

COMSOL Multiphysics® Ver.5.3 専門モジュールイントロダクション

# 半導体モジュール

基本レベルにおける半導体装置の詳細解析

製品説明

<https://www.comsol.jp/semiconductor-module>

計測エンジニアリングシステム株式会社

東京都千代田区内神田 1-9-5 井門内神田ビル 5F

2017.6.7

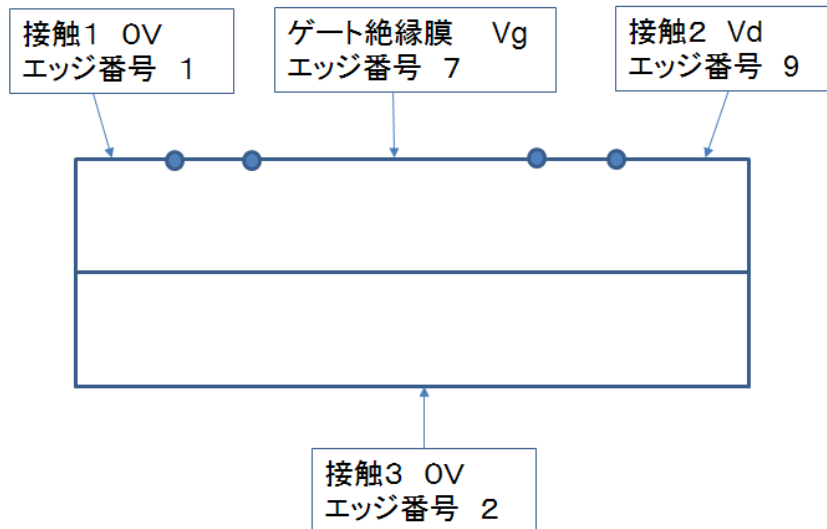
## 1. 専門モジュールイントロダクションの目的

COMSOL Multiphysics®の各専門モジュールにおける基本的な問題を取り上げ、検討したい分野で操作手順をすぐに試すことができるようにすることが目的です。

COMSOL Multiphysics®トライアル版を受領後、本書の内容をトレースすることでトライアル期間を有効につかうことができるでしょう。

## 2. チュートリアル

MOSFET の解析手順を示します。



出典：INTRODUCTION TO Semiconductor Module p. 17 以降

### 手順

#### モデルウィザード

1. デスクトップの COMSOL アイコンをダブルクリックします。ソフトウェアが起動すると画面にモデルウィザードを使う（COMSOL モデルを新規作成）かブランクモデルを使う（手動で COMSOL モデルを新規作成）かを選択する画面が表示されます。ここではモデルウィザードを選択します。COMSOL がすでに起動している場合にはファイルメニューで新規を選択後にモデルウィザードを選択します。



2. 空間次元を選択ウィンドウで 2D をクリックします。

3. フィジックスを選択ツリーで半導体を展開し半導体(semi)をダブルクリックします。すると、追加フィジックス選択リストに表示されます。別の方法として、半導体(semi)を選択し、追加ボタンを押す方法があります。
4. スタディをクリックします。
5. 標準スタディの下のスタディツリーで定常を選択します。
6. 完了をクリックします。

## グローバル定義

### パラメタ

1. ホームツールバーでパラメタをクリックします。
2. 設定ウィンドウで、以下を設定します。

Vd 10[mV]

Vg 2[V]

#### ▲ グローバル定義

P1 パラメーター: パラメーター

名前	式	値
Vd	10[mV]	0.01 V
Vg	2[V]	2 V

## ジオメトリ 1

1. モデルビルダのコンポーネント 1 の下のジオメトリ 1 をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、単位セクションに行き、長さ単位リストで、 $\mu\text{m}$  を選択します。

長さ単位:

$\mu\text{m}$

## 長方形 1

1. モデルビルダで、ジオメトリ 1 を右クリックし、矩形を選択します。
2. 設定ウィンドウで、サイズセクションに行きます。幅に 3 を、高さに 0.7 を入力します。

