(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2007-123791
(P2007-123791A)
(43)公開日　平成19年5月17日(2007.5.17)

(51)Int.Cl.		F I		テーマコード（参考）
H01L 21/66	(2006.01)	H01L 21/66	Q	4M106

審査請求 有　請求項の数 11　ＯＬ　（全 22 頁）

(21)出願番号　特願2005-338989 (P2005-338989)
(22)出願日　平成17年11月24日 (2005.11.24)
(31)優先権主張番号　特願2004-342078 (P2004-342078)
(32)優先日　平成16年11月26日 (2004.11.26)
(33)優先権主張国　日本国(JP)
(31)優先権主張番号　特願2005-284719 (P2005-284719)
(32)優先日　平成17年9月29日 (2005.9.29)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

（出願人による申告）平成１６年度、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「次世代半導体材料・プロセス基盤（ＭＩＲＡＩ）」委託研究、産業活力再生特別措置法第３０条の適用を受ける特許出願

(71)出願人　000005821
松下電器産業株式会社
大阪府門真市大字門真１００６番地
(74)代理人　100077931
弁理士　前田　弘
(74)代理人　100110939
弁理士　竹内　宏
(74)代理人　100110940
弁理士　嶋田　高久
(74)代理人　100113262
弁理士　竹内　祐二
(74)代理人　100115059
弁理士　今江　克実
(74)代理人　100115691
弁理士　藤田　篤史

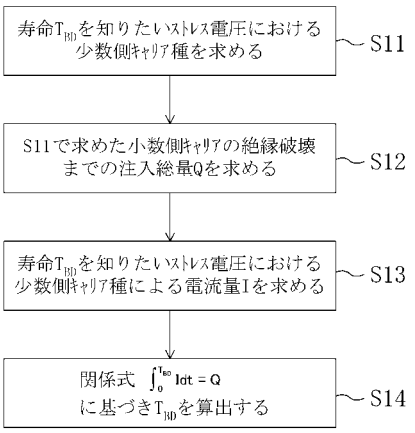
最終頁に続く

(54)【発明の名称】絶縁膜の寿命推定方法

(57)【要約】
【課題】高誘電率絶縁膜を用いたゲート絶縁膜を有する半導体素子において、ゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命をより簡便且つ正確に求める。
【解決手段】評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求めた後、絶縁膜試料に対して電気的ストレス印加を行うことによって、前記絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量Ｑを求め、その後、前記評価対象絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量Ｉを求める。最後に、

$$\int_0^{T_{BD}} Idt = Q \qquad (1)$$

式（１）に基づいて寿命T_{BD}を算出する。
【選択図】図７



【特許請求の範囲】
【請求項１】
シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と、
ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量を求める第２の工程と、
所望の電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量を求める第３の工程と、
前記第２の工程で求めた前記少数側キャリアの注入総量が印加電圧によらず一定であることと、前記第３の工程で求めた前記少数側キャリアの電流量とに基づき、前記所望の電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第４の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項２】
請求項１に記載の絶縁膜の寿命推定方法において、
前記第３の工程は、
ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れるＳＩＬＣ電流量の、第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を測定する第５の工程と、
前記ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れるＳＩＬＣ電流量の、第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を測定する第６の工程と、
前記第５の工程で測定したＳＩＬＣ電流量の経時変化と、前記第６の工程で測定したＳＩＬＣ電流量の経時変化とに基づいて、前記第１のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量と前記第２のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量との比を求める第７の工程と、
前記第７の工程で求めた比に基づいて、前記第１のストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量と、前記第２のストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量との比を求める第８の工程とを含むことを特徴とする請求項１に記載の絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項３】
シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加により前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第１の工程と、
ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流量の、前記第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を評価する第２の工程と、
前記ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流量の、第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を評価する第３の工程と、
前記第２の工程で評価した電流量の経時変化と、前記第３の工程で評価した電流量の経時変化とに基づいて、前記第１のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量と前記第２のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量との間の比を求める第４の工程と、
前記第１の工程で求めた絶縁破壊寿命と、前記第４の工程で求めた比とに基づいて、前記第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加により前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を評価する第５の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項４】
シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と

、
絶縁膜試料に対して電気的ストレス印加を行うことによって、前記絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量Ｑを求める第２の工程と、
前記評価対象絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量Ｉを求める第３の工程と、
【数１】

$$\int_0^{T_{BD}} Idt = Q \qquad (1)$$

前記式（１）に基づいて前記寿命T_{BD}を算出する第４の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項５】
シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
あるストレス電圧V_0を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0を求める第１の工程と、
前記あるストレス電圧V_0を用いた電気的ストレス印加、及び電流－電圧特性評価を前記評価対象絶縁膜に対して繰り返し実施し、それによって前記評価対象絶縁膜を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する第２の工程と、
前記評価対象絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧Ｖを用いた電気的ストレス印加、及び電流－電圧特性評価を前記評価対象絶縁膜に対して繰り返し実施し、それによって前記評価対象絶縁膜を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する第３の工程と、
前記第３の工程で得られたＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動のストレス時間を定数倍変化させることにより、当該変化させた経時変化挙動が前記第２の工程で得られたＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動とほぼ一致するときの倍率Ｘを求める第４の工程と、
【数２】

$$T_{BD} = T_0 / X \qquad (2)$$

前記式（２）に基づいて前記寿命T_{BD}を算出する第５の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項６】
シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
あるストレス電圧V_0を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0を求める第１の工程と、
前記あるストレス電圧V_0における前記評価対象絶縁膜の前記絶縁破壊寿命T_0に対して、予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性をフィッティングする第２の工程と、
前記フィッティングの結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_{BD}を求める第３の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項７】
請求項６に記載の絶縁膜の寿命推定方法において、
前記第２の工程では、前記絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性は、前記絶縁膜試料の絶縁破壊寿命の電圧加速係数のストレス電圧依存性に基づいて求められることを特徴とする請求項６に記載の絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項８】

シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、
前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と、
絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量を求める第２の工程と、
ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量を求める第３の工程と、
前記第２の工程で求めた前記少数側キャリアの注入総量が印加電圧によらず一定であることと、前記第３の工程で求めた前記少数側キャリアの電流量とに基づき、前記ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第４の工程と、
前記第４の工程で求めた前記ある電圧における前記絶縁破壊寿命に対して、予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性をフィッティングする第５の工程と、
前記フィッティングの結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第６の工程とを備えていることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項９】
請求項１～８のいずれか１項に記載の絶縁膜の寿命推定方法において、
前記高誘電率の部分はhigh-k絶縁膜であることを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項１０】
請求項１、２、４又は８のいずれか１項に記載の絶縁膜の寿命推定方法において、
前記少数側キャリア注入総量として、真性少数側キャリア注入総量を使用することを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【請求項１１】
請求項１、２、４又は８のいずれか１項に記載の絶縁膜の寿命推定方法において、
前記少数側キャリアの電流量として、真性少数側キャリアの電流量を使用することを特徴とする絶縁膜の寿命推定方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、絶縁膜、特に半導体素子において使用されるゲート絶縁膜、容量絶縁膜又は層間絶縁膜等の寿命を推定するための方法に関するものである。
【背景技術】
【０００２】
近年、半導体集積回路装置の高集積化、高機能化及び高速化に伴ってゲート絶縁膜の薄膜化が進展し、その結果、従来使用されてきたシリコン酸化膜（SiO_2 膜）又は窒素を導入したシリコン酸化膜（SiO_xN_y 膜）ではリーク電流量等の規格値を満足できなくなってきている。そのため、SiO_2 と比べてより高誘電率を持つ新たな絶縁膜材料（以下、高誘電率絶縁膜（high-k膜）と称する）、例えばハフニウム系材料（HfO_x 、$HfSiO_x$ 、$HfAlO_x$ 、HfO_xN_y 等）を用いたゲート絶縁膜が提案されている。また、一般には、これらの高誘電率絶縁膜の単層構造ではなく、シリコン酸化膜（SiO_2 膜若しくはSiO_xN_y 膜等）又はシリコン窒化膜（Si_3N_4 膜）等と高誘電率絶縁膜との積層構造が採用されている。従って、従来のシリコン酸化膜を用いたゲート絶縁膜と、高誘電率絶縁膜を有するゲート絶縁膜との間には、材料の違いに加えて構造上の違いも存在することになるが、現在、高誘電率絶縁膜を有するゲート絶縁膜の寿命推定においても、従来のシリコン酸化膜における絶縁破壊寿命の推定に用いるモデル（非特許文献１、２参照）が用いられている。
【非特許文献１】I.C. Chen、S.E. Holland、and C. Hu : "Electrical Breakdown in Thin Gate and Tunneling Oxides"、IEEE Trans. Elec. Dev. 32 (1985) pp.413-422.

