

WG10(モデリング & シミュレーション)

- M&S技術の効果維持に必要な共通基盤技術 -

STRJ-WG10主査 和田

副主査 佐藤(富士通), 幹事 林(沖)

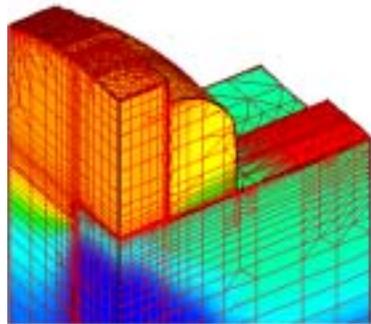
海本(松下), 藤永(ルネサス), 麻多(NEC-EL), 中村(東芝)
藤原(三洋), 藤井(シャープ), 木村(SONY), 小島(ローム),
蒲原(ルネサス), 鹿毛(STARC), 小林(アネルバ), 小方(ULVAC),
谷口(阪大), 小谷(広島国際大), 大野(産総研) [順不同敬称略]

M&Sのスコープ

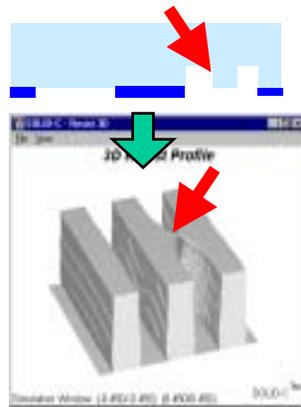
- 広範囲の物理・化学現象を対象にしている -

対象

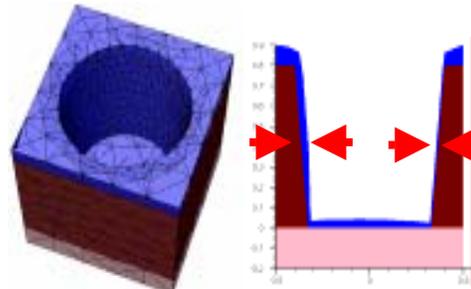
- プロセスSim., デバイスSim., 回路Sim., リソグラフィSim., 形状/装置Sim., 材料設計など



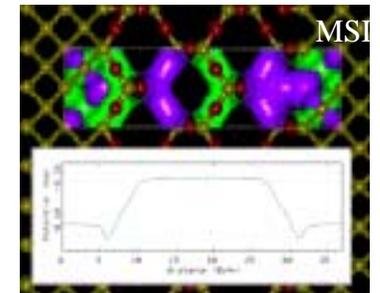
プロセス・デバイスSim.による
STI-MOS内の電位分布



リソグラフィSim.による
マスク欠陥の転写像



形状Sim.によるウェル
端のスパッタ膜形状



分子軌道法によるSiO₂
膜内の電子ポテンシャル

の図は M&S-ITWG,ITRS Tokyo 2002の資料の図を編集

2004年度の活動

- M&Sの経済効果の維持・向上には? -

• '03の調査 = M&Sの経済的效果

- M&Sの成功例は26-34%の効率向上

- キャリブレーションの重要性が指摘された

• M&S開発/効果維持の課題

- 対象の複雑化

- 対象分野が広範囲

- 新モデル/Sim.開発長期化

- 研究者の不足

} 効果維持・向上には?

報告内容

- M&Sの効果を向上・維持するための方向性 -
- Difficult-Challenge vs M&S分野 の表で検討
 - 必要な技術、仕様、if...then、を検討
 - 共通的な技術の抽出、分野ごとの重要技術を検討

頻度が多い
キーワードに着目

	FEP	Dev.	Litho.	装置	配線	回路	計算
H.F.回路				効果の解析			法の利用
浅い接合	法を適用						
Ult.CMOS		現象				効果の解析	法の利用
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

作成した分析表(部分)

Remark (from Table 102)	Front-End Process	Device-Modeling	Lithography	Equipment	Interconnect	Circuit-element	Numerical methods
Succession of modeling & tools that combine atomistic-effect with present-day continuum software tools	流体コードへフィードバックするための粒子コード バラツキを扱うための粒子コード モンテカルロ拡散プログラム + 第一原理計算	・原子レベルの計算によるDevice simulatorのチューニング(輸送モデル・移動度モデル)。		粒子-流体複合モデル:プラズマ解析で有効			数式でのモデル化 困難な物理係数(多変数に依存)の 為の多次元空間でのデータ補間アルゴリズム
Ultimate CMOS & nanoscale simulation. Capability							
Methods & algo. Which contribute to predict CMOS limits	バラツキを扱うための粒子コード イオン注入時のみならず形状膜加工時に生ずるダメージをどうあつかうか?	正確な2次元プロフィールがわからない?ためデバイス特性の予測が難しい?2次元インパースモデリング手法が有効?					各構造に対応した適切なコンパクトモデル(=少ない計算量)と、多目的最適化の判断支援技術(制約条件を任意に設定して複数の性能指標をトレードオフを判り易く表示する技術)
Quantum based simulation.		・界面の量子効果を古典的な流体シミュレータに取り込むためのモデル。					固有値問題の効率的かつ高精度な解法
Models & analysis to enable design and evaluation of device architecture beyond traditional planer CMOS	SiGe, Ge中の高精度拡散モデル 薄膜界面における不純物拡散	・ターゲット特性からトランジスタ構造を推定するためのストラテジー。					複数の性能指標を(同時)最適化するアルゴリズム(GA?)と結果の判り易い表示
Models for device impact of statistical fluctuation in structure & dopant distribution		・離散的な不純物分布の与え方。				確率微分方程式で定式化出来、かつその効率的数値解法があれば可能?	最小限のコード変更で並列ハード性能(PCクラス)を生かせるコンパイラ技術。 確率偏微分方程式(係数や各項が確率変数)の数値解法?

