

(解説)

プラズマチャージアップダメージ評価ウェーハの開発

Development of Plasma Charge-up Damage Evaluation Wafers



福本吉人*(工博)
Dr. Yoshito Fukumoto



住江伸吾*(工博)
Dr. Shingo Sumie

An evaluation wafer for plasma-induced charge-up damage in thin film processes was developed. By measuring the pre-injection leak current, which appears on the I-V characteristics of a MOS capacitor, finite damage and the continuous change of the damage could be detected. This technology has been applied in mass-production equipment in LSI/TFT-LCD fabs.

まえがき = 半導体集積回路や TFT(Thin Film Transistor) 液晶などの薄膜デバイス製造には、エッチング・アッシング・イオン注入・プラズマ CVD(Chemical Vapor Deposition) など多くのプラズマプロセスが用いられている。近年、こうしたプラズマプロセスにおいて、チャージアップ現象に起因する不良(ダメージ)が問題となっている。本稿では、当社が独自に開発した、プラズマチャージアップダメージを高精度、かつ短時間に測定できる評価ウェーハとその適用例について報告する。

1. チャージアップ発生のメカニズム

最近の研究により、チャージアップ発生のメカニズムが次第に明らかになってきた¹⁾²⁾。チャージアップ発生の主要な要因の一つは、プラズマの空間的不均一性である。図 1(a) に模式的に示すように、被プロセスウェーハ面内でプラズマ(具体的には、プラズマ電位・電子密度・電子温度など)に不均一があると、プラズマか

らウェーハに流入する電子電流とイオン電流の平衡状態が局所的に崩れる。これにより、上部電極(トランジスタのゲート電極にあたる)に電荷が蓄積されチャージアップが発生する。

チャージアップ発生のもう一つの要因は「電子シェーディング効果」である。図 1(b) に示すように、プロセス途中のウェーハ上には、絶縁膜(例えば、フォトリソ・酸化膜など)を被った高アスペクト比の微細パターンが存在する。このとき、電子とイオンの空間的な運動量の違いにより、微細パターン上部に電子が付着し電子電流が遮へいされる。結果として、電子電流とイオン電流の平衡状態が崩れ、チャージアップが誘起される。電子シェーディング効果によるチャージアップは、プラズマが空間的に均一な場合にも起こりうる現象である。

