

A 28GHz Class-AB Power Amplifier Utilizing 120nm GaN Process

氮化鎵 120 奈米 28 GHz

Class-AB 功率放大器

專題領域：電子領域 組別：B457 指導教授：徐碩鴻 組員姓名：洪琛評

摘要

功率放大器是無線通訊系統中傳輸端的重要組成部分。顧名思義，功率放大器的核心功能是将訊號放大到足夠的強度，確保訊號能夠讓接收端接收到正確的訊息。因此，功率放大器的設計直接影響無線通訊的覆蓋範圍和通訊品質。

功率放大器首先接收無線通訊前端處理後的微弱信號，然後對這個信號進行增益到其可以遠距離傳輸的強度。放大後的訊號會被傳輸至天線，讓接收端能夠接收。在功率放大器的設計過程中，有兩點需要特別注意，首先，根據電磁波理論，必須進行阻抗匹配，以避免不必要的能量損耗；其次，由於不同頻率的電磁波可能會引起諧波效應，因此必須確保輸出的訊號不會出現失真。

氮化鎵具有頻帶寬、較高的崩潰電壓、增益和可靠性，能夠在 28GHz 頻段這類的高頻環境中維持穩定的性能表現。因此本次專題選用 120nm 的氮化鎵作為材料，期望達到更好的表現。

28GHz 是當前 5G 網絡中常用的一個頻段，但隨著頻率的提高，元件在高頻下的性能往往會受到更多影響，這會引發一系列問題。因此，在設計 5G 頻段的功率放大器時，需要更加嚴謹地考慮高頻效應，避免頻率過高所帶來的問題。本專題針對 28GHz 頻段設計了一款能夠達到小訊號增益 10dB、輸出功率 32dBm 和 PAE 37% 的功率放大器。

一、 研究背景與動機

隨著 5G 通訊技術的發展，通訊頻率正不斷上升。因此，傳統上以 CMOS 為主要材料的功率放大器，逐漸無法滿足更高頻率的需求。GaN HEMT 是目前許多研究學者專注的材料，它是一種以 GaN 為基材製作的 FET。這種電晶體具有多項優勢，包括頻帶寬、較高的崩潰電壓、增益和可靠性。此外，GaN HEMT 適合小型化，能有效降低面積，因此這種新興的電晶體常被應用於功率放大器中。

所以這次專題便是希望能夠透過 GaN HEMT 這種優質的材料，設計出表現更加優異的功率放大器，以滿足現今社會對於快速通訊的需求。

二、 研究目的

功率放大器設計時，主要考量的是線性度和效率。效率較高的功率放大器能夠以較小的直流功率產生相同或更高的功率輸出，這對於提升系統的能源利用率和延長設備壽命至關重要。然而，效率和線性度之間存在著明顯的 trade-off。在提升效率的同時，放大器的線性度通常會下降。這是因為在提高效率的運行模式下，放大器會工作在接近其非線性區域，這會導致信號失真和非線性產生。因此，如何在效率和線性度之間達到最佳平衡，成為功率放大器設計中的一項關鍵挑戰。

線性度不足會引發互調失真，這種失真會降低信號的清晰度，從而影響接收端的解調性能。當信號遭遇互調失真時，可能會使接收端無法準確解碼，進而降低整體系統的可靠性。此外，非線性還可能增加多用戶間的干擾，這對於現代無線通信系統，尤其是像 5G 這樣的高密度、低延遲系統，會帶來顯著的性能下降。

因此，本專題的目標是利用 Class AB 功率放大器的設計特性來平衡效率與線性度。Class AB 功率放大器是一種廣泛應用於通信系統中的放大器類型，它能在提供較高效率的同時，保持一定的線性度。相較於 Class-A 或 Class-B 放大器，Class-AB 放大器能在中等功率範圍內運行，達到更好的效率與線性度之間的平衡。這使得 Class-AB 放大器在許多現代通信系統中成為理想選擇，尤其是在需要高功率輸出且對線性度有較高要求的場合。