【非特許文献２】J.W. McPherson、D.A. Baglee : "Acceleration Factors for ThinGate Oxide Stressing"、Int. Rel. Phys. Symposium (1985) pp.1-5.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００３】

しかしながら、近年用いられるようになってきた高誘電率絶縁膜を有するゲート絶縁膜においては、前述のように従来のゲート酸化膜と比べて材料及び構造上の違いがあるため、従来のモデルをそのまま適用できないおそれがある。また、高誘電率絶縁膜を有するゲート絶縁膜については、どのようなモデルに基づいて寿命推定を行うべきであるかが明らかではない。

【０００４】

一方、高誘電率絶縁膜の用途は今後拡大していくことが予想されている。具体的には、フラッシュメモリにおけるトンネル絶縁膜、さらにはフローティングゲートとコントロールゲートとの間に挟まれたいわゆる層間絶縁膜に対して高誘電率絶縁膜を採用することが検討されている。また、フラッシュメモリの一形態であるＭＯＮＯＳ（Metal Oxide Nitride Oxide Silicon ）型素子若しくはＳＯＮＯＳ（Silicon Oxide Nitride Oxide Silicon ）型素子又はいわゆるＮＲＯＭ（Nitride Read Only Memory）型フラッシュメモリ等における電荷を蓄積する絶縁膜層おいては、シリコン酸化膜よりも高誘電率を持つシリコン窒化膜が既に使用されているが、さらに前記のような、より高い誘電率を持つ絶縁膜が採用されることが推定される。さらに、メモリー素子における容量絶縁膜にも高誘電率絶縁膜が採用されることが推定される。

【０００５】

尚、本願においては、前述のような多様な用途で用いられる絶縁膜をも含めた絶縁膜の総称として「ゲート絶縁膜」を用いるものとし、この総称としての「ゲート絶縁膜」を本願発明の対象とする。

【０００６】

本発明は上記の課題に鑑みてなされたものであり、シリコン窒化膜を含む高誘電率絶縁膜等の単層膜又は当該高誘電率絶縁膜等を含む２層以上の絶縁膜の積層膜をゲート絶縁膜として使用する半導体素子において、ゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命をより簡便且つ正確に求めることができる評価方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【０００７】

前記の目的を達成するために、本発明に係る第１の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と、ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量を求める第２の工程と、所望の電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量を求める第３の工程と、前記第２の工程で求めた前記少数側キャリアの注入総量が印加電圧によらず一定であることと、前記第３の工程で求めた前記少数側キャリアの電流量とに基づき、前記所望の電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第４の工程とを備えている。

【０００８】

本発明の第１の絶縁膜の寿命推定方法において、前記第３の工程は、ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れるＳＩＬＣ（Stress Induced Leakage Current）電流量の、第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を測定する第５の工程と、前記ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れるＳＩＬＣ電流量の、第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を測定する第６の工程と、前記第５の工程で測定したＳＩＬＣ電流量の経時変化と、前記第６の工程で測定したＳＩＬＣ電流量の経時変化とに基づいて、前記第１のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量と前記第２のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量との比を求める第７

の工程と、前記第７の工程で求めた比に基づいて、前記第１のストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量と、前記第２のストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量との比を求める第８の工程とを含むことが好ましい。

【０００９】

本発明に係る第２の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加により前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第１の工程と、ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流量の、前記第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を評価する第２の工程と、前記ある参照電圧を印加した前記評価対象絶縁膜に流れる電流量の、第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化を評価する第３の工程と、前記第２の工程で評価した電流量の経時変化と、前記第３の工程で評価した電流量の経時変化とに基づいて、前記第１のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量と前記第２のストレス電圧による前記評価対象絶縁膜の劣化量との間の比を求める第４の工程と、前記第１の工程で求めた絶縁破壊寿命と、前記第４の工程で求めた比とに基づいて、前記第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加により前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を評価する第５の工程とを備えている。

【００１０】

本発明に係る第３の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と、絶縁膜試料に対して電気的ストレス印加を行うことによって、前記絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量Ｑを求める第２の工程と、前記評価対象絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量Ｉを求める第３の工程と、

【００１１】

【数１】

$$\int_0^{T_{BD}} Idt = Q \qquad (1)$$

【００１２】

前記式（１）に基づいて前記寿命T_{BD}を算出する第４の工程とを備えている。

【００１３】

本発明に係る第４の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、あるストレス電圧V_0を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0を求める第１の工程と、前記あるストレス電圧V_0を用いた電気的ストレス印加、及び電流－電圧特性評価を前記評価対象絶縁膜に対して繰り返し実施し、それによって前記評価対象絶縁膜を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する第２の工程と、前記評価対象絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧Ｖを用いた電気的ストレス印加、及び電流－電圧特性評価を前記評価対象絶縁膜に対して繰り返し実施し、それによって前記評価対象絶縁膜を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する第３の工程と、前記第３の工程で得られたＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動のストレス時間を定数倍変化させることにより、当該変化させた経時変化挙動が前記第２の工程で得られたＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動とほぼ一致するときの倍率Ｘを求める第４の工程と、

【００１４】

【数２】

$$T_{BD} = T_0 / X \qquad (2)$$

【００１５】
前記式（２）に基づいて前記寿命T_{BD}を算出する第５の工程とを備えている。
【００１６】
本発明に係る第５の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、あるストレス電圧V_0を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0を求める第１の工程と、前記あるストレス電圧V_0における前記評価対象絶縁膜の前記絶縁破壊寿命T_0に対して、予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性をフィッティングする第２の工程と、前記フィッティングの結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_{BD}を求める第３の工程とを備えている。
【００１７】
本発明の第５の絶縁膜の寿命推定方法において、前記第２の工程では、前記絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性は、前記絶縁膜試料の絶縁破壊寿命の電圧加速係数のストレス電圧依存性に基づいて求められることが好ましい。
【００１８】
本発明に係る第６の絶縁膜の寿命推定方法は、シリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有する評価対象絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定する方法であって、前記評価対象絶縁膜を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める第１の工程と、絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量を求める第２の工程と、ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜を流れる前記少数側キャリアの電流量を求める第３の工程と、前記第２の工程で求めた前記少数側キャリアの注入総量が印加電圧によらず一定であることと、前記第３の工程で求めた前記少数側キャリアの電流量とに基づき、前記ある電圧を印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第４の工程と、前記第４の工程で求めた前記ある電圧における前記絶縁破壊寿命に対して、予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性をフィッティングする第５の工程と、前記フィッティングの結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した前記評価対象絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命を求める第６の工程とを備えている。
【００１９】
本発明の第１～第６の絶縁膜の寿命推定方法において、前記高誘電率の部分はhigh-k絶縁膜であることが好ましい。
【００２０】
本発明の第１、第３又は第６の絶縁膜の寿命推定方法において、前記少数側キャリア注入総量として、真性少数側キャリア注入総量を使用することが好ましい。
【００２１】
本発明の第１、第３又は第６の絶縁膜の寿命推定方法において、前記少数側キャリアの電流量として、真性少数側キャリアの電流量を使用することが好ましい。
【発明の効果】
【００２２】
本発明に係る絶縁膜の寿命推定方法によると、あるストレス電圧を印加したゲート絶縁膜の寿命を、寿命測定を実際に行うことができるストレス電圧を印加したゲート絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命に基づいて推定する指針が提供されるので、ゲート絶縁膜寿命をより簡便且つ正確に求めることができる。
【発明を実施するための最良の形態】
【００２３】

