



IC設計所

Institute of Integrated Circuit Design



基於堆疊電晶體及 gm/I_D 方法之 16 nm FinFET 兩級式運算放大器

學生：黃昱愷、王子毅

指導教授：李宗哲



摘要

本研究針對 FinFET 製程通道長度受限問題，結合 gm/I_D 查表法與堆疊電晶體。依 FoM 曲線選擇 8–15 的主要工作區及偏壓，權衡速度與電流效率，減少尺寸推算誤差。堆疊元件合成等效長通道以提升輸出阻抗與增益，搭配共心佈局降低系統性不匹配。300 次 Monte Carlo 模擬顯示，offset 標準差由 8.16 mV 降至 2.43 mV，降低約 70%，佈局後為 2.53 mV。電路採 TSMC 16 nm FinFET 製程，晶片及核心尺寸分別為 $549.216 \times 598.61 \mu\text{m}^2$ 與 $23.77 \times 33.874 \mu\text{m}^2$ 。在 0.8 V 電源與 5 pF 負載下，實測增益為 51.34 dB，推估 GBW 約 68.27 MHz，平均 SR 為 37.85 V/ μs 、ICMR 為 0.20–0.65 V、輸出擺幅為 0.555–702.78 mV，功耗為 846 μW 。

電路圖及晶片佈局圖

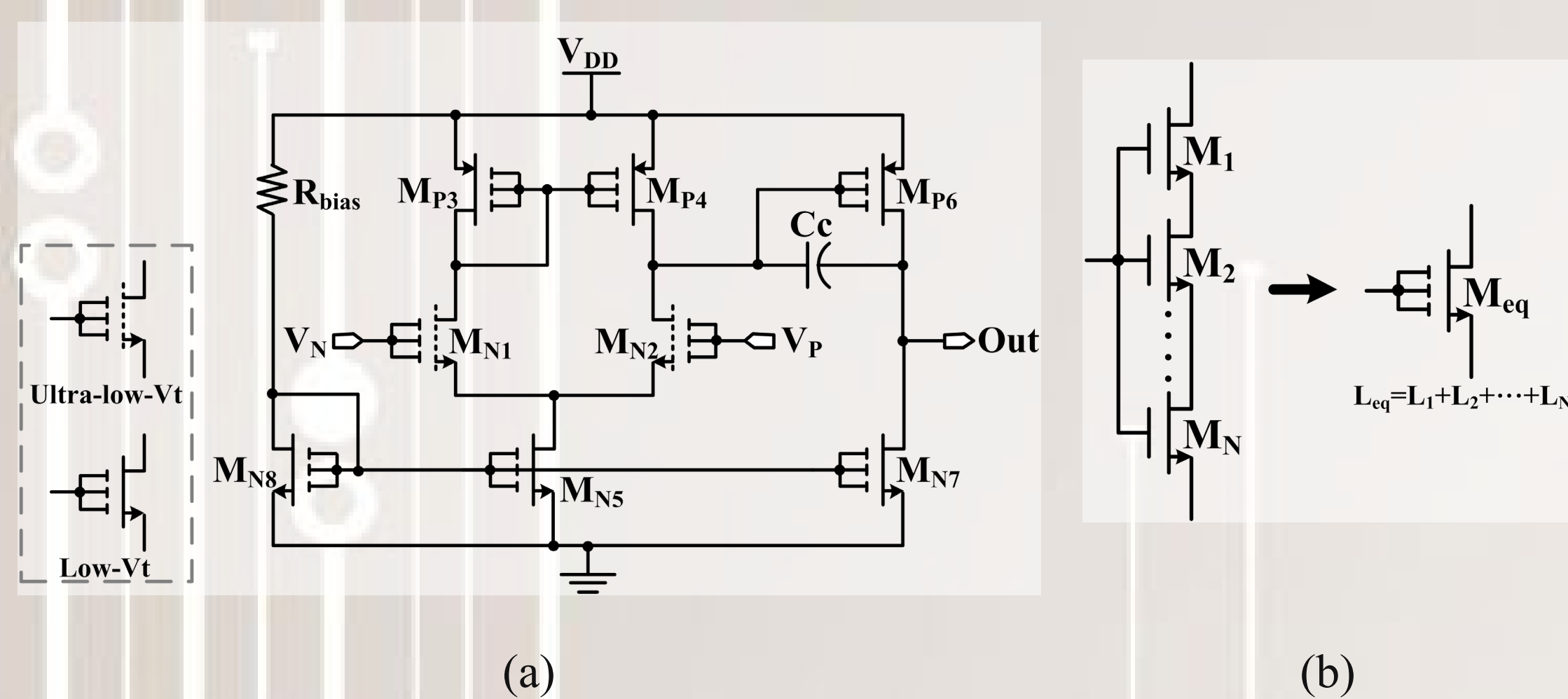


圖 1、(a) 兩級式運算放大器；(b) 堆疊元件

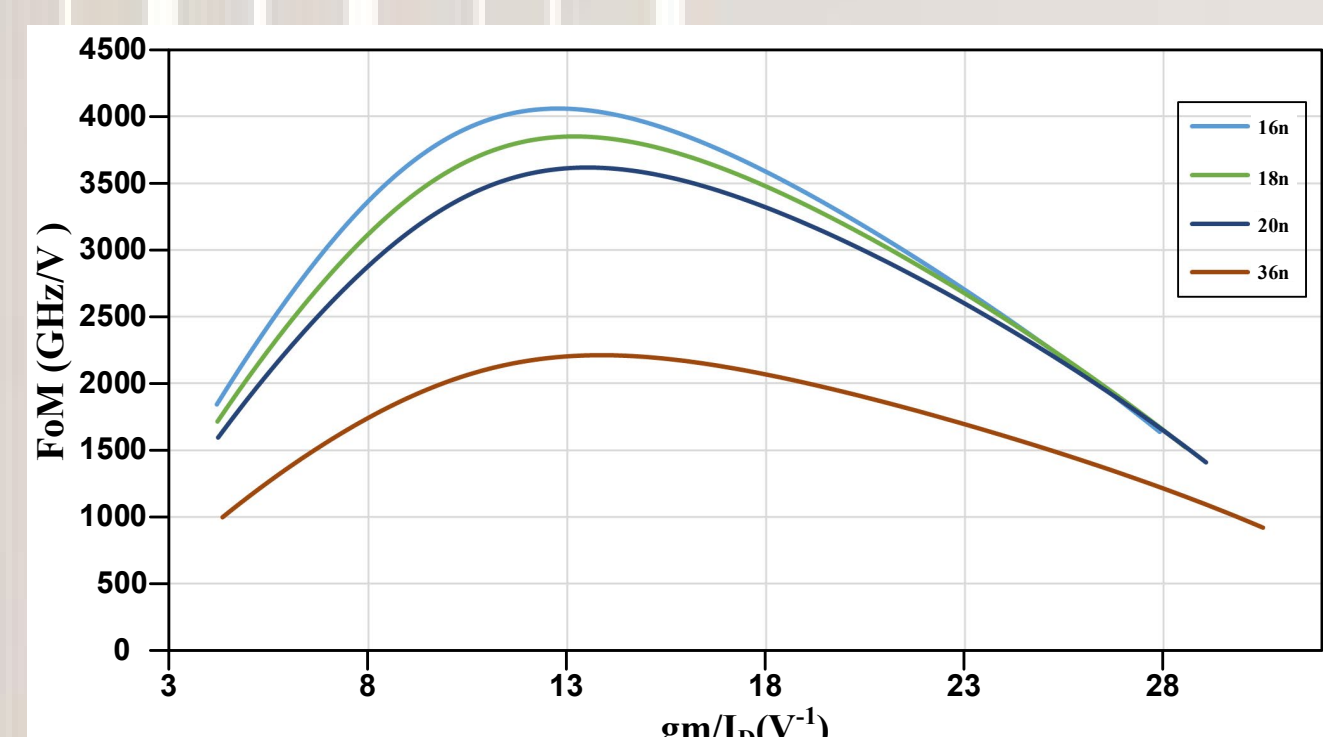


圖 2、 gm/I_D 與 FoM ($FoM = f_T \times gm/I_D$)

