(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第6434755号
(P6434755)
(45)発行日　平成30年12月5日(2018.12.5)　(24)登録日　平成30年11月16日(2018.11.16)

(51)Int.Cl.　F I
G06F 17/50 (2006.01)　G06F 17/50 662G

請求項の数 4　(全 13 頁)

(21)出願番号　特願2014-183613(P2014-183613)
(22)出願日　平成26年9月9日(2014.9.9)
(65)公開番号　特開2016-57841(P2016-57841A)
(43)公開日　平成28年4月21日(2016.4.21)
審査請求日　平成29年9月5日(2017.9.5)

(73)特許権者　000003078
株式会社東芝
東京都港区芝浦一丁目１番１号
(73)特許権者　317011920
東芝デバイス&ストレージ株式会社
東京都港区芝浦一丁目１番１号
(74)代理人　100091982
弁理士　永井　浩之
(74)代理人　100091487
弁理士　中村　行孝
(74)代理人　100082991
弁理士　佐藤　泰和
(74)代理人　100105153
弁理士　朝倉　悟

最終頁に続く

(54)【発明の名称】回路シミュレーション方法、回路シミュレーション装置およびコンピュータ読み取り可能な記録媒体

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
回路シミュレーション装置が、回路素子を所定の動作条件で動作させた第１の電気的特性値を取得し、
前記回路シミュレーション装置が、前記回路素子の動作中における基準値以上の電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、前記第１の電気的特性値を補正し、
前記第１の電気的特性値は、前記回路素子に前記電気的ストレスを印加している期間の増加にともなって増加する中間パラメータ値を含み、
前記中間パラメータ値は、前記電気的ストレスの印加を停止する前記動作条件の下では、当該電気的ストレスの印加を停止している期間の増加にともなって減少するように設定されており、
前記第１の電気的特性値の補正は、前記中間パラメータ値にともなって補正するものであり、
前記回路素子は、ＭＯＳトランジスタであり、
前記中間パラメータ値は、
ゲートに流れ込む電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、
基板電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、および、
端子電圧、温度および素子サイズの少なくとも１つと算出時刻との関数として表される

基準年齢パラメータから前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正年齢パラメータ、の少なくとも１つを含む、回路シミュレーション方法。

【請求項２】

前記回路素子は、経時的に電気的特性が変化し、

前記第１の電気的特性値の補正は、

前記回路素子に前記電気的ストレスを印加後、前記電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、前記第１の電気的特性値を回復させる、請求項１記載の回路シミュレーション方法。

【請求項３】

回路素子を所定の動作条件で動作させた第１の電気的特性値を算出する第１の算出部を備え、

前記第１の算出部は、前記回路素子の動作中における基準値以上の電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、前記第１の電気的特性値を補正し、

前記第１の電気的特性値は、前記回路素子に前記電気的ストレスを印加している期間の増加にともなって増加する中間パラメータ値を含み、

前記中間パラメータ値は、前記電気的ストレスの印加を停止する前記動作条件の下では、当該電気的ストレスの印加を停止している期間の増加にともなって減少するように設定されており、

前記第１の電気的特性値の補正は、前記中間パラメータ値にともなって補正するものであり、

前記回路素子は、ＭＯＳトランジスタであり、

前記中間パラメータ値は、

ゲートに流れ込む電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、

基板電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、および、

端子電圧、温度および素子サイズの少なくとも１つと算出時刻との関数として表される基準年齢パラメータから前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正年齢パラメータ、の少なくとも１つを含む、回路シミュレーション装置。

【請求項４】

コンピュータ読み取り可能な記録媒体であって、

コンピュータに、回路素子を所定の動作条件で動作させた第１の電気的特性値を取得する手順、前記回路素子の動作中における基準値以上の電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、前記第１の電気的特性値を補正する手順、を実行させるための、回路シミュレーションプログラムが記録され、

前記第１の電気的特性値は、前記回路素子に前記電気的ストレスを印加している期間の増加にともなって増加する中間パラメータ値を含み、

前記中間パラメータ値は、前記電気的ストレスの印加を停止する前記動作条件の下では、当該電気的ストレスの印加を停止している期間の増加にともなって減少するように設定されており、

前記第１の電気的特性値の補正は、前記中間パラメータ値にともなって補正するものであり、

前記回路素子は、ＭＯＳトランジスタであり、

前記中間パラメータ値は、

ゲートに流れ込む電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、

基板電流を基準時刻から算出時刻にわたって積分した基準積分値から前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積分値、および、

端子電圧、温度および素子サイズの少なくとも１つと算出時刻との関数として表される基準年齢パラメータから前記電気的ストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正年

