GHz 以上的操作頻率，目前關於矽基單晶功率放大器的文獻為使用 0.12 微米矽鍺雙極性互補式金氧半導體製程技術[18]-[19]，而使用 90 奈米互補式金氧半導體製程技術所設計之毫米波功率放大器之操作頻率為 60 GHz [20]。在製程技術資源有限的情況下，我們將利用國家實驗研究院晶片系統設計中心(National Chip Implementation Center)所提供之積體電路製程，包括砷化鎵高電子移動率電晶體製程技術來開發操作於 71 至 76 GHz 之功率放大器。

三、研究方法與結果

A. 設計目標與製程選擇

總計畫在整體考量後，對於此一功率放大器訂立之設計目標如表一。由於所要求之增益為 25 dB，在 E 頻段使用單一晶片將難以實現，因此我們將先以輸出功率為主要目標，再另行設計緩衝放大器以補足總計畫所要求之增益。

由於電路的操作頻率很高，除了主動元件本身需要有足夠的增益與功率輸出之外，電路設計時所需要的被動元件在高頻的損耗，對電路的特性亦有極大的影響。因此我們選擇使用晶片系統設計中心所提供之 0.15 微米高電子移動率電晶體製程來設計此一放大器。

B. 0.15 微米高電子移動率電晶體

根據先前使用此一製程在 77 GHz 設計功率放大器的小訊號量測結果發現，由製程廠所提供的電晶體模型在這麼高的頻率並不够準確，因此我們在設計時是採用我們自行開發之小訊號模型來做阻抗匹配的設計。在功率的預測上，也僅能從現有的量測結果作初步的估計。

首先針對所需要達到的輸出功率，選擇適當的輸出級的電晶體尺寸。在輸出級的電晶體，我們是選擇並聯四顆 4 fingers, 100 μm 的電晶體，總閘極寬度為 400 μm ，預期可以得到的輸出功率為 15 dBm。由於電晶體在此頻段的最大增益大約僅有 6 至 7 dB，為了能使前級放大器有足夠的驅動能力，前級放大器的電晶體我們使選擇並聯兩顆 4 fingers, 100 μm 的電晶體。圖一(a)與(b)分別為此一兩級放大器之第一級與第二級放大器之電路圖。由於電晶體直接做並聯的設計會將輸入與輸出阻抗變成非常的低，所以採用預先匹配的動作 (Pre-matching) 先讓每一個電晶體阻抗先轉到較高的阻抗再將其並聯。經過適當的匹配電路將兩級放大器整合起來。此外由於採用電晶體並聯的方式可能會產生奇模振盪 (odd-mode oscillation)，因此在此放大器的設計上，我們亦在電晶體並聯結構上加入了抑制奇模振盪的電阻。

圖二為小訊號的模擬結果，由圖可知在 71 ~ 76 GHz 的增益約在 9 ~ 10 dB 左右。輸入輸出反射損耗有在 5 ~ 8 dB。由於在此頻段目前沒有足夠準確的大訊號模型，因此無法對最大輸出功率做模擬之預測。根據先前使用相同製程在相近頻率的量測結果，最大輸出功率可達 15 dBm 以上。圖三為此放大器之電路佈局圖，晶片尺寸為 3 x 1 mm²。此放大器的設計已經完成，並已透過系統晶片中心下線至半導體代工廠製作中。

接下來的工作為設計驅動放大器以提供整個功率放大器鍊路足夠之增益，滿足總

計畫系統之要求。且於晶片製作完成後，進行量測與新版電路之設計工作。

除了使用系統晶片中心所提供之砷化鎵高電子移動率電晶體製程，我們亦嘗試使用先進之 90 奈米互補式金氧半導體製程來設計此功率放大器。目前設計工作已在進行中，預計可以達到 15 dB 之增益與 10 dBm 之輸出功率。

