

Victory Process

3次元プロセス・シミュレータ

SILVACO

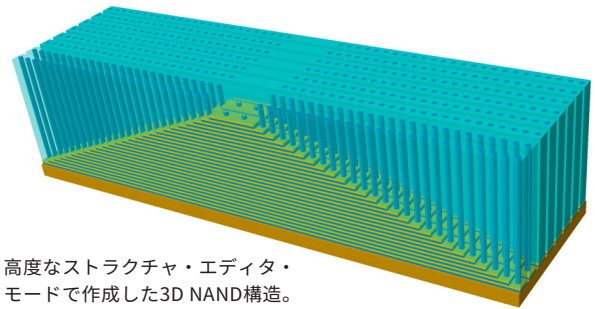
Victory Process™は、汎用のレイアウト・ドリブン1次元/2次元/3次元のプロセス/ストレス・シミュレータで、エッチング、デポジション、イオン注入、拡散、酸化、そしてストレス・シミュレーションの機能を持っています。

特長

- 3次元構造の高速プロトタイプ機能で、プロセス問題を詳細に物理解析可能
- 両面性ウェーハ・プロセス・シミュレーションに対応
- 様々な配合を含む、化合物材質の包括的なシミュレーション・サポート
- 包括的な拡散モデルの設定 :Fermi、Twodim、single-pair、5-stream
- 格子不整合、温度履歴、デポジション、物理的酸化により誘起されたストレスを含む包括的なフルフロー・ストレス解析
- 正確さ、高速性に優れたモンテカルロ法に基づくイオン注入シミュレーション
- イオン注入や、拡散、酸化、および物理エッチングとデポジションのマルチスレッド処理により効率的に実行
- 基板材料のリデポジションを考慮した物理デポジションとエッチングのための多重粒子流束モデル
- オープンアーキテクチャ採用で、エッチング、デポジション、アニール処理におけるカスタマ独自の物理モデルを容易に導入 / 修正
- 構造のミラーリング、不純物に対応したアダプティブなメッシュ細分化と電極設定を含む3次元デバイス・シミュレータとシームレスに接続
- シミュレーション・フローの一部としてのパラメータ化されたレイアウト仕様
- レイアウトの特長に基づいた使いやすいメッシュ設定と、シミュレーション・フロー中でのマニュアル・メッシュによる修正適用
- 容易に習得でき、強力なデバッグ・モードを持ち、SUPREMと同様のユーザ・フレンドリなシンタックス (Athena との互換性)
- 利用しやすいキャリブレーション・プラットフォームと、2次元モードの高速なプロセス・テスト (キャリブレーションに対して3次元計算は不要)
- シミュレーション時間の有効活用に役立つ1次元/2次元/3次元モードの自動切り替えおよびプロセス・シミュレーション中の構造のミラーリング

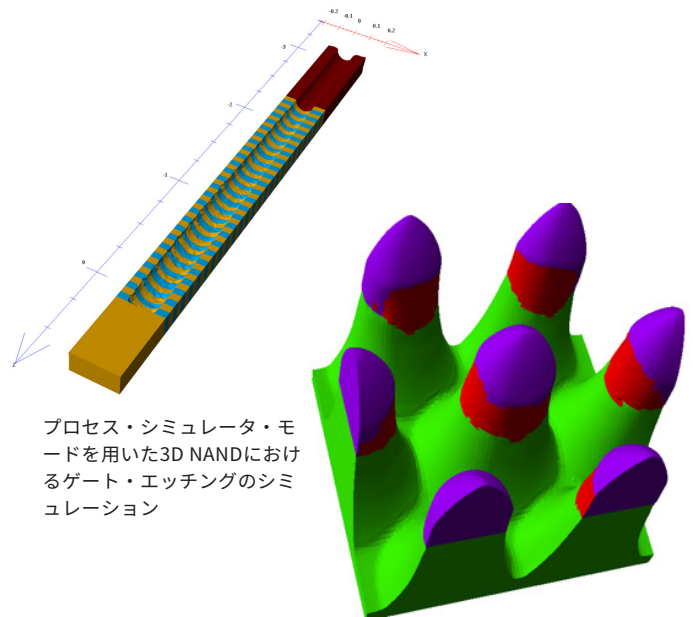
Victory Process の2つの操作モード：

- ストラクチャ・エディタ・モード(セルモード)は、イメージセンサ、SRAMセルまたはFinFETなどの3次元構造のプロトタイプングを高速に実行し、ここでは構造出力メッシュ・アルゴリズムメッシュを最適化し、後に電気特性計算のために3次元デバイス・シミュレータにロードされます。



高度なストラクチャ・エディタ・モードで作成した3D NAND構造。

- プロセス・シミュレータ・モードは、全機能を備えたレベル・セット法に基づく1次元/2次元/3次元プロセスおよびストレス・シミュレータであり、複雑なイオン・ビーム・ミリング実験やストレス依存の酸化分析など、プロセス・ベースの詳細解析により適しています。



プロセス・シミュレータ・モードを用いた3D NANDにおけるゲート・エッチングのシミュレーション

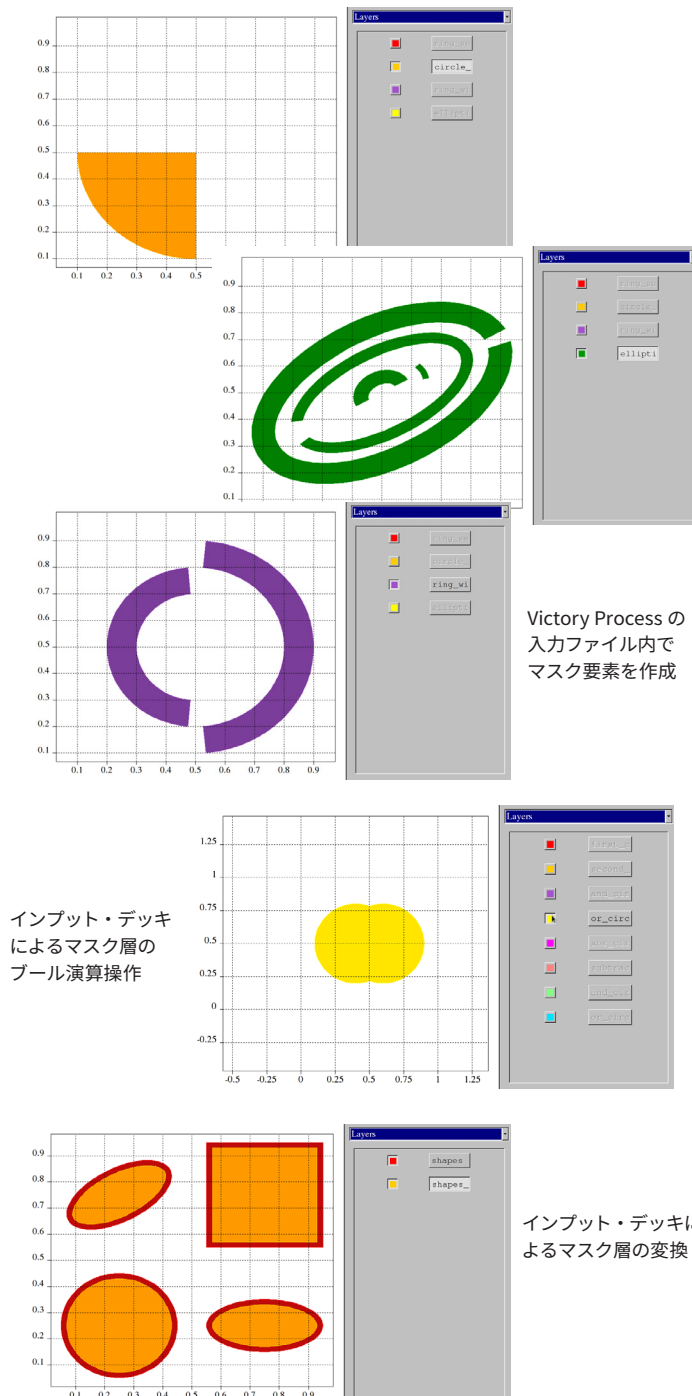
プロセス・シミュレータ・モードを用いた柱状磁気トンネル接合構造の形成シミュレーション