チャージアップが起こると、トランジスタのゲート酸化膜に高電界がかかりトンネル電流が流れるため、ゲート酸化膜の破壊や劣化が生じる。これは、トランジスタ

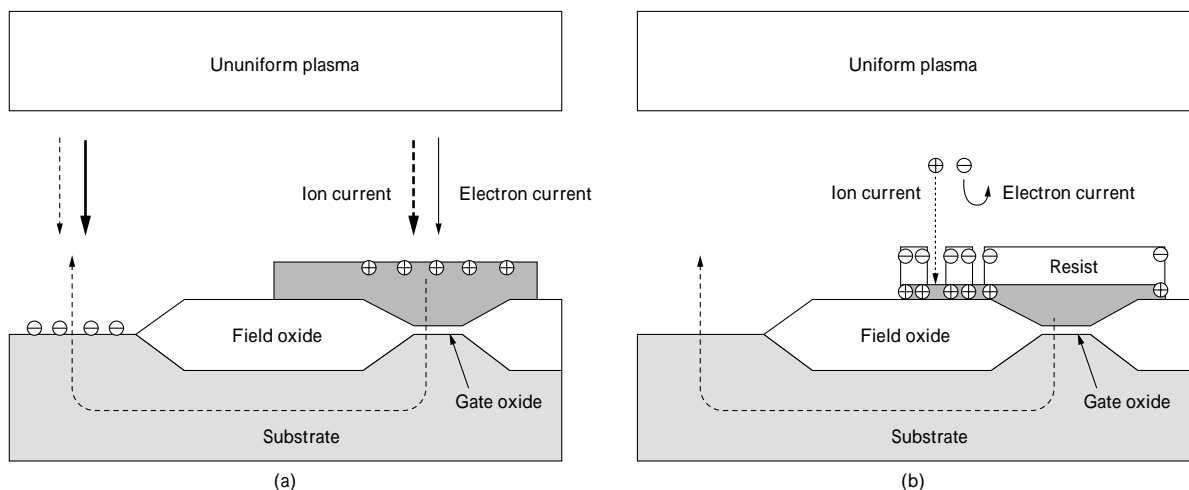


図 1 プラズマチャージアップダメージ
Fig. 1 Plasma charge-up damage

*技術開発本部・電子技術研究所 **㈱コベルコ科研・レオ事業本部

の不良，製造歩留まりの低下に直結する。

最近のプラズマプロセスでは，超微細加工を実現するために，ICP(Inductively Coupled Plasma)や ECR(Electron Cyclotron Resonance)プラズマといった高密度プラズマが多く用いられている。こうしたプロセスでは，プラズマ中の電子密度やイオン密度が大きいため，わずかなプラズマの不均一によってチャージアップが誘起される。また，デバイスの微細化，低電圧駆動を目的としてゲート酸化膜がますます薄くなっているため，小さなチャージアップ電圧でも大きなトンネル電流が流れ，ダメージを受けやすい傾向にある。300mm ウェーハ対応のプラズマプロセス装置では，大口径の均一プラズマが必要であるが，機構的・電気的な制約からそれほど容易でないことが予想される。さらに最近では，多層プリント基板回路の洗浄など，従来ウェット処理されていた後工程プロセスにも，ドライ(プラズマ)プロセスが取り入れられ始めている。

以上のことから，プラズマプロセス中のチャージアップダメージを正確に評価することは，今後ますます重要になってくると考えられる。本稿では，当社独自に開発したチャージアップ専用の評価ウェーハと，プレインジェクションリークを用いた新しい測定手法について報告する。さらに，本ウェーハを用いて実際に量産用プラズマプロセス装置を評価した適用例について述べる。

2. チャージアップダメージの評価手法

チャージアップダメージを評価する方法は，これまで種々検討されてきた。最も直接的には，製品そのもの(実デバイス)もしくはこれに近い構造のトランジスタを製作し，その特性を評価する方法が考えられる。しかしながら，この方法ではデバイス完成まで長時間かかるうえに，数多くのプロセスを経るために原因となるプロセス(あるいは装置)を特定することが困難である。

そこで，より単純な構造のテストデバイス(Test Element Group, TEG)を用い，疑わしい特定のプロセス・装置を評価することが多く行われてきた。代表的な TEG として，MNOS(Metal-Nitride-Oxide-Silicon)構造のキャパシタと，MOS(Metal-Oxide-Silicon)構造のキャパシタが知られている。

MNOS キャパシタ法は，その静電容量・電圧(C-V)特性からフラットバンド電圧を測定し，プラズマプロセス前後でその変化を観測する。フラットバンド電圧はキャパシタに印加された電圧により変化するので，プロセス中のチャージアップ電圧(最大値)を知ることができる。本手法は，特にプラズマオン・オフ時に発生する瞬時的なチャージアップを検出するのに適している。

一方，MOS キャパシタ法は，従来よりゲート酸化膜の信頼性評価として行われてきた方法をチャージアップ評価に活用したものである。キャパシタに印加する電圧を徐々に上げながら電流を測定する電流・電圧(I-V)法と，一定電流(一定電圧の場合もある)を印加して破壊に至るまでの時間を測定する TDDB(Time Dependent Dielectric Breakdown)法が知られている。MOS キャパ

シタの絶縁破壊は，トンネル電流としてゲート酸化膜を通過した総電荷量と関連するため，プロセス中に継続的，定常的に発生するチャージアップを検出するのに有効と考えられる。

3. 当社評価デバイスの構造とダメージ評価方法

チャージアップ評価など不良解析に求められる最も重要なことは，いかに早く，いかに容易に問題のプロセス・装置を特定できるかにある。実施の簡便さに加えて，測定・解析に要する時間もできるだけ短いことが求められる。また，TEGを用いた場合には，実デバイスとの関連も重要なポイントとなる。

以上の観点から，当社では MOS キャパシタの I-V 測定からチャージアップダメージを評価する方法を採用している。MOS キャパシタは構造が単純なため，デバイスの製作・測定・解析が比較的容易であり，I-V 測定は TDDB 測定に比べて圧倒的に測定時間を短くすることができる。さらに，MOS キャパシタの構造自体がトランジスタのゲート部分と本質的に同じ構造であるため，実デバイスのダメージや製品歩留まりと関連づけることが容易であると考えられる。