### ▼ オブジェクトタイプ

タイプ:

### ▼ サイズおよび形状

幅:   $\mu\text{m}$

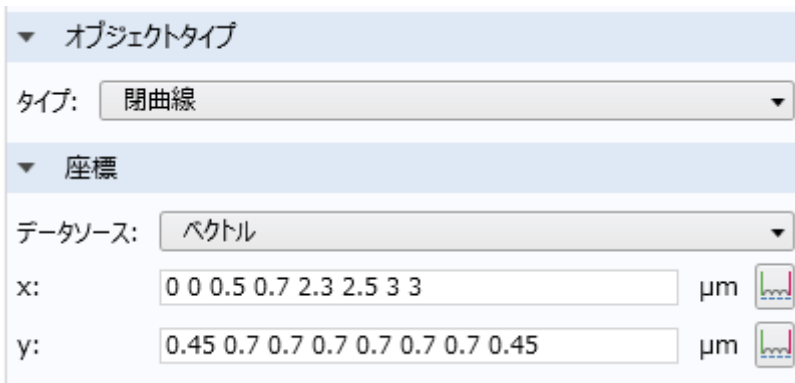
高さ:   $\mu\text{m}$

### ポリゴン 1

ソース、ドレイン、ゲート面を定義するための点を含むポリゴンを追加します。

1. ジオメトリ 1 を右クリックし、ポリゴンを選択します。
2. 設定ウィンドウで、オブジェクトタイプセクションに行きます。閉曲線を選択します。
3. 座標セクションで以下を入力します。

```
x 0 0 0.5 0.7 2.3 2.5 3 3
y 0.45 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.7 0.45
```



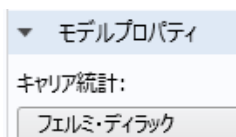
4. 「全オブジェクトを作成」をクリックします。

### 材料

1. ホームツールバーで、材料を追加をクリックします。
2. 材料を追加ウィンドウで、半導体の下のツリーで、**Si-Silicon** を選択します。
3. 「コンポーネントに追加+」 ボタンをクリックします。

### 半導体

1. モデルビルダーで半導体(semi)をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、モデルプロパティセクションに行きます。キャリア統計リストでフェルミ-ディラックを選択します。



### 解析的ドーピングモデル 1

1. フィジックスツールバーで、ドメインメニューをクリックし、解析的ドーピングモデルを選択します。
2. 設定ウィンドウで、ドメイン選択セクションに行きます。選択リストから、全ドメインを選択します。

3. 不純物セクションに行きます。

不純物タイプリストから、アクセプタドーピング(p型)を選択します。

$N_{A0}$  テキストフィールドで、 $1e17[1/cm^3]$ を入力します。

### 解析的ドーピングモデル2

1. フィジックスツールバーで、ドメインメニューをクリックし、解析的ドーピングモデルを選択します。

2. 設定ウィンドウで、ドメイン選択セクションに行きます。選択リストで、全ドメインを選択します。

3. 分布セクションで、リストからボックスを選択します。

ここで、ガウス型ドーピング分布を定義する際、矩形の一定ドーピング領域が定義されます。ガウス分布の裾野はその矩形領域から離れたところに設定されます。

まず、一様なドーピング領域の左下端を定義します。

1. 均一領域セクションに行きます。

ベース位置  $r_0$  ベクトルを設定します。

0[um]    x

0.6[um]    y

2. ドーピング領域の幅と奥行を定義します。

W 編集フィールドで、0.6[um]

D 編集フィールドで、0.1[um]

を入力します。

3. 不純物セクションに行きます。

不純物タイプリストで、ドナードーピング(n型)を選択します。

ドナー濃度  $N_{D0}$  編集フィールドで、 $1e20[1/cm^3]$  を入力します。

続いて、ガウス分布の裾野の長さを定義します。逆のタイプの背景ドーパント分布の中へドーピングを行なう場合、この設定はジャンクション深さを既定します。このモデルでは、異なる長さスケールが x と y 方向に用いられます。

