

順応メッシュ型デバイスシミュレーションの 検討(2)

松下, 憲一 / MATSUSHITA, Ken' ichi / 林, 洋一 / DANG, Ryo
/ 檀, 良 / HAYASHI, Youichi

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学工学部研究集報

(巻 / Volume)

26

(開始ページ / Start Page)

31

(終了ページ / End Page)

41

(発行年 / Year)

1990-02

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003928>

順応メッシュ型デバイスシミュレーションの検討(その2)

松下 憲一*・林 洋一*・檀 良**

On Adaptive Mesh Device Simulation (Part 2)

Ken'ichi MATSUSHITA*, Youichi HAYASHI*, and Ryo DANG**

Abstract

In part I[1], we have proposed to make use of the adaptive mesh scheme as an effective approach to deal with an impact-ion-dominated miniaturized semiconductor device, where it is necessary to increase the mesh number to ensure simulation accuracy and at the same time to maintain the simulation time within a reasonable cost limit.

In the present paper, details on the adaptive mesh generation algorithm is described based on an evaluation of computation errors. It is found that the approach has drastically reduces computer cost at no expense of computation reliability and accuracy.

§1. ま え が き

MOSFET・LSIにおいては、素子を微細化すると、動作速度・消費電力などの性能が著しく改善されるため多くの努力が払われている。そして、その集積回路の微細化を押し進めるのに、デバイスシミュレーションは大きな役割を果たしている。デバイスシミュレーションのような数値計算に求められるものには、大きく分けて二つある。つまり高い精度と、低い計算コストである。しかし、デバイスシミュレーションにおいて精度を上げることは、同時に計算コストの増大を意味する。そこでこの二つの相反する事柄の最適化を行う方法に順応メッシュがある。これは簡単に言うと、計算途中でその計算結果を吟味し、その計算結果に応じて、不都合と思われるところを再分割するというものである。さて、前述のように素子が微細化されることによるインパクトイオン化現象の増大は、デバイスの特性において大きな問題となっている^{3)~4)}。つまり、ゲート長がサブミクロン領域に達し、なおかつ高性能(高速・広域ノイズマージンなど)や従来のTTLレベルとの互換性を保つために電源電圧を下げまいとするとこの現象を無視できなくなる。これは後述するようにMOSFET中のドレイン近傍の電界が増大し、そこで加速された高エネルギー電子がチャネルトランスコンダクタンスやしきい電圧を経時変化させる等の信頼性を低下さ

* Graduate Student, Hosei University

** Professor, Hosei University

せる結果となる。従って、高電界によって発生する高エネルギー電子を抑制することが高信頼性の微細MOSFETを実現する上で極めて重要である。よってそのためにもデバイスシミュレーションにおいて、精度よくインパクトイオン化現象を計算することは大きな意義を持つ。インパクトイオン化現象の増大に対してシミュレーションの精度をあげるために様々な方法がある。例えば、インパクトイオン化現象の離散化法を吟味し、コントロールボリューム内におけるインパクトイオン化現象をより正確に評価しようとする方法⁹⁾。また、メッシュを増やすことによってより忠実にインパクトイオン化現象を評価する方法がある。しかし、この方法ではいたずらにメッシュをふやすことになるために計算効率がよくない。そこでこの問題を解決するために、今回前述の順応メッシュをインパクトイオン化現象に適用しその有効性について検討を行った。初めに順応メッシュについて簡単に述べる。次にデバイスシミュレーションとインパクトイオン化現象について簡単に述べる。その次には、順応メッシュのインパクトイオン化現象への適用について述べる。そしてそのシミュレーションの結果から順応メッシュの有効性について検討を行う。

§2. 順 応 メ ャ ッ シ ュ

シミュレーションのような数値計算において期待される事柄には、大きく分けて次の2つがあげられる。

高い計算精度 (1)

低い計算コスト (2)

デバイスシミュレーションでは、半導体の振る舞いを表す偏微分方程式を解いてデバイスの振る舞いを調べるが、そのとき対象となるデバイスをFig.1のようにメッシュを用いて小さな領域に分割して離散化して計算を行う。従って、精度を上げるためにはメッシュを細かくする必要がある。しかしメッシュ数を増やすと同時に計算コストも上昇する。実際、従来法において格子点にたいする計算時間の関係をFig.2に示す。