齢パラメータ、の少なくとも１つを含む、コンピュータ読み取り可能な記録媒体。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明の実施形態は、回路シミュレーション方法、回路シミュレーション装置およびコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関する。
【背景技術】
【０００２】
従来から、回路の設計においては、回路シミュレータを用いることにより、回路の接続情報をデータにして、当該データが要求される仕様を満たしているかどうかを確認しながら、要求される仕様を満たす回路を設計していた。
【０００３】
ここで、実際の回路を構成する回路素子は、シミュレーション上の理想的な回路素子のモデルとは異なり、動作時間の経過にともなって特性が変化する。このように特性が変化する回路素子は、該回路素子を組み込んでいるシステムに、動作不能や誤動作を生じさせるおそれがある。
【０００４】
このようなシステムの動作不能や誤動作を抑制するには、回路の設計において、回路素子の経年劣化を考慮したシミュレーションが有効とされている。実際に、市販品の回路シミュレータの中には、回路素子のモデルを、回路素子の特性の経時的変化量を見込んで修正するツールを搭載したものもある。
【０００５】
しかしながら、従来の回路シミュレータは、必ずしも実際の回路素子に対応した電気的特性の経時的変化量を反映した回路設計ができないといった問題がある。
【先行技術文献】
【特許文献】
【０００６】
【特許文献１】特開２００８－４２１６１号公報
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００７】
本実施形態は、より実際の回路素子に対応した回路設計が可能な回路シミュレーション方法、回路シミュレーション装置およびコンピュータ読み取り可能な記録媒体を提供する。
【課題を解決するための手段】
【０００８】
本実施形態の回路シミュレーション方法では、経時的に電気的特性が変化する回路素子を所定の動作条件で動作させた第１の電気的特性値を取得する。また、回路シミュレーション方法では、回路素子の動作中における基準値以上の電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、第１の電気的特性値を補正する。
【図面の簡単な説明】
【０００９】
【図１】本実施形態を示す回路シミュレーション装置のブロック図である。
【図２】図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示すフローチャートである。
【図３】図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示す模式図である。
【図４】図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示すタイムチャートである。
【発明を実施するための形態】
【００１０】
以下、図面を参照して実施形態を説明する。以下の実施形態は、あくまで一例であって本発明を限定するものではない。なお、発明者は、回路素子に電気的ストレスの印加を停

止した場合に、電気的特性の経時的変化量が減少する（すなわち、回復傾向を示す）場合があることに注目し、実施形態の回路シミュレーション方法、回路シミュレーション装置およびコンピュータ読み取り可能な記録媒体に関する発明するに至った。このように、電気的ストレスの印加を停止することによって電気的特性の経時的変化量が減少する回路特性は、リカバリ特性と言われる。例えば、ＭＯＳトランジスタにおいては、ドレイン－ソース間電圧やゲート－ソース間電圧などの電圧ストレスの印加を停止している時間の経過に伴って、しきい値電圧の経時的変化量が減少する。

【００１１】

図１は、本実施形態を示す回路シミュレーション装置１のブロック図である。図１に示すように、回路シミュレーション装置１は、記憶装置１１と、入力装置１２と、演算装置１３と、出力装置１４とを備える。

【００１２】

記憶装置１１は、本実施形態におけるコンピュータ読み取り可能な記録媒体の一例である。記憶装置１１には、回路シミュレーションプログラムが記憶されている。回路シミュレーションプログラムは、コンピュータに、次の（Ａ）、（Ｂ）に記載の手順を実行させるためのプログラムである。

【００１３】

（Ａ）基準値以上の電気的ストレスの印加が停止されることにより電気的特性の経時的変化量（すなわち、劣化量）が減少する回路素子の動作条件に基づいて、回路素子の中間パラメータ値を算出する第１の手順。なお、中間パラメータ値は、該経時的変化量に相関するパラメータであり、回路素子に基準値以上の電気的ストレスを印加している期間の増加（すなわち、時間の経過）にともなって増加するパラメータである。この第１の手順における中間パラメータ値は、電気的ストレスの印加を停止する動作条件の下では、電気的ストレスの印加を停止している期間の増加にともなって減少するように設定されている。

【００１４】

中間パラメータ値は、第１の電気的特性値の一例である。なお、第１の電気的特性値は、リカバリ特性が示される電気的特性値であれば、中間パラメータ値に限定されない。第１の手順は、経時的に電気的特性が変化する回路素子を所定の動作条件で動作させた第１の電気的特性値を取得する手順の一例である。

