

Readout

HORIBA Technical Reports

特集 高機能分析

March 1999 ■ No.18

シリコンウエハ結晶欠陥の検出

Detecting crystal defects in silicon wafers

中尾 基

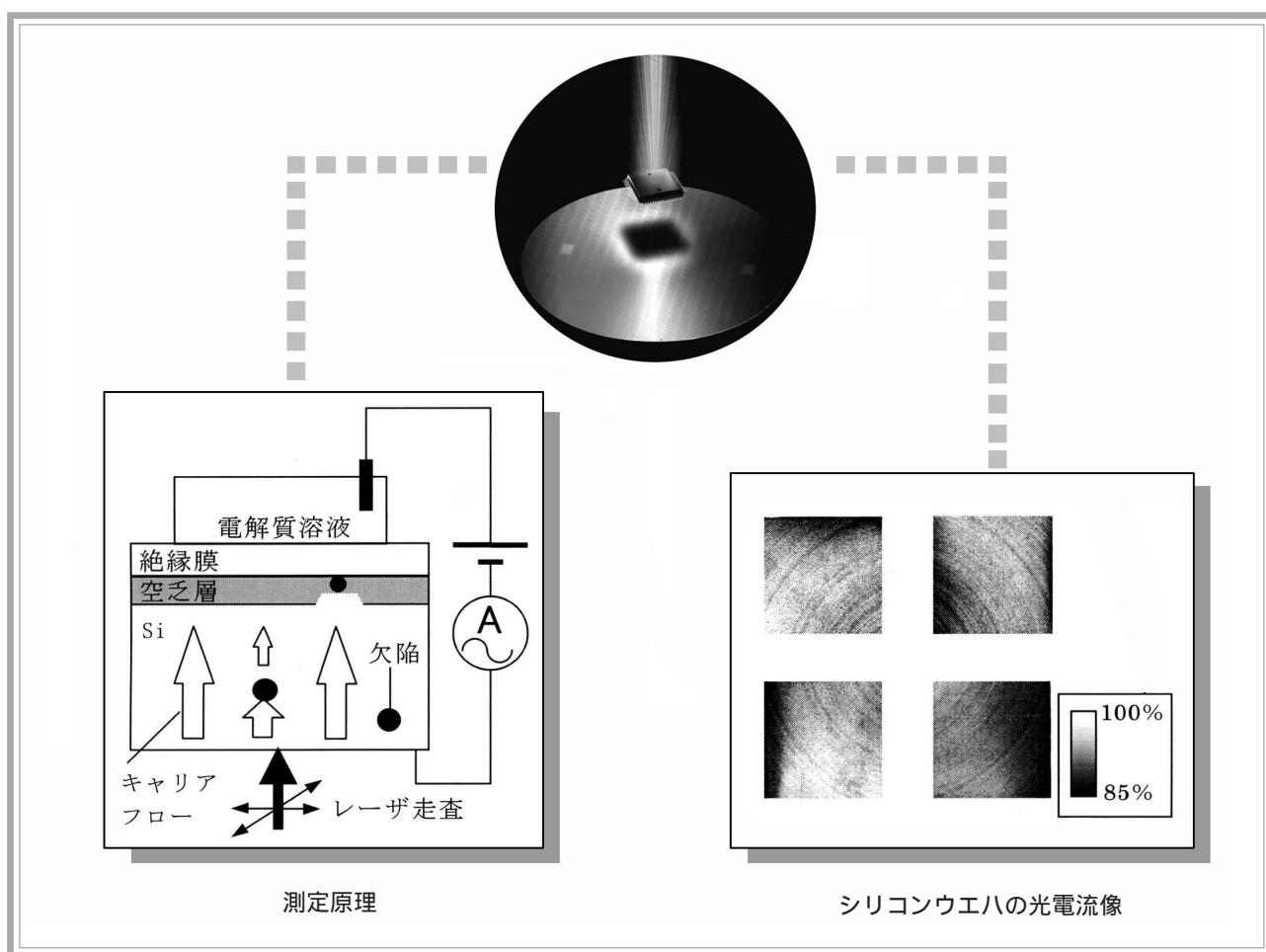
Motoi NAKAO

(Page28-31)