図 2 に当社のチャージアップ評価デバイスの断面構成を示す。MOS キャパシタ構造は，p 型シリコン基板(下部電極)・ゲート酸化膜・ポリシリコン薄膜(上部電極，アンテナとも呼ばれる)から構成され，ゲート酸化膜のサイズは $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ ，厚さは $40 \sim 160$ として，フィールド酸化膜と上部電極の厚さは，それぞれ 4000 である。上部電極の加工には薬液によるウェットエッチングを採用し，評価デバイス製作時のプラズマダメージを回避している。すなわち，プラズマ照射前(使用前)の状態では，評価デバイスにチャージアップダメージが無いことが保証される。

評価デバイス(ダイ)の平面構成を図 3 に示す。プラズマから飛来する電子電流(またはイオン電流)は，上部電極で捕集されゲート酸化膜に流入するため，この上部電極とゲート酸化膜の面積比(アンテナ比)が評価デバイスの検出感度と密接に関係する。ダイにはアンテナ比が 350 倍から 700000 倍までの 9 個のデバイスが集積されている。

評価デバイスの特性の一例を図 4 に示す。評価デバイスに ICP プラズマを照射し，照射前後で I-V 特性を比較した。プロセス条件は最適値からずらしており，チャージアップが比較的大きく発生する条件で行った。主な条