4. プロフィールセクションで、それぞれの方向に異なる長さを指定にチェックを入れます。

5.  $d_j$  ベクトルを以下のように規定します。

$$\begin{array}{ll} 0.2[\mu\text{m}] & x \\ 0.25[\mu\text{m}] & y \end{array}$$

最後に、一定の背景ドーピングレベルを規定します。

6. バックグラウンドドーピング濃度  $N_b$  リストで、アクセプタ濃度(semi/adm1)を選択します。

▼ 分布

ボックス

▼ 不純物

不純物タイプ:

ドナードーピング (n型)

ドナー濃度:

$N_{D0}$  1e20[1/cm<sup>3</sup>]

▼ 均一領域

ベース:

コーナー

ベース位置:

$r_0$  0[um]  
0.6[um]

幅:

$W$  0.6[um]

奥行:

$D$  0.1[um]

▼ プロファイル

均一領域から離れたプロファイル:

ガウシアン

プロファイル長さスケールを指定:

接合深さ

それぞれの方向に異なる長さを指定

Junction depth, asymmetric:

$d_j$  0.2[um]  
0.25[um]

バックグラウンドドーピング濃度:

$N_b$  アクセプタ濃度 (semi/adm1)

### 解析的ドーピングモデル3

ドレインに同様なガウス型ドーピングプロファイルを追加します。

1. フィジックスツールバーでドメインメニューをクリックし、解析的ドーピングモデルを選択します。

2. 設定ウィンドウで、ドメイン選択セクションに行きます。選択リストから、全ドメインを選択します。

3. 分布セクションで、リストからボックスを選択します。

4. 均一領域セクションに行き、

ベース位置  $r_0$  ベクトルを

2.4[um] x

0.6[um] y

W 編集フィールドで、1.6[um]

D 編集フィールドで、0.25[um]

を設定します。

5. 不純物セクションに行きます。

不純物タイプリストで、ドナードーピング(n 型)を選択します。

ドナー濃度  $N_{D0}$  で、 $1e20[1/cm^3]$ を入力します。

6. プロフィールセクションで、それぞれの方向に異なる長さを指定にチェックを入れます。

$d_j$  ベクトルを

0.2[um] x

0.25[um] y

を設定します。

7. バックグラウンド濃度  $N_b$  リストで、アクセプタ濃度(semi/adm1)を選択します。



▼ 分布
ボックス
▼ 不純物
不純物タイプ:
ドナードーピング (n型)
ドナー濃度:
$N_{D0}$ 1e20[1/cm^3]
▼ 均一領域
ベース:
コーナー
ベース位置:
$r_0$ 2.4[um] 0.6[um]
幅:
$W$ 1.6[um]
奥行:
$D$ 0.25[um]
▼ プロファイル
均一領域から離れたプロファイル:
ガウシアン
プロファイル長さスケールを指定:
接合深さ
<input checked="" type="checkbox"/> それぞれの方向に異なる長さを指定
Junction depth, asymmetric:
$d_j$ 0.2[um] 0.25[um]
バックグラウンドドーピング濃度:
$N_b$ アクセプタ濃度 (semi/adm1)

次は、コンタクトとゲートに関する境界条件を設定します。

## 接触

まず、ソースの接点を追加します。

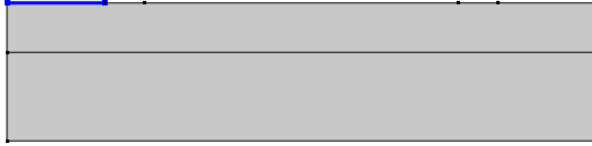
1. フィジックスツールバーで、境界メニューをクリックし、接触を選択します。

接触はいろいろな種類の金属-半導体界面を定義するために使われます。この例では、ソースを定義するために、デフォルトの理想オーム則を使います。

2. 境界 5 のみを選択します。

(注：選択をペーストボタンが選択枠の横にあるので、それを使って番号を入力できる。)

