

SmartDRC/LVSでの ウェル近接とSTIストレス効果 パラメータの抽出

はじめに

90nm以降のプロセスでは、ウェル近接とシャロートレンチアイソレーション (STI) のストレス効果が、MOSデバイスの特性を変化させる上でより顕著になります。これらの影響を考慮せずに、正確なポストレイアウトのSPICEシミュレーションを行うことはできません。BSIM4のような新しいSPICEデバイス・モデルは、ウェル近接とSTIストレスの効果をシミュレーションするためのパラメータを持っています。

シルバコのSmartDRC/LVSツールは、ポストレイアウトSPICEシミュレーションで使用できるウェル近接およびSTIストレス効果パラメータ計算のための特別な関数を提供します。この目的のために、汎用デバイスのPWRLファイルで使用できる3つの関数があります：

- `enclosure_distance()`
- `enclosure_distance_90d()` – 垂直方向の場合
- `enclosure_distance_0d()` – 並列の場合

どの機能を選択するかは、ユーザーの特定のニーズによって異なります。

エンクロージャの距離

ウェル近接と応力効果パラメータの計算は、エンクロージャ距離を介して行うことができます。SmartDRC/LVSには、エンクロージャ距離を計算するためのPWRL関数が用意されています。これらの関数は次のような構文になっています。

- `enclosure_distance (active , %MAX_CHECK_VALUE);`
- `enclosure_distance_90d(device_layer, target_layer, S_or_D_layer, %MAX_DISTANCE_VALUE);`
- `enclosure_distance_0d(device_layer, target_layer, S_or_D_layer, %MAX_DISTANCE_VALUE);`

入力層は伝統的な多角形でなければなりません。enclosure_distanceのレイヤーは、ピンレイヤーまたは補助レイヤーでなければなりません。また、他の関数では、すべてのレイヤーはデバイスレイヤー、ピンレイヤー、補助レイヤーのいずれかでなければなりません。

最大チェック値の大きな値（例えば5u）は避けることが推奨されます。

最初の関数(enclosure_distance)は、指定された測定層<active>のエンクロージャベクトルをデバイス形状に重ねて計算します。デバイス形状は、以下の条件を満たす必要があります。

- 四角である
- 計測層ポリゴンに完全に重なる
- デバイスを構成する図形の対向する2つの辺が測定レイヤーのエッジと一致する

enclosure_distance_0d()、enclosure_distance_90d()の関数については、デバイス構成する図形が以下の条件を満たす必要があります。

- 四角である
- DRCクリーンである

enclosure_distance()、enclosure_distance_0d()、enclosure_distance_90d()の3つの関数のいずれかを呼び出すとベクトル形式の変数になり、実際には2つの配列(a、b)を表していることになります。

LVSの抽出には、これら2つの関数の中央値が必要で、中央値はデバイス式計算機のmedian関数で求められます。

`median(variable_name, function_name)`

これは、定義ドメイン全体の中央値を返します。例：

```
s = enclosure_distance_0d(l1, l2, l3, 5.0)]
sa = median(s, a);
sb = median(s, b)
```

これらの関数からの4つの距離（中央値の上、下、左、右）は、SCA、SCB、SCCの計算に使用されません。enclosure_distance_90dは、ストレス効果のパラメータSA、SBとウェル近接効果のパラメータの両方を計算するために使用することができます。後者の場合、より多くのパラメータが存在し、計算もより複雑になります。

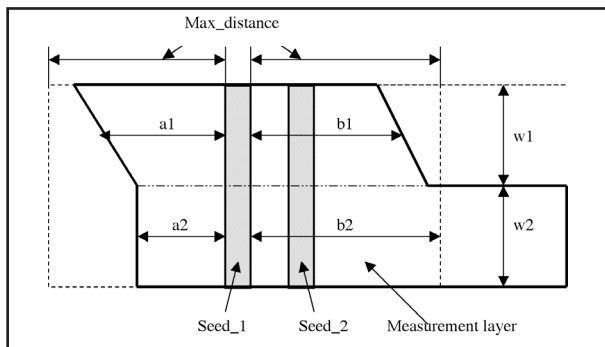


図1. デバイス形状Seed_1に対するエンクロージャ距離関数。測定層は2つの台形に分割されるため、enclosure vector は (a1, b1, w1) と (a2, b2, w2) の2つの三項を持つ。値b2はMAX_DISTANCE_VALUEで定義される。デバイス形状であるSeed_2は、別のエンクロージャ・ベクトルを持つことになる。

結果は、 $q = \text{enclosure_distance_0d}(\dots)$ のように変数に格納されますが、その変数は $\text{median}(q, \dots)$ のパラメータとしてのみ、あるいは $p = q$ のように他の変数を定義するため、 $s = (\text{condition}) ? p : q$ のように条件として使用されることがあります。