このブローシャではまず、イオン注入、拡散、エピタキシ、そして、ストレス解析のように、どちらの操作モードにも共通している事例と特長を紹介し、次にストラクチャ・エディタ・モードまたはプロセス・シミュレータ・モードそれぞれにしかない特長をご紹介します。

ストラクチャ・エディタおよびプロセス・シミュレータ・モード共通の特長

包括的なレイアウト・ハンドリング

- 基本的なセットを組み合わせることで、シミュレーション・フロー内のレイアウトを行うことで、複雑なパラメータ化レイアウトを可能にする
- 予め定義された gds レイアウトおよびシルパコ・ネイティブのマスク・フォーマットに対応
- 予め定義したレイアウトに変更を加えることが可能（シフト、リサイズまたはブール演算操作）
- LVSルール・デッキに基づいてマスク・レイヤを生成



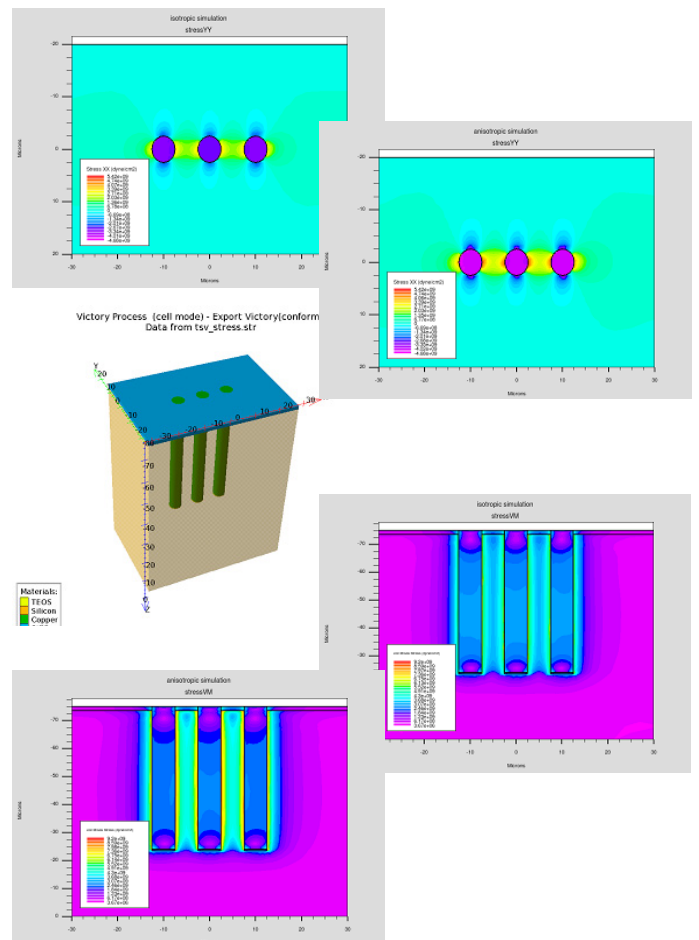
Victory Process の
入力ファイル内で
マスク要素を作成

インプット・デッキ
によるマスク層の
ブール演算操作

インプット・デッキ
によるマスク層の変換

ストレス履歴シミュレーション

- 全てのプロセス工程におけるストレス履歴のシミュレーションだけでなく、単一段階（シングル・ステップ）のストレス解析も可能
- デポジション起因の真性ストレス、格子不整合ストレス、温度履歴ストレス、酸化起因のストレスなど、マルチ・プロセスが誘起するストレス要因を考慮
- 酸化のフィードバックを考慮
- 段階的合成基板や段階的のエピタキシャル合成レイヤに対応



TSV構造において材料特性を等方性(中央)および異方性(右)としたときの、形状と応力の分布

解析的イオン注入

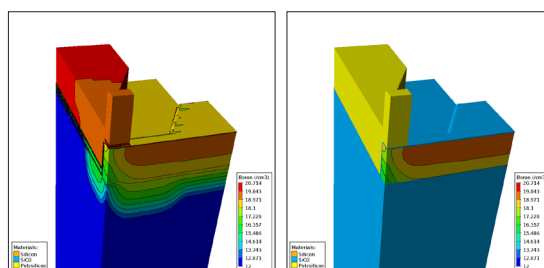
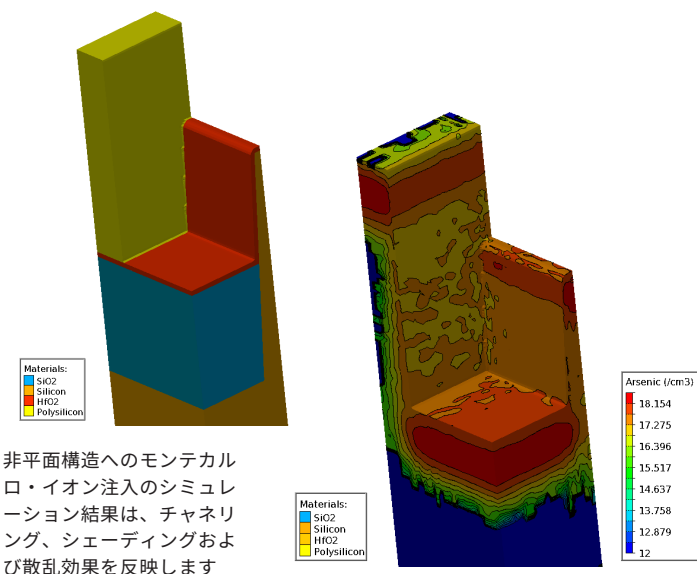
- 実験で検証したピアソン / デュアルピアソン注入モデル
- エネルギー、注入量、傾き、回転などの変動を含む、拡張した注入モーメント・テーブル
- ユーザ指定のイオン注入プロファイルおよびモーメント・テーブル対応
- 完全なマルチスレッド対応による CPU 数とほぼ線形比例して実行時間を削減

