

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-07-27

プロセスシミュレータPREDICTとデバイスシミュレータの結合について

檀, 良 / DANG, Ryo / 藤原, 圭介 / 永山, 淳 / NAGAYAMA, Atsushi / FUJIWARA, Keisuke

(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 / 法政大学工学部研究集報

(巻 / Volume)

29

(開始ページ / Start Page)

31

(終了ページ / End Page)

44

(発行年 / Year)

1993-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00003865>

プロセスシミュレータPREDICTと デバイスシミュレータの結合について

檀 良*・藤原 圭介**・永山 淳*

On Coupling Process Simulator PREDICT with a Two-Dimensional Device Simulator

Ryo DANG*, Keisuke FUJIWARA** and Atsushi NAGAYAMA*

Abstract

In a conventional semiconductor device simulation, the impurity concentration profile is generated, using a Gaussian distribution and/or a complementary error function. However, the result differs considerably with actual distributions. In the present paper, for purpose of obtaining realistic device characteristics, the impurity concentration profile of a device is based on the two-dimensionalization of a one-dimensional profile obtained from the process simulator PREDICT, using the elliptic approximation. As test devices of the simulation, a DSAMOS and a bipolar transistors are chosen. Device characteristics obtained using geometric parameters based on the elliptic approximation are presented.

§ 1. はじめに

あらゆる産業分野で使われている集積回路は、一辺10mm程度の極めて小さなシリコン片にすぎないが、情報の記憶や演算などに関しては人間の頭脳をはるかにしのぐ優れた性能を有している。しかし、この高度情報化社会において、より、性能の高いものが要求されている。今後、飛躍的な性能の向上をはかるには、複雑な処理を短時間に行う集積回路を開発しなければならない。多量のデータを高速で処理する事が出来る集積回路、すなわち、超微粒素子を組み込んだ集積回路を開発するには、検討すべき課題が山積みしている。そして、試行錯誤的な実験を通してこのような課題を一つ一つ解決してゆくのは効率が悪く、時間がかかりすぎる。このような事柄を背

*電気工学科電気電子専攻

**工学研究科電気工学専攻

景として、半導体シミュレーションという新しい技術が、1970年代後半から盛んになってきた。

本論文で取り扱う半導体シミュレーションは、計算機を使って素子の製造工程を模擬的に再現するプロセスシミュレーションと個別の素子特性を予測するデバイスシミュレーションを利用することによって、計算機端末の前で短時間にプロセス工程から素子の電気的な特性を予測する事が出来る。すなわち、従来の試行錯誤的な方法で素子製作から電気的特性の評価までに要する期間に比べると、圧倒的に短い時間で素子特性を予測する事が出来る。また、通常デバイスシミュレーションでは、素子構造すなわち濃度分布において、ガウス分布と補誤差関数を使用し、近似をおこなっている。これに、プロセスシミュレーションを使用し、より実際のデバイスに近づける。

本論文ではこの一次元プロセスシミュレータPREDICT⁽¹⁾と二次元デバイスシミュレータのインターフェース部分に重点をおき、DSAMOSとバイポーラを取り上げ、従来のデバイスシミュレーションとの特性の比較検討を行っていく。

§ 2. プロセスシミュレーション

プロセスシミュレーションは、集積回路の製造工程を計算機上で模擬的に行い、実際にデバイスを試作することなく、デバイスの加工形状やデバイス内部の不純物分布を予測する技術である。通常プロセスシミュレーションといえば、次の二つのカテゴリーに分類される。一つはシリコン基板表面上の加工形状をシミュレーションするもので、これは主にパターン転写、エッチング、各種堆積工程を対象としたシミュレータである。二つ目のカテゴリーに属するプロセスシミュレータは、シリコン基板内もしくは表面で生じる各種の物理化学現象、例えば、シリコン酸化膜、エピタキシャル成長、イオン注入、不純物原子拡散工程などを取り扱うシミュレータである。本論文で使用している一次元プロセスシミュレータPREDICTは、後者に属している。

PREDICTは、通常のプロセスシミュレータ同様、シリコン集積回路の製造において必要なプロセス工程をシミュレーションするのに使われる。それは、不純物であるボロン、アンチモン、砒素、あるいは磷などをシリコンやシリコン結晶、多結晶シリコン、シリコン窒化物、酸化シリコンに加える事によって引き起こされた効果をモデル化する。PREDICTは、次のようなプロセス工程をシミュレーションできる。

- ・砒素、ボロン、ボロンフッ化物、アンチモン、磷などの、単結晶シリコン、そして、アモルファスシリコン、酸化物、窒化物、金属/シリサイド、ポリシリコンの注入
- ・ドーブ源からの拡散
- ・不活性雰囲気中や、酸化雰囲気中での打ち込み
- ・酸化物、ポリシリコン、シリコン窒化物、シリサイド、シリコンの堆積やエッチング

堆積層を通してのイオン注入は、正確にドーピングされた多結晶シリコン源による拡散と同様に通常モデル化されている。

PREDICTは、いろいろな条件下での多くの工程での20年間の研究データによってテストされ、発展してきたシミュレーションモデルに基づいて作られている。それは、解析プログラム中で、使われた技術のモデル近似とは違って、証明された物理モデルを使っている。PREDICTは、ユーザーが、モデル方程式のパラメータを与える必要はない。しかし、ユーザーがデフォルトパラメータが不相当であると判断した場合、適切なパラメータを与える事ができる。

また、PREDICTには、従来のプロセスシミュレータでは利用できない急激なアニーリングや酸化に対するモデルが組み込まれており、そして、その拡散モデルの多くは、従来のプロセスシミュレーションのユーザーによってパラメータを与えたモデルよりも実験的な結果にあった値をとる。