（第１の実施形態）

以下、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法について、図面を参照しながら説明する。

【００２４】

図１（ａ）及び（ｂ）は、後述するデータの測定に用いた試料の断面形状を簡単に示しており、図１（ａ）はＭＯＳ（metal oxide semiconductor ）キャパシタの断面構造を示し、図１（ｂ）はＭＯＳＦＥＴ（metal oxide semiconductor field-effect transistor ）の断面構造を示している。尚、本発明の対象となる絶縁膜は、例えば高誘電率膜及びSiO_2 膜の積層構造を有するゲート絶縁膜であって、必ずしも酸化膜には限定されないので、厳密にはＭＯＳではなくＭＩＳ（metal insulator semiconductor ）と表記すべきであるが、本願においては、慣例に従い、積層構造の絶縁膜又は酸化物以外の絶縁材料から構成される絶縁膜を対象とする場合でもＭＯＳと表記する。すなわち、ＭＯＳと表記した場合でも酸化物には限定されないものとする。

【００２５】

図１（ａ）に示すＭＯＳキャパシタにおいては、シリコン基板１０上に下層のSiO_2 膜１１及び上層の$HfAlO_x$ 膜１２からなるゲート絶縁膜が形成されていると共に、当該ゲート絶縁膜の上にポリシリコンよりなるゲート電極１３が形成されている。

【００２６】

図１（ｂ）に示すＭＯＳＦＥＴにおいては、シリコン基板２０上に下層のSiO_2 膜２１及び上層の$HfAlO_x$ 膜２２からなるゲート絶縁膜が形成されていると共に、当該ゲート絶縁膜の上にポリシリコンよりなるゲート電極２３が形成されている。また、シリコン基板２０におけるゲート電極２３の両側にはソース２４及びドレイン２５が形成されている。

【００２７】

尚、ＭＯＳキャパシタのゲート電極１３及びＭＯＳＦＥＴのゲート電極２３にはそれぞれ不純物としてのリンが注入されている。また、ＭＯＳキャパシタの$HfAlO_x$ 膜１２及びＭＯＳＦＥＴの$HfAlO_x$ 膜２２はそれぞれ高誘電率膜（high-k膜）であり、ＭＯＳキャパシタのSiO_2 膜１１及びＭＯＳＦＥＴのSiO_2 膜２１はそれぞれ層間膜（Interlayer（ＩＬ）膜）又は下部絶縁膜と呼ばれる。

【００２８】

図２は、図１（ａ）に示したＭＯＳキャパシタ構造を有する試料にストレスゲート電圧（定電圧ストレス）を印加したときの絶縁破壊寿命のストレス電圧（絶対値）依存性を示している。具体的には、図２において、黒丸は、図１（ａ）に示したＭＯＳキャパシタ構造がＰ型基板上に形成されてなる試料に負のストレスゲート電圧（$-V_G$ ）を印加したときの絶縁破壊寿命のストレス電圧（絶対値）依存性を示しており、白丸は、図１（ａ）に示したＭＯＳキャパシタ構造がＮ型基板上に形成されてなる試料に正のストレスゲート電圧（$+V_G$ ）を印加したときの絶縁破壊寿命のストレス電圧（絶対値）依存性を示している。また、各試料におけるキャパシタ構造の面積は０．０１mm^2 であり、$HfAlO_x$ 膜１２の厚さは３．０ｎｍであり、SiO_2 膜１１の厚さは１．３ｎｍである。

【００２９】

図２からわかるように、測定条件範囲内では、ストレスゲート電圧がいずれの極性であっても絶縁破壊寿命はlog-linearスケールで直線的に変化している。

【００３０】

図３は、図１（ｂ）に示したＭＯＳＦＥＴ構造を有するp-chＭＯＳＦＥＴ試料及びn-chＭＯＳＦＥＴ試料を用いて、それぞれ負及び正のゲート電圧領域におけるゲート電流（I_G 、白丸）をソース／ドレイン電流（I_{SD}、実線）とウェル電流（I_{Well}、破線）とに分離して評価した結果を示している。ここで、ウェルは、図１（ｂ）に示したＭＯＳＦＥＴ構造における基板側の電位を取るための端子を指すものとする。ところで、ソース／ドレイン電流及びウェル電流のそれぞれのキャリアの種類はストレス極性によって異なり、上記試料においてはゲート正バイアス領域ではソース／ドレイン電流のキャリアが電子であ

り、ウェル電流のキャリアがホールである一方、ゲート負バイアス領域ではソース／ドレイン電流のキャリアがホールであり、ウェル電流のキャリアが電子である。従って、図３に示すように、上記試料のゲート電流については、ゲート正バイアス領域では支配的キャリアは電子であり、少数側キャリアはホールである一方、ゲート負バイアス領域では支配的キャリアはホールであり、少数側キャリアは電子である。

【００３１】

このようにして求めた電子電流量及びホール電流量のそれぞれを絶縁破壊発生までの時間によって積分することにより、絶縁破壊発生までの電子注入総量（Q_{el}）及びホール注入総量（Q_{hole}）を求め、当該Q_{el}及びQ_{hole}をストレス電圧に対してプロットした結果を図４（ａ）及び（ｂ）に示す。尚、図４（ａ）は負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合の結果を示しており、図４（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合の結果を示している。また、図４（ａ）及び（ｂ）に示す結果は、厚さ１．３ｎｍの下層SiO_2膜と厚さ５．７ｎｍの上層$HfAlO_x$膜との積層ゲート絶縁膜を有する試料を用いて得られたものである。さらに、図４（ａ）において、黒丸はQ_{el}を表し（右側縦軸）、白丸はQ_{hole}を表す（左側縦軸）と共に、図４（ｂ）において、黒丸はQ_{el}を表し（左側縦軸）、白丸はQ_{hole}を表す（右側縦軸）。

【００３２】

図４（ａ）に示すように、負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合には、Q_{hole}はストレス電圧の絶対値の増大に伴って直線的に減少している。それに対して、Q_{el}はストレス電圧の絶対値の増大に伴って当初減少しているが、ストレス電圧の絶対値が約４．５Ｖ以上の領域においてはストレス電圧に依存せずほぼ一定値になっている。他方、図４（ｂ）に示すように、正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合には、Q_{el}ははストレス電圧の増大に伴って直線的に減少している。それに対して、Q_{hole}はストレス電圧に依存せずほぼ一定値になっている。

【００３３】

以上のように、負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合にはQ_{el}が一定になり、正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合にはQ_{hole}が一定になる。すなわち、少数側キャリアの注入総量が、印加するストレス電圧の大きさに依存せず一定になることがわかる。

【００３４】

上記の法則を利用することにより、寿命推定を行うことが可能になることが期待される。ところが、図４（ａ）に示したように、ストレス電圧領域によっては、測定により得られた少数側キャリアの注入総量が必ずしも一定にならず、ストレス電圧に依存して変化する現象も見られる。当該現象は、上記の法則を寿命推定に用いる際の支障となる恐れがある。そこで、次に、少数側キャリアの注入総量がストレス電圧に依存して変化する原因について本願発明者が調べた結果について述べる。

【００３５】

図５（ａ）及び（ｂ）は、図３と同様のキャリアセパレーション法を用いて測定した、電子電流量（I_{el}）及びホール電流量（I_{hole}）のストレス電圧依存性をストレス電圧に対してプロットした結果を示しており、図５（ａ）は負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合の結果を示しており、図５（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合の結果を示している。尚、図５（ａ）及び（ｂ）に示す結果は、厚さ１．３ｎｍの下層SiO_2膜と厚さ５．７ｎｍの上層$HfAlO_x$膜との積層ゲート絶縁膜を有する試料を用いて得られたものである。また、図５（ａ）及び（ｂ）のそれぞれの右縦軸には、少数側キャリア電流量の支配的キャリア電流量に対する比として定義されたR_sをプロットしている。また、図５（ｂ）では簡単のため、I_{hole}を１００００倍した値をプロットしている。図５（ａ）及び（ｂ）においては、ストレス極性によって少数側キャリアと支配的キャリアとが変化するため、R_sの分母及び分子が入れ替わっている。