株式会社 堀場製作所

シリコンウエハ結晶欠陥の検出 *Detecting Crystal Defects in Silicon Wafers*

中尾 基



要旨

シリコンウエハにレーザ光を照射し、発生した光電流の二次元分布からウエハ内の欠陥分布を観察した。ウエハ面内に中心から同心円上の模様は、シリコン融液からシリコンインゴットとして単結晶引き上げを行う際に発生するストリーション欠陥であることがわかった。従来法では検出が難しかった欠陥を本手法により高感度に、可視化できることを示唆している。本手法は、絶縁膜堆積ウエハだけでなく、As-received ウエハ、すなわち一切の前処理・熱処理なしでも測定できることから、シリコンウエハの結晶欠陥の非破壊モニタリングにも適用できるものと期待されている。

Abstract

Crystal defects in silicon wafers are detected with photocurrent imaging. Striation defects that occur during formation of the silicon ingot can be seen as a photocurrent image. The defect was not detected with the conventional method for defect evaluation. This method is very attractive because of its high sensitivity in monitoring of defects in silicon wafers without any pretreatment.

1. はじめに

現在、さまざまな要因によって、シリコンデバイス集積度向上は阻害される傾向にある。その要因は、半導体周辺技術と同様に半導体シリコン結晶自体に起因しているものも少なくない。その一つに挙げられるのが欠陥である。デバイスサイズが小さくなるにしたがって、欠陥のより少ない完全な半導体シリコン結晶が必要になってきている。そのため、結晶成長時の欠陥発生のメカニズムを解明することが必要不可欠である。

当社では、溶液や固体表面などの化学量(pH, イオン濃度, 酸化還元電位)を二次元的に可視化する方法として、光走査型化学顕微鏡を開発した¹⁾。ここでは、pH 応答物質である Si_3N_4 膜の表面電荷によって発生する電位を光電流で検出し化学量を測定している。照射光として集光レーザービームを用い、それを二次元的に走査することで、pH 分布の画像が得られる。

今回、発想を変え、均一な pH 分布の溶液を用いることで逆に、半導体シリコンの特性分布(結晶欠陥等)を観察できることがわかった。

2. 結晶欠陥

一般的にシリコンウエハは、採取された珪石を、金属級シリコン、半導体級多結晶シリコンと順次高純度化させ、そして単結晶シリコンをインゴットとして作製した後、スライシング、ラッピング、およびエッチングして完成する。単結晶シリコンのインゴットを作製する方法としては一般的に、シリコン融液から単結晶引き上げを行う CZ(Czochralski)法が用いられている。CZ法により単結晶インゴットを融液から引き上げる際、微妙な温度差などによって結晶の成長速度等が変わり、そのため各種の結晶欠陥が生じる。もちろんここで述べている結晶欠陥は、無転位成長におけるものである。シリコン中に混入される酸素、炭素や添加不純物は、インゴット成長条件(対流による融液温度勾配、種結晶回転速度、るつぼ回転速度、引き上げ速度等)により偏析し、欠陥が生じることがわかっている。その一つがストリーションと呼ばれる種結晶から三次元的な同心状にむらを生じさせる特異な結晶欠陥である。

3. 従来の手法

3.1 X線トポグラフ法

シリコンウエハ中に欠陥が存在すると、その領域で微小な格子歪が発生する。そのため、入射 X 線に対する回折強度を測定することで、欠陥を検出することができる。そこで、用いる入射 X 線を小さいスポット径にし、二次元的に走査すれば、格子歪のウエハ面内分布像が検出できる。しかしながら、この手法でストリーションを検出するためには 1100 で 10 時間以上の熱処理を施す必要がある。この結果、格子歪が増大してしまい、シリコンウエハ結晶の一次欠陥ではなく、二次欠陥を検出していることになり、As-Grown 結晶欠陥は観察できないことになる。また、この手法は定量的に欠陥を評価できないという欠点もある。