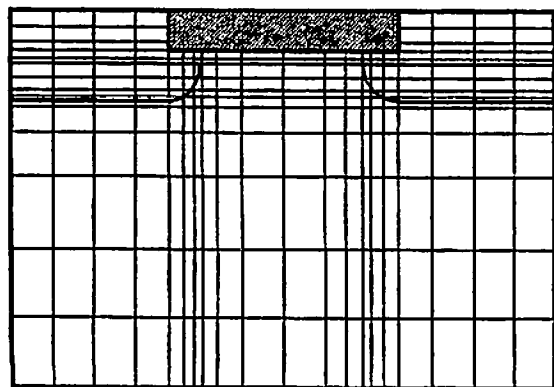


Fig. 1 MOSFETにおける従来のメッシュ生成の例

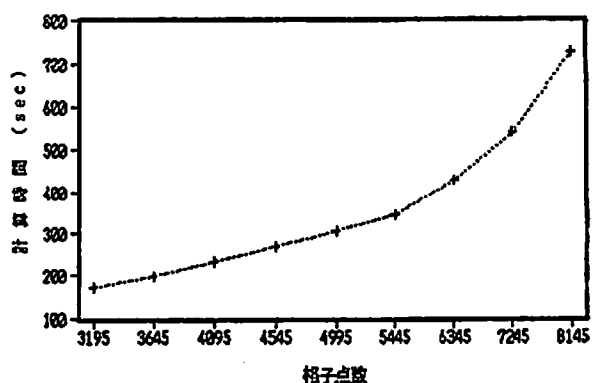


Fig. 2 格子点数と計算時間の関係

シミュレーションにはチャンネル長 $0.5\mu\text{m}$ の短チャンネル MOSFET を用い、ID-VG 特性とした。Fig. 2 を見ると、メッシュ数と計算時間の間には比例の関係が成り立たないことが分かる。すなわち、メッシュ数を 3,195 から 8,145 と約 2.7 倍にしても、それにかかる計算時間は約 7 倍弱となり、そしてメッシュを増やせば増やすほど計算時間は指数関数的に増加することとなる。従って、不必要なメッシュを少なくして精度を犠牲にすることなく計算時間を少なくする必要がある。言い換えると、さらに細かいメッシュが必要と思われる部分にのみ必要な分だけメッシュを加えるということ、それがすなわち順応メッシュである。メッシュが必要であるかどうかの判断方法については後で述べる。

今回この順応メッシュを前述の理由から、インパクトイオン化現象について適応してみた。そのシミュレーション結果についても後で述べる。

Fig. 3 に今回の順応メッシュを示す。インパクトイオン化現象について順応しているのが、それが顕著になるドレイン端においてメッシュが細かく切られているのが分かる。

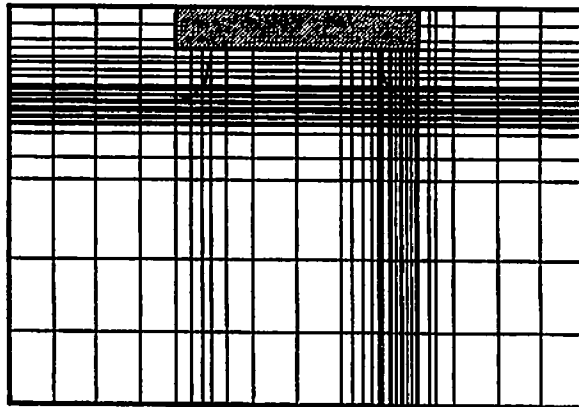


Fig. 3 順応メッシュをインパクトイオン化現象に適用した場合のメッシュ

§3. デバイスシミュレーションとインパクトイオン化現象

3. デバイスシミュレーション

デバイスシミュレーションとは、半導体の振る舞いを示す基本方程式（偏微分方程式）を差分法や有限要素法のような数値解析手法を用いて解くことによってデバイスの動作解析をするもので、素子の微細化においては欠かせないものとなっている。シミュレーションにおいてはどの式を解くかによって得られる情報が異なるため、基本方程式にどの式を選ぶかということが重要となる。今回は、順応メッシュのインパクトイオン化現象への有効性の検討という目的から、基本方程式としては以下の、ポアソン方程式、電子・正孔の電流連続式の 3 本を解くこととした。また解析手法は差分法とし、メッシュは直交メッシュとした。

