

LDD濃度改良後のSOI-FETの 極低温環境下での異常特性の改善

筑波大 素粒子実験研究室

修士2年 八木 俊輔

yagi@hep.px.tsukuba.ac.jp

報告内容

- 研究動機
- 極低温用SPICEパラメータ抽出の為の測定
 - 常温と極低温での電流電圧特性の違い
 - 電流電圧特性の測定結果
 - シミュレーションと実測の比較
- LDD不純物濃度変更後の電流電圧特性
 - V_{ds} 低い領域でドレイン抵抗異常現象が見られたいたが、LDD不純物濃度を増やすことで改善した

ニュートリノ崩壊光探索

● ニュートリノ崩壊

崩壊に伴う光子のエネルギーと測定済みの質量自乗差から、ニュートリノ質量を決定できる。

精度よく測定 $E_\gamma = \frac{m_3^2 - m_2^2}{2m_3}$ ニュートリノ振動実験

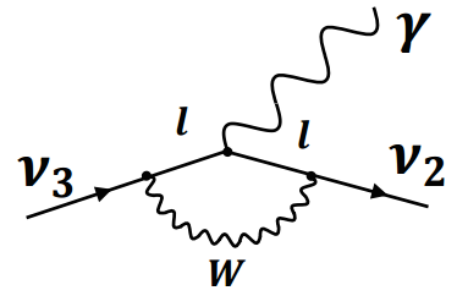
- ニュートリノは長寿命 ($T > O(10^{12})$ 年 : COBE+AKARI測定結果より)
 - ◇ 大量のニュートリノ源が必要となる。
 - 宇宙背景ニュートリノを用いる

予想される崩壊エネルギーは、約25meV(波長換算 : 50um)

- ・ テラヘルツ光検出可能な光検出器

超伝導トンネル接合素子光検出器(STJ)の導入

ニュートリノ崩壊図

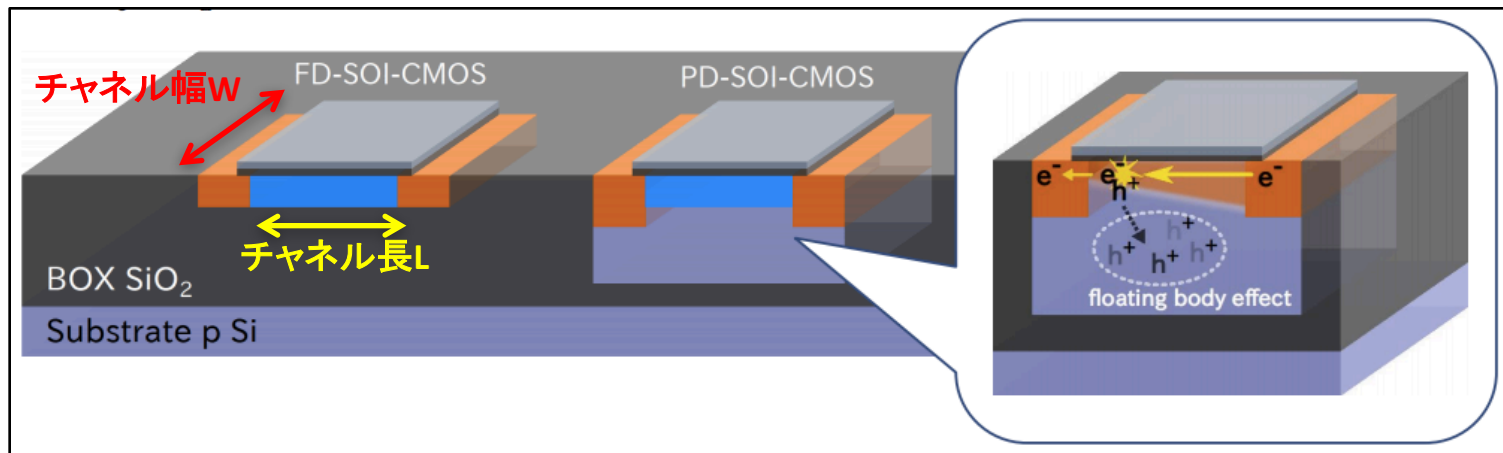


極低温動作可能：SOI-FET

FD-SOI : **F**ully **D**epleted – **S**illicon **O**n **I**nsulator

- ✓ チャンネル層が非常に薄く形成されたSOI-MOSFET
 - ◆ キャリアの衝突イオン化によって生成されたイオンがボディに蓄積し、電圧異常を引き起こす浮遊帯効果の抑制
- ✓ 実際に、4K以下でも、FD-SOI-MOSFETが正常に動作したことを確認

※JAXA/ISIS AIPC 1185,286-289(2009)参照



極低温用SPICEパラメータ抽出

現在我々は、

- 超伝導トンネル接合素子光検出器(STJ)
- 極低温でも動作可能な前置増幅器

の開発を行っている。

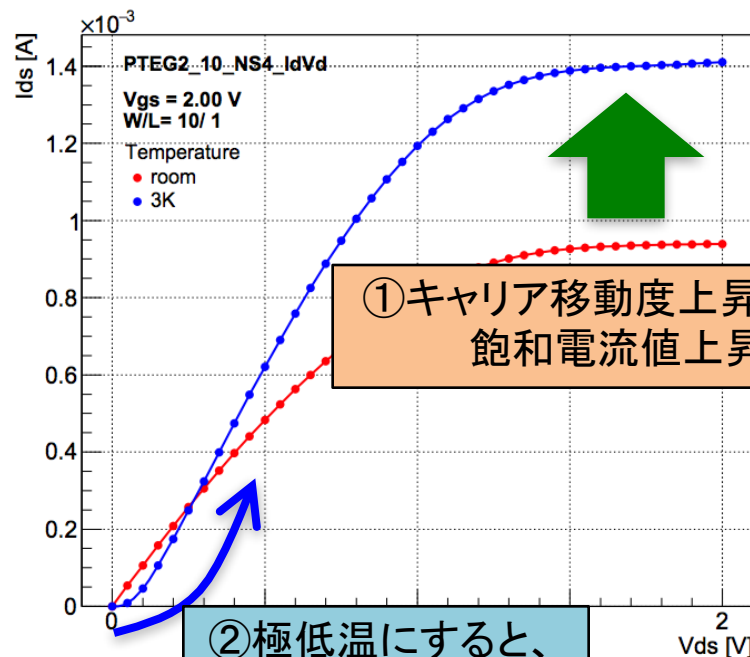
極低温環境下に適応した
シミュレーターが存在しないので、
それを構築する

- TEG測定 @極低温環境＋常温環境：筑波大 八木 が担当
 - **KEK 倉知様**にご助力いただきながら、IV測定を行っていった。
 - 測定したTEGはPTEG2
 - BT-type(Core Nomal Vth)とST2(Core Low Vth)を測定
- 極低温環境用SPICEパラメータ抽出：**JAXA 馬場様**に依頼

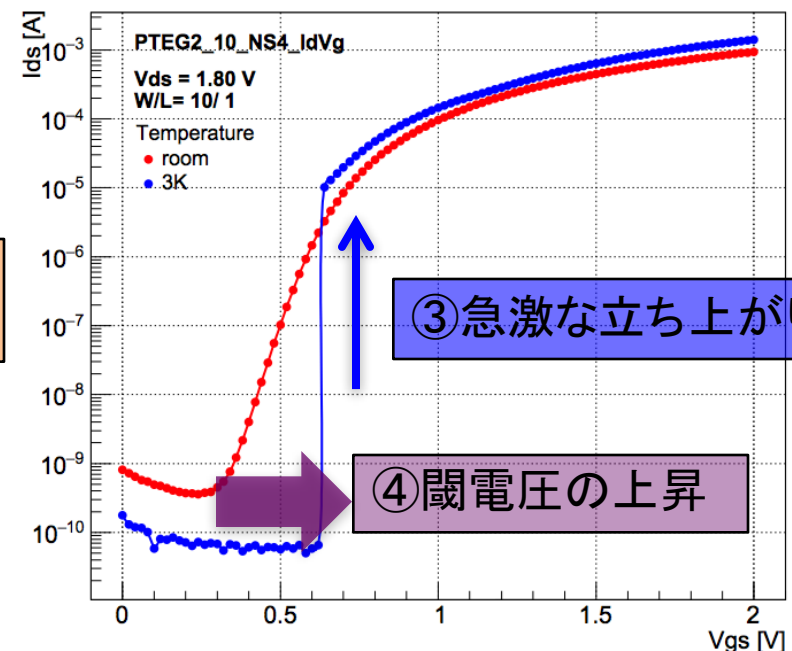
極低温での電流電圧特性

ex.) Nch ST2 W/L = 10 μ m / 1.0 μ m

I_{ds} VS V_{ds}



I_{ds} VS V_{gs}



測定したTEG詳細

BT(Core Normal Vth)

Nch BT		L [um]	
		0.2	10
W [um]	0.4	✓□	✓□
	5	✓□	✓□

Pch BT		L [um]	
		0.2	10
W [um]	0.5	✓□	
	0.63		✓□
	5	✓□	✓□

ST2(Core Low Vth)