COMSOLでの接触は、ターミナル境界条件です。デフォルトでは0Vの固定電位が印加されます。この例ではソースが接地されているので妥当です。ターミナルはまた、一定電流を規定するか、外部回路との接続のために使われます。



▼ ターミナル

ターミナル名:  
1

ターミナルタイプ:  
電圧

電圧:  
 $V_0$  0[V]

▼ 接触 タイプ

タイプ:  
理想オーム則

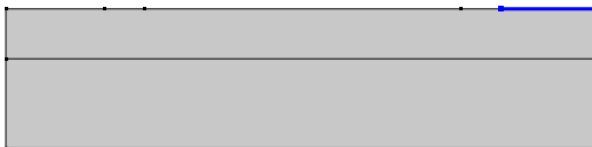
## 接触 2

ドレインを定義するために接触を追加します。

1. フィジックスツールバーでは、境界メニューをクリックし、接触を選択します。
2. 境界 9 のみを選択します。

ドレイン電圧をすでに定義したパラメタによって決定できるようにします。

3. 設定ウィンドウで、ターミナルセクションに行きます。電圧  $V_0$  編集フィールドで、 $V_d$  を入力します。



▼ ターミナル

ターミナル名:  
2

ターミナルタイプ:  
電圧

電圧:  
 $V_0$  Vd

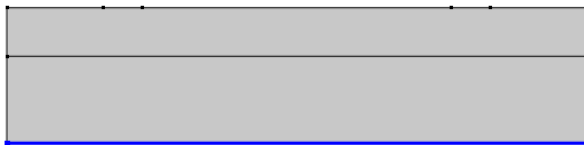
▼ 接触タイプ

タイプ:  
理想オーム則

### 接触 3

本体の電位を 0V にするために接触を追加します。

1. フィジックスツールバーで、境界をクリックし、接触を選択します。
2. 境界 2 のみを選択します。



▼ ターミナル

ターミナル名:  
3

ターミナルタイプ:  
電圧

電圧:  
 $V_0$  0[V]

▼ 接触タイプ

タイプ:  
理想オーム則

### ゲート絶縁膜 1

ゲートを設定します。ゲート誘電体は陽的には表現されていません。その代わりに、ゲート絶縁膜境界条件はゲート接点と酸化薄膜の両方を表現します。

1. フィジックスツールバーでは、境界メニューをクリックし、ゲート絶縁膜を選択します。

ゲート絶縁膜特性もまたターミナルです。ターミナルの電位や電荷を固定できます。回路に接続することも出来ます。

注意：電荷設定はターミナル上の電荷を規定し、界面に捕捉された電荷とは関係がありません。

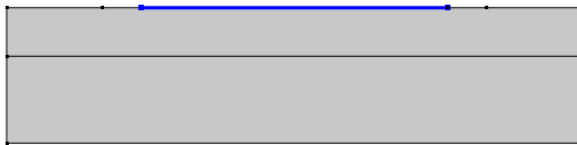
ゲートへの印加電圧は、前出のパラメタで規定されます。

2. 電圧  $V_0$  に、 $V_g$  を入力します。
3. ゲート接点セクションに行きます。

酸化物比誘電率  $\epsilon_{ins}$  に、4.5

酸化物厚  $d_{ins}$  に、30[nm]を設定します。

4. 境界 7 のみを選択します。



▼ ターミナル

ターミナル名:  
4

ターミナルタイプ:  
電圧

電圧:  
 $V_0$   $V_g$

▼ ゲート接触

酸化物比誘電率:  
 $\epsilon_{ins}$  4.5

酸化物厚:  
 $d_{ins}$  30[nm]

#### 捕獲アシスト再結合 1

再結合/生成メカニズムはある範囲でモデルに追加できます。この場合では、捕獲アシスト再結合を追加します。その時、デフォルトである Shockley-Reed-Hall モデルを使います。

1. フィジックスツールバーで、ドメインメニューをクリックし、生成-再結合>捕獲アシスト再結合を選択します。
2. 設定ウィンドウで、ドメイン選択セクションに行き、選択リストから、全ドメインを選択します。