モンテカルロ法による3次元イオン注入

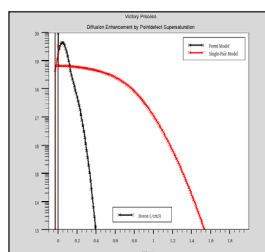
- モンテカルロ注入モジュールにおいてモーメント・パラメータの抽出をサポート
- モンテカルロ・シミュレーションによって得た3次元プロファイル・データの読み込みをサポート
- 1次元の測定プロファイル・データの読み込みをサポート
- 任意形状やマルチ・レイヤ構造を形成する結晶材料/非結晶材料への非常に正確なイオン分
- ユーザ定義材料をサポート
- 材料特性は、開いている材料データベースで設定できます
- 200eVから高MeVまで、広範囲におよぶ正確なキャリブレーション
- ダイヤモンド型並びに六方晶型結晶構造を持つ材料に対して較正されたイオン注入：シリコン、SiC、GaN
- 任意の基板面方位をサポート
- ディープ・トレンチやボイドにおいても、反射、再イオン注入、シャドーイングなど、全ての複雑なイオン注入効果を考慮
- 任意のイオン注入方向に対応
- 3次元の二体衝突予測の適用により、1次チャネリングのみならず可能性のある全ての2次チャンネルや結晶面のチャネリングを予測
- 浅い接合形成、多重イオン注入、プレ・アモルファス化、HALOイオン注入、レトログレード・ウェル形成、ウェル近接効果など、重要な技術課題に対し、時間効率もコスト効率も高いソリューションを提供
- 完全なマルチスレッド対応によるCPU数とほぼ線形比例して実行時間を削減

拡散

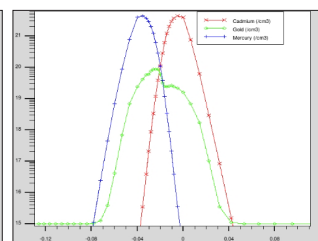
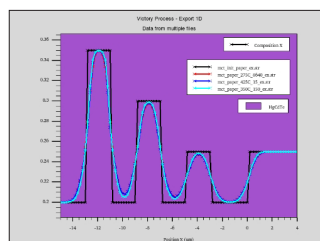
- Athena/SSuprem4と互換性のある Twodim、Fermi、グレインベースの拡散モデル
- 複数回に渡る不純物拡散のシミュレーション
- 材料界面における固溶度、不純物の活性、偏析を考慮
- シリコンからSiGe、または2つのSiGe領域のような材料組成が急峻に変化する界面での連続性のある境界条件
- 完全マルチスレッドの方程式アセンブラと線形ソルバにより、マルチコア・コンピュータにおいてシミュレーション速度を大幅に向上
- 過渡増速拡散効果のシミュレーション
- 3-stream および 5-stream 拡散モデル
- 点欠陥トラップおよびクラスタリング・モデル
- すべての材料界面における不純物の偏析
- 不純物の活性化と固溶度
- 組織依存性を考慮した HgCdTe、InP、SiGe、SiGeC などの化合物半導体への拡散
- HgCdTe のような化合物半導体における材料組成再分布のシミュレーション
- ヘテロ構造デバイスのための不連続材料インタフェース・モデル
- 酸化に伴う拡散シミュレーション
- フラッシュメモリ・アニール処理のシミュレーションおよび時間や空間で異なるユーザ指定の温度プロファイルのレーザー・アニール処理



解析的イオン注入とフェルミ拡散後の複雑な構造におけるボロン分布



格子間シリコン過飽和状態における Fermi と 3-stream 拡散モデルの比較



様々な温度におけるアニール処理による HgCdTe 化合物の再分布。カドミウム、マーキュリーおよび不純物が同時に拡散します。

エピタキシ

- 単原子および化合物材料のエピタキシャル成長
- エピタキシ中のドーピング再分布を考慮
- エピタキシ中の段階的的配合に対応
- 複雑な温度プロファイルに対応

オープン材料データベース

- 材料およびモデリング・データベースへの完全アクセス
- ユーザ指定の材料データベースとシミュレーション指定の材料データベースに対応
- 継承によるシミュレーション指定材料の定義
- 材料データベースの機能的な積層構造により、変更と材料モデルの拡張が容易に
- 先進の材料モデル開発のためのアニール処理モデル・ライブラリを開くインタフェース
- 全ての Victory 製品が同じ材料データベースを使用

オープン モデリングインタフェース

- いろいろなモデル粒子設定
- モデルパラメータを設定
- 反応関数を設定
- PDE(Partial Differential Equation) システムの構築

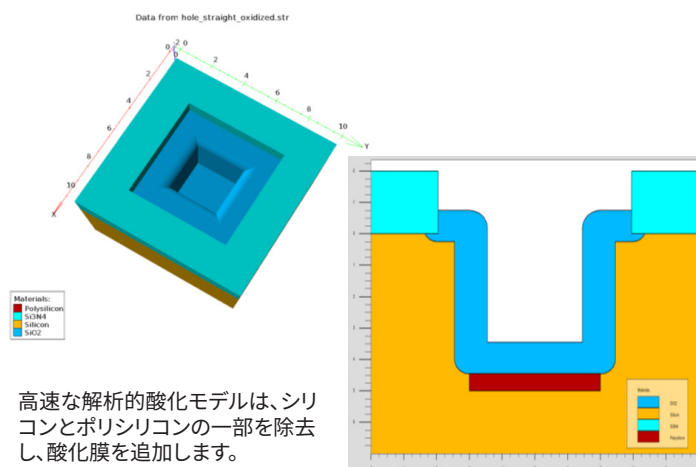
デバイス・メッシュ・インタフェース

- 様々なメッシュ・タイプに対応
- グローバルな細分化、インタフェースの細分化、ジャンクションの細分化、形状の細分化を含む全てのメッシュ・タイプに対する拡張された細分化機能
- アスペクト比でアライメントされた異方性のメッシュ対応
- 操作のミラーリング、クロッピング、スライシングによる構造修正

ストラクチャ・エディタ・モード

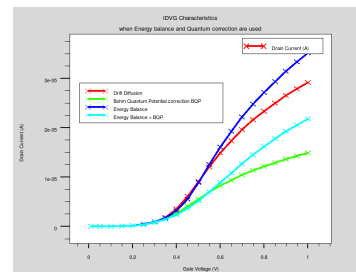
高速な幾何的エッチング、デポジション、および経験的酸化モデル

- 構造にフィットする非構造メッシュ
- 理想的な等方性およびドライ・エッチングと平坦化
- 材料領域の選択式エッチングまたは除去
- 理想化されたコンフォーマルおよび指向性デポジション - マンハッタン・モードおよび Curved モード
- Fab 同様のマスク・レイアウト・ベース・プロセス
- 酸化膜形状に近似する非常に高速な経験的酸化
- 経験的モードでは、Deal-GroveモデルとMassoudモデルを使用