N / P ST2		L [um]		
		0.4	1	5
W [um]	1	✓□	✓□	✓□
	2	✓□	✓□	
	10	✓□	✓□	✓□

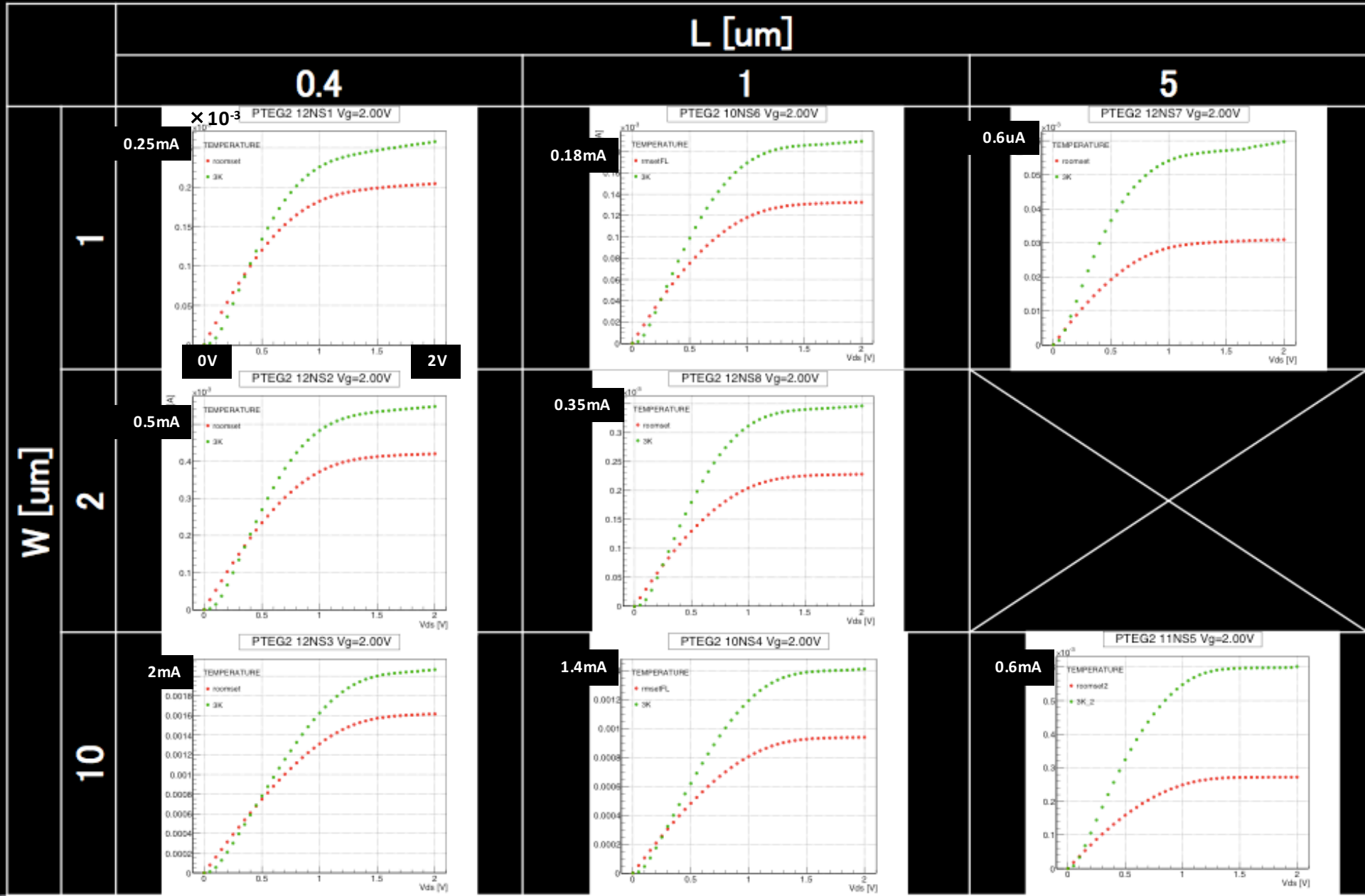
BT-type -> NchとPchで4種類ずつ

ST2-type -> NchとPchで8種類ずつ 測定

以上の素子全てのIV測定は完了

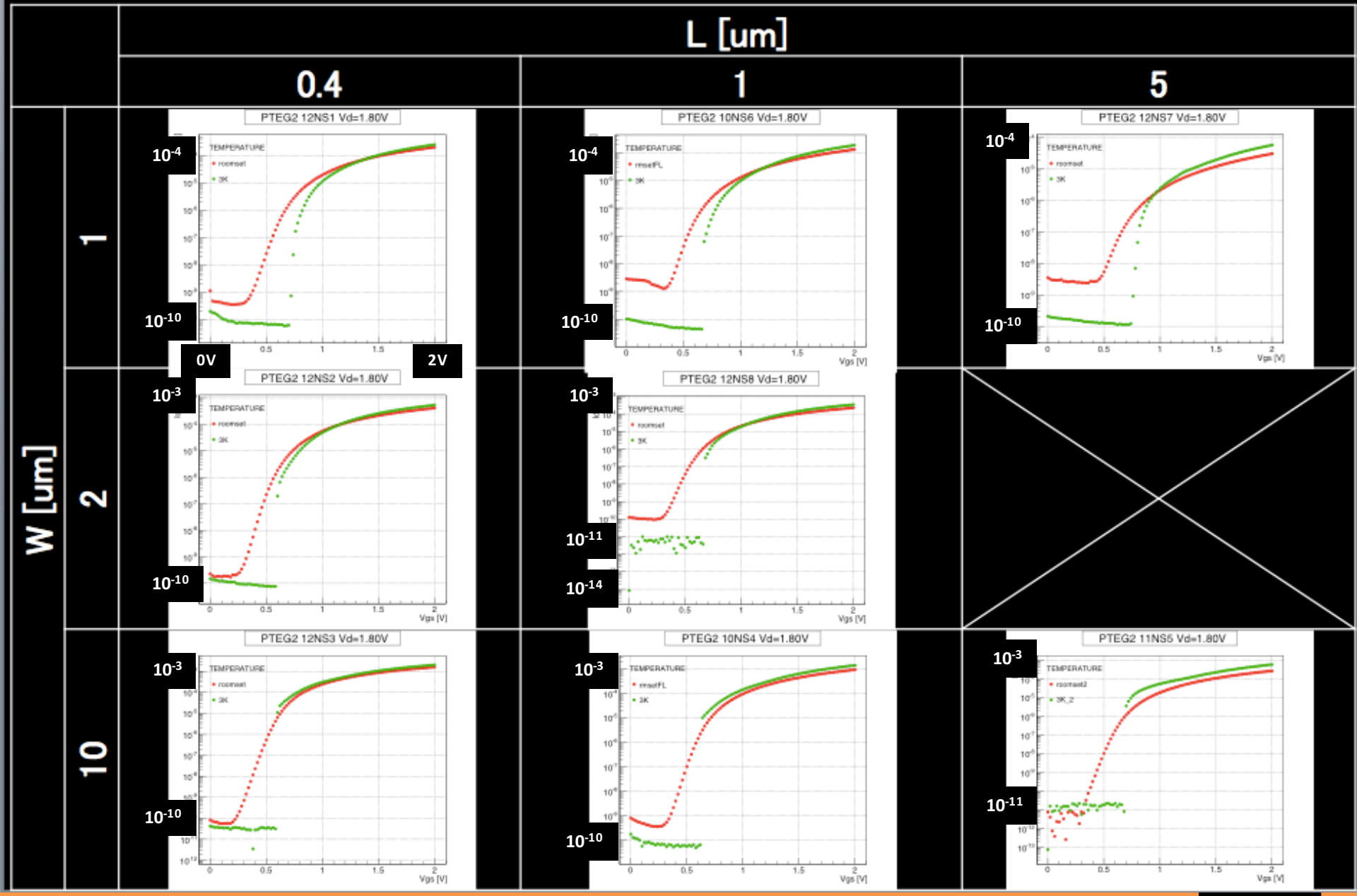
Nch ST-FET Id VS Vd ($V_{gs} = 2.00V$)

赤: room temp. 緑: 3K



Nch ST-FET Id VS Vg ($V_{ds} = 1.80V$)