【００１５】

（Ｂ）第１の手順において算出された中間パラメータ値に基づいて、回路素子の電気的特性の経時的変化量を算出する第２の手順。

【００１６】

第２の手順は、回路素子の動作中における基準値以上の電気的ストレスの印加が停止される期間に基づいて、第１の電気的特性値を補正する手順の一例である。

【００１７】

ここで、回路素子は、基準値以上の電気的ストレスの印加が停止されることにより電気的特性の経時的変化量が減少する特性すなわちリカバリ特性を有する回路素子であれば特に限定されない。好ましい態様の一例として、回路素子は、ＭＯＳトランジスタである。より好ましくは、回路素子は、ＤＭＯＳ(Double-Diffused MOS)トランジスタである。ＤＭＯＳトランジスタは、大電力を取り扱うように設計されているため、リカバリ特性による電気的特性の経時的変化量の減少量が他のＭＯＳトランジスタと比較して大きくなることがわかった。このため、ＤＭＯＳトランジスタにおいては、リカバリ特性を考慮した回路シミュレーションの有効性が更に高い。

【００１８】

また、電気的ストレスは、例えば、電圧ストレスや電流ストレスである。基準値以上の電気的ストレスは、例えば、回路素子の電気的特性に劣化を生じさせるとみなされる値以上の電気的ストレスである。具体的には、基準値は、電気的ストレスが無印加である場合の値（すなわち、ゼロ）より大きい任意の値であってもよい。また、基準値は、電気的ストレスをＭＯＳトランジスタのゲート－ソース間電圧とする場合には、しきい値電圧であ

ってもよい。この場合、基準値以上の電気的ストレスの印加を停止することは、ＭＯＳトランジスタをオフすることに相当する。

【００１９】

また、回路素子の電気的特性の経時的変化量は、例えば、ＭＯＳトランジスタのしきい値電圧の経時的変化量ΔＶｔｈ、ＭＯＳトランジスタの電流駆動能力の経時的変化量ΔＩｄｒ、ＭＯＳトランジスタのオン抵抗の経時的変化量ΔＲｏｎなどである。

【００２０】

また、回路素子の動作条件は、例えば、電圧ストレスの電圧値、電流ストレスの電流値、回路素子の温度および回路素子のサイズなどである。

【００２１】

また、中間パラメータ値は、（Ａ）に定義したとおり、回路素子の電気的特性の経時的変化量すなわち目的とするパラメータを算出できるパラメータである。しかし、本実施形態における中間パラメータ値は、通常の中間パラメータ値とは異なり、回路素子のリカバリ特性を考慮したパラメータである。中間パラメータ値の更なる詳細は後述する。

【００２２】

上述の回路シミュレーションプログラム以外にも、記憶装置１１には、ネットリストに基づく通常の回路シミュレーションを行うための回路シミュレータが、コンピュータ読み取り可能に記憶されている。回路シミュレーションプログラムは、例えば、回路シミュレータのツールとして回路シミュレータに組み込まれている。さらに、記憶装置１１には、ネットリスト入力用の回路図エディタが、コンピュータ読み取り可能に記憶されている。

【００２３】

入力装置１２は、ユーザ操作にしたがって、記憶装置１１から読み出した回路図エディタを用いてネットリストを作成し、作成されたネットリストを演算装置１３に入力する。ネットリストは、回路素子の接続情報などの通常の回路シミュレーションの実行に必要な情報に加え、何年後の回路素子の特性を解析するかを特定する経年情報を含む。入力装置１２は、例えば、各種の入力用ユーザインターフェース、コンピュータおよびディスプレイなどで具現化できる。

【００２４】

演算装置１３は、記憶装置１１から読み出した回路シミュレーションプログラムを実行することで、第１の算出部および第２の算出部として動作する。すなわち、演算装置１３は、上述の（Ａ）に記載の第１の手順と、（Ｂ）に記載の第２の手順とを実行する。演算装置１３は、第２の手順の実行によって算出された電気的特性の経時的変化量を、出力装置１４に出力する。演算装置１３は、コンピュータによって具現化できる。演算装置１３は、入力装置１２と共通のハードウェアでもよい。

【００２５】

出力装置１４は、演算装置１３から出力された電気的特性の経時的変化量を、シミュレーション結果として画像出力する。出力装置１４は、例えば、コンピュータおよびディスプレイなどで具現化できる。出力装置１４は、入力装置１２および演算装置１３と共通のハードウェアを有していてもよい。

【００２６】

以下、図２～図４を用いて、図１の回路シミュレーション装置１の動作例を説明する。図２は、図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示すフローチャートである。図３は、図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示す模式図である。より詳しくは、図３（ａ）は、しきい値電圧の劣化前のＭＯＳトランジスタの等価回路モデルを示す図である。図３（ｂ）は、しきい値電圧の劣化後のＭＯＳトランジスタの等価回路モデルを示す図である。図４は、図１の回路シミュレーション装置の動作の一例を示すタイムチャートである。