（ポアソン方程式）

$$\text{div}(\epsilon \cdot \text{grad } \Psi) = -q(p - n + N_D - N_A) \quad (3-1)$$

(電子の電流連続式)

$$\frac{\delta n}{\delta t} + \text{div}\left(-\frac{J_n}{q}\right) = GR \tag{3-2}$$

(正孔の電流連続式)

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \text{div}\left(\frac{J_p}{q}\right) = GR \tag{3-3}$$

デバイスシミュレーションで解いている基本方程式

3.2 インパクトイオン化現象

素子の微細化時に素子内部の電界を一定に保つスケーリング則を用いるなら、インパクトイオン化現象に関する問題は解決できる。しかし、実際には様々な問題が発生するため、スケーリング則は完全には用いられていないのが現状である。すなわち、電源電圧を比例縮小すると動作速度が遅くなり、接合の拡散電位や MOS ゲート材料の仕事関数など比例縮小できない電圧パラメータのために、サブスレショルド特性が悪化する。またこれらに加えて、低電圧になるとプロセスの揺らぎにたいする余裕度も低下する。これらのことより、電源電圧は一般に用いられている 5V から縮小されない傾向にある。

電源電圧一定条件下で MOSFET の微細化を行うと、しきい電圧の挟/短チャネル効果、降伏電圧の低下などがより協調される。すなわち、素子が微細化しているのに対し電源電圧は様々な理由のために下げられないために、MOSFET 中のドレイン近傍の電界が増大し、そこで加速された高エネルギー電子が衝突電離(インパクトイオン化現象)を引き起こし電子・正孔対を発生する。発生した正孔は電界に沿って基板方向へ流れ、基板電流として観測される。よって、MOSFET の基板電流は高エネルギー電子の発生をモニターする重要な量となる。Fig. 4 に簡単なインパクトイオン化現象の模式図を示す。

また、実際のシミュレーションによるインパクトイオン化現象の三次元プロット図を Fig. 5 に示す。ここで横方向に座標、縦方向にインパクトイオン化現象の発生量をとる。このプロット図より、インパクトイオン化現象はドレイン端で非常に鋭いピークをとることが分かる。

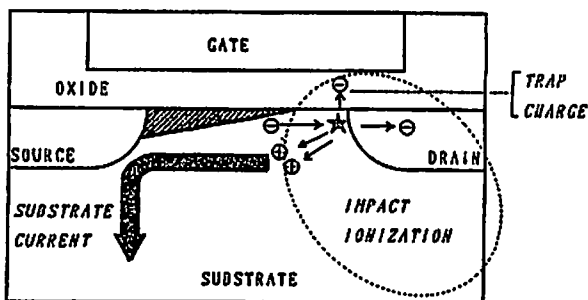


Fig. 4 インパクトイオン化現象の模式図

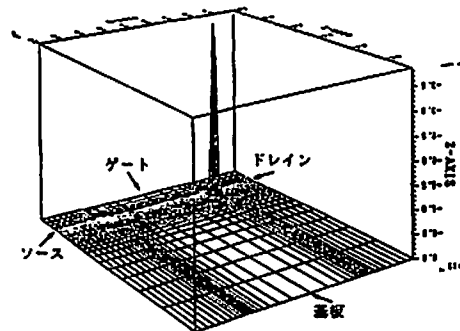


Fig. 5 インパクトイオン化現象の三次元プロット図

§ 4. 順応メッシュのインパクトイオン化現象への応用

順応メッシュをインパクトイオン化現象に適用するためには、メッシュの再分割を行うための基準が必要である。そこで今回はシミュレーションにおける誤差を基準にして再分割を行った。

ある問題を、差分法や有限要素法等を用いて解析する場合に、解析すべき問題に対応した解析結果がえられない場合の原因を考えてみる。数値的に求めた近似解に含まれる誤差は次の3つの主要な要因から起こる。