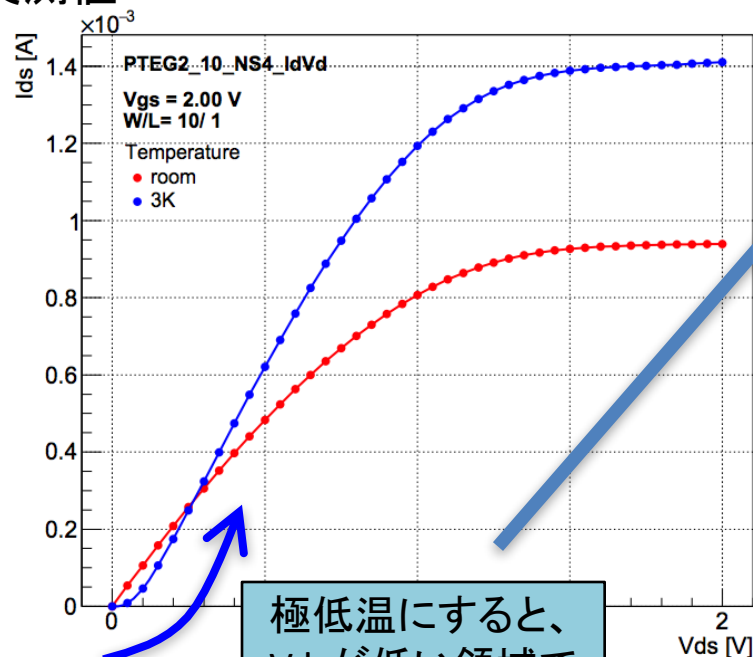
赤: room temp. 緑: 3K



SPICEパラメータ抽出

- JAXA 馬場様に私の測定結果をもとにパラメータ抽出していただきました。
- 筑波大PC環境下のもと、hspiceを用いてシミュレーション。

実測値



極低温にすると、 V_{ds} が低い領域で立ち上がりが鈍る

V_{ds} が低い領域で抵抗が大きく出る現象はシミュレーションで表現できない

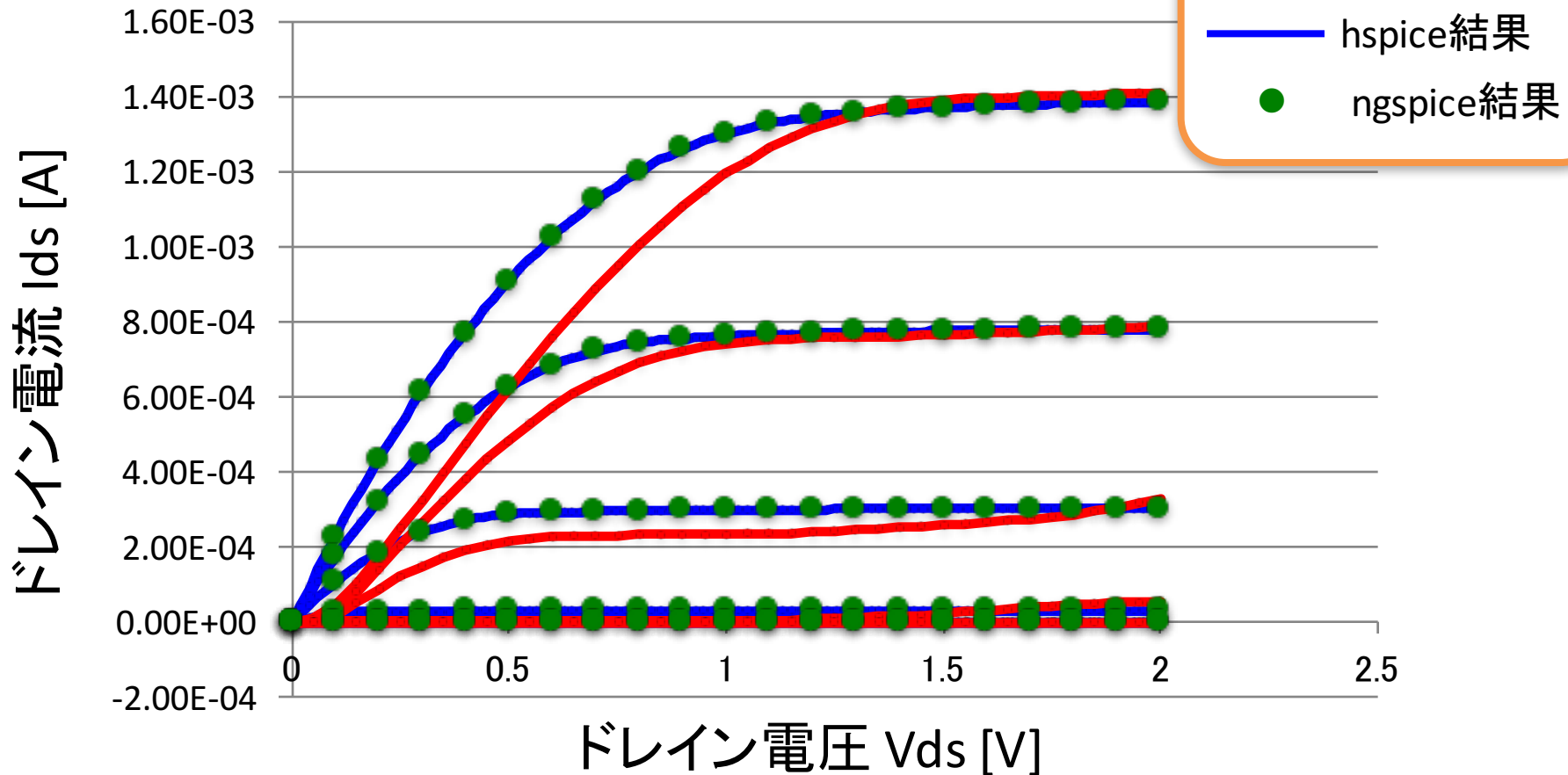
今回は、限られた領域でのみ
パラメータ抽出を行うこととする
(フィッティング電圧は飽和領域のみ)

用いたモデルはbsimsoi4.4

抽出するトランジスタは、
BT(N/P) : $L = 0.2\mu\text{m}$ $W = 5.0\mu\text{m}$
ST2(N/P) : $L = 0.4\mu\text{m}$ $1.0\mu\text{m}$ $5.0\mu\text{m}$
 $W = 10\mu\text{m}$

シミュレーションと実測の比較

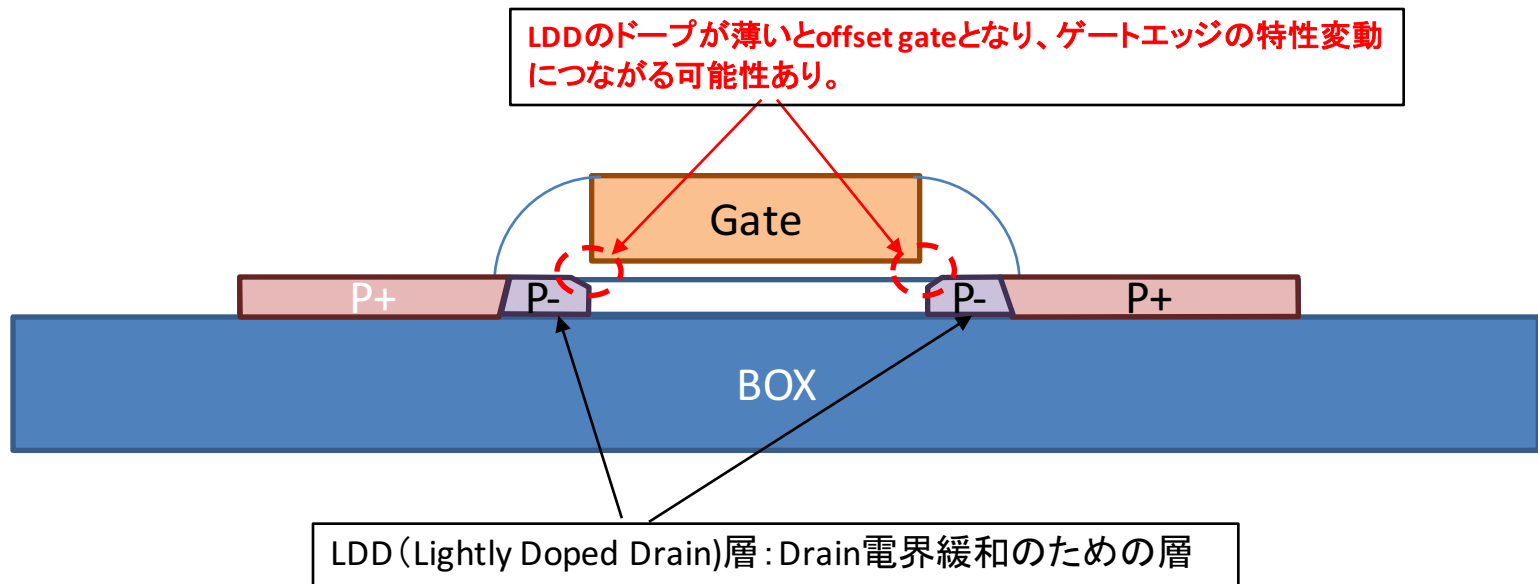
ex.) Nch ST2 W/L = 10um / 1um



LDD不純物濃度変更後のIV測定

LDD構造 : Lightly Doped Drain ... ドレインとソースの間に低濃度の不純物領域を形成
→ドレインに高電界が生じるのを防ぐ

SPICE抽出のために測定したSOI-FETは、LDDのドーピングを薄くしたSOI-FETだったため、
ゲートエッジ部の特性が変動し、 R_d が異常に高くなる現象が見られた
→なので、ドーピングを濃くしたSOI-FETを極低温環境下で測定

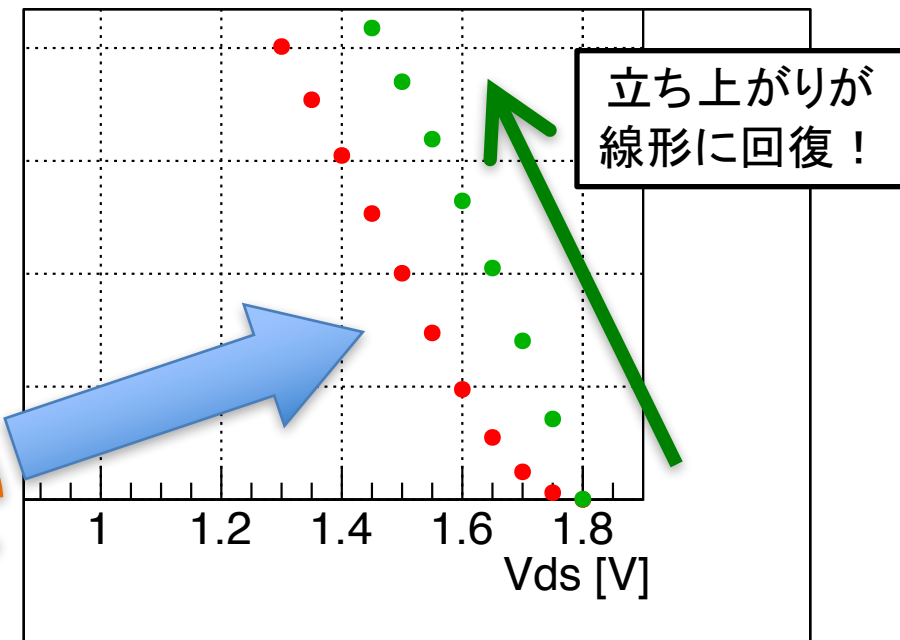
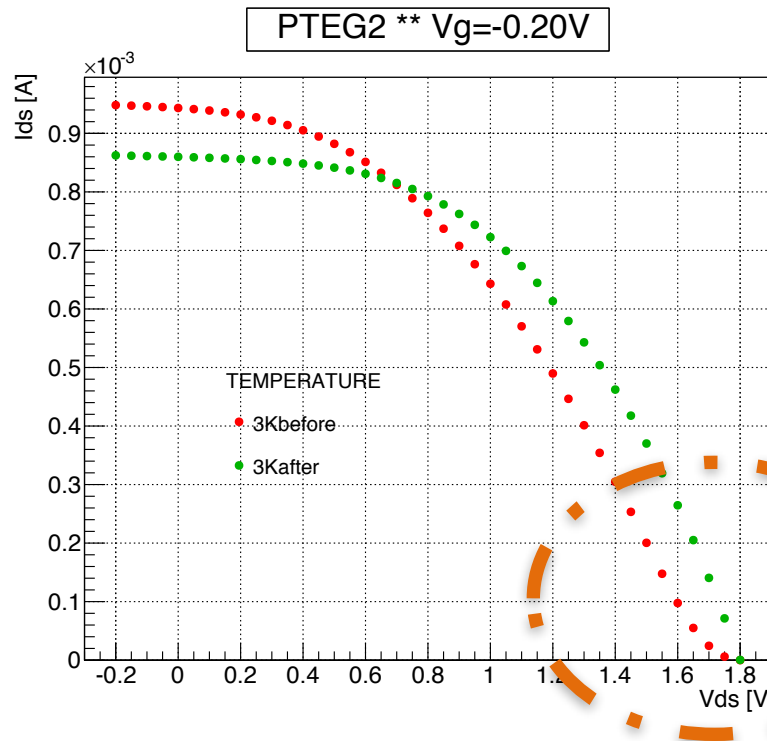