【００２７】

先ず、図２の第１のステップ（Ｓ１）において、演算装置１３は、記憶装置１１から読み出した回路シミュレータを実行することで、入力装置１２が作成したネットリストを、

該ネットリストの格納部から読み込む。このネットリストの格納部は、入力装置１２の記憶領域、演算装置１３の記憶領域または記憶装置１１の記憶領域であってよい。

【００２８】

次いで、第２のステップ（Ｓ２）において、演算装置１３は、回路シミュレータを実行することで、第１のステップ（Ｓ１）において読み込んだネットリストに基づいて、回路シミュレーションを実行する。

【００２９】

より詳しくは、第２のステップ（Ｓ２）において、演算装置１３は、過渡解析を実行する。過渡解析において、演算装置１３は、回路素子の端子に印加される電圧（電圧ストレス）および電流（電流ストレス）などを、ネットリストで指定された一定の時間ステップでモニタする。この過渡解析の結果は、回路素子の動作条件となる。

【００３０】

また、第２のステップ（Ｓ２）において、演算装置１３は、記憶装置１１から読み出した回路シミュレーションプログラムを実行することで、過渡解析の結果に示される回路素子の動作条件に基づいて、中間パラメータ値を算出する。演算装置１３は、中間パラメータ値を算出するにあたって、基準値以上のストレスの印加を停止することに基づく中間パラメータ値の減衰を加味する。

【００３１】

このとき、演算装置１３は、上述のように過渡解析の結果に基づいて動作条件を把握してもよい。あるいは、演算装置１３は、入力装置１２の入力結果（例えば、素子のオン／オフ時間の設定結果）に基づいて動作条件を把握してもよい。

【００３２】

第２のステップ（Ｓ２）において算出する中間パラメータ値は、動作条件によって決まる回路素子の物理量を、基準時刻から中間パラメータ値を算出する算出時刻にわたって積算した基準積算量から、基準値以上のストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正積算量である。基準時刻は、回路素子に対して基準値以上のストレスの印加を開始する時刻であってもよいが、これに限定されない。

【００３３】

このような補正積算量として定義される中間パラメータ値の例としては、以下に説明するＱｇａｔｅ、ＱｓｕｂおよびＡｇｅが挙げられる。

【００３４】

先ずは、Ｑｇａｔｅについて説明する。Ｑｇａｔｅは、ＭＯＳトランジスタのゲートに流れ込む電流Ｉｇａｔｅ（物理量）を、基準時刻からＱｇａｔｅの算出時刻にわたって積分した基準積分値から、基準値以上の電圧ストレスの印加の停止に基づくＩｇａｔｅの積分値の減少量を減じた補正積分値である。

【００３５】

ここで、電圧ストレスは、例えば、ゲートーソース間電圧Ｖｇｓやドレインーソース間電圧Ｖｄｓである。電圧ストレスの基準値は、当該基準値未満ではＩｇａｔｅが流れないような値であればよい。

【００３６】

また、Ｉｇａｔｅの積分値の減少量は、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下の期間の増加にともなって、係数および時定数を含む指数関数にしたがって増大する値である。この例において、Ｑｇａｔｅは、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下の期間の増加にともなって該指数関数にしたがって減少（減衰）する。

【００３７】

なお、Ｑｇａｔｅの減少の態様は、指数関数にしたがうことに限定されず、１次関数または２次以上の関数にしたがってもよい。

【００３８】

また、基準値以上の電圧ストレスを停止する第１の動作条件の後に、基準値以上の電圧ストレスを印加する第２の動作条件になる場合がある。この第２の動作条件下において、

基準積分値に対するＩｇａｔｅの積分値の減少量は、例えば、一定値である。この一定値は、例えば、第１の動作条件の終期におけるＩｇａｔｅの積分値の減少量に等しい。

【００３９】

Ｑｇａｔｅは、Ｉｇａｔｅの関数として次式のように表すことができる。

Ｑｇａｔｅ＝ｆ（Ｉｇａｔｅ、・・・）　　（１）

Ｑｇａｔｅは、例えば、しきい値電圧の経時的変化量ΔＶｔｈの算出に用いることができる。

【００４０】

もし、Ｑｇａｔｅの替わりに、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下においても基準積分値をとるパラメータＱｇａｔｅ＿ａを採用した場合、Ｑｇａｔｅ＿ａは、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下において一定値となる。なぜならば、基準値以上の電圧ストレスを停止する期間において、Ｉｇａｔｅは流れないため、この期間において、基準積分値は増減しないからである。

【００４１】

しかし、このように一定値をとるＱｇａｔｅ＿ａは、ＭＯＳトランジスタのリカバリ特性によるＩｇａｔｅの積分値の減少量を加味していない。したがって、Ｑｇａｔｅ＿ａに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができない。

