特集

多結晶Si膜の粒界キャラクタリゼーション

中野由崇，井上敦子，土屋智由，坂田二郎，多賀康訓

Interface States of Grain Boundaries in Polycrystalline Si Films

Yoshitaka Nakano, Atsuko Inoue, Toshiyuki Tsuchiya, Jiro Sakata, Yasunori Taga

要　旨

多結晶Si膜はマイクロセンサデバイス用構造材として有望である。その際，長期信頼性の観点から疲労劣化の問題が危惧される。この機械物性の変動メカニズムを解明するには，機械物性に大きな影響を与えるSi結晶粒界の挙動解析が必要である。本研究では，簡便な電気的評価法であるアドミッタンス法を結晶粒界の解析に適用し，CVD法で成膜した非晶質Si膜の結晶化過程での粒界準位の発生およびその熱的挙動を明らかにした。また，ユニークな試みとして，異なる機械物性値を有する多結晶Si膜のメンブレンを作製し，外部応力の有無による粒界準位の挙動を評価した。外部応力付与により粒界準位はエネルギー的に深くなり，そのシフト量はヤング率に依存することがわかった。これらの結果は，多結晶Si膜の機械的挙動を粒界準位により初めて説明したものであり，今後の疲労劣化現象のメカニズム解明に寄与するものと思われる。

Abstract

Polycrystalline Si films are a promising structural material for microsensing devices. On its application, mechanical fatigue phenomena may be worrying in view of long-term reliability. For revealing its mechanism, it is necessary to understand the structural behavior of its correlative grain-boundaries (GBs). In the present study, using an admittance spectroscopy technique, we have systematically clarified the formation process and the thermally induced behavior of interface states of GBs in chemical vapor deposited amorphous films during thermal annealing. As a unique trial, we have also investigated the correlation between the GB states and the mechamical properties using the polycrystalline Si membranes. The results indicate that a deeper energy shift of the GB states is caused by an external stress and that its quantity depends on Young's modulus of the films. We expect that our findings contribute to the solution of fatigue problems of polycrystalline Si films in the near future.

キーワード　多結晶Si膜，結晶化，結晶粒界，粒界準位，応力，ヤング率

1．はじめに

多結晶Si膜は周知の通り太陽電池や薄膜トランジスタといった各種デバイスへの応用が注目されている。一方，高集積化と高機能化の期待から多結晶Si膜を構造材としたマイクロセンサデバイスの研究も活発に進められ，実際に多結晶Si膜を使用した加速度センサや角速度センサが試作されている。この際，温度や振動等の使用環境が厳しい自動車分野への実用を想定すると，耐使用環境性や長期信頼性の確保が重要であり，多結晶Si膜の破壊強度などの機械物性の解析とその改善が必要

となる。とりわけ，繰り返し振動による疲労劣化現象といった機械物性変動のメカニズムを解明するには，原子オーダーでの詳細な構造解析が必要である。

多結晶Si膜の電気物性および機械物性を決定する重要な因子として結晶粒界の存在が挙げられる。結晶粒界では，電気的に活性なエネルギー準位（粒界準位）が存在しており，キャリアのトラップ・再結合・散乱など電気的性質を支配する一方，機械的にも結晶内部と比べて結晶性が悪いため破壊の起点として働きやすく破壊強度特性をも支配する。したがって，結晶粒界の構造や性質を解明し，それらを設計・制御する技術を確立することが求められている。しかし，実デバイスで用いられるような粒径や膜応力を制御した，非晶質から結晶化した多結晶Si膜についての機械物性の微視的解明は遅れており，粒界や粒径が諸特性に及ぼす効果，結晶化や粒界形成過程の解明には至っていない。したがって，多結晶Si膜の破壊強度や疲労劣化のメカニズムを解明するには，結晶性の観点及び応力等の機械物性の観点から結晶粒界の挙動解析が必要である。

近年，国内外の研究機関において多結晶Siの結晶粒界の原子配列と電子構造について理論的に計算されている[1, 2]。多結晶Si膜の透過電子顕微鏡観察で頻繁に見られる，<011>軸を回転軸とする傾角粒界の$\Sigma = 3$・$\Sigma = 9$・$\Sigma = 27$などの規則粒界（対応粒界）は生成エネルギーが小さいため出現しやすく，ボンドの再構成や奇数員環をつくることで安定化し，バンドギャップ中に電気的に活性な粒界準位をつくらない。一方，ランダム粒界（ねじれ粒界）は規則粒界の界面よりも不規則な部分が存在するのでボンド歪が大きく，ボンドが切れた状態を生成しやすい。このダングリングボンドが活性な粒界準位となりバンドギャップ中に出現する。機械的強度の観点からは，規則粒界は転位が発生しても通り抜ける性質を有し機械的強度は大きいが，ランダム粒界は破壊の起点になりやすいといえる。また，粒界面に転位（欠陥）が一様に分布している状態よりも，粒界面の一部に転位が集中している状態のほうがエネルギー的には安定であるが，破壊強度的には弱くなる。したがって，機械的強度を向上させるためには，ランダム粒界をできるだけ少なくすることが必要である。このランダム粒界は透過電子顕微鏡等では観察が困難であるため，電気的な手法を用いてバンドギャップ中の活性な粒界準位を検出し評価することが賢明である。電気的評価は原子オーダーの微少な構造的変化でも電気的シグナルとして明確に検出できる。本研究では，粒界準位と機械的性質の関係を検討するのに有用なツールである簡便なアドミッタンス法を使用して粒界準位を検出した。