分析表の計算技術の列

- 確率偏微分, インパースモデリング, 多目的最適化, テーブルと補間... -

数値計算技術	
5GHz以上のHF回路モデル	
効率的なフルチップの配線遅延Sim.	3D-Sim.から安定・効率的 パラ抽 が必要 並列計算の有効活用 素子やセルのキャラクタライズはテーブル化が行き着く先か？ その時、 多次元テーブル のコンパクト化と高速なアクセス
精密な3次元配線用モデル	複雑形状に対応した 3D格子発生 技術
HF回路用モデル(非定常輸送, ノイズ, カップリング)	頑健で効率的な パラ抽
RF測定なしでのパラメータ抽出	頑健で効率的な パラ抽 並列計算の有効活用(中村)
極浅い接合形成	
点欠陥, 高濃度域の活性化, 準安定化効果, 拡散, 界面, シサイトの各モデル	実用的 インパースモデリング 手法 3D格子生成
極浅い接合の評価技術	CV特性からドーパント分布を推定する インパースモデリング
装置シミュレーションと形状シミュレーションの結合	
物理的な基礎データ(反応係数, 反応断面積, 表面化学), 反応機構, 簡素化されたモデル	膨大な化学反応経路から主要反応を推定する手法(インパースモデリング)
装置シミュレーションと形状シミュレーションの結合	一方の結果をテーブル化したモデルでの 多次元データ補間 方法
リソグラフィのモデル	
LERとその回路特性への影響モデル	3D格子生成 (デバイスSimでのパラッキ解析) 効率的な 確率微分方程式 の数値解法
超解像技術とマスク合成(OPC, PSM)	効率的で頑健, 局所最適リーな インパースモデリング
多世代に適用可能なリソシステムのモデル	多目的最適化 の判断支援ツール(技術の性能指標化が前提)

流体近似モデルの先	
原子レベルから流体近似レベル迄の各モデルの階層化	数式でのモデル化が困難な場合のテーブルモデル用に 多次元テーブルの補間 アルゴリズム
CMOS極限とナノデバイスのモデル	
CMOSの限界性能予測用の計算方法	多目的最適化 技術と判断支援・表示技術
量子力学ベースのモデル	固有値問題の効率的かつ高精度な解法
従来のCMOS以降の素子性能評価や設計用のモデル	多目的最適化 と判断支援技術
ドーパントや構造揺らぎに関する素子特性のモデル	並列計算技術 確率偏微分方程式 (係数や各項が確率変数)の数値解法?
コンパクトモデル	
統計的事象の効率的な解析方法	確率微分方程式 とその効率的数値解法 区間計算法
配線とパッケージに関する熱・機械・電気的モデル	
パッケージと配線に関するモデル(EM, ストレスマイグレーション, ピエゾ効果, 密着性など)	多数の現象間の因果関係や影響確率を解析する技術(一種のバリエーションモデルか?)
ソフトウェアの統合化と高度なアルゴリズム	
各問題用の解法に特化したアルゴリズム	確率偏微分方程式 の効率的数値解法, 頑健かつ効率的 パラ抽 / インパースモデリング 多目的最適化 と判断支援技術 3D格子発生 多次元ランダムテーブルの補間
実験計画, ジョブ制御, データファイルの標準書式, 各種ソフトの統合/結合	汎用ファイル書式と入出力機能のライブラリ

M&S各分野に共通的な技術

— 要求に応えるために必要な数値解析技術 —

- 最適化・逆問題
 - パラメータ抽出、多目的最適化
- バラツキの効率的な解析
 - 確率偏微分方程式、区間解析
- テーブルモデル
 - 多次元ランダムテーブルと補間
- 3D格子発生
- 並列計算技術, ...

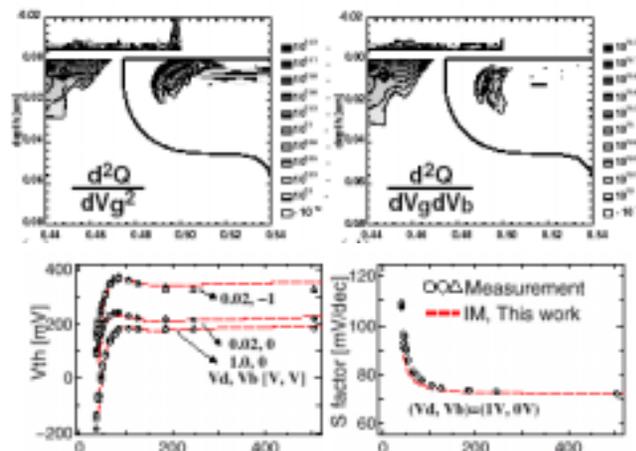
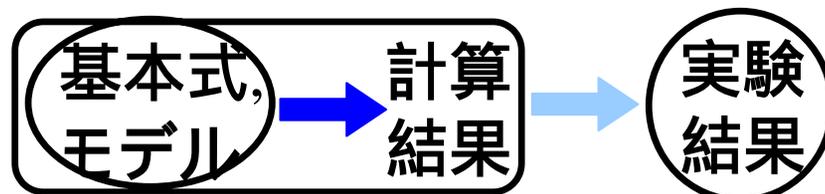


他分野の手法・技術動向への感度と、従来手法にとらわれない発想が重要

インバースモデリング技術の魅力

- 原因 結果のM&Sから広い視野へ -

- 広い/新たな応用範囲
(確かなモデル存在が前提)
 - 測定の支援(2Dプロファイル, 界面準位, ...)
 - 複雑な反応系の主反応
 - キャリブレーション
 - 性能を満す構造の探索
- 数学的には多くの困難
 - 解の存在, 一意性, ...