§ 3. プロファイルの二次元化手法

通常デバイスシミュレーションではガウス分布と補誤差関数を用い近似的にデバイス内部の不純物分布を与えている。しかし、実際のデバイスのものとはかなり開きがあり、また、実際にプロセス上で可能であるかどうかという点において、疑問が残る。そこで、製造工程を模擬的に行うプロセスシミュレータを使用してシミュレーションし、その不純物分布に従ってデバイス特性の解析を行っていく。一次元プロセスシミュレータであるPREDICTより導かれた不純物分布を二次元デバイスシミュレータに組み込むためには当然二次元化しなければならない。本論文では楕円近似を用い二次元化を行う。3. 1では、拡散層での二次元化を述べ、3. 2では拡散層とは異なつた形の不純物分布を持つバイポーラの埋め込み層の二次元化について述べる。

3.1 拡散層の二次元化

ここでは、楕円近似を用い拡散層を二次元化する手法について述べる。最初に、次のような楕円の式を考える。

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

ここで、 x_0 、 y_0 は楕円の中心の座標、 a は短軸の長さ、 b は長軸の長さである。Fig.1のようにMESHで切られた二次元デバイスシミュレーションでの不純物濃度の求めたい格子点を定める。その格子点上に重なるように式(1)をあてはめる。ここで、式(1)での x 、 y は格子点の座標、 x_0 はマスク端の座標、 y_0 は酸化膜/シリコン界面の座標となる。この時、楕円は等濃度線を表すことになる。すなわち、 x 、 y 格子点での濃度は、この楕円の長軸 b に一致する

PREDICT より導かれた深さでの濃度と一致することになる。ここで座標パラメータとしてAを式(2)のように定義すると、長軸bは式(1)より式(3)のように与えられる。

$$A = \frac{a}{b} \tag{2}$$

$$b = \sqrt{\frac{(x - x_0)^2}{A^2} + (y - y_0)^2} \tag{3}$$

しかし、この長軸bは必ずしもPREDICTの格子点と一致しない。すなわち、bに対応する深さでの濃度を、その隣り合わせとなるPREDICTでの格子点 y_j, y_{j+1} の間で式(4), (5), (6)を使ってFig.2のように線形補間を行い、 $C(x, y)$ を求める。

$$C(x, y) = \frac{mC_{j+1} + nC_j}{m + n} \tag{4}$$

$$m = |y_j - b| \tag{5}$$

$$n = |y_{j+1} - b| \tag{6}$$

ここで、 $C(x, y)$ は、デバイスシミュレーションでの座標 x, y における濃度、 C_j, C_{j+1} は、それぞれPREDICTにおける格子点 y_j, y_{j+1} における濃度である。そして、楕円近似をする全ての点に適用して同様な作業を行う。

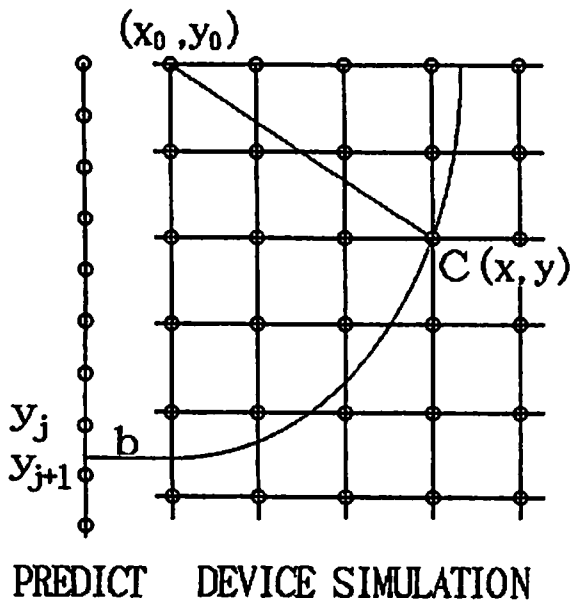


Fig.1 楕円近似の方法

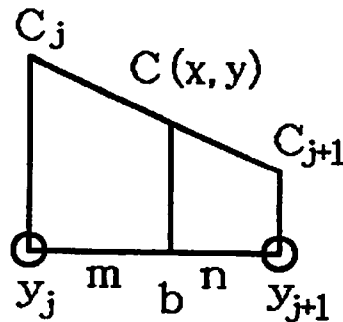


Fig.2 不純物濃度の線形補間

3.2 埋め込み層の二次元化

ここでは、楕円近似を用いバイポーラデバイスの埋め込み層を二次元化する手法について述べる。埋め込み層を二次元化するために注意しなければならないことは、Fig.4を見るとわかるように、二つの楕円で近似しなければならないことである。Fig.4の下側の楕円は、拡散層と同様に楕円近似することができる。ただし、式(1)において、 x_0 は埋め込み層のマスク端の座標、 y_0 は埋め込み層不純物濃度の最も高い座標となる。