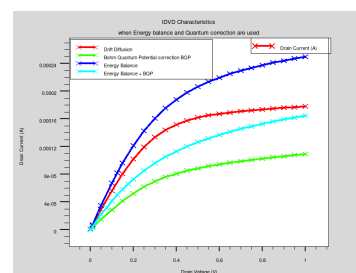
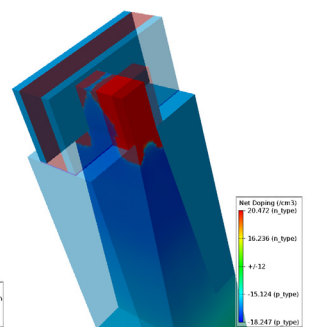
FinFET の例

量子補正とエネルギー・バランスを含む 3 次元 FinFET シミュレーション



Victory Device を使用してシミュレーションした IDVD 特性によって、エネルギー・バランスと量子補正が使用されているときの違いを示しています。

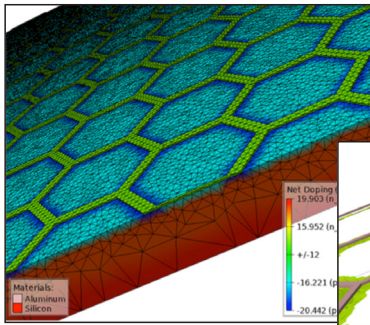
FinFET の 3 次元ネット・ドーピング分布



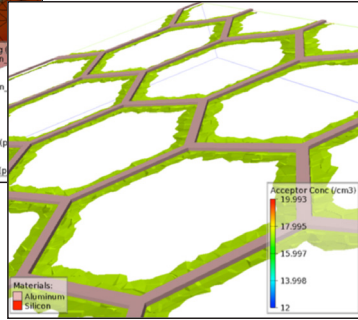
Victory Device を使用してシミュレーションした IDVD 特性によって、エネルギー・バランスと量子補正が使用されているときの違いを示しています。

可視光 - CIS、CCD、太陽電池

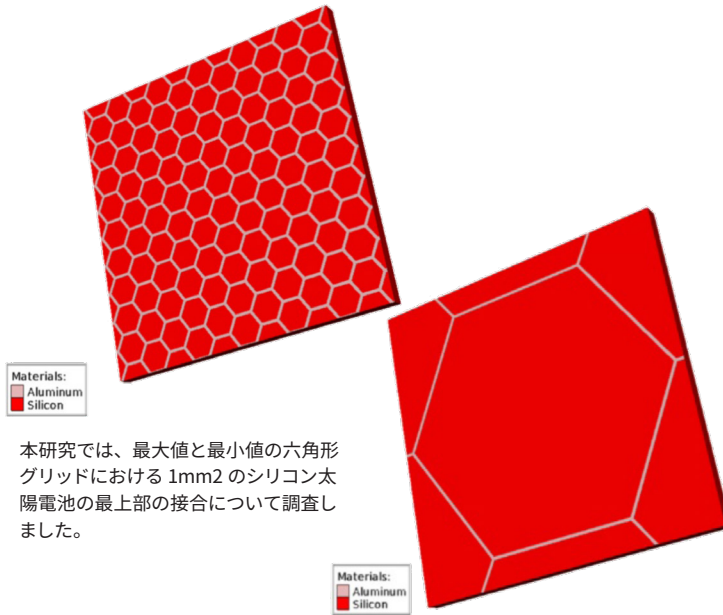
太陽電池の多くの設計基準の中でも、最上部の金属接合の設計はセル効率に影響を与えます。最上部の金属接合の面密度は、セルの出力パワー大きさを著しく左右します。



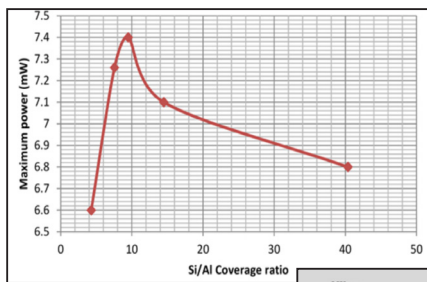
適応性のある3次元ドローネメッシュを太陽電池シミュレーションに使用



六角形金属接合の下の等値面は $3.4e17/cm^3$ の受容体

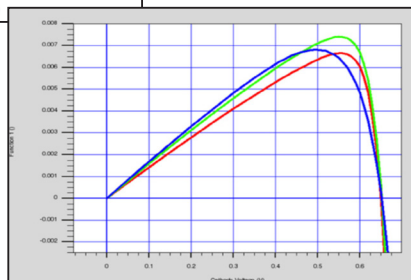


本研究では、最大値と最小値の六角形グリッドにおける $1mm^2$ のシリコン太陽電池の最上部の接合について調査しました。



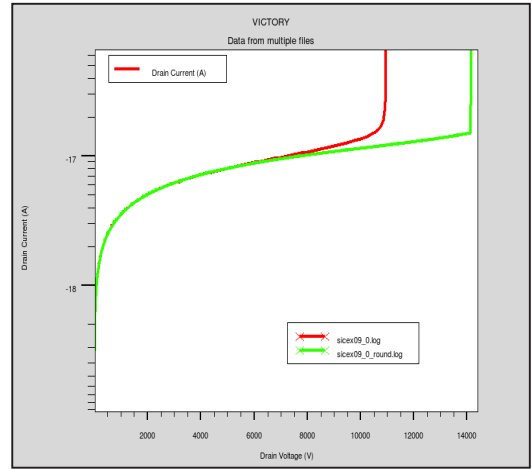
最大出力と金属接合分配 R の関係性を表しています。

最小値の六角形の太陽電池効率を赤い線で (外接円半径または辺長 $104 \mu m$)、緑の線 ($a=225 \mu m$)、そして、最大値の六角形を青の線 ($a=945 \mu m$) で表しています。



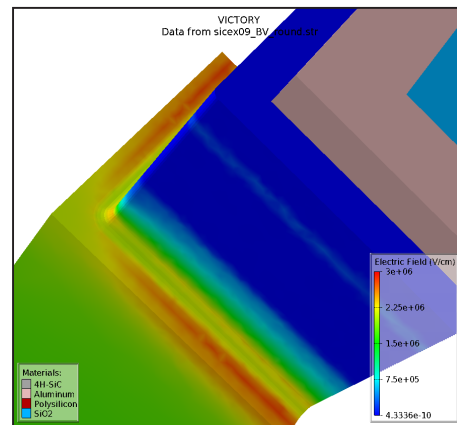
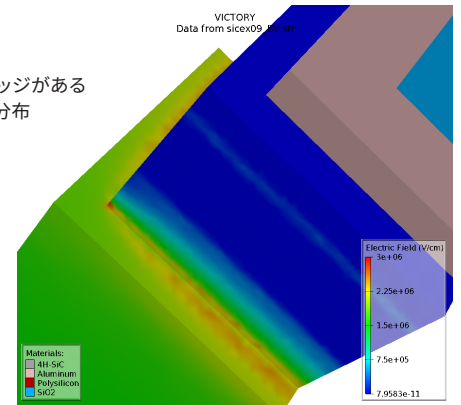
SiC トレンチ IGBT の例