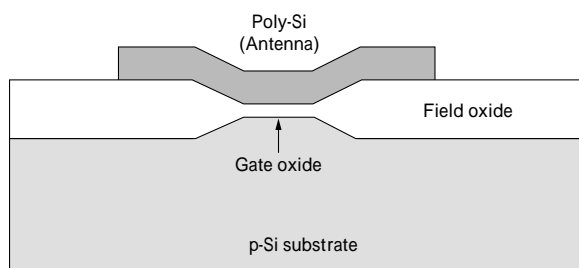


図 2 評価デバイスの断面構造
Fig. 2 Cross-sectional structure of evaluation device

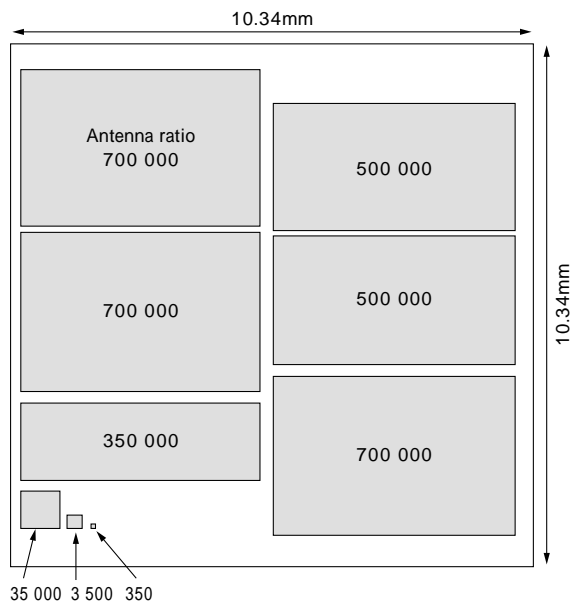


図3 評価デバイスのダイ構成
Fig. 3 Die configuration of evaluation device

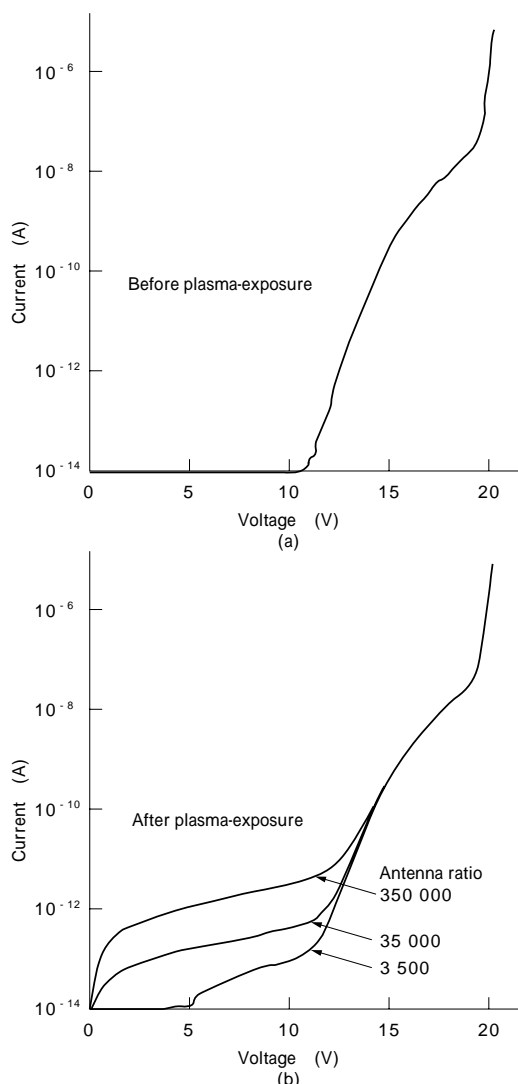


図4 評価デバイスの電流 - 電圧特性
Fig. 4 Current-voltage characteristics of evaluation device

件は、プラズマガス O_2 、ガス圧 30mTorr、高周波電力 500W、基板バイアスなし、処理時間 5分、評価デバイスのゲート酸化膜厚さは 160 として。I-V 測定は、シリコン基板側を接地し、上部電極が負電位になるように電圧

印加した。電圧を 0.1V ステップで増大させ、一定の遅延時間経過後に電流を計測した。遅延時間を設ける理由は、過渡的なキャパシタ流入電流をキャンセルするためである。

図4 (a) はプラズマ処理前の特性であり、ほぼ理想的な MOS キャパシタの I-V 特性を示している。すなわち $V = 10V$ 付近からトンネル電流が立上がり、 $V = 17V$ 前後で不可逆な真性絶縁破壊に至る。トンネル電流は、絶縁膜に高電界が印加されたときに生じる FN (Fowler-Nordheim) 型の特性である。また図には示していないが、プラズマ照射前には、アンテナ比による特性の違いはほとんどない。

一方、プラズマ照射後の図4 (b) では、プラズマ照射前と同様に、FN トンネル電流と、 $V = 17V$ 前後での真性絶縁破壊が見られる。プラズマ照射前と明らかに異なるのは、FN トンネル電流が立上がるよりも低い電圧 ($V = 0 \sim 10V$) で特徴的なブレインジェクションリーク (ソフトリーク、あるいはストレス誘起リークとも呼ばれる) が観測されることである。ブレインジェクションリークは、アンテナ比が大きくなるにつれて単調に増大しており、プラズマ照射中に受けたチャージアップダメージと関連が深いと考えられる。同様のブレインジェクションリークは、他のゲート絶縁膜厚の評価デバイスにおいても観測された。

従来、MOS キャパシタの I-V 測定によるチャージアップダメージは、主に絶縁破壊電圧の変化により評価していた。当社の新しい評価手法は、FN トンネル領域で一定の電流値 (ここでは $1nA = 4 \times 10^{-3} A/cm^2$) に達する電圧値を GOI (Gate Oxide Integrity) 電圧、ブレインジェクション領域で一定の電圧値 (ここでは $GOI/2$) に対する電流値をリーク電流と定義し、この二つの指標からチャージアップダメージをより高感度に評価できることを特長としている。

ブレインジェクションリークの発生メカニズムを調べるために、さらに詳しい分析を実施した。まず、電圧をステップアップした後、リーク電流の時間依存性を測定した。その結果、電圧変化時に大きな電流が流れ、その後減衰して飽和値に達することが観測された。すなわち、ブレインジェクションリークには、定常的な電流成分と、電圧を変化させた直後に流れる過渡成分があり、その双方がプラズマ照射により増大することが示唆される。また、同じデバイスに対する C-V 特性の分析から、プラズマ照射後にゲート酸化膜中の電荷密度増大が観測された。以上のことから、ブレインジェクションリークの増大は、プラズマ照射中にゲート酸化膜内に欠陥レベルが形成され、これを介したホッピング伝導 (定常電流) や欠陥レベルへの充放電 (過渡電流) が観測されているものと考えられる。

