

# 小野寺研インターン

澤 孝晃

2018 年 7 月 8 日

## 1 序論

トランジスタの微細化によりゲート長が 7nm のデバイスが製造可能となっており、 $\mu\text{m}$  以下の寸法になってからは電子や分子の量子的な揺らぎが顕著になり、大量のトランジスタからなる集積回路のチップにおいて、同じ寸法のトランジスタ特性間にミスマッチが起きるようになった。ここで、素子同士の特性のミスマッチが回路の性能と信頼性にどう影響を与えるのかが重要である。製造時に発生する特性のミスマッチは静的ばらつきと認識されている一方、動作時にトランジスタの特性が時間によって変動することがありノイズや経年劣化として認識されている。ノイズの主要成分は熱雑音であり白色雑音とも呼ばれる。

主要成分の他に、結晶と結晶の界面に置いて、分子間結合の分子間結合の切断による欠陥が存在する。界面に存在する欠陥に自由キャリアの捕獲と放出が繰り返されると電流の時間変動が発生する。このような変動をフリッカーノイズと呼び、低い周波数領域に置いてパワー密度が大きいことが特徴である。MOS トランジスタの場合、シリコンと酸化膜の間の界面に存在する欠陥が原因となっている。トランジスタの寸法が $\mu\text{m}$  以下になってから、各種欠陥へのキャリアのトラップによる影響が顕著に現れ始めた。その理由として、欠陥 1 つへのキャリアのトラップの相対的な影響が顕著にあらわれたことと、製造技術の進歩により各種欠陥の数が減少してきており、あるトランジスタに欠陥が存在する確率が減少してきたことがある。従って、1 つの欠陥がチャンネルに流れる電流にどう影響されるか正確に見積もる手法が求められるようになった。相対的に大きな電流変動は、1 つの欠陥への 1 つの欠陥へのキャリアの捕獲と放出の減少により発生するため離散的な変動として観測される。また、その変動が起きる時間間隔は固定ではなく大きくばらつく。

ランダムテレグラフノイズ (RTN) は界面に存在するトラップにキャリアの捕獲・放出によりデバイスの閾値電圧が変動する現象である。閾値電圧だけでなく移動度が変化する説もある。RTN を特徴付けるパラメータは、トラップあたりのオン電流の変化量、トラップあたりの時定数、トラップの数の 3 種類がある。トラップあたりの RTN パラメータを評価するのではなく、RTN による合計量の変動を評価し、その変動量の分布をモデル化することにより回路設計に活かすことを目標にする。

今回のインターンでは、微細デバイスに発生する RTN をリング発振回路を用いて測定し、RTN が回路性能の最悪分布に与える影響を評価する。測定対象である RTN は統計的な性質を持っており、各種統計的な性質をモデル化することが目的である。統計的な評価を行うために、同じ寸法の大量のデバイスの電流特性の時間変化を測定し、デバイス毎に観測される電流値変動の振幅および捕獲・放出するまでの平均時間などを評価する。

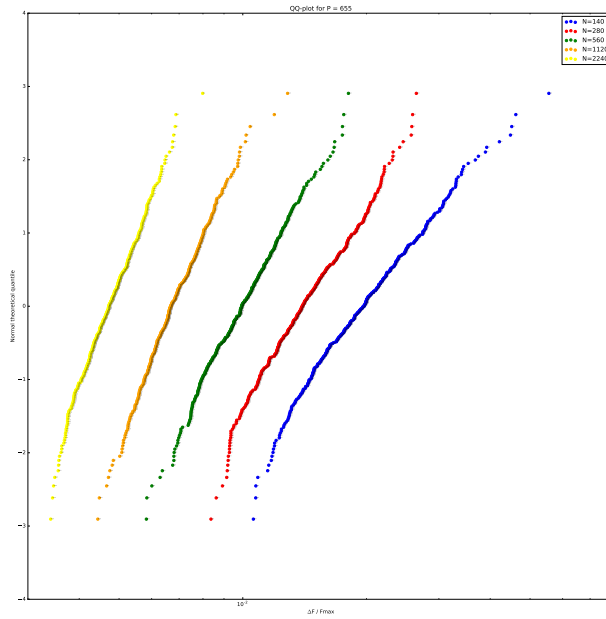
## 2 方法

今回の測定環境では、FPGA ボードと PC を使って、スロット 0 からスロット 71 のリングオシレータ (RO) を、セクション 0 からセクション 383 まで 384 個のセクションの発信周波数を測定する。各セクション 10 秒ずつ測定するので、合計 1 時間程度かかる。また、RO の電源は 0.5V に設定する。