3次元トレンチ SiC IGBT シミュレーションによって、角ばったトレンチに比べて丸みを帯びているトレンチは、最大 350V の降状電圧の増加があることが示されています。



Victory Device を使用したトレンチ・エッジが角ばっている場合と丸みを帯びている場合それぞれの3次元 IGBT BV シミュレーション結果の比較

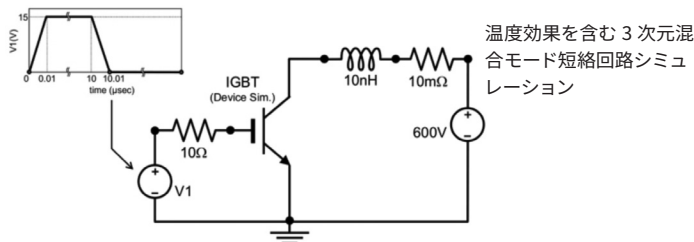
トレンチに角ばったエッジがある3次元 IGBT での電界分布



トレンチに丸みを帯びたエッジがある3次元 IGBT での電界分布

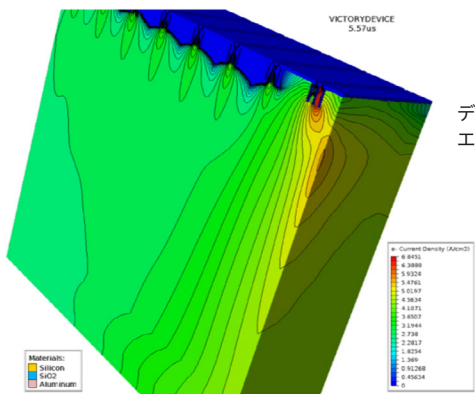
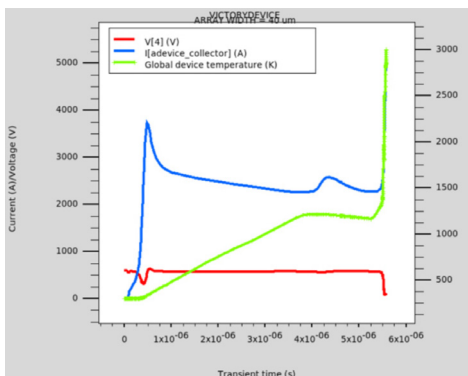
マルチセル IGBT における3次元電流集中

短絡回路条件下の IGBT マルチセル配置のための 3 次元 TCAD の混合モード電流フィラメント・シミュレーション

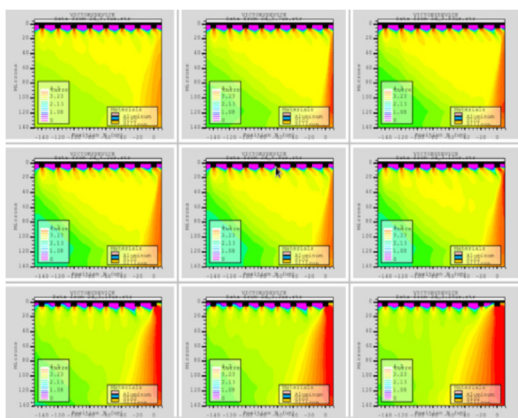


温度効果を含む 3 次元混合モード短絡回路シミュレーション

3次元 8セル IGBT 配置の短絡回路波形で、幅が 40 μm のもの



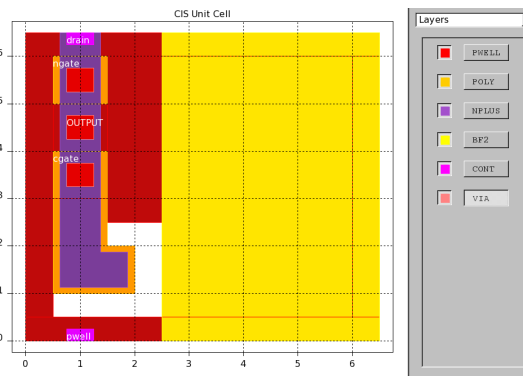
デバイス破損点 $t = 5.57 \mu s$ のエレクトロン電流密度分布



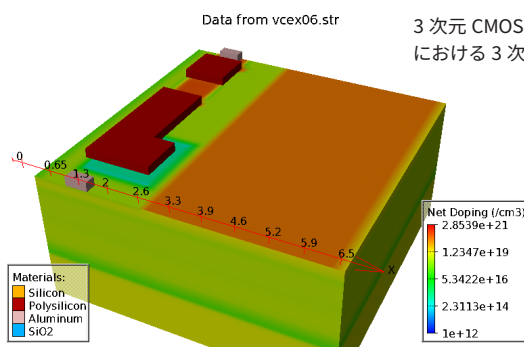
疑似 3次元 8セル IGBT 配置で、幅 1 μm (b) の短絡回路波形。デバイスのオーバーヒート直前のエレクトロン電流密度に関する空間的進展の断面図。

CMOS イメージ・センサのシミュレーションの例

2つのパス・トランジスタを含む完全な CMOS イメージ・センサ・セルの TCAD シミュレーション

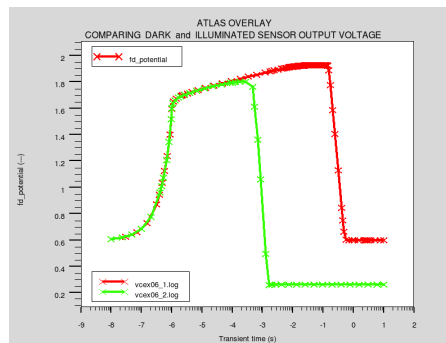
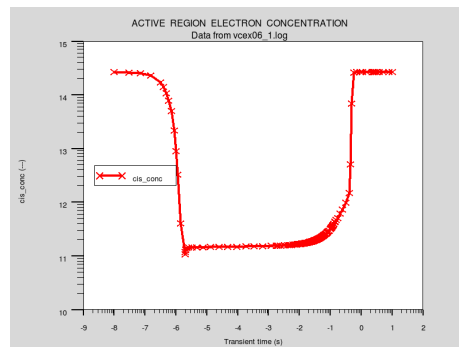