4. 量産プロセス装置への適用例

当社評価ウェーハ (デバイス) を用いたチャージアップダメージ評価は、エッチング・アッシング (酸素プラズマによるレジスト灰化)・イオン注入・プラズマ CVD・

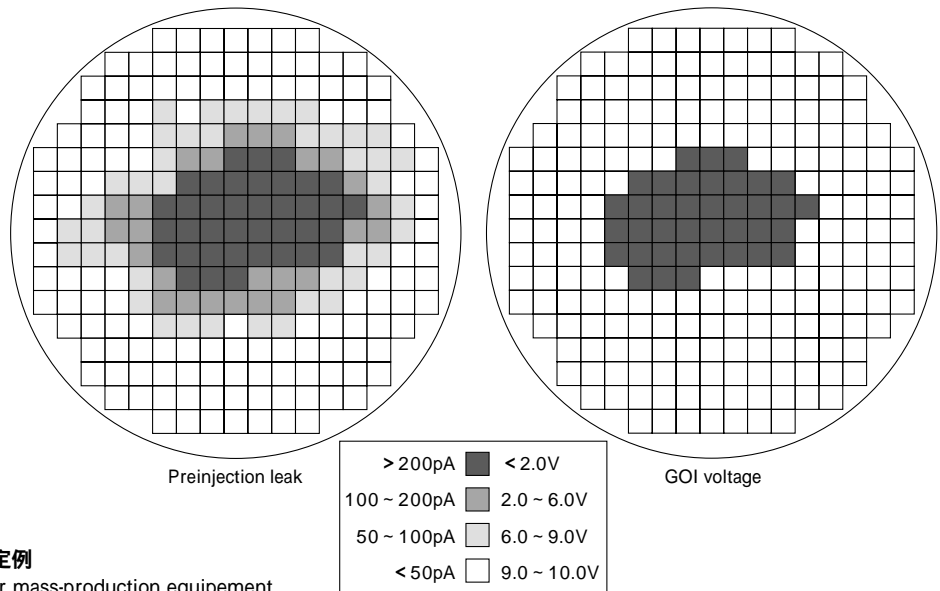


図5 量産プロセス装置のダメージ測定例
Fig. 5 Example of damage evaluation for mass-production equipment

スパッタデポジション・イオンミリングなど、ほとんど全ての(広義の)プラズマプロセスに対して有効性が確認されている。ここでは、ポリシリコンエッチングのダメージ評価例について述べる。

評価デバイスを一面に敷詰めた200mm評価ウェーハ(ゲート酸化膜厚さ80)を量産用ポリシリコンエッチング装置で処理し、エッチングプロセス中のチャージアップダメージを評価した。今回もプロセス条件は最適値からずらしてあり、チャージアップが比較的大きく発生する条件で行っている。

図5に、エッチング処理後のGOI電圧とリーク電流のウェーハ面内分布を示している。測定にはアンテナ比700000のデバイスを用いた。ウェーハ周辺のデバイスは、GOI電圧は9.6~9.8V、リーク電流は50pA以下であり、ほぼ無ダメージと判定される。ウェーハ中央の直径約100mmの領域では、GOI電圧の低下とリークの増大が観測され、ウェーハ中央のデバイスでは、GOI電圧が2V以下、リーク電流は測定限界(100000pA)以上に達した。リーク電流ではGOI電圧で変化のない領域から電流増大が観測されており、リーク電流測定はGOI電圧(もしくは絶縁破壊電圧)測定よりもダメージ検出感度が高く、かつウェーハ面内の連続的なダメージ変化を観測できることが立証された。

むすび = MOSキャパシタを用いた当社チャージアップ

ダメージ評価ウェーハと、独自のダメージ評価手法について述べた。現在、ウェーハ(デバイス)の形状は、200mmウェーハもしくはチップ(ダイ)を標準としており、300mmウェーハも開発中である。ゲート酸化膜厚さは、40・50・80の3種類を標準としており、対象装置の形態、ダメージの大小に応じて選択可能である。

当社チャージアップダメージ評価ウェーハは、プラズマチャージアップダメージ評価の切札として、装置メーカー、量産ファブで使用され始めている。新しいプラズマプロセス装置の開発から、新規導入装置の選定、装置メンテナンス後の特性確認、定期的なコンディション維持まで、さらに多くの場面で活用が期待される。

参考文献

- 1) 中村守孝: 半導体プロセスにおけるチャージング・ダメージ, (1996) p.9, リアライズ社.
- 2) Y. Fukumoto et al.: Proceedings of 2nd International Conference on Plasma Process Induced Damage (1997) p.99, American Vacuum Society.