T.Tanaka et al., IEDM2002 Tech. Digest, 35-4
インバースモデリングで V_{th} -L特性等から
2次元的不純物分布を推定

最適化/インバースモデリングの課題

- 局所最適解, 計算効率, 多目的 -

- 最小化すべき量は通常多数の局所最適解が存在
頑健な方法
- 現実には相反する性能指標
妥協解の提示
- シミュレータでの試行は長時間
探索の効率化
- モデル/Sim.の十分な予測性能を前提
キャリブレーションに利用

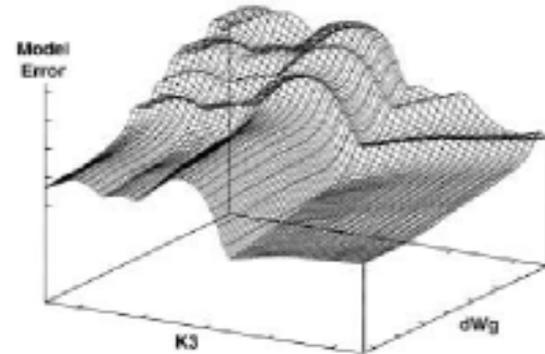
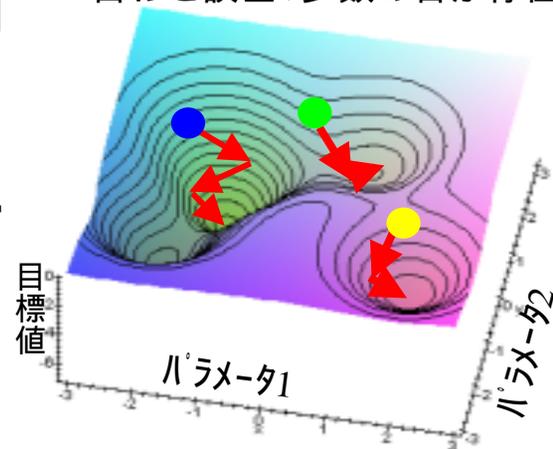


Figure 1: Device model error versus various values of BSIM3 parameters dWg and K3.

'99 Int. Conf. On Modeling and Simulation of Microsystems
BSIM3のパラメータK3とdWgに対する
合わせ誤差. 多数の谷が存在する



従来法は計算の
初期値に依存

インバースモデリング技術の例

— 結果・実測値から原因・パラメータを推定 —

- 測定困難な量も推定可能 分析技術への寄与
- キャリブレーションに極めて有効な技術

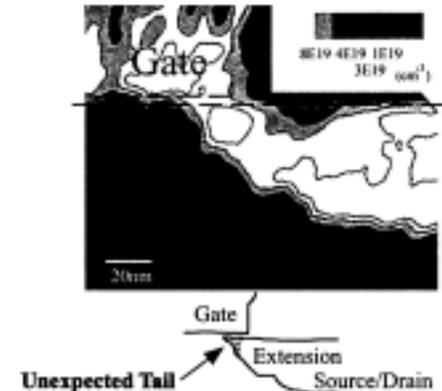
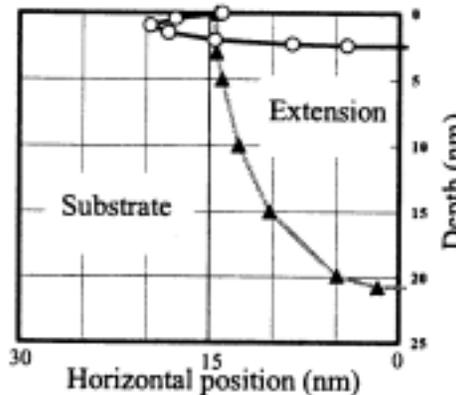
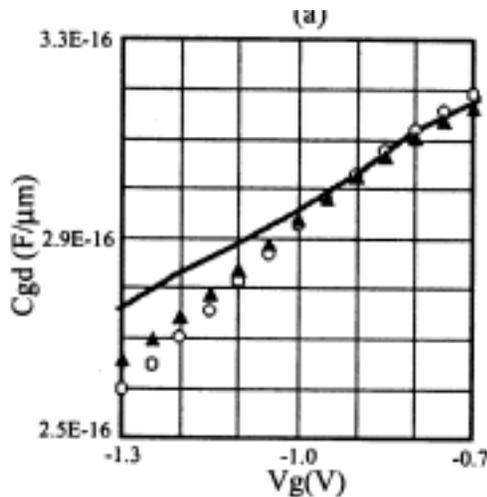


Fig. 5 2D distribution of n-type carrier concentration around the SDE region, together with a schematic illustration. This was estimated from the tip position by calibration using a SIMS depth profile across the SD region.