四、研究成果

本計畫執行期間(96/8/1 至今)所發表論文如下。

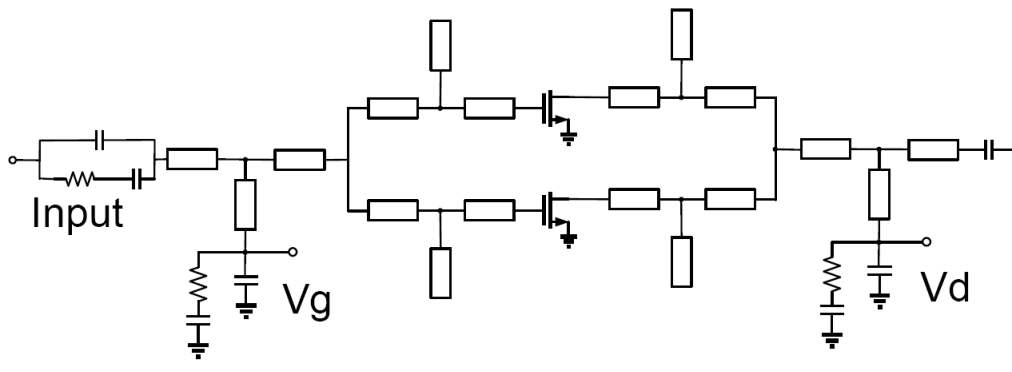
- (a) Zuo-Min Tsai, Yu-Sian Jiang, Jeffrey Lee, Kun-You Lin, and Huei Wang, "Analysis and design of bandpass single-pole-double-throw FET filter-integrated switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 55, pp. 1601-1610, Aug. 2007.
- (b) Shih-Fong Chao, Che-Chung Kuo, Zuo-Min Tsai, Kun-You Lin, and Huei Wang, "40-GHz MMIC SPDT and multiple-port bandpass filter-integrated switches," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 55, pp. 2691-2699, Dec. 2007.
- (c) Ming-Fong Lei, Zuo-Min Tsai, Kun-You Lin, and Huei Wang, "Design and analysis of stacked power amplifier in series-input and series-output configuration," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 55, pp. 2802-2812, Dec. 2007.
- (d) Chi-Hsueh Wang, Zuo-Min Tsai, Kun-You Lin, and Huei Wang, "A 60-GHz single-chip transceiver for WPAN applications," *2008 Global Symposium on Millimeter-Wave (GSMM2008)*, Nanjing, PRC, April 2008.
- (e) Jeng-Han Tsai, To-Po Wang, Kun-You Lin, Tian-Wei Huang, Yi-Cheng Lin, Hsin-Chia Lu, and Huei Wang, "40-48 GHz sub-harmonic transceiver for high data-rate communication system applications," *2008 Global Symposium on Millimeter-Wave (GSMM2008)*, Nanjing, PRC, April 2008.