3.2 μ -PCD 法

表面層の少数キャリア寿命を測定することができる手法として、マイクロ波光導電率減衰法(μ -PCD)がある。 μ -PCD法は、ウエハにレーザー光およびマイクロ波を照射し、そのときの反射マイクロ波強度を測定することでマイクロ波に対する反射率を求める。この反射率はウエハの少数キャリア寿命と相関がある。このことから、光学系を走査することで、ウエハ内の少数キャリア寿命の分布像を測定できる。しかしながら、この手法も検出感度が低いため、熱処理を行わないと、ストリーションを観察できない。

4. 測定原理

図 1 にシリコンウエハの裏面に光を照射したときに発生する光キャリアの拡散の様子と構造を示す。半導体シリコンに、シリコンのバンドギャップ

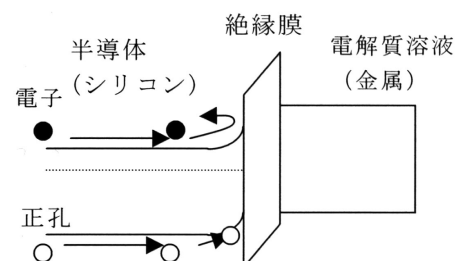


図 1 電解質溶液 / 絶縁膜 / 半導体(EIS)構造のエネルギーバンド図

Energy band diagram of electrolyte-insulator-semiconductor structure (EIS)

(1.1eV)以上のエネルギーを持つ光が入射されると、価電子帯の電子が伝導帯に励起され、伝導帯の電子とともに価電子帯の正孔が光キャリアとして生成され、絶縁膜/半導体界面に形成される空乏層まで拡散する。空乏層に到着した光キャリアは、空乏層での電位勾配によるドリフトで電荷分離が引き起こされる。

例えば、図1のように空乏層が形成されるように、n型半導体を用いて、半導体側に正方向のバイアス電圧を印加すると、空乏層まで到着したキャリアは、正孔が絶縁膜側に、電子が半導体基板側に引き寄せられる。この電荷分離により正孔が蓄積されるため、絶縁物/半導体界面の電位に変化が生じ、バンドの曲がりに変化が起こる。逆に、この状態から光照射を止めると、光照射によって平衡状態からのバンドの曲がりが増加していることから、蓄積されていた正孔が、半導体バルクの方向に引き戻される。そのため、変調光を照射することで交流光電流が流れることになる。

この光電流は、以下の式で表わすことができる。

$$I = q \phi \eta (1 - \Theta) \exp\left(-\frac{d}{L_p}\right) \frac{C_i}{C_i + C_d} \dots \dots (1)$$

q は素電荷、 ϕ は入射光子数、 η は量子効率、 Θ は反射率、 d はシリコン基板厚、 L_p は少数キャリア拡散長、 C_i は絶縁膜のキャパシタンス、および C_d は半導体空乏層のキャパシタンスである。

なお、拡散長 L_p は

$$L_p = \sqrt{D\tau} \dots \dots (2)$$

で表わすことができる。 D および τ は、それぞれ少数キャリアの拡散定数、寿命である。

また、空乏層容量 C_d は、

$$C_d = \sqrt{\frac{\epsilon_s q^2 N_A}{4kT \ln(N_A/n_i)}} \dots \dots (3)$$

である。ここで、 ϵ_s はシリコンの誘電率、 N_A は添加不純物濃度、 n_i は真性半導体キャリア濃度、 k はボルツマン定数、および T は絶対温度である。

(1)~(3)式で少数キャリア寿命に加えて、半導体中の添加不純物濃度の情報が測定される光電流に含まれることがわかる。なお、光走査型化学顕微鏡の空間分解能および信号強度の評価に関して、(1)式を用いたシミュレーション結果と、実験結果が一致していることは従来示している²⁾。