## 3 結果

### 4 N skewed の結果

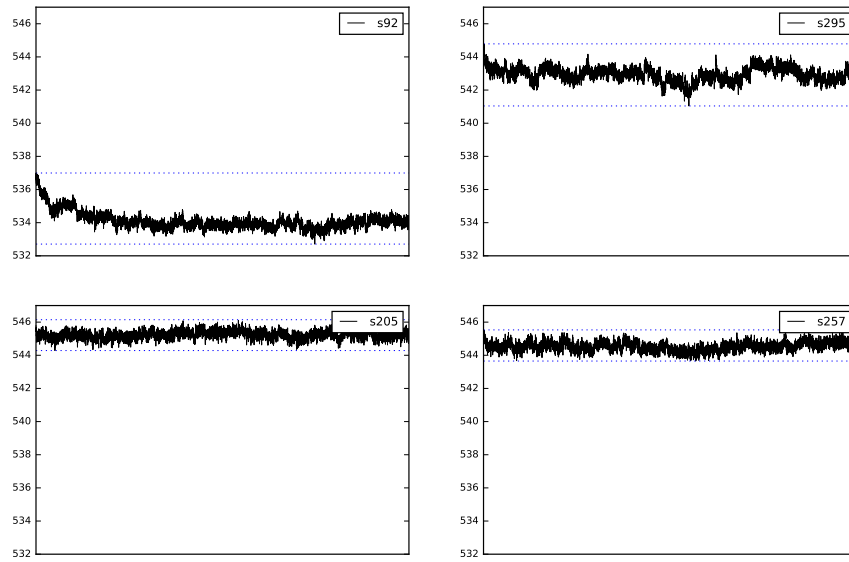
分周した発振周波数の qqplot を描く。qqplot とは得られたデータと理論分布を比較し、その類似度を調べるためのグラフである。横軸は各分周器にかけられた発振周波数の各セクションでの最大値と最小値の差を最大値で割った値である。縦軸は理論分位数となっている。



(a)  $p=655$  の時の qqplot

	$\sigma$	$\mu$
<b>N=140</b>	7.642930	13.013758
<b>N=280</b>	9.290706	17.169270
<b>N=560</b>	10.719097	21.432948
<b>N=1120</b>	13.552113	29.374513
<b>N=2240</b>	14.910113	34.640114