五、參考文獻

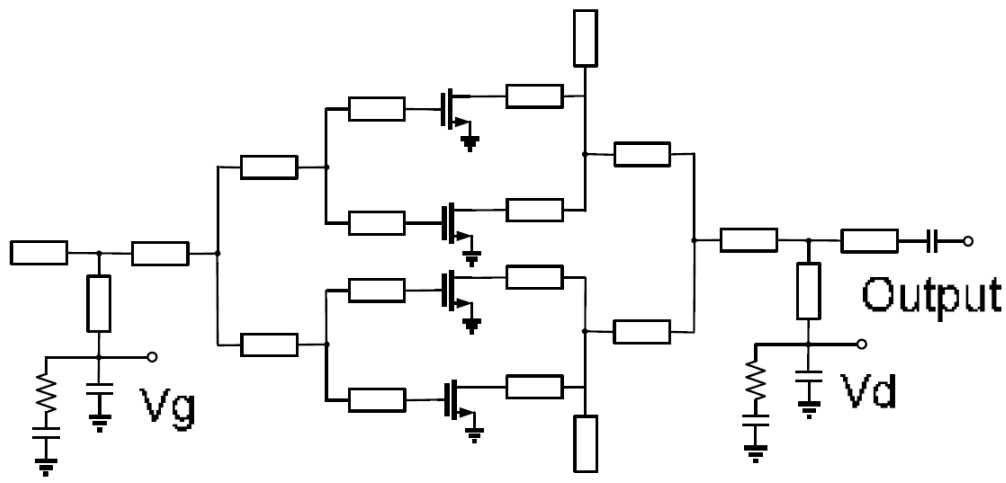
- [1] R. A. Pucel (ed.), *Monolithic microwave integrated circuits*, IEEE Press, New York, 1985.
- [2] L. C. T. Liu, C. S. Liu, J. R. Kessler, S. K. Wang, and C. D. Chang, "A 30 GHz monolithic receiver," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.34, pp. 1548-1552, Dec. 1986.
- [3] T. Ohira, T. Tkumitsu, T. Hiraoka, Y. Kihata, K. Araki, and H. Kato, "Development of key monolithic circuits to Ka-band full MMIC receivers," *IEEE Microwave and Millimeter-wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, pp. 69-74, June 1987.
- [4] H. Kondoh, K. Sekine, S. Takatani, K. Takano, H. Kuroda, and R. Dabkowski, "77 GHz fully-MMIC automotive forward-looking radar," *1999 IEEE GaAs IC Symposium*, pp. 211-214, 1999.
- [5] A. Tessmann, L. Verweyen, M. Neumann, H. Massler, W. H. Haydl, A. Hulsmann, and M. Schlechtweg, "A 77 GHz GaAs pHEMT transceiver MMIC for automotive sensor applications," *1999 IEEE GaAs IC Symposium*, pp. 207-210, 1999.
- [6] K. Kamozaiki, N. Kurita, W. Hioe, T. Tanimoto, H. Ohta, T. Nakamura, and H. Kondoh, "A 77GHz T/R MMIC chip set for automotive radar systems," *1997 -IEEE GaAs IC Symposium*, pp. 275-278, 1997.
- [7] H. Y. Chang, H. Wang, M. Yu, and Y. Shu, "A 77-GHz MMIC power amplifier for automotive radar applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 13, pp. 143-145, April 2003.
- [8] H. Wang, L. Samoska, T. Gaier, A. Peralta, H. H. Liao, Y. C. Leong, S. Weinreb, Y. C. Chen, M. Nishimoto, and R. Lai, "Power-amplifier modules covering 70-113 GHz using MMICs," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, pp. 9-16, Jan. 2001.
- [9] M. Morgan, and S. Weinreb, "A W-band monolithic medium power amplifier," *2003 IEEE MTT-S Dig.*, pp. 133-136, 2003.
- [10] X. Guan, and A. Hajimiri, "A 24-GHz CMOS front end," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, no. 2, pp. 368-373, Feb. 2004.
- [11] K.-W. Yu, Y.-L. Lu, D.-C. Chang, V. Liang, and M. F. Chang, "K-Band low-noise amplifiers using 0.18 μm CMOS technology," *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 106-108, March 2004.
- [12] A. Masud, H. Zirath, M. Ferndahl, and H.-O. Vikes, "90 nm CMOS MMIC amplifier," *2004 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium Digest*, 2004, pp. 971-974.
- [13] H. Shigematsu, M. Sato, T. Hirose, F. Brewer, and M. Rodwell, "40Gb/s CMOS distributed amplifier for fiberoptic communication systems," *2004 International Solid-State Circuit Conference (ISSCC)*, pp. 476-477, Feb. 2004.
- [14] H. Shigematsu, T. Hirose, F. Brewer, and M. Rodwell, "CMOS circuit design for millimeter-wave applications," *2004 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium Digest*, 2004, pp. 123-126.
- [15] C. H. Doan, S. Emami, A. M. Niknejad, and R. W. Brodersen, "Design of CMOS for 60GHz applications," *2004 International Solid-State Circuit Conference (ISSCC)*, pp. 440-441, Feb. 2004.
- [16] J. H. Tsai, W. C. Chen, T. P. Wang, T. W. Huang, and H. Wang, "A miniature Q-band low noise amplifier using 0.13- μm CMOS technology," *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, vol. 16, no. 6, pp. 327-329, June 2006.
- [17] H. Y. Chang, P. S. Wu, T. W. Huang, H. Wang, C. L. Chang, and J.G.J. Chern, "Design and analysis of CMOS broad-band compact high-linearity modulators for gigabit microwave/millimeter-wave applications," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 54, pp. 20-30, Jan. 2006.
- [18] U. R. Pfeiffer, S. K. Reynolds, and B. A. Floyd, "A 77 GHz SiGe power amplifier for potential applications in automotive radar systems," *2004 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium Digest*, pp. 91-94, June 2004.
- [19] A. Komijani, and A. Hajimiri, "A wideband 77-GHz, 17.5-dBm fully integrated power amplifier in silicon," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 8, pp. 1749-1756, Aug. 2006.
- [20] T. Yao, M. Gordon, K. Yau, M. T. Yang, and S. P. Voinigescu, "60-GHz PA and LNA in 90-nm RF-CMOS," *2006 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium Digest*, June 2006.