LDD不純物濃度変更後のIV測定

ex.) Pch ST2 W/L = 10 μ m / 1 μ m

I_{ds} VS V_{ds}

- LDD不純物濃度が現行(@3K)
- LDD不純物濃度が改良(@3K)



まとめ

- 昨年度、KEK倉知様のご助力をいただきながら、極低温環境下でPTEG2 IV測定をした
 - 本測定で、極低温環境下での特徴である
 - 閾電圧の上昇
 - キャリア移動度上昇に伴う飽和電流値の上昇 などを観測することができた
 - 本測定をもとにSPICEシミュレーター構築をJAXA馬場様にいただき、構築に成功した
- LDD不純物濃度を濃くすることで、極低温環境下での V_{ds} が低い領域での R_d 異常は改善した
 - LDD改良が施されたTEGで、より精度の高いSPICEパラメータ抽出を行う

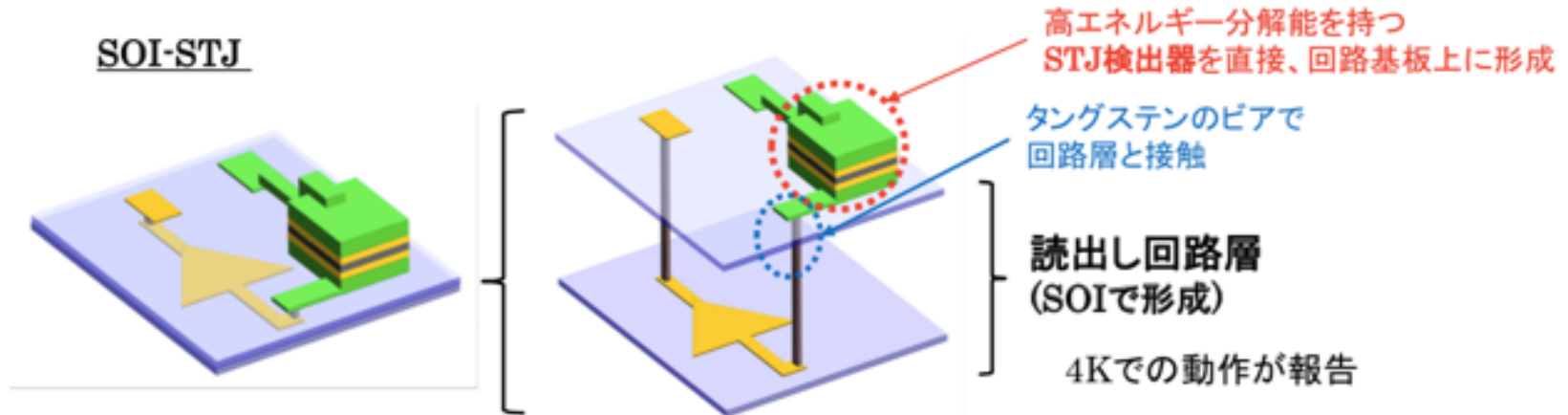
Backup

SOI-STJ

- ニュートリノ崩壊光(25meV)を精密に測定
 - ニュートリノの絶対質量を決定することが可能
- 測定系依存の雑音により、遠赤外光子検出は達成していない
 - 冷凍機の振動やグラウンド準位の不定性など
 - 検出器が置かれる冷凍機内部から外部までの長い配線に乗る雑音

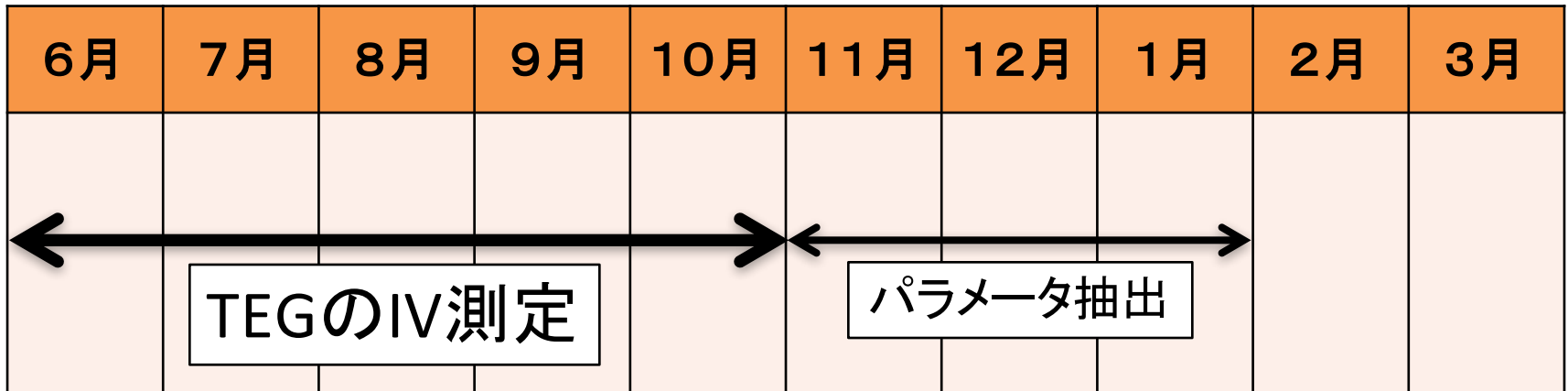
高エネルギー分解能を持つ
超伝導検出器(STJ)の開発

増幅器を検出器直近に設置
低温プリアンプとして
SOI-STJの開発



極低温用SPICEパラメータ抽出

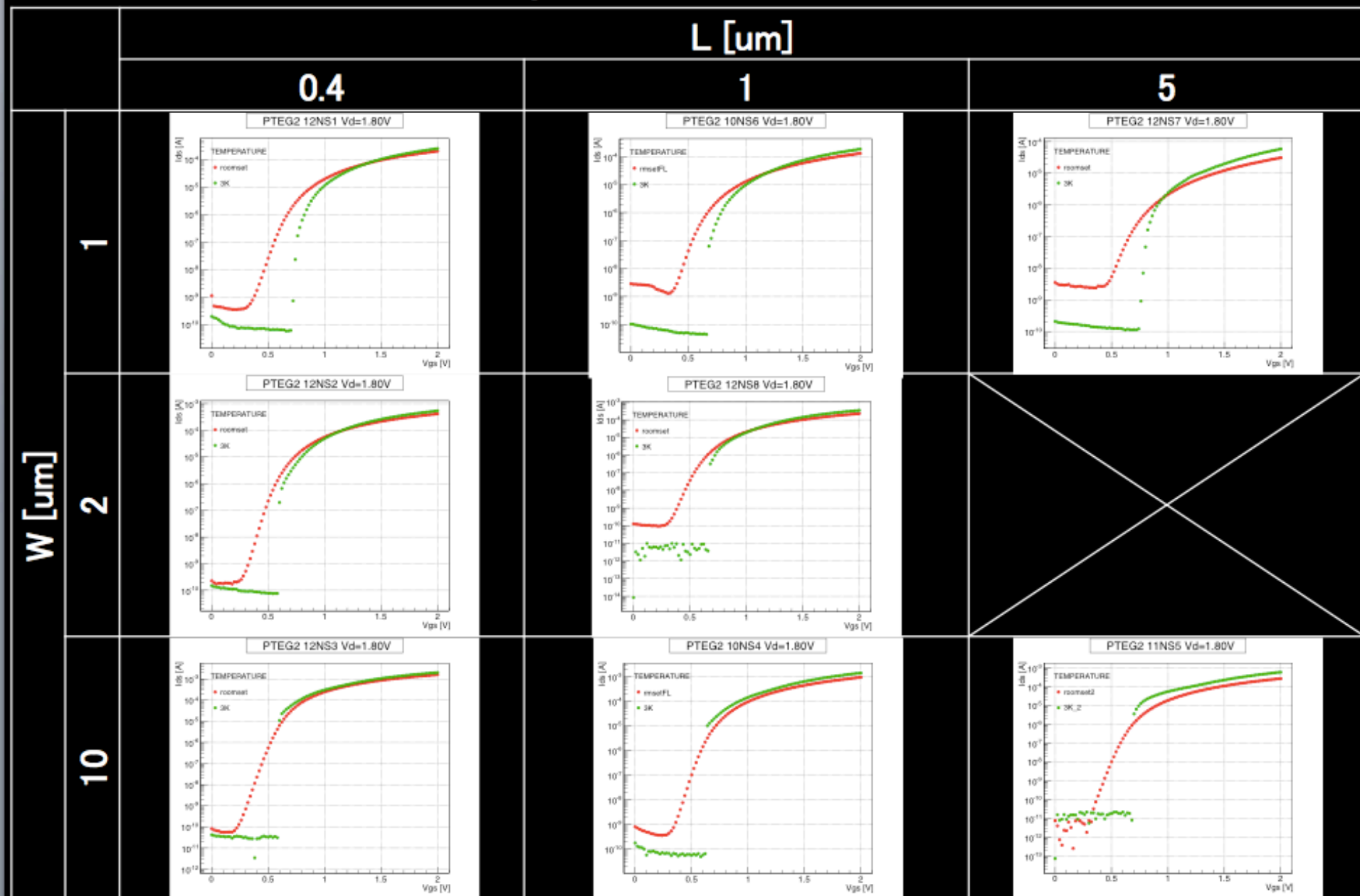
- TEG測定 @極低温環境＋常温環境：筑波大 八木 が担当
 - KEK 倉知様にご助力いただきながら、IV測定を行っていった。
 - 測定したTEGはPTEG2
 - BT-type(Core Nomal Vth)とST2(Core Low Vth)を測定
- 極低温環境用SPICEパラメータ抽出：JAXA 馬場様に依頼



