

## 射頻、微波及毫米波積體電路 (RFIC and MMIC)

半導體製程的進展快速，目前已有0.18  $\mu\text{m}$ /90 nm 甚至65 nm/40 nm 的RF CMOS製程被開發出來，使得RFIC的設計可以滿足更高頻率、更高整合度的需求。RFIC的發展趨勢之一指向更高頻寬及頻段的應用，如下世代的無線網路(WLAN)通信標準IEEE 802.11ac的5-GHz多頻道系統或是更高頻率IEEE 802.11ad的60-GHz寬頻系統。另一發展趨勢是在現有的系統之下進行整合，包括單一頻帶的子電路整合，如WLAN系統收發機(Transceiver)與功率放大器(PA)、收發切換開關(T/R switch)等的整合；單一系統的多頻帶整合，如IEEE 802.11a/b/g/n/ac/ad 2.4/5/60-GHz多頻帶WLAN的收發機整合，或是24/77-GHz中距離與長距離汽車雷達多通道收發機整合；不同系統的整合，如WLAN與手機GSM/WCDMA/LTE的多模整合等。相關研究議題如下：

### 1. 綠能低功耗多標準(Multi-standard)多頻帶(Multi-band)收發機

未來在綠能與多標準系統(如802.11a/b/g/n/ac/ad 2.4/5/60-GHz)的設計需求中，低功耗設計將是未來系統的主要挑戰，對於筆記型電腦或平板電腦而言，多模通信模組的直流耗電在3W以下將是基本需求，其中射頻部份的功率消耗更將降至1W或0.5W以下，但是對於智慧型手機而言，多模通信模組在0.5W以下將是未來的趨勢，這使得射頻部份的功率消耗將降至0.1W或更低。這些低功耗的系統需求將使得射頻電路需要有架構創新或是被動元件與主動混合架構以達成更省電的射頻系統。

### 2. 高線性度多頻道(Multi-channel)收發機

在有限的無線頻譜(Wireless Spectrum)資源中，提昇無線傳輸速率超過十億位元(Gigabit)傳輸速率將是未來發展的必然趨勢，目前多天線系統(Multi-Input Multi-Output, MIMO)已是非常成熟的技術，但未來的感知無線電(Cognitive Radio)將會結合不同頻帶，使用其中多個可用的頻道(Frequency-Channel)同時進行多頻道(Multi-channel)的資料傳輸，特別是5GHz以下的各種有限頻寬(Bandwidth)的無線通信標準(如手機或2.4/5GHz無線網路)，在經過不同頻帶(Frequency-band)中之多頻道(Frequency-Channel)結合後才能形成真正的寬頻通信，以提昇無線傳輸速率超過Gbps (Gigabits per second)，但在多頻道(Multi-channel)與Gbps的高速要求中，收發機的線性度要求將較以前的單一頻道通信更為提高，而且需要在多頻道(Multi-channel)與Gbps的高速信號實作測量中以確認收發機各元件的線性度滿足其要求。

### 3. 功率放大器的自動偏壓控制

由於WLAN功率放大器大多操作在非飽和區，所以在功率控制上均直接採功率調降(power backoff)的方式，偏壓電流不變，而功率增加效率(PAE)極差。自動

偏壓控制可隨著輸出功率調整偏壓電流，以提升效率。

#### 4. 高線性度、低插入損耗的收發切換開關

目前以CMOS/SiGe BiCMOS 所設計的WLAN收發機(transceiver)中，缺乏高線性度、低插入損耗的收發切換開關，如何整合T/R切換器是一個重要的題目。

#### 5. 低電壓操作電路

CMOS製程已經進展到40 nm製程，其操作電壓可能降至低於1 V，傳統的cascode LNA或是雙平衡式混波器(double-balanced mixer)等電路均無法正常操作，必須改良電路架構以在低電壓操作。如在VCO上使用變壓器(Transformer)取代電感，即可使操作電壓下降。低電壓的操作會限制輸出訊號的振幅，進而降低訊號訊雜比，使相位雜訊惡化。使用變壓器當作正回授的路徑，可以使振幅大於操作電壓。

#### 6. 高頻被動元件之設計及等效模型的建立

隨著操作頻率的提高，每一個高頻元件、每一段佈線的雜散效應均要考慮。被動元件的設計，以晶片中的電感為例，佔據了很大的面積，如何設計以提高Q值或使用更小的面積，都是很大的挑戰。例如平面或堆疊對稱型電感，即可在差動操作下，得到更高的Q值。目前已有論文以上述的模型做為基礎，提出一個能適用在30~100 GHz的電感模型，並使用這個模型於混頻器及壓控震盪器等電路。

#### 7. 高效能的射頻靜電防護

隨著製程的演進，電晶體的結構益形薄弱，對於靜電防護必需更加用心，特別是先進的CMOS製程，其奈米尺寸的電晶體閘極(Gate)極為脆弱，非常容易被靜電打穿，需要針到閘極偏壓(Gate Bias)進行數位控制的間接電壓控制，不適合使用直接偏壓控制，在RFIC/MMIC的設計上加入靜電防護電路後，電路效能也會受到影響，需要有兼顧射頻性能與靜電防護雙重考量的電路設計。