【００３６】

R_sのストレス電圧依存性に着目すると、図５（ａ）及び（ｂ）に示すように、ストレ

ス極性が正であっても負であっても高電圧領域においてはRsは直線的に変化している。図５（ａ）及び（ｂ）においては高電圧領域のRsにフィットさせた直線を点線で示しているが、低電圧領域においては当該直線よりもRs値が大きくなり、当該直線からずれている。具体的には、当該直線上にRs値が乗っているのは、負バイアスでは約４．７Ｖ（絶対値）以上のストレスゲート電圧を印加した場合であり、正バイアスでは約４．３Ｖ以上のストレスゲート電圧を印加した場合である。これらの値は、図４（ａ）及び（ｂ）に示した少数側キャリアの注入総量が一定になるストレス電圧領域とほぼ一致している。また、図４（ａ）に示したように、負バイアスでは約４．３Ｖ（絶対値）以下のストレス電圧領域では少数側キャリアの注入総量が増大しているが、これは、上記Rs値が点線（高電圧領域のRsにフィットさせた直線）よりも大きくなる挙動と一致している。

【００３７】

以上の結果より、絶縁破壊に寄与する少数側キャリア電流量が実際には低電圧領域においても直線的に変化していると仮定すれば、少数側キャリアの注入総量が全ストレス電圧領域において一定になることが期待される。以下、当該仮定の妥当性について、実験結果を参照しながら説明する。

【００３８】

図６（ａ）及び（ｂ）は、図５（ａ）及び（ｂ）に示した評価に用いた試料と同様の試料に対して種々のストレスゲート電圧を繰り返し印加したときの、あるゲート電圧におけるＳＩＬＣ電流量の変化をプロットした結果を示しており、図６（ａ）は負バイアスのストレスゲート電圧（$-V_G$＝－４～－５．２５Ｖ）を印加した場合の結果を示しており、図６（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧（$+V_G$＝＋３．５～＋４．５Ｖ）を印加した場合の結果を示している。尚、本願において、ＳＩＬＣ電流量は、あるゲート電圧におけるゲート電流量として規定されるものであり、その伝導機構等については特に限定されない。

【００３９】

ＳＩＬＣ電流量は、絶縁膜中に生成された欠陥（トラップ）の総量を反映していると考えられており、また、絶縁破壊は、これらの欠陥がある一定量生成されたときに発生すると考えられる。このため、ＳＩＬＣ電流量の挙動をホールの注入量又は電子の注入量を用いて表現できるならば、当該キャリアによって絶縁破壊の発生も制御されていることが予想される。尚、図６（ａ）及び（ｂ）において、ＳＩＬＣ電流量を読み取るゲート電圧はそれぞれ例えば－２Ｖ及び＋１．５Ｖである。また、図６（ａ）及び（ｂ）において、黒丸（又は黒四角）は注入電子量（下側横軸）に対してプロットしたＳＩＬＣ電流量を表し、白丸は注入ホール量（上側横軸）に対してプロットしたＳＩＬＣ電流量を表している。

【００４０】

まず、図６（ａ）に示すように、負バイアスのストレスゲート電圧（$-V_G$＝－４～－５．２５Ｖ）を印加した場合、支配的キャリアである注入ホール量に対してＳＩＬＣ電流量をプロットした結果は、ストレス電圧に依存して広がった分布を有している。それに対して、少数側キャリアである注入電子量に対してＳＩＬＣ電流量をプロットした結果は、ほぼ１つのカーブに乗っており、ＳＩＬＣ電流量が注入電子量によって決まっていることがわかる。尚、黒丸及び黒四角で示したＳＩＬＣ電流量の分布のうち右方向にずれている１本のデータは－４Ｖのストレス電圧を印加した場合のデータであって、図５（ａ）に示したRsのゲート電圧依存性において点線（高電圧領域のRsにフィットさせた直線）から外れている（大きくなっている）ストレス電圧領域のデータに相当している。これは、少数側キャリア電流量を過大に見積もっていること（後述する「通常の注入電流」を少数側キャリア電流量に含めていること）を意味しており、これを補正すれば注入電子量が小さくなって他のストレス条件のＳＩＬＣ電流量分布とほぼ一致することになる。

【００４１】

次に、図６（ｂ）に示すように、正バイアスのストレスゲート電圧（$+V_G$＝＋３．５～＋４．５Ｖ）を印加した場合、支配的キャリアである注入電子量に対してＳＩＬＣ電流量をプロットした結果は、ストレス電圧に依存して広がった分布を有している。それに対

して、少数側キャリアである注入ホール量に対してＳＩＬＣ電流量をプロットした結果は、ほぼ１つのカーブに乗っている。尚、図６（ｂ）においては、前述のR_sの直線（図５（ａ）に示す点線）からのずれを補正するために当該ずれの生じているストレス電圧領域においては当該直線から得られた値をR_sとして注入ホール量を計算し、その結果を補正注入ホール量として表示している。このような補正を行うことにより、図６（ｂ）に示したように、ＳＩＬＣ電流量のプロット結果は非常にまとまった分布を示すようになる。

【００４２】

以上の結果より、低電圧領域におけるR_sとしては高電圧領域におけるR_sを外挿することにより得られる値を使用すべきであることがわかり、また、絶縁破壊までの少数側キャリアの注入総量が一定になっていると考えて良いことがわかる。

【００４３】

尚、上述の少数側キャリア電流量の補正が必要である理由については以下のように考えられる。少数側キャリア電流には、通常の注入電流の他に、以下の機構によって生成され絶縁膜に注入される成分が存在する。すなわち、支配的キャリアが絶縁膜の一方の界面から絶縁膜中に注入され、反対側の界面に到達したときに、ある割合で支配的キャリアとは異なる種類のキャリア（つまり少数側キャリアと同種のキャリア）が生成される。このように生成されたキャリアのうち絶縁膜に注入されるものを真性少数側キャリアと定義し、その電流量を真性少数側キャリアの電流量と定義すると、少数側キャリアの電流量は、前記の機構によって生成・注入された真性少数側キャリアの量と、当該機構とは無関係に注入されたキャリアの量（通常の注入電流）との和になっている。

【００４４】

また、真性少数側キャリア注入総量をある時間までの真性少数側キャリア電流量の総和として定義すると、測定によって得られた少数側キャリア注入総量が真性少数側キャリア注入総量とほぼ等しい場合には前記測定によって得られた少数側キャリア注入総量をそのまま少数側キャリア注入総量として使用して寿命推定を行ってもよいことになる。一方、測定によって得られた少数側キャリア注入総量が真性少数側キャリア注入総量と異なっている場合には、測定によって得られた少数側キャリア注入総量ではなく真性少数側キャリア注入総量を少数側キャリア注入総量として使用して寿命推定を行うことが好ましい。

【００４５】

同様に、測定によって得られた少数側キャリア電流量が真性少数側キャリア電流量とほぼ等しい場合には前記測定によって得られた少数側キャリア電流量をそのまま少数側キャリア電流量として使用して寿命推定を行ってもよい。一方、測定によって得られた少数側キャリア電流量が真性少数側キャリア電流量と異なっている場合には、測定によって得られた少数側キャリア電流量ではなく真性少数側キャリア電流量を少数側キャリア電流量として使用して寿命推定を行うことが好ましい。

【００４６】

以下、上述の知見に基づく第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法（半導体装置の評価方法）について、図７を参照しながら説明する。

【００４７】

図７は、第１の実施形態に係る半導体装置の評価方法（絶縁膜の寿命推定方法）のフローを示している。

【００４８】

まず、ステップＳ１１において、評価対象の絶縁膜（例えばシリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有するゲート絶縁膜）の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を印加した絶縁膜試料を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める。ここで、例えばキャリアセパレーション法を用いてもよい。

【００４９】

次に、ステップＳ１２において、定電圧ストレス又は定電流ストレス等の任意の条件下で絶縁膜試料に対してストレス印加を行って絶縁破壊させることにより、絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア注入総量Ｑを求める。注入総量Ｑの測定においては、

例えば複数の試料を用いて多数のＱ値を求め、それらの値を統計処理することによって得られた値を、後述する寿命T_{BD}の推定に用いることによって寿命T_{BD}の推定精度をより高めることができる。具体的には、複数の試料から得られた多数のＱ値に対して例えばワイブルプロットを行って５０％又は約６３．２％の不良率（絶縁破壊発生率）となるときのＱ値を寿命T_{BD}の推定に用いてもよい。また、注入総量Ｑの測定においては、評価対象の絶縁膜とは膜厚や製法等が異なる絶縁膜試料を用いてもよいし、膜厚や製法等は同じであるが異なるロットの絶縁膜試料を用いてもよい。