- (a) 離散化誤差
- (b) 丸め誤差
- (c) モデルに含まれている近似による誤差

今回(b)(c)についてはほとんど影響が無いものとして考えないことにする。すなわち、(b)については、現在の計算機の精度を考えるとほぼ無視できると考えられ、また(c)についても量子効果の増大等の問題もあるが、今回はあえて“正確に”表していると仮定する。従って(a)の離散化誤差だけを考えることにする。次にその誤差評価の方法を述べる。

4.1 誤差の評価

数値計算による全誤差を、次のように表す。

$$\begin{aligned} \text{全誤差} &= (U - N) \\ &= (U - u) + (u - N) \\ &= \text{離散化誤差} + \text{安定性誤差} \end{aligned}$$

U : 厳密解

u : 差分解

N : 数値解

これらのうち大勢を占めるのは離散化誤差である。ただし、ここで言う離散化誤差とは離散化時に発生する全ての誤差のことを指すものとする。よって、今回は、シミュレーションの誤差として離散化誤差をもって評価する。

4.2 インパクトイオン化現象の誤差の見積

デバイスシミュレーションにおいてインパクトイオン化現象を表現する項は、(3-2)、(3-3)式に示すように電流連続式の右辺にしか存在していないために、シミュレーションのインパクトイオン化現象における精度はすべてこの部分の扱い方に依存している。またインパクトイオン化現象は、電界及び電流の非常に複雑な関数となっている。式(3-2)、(3-3)をコントロールボリューム法を用いて離散化すると、

$$\int_{cv} \frac{\delta n}{\delta t} dv - \int_{cv} \text{div } J_n dv = \int_{cv} GR dv \quad (\text{電子}) \quad (4-1)$$

$$\int_{cv} \frac{\delta p}{\delta t} dv + \int_{cv} \text{div } J_p dv = \int_{cv} GR dv \quad (\text{正孔}) \quad (4-2)$$

電流連続式をコントロールボリューム法で解いた場合

となる。前述のとおり GRは電界及び電流の非常に複雑な関数であるために、この積分を直接計算することは非常に困難である。(ただし、ここで cv はコントロールボリュームとする。)従って何らかの近似をもってその積分を近似計算することとなる。よってインパクトイオン化現象の離散化における誤差は、その積分の近似計算における誤差ということになる。デバイスシミュレーションでは、コントロールボリューム内における生成再結合(インパクトイオン化)の量は一定とするのが普通である。よって、(4-1)、(4-2)の右辺の積分は、Fig. 6に示すように階段状の近似となる。階段近似の場合、被積分関数が一次の場合はその積分値に誤差を含まないが、二次以上の場合には誤差を持ち、傾きの変化が大きければ大きいほどそれは大きくなる。(4-1)、(4-2)の被積分関数であるインパクトイオン化現象を含む生成再結合項は、前述のように非常に複雑な関数であり、さらにインパクトイオン化現象はFig. 6に示すようにドレイン端で鋭いピークを持つために、その階段近似による積分値は大きな誤差を持つこととなる。

階段近似による積分計算の誤差は、一次元で考えると、

$$\xi = \delta X_i \cdot GR_i - \int_a^b GR dl \quad (4-1)$$

しかし、(4-3)の積分は前述のとおり計算できない。従って、階段近似以外の近似値を持ってそれに当てるしかない。そこで今回は、Fig. 7に示すような折れ線近似で計算した。この近似の場合も一次までしか正確に近似できないが、隣の格子点の値が積分値に入って来るために、階段近似に比べ被積分関数の傾きの変化による影響が少ない。よって、今回はこの折れ線近似と比較することによってインパクトイオン化現象の離散化誤差を見積もった。