CMOS イメージ・センサのレイアウト



3次元 CMOS イメージ・センサにおける 3次元不純物濃度分布

ダーク・リカバリ・タイム・シミュレーション中に Victory を使用して算出された電子密度



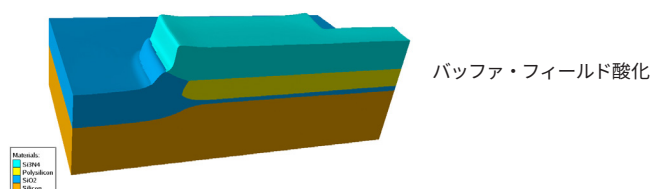
Victory を使用したセンサ出力電圧シミュレーション (照明のある場合とない場合の比較)

プロセス・シミュレータ・モード

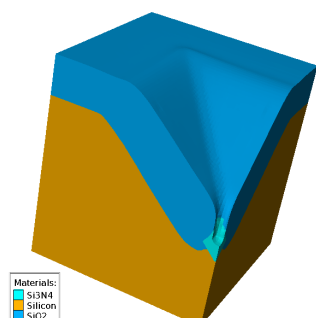
プロセスモードにおいて、この構造は、面と面の間に挟まれた材料レイヤの積み重ねであると陰解法的に表現され、それぞれの表面は正方メッシュの階層構造で陰解法的に定義されます。

酸化モデル

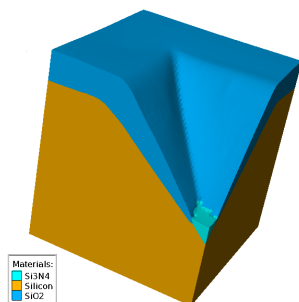
- ・ 経験モード、完全物理モード、または複合モードでの酸化シミュレーション
- ・ 極薄酸化レイヤに経験モードを適用
- ・ 経験モードには Deal-Grove および Massoud モデルを使用
- ・ 完全物理モードによる酸化種輸送、Si/SiO₂ 界面における反応、粘性フロー、材料の変形、ストレス形成のシミュレーション
- ・ 酸化膜厚に応じて、経験モードと完全物理モードを自動的に切り替え
- ・ 経験モードは粗いメッシュを使用して平面領域をシミュレートするため、層厚がメッシュ・サイズよりも小さくても計算可能
- ・ 完全物理モードは細かいメッシュで領域をシミュレーション
- ・ 応力依存の酸素輸送および界面反応
- ・ 方位依存性やドーピング依存性、雰囲気条件を考慮
- ・ 完全なマルチスレッド対応による CPU 数とほぼ線形比例して実行時間を削減
- ・ 階層デバイス同様、SiGe および SiC のような化合物半導体の酸化



応力依存を考慮しない例：デフォルトの線形粘性モデルを使用した逆ピラミッド溝の酸化



応力を考慮した逆ピラミッド溝の酸化。応力はコーナー領域で発生します。応力による酸化速度の低下は、コーナーの集まる頂点付近で顕著になります。



物理エッチングとデポジション・モジュールは、半導体製造工場で使用されるさまざまな形状進展プロセス、ならびに媒体および摩擦アプリケーション向けハードコーティング・プロセスを網羅する包括的なモデル・セットです。

物理エッチング

- ・ 選択性の高いエッチング
- ・ 等方性、異方性、および指向性エッチング
- ・ 結晶方位依存の異方性エッチング(例: KOH中のシリコン)
- ・ リデポジションを考慮したプラズマ・エッチング
- ・ 粒子輸送効果および粒子/リアクタ・プロパティを考慮
- ・ メモリ・テクノロジーにおけるディープ・トレンチ・エッチングのイオン増速型化学エッチングのような多重粒子エッチング・モデル
- ・ 完全なマルチスレッド粒子流束計算によるCPU数とほぼ線形比例する実行時間の削減

物理的デポジション

- ・ コンフォーマル、非コンフォーマル、および指向性デポジション
- ・ スパッタ・デポジション
- ・ イオン・アシストのスパッタ・デポ
- ・ 粒子輸送効果や粒子およびリアクタの特性を考慮
- ・ 完全なマルチスレッド粒子流束計算による CPU 数とほぼ線形比例する実行時間の削減

モデリング・インタフェース機能

- ・ 複数の反射を伴うフラックスを扱うための高速な経験的近似手法
- ・ エッチング・レート、エッチングのアスペクト比、異方性および粘性係数に対してユーザ・モデルを定義可能
- ・ ユーザ指定のテクノロジー・モデル(例: エッチング・レート vs. ガス流量など)
- ・ ユーザが定義可能な表面反応モデル
- ・ ユーザが定義可能な、流束モデルを介した粒子輸送特性
- ・ すべてのモデルはバリスティック輸送に対応
- ・ 輸送モードの自動/ 手動選択
- ・ 多重粒子の輸送と反応

イオン・ミリング (IM: Ion Milling) とイオンビーム・デポジション (IBD: Ion Beam Deposition)

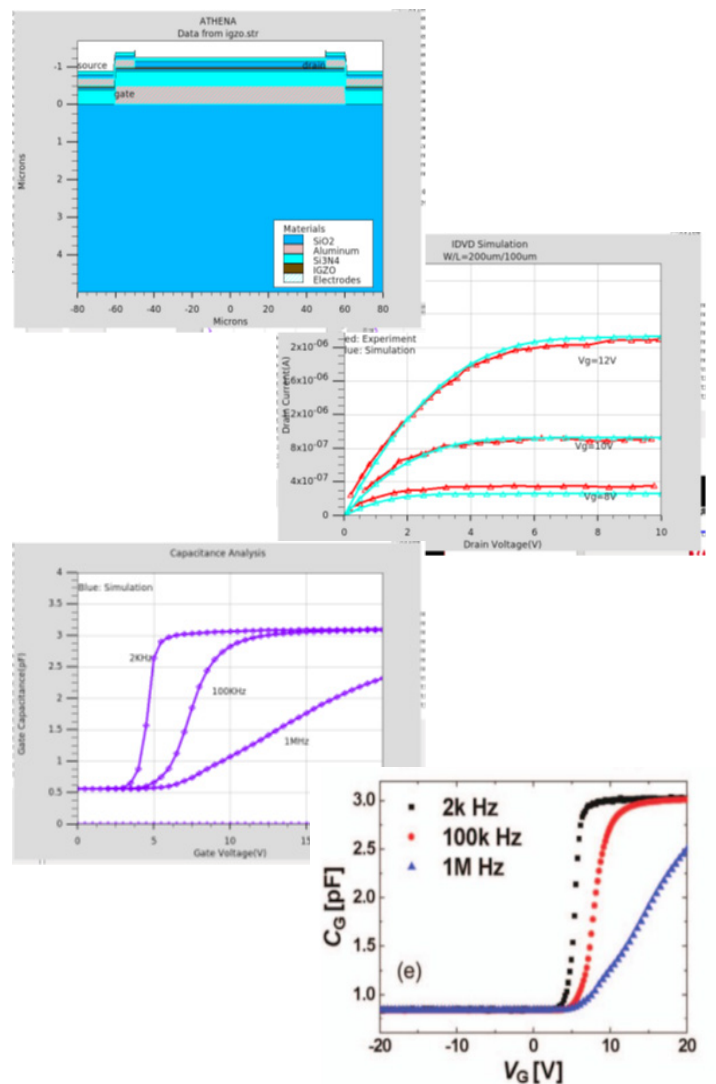
- 固定ビームおよび回転ビーム
- 複数の合金材料のリデポジションを含む回転ビームの入 / 切の選択式切り替え
- イオン・ビーム・エッチングおよびイオン・ビーム・デポジションにおいて平行性と発散性の高いビーム
- リデポジション効果のシミュレーション
- 設定可能な、材料特有のイールド関数と再放出効率
- シェーディング効果を考慮
- イオン・エネルギー、ビーム電流、イオン質量、イオン電荷などのプロセス条件を考慮する経験的イールド・モデル