【００５０】

次に、ステップＳ１３において、寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を印加した絶縁膜試料を流れる前記少数側キャリアの電流量Ｉを求める。このとき、例えば図３又は図５に示したようなキャリアセパレーション法を用いてもよい。また、少数側キャリアの電流量Ｉとしては、測定によって得られる少数側キャリア電流量に代えて、前述の真性少数側キャリア電流量を用いてもよい。

【００５１】

次に、ステップＳ１４において、前述の式（１）に基づいて、寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧を評価対象の絶縁膜に印加した場合における寿命T_{BD}を算出する。ここで、式（１）に代えて、簡単のため、下記式（３）又はその他の式を用いて、少数側キャリアの注入総量Ｑ及び少数側キャリアの電流量Ｉから寿命T_{BD}を算出してもよい。

【００５２】

【数３】

$$T_{BD} = Q / I \qquad (3)$$

【００５３】

以上に説明したように、本実施形態によると、少数側キャリアの注入総量Ｑが印加電圧によらず一定であることを利用して、あるストレス電圧を印加した絶縁膜の寿命を簡便且つ正確に求めることができる。

【００５４】

尚、本実施形態のステップＳ１３において、以下のような工程をさらに実施してもよい。すなわち、ある参照電圧を印加した絶縁膜試料に流れるＳＩＬＣ電流量の、第１のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化（第１の経時変化）を測定する。続いて、ある参照電圧を印加した絶縁膜試料に流れるＳＩＬＣ電流量の、第２のストレス電圧を用いた電気的ストレス印加に伴う経時変化（第２の経時変化）を測定する。次に、前記第１の経時変化と前記第２の経時変化とに基づいて、前記第１のストレス電圧による絶縁膜試料の劣化量と前記第２のストレス電圧による絶縁膜試料の劣化量との比を求める。その後、当該比に基づいて、前記第１のストレス電圧を印加した絶縁膜試料に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量と、前記第２のストレス電圧を印加した絶縁膜試料に流れる電流のうちの前記少数側キャリアの電流量との比を求める。

【００５５】

（第２の実施形態）

以下、本発明の第２の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法について、図面を参照しながら説明する。尚、本実施形態は、ゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定するための方法についてのものである。

【００５６】

図６（ａ）及び（ｂ）に示したように、ゲート絶縁膜に対してストレス印加を繰り返し行ったときのＳＩＬＣ電流量の経時変化を真性少数側キャリア注入総量に対してプロットした場合、ストレス電圧依存性に関して単一の相関関係が得られる。

【００５７】

従って、２つの互いに異なるストレス条件のそれぞれについてＳＩＬＣ電流量の経時変

化を例えばストレス時間に対してプロットした場合におけるストレス条件間のプロット結果の違い（比）（つまりストレス時間方向の違い（比））は、ストレス条件に依存した絶縁破壊寿命の違い（比）を反映していることになる。

【００５８】

例えば横軸にストレス時間を対数スケールで表すと共に縦軸にＳＩＬＣ電流量を対数スケールで表したときに、一方のストレス条件下でのＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動の横軸（ストレス時間）をＸ倍変化させることによって、当該変化させた経時変化挙動が他方のストレス条件下でのＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動とほぼ一致させることができた場合、一方のストレス条件下での絶縁破壊寿命は他方のストレス条件下での絶縁破壊寿命に対して１／Ｘ倍の大きさを有していることが推定される。

【００５９】

図８は、上述のストレス条件に依存した絶縁破壊寿命の違い（比）の一例を示しており、具体的には絶縁膜試料に対して例えば＋３．５Ｖの定電圧ストレス印加及び＋４．２５Ｖの定電圧ストレス印加をそれぞれ繰り返し実施したときの、ゲート電圧＋１．５Ｖにおけるストレス電流量の経時変化をプロットした結果を示している。図８において、＋３．５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときのＳＩＬＣ電流量の経時変化を黒丸で示すと共に、＋４．２５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときのＳＩＬＣ電流量の経時変化を黒四角で示す。尚、ＳＩＬＣ電流量がある値に達するまでの時間は、ストレス電圧が小さい方がより長時間になる。

【００６０】

また、図８において、＋３．５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときのＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を、ストレス時間を１／２００にしてプロットした結果を白丸で示している。図８に示すように、このプロット結果は、＋４．２５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときのＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動とほぼ一致している。すなわち、＋３．５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときの（真性）少数側キャリア電流量は、＋４．２５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときの（真性）少数側キャリア電流量の１／２００程度であることが推定される。従って、絶縁破壊までの（真性）少数側キャリア注入総量が一定であるという上述の知見より、＋３．５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときの絶縁破壊寿命は、＋４．２５Ｖの定電圧ストレス印加を行ったときの絶縁破壊寿命の１／２００の逆数倍、つまり２００倍であることが推定される。この推定結果は、図２に示した結果（白丸）から推定される値ともほぼ一致しており、本発明に係る寿命推定方法の妥当性が支持される。

【００６１】

図９は、第２の実施形態に係る絶縁膜（例えばシリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有するゲート絶縁膜）の寿命推定方法のフローを示している。

【００６２】

まず、ステップＳ２１において、任意のストレス電圧V_0を印加した絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0を求める。ストレス電圧V_0は例えば＋４．２５Ｖである。

【００６３】

次に、ステップＳ２２において、前記のストレス電圧V_0を用いたストレス印加、及び電流－電圧特性評価を絶縁膜試料に対して繰り返し実施し、それによって絶縁膜試料を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する。ＳＩＬＣ電流量を測定するためのゲート電圧は例えば＋１．５Ｖである。

【００６４】

次に、ステップＳ２３において、評価対象の絶縁膜の寿命T_{BD}を求めたいストレス電圧Ｖを用いたストレス印加、及び電流－電圧特性評価を絶縁膜試料に対して繰り返し実施し、それによって絶縁膜試料を流れるＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価する。

【００６５】

次に、ステップＳ２４において、ストレス電圧Ｖを用いて得られたＳＩＬＣ電流量の経

時変化挙動のストレス時間を定数倍（例えばＸ倍）変化させることにより、当該変化させた経時変化挙動が、ストレス電圧V_0を用いて得られたＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動とほぼ一致するときの倍率Ｘを求める。

【００６６】

最後に、ステップＳ２５において、下記式（４）を用いて、ストレス電圧Ｖを評価対象の絶縁膜に印加した場合における寿命T_{BD}を算出する。

【００６７】

【数４】

$$T_{BD} = T_0 / X \qquad (4)$$

【００６８】

以上に説明したように、本実施形態によると、ＳＩＬＣ電流量又はゲート電流量のストレス経時変化挙動を評価することによって絶縁破壊寿命を推定することが可能である。このため、測定に膨大な時間を要する低ストレス電圧領域の測定において絶縁破壊に至るまでの測定を必ずしも実施する必要がないので、測定に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。また、第１の実施形態においては寿命推定に必要であった（真性）少数側キャリア電流量又は（真性）少数側キャリア注入総量を必ずしも測定する必要がないので、簡便且つ正確に寿命推定を行うことが可能となる。

【００６９】

尚、本実施形態において、ＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を評価するために、電流－電圧特性評価を行っているが、電圧をある一定の範囲内で必ずしも掃引する必要はない。すなわち、予め決定しておいた電流量読み取り電圧V_Rにおける電流量を測定するだけでもよい。

【００７０】

また、本実施形態において、ＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を異なるストレス条件のそれぞれについて評価している。しかし、予め決定しておいた電流量読み取り電圧V_Rにおける電流量が、予め決めておいた値になるか又は予め決めておいた値だけ変動するまでの時間を異なるストレス条件のそれぞれについて求め、当該結果のストレス条件間の比を倍率Ｘとして用いてもよい。

【００７１】

また、本実施形態において、ＳＩＬＣ電流量の経時変化挙動を異なるストレス条件のそれぞれについて評価している。しかし、予め決定しておいた電圧値読み取り電流量I_Rにおける電圧値が、予め決めておいた値になるか又は予め決めておいた値だけ変動するまでの時間を異なるストレス条件のそれぞれについて求め、当該結果のストレス条件間の比を倍率Ｘとして用いてもよい。

【００７２】

（第３の実施形態）

以下、本発明の第３の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法について、図面を参照しながら説明する。尚、本実施形態は、ゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定するための方法についてのものである。