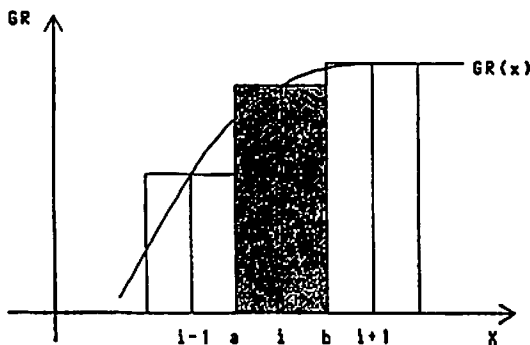


Fig. 6 従来型シミュレーションのコントロールボリューム内における生成再結合の取り扱い方

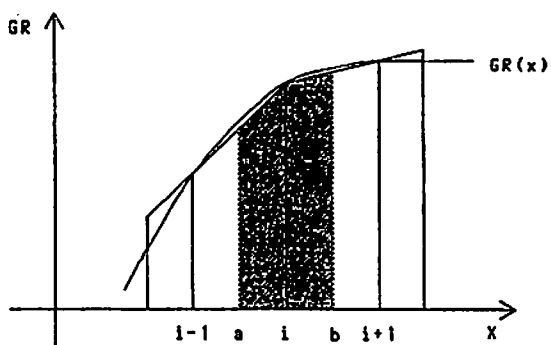


Fig. 7 誤差計算における積分近似

§ 5. シミュレーション結果

以下に、今回のシミュレーションの計算方法を示す。

計算方法

メッシュ：直交メッシュ

離散化法：差分法

解 法：非結合法

解析対象： n チャネル—MOSFET

また、解析対象となる MOSFET についての詳細は以下のとおりである。

n チャネル—MOSFET

チャネル長 $0.5\mu\text{m}$

$W=1.0\mu\text{m}$

基板濃度 $5.0 \text{E} 16 \text{ [}/\text{cm}^3\text{]}$

$X_j=0.2\mu\text{m}$

$T_{ox}=200\text{\AA}$

5.1 計算アルゴリズム

誤差が大きいと考えられる格子点においてその回りで再分割を行った場合、当然新しい格子点の物理量は基本方程式を満たしているわけではない。また差分法においては、新しい格子点を作るとその影響は新しい格子点のみならず系全体にまで及ぶ。従って基本方程式をその系全体にお

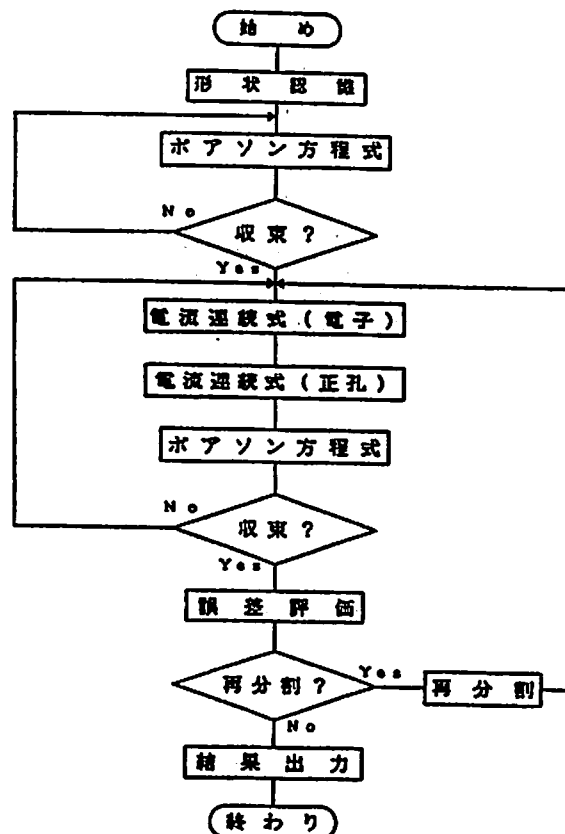


Fig. 8 順応メッシュデバイスシミュレーションのアルゴリズム

いて解き直す必要がある。次にそのアルゴリズムを Fig. 8 に示す。

まず始めに解析対象となる MOSFET の形状を認識する。つぎに一般に Gummel アルゴリズム⁶⁾ と呼ばれる方法によって基本方程式を解く。収束したところで誤差評価を行い、再分割が必要であれば再分割を行う。そして Gummel ループに戻り、ポアソン方程式、電子・正孔の電流連続式を解き、再分割が必要なくなるまでこれを続ける。