【００４２】

これに対して、Ｑｇａｔｅは、リカバリ特性によるＩｇａｔｅの積分値の減少量を加味した補正積分値をとるので、Ｑｇａｔｅに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができる。このことを更に詳しく述べると次のとおりである。

【００４３】

ＭＯＳトランジスタは、電圧ストレスの印加によって酸化膜に電荷がトラップされることにより、ΔＶｔｈが経時的に増加すると考えられる。逆に、電圧ストレスの印加が停止されれば、酸化膜中にトラップされた電荷が拡散して、ΔＶｔｈが経時的に減少する、すなわち、リカバリ特性が発揮されると考えられる。

【００４４】

Ｑｇａｔｅは、このような電荷が拡散する挙動を、Ｑｇａｔｅの減衰として表現することができるので、Ｑｇａｔｅに基づいて求められるΔＶｔｈは、リカバリ特性を適切に表現することができる。

【００４５】

続いて、Ｑｓｕｂについて説明する。Ｑｓｕｂは、ＭＯＳトランジスタのバルク（サブストレート）ノードを流れる基板電流Ｉｓｕｂ（物理量）を、基準時刻からＱｓｕｂの算出時刻にわたって積分した基準積分値から、基準値以上の電圧ストレスの印加の停止に基づくＩｓｕｂの積分値の減少量を減じた補正積分値である。

【００４６】

電圧ストレスの具体例は、Ｑｇａｔｅと同様でよい。また、減少量の具体例は、Ｑｇａｔｅと同様でよい。すなわち、Ｑｓｕｂは、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下の期間の増加にともなって、係数および時定数を含む指数関数にしたがって減少してよい。

【００４７】

Ｑｓｕｂは、Ｉｓｕｂの関数として次式のように表すことができる。

Ｑｓｕｂ＝ｆ（Ｉｓｕｂ、・・・）　　（２）

Ｑｓｕｂも、Ｑｇａｔｅと同様に、例えば、しきい値電圧の経時的変化量ΔＶｔｈの算出に用いることができる。

【００４８】

もし、Ｑｓｕｂの替わりに、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下においても基準積分値をとるパラメータＱｓｕｂ＿ａを採用した場合、Ｑｓｕｂ＿ａは、基準値以上の電圧ストレスを停止する動作条件下において、一定値となる。その理由は、Ｑｇａｔｅ＿ａの場合と同様である。しかし、このように一定値をとるＱｓｕｂ＿ａは、ＭＯＳト

ランジスタのリカバリ特性によるＩｓｕｂの積分値の減少量を加味しないものである。したがって、Ｑｓｕｂ＿ａに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができない。

【００４９】

これに対して、Ｑｓｕｂは、リカバリ特性によるＩｓｕｂの積分値の減少量を加味した補正積分値をとるので、Ｑｓｕｂに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができる。

【００５０】

最後に、Ａｇｅについて説明する。Ａｇｅは、端子電圧、温度および素子サイズの少なくとも１つ（物理量）とＡｇｅを算出する算出時刻との関数（積算量）として表される基準年齢パラメータから、基準値以上のストレスの印加の停止に基づく減少量を減じた補正年齢パラメータである。

【００５１】

ストレスの具体例は、Ｑｇａｔｅと同様でよい。また、減少量の具体例も、Ｑｇａｔｅと同様でよい。すなわち、Ａｇｅは、基準値以上のストレスを停止する動作条件下の期間の増加にともなって、係数および時定数を含む指数関数にしたがって減少してよい。

【００５２】

Ａｇｅは、Ｖｄｓ、Ｖｇｓ、ゲート幅W、ゲート長Ｌおよび温度Ｔｅｍｐの関数として次式のように表すことができる。

Ａｇｅ＝ｆ（Ｖｄｓ、Ｖｇｓ、W、Ｌ、Ｔｅｍｐ、・・・）　　（３）

Ａｇｅも、Ｑｇａｔｅと同様に、例えば、しきい値電圧の経時的変化量ΔＶｔｈの算出に用いることができる。

【００５３】

もし、Ａｇｅの替わりに、基準年齢パラメータを採用した場合、基準年齢パラメータは、基準値以上のストレスを停止する動作条件下において、一定値となり得る。しかし、このように一定値をとる基準年齢パラメータは、ＭＯＳトランジスタのリカバリ特性による減少量を加味しないものである。したがって、基準年齢パラメータに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができない。

【００５４】

これに対して、Ａｇｅは、リカバリ特性による減少量を加味した補正年齢パラメータであるので、Ａｇｅに基づいて得られるΔＶｔｈは、リカバリ特性を表現することができる。

【００５５】

以上のような第２のステップ（Ｓ２）の後は、第３のステップ（Ｓ３）を実行する。第３のステップ（Ｓ３）において、演算装置１３は、回路シミュレーションプログラムを実行することで、第２のステップ（Ｓ２）において算出された中間パラメータ値の積算値を算出する。

