

# LSIデバイス設計CADシステム

# Advance / TCAD

平成27年6月30日

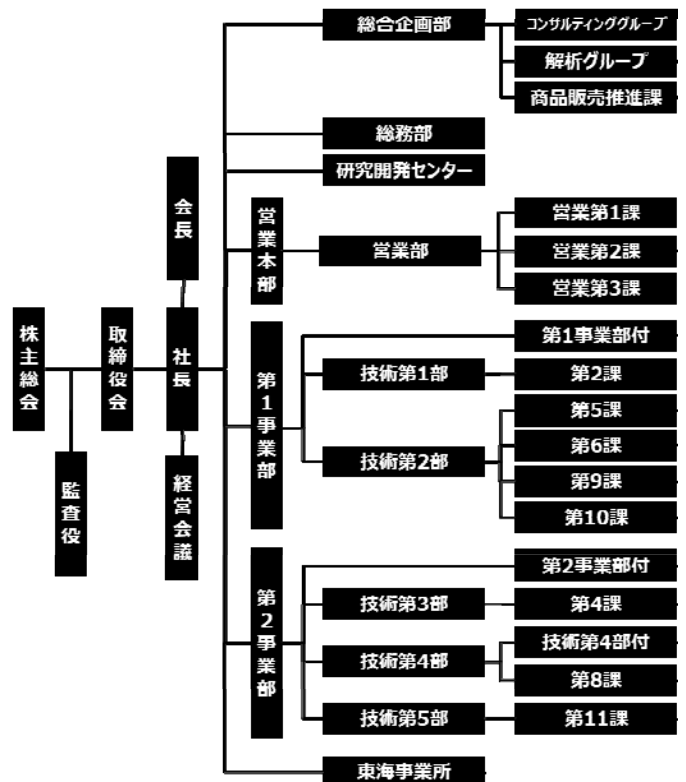
## アドバンスソフト株式会社

1

### 会社概要

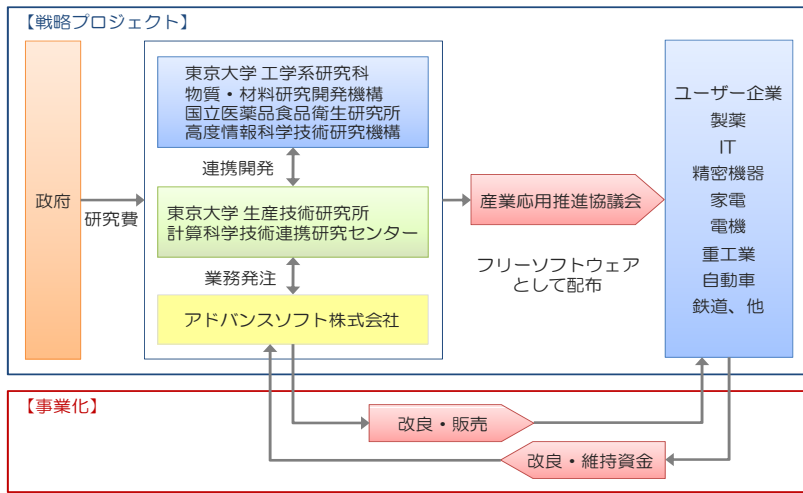
アドバンスソフト株式会社はシミュレーションや関連ソフトウェア開発を中心とした計算科学技術の専門企業として、2002年4月に設立されました。当社は、産業の基盤技術である計算科学技術を中心としたデジタルエンジニアリング技術において、世界をリードする企業になることを目指しています。

名称 アドバンスソフト株式会社  
英文名 AdvanceSoft Corporation  
本社 〒101-0062  
東京都千代田区神田駿河台四丁目3番地  
新お茶の水ビルディング17階西  
TEL:03-6826-3976 FAX:03-5283-6580  
URL <http://www.advancesoft.jp>  
設立 2002年(平成14年)4月24日  
資本金 3,724 万円  
従業員数 76 名  
役員  
代表取締役会長 小池 秀耀  
代表取締役社長 松原 聖  
専務取締役 三橋 利玄  
取締役 田崎 好重  
監査役 平林 寛治



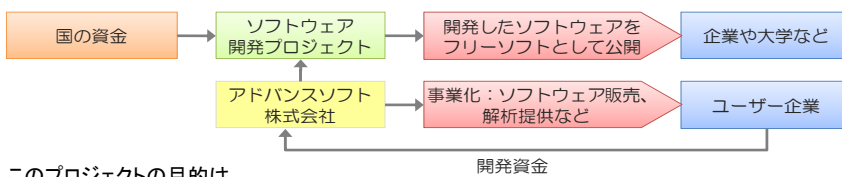
2

# 国家プロジェクトとアドバンスソフトの設立



文部科学省はわが国の計算科学技術の振興目的として戦略的基盤ソフトウェア開発プロジェクトと革新的シミュレーション・ソフトウェア開発プロジェクトを2002年～2007年の6年間実施しました。このプロジェクトは、総額約70億円のわが国最大のソフトウェア開発プロジェクトであり、東京大学 生産技術研究所を中核とした「学」と「産」のアドバンスソフト(株)の強力な産学官連携により推進されました。

## 研究開発成果の事業化



このプロジェクトの目的は

- ①複雑・大規模な世界水準の戦略的基盤ソフトウェアを開発し公開する
- ②戦略ソフトを開発できるトップレベルの人材を世界最先端のソフトウェア開発を通じて育成する
- ③戦略的基盤ソフトウェア開発の大学と企業の連携による研究拠点の構築をする
- ④アドバンスソフトによる開発したソフトウェアの事業化と持続的な改良をする