#### 8. 寬頻化的電路設計

將電路的頻率響應、阻抗匹配、雜訊與功率輸出等規格寬頻化，所需的許多技巧與熟知的窄頻通訊大為不同，必須詳細考慮及設計。完成一個寬頻化的電路主要朝兩方面進行：第一，在寬頻電路的輸入端必須使用寬頻匹配網路(被動集總LC元件及主動電路元件所組成)或回授，使電路輸入阻抗與電源端的阻抗達到共軛匹配(conjugate matching)。第二，設計核心電路的組態，使得寬頻電路的頻寬不受電路中極點的影響而限制頻寬。由於透過RC電路來達到極寬頻的效果十分有限，故必須尋求其它的技巧來擴展頻寬。可以引入擴展頻寬的零點：於共源(射)極放大電路的源(射)極加入電阻與電容並聯電路，或於汲(集)極加入電阻與電

感串聯電路，使得由電阻與電感所形成的零點，能緩和由電阻與後級電路的輸入電容形成的極點所造成的增益下降，亦可產生等效的負電容來抵消寄生電容，進而抵消其所引起的額外極點。在降低MOS輸入電容而不影響其轉導(gm)的情形下，MOS的電流截止頻率 $f_T$ 得以增加，使得其操作頻寬隨之增加。輸入端及輸出端亦可分別加入匹配網路(Bandpass ladder filter)及源極追隨器(source follower)來達到輸入及輸出匹配。

## 9. 毫米波射頻收發機元組件設計

由於57~64 GHz 頻帶之電磁波易被氧氣吸收，因此美國與日本皆將此頻帶規劃為不需使用執照的頻帶。此頻帶具有7 GHz 的頻寬，可以提供7 Gbps以上的資料傳輸速率。60-GHz的無線區域網路IEEE 802.11ad將加速高畫質影音與3D影片的傳輸、及無線寬頻數位化生活的來臨。另外在汽車雷達發展方面，因為毫米波CMOS晶片的低價量產與毫米波系統封裝(System-in-Package, SiP)的技術成熟，各國政府未來將汽車雷達納入標準配備以增進汽車預警功能與安全性，24-GHz中短程雷達已有廉價成熟的產品，但77-GHz的長程雷達仍是目前的熱門研究題目。

## 10. CMOS/SiGe/SOI功率放大器設計

目前的GaAs HBT因價格與性能的優勢仍是手機功率放大器的主流，但在低價位手機市場中單晶片CMOS功率放大器已漸漸切入，在高性能的手機市場中SiGe/SOI比GaAs HBT更有低價格競爭的優勢，未來等製程成熟與電晶體模式更完備後，SiGe/SOI可加入手機功率放大器的競爭行列；另外，延伸CMOS製程所涵蓋的RFIC範圍，CMOS PA的研究仍有空間。尤其在毫米波頻段高效率的放大器，仍為研發的瓶頸。

## 11. 氮化鎵(GaN)功率放大器設計

氮化鎵(GaN)元件提供各種製程中最大的功率密度(Power density)，也是提供最好的射頻功率轉換效率，目前GaN多以電晶體封裝供應，但是未來將普遍成為RFIC/MMIC，這是下一代的功率電晶體，也是提供電力轉換最佳效率的功率元件。

## 12. 三維積體電路(3D IC)

三維積體電路製程藉由主動元件層的堆疊技術，以及層與層之間的三維互連線(3D interconnects)技術，不僅具有減少金屬導線長度、電阻及傳播延遲的優點，而且能增加互連線的密度與資料傳輸率，此外也可用來整合異質晶片製程，使得系統晶片能有更佳的操作性能與功能整合，並能更節省晶片面積與耗電量，被認為是下世代半導體的重要發展技術。雖然具有明顯的潛在優勢，三維積體電路在製程及設計上仍有許多技術障礙有待克服，其中在三維互連(interconnects)的電性

設計上，尤其是垂直方向的互連，有很大的研究空間值得去探討。

### **13. IPD CMOS / LTCC Flip-Chip CMOS**

因為CMOS的元件損耗較大Q值較低，Integrated Passive Device (IPD) CMOS製程已開發成熟，適合用來實現高Q值低損耗的濾波器，尤其在較高的微波或毫米波頻段，可用在系統封裝SiP的接收器中。另外，也可使用LTCC來實現毫米波高Q值的元件，再利用覆晶轉接(Flip-chip)來與CMOS整合成為系統封裝SiP。

### **14. 數位輔助射頻技術(Digitally Assisted Radio Processing)**

隨著半導體製程邁向先進奈米製程，數位訊號處理速度加快而使得數位輔助射頻處理技術的發展愈有潛力，可以用來大幅簡化射頻積體電路之類比架構，使能跟隨著新世代半導體製程的演進，讓射頻電路積體化程度不斷提升並使所佔晶片面積能夠持續縮小；另一方面，射頻電路也可以幫助數位Gigabit電路簡化降低功率。同時，有了數位訊號處理的幫助，也能有助於突破現有類比式射頻積體電路性能上的瓶頸，讓效率與動態範圍可以兼顧，也能發展軟體控制硬體架構，使射頻積體電路更適合操作於多模通訊系統。