本設計工作區

- $gm/I_D < 8$ (強反轉) 電流效率較低
- $gm/I_D = 8-15$ 兼顧速度與電流效率
- $gm/I_D > 15$ (弱反轉) 增益較高，頻寬降低

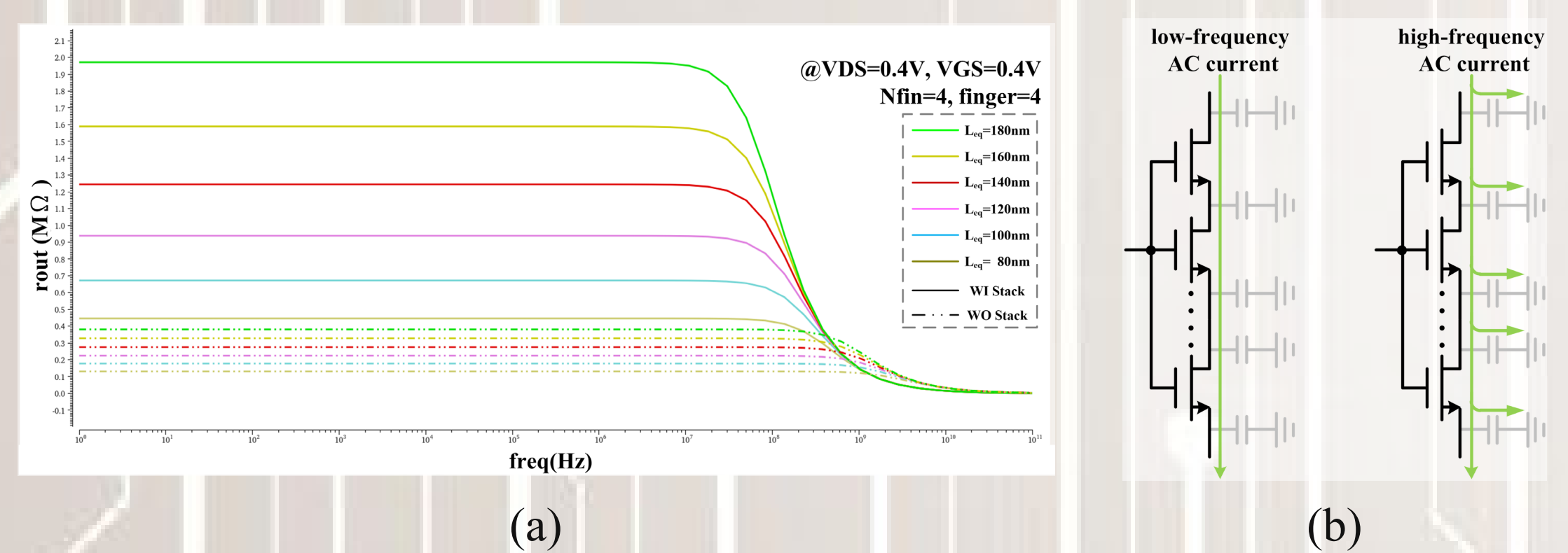


圖 3、(a) 堆疊與未堆疊元件之輸出阻抗頻率響應；(b) 寄生電容與交流電流路徑

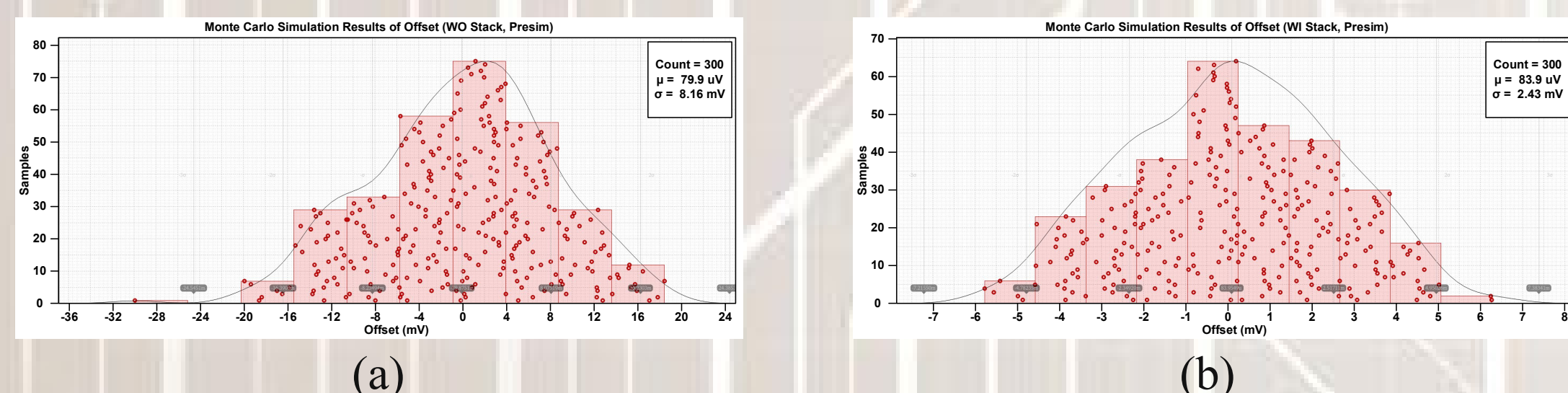


圖 4、Monte Carlo 統計分布圖
(a) 未堆疊， $\sigma = 8.16 \text{ mV}$ ；(b) 堆疊， $\sigma = 2.43 \text{ mV}$ 。