【００７３】

図１０は、種々の材料よりなるゲート絶縁膜に定電圧ストレスを印加したときのゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命（T_{BD}）における電圧加速係数γのストレス電圧依存性をプロットした様子を示している。尚、電圧加速係数γは、下記式（５）のように表される。

【００７４】

【数５】

$$\gamma = d\log T_{BD} / dV_G \qquad (5)$$

【００７５】
式（５）において、T_{BD}は絶縁破壊寿命であり、V_G はストレス電圧である。
【００７６】
図１０に示すように、ゲート絶縁膜材料の種類とは無関係に、電圧加速係数とストレス電圧（絶対値）との間には共通した相関関係が見られる。尚、図１０に示した実線は、前記相関関係を示すフィッティング結果の一例である。また、式（５）によれば、図１０に示した電圧加速係数γのストレス電圧依存性をストレス電圧に対して積分することによって、絶縁破壊寿命T_{BD}のストレス電圧依存性を半定量的に求めることが可能であることが分かる。このようにして求めた絶縁破壊寿命T_{BD}（任意単位）のストレス電圧依存性を図１１に示す。
【００７７】
以上のように、絶縁破壊寿命（T_{BD}）の電圧加速係数γのストレス電圧依存性に基づいて、絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を求めることが可能であり、これを実測したT_{BD}値にフィッティングすることによって、当該フィッティング結果に基づいて、実測していないストレス電圧領域（例えば所望のストレス電圧）におけるT_{BD}値を精度良く求めることが可能となる。
【００７８】
図１２は、第３の実施形態に係る絶縁膜（例えばシリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有するゲート絶縁膜）の寿命推定方法のフローを示している。
【００７９】
まず、ステップＳ３１において、任意のストレス電圧V_0 を印加した絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命T_0 を求める。
【００８０】
次に、ステップＳ３２において、前述の知見に基づき、予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性を、ストレス電圧V_0 における絶縁破壊寿命T_0 に対してフィッティングする。また、絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性として、評価対象の絶縁膜とは膜厚や製法等が異なる絶縁膜試料又は膜厚や製法等は同じであるが異なるロットの絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性を予め求めておいてもよい。
【００８１】
最後に、ステップＳ３３において、ステップＳ３２でのフィッティング結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命Ｔを求める。
【００８２】
以上に説明したように、本実施形態によると、一点又は数点の絶縁破壊寿命（T_{BD}）を実測により求めるだけで、例えば絶縁破壊寿命（T_{BD}）の電圧加速係数γのストレス電圧依存性から求められた絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性に基づいて、所望のストレス電圧における絶縁破壊寿命（T_{BD}）を求めることが可能となる。従って、絶縁破壊寿命推定に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。
【００８３】
尚、本実施形態において、電圧加速係数γのストレス電圧依存性を利用して絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を求めたが、これに代えて、他の方法によって、絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を求めてもよい。
【００８４】
（第４の実施形態）
以下、本発明の第４の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法について、図面を参照しな

がら説明する。尚、本実施形態は、ゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命を推定するための方法についてのものである。

【００８５】

第１の実施形態において述べたように、ゲート絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリアの注入総量は、ストレス電圧の大きさに関係なく一定である。また、第３の実施形態において述べたように、絶縁破壊寿命（T_{BD}）の電圧加速係数γに基づいて絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を求めることが可能である。これらの知見を組み合わせることにより、以下に説明するように、絶縁破壊寿命を実測することなく推定することが可能になる。

【００８６】

図１３は、第４の実施形態に係る絶縁膜（例えばシリコン酸化膜よりも高誘電率の部分を有するゲート絶縁膜）の寿命推定方法のフローを示している。

【００８７】

まず、ステップＳ４１において、任意のストレス電圧V_0を印加した絶縁膜試料を流れる電流のうちの少数側キャリアの種類を求める。ここで、例えば図３又は図５に示したように、キャリアセパレーション法を用いてもよい。

【００８８】

次に、ステップＳ４２において、絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリア（ステップＳ４１で求めた少数側キャリア）の注入総量Ｑを求める。また、注入総量Ｑの測定においては、評価対象の絶縁膜とは膜厚や製法等が異なる絶縁膜試料を用いてもよいし、膜厚や製法等は同じであるが異なるロットの絶縁膜試料を用いてもよい。

【００８９】

次に、ステップＳ４３において、前記ストレス電圧V_0を印加した絶縁膜試料を流れる前記少数側キャリアの電流量I_0を求める。このとき、例えば図３又は図５に示したようなキャリアセパレーション法を用いてもよい。

【００９０】

次に、ステップＳ４４において、求めた注入総量Ｑ及び電流量I_0を例えば式（１）（第１の実施形態参照）に代入することによって、前記ストレス電圧V_0を絶縁膜試料に印加した場合における推定絶縁破壊寿命T_0を求める。

【００９１】

次に、ステップＳ４５において、例えば第３の実施形態と同様に予め求めておいた絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性を、ストレス電圧V_0における絶縁破壊寿命T_0に対してフィッティングする。また、絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性として、評価対象の絶縁膜とは膜厚や製法等が異なる絶縁膜試料又は膜厚や製法等は同じであるが異なるロットの絶縁膜試料の絶縁破壊寿命のストレス電圧依存性を予め求めておいてもよい。

【００９２】

最後に、ステップＳ４６において、ステップＳ４５でのフィッティング結果に基づいて、所望のストレス電圧Ｖを印加した絶縁膜試料が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命Ｔを求める。

【００９３】

以上に説明したように、本実施形態によると、一点の絶縁破壊寿命（T_{BD}）をも実測することなく、例えば絶縁破壊寿命（T_{BD}）の電圧加速係数γのストレス電圧依存性から求められた絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性に基づいて、所望のストレス電圧における絶縁破壊寿命（T_{BD}）を求めることが可能となる。従って、絶縁破壊寿命推定に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。

【００９４】

尚、本実施形態において、測定によって得られた少数側キャリアの電流量が真性少数側キャリアの電流量とほぼ等しい場合には前記測定によって得られた少数側キャリアの電流量を少数側キャリアの電流量として使用しても良いが、そうでない場合には測定によって

得られた少数側キャリアの電流量ではなく真性少数側キャリアの電流量を少数側キャリアの電流量として使用する方が好ましい。

【００９５】

また、第１の実施形態において述べたように、ゲート絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの少数側キャリアの注入総量は、ストレス電圧の大きさに関係なく一定である。また、第３の実施形態において述べたように、絶縁破壊寿命（T_{BD}）の電圧加速係数γに基づいて絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を求めることが可能である。これらの知見を組み合わせることにより、真性少数側キャリア電流以外の電流モードが支配的であるために真性少数側キャリアの電流量の実測が困難な試料においても、真性少数側キャリアの電流量を推定することが可能となる。

【００９６】

すなわち、真性少数側キャリアの電流量を絶縁破壊の発生に至るまでの時間によって積分した値（注入総量）がストレス電圧に依存せずに一定であることから、絶縁破壊寿命(（T_{BD}）の逆数が真性少数側キャリアの電流量に比例していることが推定される。従って、図１１に示したような絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性の逆数を求めることによって、真性少数側キャリアの電流量のストレス電圧依存性が求まる。このようにして求めた真性少数側キャリアの電流量は半定量的数値であることに注意する必要がある。また、真性少数側キャリア注入総量は、あるストレス時間までの真性少数側キャリアの電流量の積分値として求めることが可能である。

【産業上の利用可能性】

【００９７】

以上に説明したように、本発明の絶縁膜の寿命推定方法によると、あるストレス電圧を印加したゲート絶縁膜の寿命を、寿命測定を実際に行うことができるストレス電圧を印加したゲート絶縁膜が絶縁破壊に至るまでの絶縁破壊寿命に基づいて推定する指針が提供されるので、本発明はゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命を評価する方法等として非常に有用である。

【図面の簡単な説明】

【００９８】

【図１】図１（ａ）及び（ｂ）は、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法の対象としたキャパシタ及びトランジスタのそれぞれの断面構造を示す図である。

【図２】図２は、図１（ａ）に示したＭＯＳキャパシタ構造を有する試料にストレスゲート電圧（定電圧ストレス）を印加したときの絶縁破壊寿命のストレス電圧（絶対値）依存性を示す図である。