測定層ポリゴンは、層とデバイス形状の一致するエッジに平行な辺を持つ台形に分割されます。各台形は、エンクロージャ距離要素に3つの値 (a, b, w) を提供します (図1)。max_check_valueパラメータは探索窓の大きさを定義するために、a, bの最大値を定義します。

測定された層が複数のデバイスの種形状を覆っている場合、各種形状に対して個別にエンクロージャ距離を計算します。エンクロージャ・ベクトルの計算中は、他のデバイス形状はすべて無視されます。デバイス形状が必要な条件を満たさない場合、a, b, wの値は-1されます。

ウェル近接・エンクロージャ機能

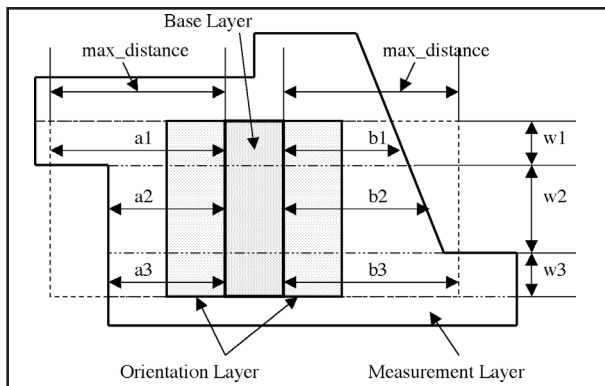


図2. PERPENDICULAR方向のオリエンタル層を引数としたEnclosure_distance_90d関数。測定層の重なり部分は3つの台形に分割されるので、出力される囲み距離は(a1, b1, w1), (a2, b2, w2), (a3, b3, w3)の3つの三組となる。値a1, b3はMAX_DISTANCE_VALUEで定義されます。

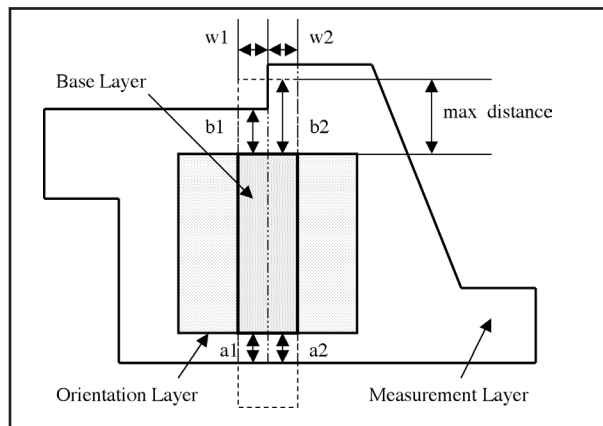


図3. 平行方向のオリエンタル層を引数としたEnclosure_distance_0d関数。測定レイヤーのポリゴンの重なり部分は2つの台形に分割されるので、出力される囲み距離は(a1, b1, w1) と (a2, b2, w2) の2つのトリプレットを持つことになる。値 b2 は MAX_DISTANCE_VALUE で定義される。

例

次の例は、ユーザー定義のPWRLプロシージャでエンクロージャ関数を使用する方法を示しています。

- 2つの変数による応力効果パラメータの計算 (ENCLOSURE_VECTOR関数と同等) $s = \text{enclosure_distance}(\text{dif}, 50);$
- 4つの変数による応力効果パラメータの計算 (ENCLOSURE_PERPENDICULAR関数と同等) $P = \text{enclosure_distance_90d}(\text{gate}, \text{dif}, \text{t_sd}, 50);$
- ウェル近接効果モデルのSCA、SCB、SCCパラメータに対するSC1、SC2、SC3、SC4距離の算出。

```

:
$device MOS(mos3) gate gate t_sd t_sd bulk <perim>
<dif> <ASDD> <D1> <NG> <G1> <seed> <well>
$spice_model "name_model"
[
$property W L AS AD PS PD AS1 AD1 SCA SCB
SCBW1 SCBW2 SCBL1 SCBL2 SCCW1 SCCW2
SCCL1 SCCL2 SCC SC1 SC2 SC3 SC4 s(u) sc sd ;

```

```

s = enclosure_distance (dif , 50); // in microns, 1e-6;
P = enclosure_distance_90d (gate, dif , t_sd, 50);
sc = 1e-6 * median(P, a);
sd = 1e-6 * median(P, b);

```

```

S1 = enclosure_distance_0d (gate, well, t_sd, 10);
Q = enclosure_distance_90d (gate, well, t_sd, 10);
SC2 = 1e-6 * median(S1, a);
SC4 = 1e-6 * median(S1, b);
SC1 = 1e-6 * median(Q, a);
SC3 = 1e-6 * median(Q, b);

```

注意

• s 関数 = enclosure_distance (dif, 50); の場合、s(u) はデバイスプロパティに書き込まれ、その結果、sa, sb の値がミクロン単位で得られます。

• enclosure_distance 関数を2つの変数の場合と4つの変数の場合の両方で計算したときに、出力パラメータ (sa と sb) の名前が同じで混乱しないよう、enclosure_distance_90d の出力パラメータは sc と sd という名前になっています。テストケースが示すように、これらの値は対で等しくなります：
sa=1.720u sb=7.280u sc=7.280u sd=1.720u

次に、これらの結果を基に、SCA、SCB、SCC の各パラメータを算出するための複雑な式は次のように記述されます。

...