▼ 捕獲アシスト再結合

領域捕獲モデル:  
Shockley-Read-Hall モデル

▼ Shockley-Read-Hall 再結合

電子寿命 (SRH):  
 $\tau_n$  材料データ参照

ホール寿命 (SRH):  
 $\tau_p$  材料データ参照

欠陥準位と真性準位間のエネルギー差:  
 $\Delta E_t$  0[V]

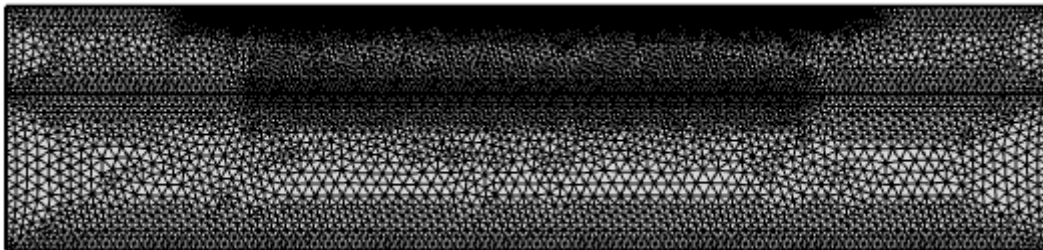
注：念のため、モデルツリーの様子を示しておく。

- 解析的ドーピングモデル 1
- 解析的ドーピングモデル 2
- 解析的ドーピングモデル 3
- 接触 1
- 接触 2
- 接触 3
- ゲート絶縁膜 1
- 捕獲アシスト再結合 1

### メッシュ 1

フィジックススペースのメッシュ設定を使うことができます。

1. モデルビルダで、メッシュ 1 を右クリックし、全て作成を選択します。



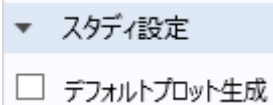
## スタディ 1

スタディを設定する前に、ドーピングが正しく設定されたかのチェックをします。そのために、スタディで初期値を取得します。

1. スタディ 1 をクリックします。

デフォルトプロットを生成を無効にします。

2. 設定ウィンドウで、スタディ設定セクションに行きます。デフォルトプロットを生成チェックボックスをクリアします。



3. スタディツールバーで、初期値を取得をクリックします。

## 結果

### 2D プロットグループ 1

モデルのドーパント分布をチェックするために 2D プロットグループを追加します。

1. ホームツールバーで、プロットグループ追加をクリックし、2D プロットグループを選択します。
2. プロットグループをリネームするために、ラベルに”Signed Dopant Concentration”を入力します。
3. いまリネームした Signed Dopant Concentration ツールバーに行き、サーフェスをクリックします。

Signed Dopant Concentration(Nd-Na)をプロットします。この量は、正味ドナードーピングに対して正値をとり、正味アクセプタードーピングに対して負値をとります。

4. 結果 : Signed Dopant Concentration の下で、サーフェス 1 をクリックします。
5. 設定ウィンドウで、表式の置換 (式セクションの右上コーナーにある) をクリックします。モデル : コンポーネント 1 : 半導体 : キャリア濃度 : semi.Ndoping-符号付ドーパント濃度をダブルクリックします。
6. 「プロット」 をクリックします。

## スタディ 1

### ステップ 1 : 定常

レジスタの印加電圧を決定するために定常計算を行います。

この計算では、 $V_d$  を 10mV とし、 $V_g$  をスイープします。

1. スタディ 1 : ステップ 1 : 定常をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、スタディ拡張セクションをクリックして展開します。  
スタディ拡張パネルで、パラメトリックスイープを行います。
3. スタディ拡張セクションに行き、補助スイープチェックボックスを選択します。
4. スイープタイプリストで、全組み合わせを選択します。このスイープは2個のパラメータの各組み合わせをスイープします。
5. 「追加+」をクリックします。テーブルに、以下を設定します。