今年度は、LDD濃度改良後のFETで再度SPICEパラメータ抽出を行う予定

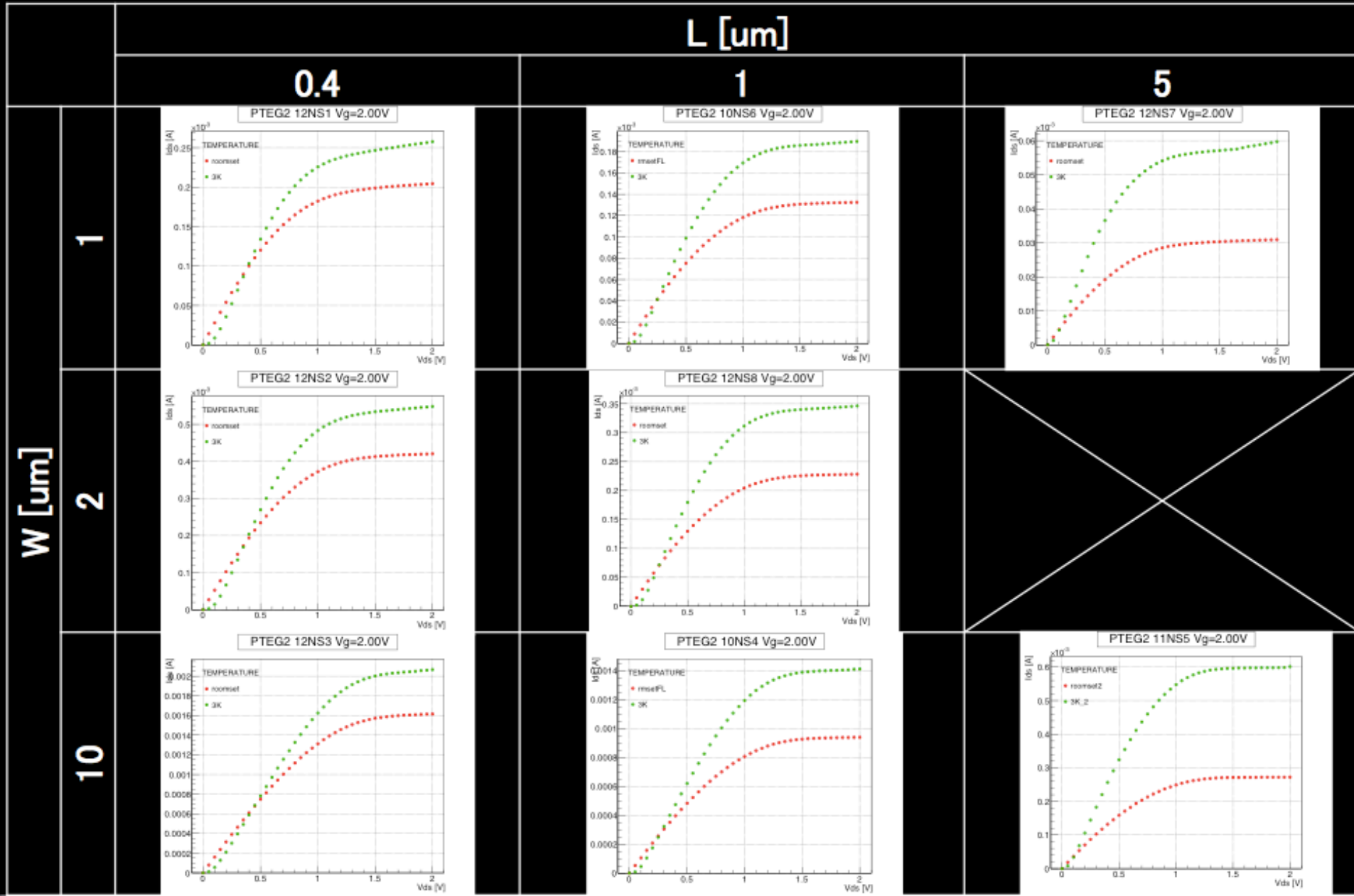
Nch ST-FET Id VS Vg ($V_{ds} = 1.80V$)

赤: room temp. 緑: 3K



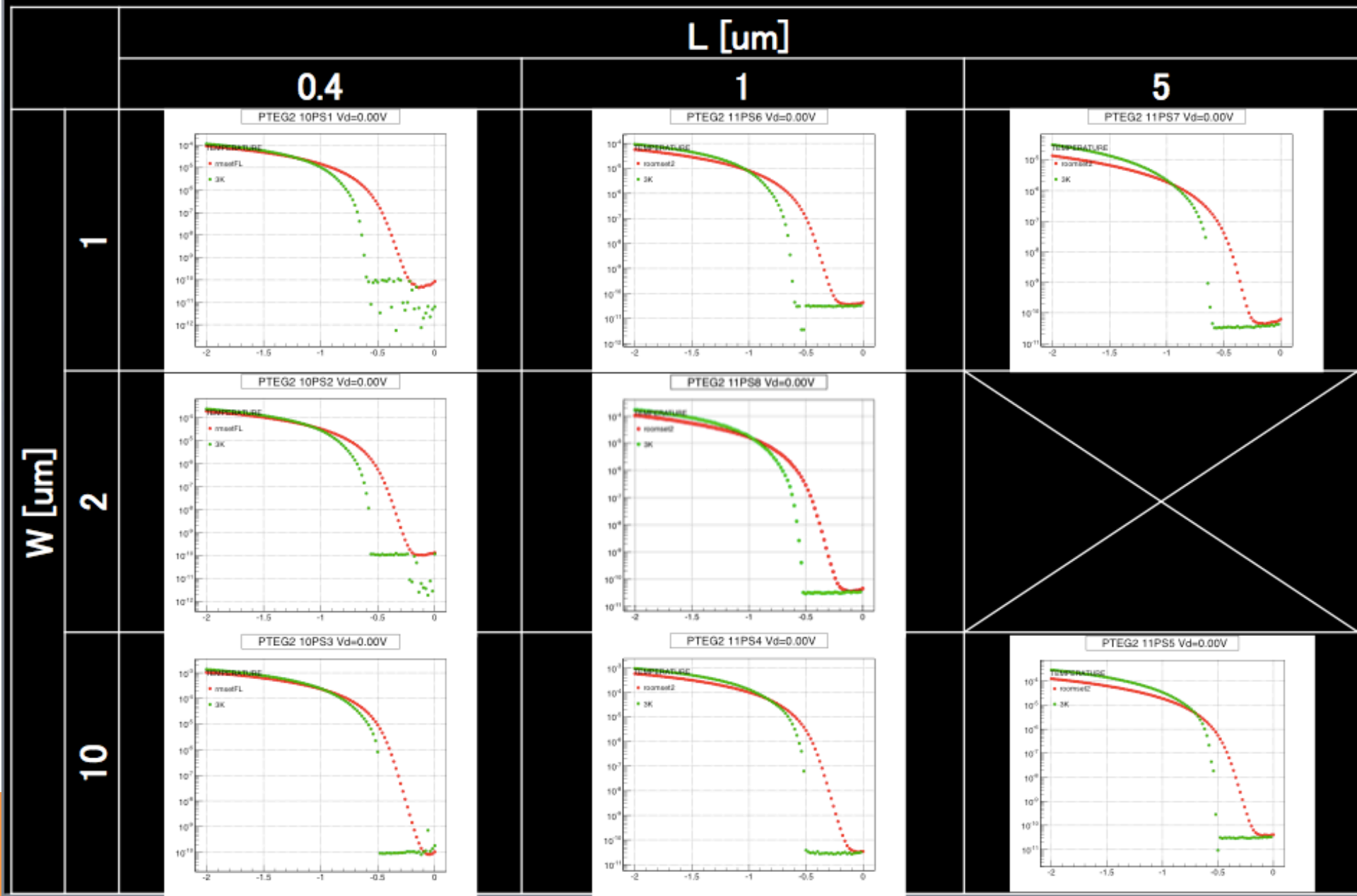
Nch ST-FET Id VS Vd ($V_{gs} = 2.00V$)

赤: room temp. 緑: 3K



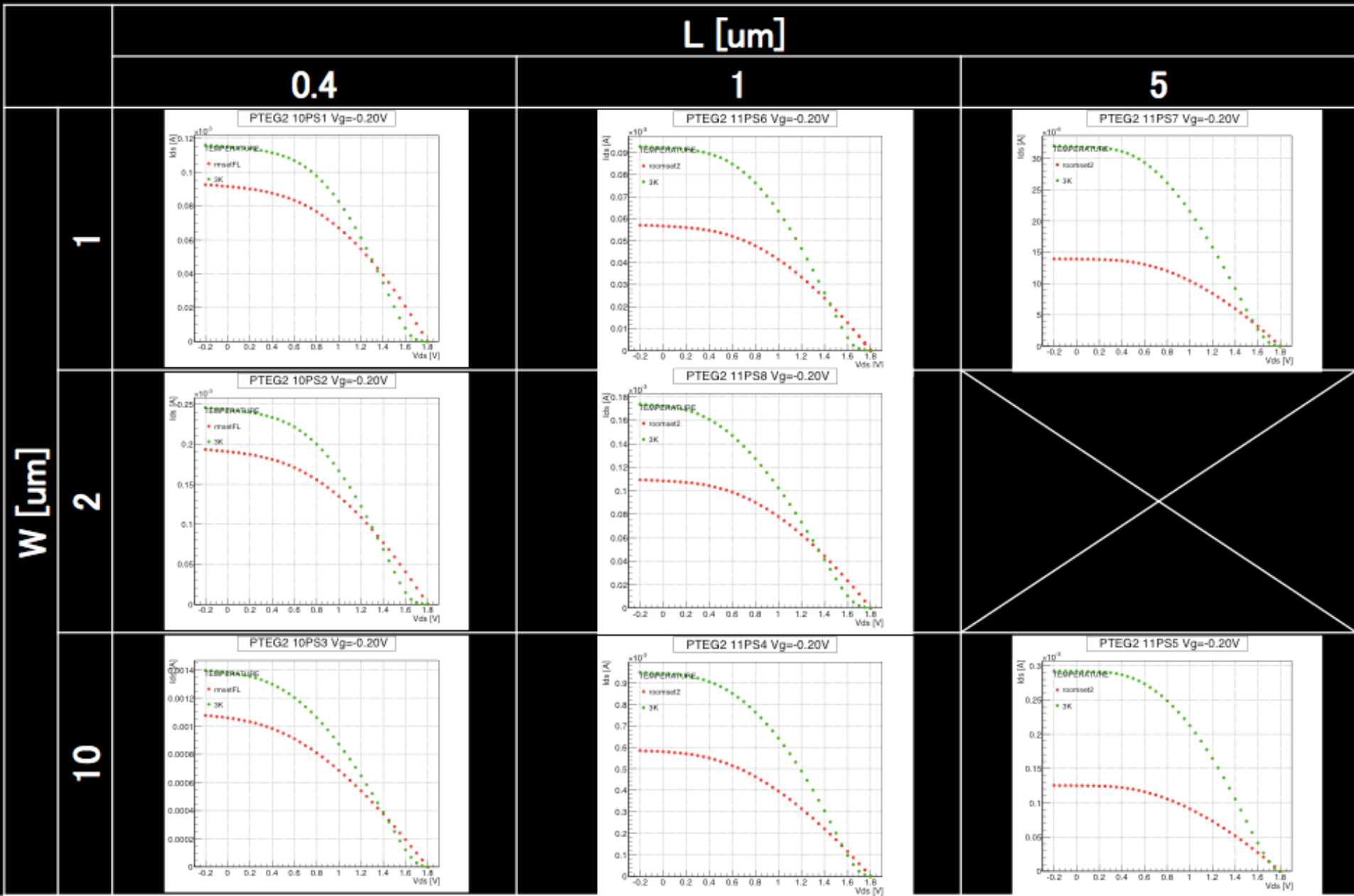
Pch ST-FET Id VS Vg ($V_{ds} = -1.80V$)