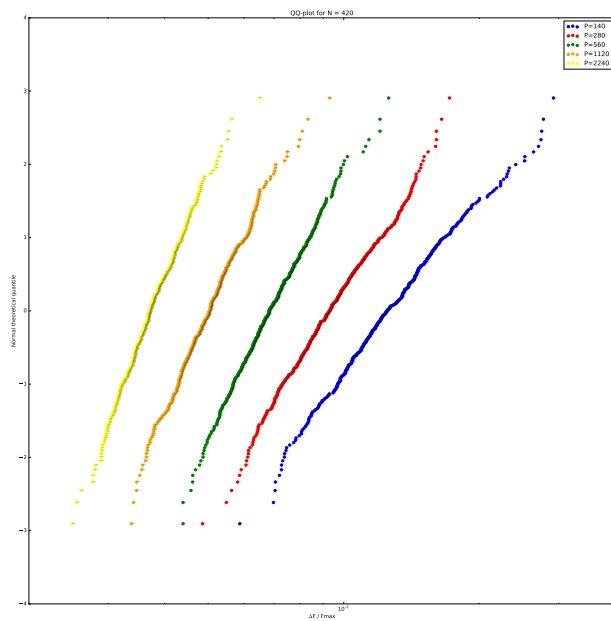
(b)  $p=655$  の時の傾きと切片



(c)  $p=655$ ,  $n=2240$  の時の波形

図 1 the effect of the edge length of FET in  $p = 655$

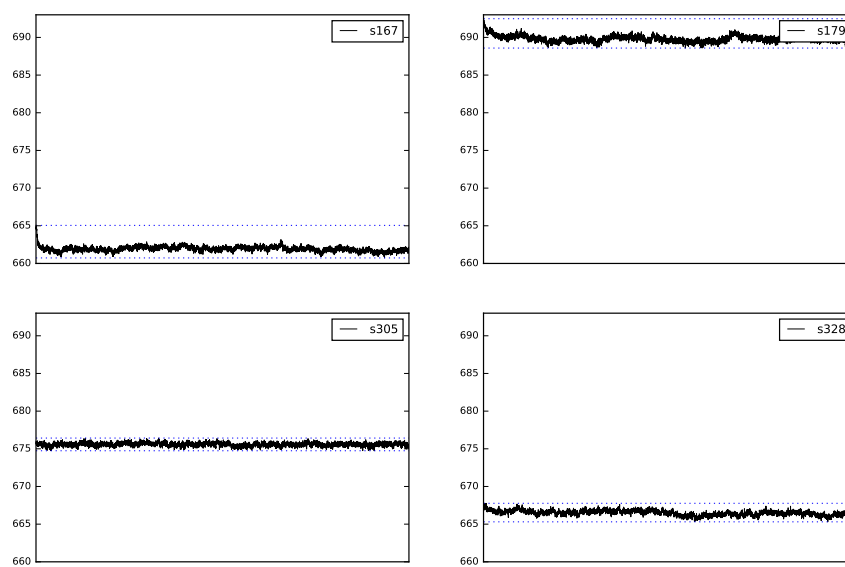
## 5 P skewed の結果



(a)  $n=420$  の時の qqplot

	$\sigma$	$\mu$
<b>P=140</b>	7.995111	15.153213
<b>P=280</b>	9.720276	19.710795
<b>P=560</b>	12.113357	26.177423
<b>P=1120</b>	13.509524	31.045111
<b>P=2240</b>	15.503079	37.609672