SCREF=1e-6*0.95;

$$\text{SCA} = 1 / (W * L) * (\text{SCREF} * \text{SCREF}) * (W * (1 / \text{SC1} - 1 / (\text{SC1} + L)) + L * (1 / \text{SC2} - 1 / (\text{SC2} + W)) + W * (1 / (\text{SC3} + L)) + L * (1 / \text{SC4} - 1 / (\text{SC4} + W)));$$

$$\text{SCBW1} = 1 / (W * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 10 * \text{SC2} * \exp(-10 * \text{SC2} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * \text{SC2} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 10 * (\text{SC2} + W) * \exp(-10 * (\text{SC2} + W) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * (\text{SC2} + W) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCBW2} = 1 / (W * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 10 * \text{SC4} * \exp(-10 * \text{SC4} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * \text{SC4} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 10 * (\text{SC4} + W) * \exp(-10 * (\text{SC4} + W) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * (\text{SC4} + W) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCBL1} = 1 / (L * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 10 * \text{SC1} * \exp(-10 * \text{SC1} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * \text{SC1} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 10 * (\text{SC1} + L) * \exp(-10 * (\text{SC1} + L) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * (\text{SC1} + L) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCBL2} = 1 / (L * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 10 * \text{SC3} * \exp(-10 * \text{SC3} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * \text{SC3} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 10 * (\text{SC3} + L) * \exp(-10 * (\text{SC3} + L) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 100 * \exp(-10 * (\text{SC3} + L) / \text{SCREF}));$$

SCB = SCBW1 + SCBW2 + SCBL1 + SCBL2;

$$\text{SCCW1} = 1 / (W * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 20 * \text{SC2} * \exp(-20 * \text{SC2} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * \text{SC2} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 20 * (\text{SC2} + W) * \exp(-20 * (\text{SC2} + W) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * (\text{SC2} + W) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCCW2} = 1 / (W * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 20 * \text{SC4} * \exp(-20 * \text{SC4} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * \text{SC4} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 20 * (\text{SC4} + W) * \exp(-20 * (\text{SC4} + W) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * (\text{SC4} + W) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCCL1} = 1 / (L * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 20 * \text{SC1} * \exp(-20 * \text{SC1} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * \text{SC1} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 20 * (\text{SC1} + L) * \exp(-20 * (\text{SC1} + L) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * (\text{SC1} + L) / \text{SCREF}));$$

$$\text{SCCL2} = 1 / (L * \text{SCREF}) * (\text{SCREF} / 20 * \text{SC3} * \exp(-20 * \text{SC3} / \text{SCREF}) + \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * \text{SC3} / \text{SCREF}) - \text{SCREF} / 20 * (\text{SC3} + L) * \exp(-20 * (\text{SC3} + L) / \text{SCREF}) - \text{SCREF} * \text{SCREF} / 400 * \exp(-20 * (\text{SC3} + L) / \text{SCREF}));$$

SCC = SCCW1 + SCCW2 + SCCL1 + SCCL2;

トランジスタのパラメータを出力したネットリスト (.spo) の例:

```
m_mos3_10 T2 T1 T3 lvs_6 mos3 L=1.000u
W=3.000u AD=5.160p AD1=5.160 AS=21.840p
+ AS1=21.840 PD=9.440u PS=20.560u SC1=8.280u
SC2=1.351u SC3=2.720u SC4=2.000u
+ SCA=0.345 SCB=32.260n SCBL1=0.000a
SCBL2=0.103p SCBW1=32.210n SCBW2=50.237p
+ SCC=10.410f SCCL1=0.0 SCCL2=0.000a
SCCW1=10.410f SCCW2=0.018a sa=1.720u
+ sb=7.280u sc=7.280u sd=1.720u
+ X=28.72 Y=-13.00
```

結論

このアプリケーション・ノートでは、SmartDRC/LVS のウェル近接と STI ストレス効果パラメータ計算の新機能について説明しました。これらの機能により、SmartDRC/LVS は中位 (90-65nm) CMOS テクノロジー・プロセスや先端 (28nm 以下) プロセス・ノードのデバイス・レイアウト・パラメータ抽出に利用することが可能になります。