アドバンスソフト(株)はこのプロジェクトを推進し、世界最高水準のソフトウェアを開発するとともに、その成果を事業化することを目的として設立されました。

3

## TCADの歴史と現状

- 最初の商業用TCADはTMA社によるものである。スタンフォード大学のダットン教授が開発したプロセスシミュレータ(SUPREM、SUPREM3、SUPREM4)とデバイスシミュレータ(PISCES)をベースに、TMA社は、TSUPREM4とMEDICIをリリースした。これが1979年のことである。1989年には、シルバコ・インターナショナル社がスタンフォード大の同シミュレータをベースにプロセスシミュレータATHENAとデバイスシミュレータATLASによるTCADを発表した。同年、スイスのISE社<sup>[2]</sup>はプロセスシミュレータDIOSとデバイスシミュレータDESSISによるTCADの発表を行なった。これら3社がTCADの3大メーカーである。当初は1次元2次元のプロセスシミュレータであったが、フロリダ大学で開発された3次元プロセスシミュレータFLOOPSがISE社で商用化され、より実際のプロセスで実際の構造が構築できるようになった。
- しかし、半導体ベンチャー企業は、莫大な設備投資のかかる半導体プロセスラインを持つことなく、外部のファウンダリーを利用することが多く、通常のCADと同等の数が売れるわけではなく、他のCADソフトの様に販売後の保守費用で利益を上げるビジネスモデルが成立しにくい状況となった。そのため、TMAは1998年にアヴァンティ社に買収。その後、2001年にアヴァンティ社はシンプシス社に買収され、ISE社も2004年にシンプシス社に買収された。
- 現在、シンプシス社は、旧TMAのTCADの販売を中止し、旧ISE社のTCADを中心に販売しており、TCADの主要メーカーは2社となっている。(ウィキペディアより)

4

# わが国の現状

- 1980年代はわが国の半導体メーカー各社でTCADを開発していた。
- 半導体先端テクノロジーズ (Selete) のTCADシステム : **HyENEXSS**  
1996年-2011年)わが国の半導体メーカーが総力を挙げて開発

2011年にSeleteが解散。実質的に海外企業の独占状態にある。

## 富士総合研究所の半導体素子設計シミュレータ (1993年現在)

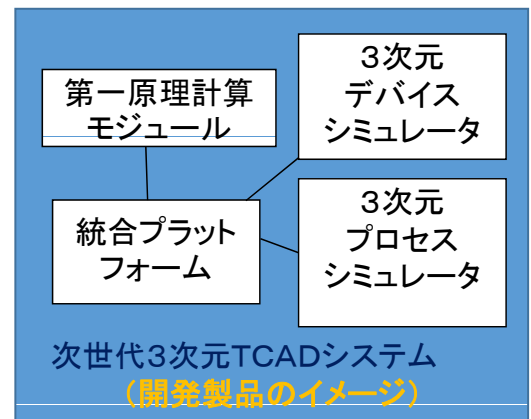
シミュレータの種類	シミュレータ名	目 的
素子設計総合シミュレータ	VEGA	● レイアウト・パターンから任意の断面の形状、不純物濃度分布、電気特性を一貫して求めることできる 2次元総合シミュレータ ● ワークステーションを使用する CAD ツール
プロセス・シミュレータ	VS-P/B	● 任意断面の不純物濃度分布を求める 2次元プロセス・シミュレータ
	POLAR-2 D	● 複雑な形状や酸化による形状の変化等を高精度の解析モデルを用いて詳細解析を行う 2次元プロセス・シミュレータ
形状シミュレータ	VS-M/B	● 半導体デバイスの 2次元断面形状を作製プロセスに従ってシミュレートする
	F TREPTON	● 3次元光リソグラフィ・シミュレータ ● 位相シフト法に対応できる ● 2次元光強度と 3次元現象をシミュレート
プロセスの個別工程シミュレータ	BTE-2 D	● イオン注入を詳細に解析するためのシミュレータ ● 2次元 Boltzmann 方程式を解き、シリコン基板に打ち込まれたイオンの挙動を追跡する
	LASER-2 D/A	● レーザ・アニール法で半導体デバイスを作製する場合の温度分布の時間的変化を計算する 2次元シミュレータ
デバイス・シミュレータ	VENUS-2 D/B	● 連続体モデルによる 2次元デバイス・シミュレータ ● 半導体デバイスの電気特性を求める
	VENUS-3 D	● 連続体モデルによる 3次元デバイス・シミュレータ
	FEMTO-2 D	● 粒子モデルによる 2次元デバイス・シミュレータ ● モンテカルロ法を用い、半導体デバイス内の電子の挙動をシミュレートする ● 半導体デバイスの電気特性を求める
パラメータ抽出プログラム	PARAM	● 回路シミュレーションで必要となる素子モデル式のパラメータをデバイス・シミュレーションの結果より抽出する
回路シミュレータ	FCAP	● スーパーコンピュータ用の高速回路シミュレータ
LCR 計算プログラム	LCR-3 D	● LSI 回路のインダクタンス、配線容量、抵抗を計算する 3次元シミュレータ

# Advance/TCAD

- ◆ LSIの開発、製造においてTCADシステムは必要不可欠のツールとなっているが、現在、TCADシステムは米国のシノプシス社とシルバコ社がほぼ独占している。しかし、両社の主力製品は2次元TCADシステムであり3次元解析が必須となる30ナノメートル以下の微細素子解析においてはその地位を確立していない。また、今後重要となるパワーデバイスの解析機能も市場のニーズに応えていない。
- ◆ 製品:本研究では次世代TCADシステムを開発する。**Advance/TCADは半導体の微細化、高度化に伴い現状のTCADシステムでは対応できない課題を解決するシステムである。**

Advance/TCADは科学技術振興機構殿の研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)の実用化挑戦タイプの支援を受け開発しました。

A-STEPは大学・公的研究機関等(以下、「大学等」という。)で生まれた国民経済上重要な科学技術に関する研究成果を基にした実用化を目指す研究開発フェーズを対象とした国の技術移転支援プログラムです。

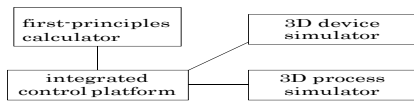


Yasuyuki Ookura, Nobuhiko Kato, Shin-ichiro Kobayashi, Takuhito Kuwabara, Masanori Harada, Ken Yamaguchi and Hideaki Koike  
AdvanceSoft Co., Tokyo, Japan

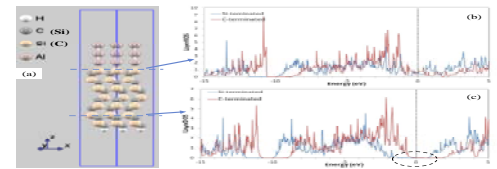
INTRODUCTION

A new 3-D TCAD system has been proposed aiming close coupling of first-principles calculator, process, and device simulators in response to requirements for ultra-small to high-power semiconductor devices of which crystals and materials have been diversified unlimitedly.

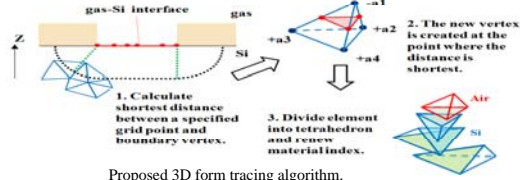
In this paper, topics of each program are demonstrated.