$V_d$  0.01

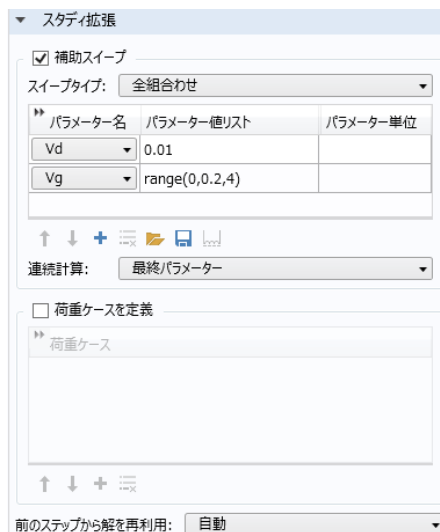
6. 「追加+」をクリックし、 $V_g$  を選択します。
7. 「範囲」をクリックし、範囲ダイアログボックスに行きます。  
スタートに、0  
ステップに、0.2  
停止に、4

を入力します。

8. 「置換」をクリックします。ゲート電圧は 0 と 4V の間をスイープされます。

デフォルトで、設定の継続は、最終パラメータ（ここでは  $V_g$ ）に設定されています。この設定によって、ソルバーが前の解  $V_g$  を今回の計算の初期見積もりとして使って新しい  $V_g$  の計算を行うようになっています。もし必要ならばリストに記載されていない  $V_g$  の数値で計算を行うこともできます。

9. 前のステップから解を再利用から、自動を選択します。



10. ホームツールバーで「計算」をクリックします。

## 結果

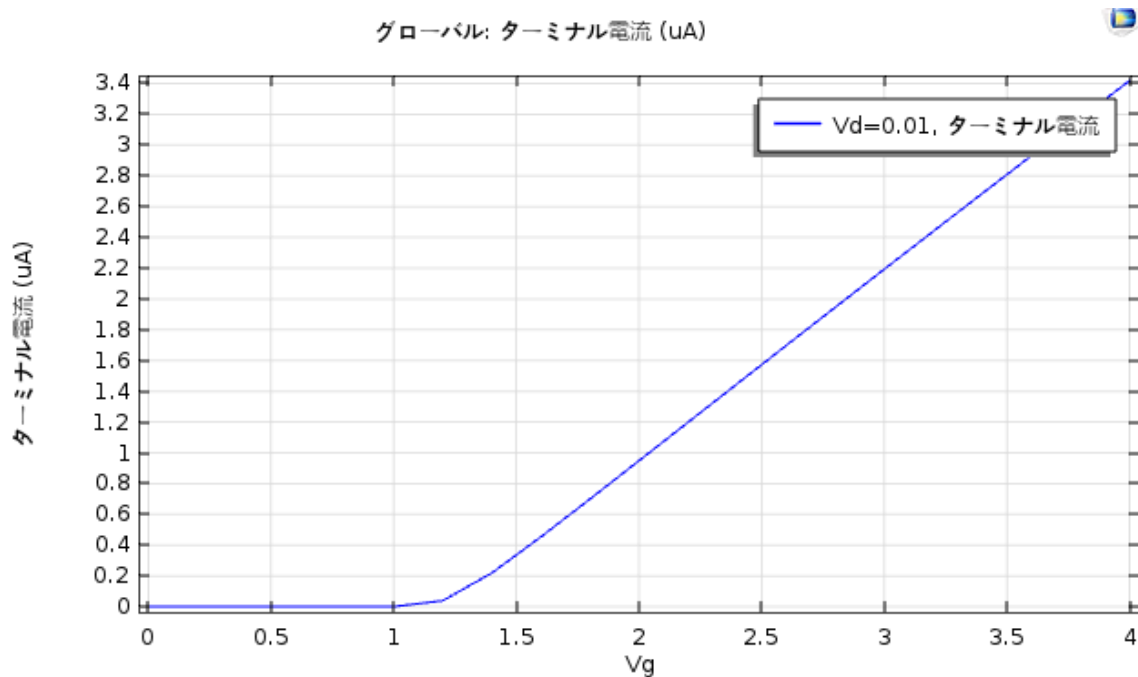
1 Dプロットグループを追加して、ソース電流 vs ゲート電圧 をプロットします。