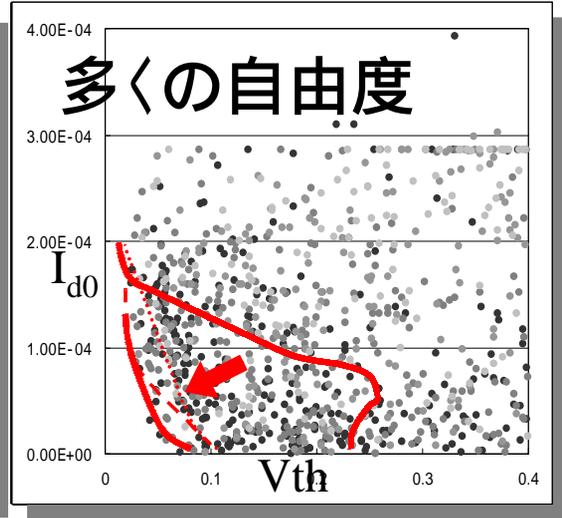
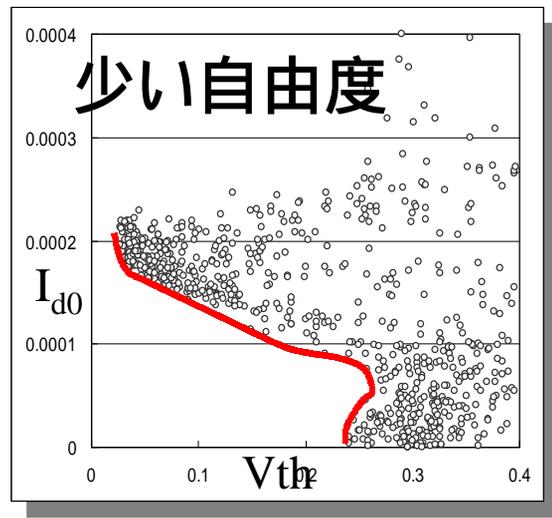
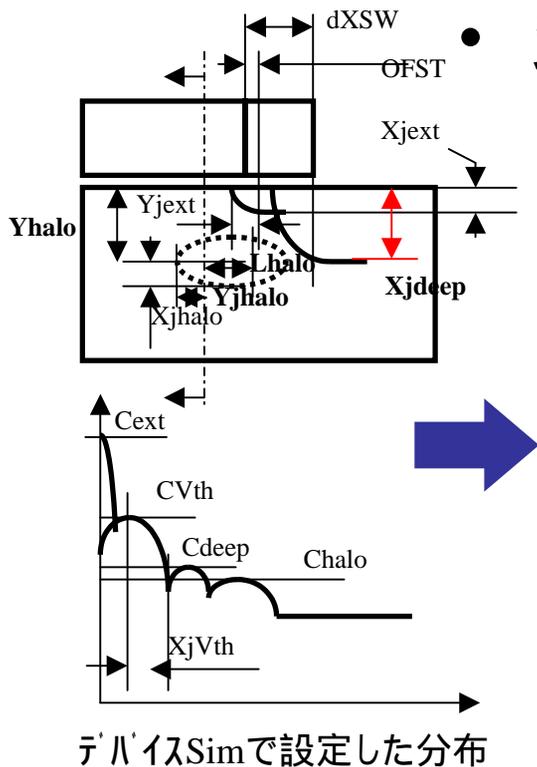
MOSFETのext.部の異常拡散の推定例

H. Fukutome, T.Aoyama, H. Aritome, IEDM2001

必要な最適化技術

— 多目的・多峰性問題の解決と計算効率が鍵 —

- 多目的最適化・・・トレードオフの性能指標を極力満す解の探索
- 多峰性問題・・・複数の極小値から最小値を探索出来るか？

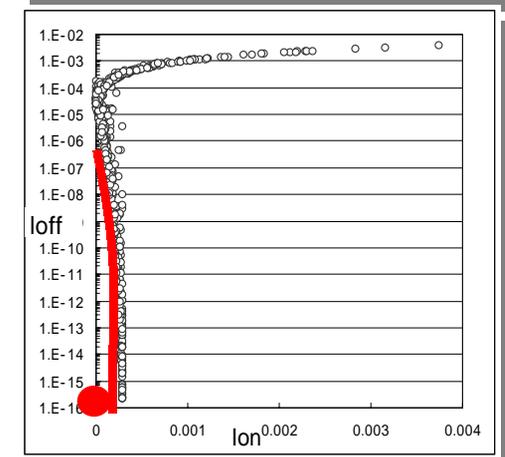
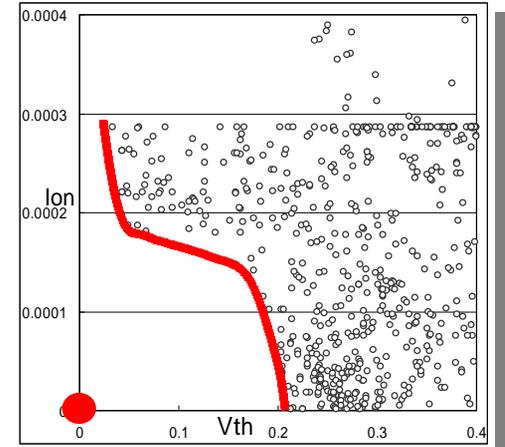
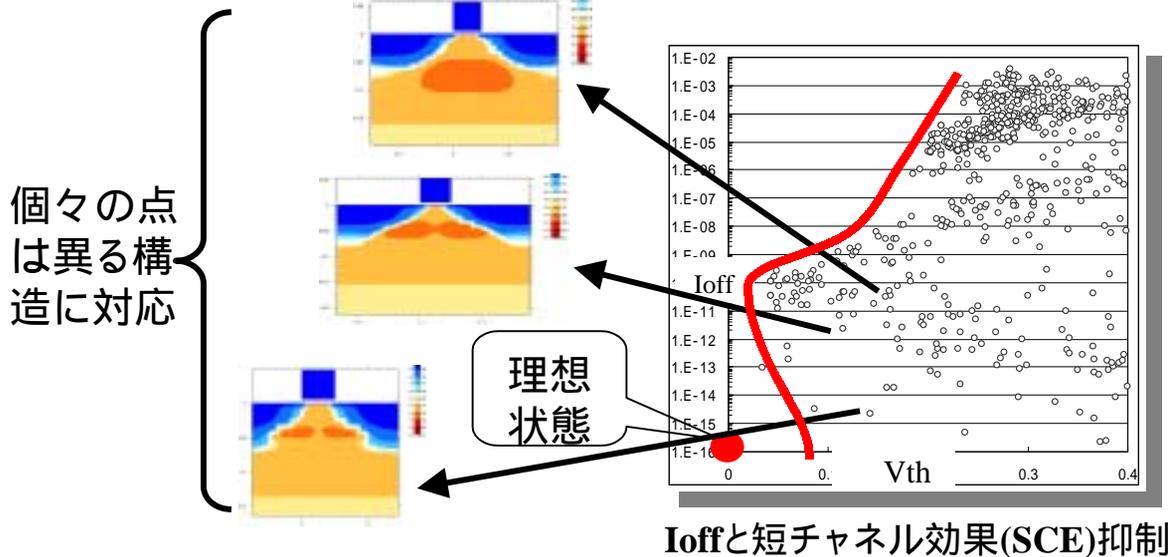