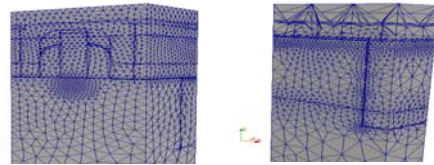
Advance/TCAD system.  
Three parts are seamlessly operated by integrated control platform with flexible graphical user interface.



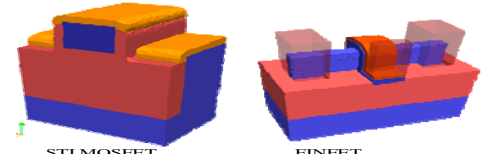
(a) Calculation model in the case of 4H-SiC(0001)-Al(111). LDOS at the interface (b) and bulk (c).



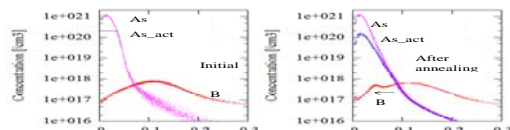
Proposed 3D form tracing algorithm.



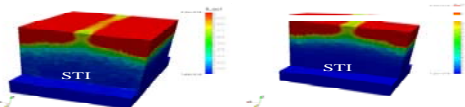
An example of STIMOSFET and IGBT structure using the proposed algorithm.



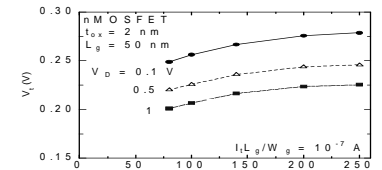
Examples of the final structures using a new algorithm.



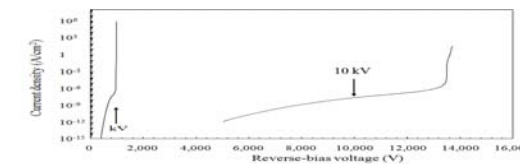
The distribution of As(total), B(total), As(active) (a) as implantation, (b) after annealing. The peak of B shifts toward the peak of As.



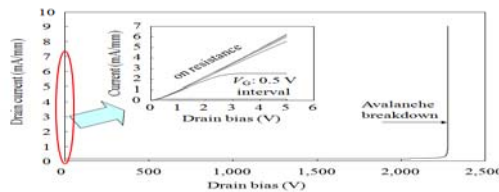
Change of boron profile by channel width due to the arsenic deactivation ( $W_g = 250$  nm (left) /  $80$  nm (right) and  $L_g = 50$  nm).



Appearance of narrow-channel effect for the threshold voltage of MOSFETs due to the change of boron profile by the deactivation of arsenic.



Current-voltage characteristics of SiC diodes over 10 kV.



Current-voltage characteristics of SiC vertical MOSFET over 2 kV.

CONCLUSIONS

The derivation of Schottky-barrier height using first-principles calculator, a robust and high-speed topographical algorithm using the distance function for the process simulator, a 3-D narrow-channel effect of MOSFET due to arsenic deactivation, robust calculation for high-voltage breakdown characteristics of wide-gap devices has been demonstrated by a new 3-D TCAD system.

Copyright ©2014 AdvanceSoft Corporation. All rights reserved.

## 開発する次世代TCADシステムの概要

◆製品: 本研究では次世代TCADシステムを開発する。「次世代3次元TCADシステム」とは半導体の微細化や高度化に伴い現状のTCADシステムでは十分対応できない課題を解決するシステムである。従来のTCADに加えて、新技術は以下のとおりである。

### ①微細素子の解析機能の強化

- ・ バリスティック輸送解析
- ・ CMOSインバータの一括解析と複雑構造や複数トランジスタの一括解析(10トランジスタ程度)
- ・ 3次元解析(微細素子、パワーデバイスでは不可欠)

### ②パワーデバイスへの対応

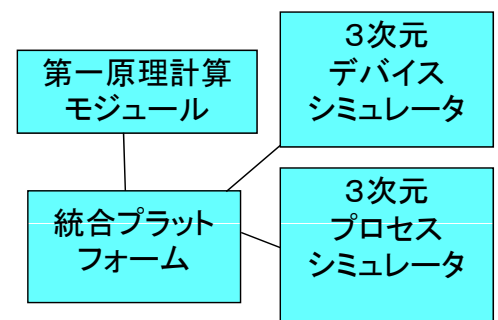
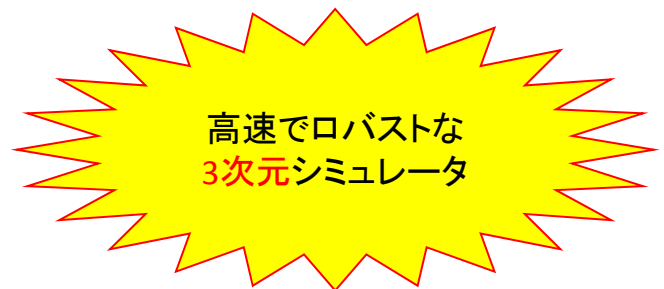
- ・ フローティング電極, 高耐圧のロバスト解析
- ・ デバイスの3次元形状近似の高度化

### ③第一原理計算との活用(材料探索など)

- ・ ITRSの課題への挑戦

### ④計算技術

- ・ 並列コンピュータへの対応(MPIによる分散並列)
- ・ プロセスの3次元形状追跡、3次元自動メッシュ
- ・ 大規模計算の高速化



## デバイスシミュレータのおもな特徴

特徴	3次元高速解析(並列コンピュータ対応) マスク利用により立体構造を容易に作成 3次元メッシュの自動生成 不純物のばらつき解析 パワーデバイスのフローティング電極のロバスト解析 CMOSラッチアップの直接解析 複数トランジスタの一括解析(10トランジスタ程度)
物理モデル	再結合モデル(SRH、オージェ、深い順位、界面順位) キャリア生成モデル(衝突電離、雪崩増倍、GIDLモデル) 電解依存移動度モデル、パリスティック伝導モデル、絶縁体中の移動度モデル、量子効果(トンネル効果)、量子補正、ヘテロ接合

9

## プロセスシミュレータの特徴

- 物理モデル
- イオン注入工程 (モンテカルロ法)
  - 拡散工程
  - 酸化工程 (粘弾性モデル)
  - エッチング工程
  - 堆積
- 数値計算法
- 拡散方程式は有限体積法により離散化する
  - 計算格子は非構造格子(基本は四面体)
  - MPIを用いた分散並列処理(高速、大規模メモリー)
  - 高速線形ソルバー