5.2 誤差分布

Fig. 9 の (a), (b), (c) はそれぞれ (a) 再分割前, (b) 再分割一回目, (c) 再分割二回目, の, 縦軸に誤差, 横方向に座標をとった誤差分布の三次元プロット図である。(a), (b), (c) と再分割が行われていくに従って誤差が小さくなっていく様子が分かる。

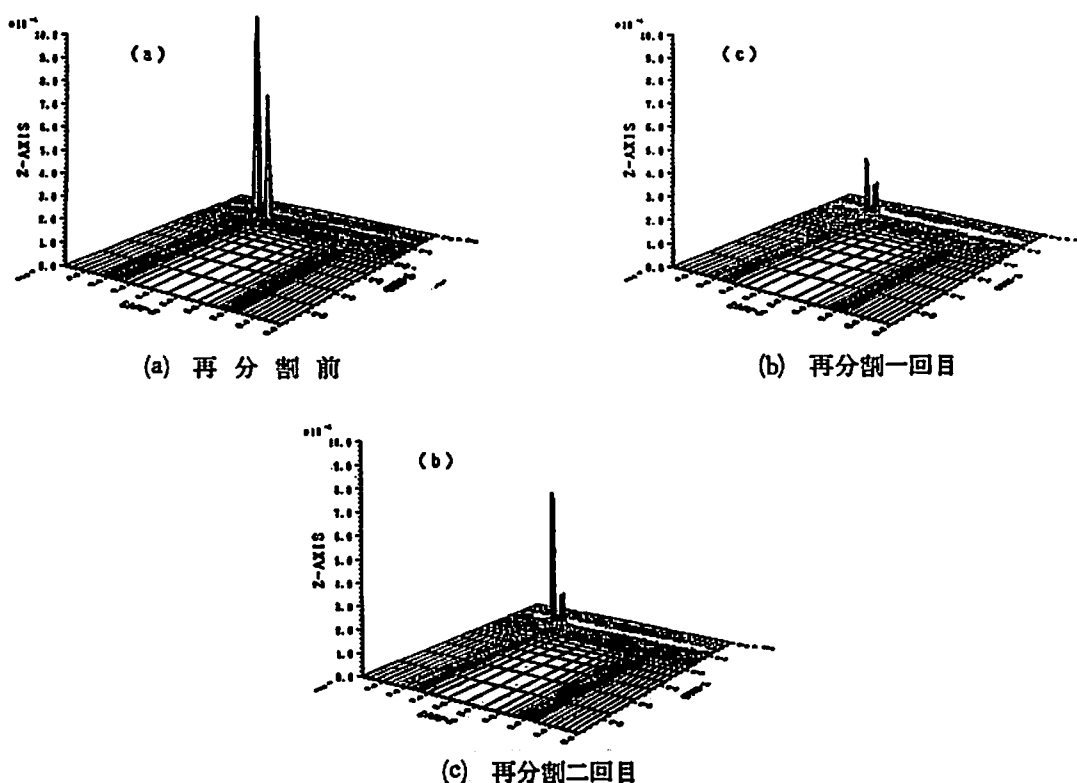


Fig. 9 再分割による誤差分布の変化の三次元プロット図

5.3 基板電流ゲート電圧特性

基板電流-ゲート電圧特性を Fig. 10 に示す。このときのドレイン電圧は 5.0V である。(a) は従来の方法による結果で、縦方向に 35, 横方向に 31 と非常に小さいメッシュサイズとなっている。従来のデバイスシミュレーションでは、メッシュ数を増やすと基板電流も増える傾向にあり、これはインパクトイオン化現象が顕著であるドレイン端におけるメッシュ数が不足しているためであると思われる。よって、メッシュを増やして基板電流の収束値を計算した結果が (b) である。このときのメッシュは縦 181, 横 45 と非常に大きな値となっている。(c) は (a) の条件を初期条件として順応メッシュを適用した結果である。メッシュは初め 31 * 35 で始まり、最終的には縦 59, 横 55