5. 結果と考察

図2にこの手法で得られた光電流二次元像を示す。

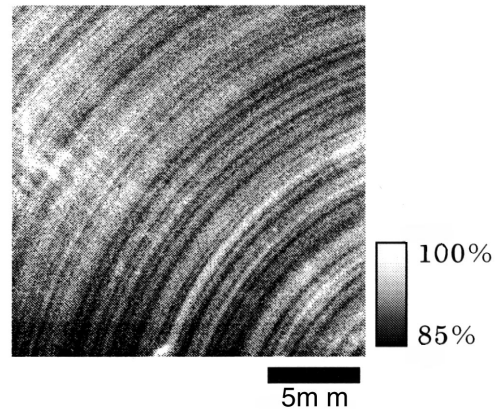


図2 n型10⁻²Ω・cm Si(100)の光電流像
Photocurrent image for n-Si(100) wafer

抵抗率が10⁻²Ω・cm、n型(100)Siウエハにドライ熱酸化膜を50nm形成後、減圧化学気相成長でSi₃N₄膜を100nm堆積したものを絶縁膜とし、それに電解質水溶液を接触させて測定を行った。この絶縁膜の形成に伴う熱処理(典型的には1000℃で1時間程度)は、従来手法でのストリーション検出のために行う熱処理に比べて、温度も低く、時間も短い。図中に筋状に色の明暗の像が観察される。これは、測定される光電流の大きい領域と小さい領域が筋状、交互に存在していることを示している。また、100mmウエハのほぼ全面に対して測定した結果、ウエハの中心部から同心円状に明暗の筋状の模様が観察できている。このことは、シリコンウエハ中のインゴット成長時に発生するストリーション欠陥が本装置によって測定できたことを示している。このようなストリーションは、図2のn型10⁻²Ω・cmだけでなく、p型10⁻²Ω・cm、n型5⁻²Ω・cm、およびp型2⁻²Ω・cmのSi(001)ウエハや、p型1⁻²Ω・cmのSi(111)ウエハなど、さまざまな抵抗率、面方位を持つウエハに対しても観察された。

画像から得られたストリーション上の光電流値を式(1)から式(3)で、少数キャリア寿命や添加不純物濃度に変換することにより、この手法は欠陥の定量的な評価に用いることもできる。

図3にX線トポグラフィ法やμ-PCD法でシリコンウエハ中欠陥を検出するために行う熱処理後(酸素雰囲気、1100℃、12時間)の光電流像を示す。熱処理を行っていないウエハのものに比べて、光電流値の大小を示すリングの間隔が大きくなり、さらに光電流値の大小差も大きくなっていることがわかる。こ