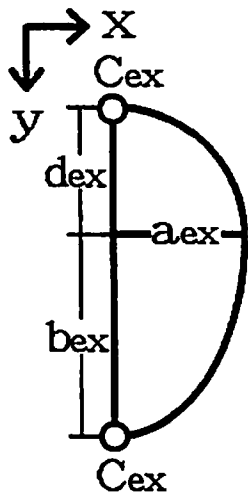


Fig.3 埋め込み層の座標パラメータを決定するための楕円

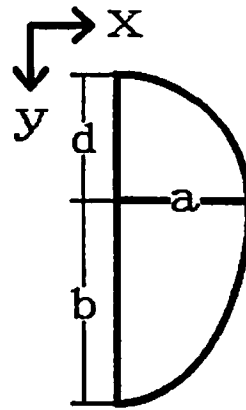


Fig.4 埋め込み層の楕円近似

次に、問題となるFig.4の上側の楕円について考える。上側の楕円は、濃度が適合するように、座標パラメータを求めなければならない。そこで次のように計算することにした。まず、PREDICTより求められた不純物分布上でエピ層側の濃度傾斜最大の点の濃度 C_{ex} を検索する。次に、基板側の埋め込み層の濃度が、 C_{ex} となる点を検索する。そして、それぞれのピーク濃度となる点からの距離をFig.3に示めされるように求める。ここで、上側の楕円の座標パラメータをDとすると、それぞれの項の関係式は、式(7)、(8)のように与えられる。

$$A = \frac{a_{ex}}{b_{ex}} \tag{7}$$

$$D = \frac{d_{ex}}{a_{ex}} \tag{8}$$

これより、上側の楕円で示すことのできる格子点 x, y での濃度を求める。格子点 x, y に重なるFig.4に示される上側の楕円は式(9)となる。

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{d^2} = 1 \quad (9)$$

また、座標パラメータは、式(10)のように表せる。

$$D = \frac{d}{a} \quad (10)$$

式(9), (10)より、aは式(11)となる。

$$a = \sqrt{(x-x_0)^2 + \frac{(y-y_0)^2}{D^2}} \quad (11)$$

よって式(2), (11)よりbは式(12)となる。

$$b = \frac{1}{A} \sqrt{(x-x_0)^2 + \frac{(y-y_0)^2}{D^2}} \quad (12)$$

そして、前節と同様にbに対応する濃度をPREDICTより導き出された濃度分布より線形補間することによって格子点x, yにおける濃度を導くことができる。

§ 4. 二次元化不純物プロファイル

Fig.5は、通常行われているプロセスシーケンス^[2]を用いて、PREDICTにより導かれたDSA MOS不純物プロファイルである。また、Fig.5を用いて二次元化した不純物プロファイルをFig.6に示す。同一の拡散マスクを用いて二重拡散する事によりチャンネル領域を形成し、チャンネル領域が界面方向、深さ方向に濃度分布を持つ様子がよくわかる。そしてFig.7は、従来の不純物分布とPREDICTより求められた不純物分布を比較している。チャンネル領域の中央部分で、PREDICTの不純物濃度の方が高いことがわかる。Fig.8はFig.5と同様に、標準的なバイポーラプロセスシーケンス^[2]にそってPREDICTでシミュレーションした結果である。Fig.9は、Fig.8を用いて二次元化したバイポーラの不純物プロファイルである。また、Fig.10には、バイポーラの真性領域のプロファイルを示す。Fig.10を見ると通常デバイスシミュレーションで用いられている不純物プロファイルと二次元化した不純物プロファイルが、埋め込み層付近で違っていることがよくわかる。そして、Fig.6, Fig.9の不純物プロファイルを使いシミュレーションした。