1. ホームツールバーで、プロットグループを追加し、1 Dプロットグループを選択します。
2. リネームするために、"Id vs Vg (Vd=10mV)"をラベルに入力します。
3. 1 Dプロットグループツールバーで、グローバルをクリックします。

ポスト処理メニューはたくさんのプロット変数を用意しています。ターミナル1から流出する電流を選択します。

4. グローバルの設定ウィンドウで、表式の置換をクリックします。メニューで、モデル：コンポーネント1：半導体：ターミナルグループ：semi.I0\_2-ターミナル電流 をダブルクリックします。

5. 単位を  $\mu\text{A}$  に変更し、「プロット」をクリックします。



この結果から、トランジスタの閾値電圧  $V_T$  は約  $1.2\text{V}$  であることがわかります。これは参考文献 (S.M.Sze and K.K.Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp.305-306, 2007) にある理論値と比較できます。この理論値は  $1.20\text{V}$  ですので、今回の計算結果と良く一致しています。



## スタディ 2

次に、ゲート電圧をある範囲で変化させたとき、ドレイン電圧の関数としてソース電流をプロットするためのスタディを追加します。

1. ホームツールバーで、スタディ追加をクリックします。
2. スタディ追加ウィンドウで、スタディのサブセクションに行き、標準スタディで定常を選択します。
3. スタディ追加ウィンドウのツールバーで「+スタディ追加」をクリックします。
4. ホームツールバーで、「スタディの追加」をクリックし、スタディ追加ウィンドウを閉じます。

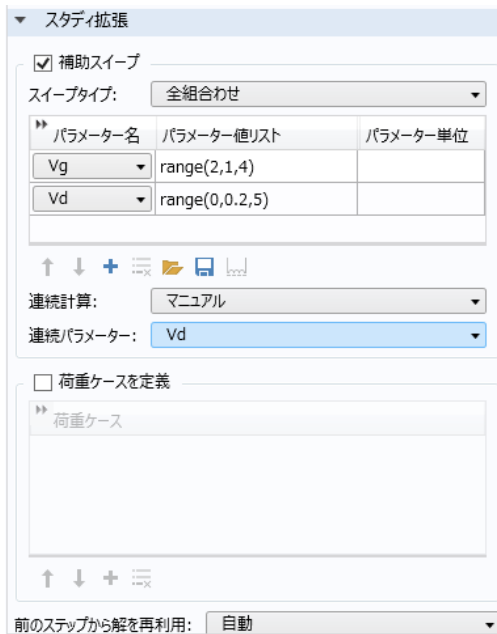
### ステップ 1 : 定常

1. スタディ 2 で、ステップ 1 : 定常をクリックします。
2. 設定ウィンドウで、スタディ拡張セクションに行きます。
3. 補助スイープのチェックボックスを選択します。
4. スイープタイプリストから、全組み合わせを選択します。「追加+」をクリックします。

$V_g$  を選択します。

それでは、 $V_g$  についてパラメトリックスイープの設定を行います。

5. 範囲をクリックし、範囲ダイアログボックスに行きます。  
スタートに、2  
ステップに、1  
停止に、4
6. 置換をクリックします。
7. 設定ウィンドウで、スタディ拡張で、追加+をクリックし、 $V_d$  を選択します。
8. 範囲をクリックし、範囲ダイアログボックスに行きます。  
スタートに、0  
ステップに、0.2  
停止に、5
9. 置換をクリックします。
10. 設定ウィンドウのスタディ拡張セクション、連続計算リストで、マニュアルを選択し、連続パラメタリストで  $V_d$  を選択します。  
連続ソルバーは  $V_d$  を内部スイープします。そのとき、解は  $V_d$  の数値によって変化します。
11. 前のステップから解を再利用で、自動を選択します。