【図３】図３は、図１（ｂ）に示したＭＯＳＦＥＴ構造を有するp-chＭＯＳＦＥＴ試料及びn-chＭＯＳＦＥＴ試料を用いて、それぞれ負及び正のゲート電圧領域におけるゲート電流をソース／ドレイン電流とウェル電流とに分離して評価した結果を示す図である。

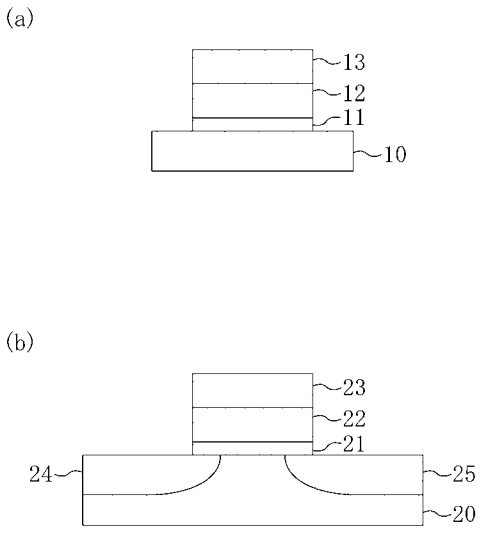
【図４】図４（ａ）及び（ｂ）は、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法において求めた電子電流量及びホール電流量のそれぞれを絶縁破壊発生までの時間によって積分することにより、絶縁破壊発生までの電子注入総量（Q_{el}）及びホール注入総量（Q_{hole}）を求め、当該Q_{el}及びQ_{hole}をストレス電圧に対してプロットした結果を示す図であり、図４（ａ）は負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示しており、図４（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示している。

【図５】図５（ａ）及び（ｂ）は、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法においてキャリアセパレーション法を用いて測定した、電子電流量（I_{el}）及びホール電流量（I_{hole}）のストレス電圧依存性をストレス電圧に対してプロットした結果を示す図であり、図５（ａ）は負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示しており、図５（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示している。

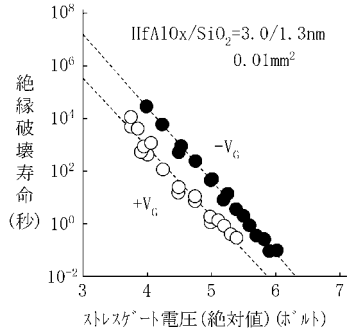
【図６】図６（ａ）及び（ｂ）は、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法において絶縁膜試料に対して種々のストレスゲート電圧を繰り返し印加したときの、あるゲート電圧におけるＳＩＬＣ電流量の変化をプロットした結果を示す図であり、図６（ａ

）は負バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示しており、図６（ｂ）は正バイアスのストレスゲート電圧を印加した場合を示している。
【図７】図７は、本発明の第１の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法のフローを示している。
【図８】図８は、本願発明者が調べた、＋３．５Ｖ及び＋４．２５Ｖの定電圧ストレスゲート電圧印加時のＳＩＬＣ電流量のストレス時間依存性と、＋３．５Ｖの定電圧ストレスゲート電圧印加時のＳＩＬＣ電流量をストレス時間を１／２００にしてプロットした結果とを示す図である。
【図９】図９は、本発明の第２の実施形態に係る絶縁膜の寿命推定方法のフローを示している。
【図１０】図１０は、本願発明者が調べた、種々の材料よりなるゲート絶縁膜に定電圧ストレスを印加したときのゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命（T_{BD}）における電圧加速係数γのストレス電圧依存性をプロットした様子を示す図である。
【図１１】図１１は、種々の材料よりなるゲート絶縁膜に定電圧ストレスを印加したときのゲート絶縁膜の絶縁破壊寿命（T_{BD}）における電圧加速係数γのストレス電圧依存性に基づいて本願発明者が求めた、絶縁破壊寿命（T_{BD}）のストレス電圧依存性を示す図である。
【図１２】図１２は、本発明の第３の実施形態に係る絶縁膜（ゲート絶縁膜）の寿命推定方法のフローを示している。
【図１３】図１３は、本発明の第４の実施形態に係る絶縁膜（ゲート絶縁膜）の寿命推定方法のフローを示している。
【符号の説明】
【００９９】
１０　シリコン基板
１１　SiO_2 膜
１２　$HfAlO_x$ 膜
１３　ゲート電極
２０　シリコン基板
２１　SiO_2 膜
２２　$HfAlO_x$ 膜
２３　ゲート電極
２４　ソース
２５　ドレイン
V_G　ゲート電圧
I_G　ゲート電流
I_{SD}　ソース／ドレイン電流
I_{Well}　ウェル電流
I_{el}　電子電流
I_{hole}　ホール電流
Q_{el}　絶縁破壊発生までの電子注入総量
Q_{hole}　絶縁破壊発生までのホール注入総量
T_{BD}　絶縁破壊寿命
R_s　少数側キャリア電流量の支配的キャリア電流量に対する比

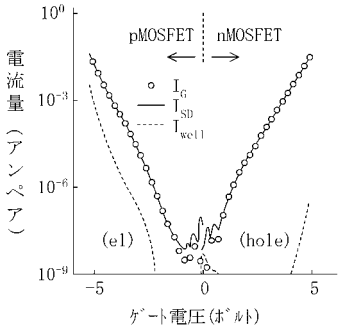
【図１】



【図２】

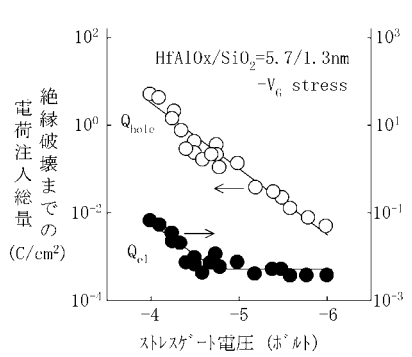


【図３】

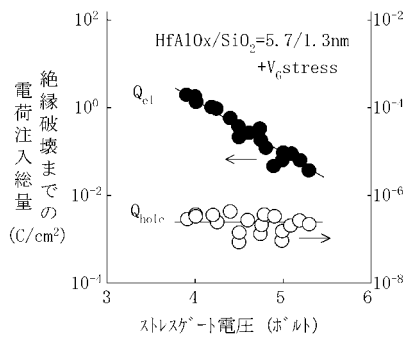


【図４】

(a)

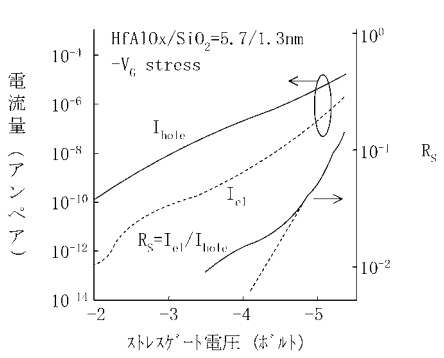


(b)

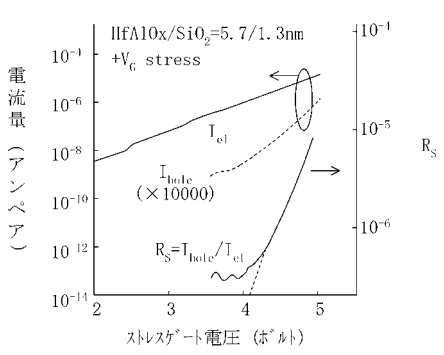


【図５】

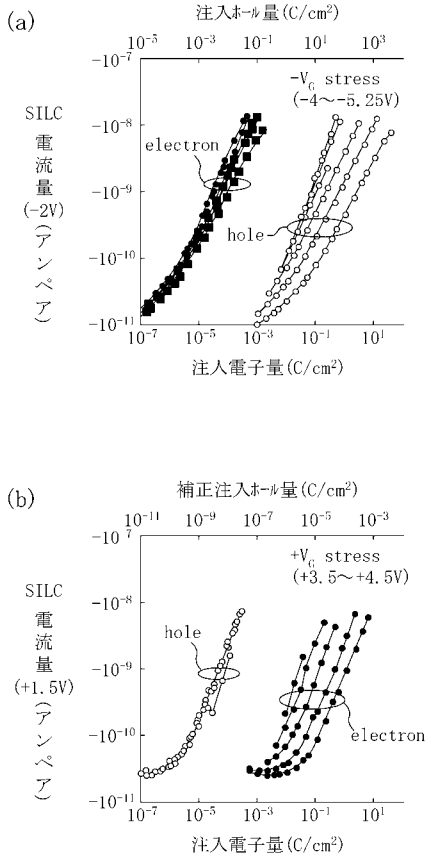
(a)