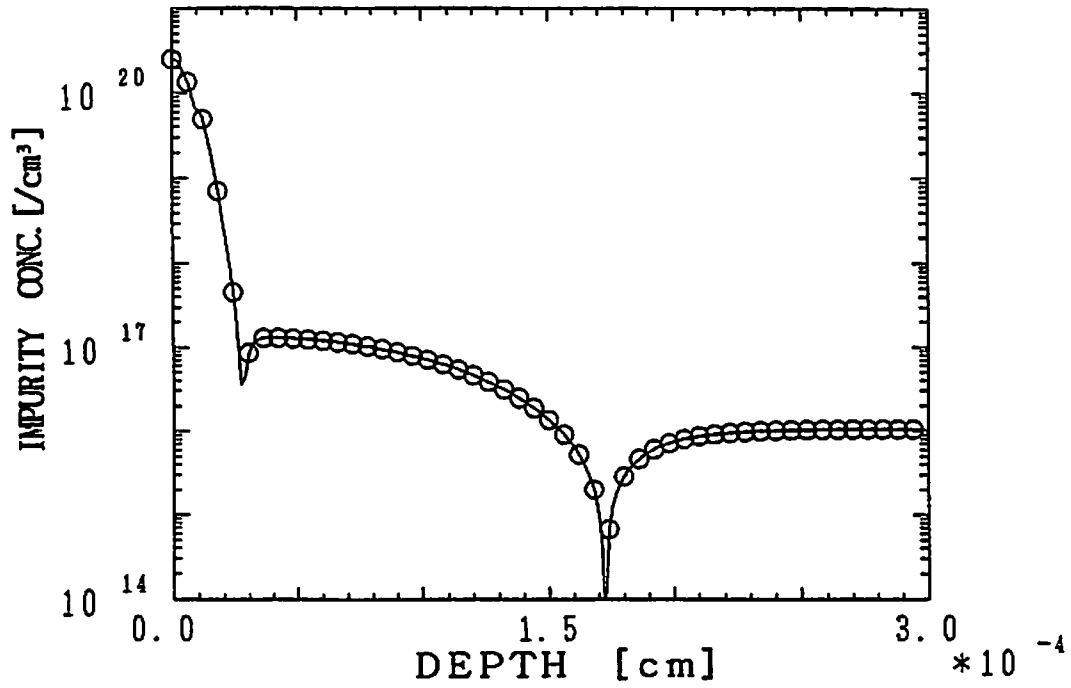


Fig.5 PREDICTより導出されたDSAMOSの不純物分布

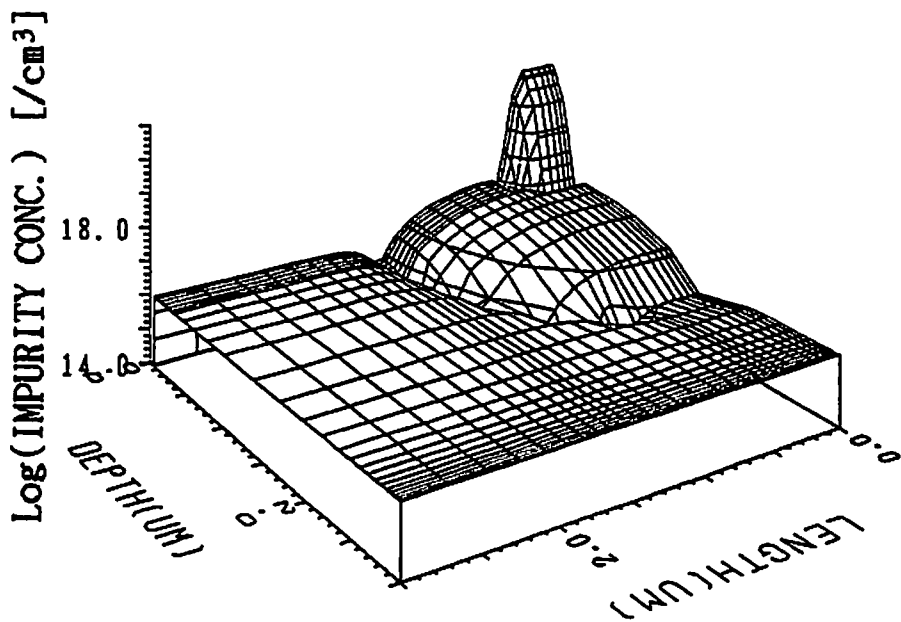


Fig.6 二次元化したDSAMOSの不純物分布

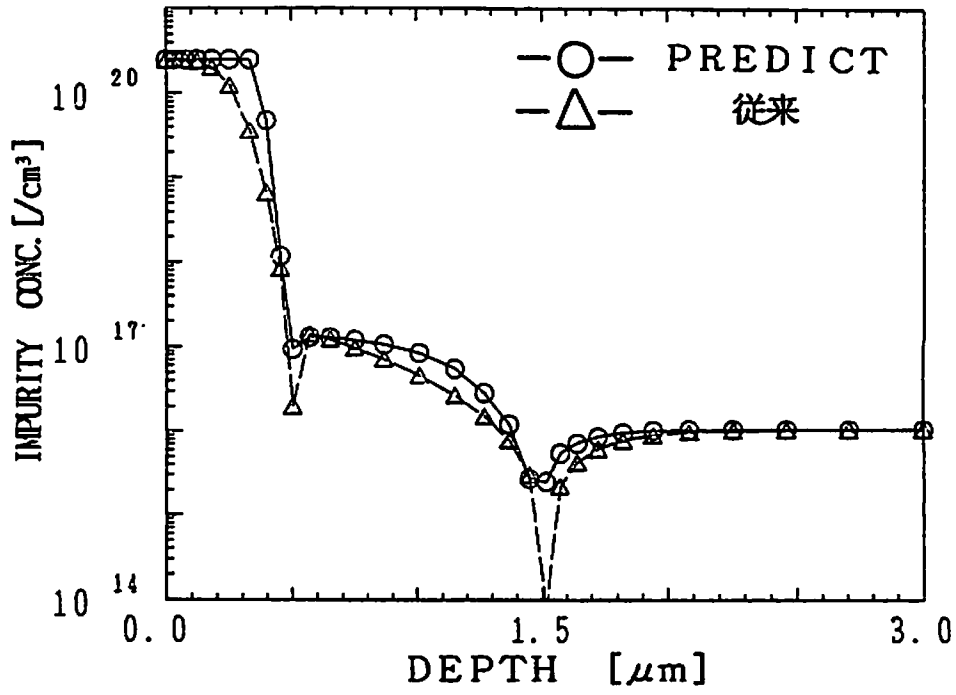


Fig. 7 DSAMOSのチャネル領域の不純物分布

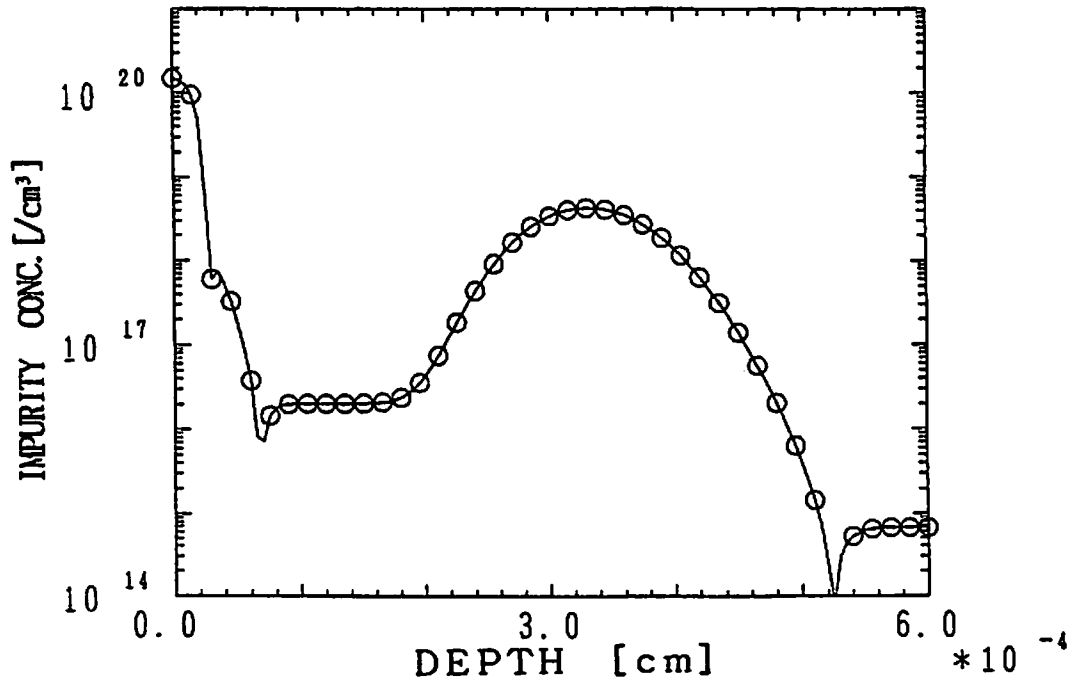


Fig. 8 PREDICTより導出されたパイポラの不純物分布

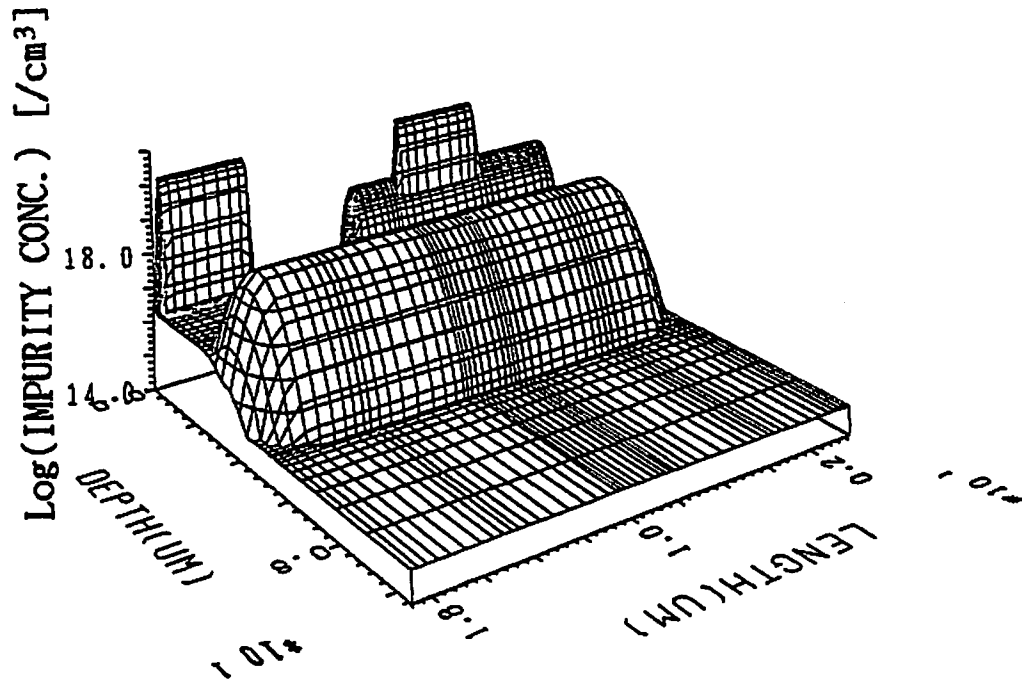


Fig.9 二次元化したバイポーラの不純物分布

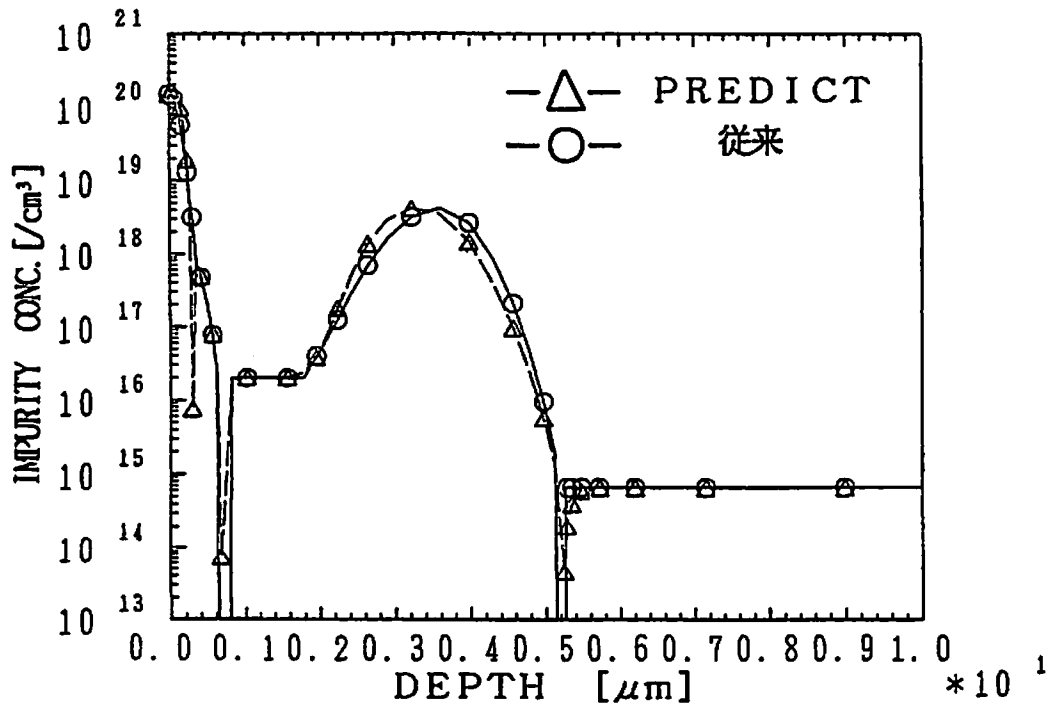


Fig.10 バイポーラの真性領域の不純物分布

§ 5. シミュレーション結果

シミュレーションは、ドリフト拡散モデルを用いたデバイスシミュレータを使用した^[3]。Fig.11にDSAMOSの $V_D=5[V]$ の I_D-V_G 特性を示す。しきい電圧はほぼ同じ値をとるが、しきい電圧を越えたところから、PREDICTから導入されたプロファイルのほうが、従来のプロファイルの電流値よりも低くなっている。これは、DSAMOSが、チャンネル界面におけるピーク不純物濃度によってしきい電圧がほぼ決まるからである^[4]。今回使用した二つの不純物濃度分布を比較すると、およそ一致する。しかし、Fig.7に示されているように、チャンネル界面中央部分の不純物濃度がPREDICTによる方が、高くなっている。このために、しきい電圧をすぎたあたりから電流値に差がでてきたものと考えられる。Fig.12の I_D-V_D 特性にも同様な結果がみられた。

