

氏名	小島 繁
学位（専攻分野）	博士（工学）
学位記番号	総研大甲第58号
学位授与の日付	平成5年9月30日
学位授与の要件	数物科学研究科 放射光科学専攻 学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	高時間分解能X線回折法によるシリコン単結晶の パルスレーザーアニール過程の研究
論文審査委員	主査 教授 岩崎 博 教授 松下 正 教授 安藤 正海 教授 大隅 一政 助教授 飯田 厚夫 助教授 雨宮 慶幸 教授 菊田 惺志（東京大学）

新しい半導体プロセス技術という位置付けで、パルスレーザーの半導体プロセスへの応用研究が盛んであり、エキシマレーザーを用いた露光プロセス等の一部は、既に生産現場にも導入されている。今後は、レーザーCVD、レーザーエッチング、レーザードーピング、レーザー酸化及び窒化、回復アニールおよび再結晶化アニール等といったレーザーを用いた低温化プロセスも実用化されるであろう。

レーザーを使う利点として、(1)雰囲気によらない、(2)局所的処理、(3)短時間処理、(4)基板のダメージを小さくできる、(5)プロセスの単純化、等があげられているが、多くの場合、パルス的なレーザー照射が行われ、温度上昇を伴うので熱歪みが生じる。ところが、基板の温度上昇、等をナノ秒の時間オーダーで、厚さ10nmから1 $\mu$ m程度で、その場観察する有効な手段が無く、パルスレーザー処理後の試料の状態の観察や数値計算に頼ってきた。半導体基板の温度上昇、特にデバイスを作製する表面層の温度上昇及び歪みを正確に把握することは、パルスレーザーを半導体プロセスに応用する上で大事なことになる。

特に、現在のMOSトランジスタのゲート酸化膜厚は、10nm程度であり、今後さらに高密度化と共に薄くなる傾向にあるから、酸化膜厚と同程度の深さの層での温度上昇を測定することは、今後のパルスレーザーの半導体プロセスへの応用を考え、将来の見通しを知るうえで、非常に重要である。

本研究では、25nsの時間分解能の時間分割X線回折法を開発し、かつX線の侵入深さを制御して、パルスレーザー照射下の結晶表面及び内部での格子歪みを観察し、結晶温度の上昇を見積った。

X線は、波長や非対称反射等の選択で侵入深さを変えることができ、表面近傍の測定が可能である。また、全反射条件下の表面X線回折を用いれば、X線の侵入深さを試料表面層わずか数10nmの大きさにすることも可能であり、通常の方法では困難な部分からの情報が得られる。

本研究では、高時間分解能の時間分割測定法として、TACを用いた方法とMCSを用いた方法を開発した。MCSを用いた方法では、同じ角度位置での時間の推移に対する回折強度変化を調べられるが、いまのところ時間分解能は、200nsである。TACを用いた方法では、ロッキングカーブの強度変化を調べるのに向いており、時間分解能も25nsと高時間分解能が実現できる。

通常のBragg反射においては、試料の配置が対称反射や非対称反射の場合、シリコンに対する可視パルスレーザー光の侵入深さとX線の消衰距離は、ほぼ同じオーダーの1 $\mu$ m前後なので、深さ方向の温度分布を観察できる。skew diffraction配置を用いた表面X線回折法では、X線の侵入深さを数10nmまで浅くすることができ、表面温度の見積りが可能となる。

これらの光学配置を用いて時間分割測定を行うことにより、以下の結果が得られた。

非対称Bragg反射を用いた表面近傍の測定では、(1)低角側での強度の増大(2)ピークシフト(3)半値幅の増大が観察された。半値幅の増大は、観察している層に温度勾配と測定

している時間幅のなかでの温度変化があることを示しており、その後の半値幅の回復は、X線で観察している層の温度が均一になる過程を示している。また、パルスレーザー照射直後の低角側での強度の増大は、表面層の急激な温度上昇に対応しており、ピークシフトは、観察している層の平均温度が室温よりも高いことに対応している。