三、 研究方法

1. Stability circuit and bypass capacitor

由於高頻電磁波可能產生反射效應，這可能導致寄生振盪，因此任何元件都有可能對功率放大器的穩定性造成影響。而我們希望放大器在輸入信號消失後，其輸出信號不會繼續振盪或產生其他不受控的行為，因此需要 stability circuit 來幫助我們確保上述的行為不會發生。

最簡單的穩定電路是透過串聯電阻在電晶體的 Gate 端，這個電阻能起到分壓的效果，降低跨過電晶體的電壓，提升穩定度。

然而這個做法的缺點是會導致增益嚴重下降，為了解決這個問題，我們通常會在電阻旁邊加入並聯電容。電容的公式是 $Z = \frac{1}{j\omega c}$ ，在低頻時，電容的阻抗趨近於無限大，相當於斷路，對電路沒什麼影響；但在高頻時，電容的阻抗接近零，會使得電阻分壓的效應減弱，從而提升增益。如此能夠讓訊號在低頻或是高頻都有路可以選擇通過。

並聯電容電阻最後會透過模擬，得到一個能夠低頻穩定的電阻值 R_3 ，同時在操作頻段也不會降低過多增益的電容值 C_3 來使用。

接著會接上一個和 RC 並聯電路並聯的電阻 R_2 ，這個電阻除了能調控穩定度之外，還能作為 DC bias circuit 的一部分。Bias circuit 的設計主要包括兩個重要的 bypass capacitor：in-band bypass 和 out-band bypass。

- In-band bypass：電容會將 RF 訊號導向地面，確保其後的偏壓電路不會影響穩定性。
- Out-band bypass：電容有助於控制低頻穩定性，確保 DC 信號不會干擾射頻信號。

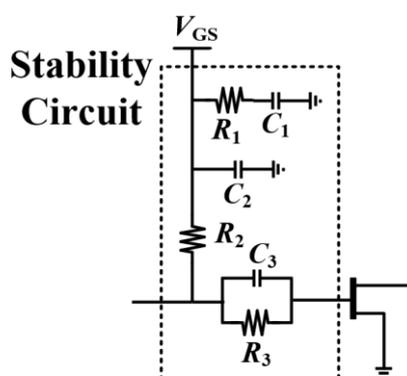


Fig. 1 stability circuit

2. Load-pull

在射頻和微波電路設計中，阻抗匹配是非常重要的概念，其主要目的是減少反射損耗，並最大化功率傳輸效率。

為了找出最佳的阻抗，通常會使用 load-pull 這個工具。Load-pull 測試是一種重要的射頻放大器性能分析技術，其原理是通過調整放大器輸出端的負載阻抗，並觀察輸出功率、效率、增益等性能參數的變化，從而找出最佳的負載阻抗點。

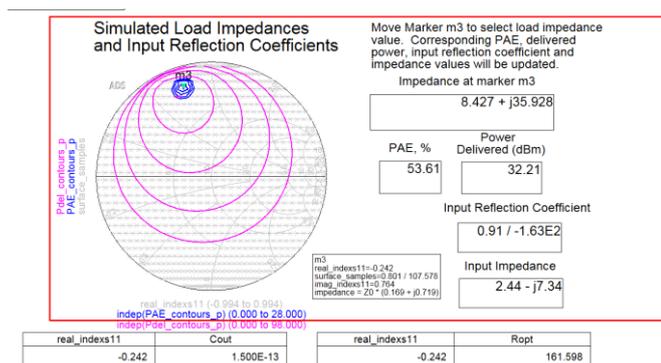


Fig. 2 load-pull simulation

3. Matching network

在前面已經通過 load-pull 測試找到最佳阻抗，接下來的步驟是將負載阻抗匹配剛剛找出的最佳值。在進行匹配時，通常會使用 Smith chart 作為運算工具，透過這個工具，我們可以輕鬆地實現阻抗匹配。

在匹配電路的設計中，有一個重要的注意事項是避免 DC 信號直接流入地面或是流入輸出端或輸入端。因此，在匹配電路的邊緣會放置一顆 series capacitor，其作用是 DC block，讓 DC 信號流入電晶體中。同時，因為這顆電容也是匹配電路的一部分，因此在使用 Smith chart 進行阻抗匹配時，也必須考慮這顆電容的影響。