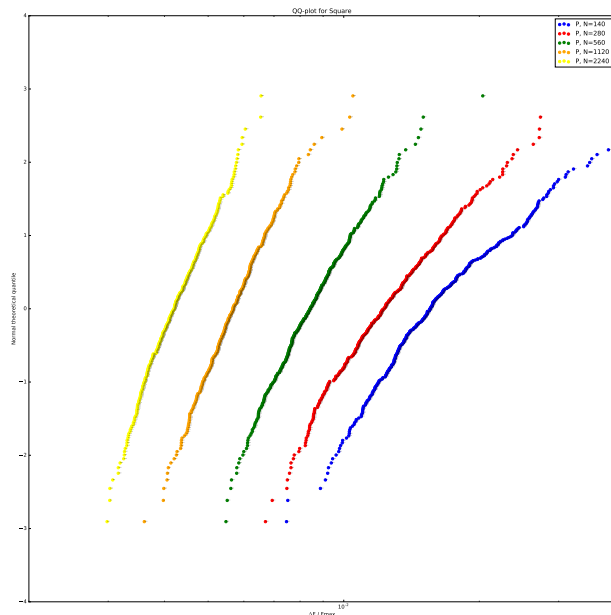
(b)  $n=420$  の時の傾きと切片



(c)  $n=420$ ,  $p=2240$  の時の波形

図 2 the effect of the edge length of FET in  $n = 420$

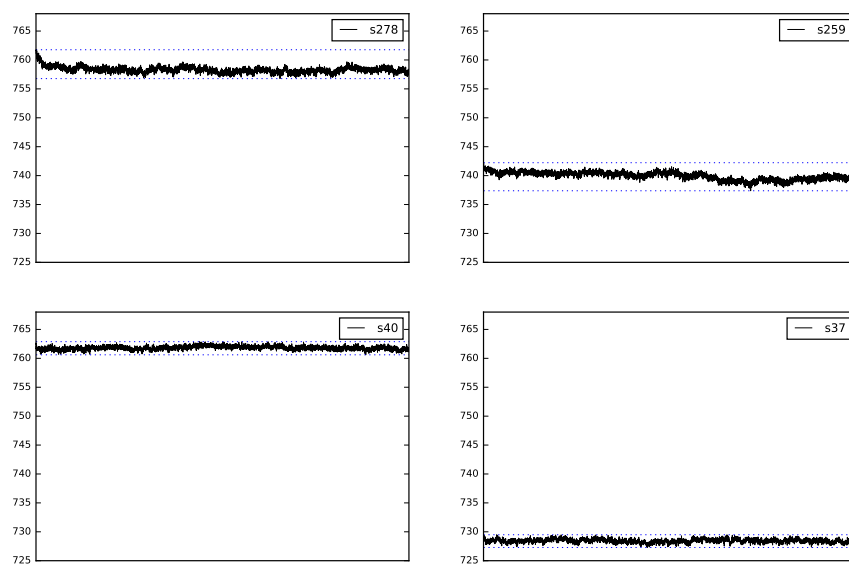
## 6 Balanced の結果



(a) Balanced の時の qqplot

	$\sigma$	$\mu$
<b>P, N=140</b>	6.701765	11.970562
<b>P, N=280</b>	8.040099	15.287765
<b>P, N=560</b>	11.269633	23.320950
<b>P, N=1120</b>	14.117825	31.657139
<b>P, N=2240</b>	15.159114	35.990718