1 2. ホームツールバーで、「計算」をクリックします。

## 結果

チャネルのピンチオフが、電子濃度のプロットと、電位分布で  $V_d$  を 0,1,5V に変えたときに観察されます。

## 電子濃度(semi)

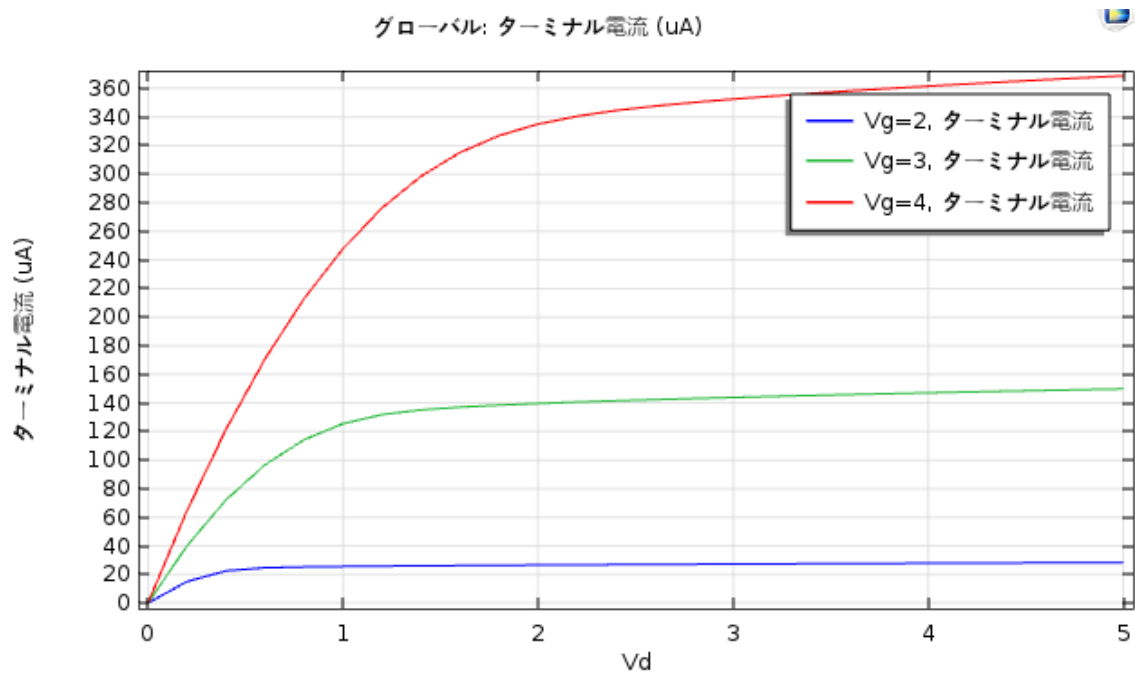
1. 結果の下の電子濃度(semi)をクリックします。  
デフォルト表示は、 $V_d=5V$ ,  $V_g=4V$  の場合です。
2. その 2Dプロットグループの設定ウィンドウのデータセットセクションで、 $V_d$  を 1V、0V に変更して都度プロットをクリックしてみましょう。

## 電位(semi)

1. 結果の下の電位(semi)をクリックします。
2.  $V_d$  を 5V, 1V, 0V に変更してプロットします。  
ピンチオフ効果は 5V で顕著です。
- 1 Dプロットグループを追加し、ドレーン電流 vs ドレーン電圧を表示させます。
3. ホームツールバーでプロットグループ追加を選択します。1 Dプロットグループを選択します。
4. リネームするために、“Id vs. Vd”をラベルに入力します。
5. 設定ウィンドウで、データセクションに行き、データセットリストで、スタディ 2/解 2 を選択します。

### 1 Dプロットグループ6

1. Id vs. Vd ツールバーから、グローバルをクリックします。
2. 結果 : Id vs. Vd でグローバル1 をクリックします。
3. 設定ウィンドウで、表式を置換をクリックし、メニューからモデル : コンポーネント 1 : 半導体 : ターミナルグループ : semi.I0\_2-ターミナル電流 をダブルクリックします。
4. 単位を uA に変更します。
5. 「plot」 をクリックします。



以上