表面に対して斜めの反射面を用いた表面X線回折での時間分割測定において、侵入深さが $0.95\mu\text{m}$ と深く表面近傍を観察している場合、パルスレーザー照射後に、ピーク強度の減少、低角側の副ピーク、およびピークシフトが観察された。侵入深さは同程度であるが、通常のBragg反射を用いた時間分割測定よりも大きな変化が観察された。この理由は、通常のBragg反射では、消衰距離を分散面の最短距離で定義しているため、Braggピークから外れるに従って深く結晶内部にX線は侵入する。skew diffraction配置の場合は、回折が起こると、回折の起きていない場合の侵入深さよりも消衰距離が短くなるので浅い部分を観察していることになる。このために、skew diffraction配置のほうが感度が良くなる。

侵入深さが $75\text{nm}$ と浅い場合の時間分割測定から、ピーク強度の減少、半値幅の増大、ピークシフトが観察された。レーザー照射後 $50\text{ns}$ の測定結果におけるピークシフトから、極表面( $75\text{nm}$ 以下)の平均温度上昇を $210^\circ\text{C}$ と見積ることができた。

本研究で行ったskew diffraction配置を用いた表面X線回折法での高時間分解能の時間分割測定は、初めての試みであり、パルスレーザー照射下の表面平均温度上昇が初めて実験的に見積られた。評価の糸口がつかめたので、この分野の研究が活発になると考える。

## 論文の審査結果の要旨

レーザーは半導体プロセスにおいて計測手段としてもちいられているが、加工手段としてはマーキング等の一部を除いてほとんどが応用されていないのが現状である。加工手段としての応用を実現させるには、半導体プロセスにおける歩留まりの向上が必要不可欠であり、そのためにレーザー光照射が与える半導体への影響が正しく評価されなくてはならない。今回小島繁君が行った研究は、パルスレーザー光を照射したときのシリコン結晶表面の温度上昇を時間分割で測定する有効な手段を開発し、パルスレーザー光照射が表面に与える影響を評価することを目的としている。レーザーを用いたプロセッシングは通常反応ガス中で行われるので、表面を調べる探針として資料まわりの雰囲気依存しない放射光X線を採用し、表面からの情報を得るための光学系を設計した。時間分割測定法としてはMulti Channel Scaling(MCS)を用いた測定法とTime Amplitude Converter(TAC)を用いた測定法を開発し、後者では時間分解能25nsを得た。

パルスレーザー光照射下のシリコン結晶表面における深さ方向の温度分布を調べるために、通常のBragg反射のロッキング曲線の時間分割測定を行い、一方、熱計算による深さ方向の温度分布から1次元の高木-Taupin方程式を用いてロッキング曲線を計算し、比較を行い、良い一致をみた。パルスレーザー光照射下では表面からのエネルギーの散逸が熱放射や弾性波の形で観察されている。この効果を調べるためには、100nm程度の深さに極表面の温度上昇を評価するために、資料表面に垂直な反射面及びskew diffraction配置での反射面からの反射の時間分割測定を行った。表面に垂直な反射面を用いた表面X線回折の測定では、面内方向の結晶の膨張がほとんど無く、深さ方向の膨張だけを考慮すればよいことが明らかになった。また、skew diffraction配置を用いた表面X線回折での測定では、パルスレーザー光照射後50nsの時間分割ロッキング曲線における反射極大の変位から75nm以下の深さの極表面の温度上昇を $210^{\circ}$ と推定でき、断熱境界条件下での熱計算結果との良い一致をみた。これらの実験は表面X線回折法がパルスレーザー光照射下の結晶表面状態を評価する有効な手段であることを示している。

小島君提出の論文は以上の研究をまとめたものであり、パルスレーザーの半導体工学への応用に貴重な知見を与えるものである。また複雑な光学系及び実験装置の構築、X線反射測定などに極めて優れた実験技能を発揮してきたことが伺われ、数物科学研究科放射光科学専攻の博士論文として相応しい内容を有していると判断した。

また、小島繁君に対する博士論文にかかわる専攻分野ならびに基礎となる分野の学識を口述により試験した。例えば、時間分割測定システム、X線光学系、動力学的回折理論、この理論による歪んだ結晶の取り扱い及び表面X線回折、などの基礎的及び専門的事項その他について種々の質問を行ったが、同君はこれらに対し的確に答えた。測定システムを構築し、実験を成功させるには広い学識と目的意識が必要であるが、一般物理学ならびに放射光科学についても十分な理解と知識があることを示した。