

シリコンウエハ加工表面における近接場の電磁界解析 - 近接場を利用した微小欠陥検出法に関する考察 -

大阪大学大学院工学研究科 ○高橋 哲, 三好隆志, 高谷裕浩

要 旨

本研究は、鏡面研磨されたシリコンウエハ内部を臨界角条件で伝搬する赤外光によって表面に近接場を形成させ、表面層に存在する微小欠陥によって乱された近接場を計測して、シリコンウエハ加工表面層欠陥を解析する新たな計測技術の開発を目指すものである。本報では、提案手法の実現可能性について電磁界解析の観点から検討を試み、FDTD法に基づいた解析を行った。

1. はじめに

半導体集積回路の製造において、製造デバイスの信頼性を向上させるためには、歩留まり悪化の原因となるシリコンウエハ加工表面層に存在する微小欠陥を検出・評価する技術の確立が不可欠である。これらの微小欠陥検出・評価技術としては、レーザ光をウエハ表面に集光照射し、表面からの反射・散乱光を欠陥検出パラメータとする光学的手法を用いたものが一般的である。しかし、反射・散乱光といった遠隔場における光波を検出パラメータとする手法では、回折現象があるため、次世代の半導体デバイス製造の際に問題となるような数10nm以下の微小欠陥の詳細な評価は原理的に困難である。そこで、著者らは、nmオーダーといった微小領域の光学特性に反映して生成される近接場に注目し、近接場を欠陥検出パラメータとする新しいシリコンウエハ加工表面層微小欠陥検出法を提案している。本報では、提案手法の実現可能性について、電磁界解析の観点から検討を試みた。

2. 近接場を利用した表面層欠陥検出法

図1に本手法の概念図を示す。シリコンに対して吸収の少ない近赤外レーザビームを、シリコンウエハ内部において伝搬させる。ここで、シリコンウエハ内部から空気中への入射角を臨界角条件を満たすように設定すると、レーザビームは、全反射され、空気中へは伝搬していかない。この全反射の際に、シリコンウエハ表面に漏れ出す光がエバネッセント光である。エバネッセント光はMaxwellの電磁波方程式の解として記述され、ウエハ表面法線方向に沿って指数関数的に強度が減衰するような電場分布、つまり近接場を形成する。この近接場はナノメートルオーダーといった微小領域における光学特性の影響をうけることが知られており、表面層に微小欠陥が存在すると、その微小欠陥の属性に応じて近接場は変化する。本手法は、そのままでは観測不可能な近接場を、プローブを用いて伝搬光に変換することで間接的に観測し、その分布の

変化から表面層微小欠陥の検出・評価を行うものである。本手法は近接場を検出パラメータとしていることから、検出可能最小欠陥サイズが光源波長の制約を受けないこと、また、近接場の生成方法としてウエハ内部からの臨界角条件を利用していることから、表面上の欠陥だけでなく、従来の欠陥検出法では困難だった表面層下の内部欠陥も検出できる可能性があるといった特徴を有する。

3. シミュレーション解析モデル

数値電磁界解析としてFDTD法を用いて計算した。FDTD法とはMaxwellの微分方程式を差分化して、時間領域で解く方法である。その特徴としては、モーメント法などの積分方程式に基礎を置く解析手法では適用が困難な問題を比較的簡単に解くことができ、電場の時間変化を詳細に調べることが可能である。ここでは、吸収境界条件として一次のHigdonの境界条件を用いた。この吸収境界条件は任意に設定された境界への入射角を中心に反射を軽減させるものであり、最適なパラメータを選定することで高精度な解析を行うことができる。図2に、表面層欠陥の一例としてCOPと呼ばれるピット状欠陥をモデル化したものを示す。解析領域は空気層(屈折率:1.0)とシリコン層(屈折率:3.554)の2層に分けて設定され、光源としては波長1064nmのYAGレーザを想定し、電場振幅として1.0 V/mの初期値を与えた。また、プローブとし

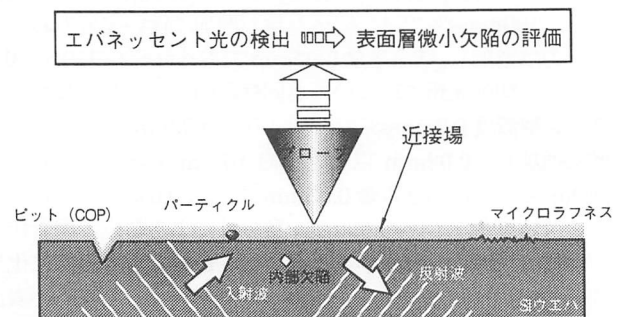


図1. 近接場を利用した表面層欠陥検出法概念図

ては近赤外光の導入を考慮して材質をシリコンとし、先端角は60度とした。セルサイズに関しては計算領域のx方向について400分割、y方向について300分割して行った。