高速で  
ロバストな  
3次元  
シミュレータ

10

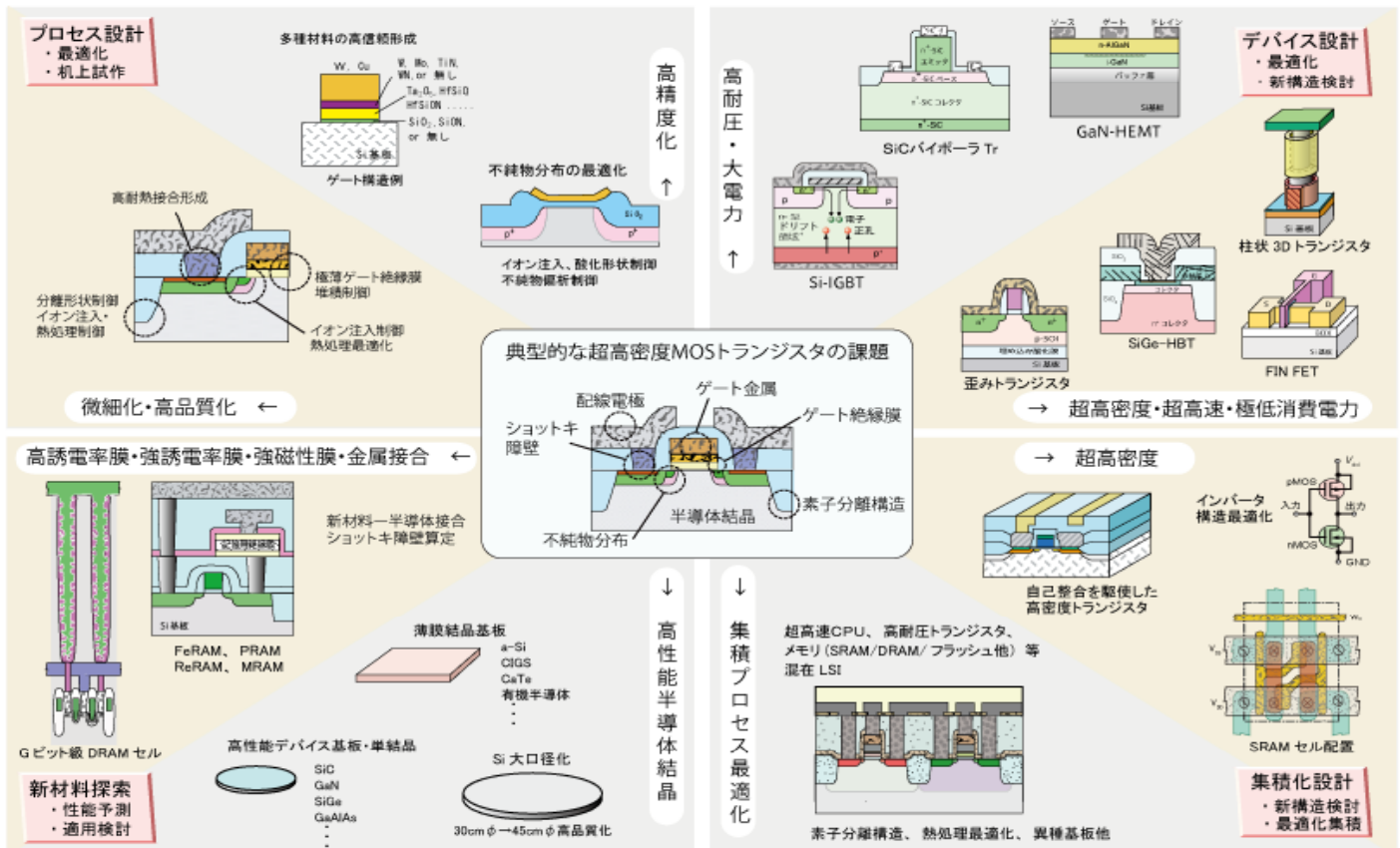
# 本製品の競合製品に対する優位性

○:相対的に優れている。 △:相対的に劣っている。 ×:機能がないか、実用的とはいえない

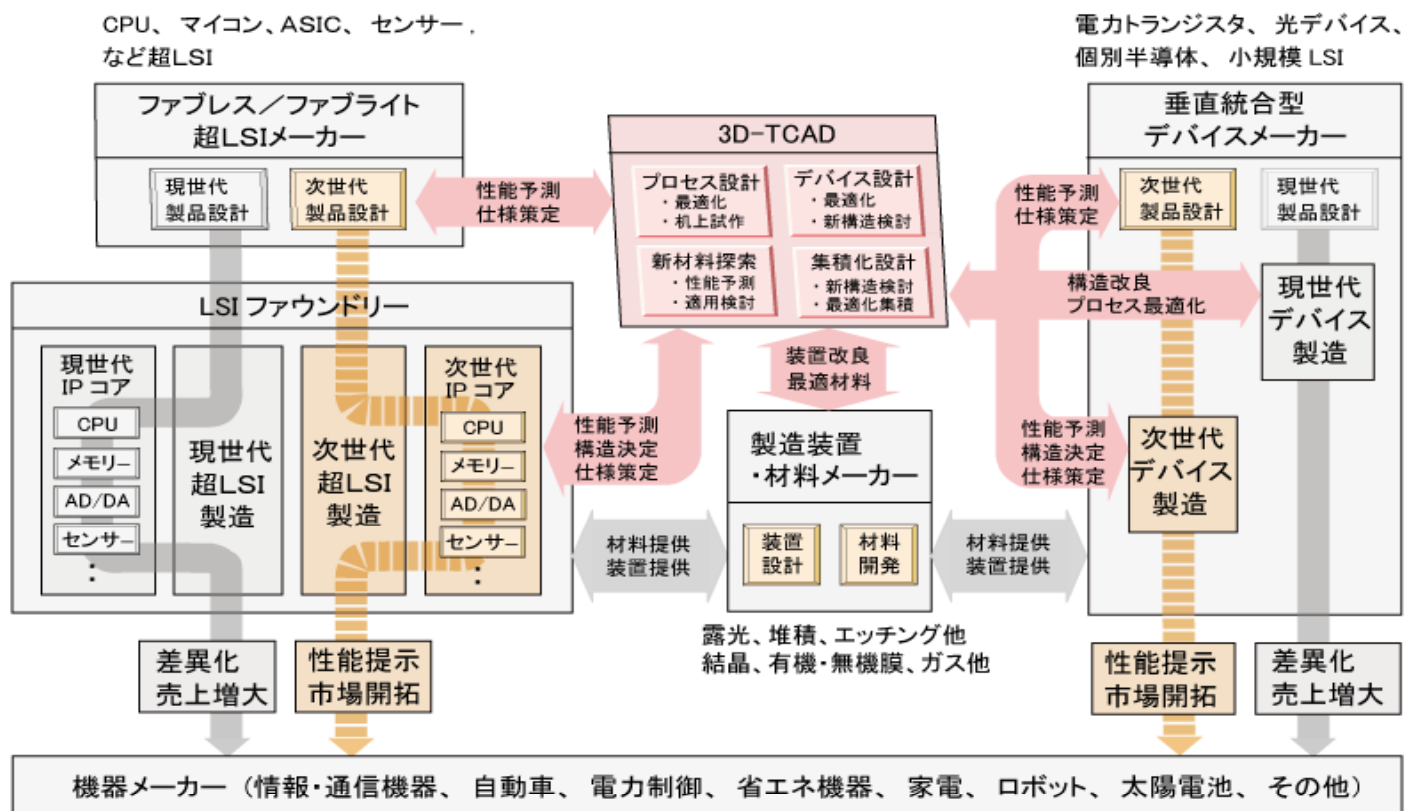
シミュレータ	機能	本製品	競合製品	備考
デバイス シミュレータ	バリスティック輸送解析	○	△	計算速度に大きな差。3倍以上速い。
	CMOSインバータの一括解析	○	×	既存ソフトは解析不可
	3次元解析	○	△	ロバスト性、計算速度に差。特に分散並列処理で優位
	並列コンピュータへの対応	○	△	既存ソフトは分散並列に対応できない。大規模並列計算はできない。
	3次元形状追跡、3次元自動メッシュ	○	△	本製品は独自のアルゴリズムを開発しており。精度、ロバスト性に差がある。
	大規模計算の高速化	○	△	並列化などのより計算速度に大きな差。競合製品は1000万格子程度の大規模解析はできない。
	フローティング電極のロバスト解析	○	×	本製品はワイドギャップ半導体の再結合モデルを(②順位モデル)を実装し、フローティング電極の解析を可能とした。既存ソフトには機能なし
プロセス シミュレータ	次世代素子対応:複雑な構造や複数トランジスタの一括解析	○	×	本製品は10トランジスタ以上の一括解析ができる。競合製品は実用的でない。
	イオン注入	○	△	本製品のモンテカルロ計算は並列化されており、大規模解析に関しては競合製品より数十倍以上高速。
	不純物拡散	○	○	本製品には5変数モデルが実装されている。並列計算により高速。競合製品は実績の点で先行している。
	酸化	○	△	競合製品の3次元の酸化計算(粘弾性)は実用的ではない。
	堆積・エッチング	○	×	本製品は3次元の複雑な形状の堆積・エッチングが解析できる。競合製品は複雑な形状に対して実用的でない。