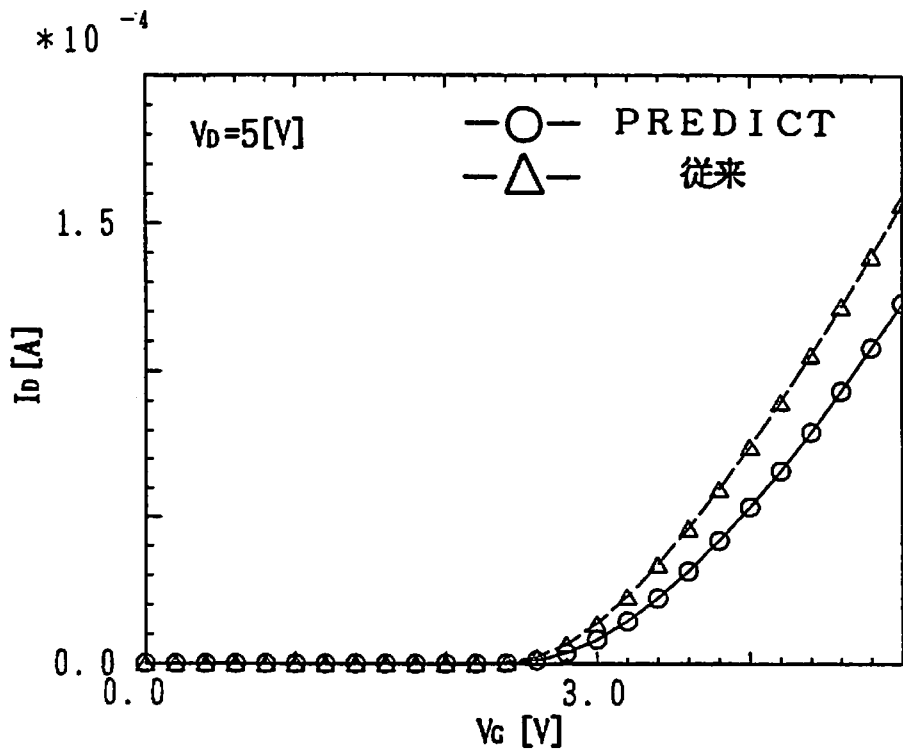


Fig.11 I_D-V_G 特性

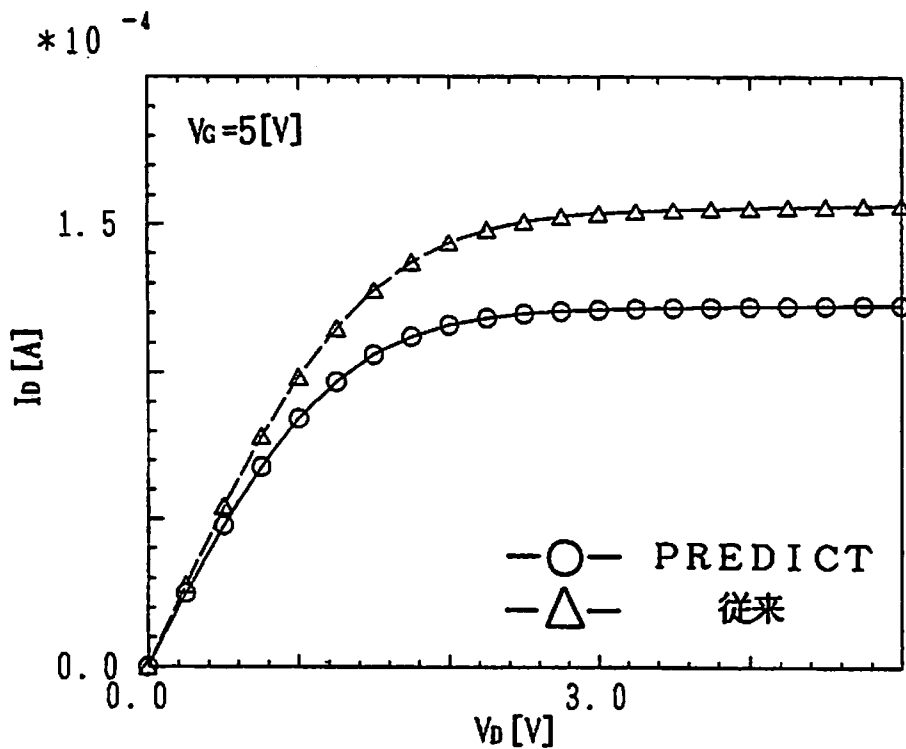


Fig.12 I_D-V_D特性

Fig.13からFig.15は、バイポーラの特性を示す。Fig.13のI_c-V_{BE}特性において、従来の不純物分布による電流値、PREDICTの不純物分布による電流値は、ほぼ一致していることがわかる。V_{BE}の低い部分でのI_cの一致していない部分は、計算誤差と考えられる。Fig.14, Fig.15においてコレクタの空乏層に注目すると、V_{BE}=0.8[V]の時ベース領域内の正孔分布のすそがコレクタ接合点に向かって移動している。さらに高いエミタ電圧V_{BE}=0.84[V]では、電子はこれまでのコレクタ空乏層領域を埋めつくしてしまい、同時にベースからコレクタへ向かう正孔のしみだしもまた顕著になる。この状態は低注入と高注入の境界とみなされ、これより高いV_{BE}が高注入状態を表すと考えられる。V_{BE}=0.86~0.9[V]の各電圧における電子、正孔はともにコレクタ低濃度領域内まで深く進入する。この効果はベース押し出し効果と呼ばれ、トランジスタの典型的な高注入動作として知られている。この効果により、実効的なベース領域は本来のエミッタ接合点とコレクタ接合点にはさまれた狭い範囲をはみ出して著しく広がり、キャリア蓄積量は低注入状態より極端に増大する。このことは、トランジスタの直流電流増幅率の低下やカットオフ周波数の低下をまねく主要な要因となる^[5]。