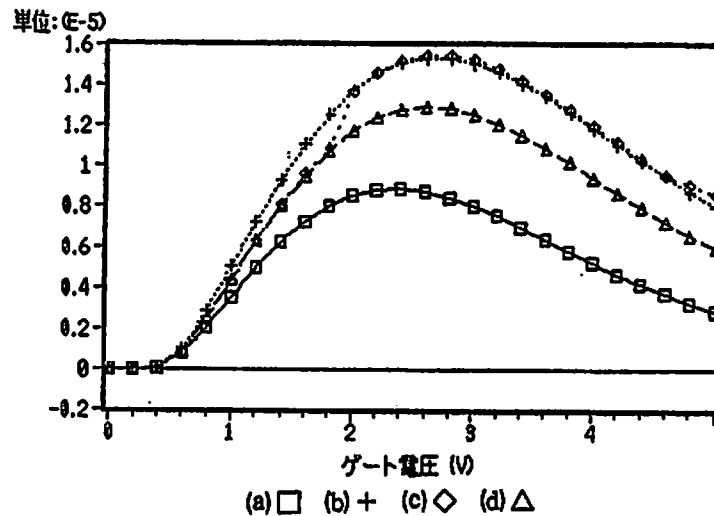


Fig. 10 基板電流ゲート電圧特性の比較

となった。(d)は(c)の最終結果のメッシュと同じサイズである。

最も精度のよいと思われるシミュレーション結果は、(b)である。(b)と(c)と(d)を比べることによって、同じ使用メモリにおける精度について検討すると、(c)はゲート電圧=1.9[V]以降において(b)と非常に良く一致している。よって順応メッシュは基板電流の計算精度において十分な精度を持っていることを示している。また(c)と(d)を比較すると、(d)は(c)ほどの精度が得られないことが分かる。従って、同じメモリ空間で比較するなら、基板電流の計算精度の点において順応メッシュは従来法に比べ有効であることが分かる。

5.4 ドレイン電流—ドレイン電圧特性

ドレイン電流—ドレイン電圧特性を Fig. 11 に示す。このときゲート電圧=5.0[V]である。(a)は縦31, 横35の比較的小さなメッシュサイズによるシミュレーション結果である。(b)は(a)の初期条件で始めて、順応メッシュを適用したシミュレーション結果である。(c)は(b)における最終的なメッシュのサイズと同じメッシュ数の従来型のシミュレーション結果である。(a), (b), (c)の三つともドレイン電圧が約6[V]付近まではほとんど差は見られない。しかし解の安定性で考えればメッシュの少ない(a)が最も安定性が悪く、メッシュの多い(c)が最もよい。順応メッシュの(b)は、メッシュの少ない最初の部分では安定性は悪いものの、メッシュが増えるとよくなっている。ただし、電気的な特性を考えてみるとこれら3つのシミュレーション結果はこの領域に限ってはメッシュのサイズにあまり影響をうけないようである。しかし、降伏電圧特性になると話は異なる。(a), (b), (c)の3つの降伏電圧を比較してみると、従来ではメッシュ数が少ない方が降伏電圧は高くなっている。それらに比べ順応メッシュにおける降伏電圧は、最も低い値を示している。この原因は、5.3 において示したとおり、降伏電圧を決定する基板電流の値がメッシュが少ないと小さく見積られるからである。よって順応メッシュはドレイン電流ドレイン電圧特性においても有効であることが分かる。