MOSFETの短チャネル効果抑制と駆動力の相反指標を満たす解の探索結果

多目的最適化の例

- 駆動電流, 短チャネル効果, Off電流の3目的 -

- 与えられた自由度内での性能限界が判る
- 複数目標のトレードオフ関係について見やすい表示が必要

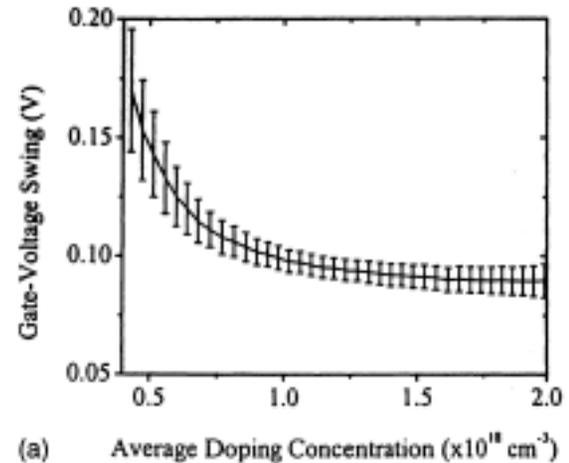
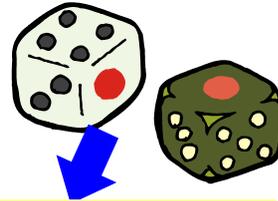


IonとSCE抑制(上), IonとIoff(下)

バラツキや揺ぎの効率的解析

— 確率偏微分方程式などの適用検討を —

- モンテカルロ手法の効率改善
- 確率偏微分方程式
 - 変動項を含むモデル式の平均値を1試行で
- 区間解析手法?



ドーパント揺らぎによるサブスレショルドスイングの解析結果

P.Andrei, I.Mayergoyz, "Random doping-induced fluctuations of subthreshold characteristics in MOSFET devices", *Soviet State Electronics* 47 (2003) 2055-2061

確率偏微分方程式

$$\Delta X = b(X, t)\Delta Z,$$

Zは平均値=0, 分散が t の時

$$df(X, t) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial f}{\partial X} b dZ + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X^2} b \cdot dt$$

揺ぎの効果

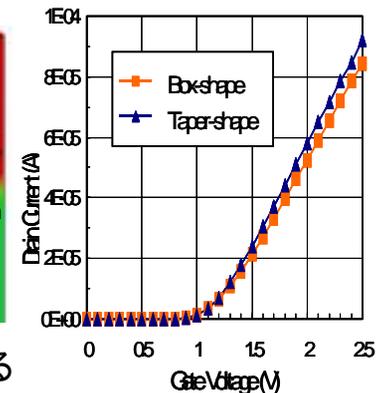
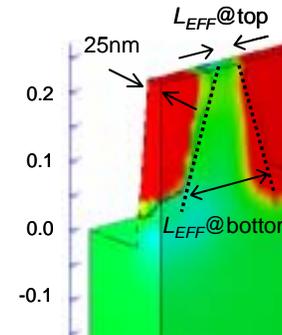
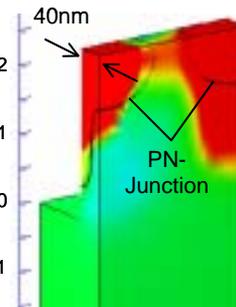
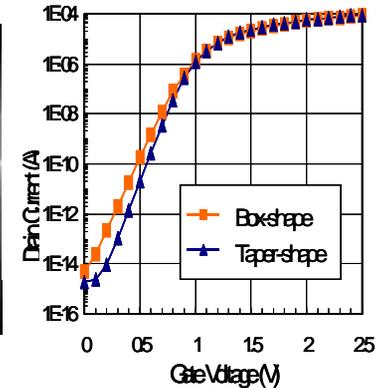
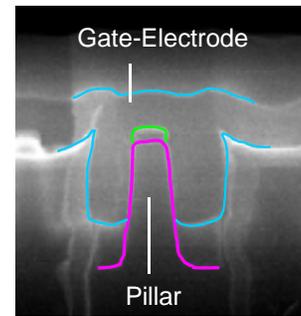
Gauss型の変動効果が前提, 適用できる式の形には制限がある