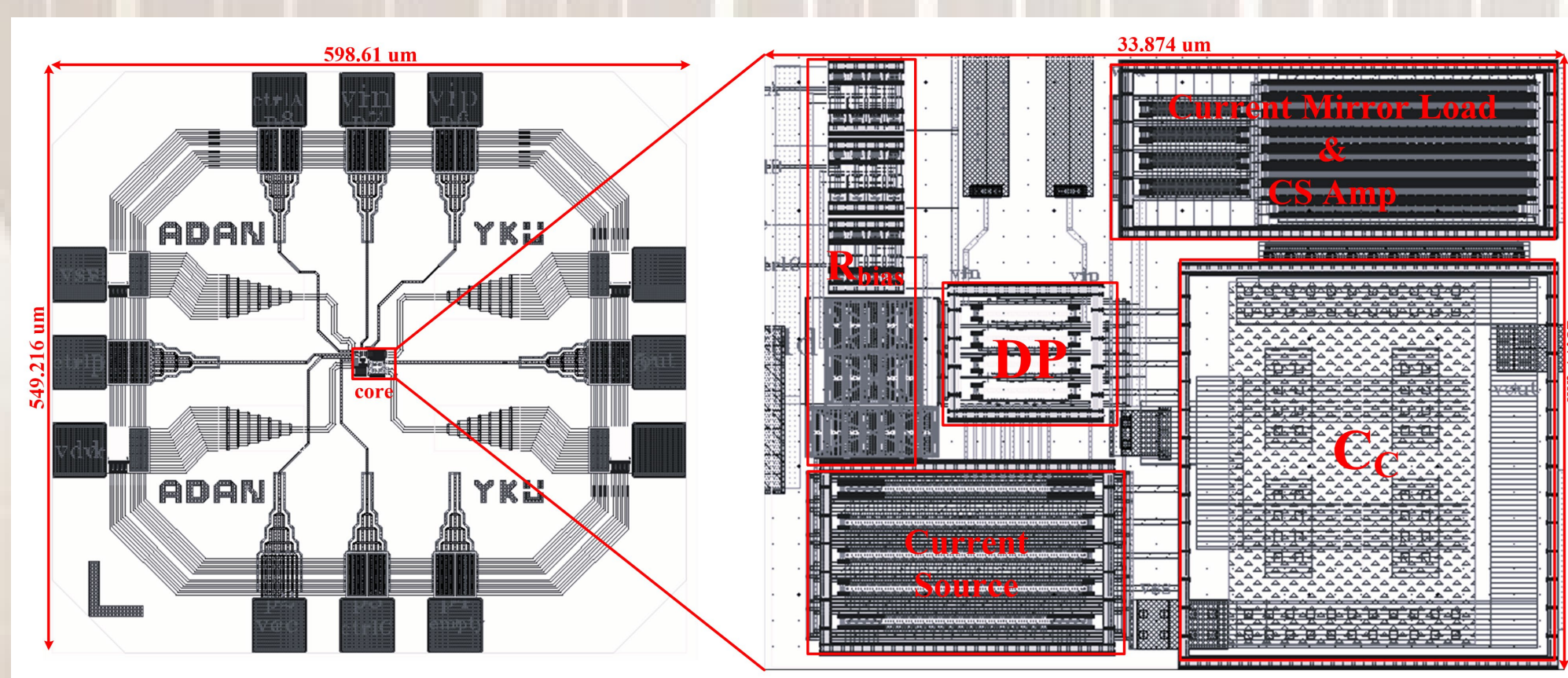


圖 5、晶片佈局與核心電路

量測結果及規格比較表

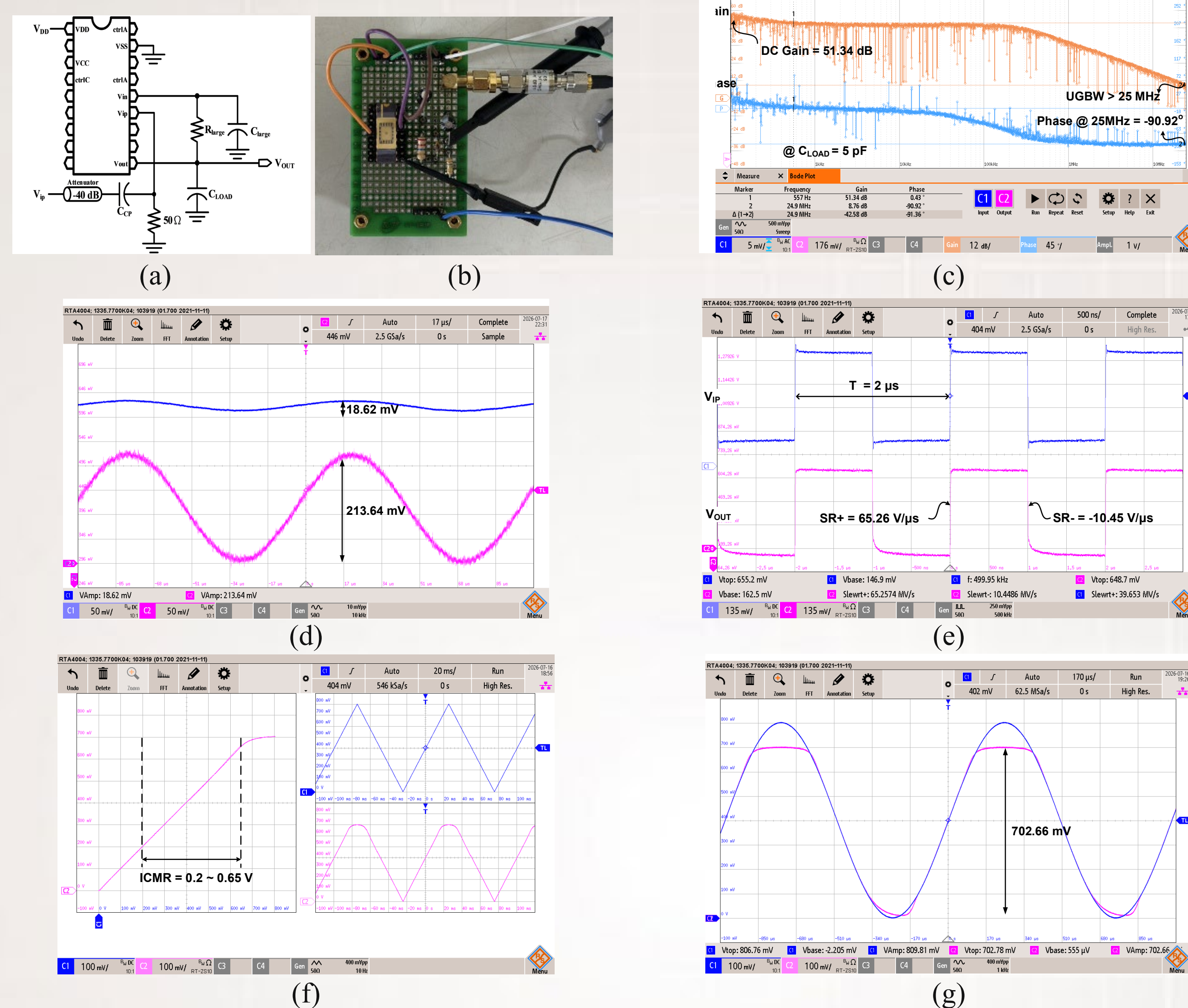


圖 6、電源 0.8 V，負載電容 5 pF；輸入衰減器確保訊號完整性，(a) 量測轉移線；(b) 測試電路板；(c) 頻率響應；(d) 閉迴路響應 @ $A_v=11 \text{ V/V}$ ；(e) SR；(f) ICMR；(g) 輸出擺幅。

表 1 規格比較表

Parameter	[1] 2019	[3] 2019	[5] 2011	[6] 2015	[7] 2018	This work	
Publication	ICM	MICPRO	JSSC	ICCIC	CCWC	-	
Technology (nm)	16	16	65 (planar)	32	45	16	