表一、功率放大器之規格表。

元件	參數	設計目標
PA	Frequency	71-76GHz
	Gain	> 25 dB
	P1dB	> 10dBm
	Return Loss	<-10dB

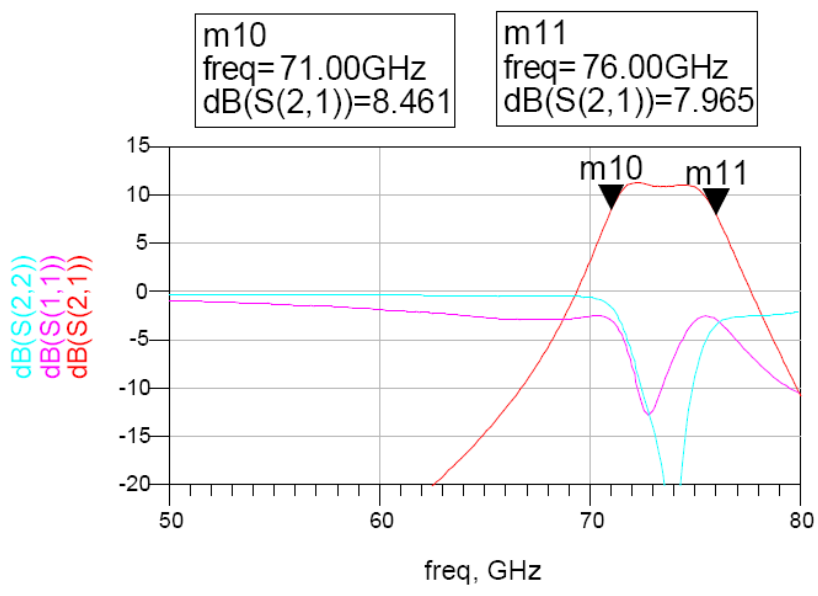


(a)

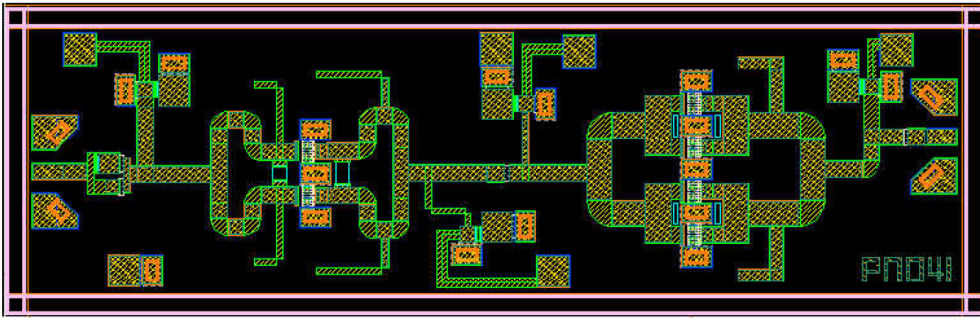


(b)

圖一、71~76 功率放大器之(a)第一級，與(b)第二級電路圖。



圖二、71~76 功率放大器之小訊號模擬結果。



圖三、71~76 功率放大器之電路佈局圖。