## 3D-TCAD 適用対象例 (汎用である)

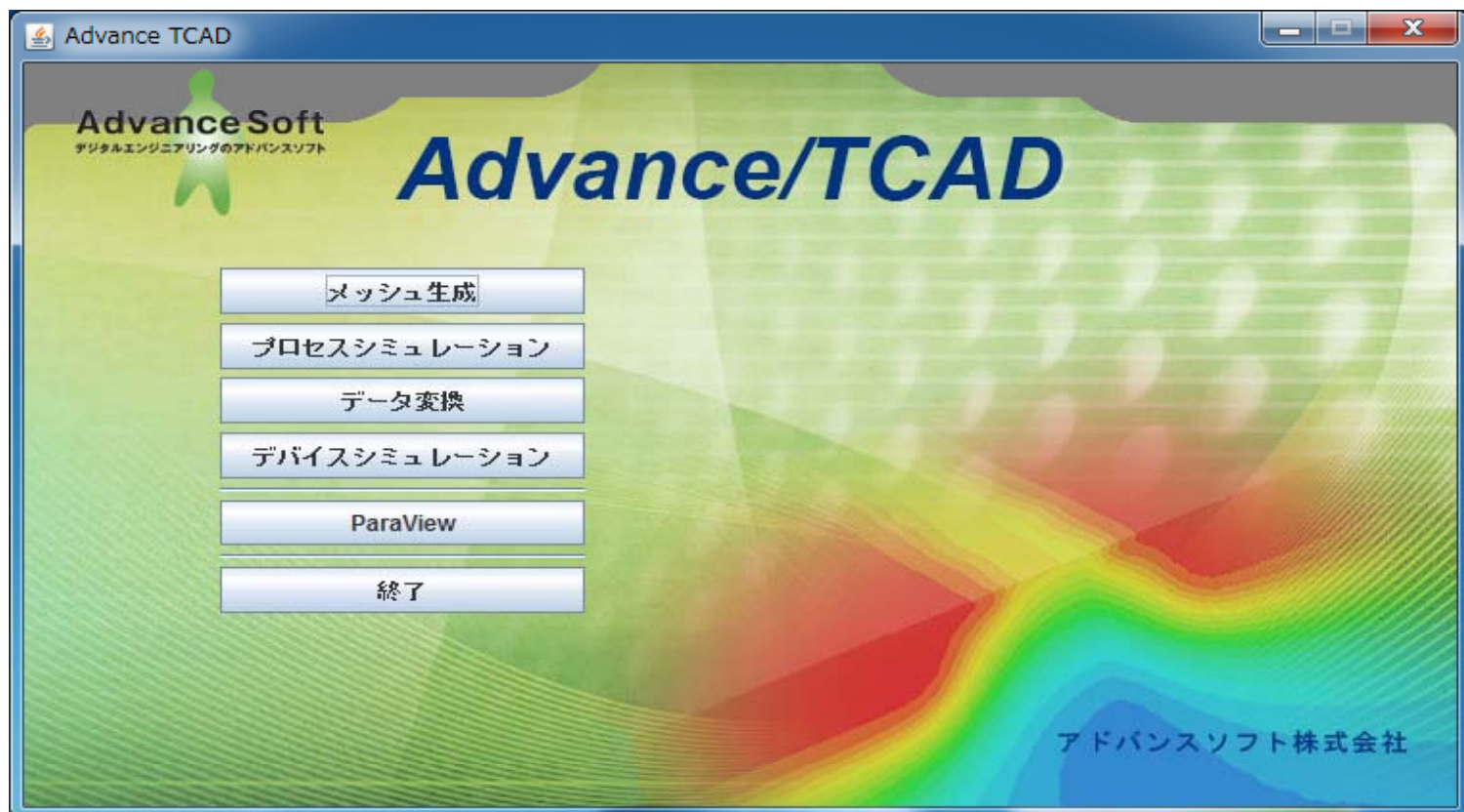
### 3D-TCAD 適用対象課題



# 3D-TCADのニーズ



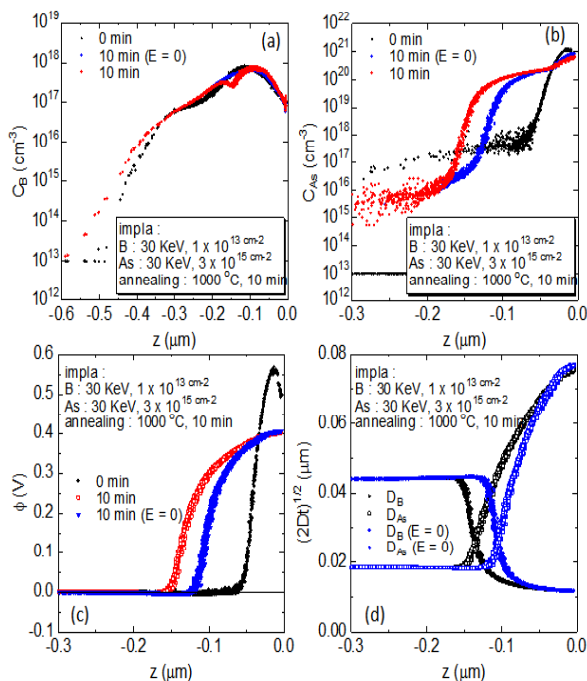
## Advance/TCADシステムの概要



## 拡散

簡易拡散モデル(FERMIモデル)と変数モデルを実装している。FERMIモデルは不純物原子の流束が濃度勾配に比例する項とイオン化した全不純物原子による電界項の和から構成されるモデルである。尚、FERMIモデルで使用する拡散係数等の値はSUPREM4のものを利用している。

### FERMIモデル 野結果



赤丸がFERMIモデルを用いた場合の濃度分布で青丸は電界分布がゼロ(E=0)の場合

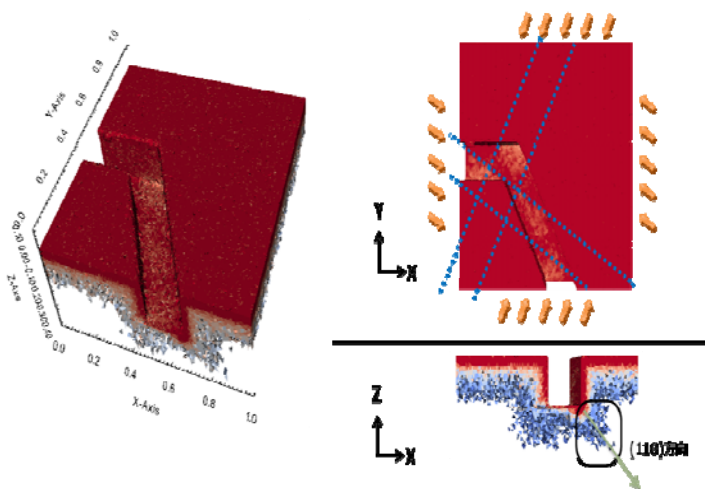
黒: 拡散の初期分布はイオン注入計算の結果

(a)Asおよび(b)Bの深さ方向の濃度依存性(z=0がSi-SiO<sub>2</sub>界面でz<0はSi領域)  