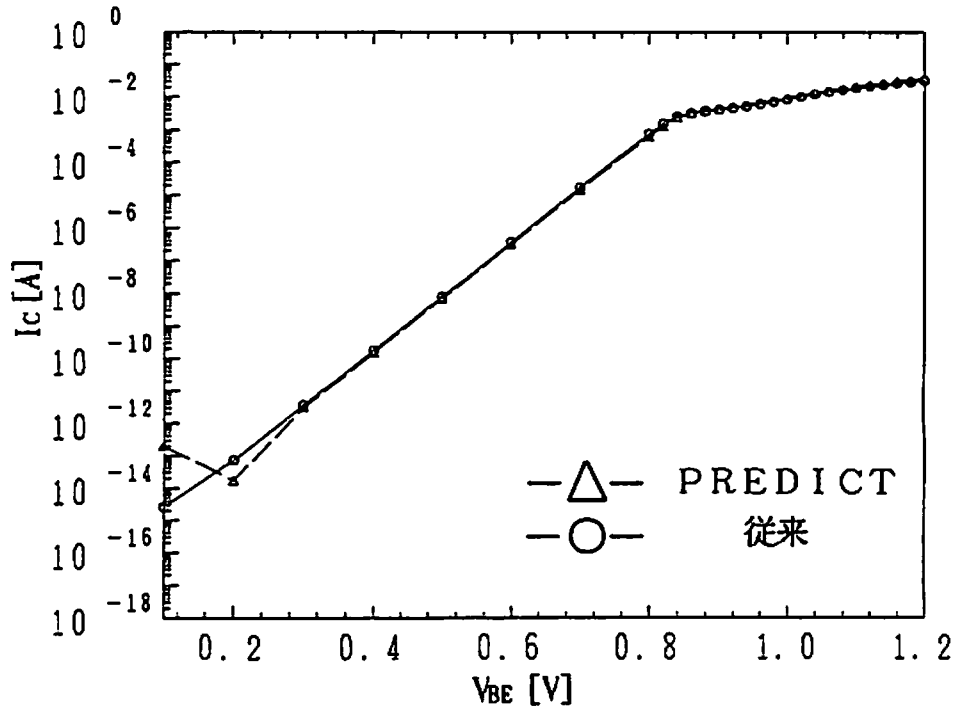


Fig.13 $I_c - V_{BE}$ 特性

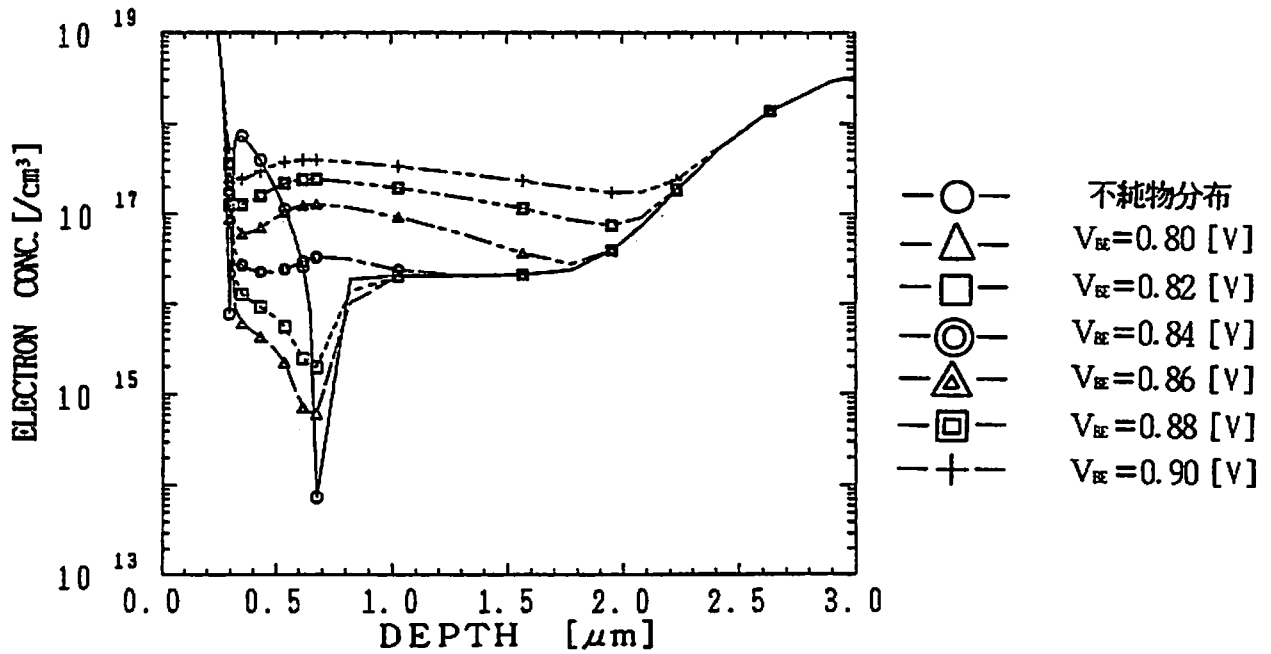


Fig.14 真性領域の電子濃度

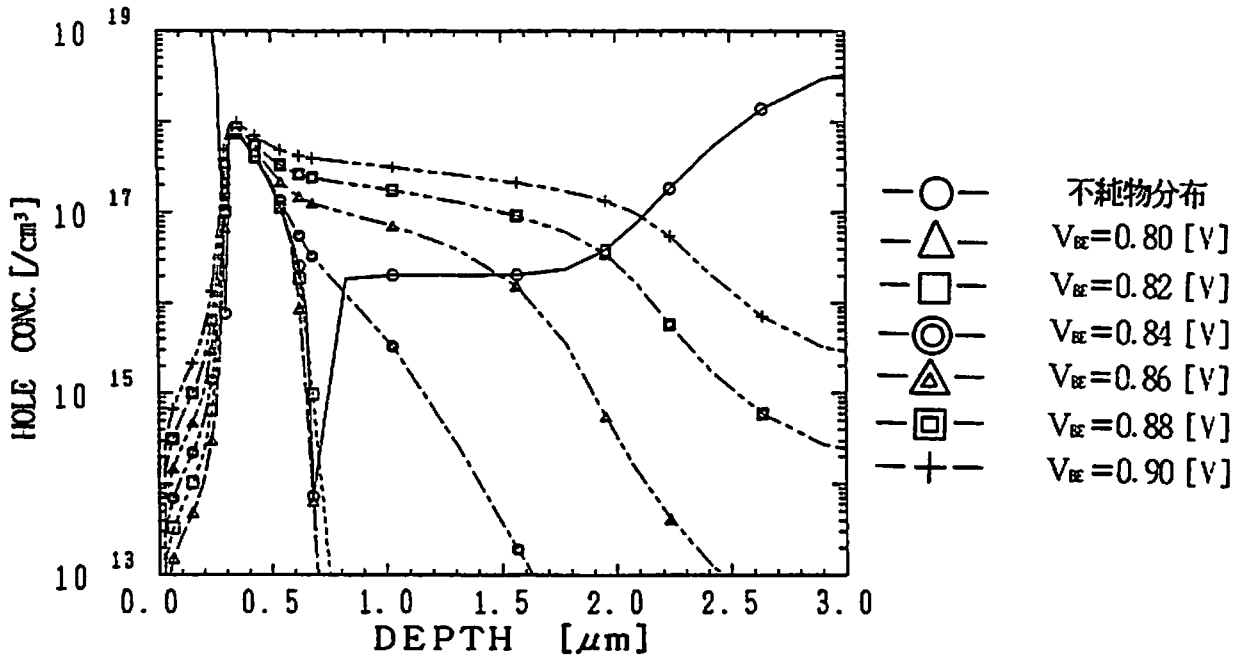


Fig.15 真性領域の正孔濃度

§ 6. まとめ

PREDICTと二次元デバイスシミュレータのインターフェース部分として楕円近似を用い二次元化した不純物分布と、通常デバイスシミュレーションで用いられている不純物分布の特性を比較検討した。

PREDICTにおいては、チャンネル領域の不純物濃度によって、デバイス特性がかなり左右され、 I_D-V_G 特性や I_D-V_D 特性にあらわれた。特に印加電圧が高いときに、ドレイン電流の違いが顕著にみられた。

バイポーラのデバイス特性は、従来の不純物分布と比較して I_C-V_{BE} 特性からわかるように、ほぼ一致することがわかった。しかし、埋め込み層の不純物分布には、かなりの相違点があることを示した。

このように、一次元プロセスシミュレータPREDICTと、二次元デバイスシミュレータを用いシミュレーションすることで、通常デバイスシミュレーションで用いられている不純物分布とは違うプロファイル、そして、デバイスの構造によっては、違う電流特性が得られた。プロセスシミュレーションを用いより現実的な不純物分布でシミュレーションすることは、より実際のデバイス特性を得ることができ、より高精度なデバイス特性を予測できることを示した。

謝辞

本研究は、パソコン版の PREDICT を用いて行なったものです。尚、このパソコン版の PREDICT はエイシックテクノロジー（株）のご好意により長期貸し出ししていただいたもので、ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] PREDICT, User's Manual, SILVACO International, Feb. 1991.
- [2] 原徹 他著, “超LSIプロセスデータハンドブック”, サイエンスフォーラム, 1982.
- [3] 檀良 他, “非等温シミュレータを用いた MOSFET 解析”, 法政大学工学部研究集報, Vol.28, pp.133-143, 1992.
- [4] 大橋寛 他, “DSAMOSトランジスタのしきい電圧”, JSAP, No.2, p.665, 1992.
- [5] 倉田衛 著, “バイポーラトランジスタの動作原理”, 近代科学社, 1980.