赤: room temp. 緑: 3K



Pch ST-FET Id VS Vg ($V_{ds} = -2.00V$)

赤: room temp. 緑: 3K



移動度について

線形領域

I_{ds} VS V_{gs} カーブ @ $V_{ds} = 0.05V$

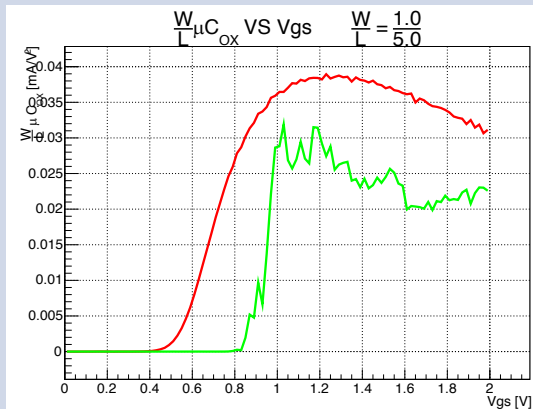
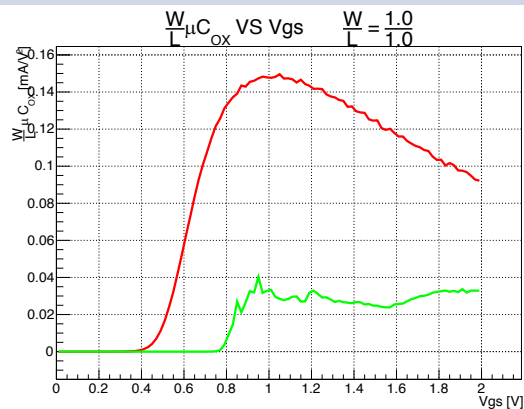
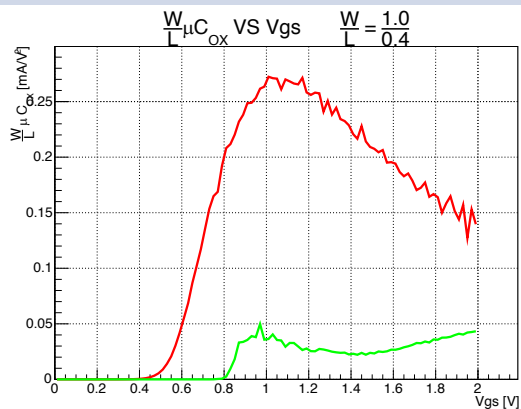
- 室温
- 極低温(3K)

$L = 0.4 \mu m$

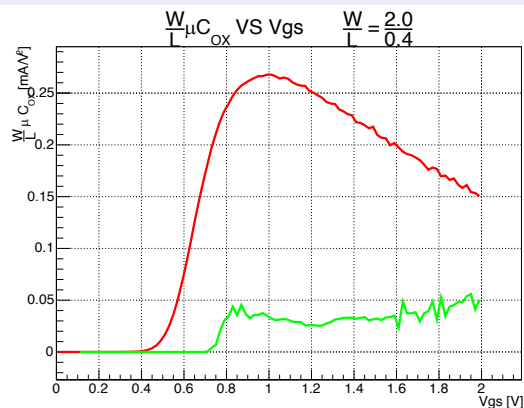
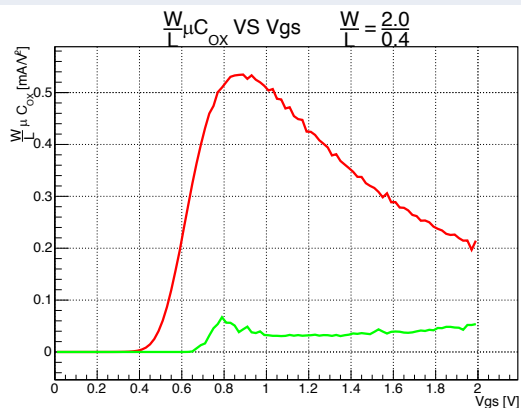
$L = 1 \mu m$

$L = 5 \mu m$

$W = 1 \mu m$

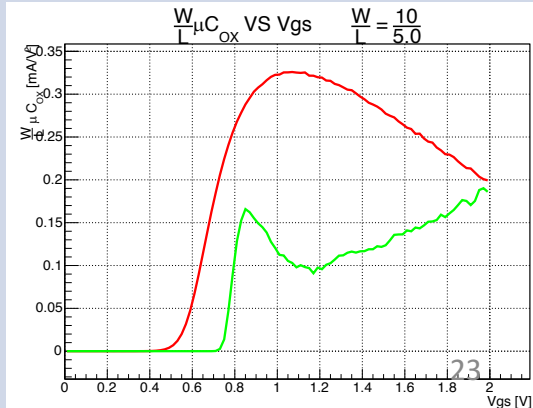
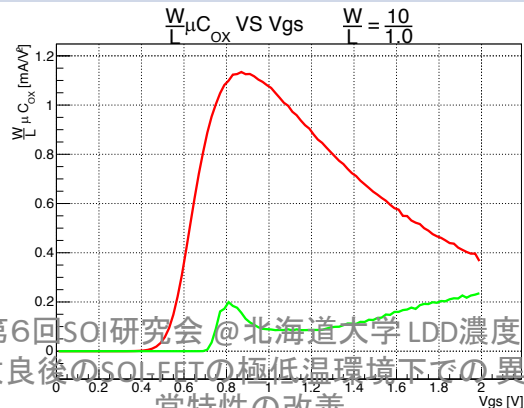
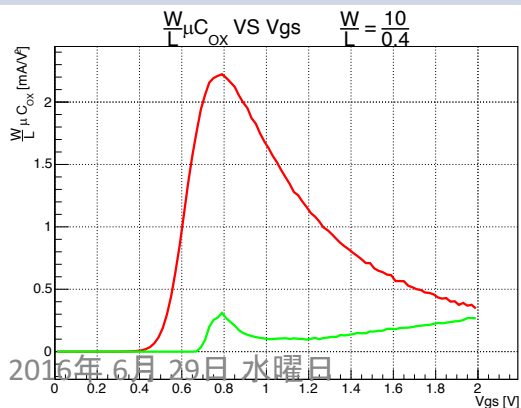


$W = 2 \mu m$



— 室温
— 極低温(3K)

$W = 10 \mu m$



2016年6月29日 水曜日

第6回SOI研究会 @ 北海道大学 LDD濃度改良後のSOI-FETの極低温環境下での異常特性の改善

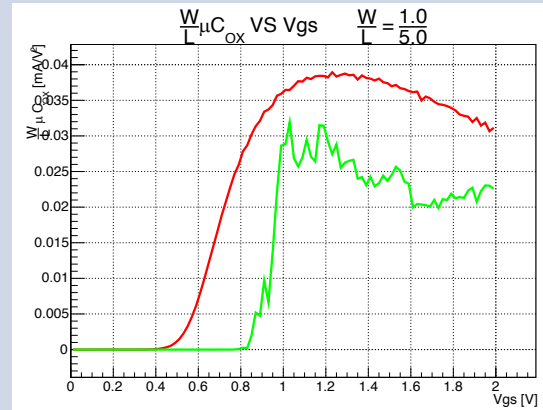
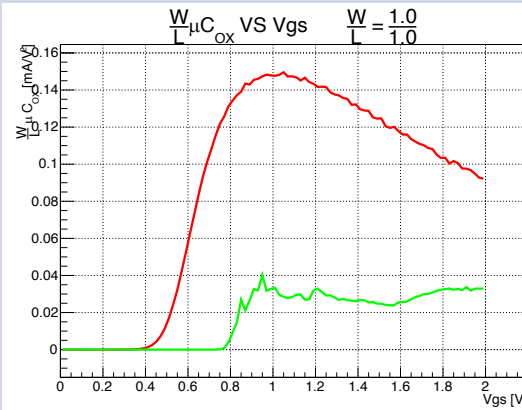
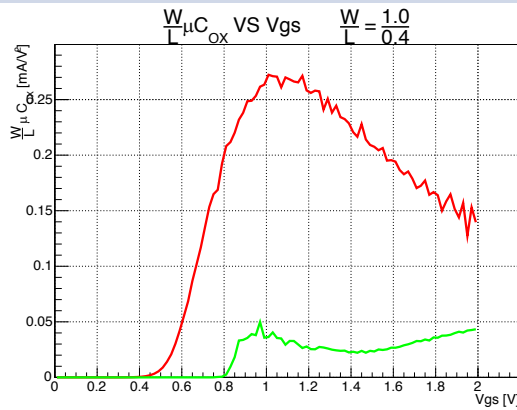
23