這邊輸出端不使用電阻而是使用傳輸線來做阻抗匹配，主要是因為電阻會消耗能量，能量被消耗就會導致功率放大器的輸出功率降低，影響功率放大器的 performance。另外輸出端因為不像輸入端有 stability circuit 來提供 bias 路徑，所以通常輸出端至少需要一個 short stub 來提供 bias。

匹配電路可以使用電容、電感或傳輸線來實現，然而，相較於電容和電感，傳輸線的特性較為容易掌握，因此通常偏好使用傳輸線來設計匹配電路。

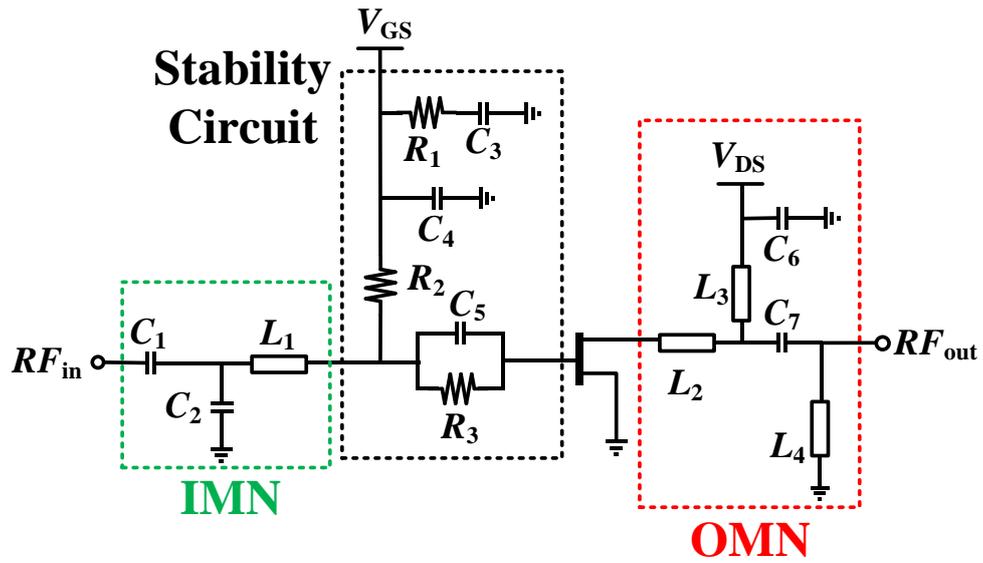


Fig. 3 stability circuit with input and output matching network

四、 研究結果

把上述的幾個架構全部結合之後，就可以透過知道放大器的 performance 在什麼程度。

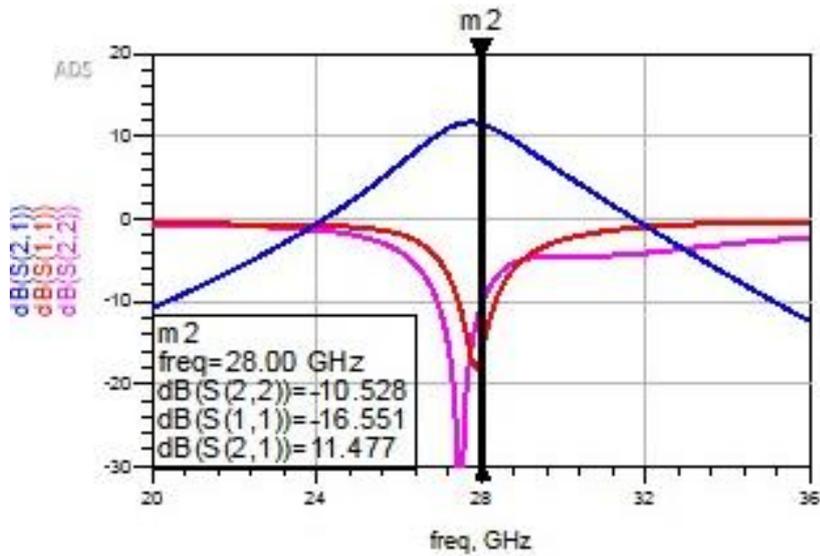


Fig. 4 S parameter simulation

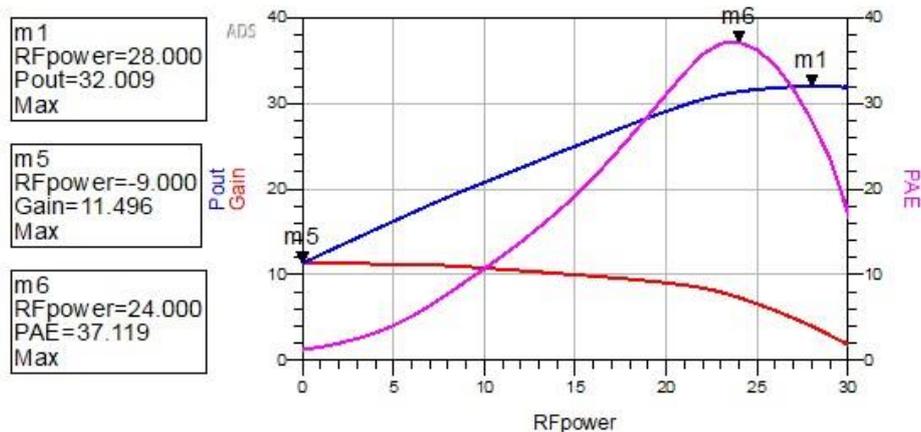


Fig. 4 large signal simulation

從模擬結果可以看出，在 28GHz 時，小信號增益達到了 10.53dB，而在大信號模擬中，輸出功率飽和於 32dBm，且 PAE 達到了 37.12%。最終結果使用 EM 模擬器進行模擬，驗證 layout 的影響，包括不同 Target、Fast 和 Slow 的模擬，以及 V_{DS} 的 $\pm 10\%$ 變化。此外，考慮到大信號熱效應及功率放大器的穩定性，該設計還包括不同溫度條件（如 25 $^{\circ}\text{C}$ 、75 $^{\circ}\text{C}$ 和 125 $^{\circ}\text{C}$ ）以及總體穩定性的模擬。