1次元 / 2次元モード

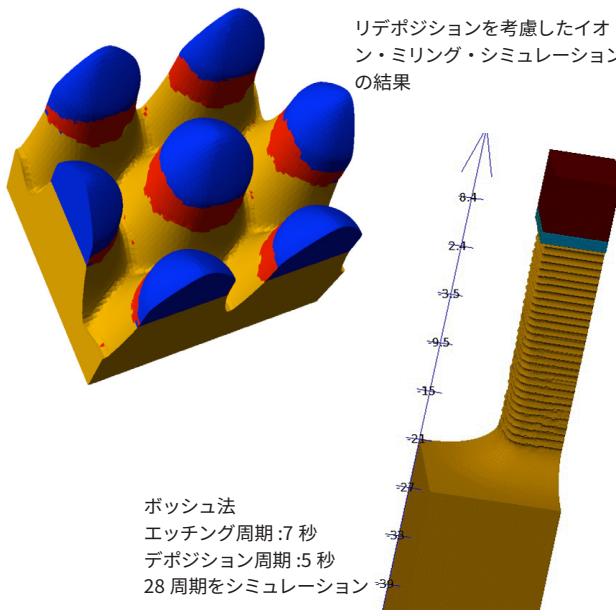
- 極めて類似したシンタックスにより Athena から T-Suprem への移行が容易
- DeckBuild 内において自動化された入力ファイルの変換
- レベル・セット法に基づいたエッチング / デポジット / 酸化は、複雑な構造形状の安定性を高める
- 1次元 / 2次元シミュレーションにより、完全な3次元シミュレーション以前の迅速なキャリブレーションとプロセス・プロトタイプングが可能
- オープン・モデル・インタフェースと材料データベースで、標準または新規の材料や不純物の任意のモデル開発が可能
- Atlas と Victory へのシームレスなリンク
- 最も時間を消費するプロセスステップに対するマルチスレッド対応

アモルファスIGZO TFTの解析例

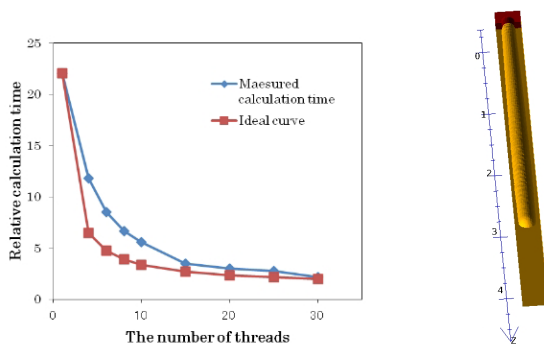
この例では、ディスプレイに使用される先進のアモルファス InGaZnO 薄膜トランジスタに対して、一連のプロセス/デバイス・シミュレーションを行っています。



リデポジションを考慮したイオン・ミリング・シミュレーションの結果



ボッシュ法
エッチング周期 : 7 秒
デポジション周期 : 5 秒
28 周期をシミュレーション



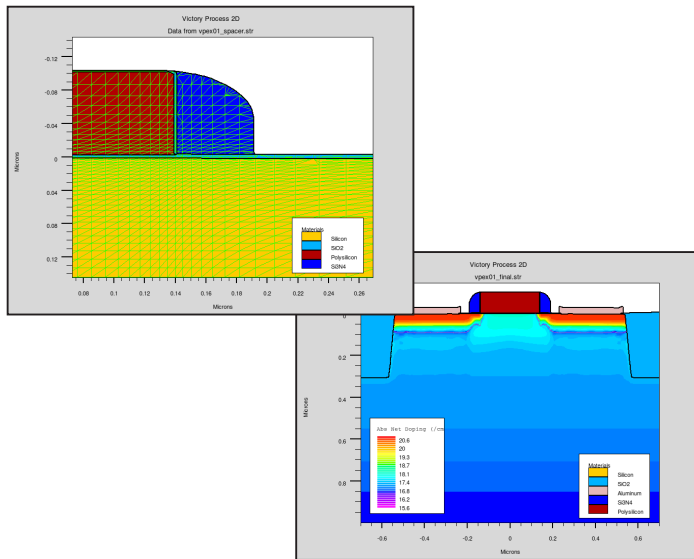
イオン増速型化学エッチング (IECE: Ion Enhanced Chemical Etching) モデルの高精細アスペクト比 (1:30) トレンチ・エッチング

プロセスモードにおける 1次元 / 2次元シミュレーションが可能。古いインプット・ファイルのコンバージョンにおいて Athena と互換性があるシンタックスは Athena の直接的な代替品として検討可能。

プロセス・シミュレーションによって得られたアモルファスIGZO TFTの構造(左)と、デバイス・シミュレーションによって得られたIdVdプロット、CVプロットと実験結果との比較。

28nm MOSFET

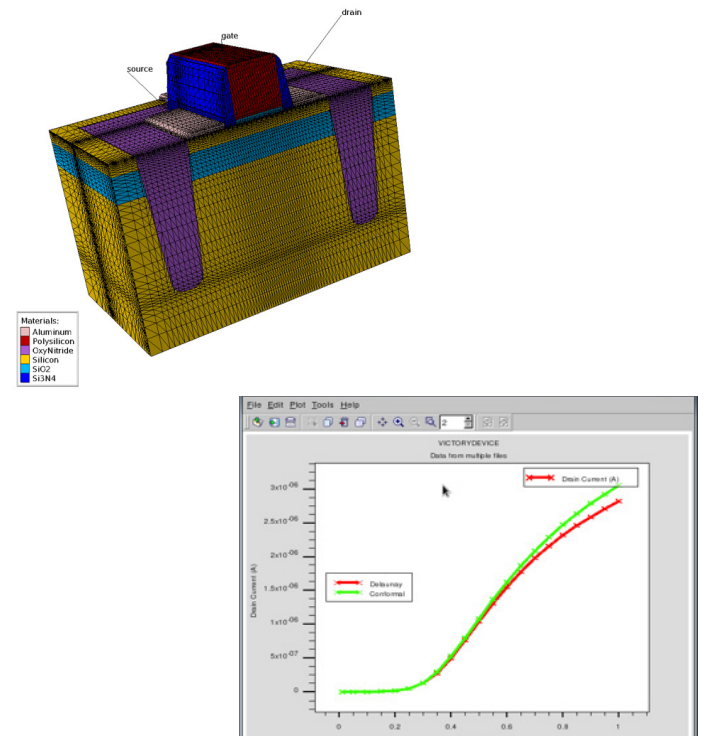
この例は、シャロー・トレンチ・アイソレーション (STI: Shallow Trench Isolation) のための 28nm NMOS トランジスタの 2 次元プロセス・シミュレーションを示しています。この例の目的は、Athena との包括的な互換性を実証することです。