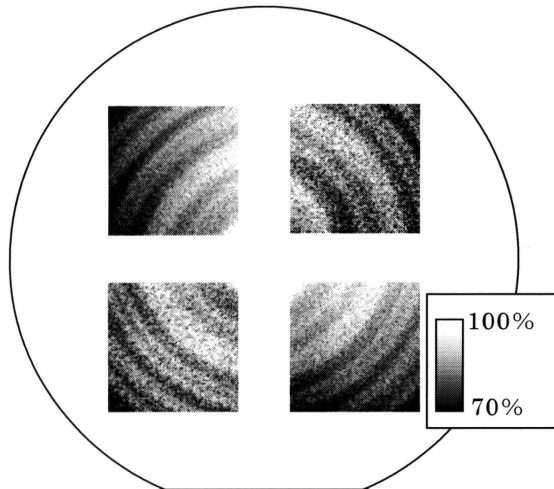


図3 1100 12時間熱処理後の光電流像
Photocurrent image after thermal treatment

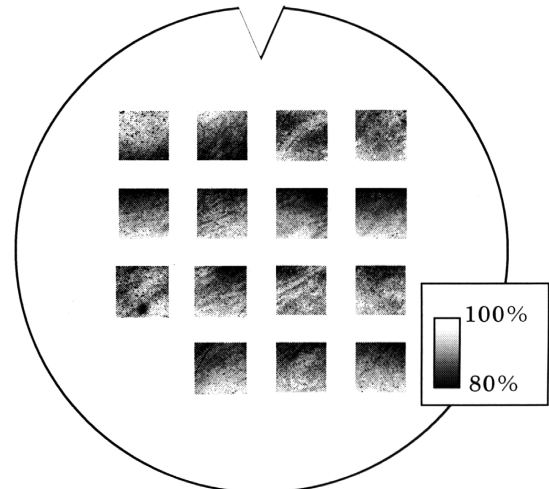
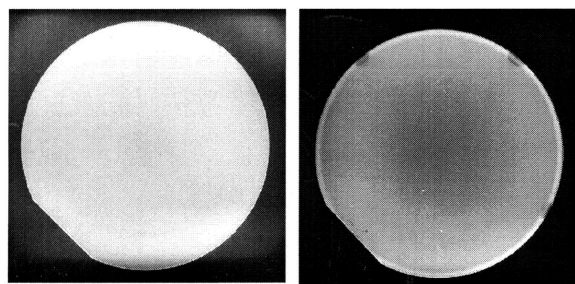


図5 200mm ウエハの光電流像
Photocurrent image for 8-inch wafer

これは熱処理によって、酸素や添加不純物の析出が起こり、欠陥が増大されたことによるものと思われる。

図4に、図2で用いたものと同一ロットのシリコンウエハから得られたX線トポグラフ像を示す。熱処理後のウエハでは、ウエハ周辺部や酸化の際のホルダー部分で若干のコントラストは現れているが、As-received および熱処理後いずれのウエハにおいても、ストリエーションに対応する欠陥は検出できていないことがわかる。この結果は、X線トポグラフ法で検出できない欠陥が、光電流法で検出できたことを意味し、従来法に比べて非常に高感度にシリコンウエハの欠陥を可視化できることを示すものである。



(a) As-received (b) After thermal treatment

図4 X線トポグラフ像
X-ray topograph image

図5に200mmウエハの光電流画像を示す。100mmウエハで観察されたストリエーション欠陥は検出されず、点や線状の欠陥が認められる。最近の半導体技術躍進の中、シリコンウエハの結晶性に関しても、100mmウエハに比べて200mmウエハは数段向上している。一般的な200mmウエハの結晶欠陥では、大きさが数nm～数十nmであるGrown-in八面体空孔欠陥が着目されるのみで、メゾスコピックな欠陥は存在

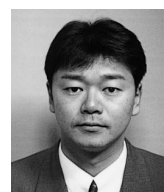
しないと解釈されている。そのため、本手法で今回検出された点・線状欠陥は、従来手法では検出されなかったものであり、本手法の欠陥検出の高感度技術によって初めて明らかにされたと考えられる。このことは、本手法による評価が200mmウエハの結晶性に一石を投じるものであると確信している。

6. まとめ

シリコンウエハ中に存在する結晶欠陥（ストリエーション）を、レーザ光を半導体シリコン裏面から照射したときの光電流を測定する手法で検出することができた。また、従来測定が困難だった非熱処理によるストリエーションの観察も本手法で測定できた。このようなことから、この光電流法がシリコンウエハの結晶性の良否判定に適用できることがわかった。今後は、ウエハ全面を一括で測定できるように、光走査を拡大し、大口径ウエハにも対応すること、および本手法で可視化された欠陥と、デバイス特性の相関関係を探求していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 中尾基, 野村聡, 中西剛, 高松修司, 富田勝彦, READOUT, No.13, 75-80 (1996)
- 2) M.Nakao, T.Yoshinobu and H.Iwasaki: Jpn. J. Appl. Phys. 33, L394-397 (1994)



中尾 基
Motoi NAKAO

基礎技術開発部
ケミカルセンサプロジェクト