3D格子発生技術

— 必須で緊急・実用レベルとはまだ言い難い —

- 3D解析の必要性増大
(微細化やFinFET 3D効果)
- 3D格子への要求項目：

- 移動界面・形状対応
- 薄膜曲面への対応
- 材質境界層の形成
- 扁平・針状要素排除



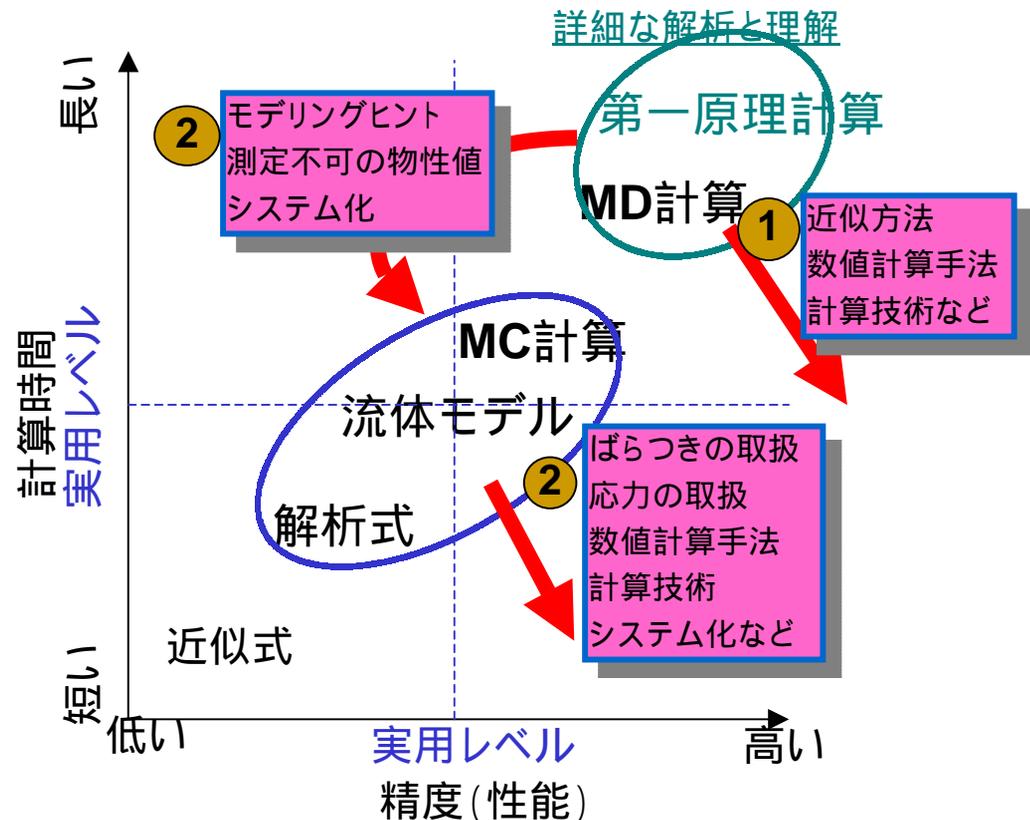
FinFETはテーパで特性が大きく変わる

近藤他, 応物学会シリコンテクノロジー分科会第56回研究会2003

Front-End Process M&Sの課題

- モデルの階層化と成果の相互活用 -

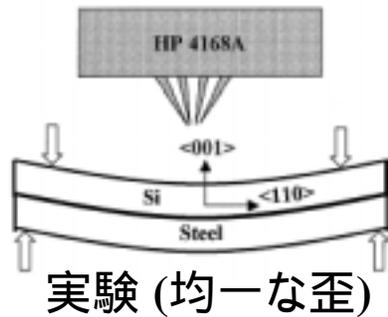
- 個々の工程への活用・寄与実績の積み上げ
 - 体系的実測データ取得
 - モデル精度の階層化
 - 応力の効果, バラッキ, 測定困難な量の推定
- デバイス解析用の機能 (素子構造, プロファイル計算)
 - キャリブレーション手法



MC : Monte-Carlo モンテカルロ
MD : Molecular-Dynamics 分子動力学

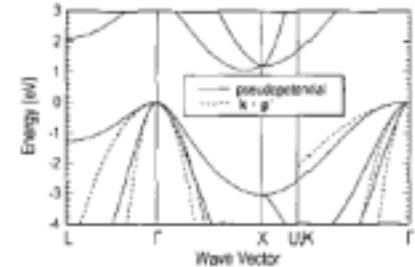
デバイスSim.の課題

- 応力/歪みを考慮した各種モデルを早急に -

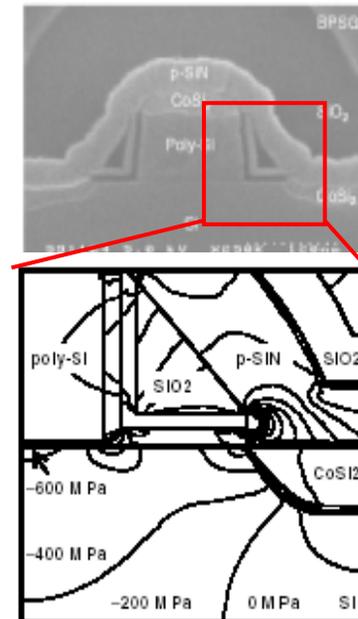
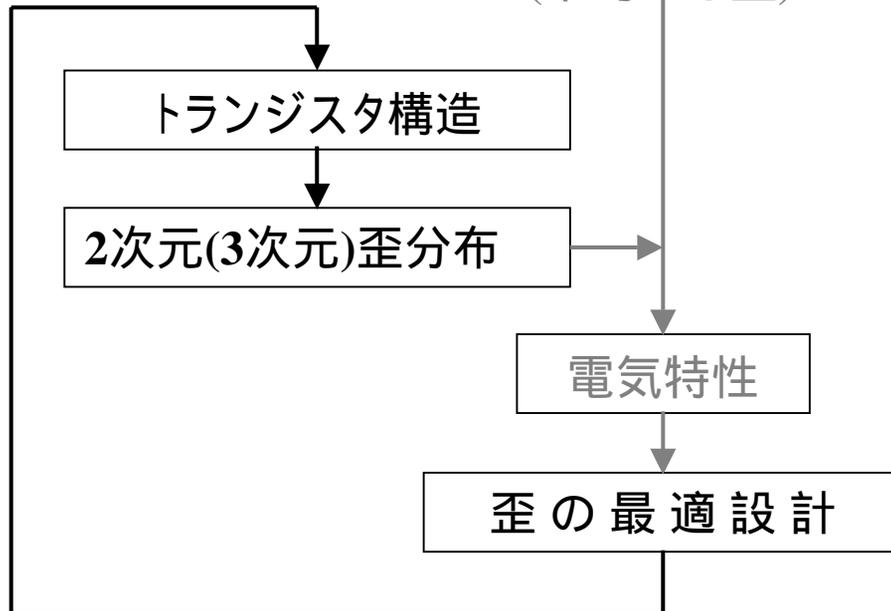