【００５６】

より詳しくは、第３のステップ（Ｓ３）において、演算装置１３は、中間パラメータ値の経年時間にわたっての総量を算出する。例えば、演算装置１３は、上述の過渡解析での動作が１年間続いた場合の中間パラメータ値の総量を算出してもよい。

【００５７】

演算装置１３は、中間パラメータ値の積算値を算出するにあたって、第２のステップ（Ｓ２）において中間パラメータ値の減衰を加味しているが故に、自ずと中間パラメータ値の減衰を加味する。ただし、本実施形態は、第２のステップ（Ｓ２）において減衰を加味しない中間パラメータ値の算出を行った後に、第３のステップ（Ｓ３）において減衰を加味した中間パラメータ値の補正および補正後の中間パラメータ値の積算を行う態様を除外しない。

【００５８】

次いで、第４のステップ（Ｓ４）において、演算装置１３は、第３のステップ（Ｓ３）

において算出された中間パラメータ値の積算値に基づいて、回路素子の電気的特性の経時的変化量を算出する。

【００５９】

例えば、演算装置１３は、Ｑｇａｔｅの積算値に基づいて、次式のように、Ｑｇａｔｅおよび時間Ｔの関数として表現されるΔＶｔｈを算出する。

ΔＶｔｈ＝ｇ（Ｑｇａｔｅ、Ｔ、・・・）　　（４）

【００６０】

また、例えば、演算装置１３は、Ｑｓｕｂの積算値に基づいて、次式のように、Ｑｓｕｂおよび時間Ｔの関数として表現されるΔＶｔｈを算出する。

ΔＶｔｈ＝ｇ（Ｑｓｕｂ、Ｔ、・・・）　　（５）

【００６１】

また、例えば、演算装置１３は、Ａｇｅの積算値に基づいて、次式のように、Ａｇｅおよび時間Ｔの関数として表現されるΔＶｔｈを算出する。

ΔＶｔｈ＝ｇ（Ａｇｅ、Ｔ、・・・）　　（６）

【００６２】

演算装置１３は、算出された電気的特性の経時的変化量を、出力装置１４に出力する。出力装置１４は、演算装置１３から出力された電気的特性の経時的変化量を、解析者が理解し易い形式で出力する。例えば、出力装置１４は、電気的特性の経時的変化量を、テキストファイルとして表示してもよく、また、回路図データ画面上に表示してもよい。

【００６３】

次いで、第５のステップ（Ｓ５）において、演算装置１３は、経時的変化後すなわち経年劣化後の電気的特性を回路シミュレータで再現できるように、ネットリストを作成する。演算装置１３は、作成したネットリストを、例えば、記憶装置１１に記憶させる。このネットリストにおいて経時的変化後の電気的特性を表現する態様は特に限定されないが、好ましい態様の例として、回路シミュレータのパラメータ値による記述や、劣化量を表現する等価回路モデルの追加などを採用してよい。例えば、図３（ａ）に示すように、しきい値電圧の劣化前のＭＯＳトランジスタの等価回路モデルに対して、図３（ｂ）に示すように、しきい値電圧の変動量を表現する電圧源を、ゲート部に直列接続した態様で追加してもよい。

【００６４】

次いで、第６のステップ（Ｓ６）において、演算装置１３は、回路シミュレータを実行することで、第５のステップ（Ｓ５）において作成したネットリストを用いて、経年後の特性の回路シミュレーションを実行する。

【００６５】

このようにして、リカバリ特性が反映された経時後の特性を確認することができる。もし、リカバリ特性を考慮しないで経年後の特性の回路シミュレーションを行う場合、実際よりも劣化した特性を示すシミュレーション結果が得られる。このようなシミュレーション結果に基づいて劣化が許容限度に収まる回路を設計する場合、実際より過度な劣化を見込んで、劣化が少なくなるように回路素子のサイズを大きく設計することを余儀なくされる。この結果、回路素子の製造コストが必要以上にかかってしまう。

【００６６】

これに対して、本実施形態においては、リカバリ特性を考慮した特性の回路シミュレーションを行うことができるので、実際の劣化を見込んで回路素子のサイズをコンパクトにすることができ、結果的に、製造コストを抑制することができる。

【００６７】

次に、上述の第３のステップ（Ｓ３）における中間パラメータ値の算出動作および第４のステップ（Ｓ４）における中間パラメータ値の積算値の算出動作を、図４のタイムチャートを用いて更に詳述する。