五、總結

這次的專題成功製造出能在 28GHz 達到穩定並擁有一定增益的 Class-AB 功率放大器，比較可惜的是因為一開始電晶體的尺寸沒有想好，為了更高的效能，導致最後完成的 layout 的尺寸偏大。

在整個專題中，layout 的部分是最需要花時間心力去 try-and-error 的，由於高頻電路只要傳輸線稍微改變就可能有很大的影響，加上製成的傳輸線又與理想的傳輸線相差甚大，因此常常試了好幾次還是找不到適當的長度，所幸在不斷地嘗試後，最終得以完成完整的 layout 和 full EM simulation 結果。

六、心得

這段時間的專題研究，不僅提升了我在功率放大器設計方面的理論知識與實作能力，也讓我對射頻電路設計有了更深刻的理解。從初期的設計與模擬，到最終的實物測試與調整。這其中的每個環節都需要細心與耐心，這讓我深刻體會到射頻電路設計的複雜性與挑戰性。通過與教授和學長姐的交流，我學到了如何在遇到設計瓶頸時，進行有效的問題分析與解決。

在研究過程中，我學會了如何運用 Load-Pull 技術來優化功率放大器的性能，特別是在輸出功率與效率之間找到平衡。接著，在實際操作中，我學會了如何應對高頻放大器設計中的穩定性問題，尤其是在高頻時寄生效應更為顯著。學長特別強調了穩定性分

析與設計的重要性，這對我的設計過程幫助極大。

在這兩學期的實作專題中，我衷心感謝徐碩鴻教授、尚鈺翔學長和胡采容學姊在功率放大器研究上的悉心指導。徐教授在專題初期幫助我確立了研究方向，並給予我寶貴的建議；實驗室的學長姐則在整個專題過程中提供了巨大的幫助，他們不僅指導我進行功率放大器的實作與測試，還帶領我深入理解相關理論知識與設計技巧。