不均一な歪に対応した移動度モデルの早期開発が必須！

移動度モデル
(不均一な歪)



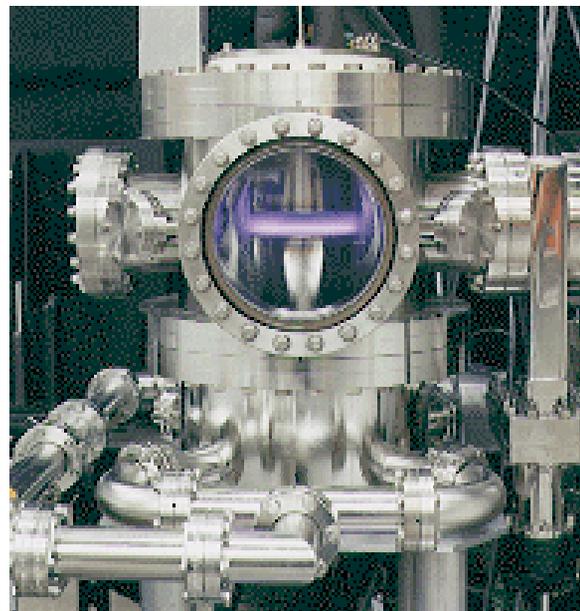
バンド構造による計算
(均一な歪)



S. Ito, IEDM (2000)

装置/形状M&Sの課題

- プラズマ・表面反応のモデル開発に向けて -
- 系統的実験データが不可欠
 - 一組織で系統的取得困難
 - 衝突反応断面積など膨大な基礎データが必要
 - データ共有化システムなし
- 標準装置・TEGを決め、系統的に測定するプロジェクトを！
 - 組織間でのデータ比較
 - の微細形状に関する系統的データも共有可



米国の例：NIST rf reference cell project . This reference chamber was developed in the 1988 Gaseous Electronics Conference.

回路要素M&Sの課題

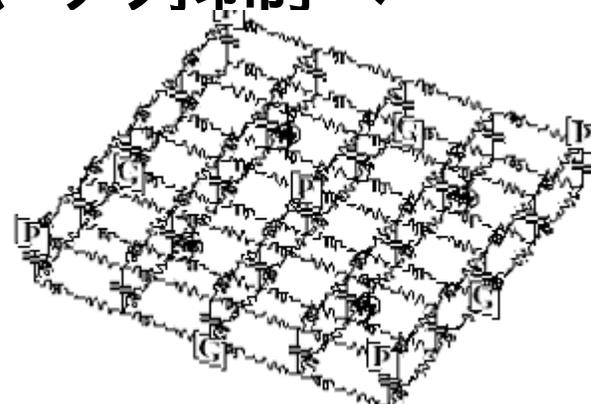
- 回路動作信頼性向上と過剰マージン抑制へ -

- 高速化

On-Chip Inductance,

依存顕在化,

変動, 電源変動問題



高速化のため回路解析はL,C,R
全ての考慮が必要に

- 必要技術と困難

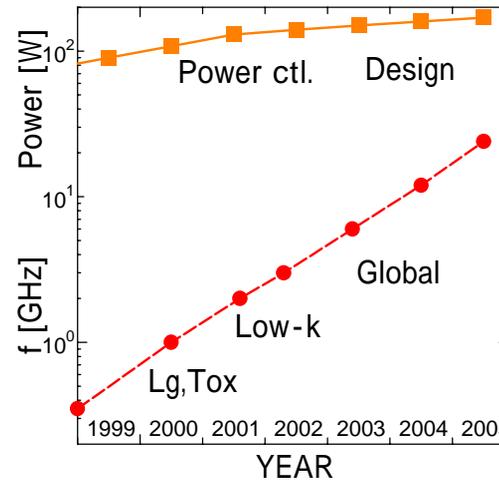
- インダクタンスモデリング: On-Chip Inductance抽出の難しさ
- フルチップで寄生RLC抽出: 長距離作用 安定解法困難
- 大規模RLC回路の解析: 大規模密行列の安定解法
- オンチップの実測検証技術の確立

インターコネクの技術課題

- Full-Chip熱解析へ向けて -

- 際限ない高速化追求
 - 配線構造/配置に依存
 - Low-k化と熱伝導率低下 trade offが課題

設計には大規模・高効率解析手法が必須



代表的素子の電力と周波数トレンド

設計初期での発熱問題考慮が重要になる

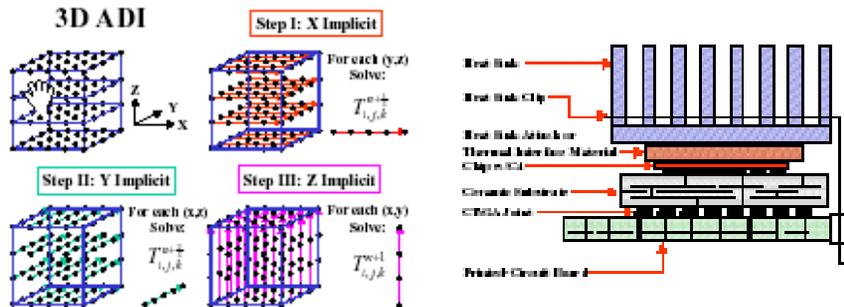


Figure 1: ADI Method.