【００６８】

図４の上段には、動作条件の一例としての回路素子への印加電圧（電圧ストレス）のタ

イムチャートが示されている。この印加電圧のタイムチャートにおいては、ハイレベルの電圧ＶＨが、基準値以上のストレスに該当し、ロウレベルの電圧ＶＬが、基準値未満のストレスに該当する。

【００６９】

したがって、ハイレベルの電圧ＶＨが最初に印加される期間ｔ１～ｔ２の後のロウレベルの電圧ＶＬが印加される期間ｔ２～ｔ３は、基準値以上のストレスの印加が停止される期間に該当する。

【００７０】

図４の中段には、図２の第３のステップ（Ｓ３）で算出された中間パラメータ値の積算値のタイムチャートが示されている。このタイムチャートは、図４の上段の印加電圧のタイムチャートと時間的に対応するように示されている。

【００７１】

より具体的には、図４の中段には、図２の第２のステップ（Ｓ２）および第３のステップ（Ｓ３）で述べたような中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値が、実線で示されている。また、図４の中段には、比較例として、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値が、破線で示されている。

【００７２】

図４の下段には、図２の第４のステップ（Ｓ４）で算出された回路素子の電気的特性の経時的変化量のタイムチャートが示されている。このタイムチャートは、図４の上段の印加電圧のタイムチャートおよび図４の中段の中間パラメータ値の積算値のタイムチャートと時間的に対応するように示されている。

【００７３】

より具体的には、図４の下段には、中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値（図４の中段の実線部）に基づく経時的変化量が、実線で示されている。また、図４の下段には、比較例として、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値（図４の中段の破線部）に基づく経時的変化量が、破線で示されている。

【００７４】

ここで、図４の中段に示すように、中間パラメータ値の積算値は、期間ｔ１～ｔ２においては、期間の増加にともなって単調増加する。このような図４の記載は、期間ｔ１～ｔ２において中間パラメータ値自体が期間の増加にともなって単調増加することを示唆している。

【００７５】

また、図４の中段に示すように、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値（実線部）は、期間の増加にともなって減衰する。このような図４の記載は、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値自体が期間の増加にともなって係数および時定数を含む指数関数にしたがって減衰することを示唆している。

【００７６】

一方、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値（破線部）は、一定である。中間パラメータ値自体も同様に一定である。

【００７７】

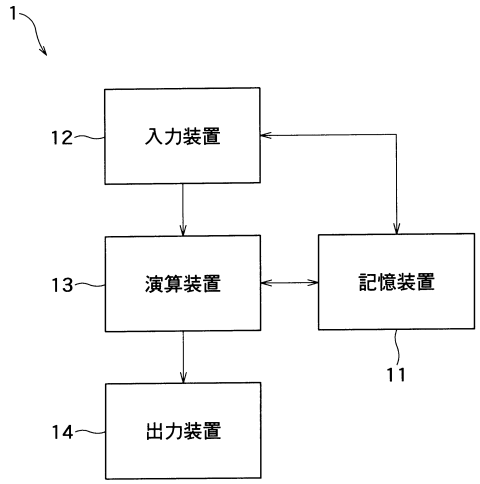
また、図４の中段に示すように、ハイレベルの電圧ＶＨが再び印加される時刻ｔ３以降の期間において、中間パラメータ値の積算値は、中間パラメータ値の減衰を加味した場合（実線部）も、中間パラメータ値の減衰を加味しない場合（破線部）も、期間の増加にともなって単調増加する。

【００７８】

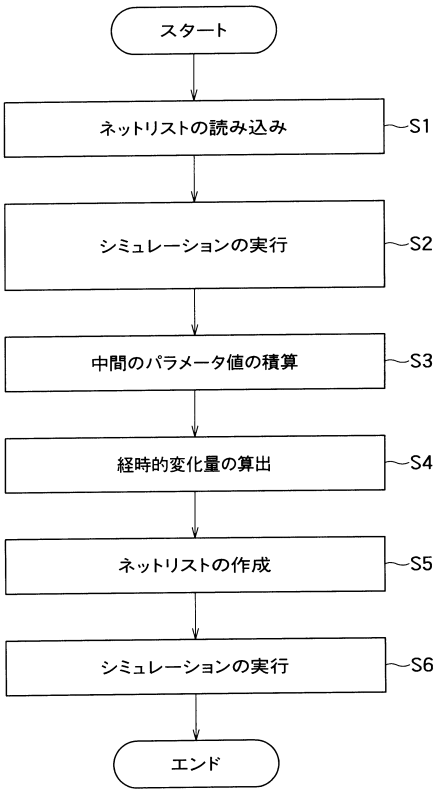
ただし、ｔ３以降の期間において、中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値は、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値よりも一定量減少している。その理由は、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値は一定であるのに対して、中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値は減衰するためである。