エッチング、デポジション、イオン注入、拡散 / 酸化を含む 20 のプロセス段階を経た 2 次元プロセス・シミュレーション結果

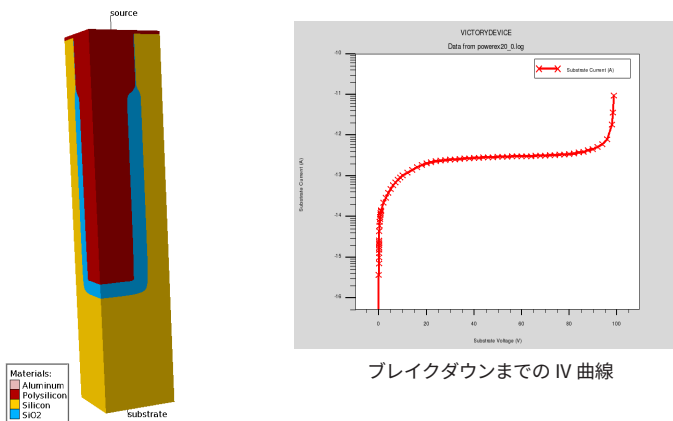
20 nm FDSOI

2つの異なるデバイス・メッシュ生成手法を用いた、20nm完全空乏型 SOI トランジスタに対する一連のプロセス/デバイス・シミュレーション



3次元垂直 LOCOS パワー MOSFET

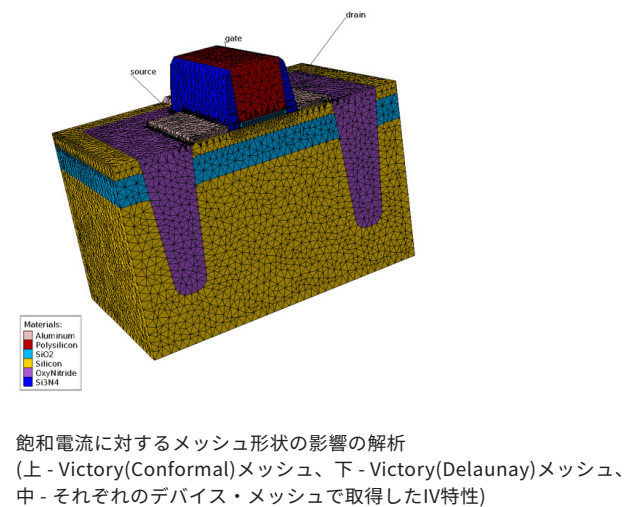
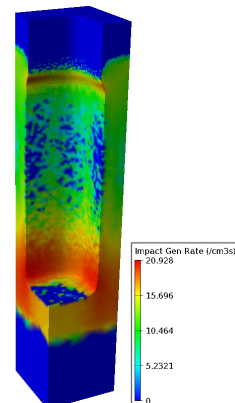
この例は、Victory Processにおいて簡素化されたプロセス・フローにより作成された3次元湾曲コーナー垂直LOCOS MOSパワー・デバイスを示しています。次に、この構造は電気的シミュレーションのためにVictory Deviceへ渡されます。



ブレイクダウンまでの IV 曲線

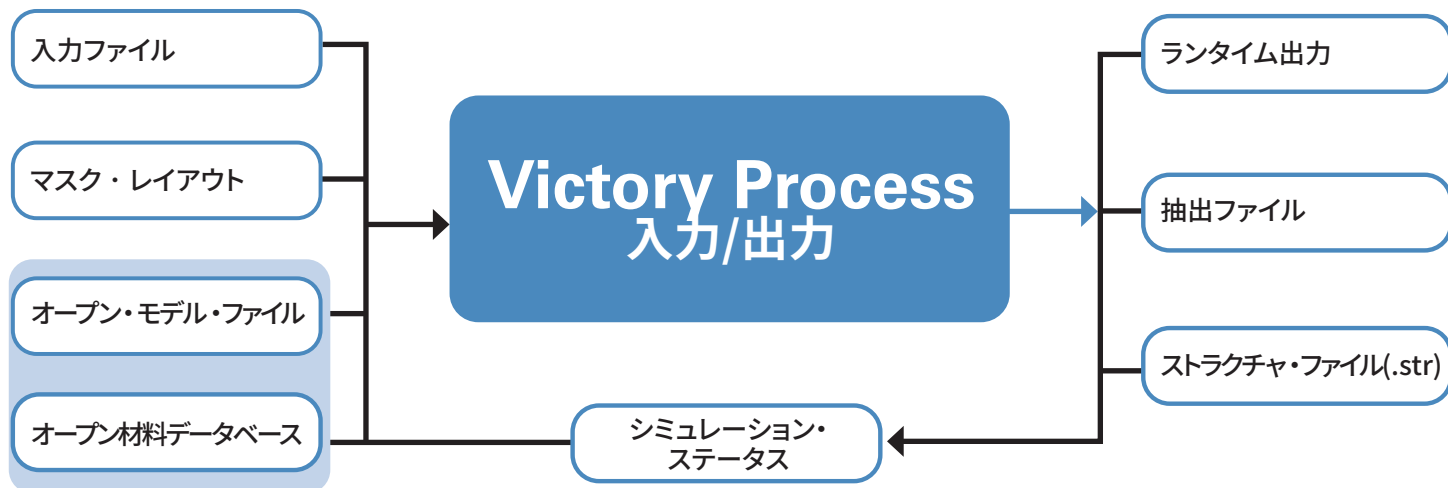
垂直 MOSFET の形状

ブレイクダウン付近の衝突イオン化率



飽和電流に対するメッシュ形状の影響の解析

(上 - Victory(Conformal)メッシュ、下 - Victory(Delaunay)メッシュ、中 - それぞれのデバイス・メッシュで取得したIV特性)



SILVACO

株式会社シルバコ・ジャパン
お問い合わせ : jpsales@silvaco.com



Rev 040920_20

横浜本社

〒220-8136
神奈川県横浜市西区みなとみらい 2-2-1 横浜ランドマークタワー 36F
TEL : 045-640-6188 FAX : 045-640-6181

WWW.SILVACO.COM