フルチップ3D解析の例：3D-ADI法で計算時間をO(N)にした

T-Y.Wang (U.Wisconsin), ISPD 2003 “Thermal-ADI”

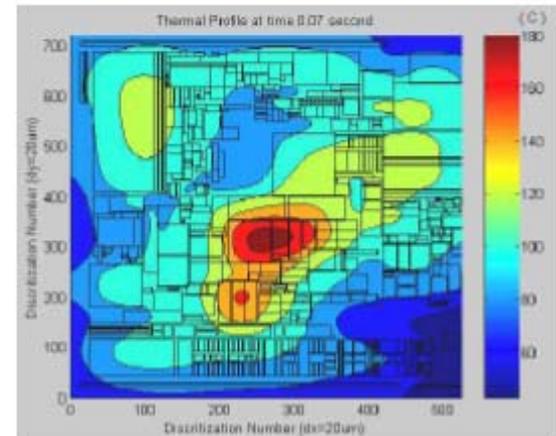
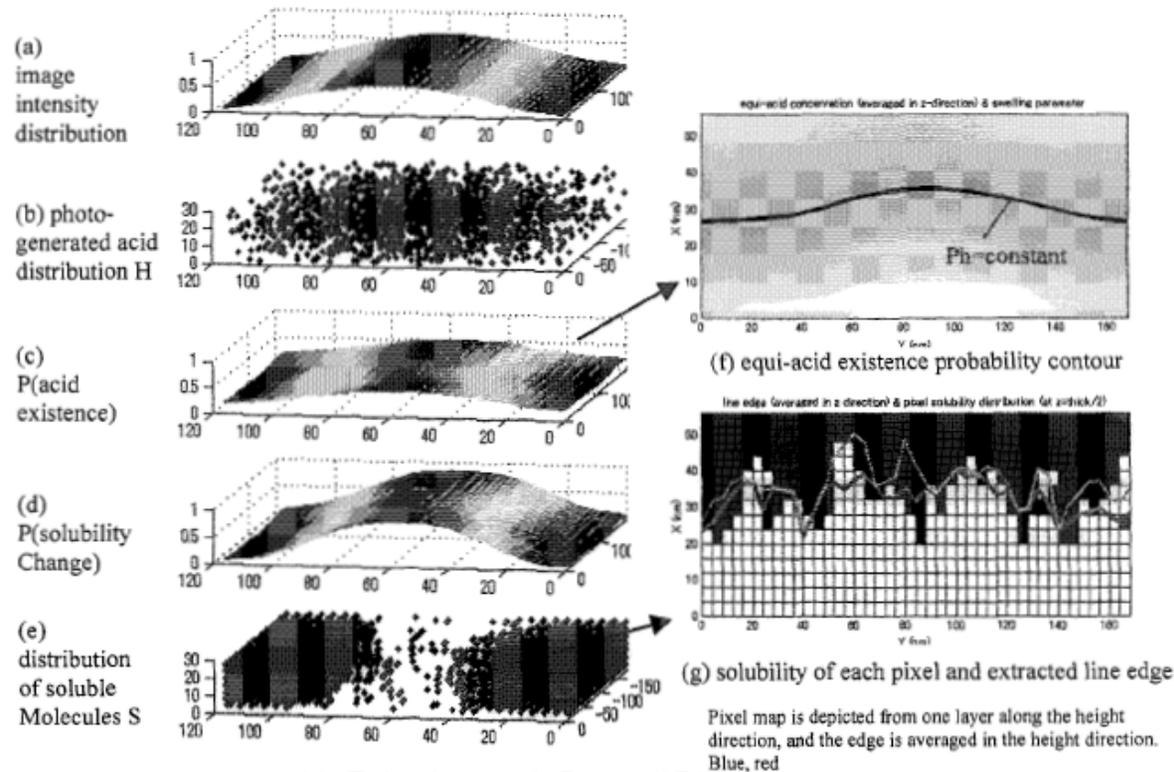


Figure 10: Thermal Profile at $t = 0.07$ s.

リソグラフィM & Sの課題

- 光学像のSim.: EUV, 液浸 偏光の考慮
- レジスト形状のSim.: 組成揺らぎ 形状揺らぎ



化学反応型レジストのLERシミュレーション

まとめ

- M&Sの効果を向上・維持するために -

- 共通的要素技術

- 最適化/インバースモデリングでは目処,バラツキの効率的解析は限定的なら可能?,他は更に調査/研究を要す

- M&S各分野での重要課題

- プロセスSim.=体系的データ蓄積,キャリブレーション,モデル階層化
- デバイスSim.=不均一歪依存移動度
- 装置/形状Sim.=標準装置/TEGでの基礎データ集積を!
- 回路要素=On-Chip-Inductance効果(抽出法,解法)
- インターコネク特=Full-Chipレベルの熱解析,計算効率
- リングラフイ=偏光の考慮,レジストの感光・反応モデル

ITRSにある「材料設計」,「パッケージ」分野の検討は今回省略した