【００７９】
このようなｔ３以降の期間における中間パラメータ値の積算値の大小関係を示す図４の記載は、ｔ３以降の期間において、減衰を加味した中間パラメータ値自体が、減衰を加味しない中間パラメータ値自体に対して、一定の減少量分減少した値となり得ることを示唆する。
【００８０】
図４の下段に示すように、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値の減衰を加味した中間パラメータ値の積算値に基づく経時的変化量（実線部）は、期間の増加にともなって減少する。この経時的変化量は、期間ｔ２～ｔ３において印加電圧がロウレベル（ＶＬ）となることによって生じるリカバリ特性を適切に反映している。
【００８１】
一方、期間ｔ２～ｔ３において、中間パラメータ値の減衰を加味しない中間パラメータ値の積算値に基づく経時的変化量（破線部）は、一定である。この経時的変化量は、期間ｔ２～ｔ３におけるリカバリ特性を反映していない。
【００８２】
以上説明したように、本実施形態によれば、リカバリ特性を反映した中間パラメータ値（第１の電気的特性値）を算出することができるので、リカバリ特性を反映した回路設計が可能である。
【００８３】
本実施形態による回路シミュレーション装置の少なくとも一部は、ハードウェアで構成してもよいし、ソフトウェアで構成してもよい。ソフトウェアで構成する場合には、データ処理方法の少なくとも一部の機能を実現するプログラムをフレキシブルディスクやＣＤ－ＲＯＭ等の記録媒体に収納し、コンピュータに読み込ませて実行させてもよい。記録媒体は、磁気ディスクや光ディスク等の着脱可能なものに限定されず、ハードディスク装置やメモリなどの固定型の記録媒体でもよい。また、データ処理方法の少なくとも一部の機能を実現するプログラムを、インターネット等の通信回線（無線通信も含む）を介して頒布してもよい。さらに、同プログラムを暗号化したり、変調をかけたり、圧縮した状態で、インターネット等の有線回線や無線回線を介して、あるいは記録媒体に収納して頒布してもよい。
【００８４】
本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の趣旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や趣旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。
【符号の説明】
【００８５】
１　回路シミュレーション装置
１３　演算装置

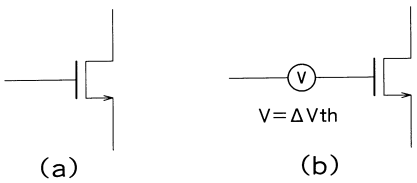
【図１】


1
12
入力装置
13
演算装置
記憶装置
11
14
出力装置

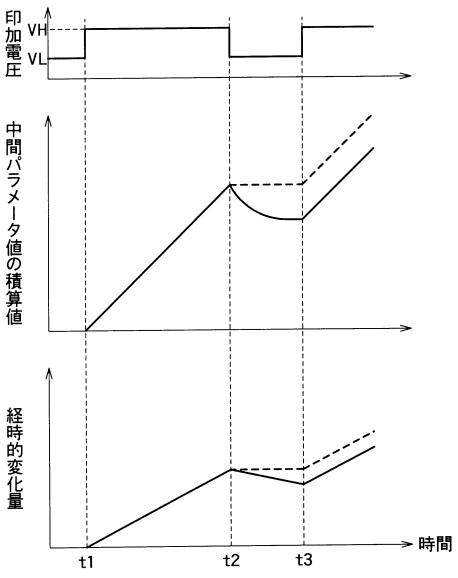
【図２】


スタート
ネットリストの読み込み
S1
シミュレーションの実行
S2
中間のパラメータ値の積算
S3
経時的変化量の算出
S4
ネットリストの作成
S5
シミュレーションの実行
S6
エンド

【図３】


V
V＝ΔVth
(a)
(b)

【図４】


印加電圧
VH
VL
中間パラメータ値の積算値
経時的変化量
時間
t1
t2
t3

フロントページの続き

(74)代理人　100107582
弁理士　関根　毅
(74)代理人　100118843
弁理士　赤岡　明
(74)代理人　100120385
弁理士　鈴木　健之
(72)発明者　木村　智寿
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内
(72)発明者　阿部　和秀
東京都港区芝浦一丁目１番１号　株式会社東芝内

審査官　松田　直也

(56)参考文献　特開２００８－２２５９６１（ＪＰ，Ａ）
黒川　敦，信頼性保証のためのＮＢＴＩのモデリングとシミュレーション方法，第２０回　回路とシステム軽井沢ワークショップ　論文集，日本，電子情報通信学会　システムと信号処理サブソサイエティ　電子情報通信学会　非線形理論とその応用サブソサイエティ，２００７年　４月，p.13～18

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０６Ｆ　　１７／５０