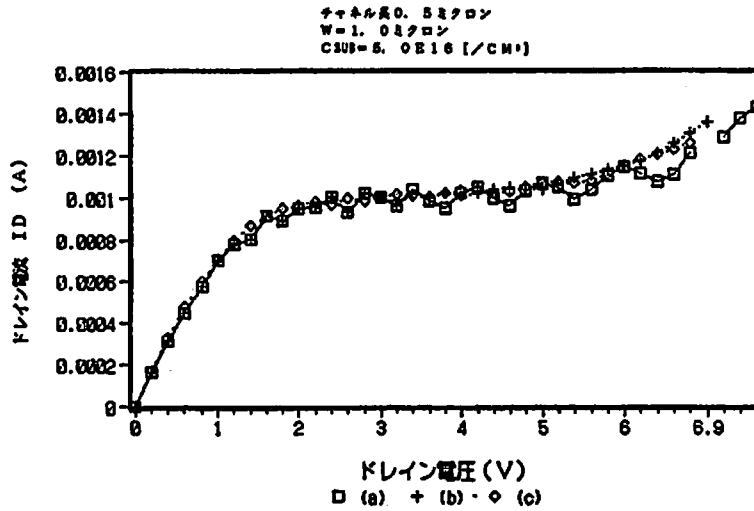


Fig. 11 ドレイン電流-ドレイン電圧特性の比較

5.5 計算コスト

今回のシミュレーションの計算コストの比較を Table 1 に示す。

ドレイン電流-ゲート電圧特性においては、同じ精度で従来法と順応メッシュにおけるシミュレーション結果を比較するならば、計算時間で約 1/2、使用メモリで約 1/3 順応メッシュの方が少なく済む。従って、トータルな計算コストとしては、約 6 倍の改善になる。次に、ドレイン電流-ドレイン電圧特性はドレイン電流-ゲート電圧特性と比べて計算時間が非常に多くかかる。従って後者と違い前者は、シミュレーションにおける結果の収束は求められなかった。しかし、5.3 よりインパクトイオン化現象における順応メッシュの有効性は十分であるので前者における順応メッシュによるシミュレーション結果は十分な精度を持つものと思われる。よって、ドレイン電流-ドレイン電圧特性においても順応メッシュは計算コストの軽減に有効であることが分かる。

Table 1 計算コストの比較

	ID-VD 特性		ID-VG 特性	
	計算時間 (SEC)	格子点数	計算時間 (SEC)	格子点数
REMESH VERSION	969.76	2576	351.02	3245
NO-REMESH 31 * 35	425.46	1085	32.177	1085
NO-REMESH 59 * 46	740.45	2576		
NO-REMESH 59 * 55			179.49	3245
NO-REMESH 181 * 45			729.77	8145

§5. ま と め

以上、短チャンネル MOS デバイスの解析において順応メッシュを適用したデバイスシミュレーションを行ったところ、ホットキャリアの評価において従来型のメッシュによるシミュレーション

が、確からしい計算結果を得るには不十分な事、また計算時間、メモリ等の条件を考えて、順応メッシュ型デバイスシミュレータが非常に有効なことが確認できた。以下にその結果をまとめる。

- ・基板電流—ゲート電圧特性において、基板電流値及び計算コストにおいて改善が見られた。
- ・ドレイン電流—ドレイン電圧において降伏電圧の解析に検討が必要なことが分かった。また計算コストにおいて改善が見られた。
- ・今回の検討により、順応メッシュがインパクトイオン化現象のような局所的な現象の解析に有効なことが分かった。

今後の検討すべき項目としては、誤差の大きいと考えられる部分のみの部分的な再分割を行うことと、解析対象をインバータ等のより複合的なデバイスに広げること及び、インパクトイオン化における物理定数の検討が考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、有益な助言をいただいた小島敏明氏、また様々な協力をいただいた当研究室の4年生諸君に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 松下憲一, 檀 良: 順応メッシュ型デバイスシミュレーションの一考察. 電子情報通信学会研究会, 1989年9月, SDM 89-101, VLD 89-60.
- 2) S.A. Abbas and, R.C. Dockery: *Hot-Carrier Instability in IGFET's Applied Physics Letters*, vol. 27, pp.147-148, 1975.
- 3) T.H. Ning, P.W. Cook, R.H. Dennard, C.M. Osburn, S.E. Schuster and T.H. Ning: 1 Micron MOSFET VLSI Technology: part IV Hot-Electron Design Constraints. *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. SC-14, pp. 268-275, 1979.
- 4) P.E. Cottrel, R.R. Troutman and T.H. Ning: Hot-Electron Emission in N-Channel IGFET's. *IEEE Transactions on Electron Device*, vol. ED-26, No. 4, pp. 520-533, 1979.
- 5) S.E. Laux and B.M. Grossman: A General Control-Volume Formulation for Modeling Impact Ionization in Semiconductor Transport. *IEEE Trans. on Computer-Aided-Design*, vol. CAD-4, pp.520-525 (1985).
- 6) H.K. Gummel: A self-consistent iterative scheme for one-dimensional steady state transistor calculations. *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-11, pp. 455-465, 1964.