(c)ポテンシャルの深さ(z)依存性(d)拡散長(2Dt)<sup>1/2</sup>の深さ(z)依存性

## イオン注入

イオン注入機能として、3次元モンテカルロ法アルゴリズムを実装されている。任意のアモルファス材料、および結晶基板への注入計算が可能となった。また、それ以外に4H-SiCなどの六方晶系結晶基板への対応、並列化、分子注入の実装されている。

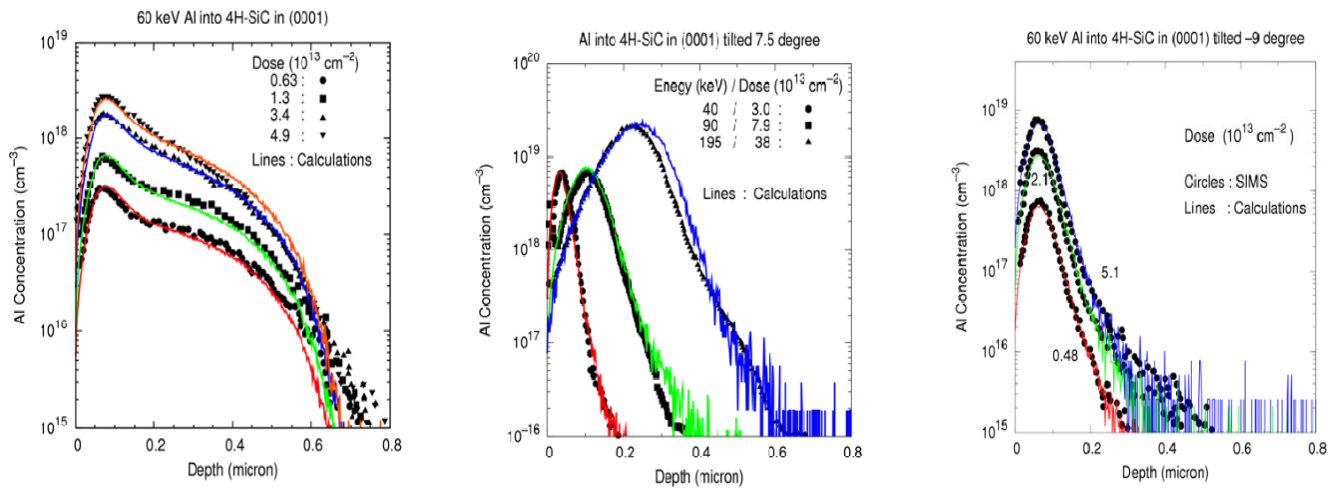
1次元解析を基づく高速解析機能も実装されている。



3次元形状へのイオン注入シミュレーションの結果

六角トレンチ構造の4分の1部分への斜めイオン注入計算の結果。左側の図は全体の鳥瞰図、右側上手はxy平面、右側下図はzx平面で切り取った図。注入条件は、モンテカルロ粒子数 400万個、注入イオン ほう素、注入エネルギー 5keV、注入ドーズ量 10<sup>15</sup>/, Tilt角 50°, Rotation角を60°, 150°, 240°, 330° の4方向とした。