Result	Presim	Presim	Meas	Presim	Presim	Postsim	Meas
Supply Voltage (V)	0.9	1.8	1	1	0.7	0.8	0.8
Load (pF)	5	0.005	2	1	1	5	5
DC Gain (dB)	61.3	23.7	56.12	48.47	92	64.82	51.34
GBW (MHz)	39.1	5070	390	206.9	230	113.1	~68.27 (Est.)
PM (°)	60.4	-	71	66.49	82	62.01	> 60 (Est.)
Average SR (V/ μs)	15.4	17500	-	66.76	17.4	63.55	37.85
ICMR (V)	-	-	-	-	-	-	0.2 ~ 0.65
Output Swing (mV)	-	-	-	-	-	-	702.66
Offset (mV)	-	-	-	-	-	-	6.14
THD (dB)	-	-	-	-	-	-	-40
Power (μW)	-	537.1	1600	234.22	15.43	838.7	846
FoM (MHz·pF·V/ μW ·us)	-	0.072	0.48†	0.48	4.46†	0.51	0.29
Chip size (μm^2)	-	-	-	-	-	549.216×598.61	
Core size (μm^2)	-	-	-	-	-	23.77×33.874	

$FoM = (GBW \times CL / Power)^{0.5} \times (SR_{avg} \times CL / Power)^{0.5} \times (A_v / A_{v,spec})^{0.2}$

Est. 為推論值。† 文獻採 cascode 且 PM 偏高，FoM 較高。

‡ 未提供 SR，僅使用頻寬項與增益項，權重為 1 及 0.2。