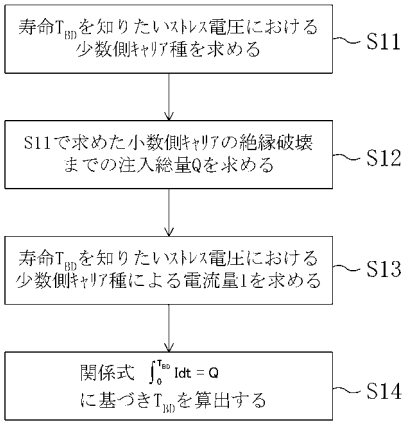
(b)



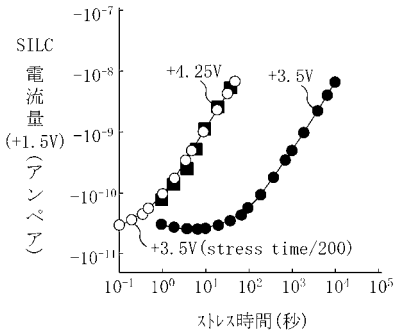
【図６】



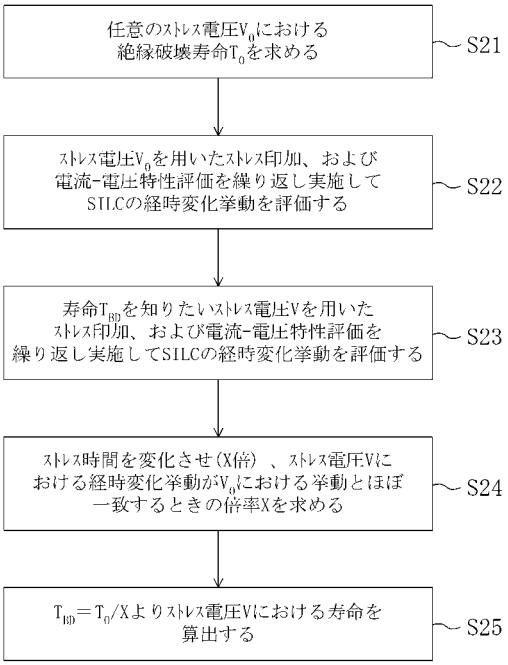
【図７】



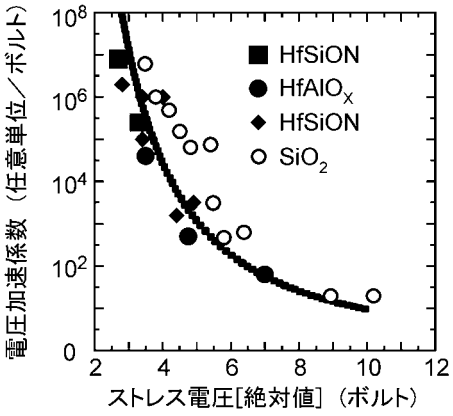
【図８】



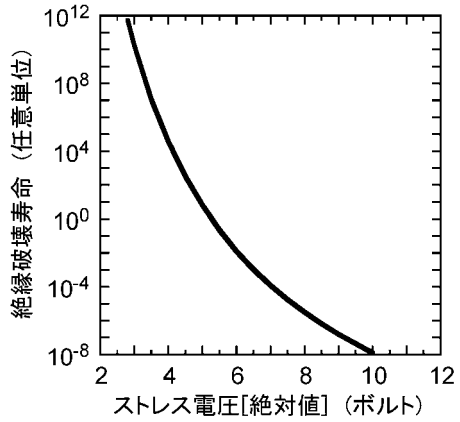
【図９】



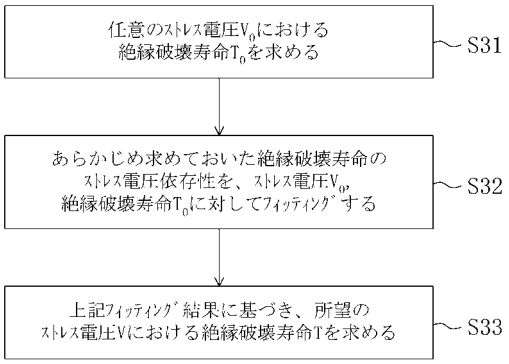
【図１０】



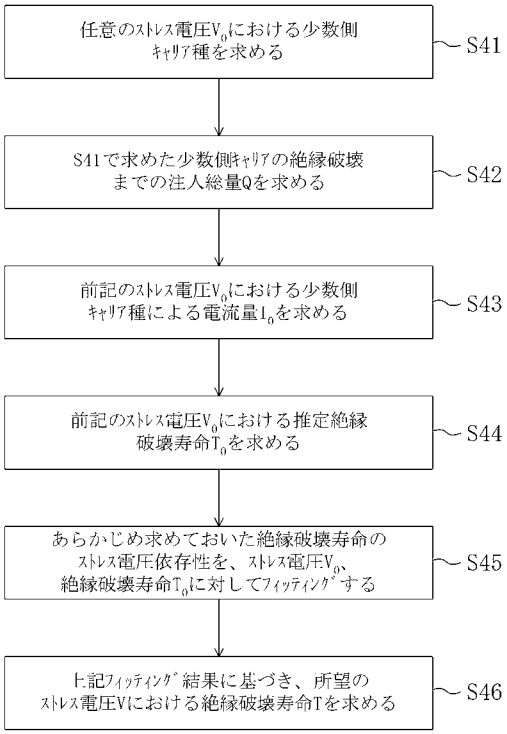
【図１１】


絶縁破壊寿命（任意単位）
10^{12}
10^{8}
10^{4}
10^{0}
10^{-4}
10^{-8}
2
4
6
8
10
12
ストレス電圧[絶対値]（ボルト）

【図１２】


任意のｽﾄﾚｽ電圧V_0における
絶縁破壊寿命T_0を求める
S31
あらかじめ求めておいた絶縁破壊寿命の
ｽﾄﾚｽ電圧依存性を、ｽﾄﾚｽ電圧V_0,
絶縁破壊寿命T_0に対してﾌｨｯﾃｨﾝｸﾞする
S32
上記ﾌｨｯﾃｨﾝｸﾞ結果に基づき、所望の
ｽﾄﾚｽ電圧Vにおける絶縁破壊寿命Tを求める
S33

【図１３】


任意のｽﾄﾚｽ電圧V_0における少数側
ｷｬﾘｱ種を求める
S41
S41で求めた少数側ｷｬﾘｱの絶縁破壊
までの注入総量Qを求める
S42
前記のｽﾄﾚｽ電圧V_0における少数側
ｷｬﾘｱ種による電流量I_0を求める
S43
前記のｽﾄﾚｽ電圧V_0における推定絶縁
破壊寿命T_0を求める
S44
あらかじめ求めておいた絶縁破壊寿命の
ｽﾄﾚｽ電圧依存性を、ｽﾄﾚｽ電圧V_0、
絶縁破壊寿命T_0に対してﾌｨｯﾃｨﾝｸﾞする
S45
上記ﾌｨｯﾃｨﾝｸﾞ結果に基づき、所望の
ｽﾄﾚｽ電圧Vにおける絶縁破壊寿命Tを求める
S46

フロントページの続き

(74)代理人 100117581
弁理士 二宮 克也
(74)代理人 100117710
弁理士 原田 智雄
(74)代理人 100121728
弁理士 井関 勝守
(74)代理人 100124671
弁理士 関 啓
(74)代理人 100131060
弁理士 杉浦 靖也
(72)発明者 岡田 健治
大阪府門真市大字門真１００６番地 松下電器産業株式会社内

Ｆターム(参考) 4M106 AA01 AA12 BA14 CA14 CA27 CA56 DH04 DH16 DJ20