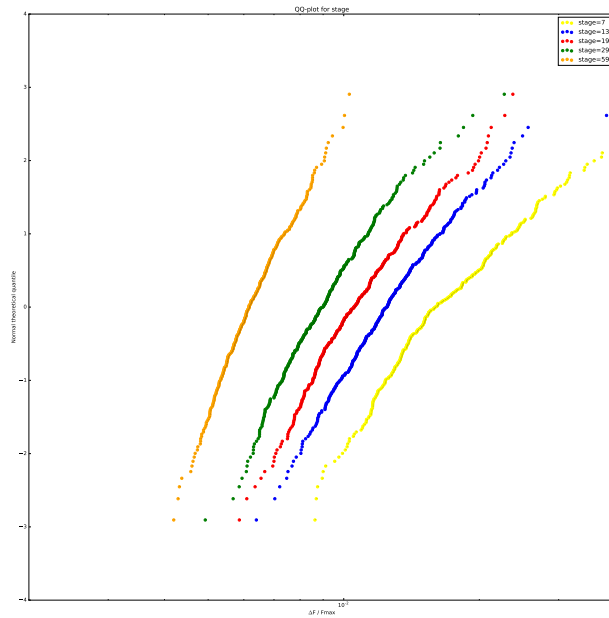
(b) Balanced の時の傾きと切片



(c) n,p=2240 の時の波形

図3 the effect of the size of FET

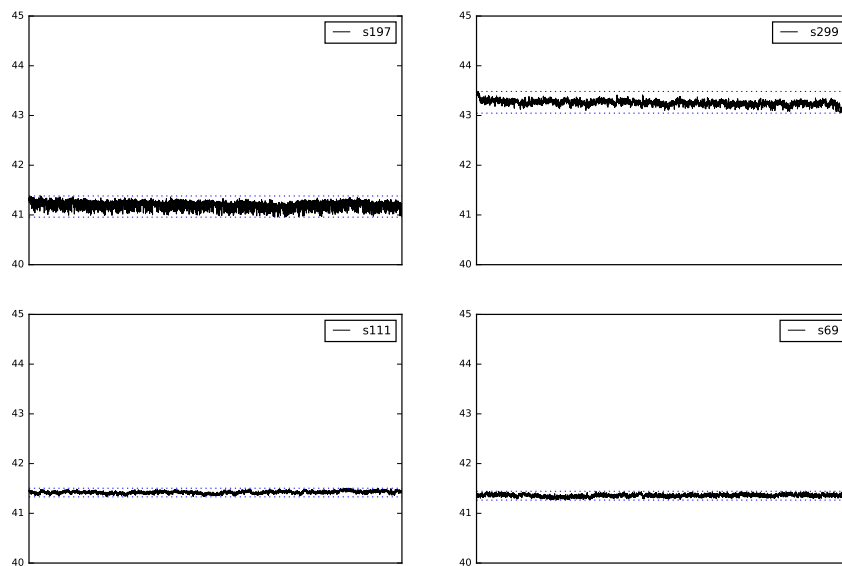
## 7 stage の結果



	$\sigma$	$\mu$
<b>stage=7</b>	6.888903	12.195206
<b>stage=13</b>	8.593555	16.301643
<b>stage=19</b>	9.128267	17.957195
<b>stage=29</b>	10.166360	20.770548
<b>stage=59</b>	13.962715	30.766687

(a) stage の時の qqplot

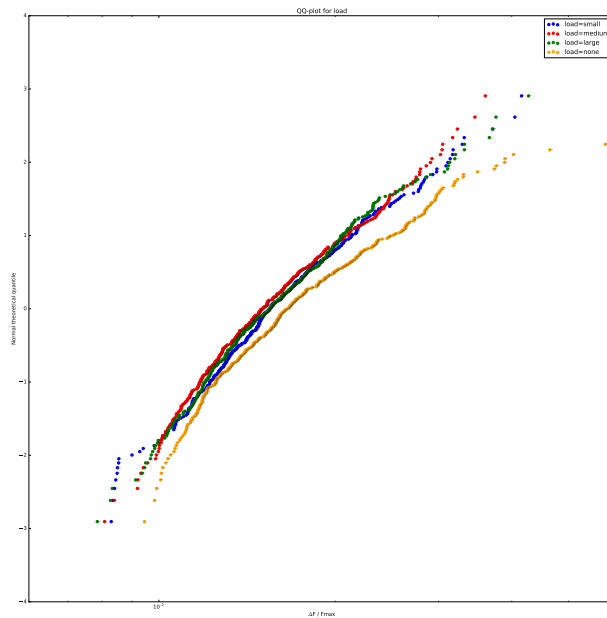
(b) stage の時の傾きと切片



(c) stage=59 の時の波形

図 4 the effect of the stage of FET

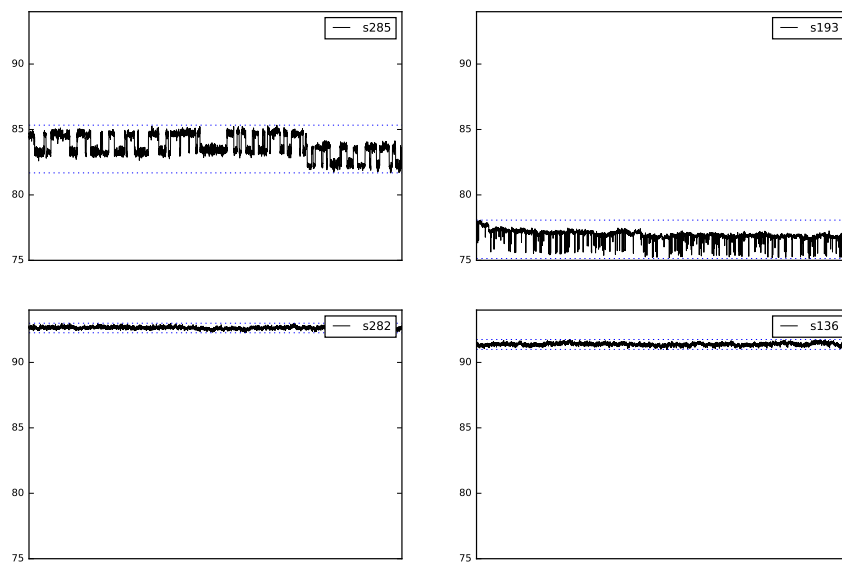
## 8 extra load の結果



(a) extra load の時の qqplot

	$\sigma$	$\mu$
load=small	7.912880	14.213154
load=medium	8.088943	14.633828
load=large	8.043086	14.490517
load=none	6.448896	11.323411

(b) extra load の時の傾きと切片



(c) load=large の時の波形

図 5 the effect of the extra load of FET