4. シミュレーション解析結果

まず、初めにプローブの直下に欠陥が存在する場合を想定し、計算を行った。ここでは、提案手法を実用化の上で最も重要と思われるプローブによる近接場の伝搬光変換機能の確認を目的として、比較的大きめのサイズのCOP（幅100nm、深さ70nm）の検出をシミュレートした（図3）。図3(a)は電場分布を濃淡で視覚化したものである。シリコンウエハ内部においては、規則正しい濃淡分布の生成が、また、空気中においては、プローブ先端(D)からの点光源状の電場分布の拡がり確認できる。また、A-A'断面における電場の時間変化（図3(b))を見ると、シリコン内部(A-B)の電場分布において時間的に変化しない節の存在が認められることから、図3(a)で確認された濃淡分布は入射波と空気層界面からの反射波による干渉により生じたものであることが分かる。またプローブ内部(C-D)にも電場は導入されており、同様の考察から、これらの電場分布も定常波状となっていることが分かる。そして、末端(D)からは空気中へ伝搬光が生じていることが確認された。図4はこのプローブ先端からの伝搬光振幅と欠陥位置との関係を調べたものであり、実験的にはプローブをウエハから等高度(0.1 μm)で横方向に走査したときにプローブ先端から観測される伝搬光強度に相当する。ここでは、特に欠陥が起因となって生じた伝搬光に注目するために、同条件で欠陥が存在しないときに得られた電場を減算したものをプロットした。(a)はCOP欠陥(幅40nm、深さ30nm)、(b)は深さ0.2 μm に存在する菱形状の内部空洞欠陥(幅40nm、高さ60nm)の検出結果である。両者とも伝搬光強度はプローブ先端が欠陥上方に近づくとつれ、大きくなっていき、欠陥上方から遠ざかるほど、小さくなっていくことが分かる。特にCOP欠陥では、欠陥近傍において、欠陥の真上にプローブが達した時に伝搬光強度が微小に減少するといった興味深い現象が見られた。この現象は欠陥位置の高精度な特定に適用できると思われ、今後、メカニズムの解明を行っていきたい。

5. まとめ

近接場を欠陥検出パラメータとしたシリコンウエハ加工表面層の微小欠陥検出法の可能性を調べるために、FDTD法を用いたシミュレーション解析を行った。その結果、シリコンプローブをシリコンウエハ表面に近接させると、プローブ内部に光が浸透し、プローブ先端からは観測可能な伝搬光が生成されることが分かった。また、この伝搬光をモニタすることで、従来検出が困難だった内部

欠陥の検出も可能であることを示した。今後は、物性、大きさ、形態等の欠陥属性と検出伝搬光の関係について詳細に調べていきたい。

参考文献

- 1) 宇野享:FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998

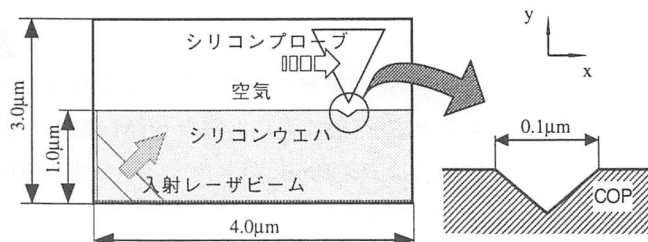


図2. シミュレーション解析モデル (COP欠陥の場合)

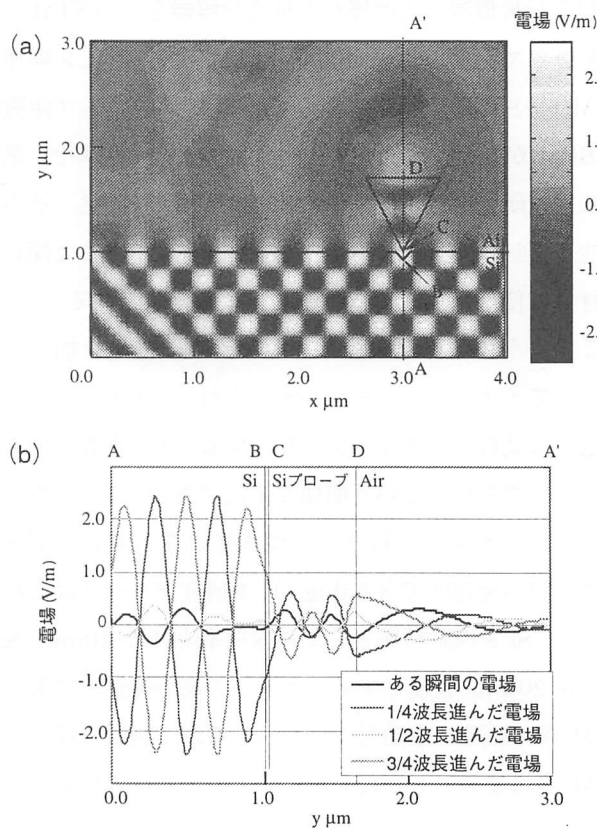


図3. 欠陥・プローブが存在するときの電場分布 (a) と A-A'断面における電場の時間変化 (b)

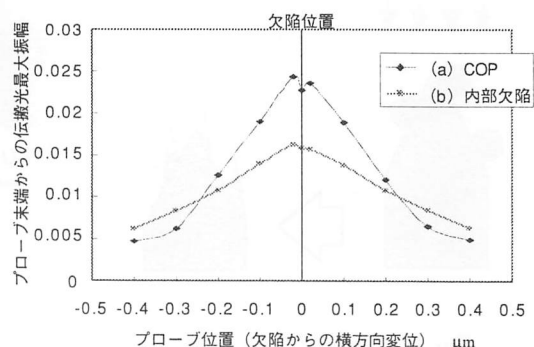


図4. プローブ走査時に観測される伝搬光最大振幅