# ◆イオン注入 SiCの6方晶対応

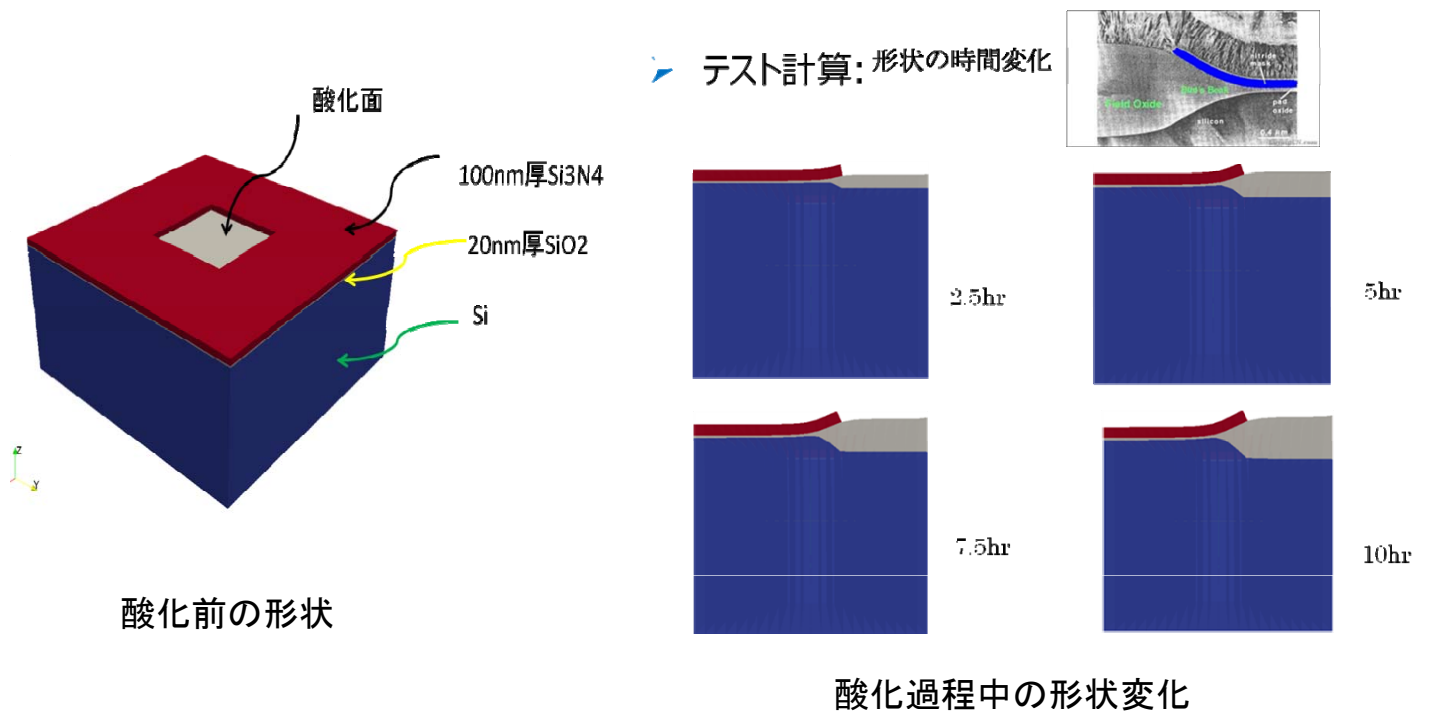


イオン注入シミュレーション 実験値と計算結果の比較

それぞれ4H-SiC結晶基板の(0001)面へのアルミニウムイオンの注入を共通条件とし、左図は注入量依存性、中央図は注入エネルギーと注入量依存性、右図はTilt角を9度と設定し注入量依存性を調べたものである。

## 酸化

3次元粘弾性モデルが実装されている。また誤差関数を用いた簡略解析機能も実装されている。

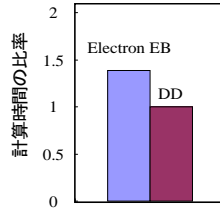


# デバイスシミュレータの特徴

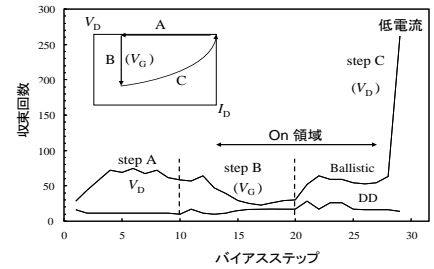
①バリスティック輸送解析で、現状の3倍以上の高速計算手法を確立し、バリスティック輸送解析の実用化を実現した。

②従来は解析できなかったワイドギャップ半導体(例えばSiC)のフローティング電極解析手法を確立し、パワーデバイスの解析を実用化した。

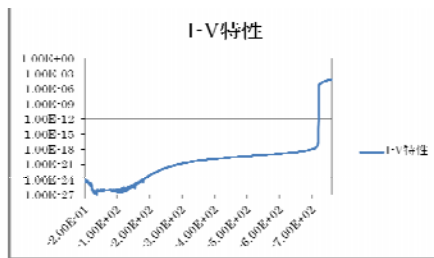
③従来はできなかったCMOSの一括解析手法を確立した。複数トランジスタの一括解析を実現