$L = 0.4 \mu\text{m}$

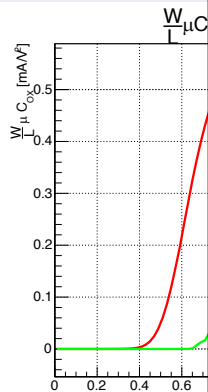
$L = 1 \mu\text{m}$

$L = 5 \mu\text{m}$

$W = 1 \mu\text{m}$



$W = 2 \mu\text{m}$

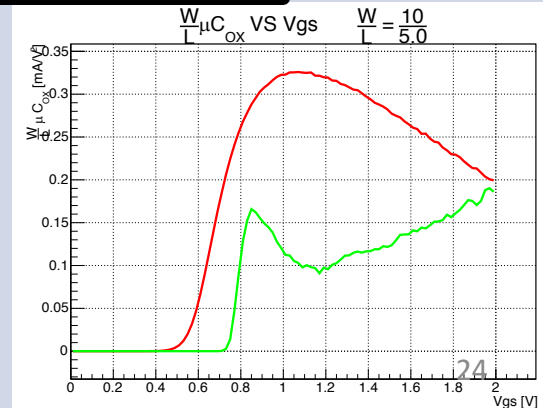
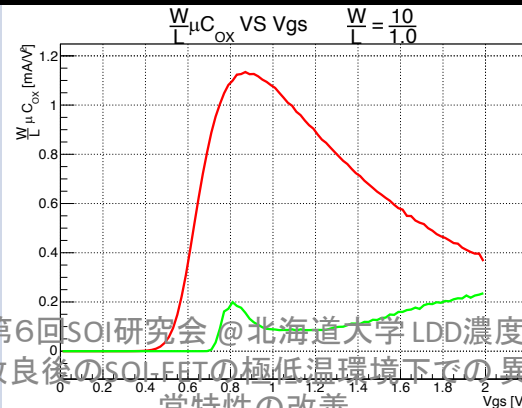
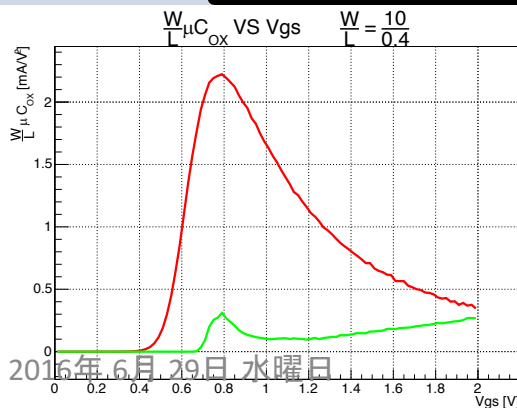


極低温環境下で、 V_{ds} が低い領域では、
ドレイン抵抗が高くなるので、
 $\mu C(W/L)$ 値は低く出る。

飽和領域で、移動度比を推定する

晶
低温(3K)

$W = 10 \mu\text{m}$



2016年6月29日 水曜日

第6回SOI研究会 @ 北海道大学 LDD濃度
改良後のSOI-FETの極低温環境下での異
常特性の改善

飽和領域

I_{ds} VS V_{gs} カーブ @ $V_{ds} = 1.80V$

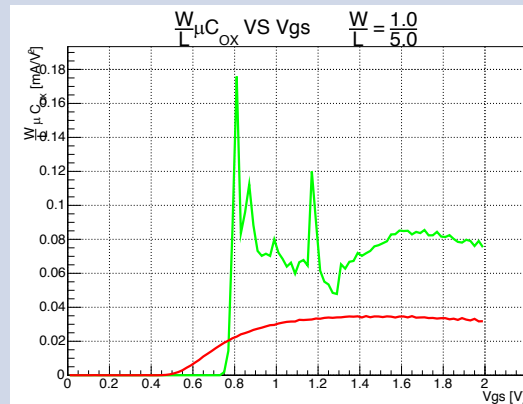
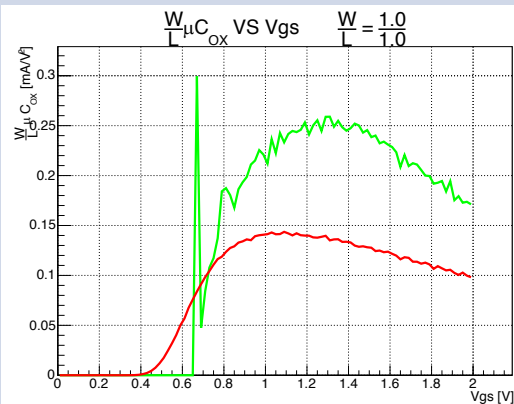
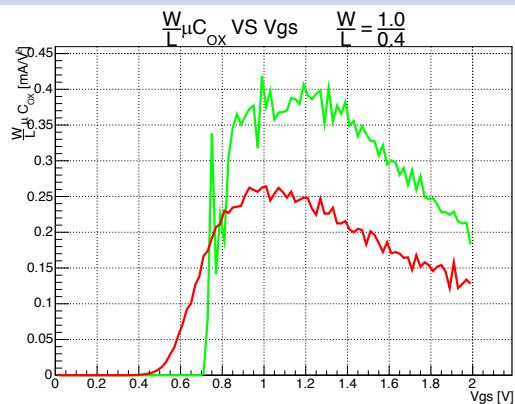
- 室温
- 極低温(3K)

$L = 0.4 \mu\text{m}$

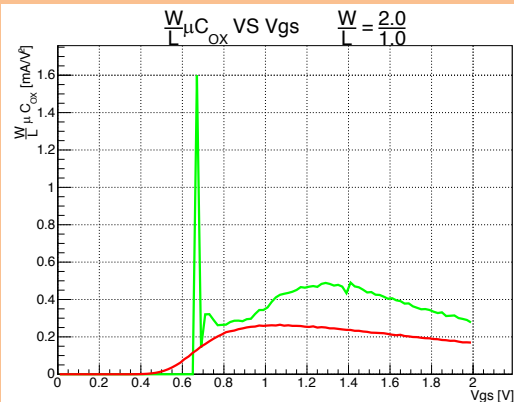
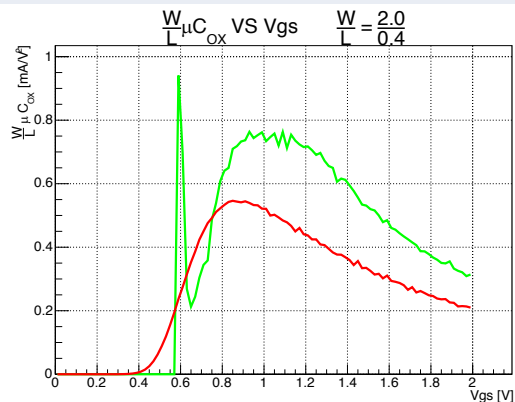
$L = 1 \mu\text{m}$

$L = 5 \mu\text{m}$

$W = 1 \mu\text{m}$



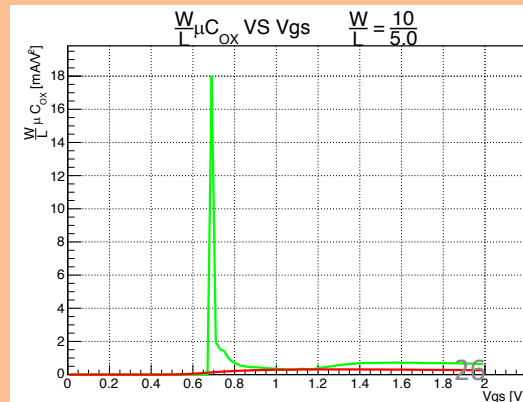
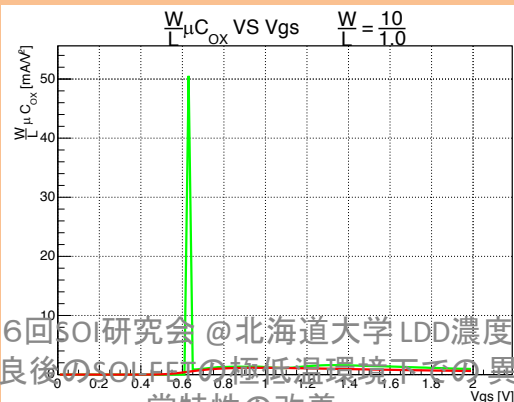
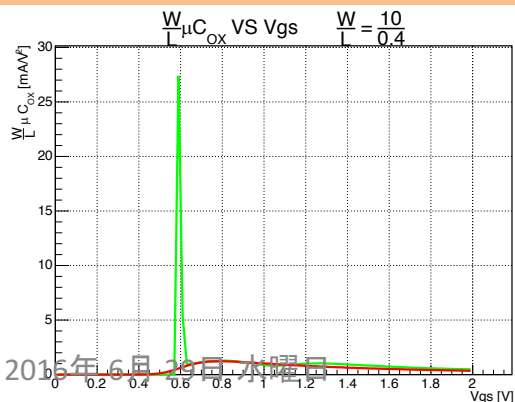
$W = 2 \mu\text{m}$



軸のスケールを
調整し直す

— 室温
— 極低温(3K)

$W = 10 \mu\text{m}$



2015年6月29日 水曜日

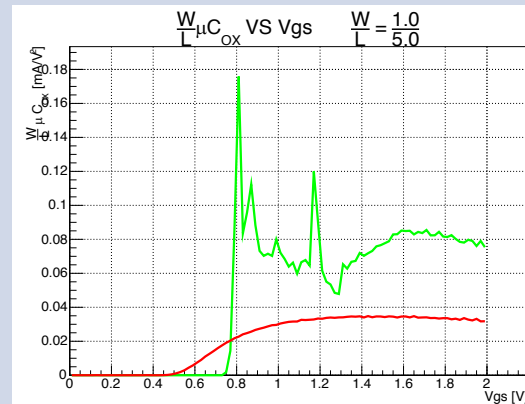
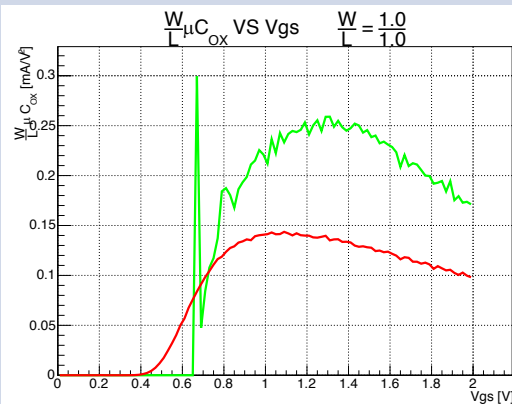
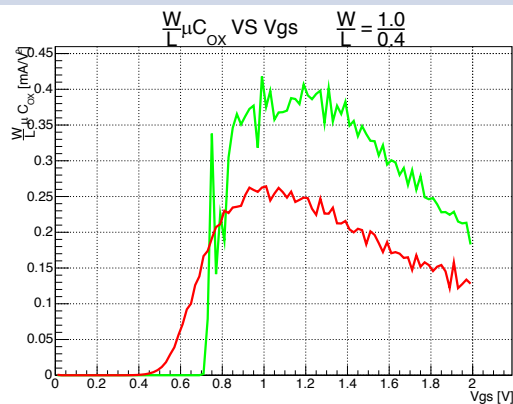
第6回SOI研究会 @北海道大学 LDD濃度
改良後のSOI-FETの極低温環境下での異
常特性の改善