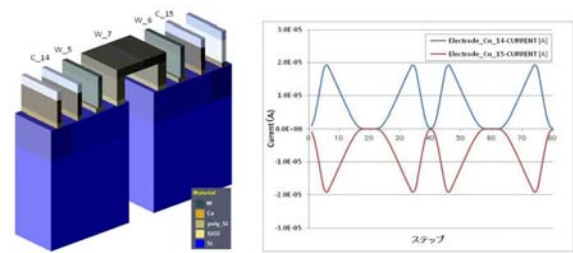
1反復当たりの計算時間比較



一筆書きバイアススケジュールにおける収束回数



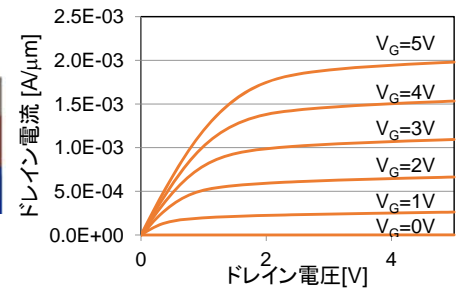
2準位モデルを用いた場合のSiCのI-V特性



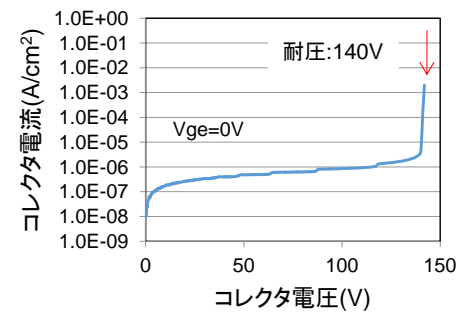
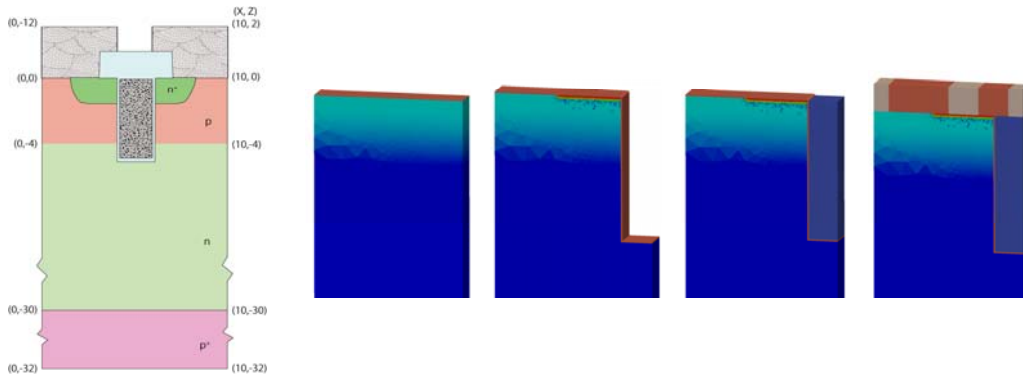
CMOSインバータの簡易モデルと電流-電圧特性

## 解析事例

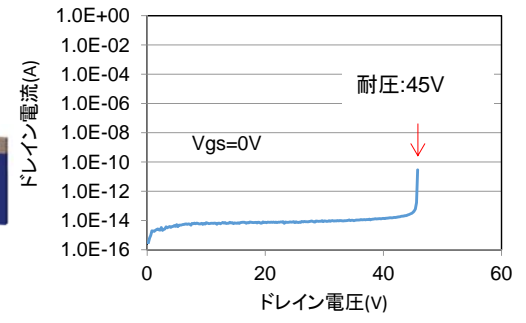
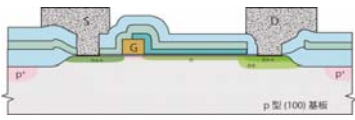
### 微細MOSFET



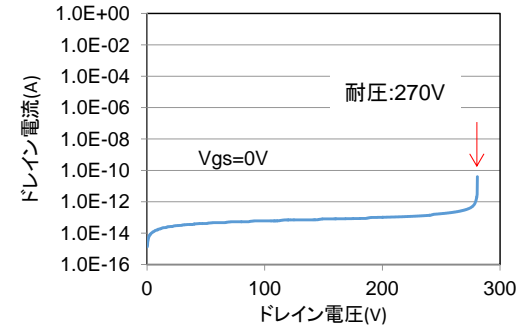
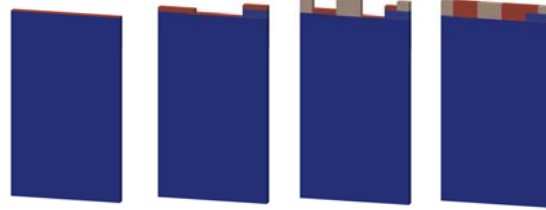
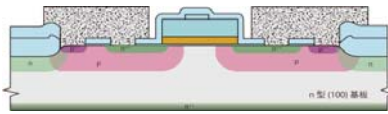
### IGBT



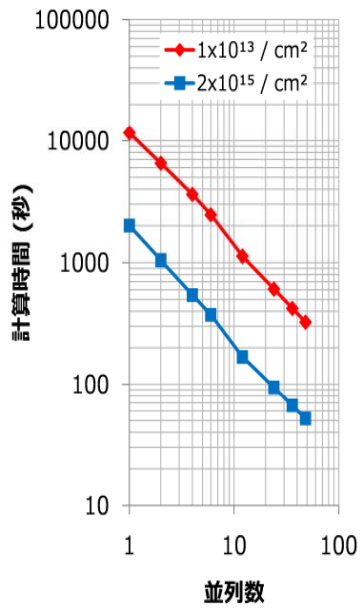
## 横型パワーMOSFET



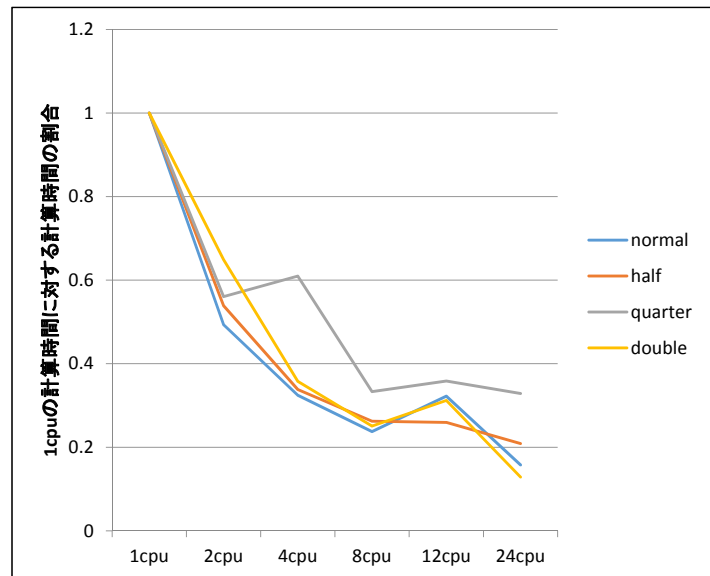
## 縦型パワーMOSFET



## ◆ 並列計算



イオン注入  
48並列で39倍の高速化



デバイスシミュレーション  
Normal: 120万格子数