$L = 0.4 \mu\text{m}$

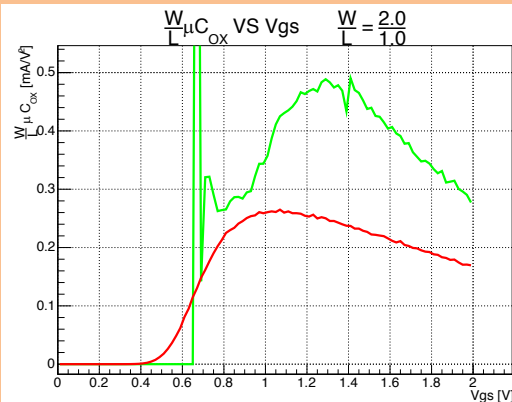
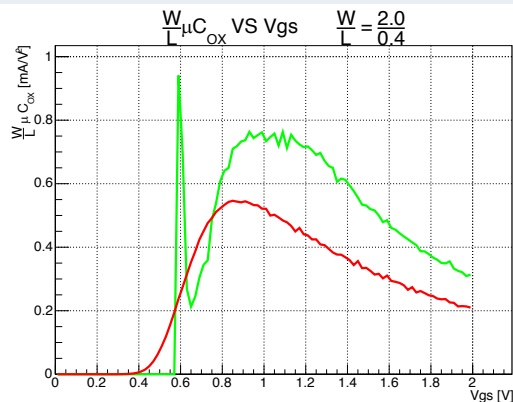
$L = 1 \mu\text{m}$

$L = 5 \mu\text{m}$

$W = 1 \mu\text{m}$



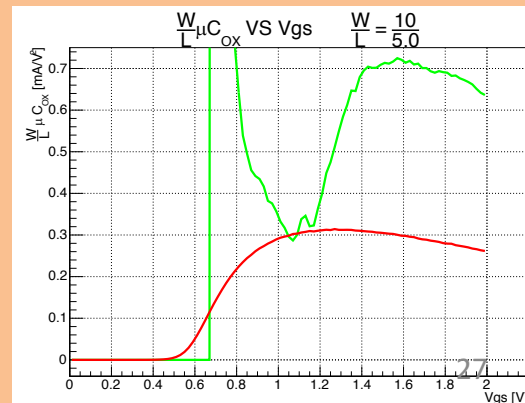
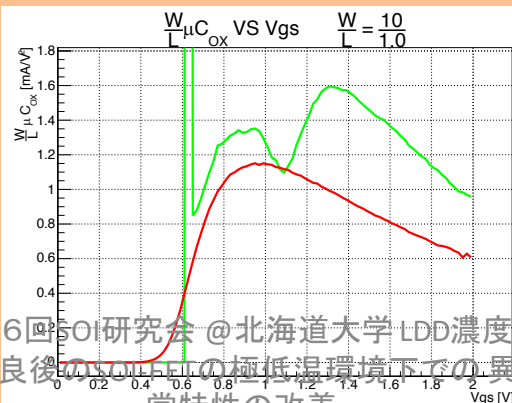
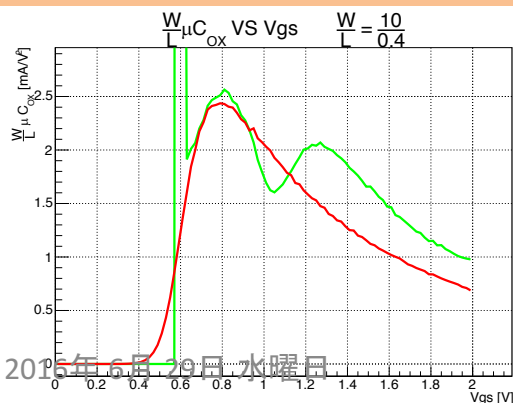
$W = 2 \mu\text{m}$



軸のスケールを
調整し直す

— 室温
— 極低温(3K)

$W = 10 \mu\text{m}$



2015年6月29日 水曜日

第6回SOI研究会 @北海道大学 LDD濃度
改良後のSOI-HEMTの極低温環境下での異
常特性の改善

24

移動度についての検証

3Kでのキャリア移動度は常温のと比べて約2倍ほど大きくなると言われている。
本測定で移動度がどれだけ大きくなっているか検証する

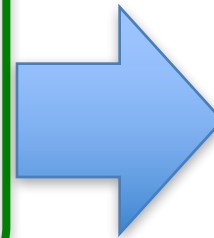
線形領域・飽和領域でのドレイン電流の式は以下のようになる

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{ds}(linear) = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left\{ (V_{gs} - V_{th}) V_{ds} - \frac{1}{2} V_{ds}^2 \right\} \\ I_{ds}(saturated) = \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2 \end{array} \right.$$

この式を変形すると

$$\mu C_{OX} \frac{W}{L} (linear) = - \frac{\partial^2 I_{ds}}{\partial V_{ds}^2}$$

$$\mu C_{OX} \frac{W}{L} (saturated) = 2 \left(\frac{\partial \sqrt{I_{ds}}}{\partial V_{gs}} \right)$$



常温と3Kでの $\mu C_{OX} W/L$ の値の
比がそのまま移動度の比

移動度についての検証

3Kでのキャリア移動度は常温のと比べて約2倍ほど大きくなると言われている。
本測定で移動度がどれだけ大きくなっているか検証する

線形領域・飽和領域でのドレイン電流の式は以下のようになる

$$\begin{cases} I_{ds}(linear) = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \{ (V_{gs} - V_{th}) - \frac{R_d I_{ds}}{W} \} \\ I_{ds}(saturated) = \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_{th})^2 \end{cases}$$

線形領域において、
Rdが低く出る異常が見られ、
uC*(W/L)値が常温に比べ
3Kの時の方が小さくなる

この式を変形すると

$$\mu C_{OX} \frac{W}{L} (linear) = - \frac{\partial^2 I_{ds}}{\partial V_{ds}^2}$$

$$\mu C_{OX} \frac{W}{L} (saturated) = 2 \left(\frac{\partial \sqrt{I_{ds}}}{\partial V_{gs}} \right)$$

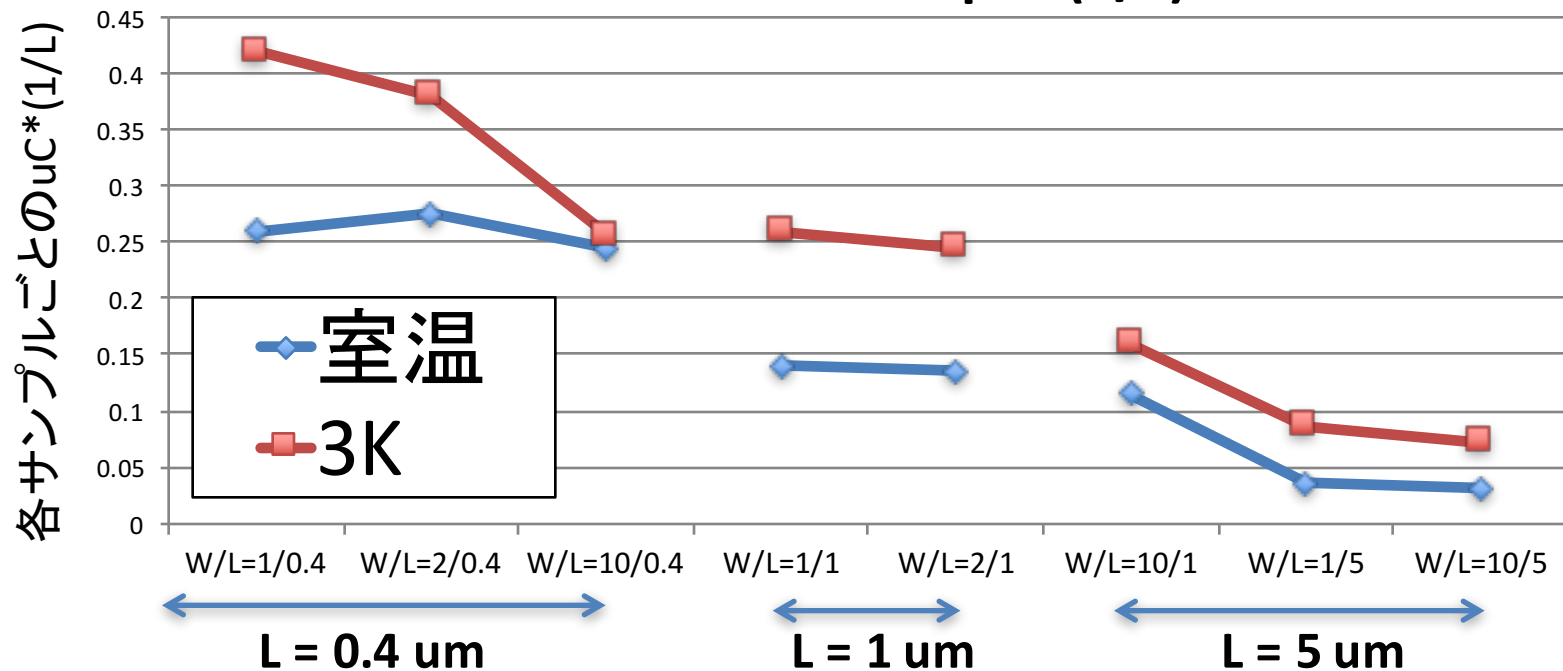
飽和領域のみ検証

常温と3KでのuCW/Lの値の
比がそのまま移動度の比

移動度比(3K/常温) 結果

いずれのサンプルも3Kになると移動度が大きくなるような結果になったが、移動度比の大きさはサンプルごとにばらつきがあるように見えますが、移動度の上昇は観測できているだろう

各サンプルごとの $\mu C^*(1/L)$



Nch ST2 schematic