本研究の目的は，非晶質Si膜の結晶化過程における粒界準位の発生機構を明らかにし，粒界設計指針の確立に寄与することである。まず，CVD (Chemical Vapor Deposition) 法で成膜した非晶質Si膜を熱アニールで結晶化させ，粒界準位の発生およびその熱的挙動を評価した。また，新しい試みとして，ヤング率等の機械的挙動の観点から，異なる機械物性値を有する多結晶Si膜のメンブレンを用いて，外部応力の有無による粒界準位の挙動を評価し，粒界準位と機械的性質の関係について検討した。

2．結晶粒界の評価法

一般的にSi結晶粒界における活性な粒界準位を検出・評価する代表的な方法として，DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) 法[3]・アドミッタンス法[4]などがある。どの方法も電子の熱放出速度から粒界準位のパラメータ（状態分布，キャリア捕獲断面積，粒界障壁の標準偏差など）を得ている。DLTS法は電圧や光といった外部刺激を加えた際の静電容量や電流の過渡変化を測定する非定常状態での評価法である。一方，アドミッタンス法は静電容量やコンダクタンスの周波数特性を測定する定常状態での評価法である。アドミッタンス法はDLTS法に比べて周波数応答アナライザなどの装置で測定が可能であり，幅広い周波数領域をカバーしていれば室温でも粒界準位の評価が可能である。ここでは，本実験で用いたアドミッタンス法について簡潔に説明する。

アドミッタンス法はacコンダクタンスが深い準位からの電子の熱放出速度によって変化することを利用して深い準位の性質を評価する簡便な接合

法である。結晶粒界を一種の接合と見なし，粒界に角周波数ωの微小ac電圧を印加すると，粒界空乏層内のフェルミ準位が$1/\omega$の速度で粒界準位E_{gb}の上下を変調することになる。ここで，粒界準位からの電子の熱放出速度e_nが角周波数ωと等しくなったとき，acコンダクタンスに共鳴が起こりコンダクタンス$G(\omega)$が増大する。$G(\omega)$は粒界準位からの熱放出によるコンダクタンス$G_{gb}(\omega)$とdc成分によるコンダクタンスG_{dc}の和であり，G_{dc}は角周波数に依存しない。

$$G(\omega) = G_{gb}(\omega) + G_{dc} \quad \cdots\cdots(1)$$

アドミッタンス・シグナルを次式のように定義する。

$$G(\omega)/\omega = e^2 \cdot N_{gb} / (2\omega \cdot \tau) \ln(1 + \omega^2 \cdot \tau^2) \quad \cdots\cdots(2)$$

e : 電荷，N_{gb} : 粒界準位密度

τ : 電子の熱放出緩和時間

アドミッタンス・シグナルは$\omega \cdot \tau = 1.98$でピーク値をもつ。したがって，アドミッタンス・スペクトルのピーク周波数より，粒界準位からの電子の熱放出速度e_nが求められる。また，e_nの温度依存性は次式で表される。

$$e_n = N_c \cdot V_{th} \cdot \sigma_n \exp[(E_c - E_{gb})/kT]$$
$$= A^* \cdot 2/q \cdot T^2 \cdot \sigma_n \exp[(E_c - E_{gb})/kT] \quad \cdots\cdots(3)$$

N_c : 伝導帯での電子の有効状態密度

V_{th} : 電子の熱速度，k : Boltzmann定数

σ_n : キャリア捕獲断面積

A^* : Richardson定数

したがって，各測定温度での電子の熱放出速度e_nを求めれば，e_n/T^2のアレニウス・プロットから粒界準位の深さE_c-E_{gb}とキャリア捕獲断面積σ_nが求められる。

3．実験方法

3．1　成膜

成膜用基板として，NSG (nondoped silicate glass : 1μm) / Si_3N_4(200nm) / Si(100)基板を用いた。非晶質Si膜はSi_2H_6を原料として減圧CVD法により成膜した。成膜温度は520℃，膜厚2μmとした。成膜後，600℃の窒素ガス雰囲気中で異なる時間(1～24h) 熱アニールし，非晶質膜を固相成長により結晶化させた。さらに，12時間熱処理した試料を800°C・900°C・1000°Cの窒素ガス雰囲気中で1時間再アニールを行った。

3．2　評価

結晶性の評価はX線回折・ラマン分光・透過電子顕微鏡観察を用いて行った。粒界準位の評価はアドミッタンス法を用いて室温から80°Cまで行った。この際，Si膜上部にAlを蒸着し櫛形電極（ギャップ100μm）を形成し，ゼロバイアス状態でのコンダクタンスの周波数依存性を測定した。acシグナルは50mVとした。

3．3　メンブレン作製と評価

減圧CVD法で成膜した非晶質Si膜 (2μm) を窒素ガス雰囲気中で異なった温度（600°C・24h，700°C・2h，1000°C・1hの3水準）で熱処理し結晶化させた後，基板をエッチングにより除去し，7mm角の多結晶Si膜のメンブレンを作製した。Al電極を膜上下部に形成後，外部応力の有無状態でアドミッタンス法により粒界準位を評価した。外部応力の付与はメンブレン片側を真空で引き膜を歪ませることで行った。この際の外部応力は約300MPaである。3水準のメンブレン多結晶Si膜のヤング率及び内部応力はバルジ法の応力－たわみ特性から求めた[5)]。

4．実験結果及び考察

4．1　等温度結晶化アニーリング挙動

Si膜のas-depo.及び1時間の熱処理での結晶状態はX線的に非晶質であった。2時間以上の熱処理では3つの結晶化ピークSi(111)・Si(220)・Si(311)が見られ，急激な結晶化が認められた。それぞれのピーク強度比から，結晶化Si膜は(111)面の優先配向を示した。

各熱処理試料を断面TEM観察と電子線回折で評価した。**Fig. 1**に代表的なTEM像を示す。1時間の熱処理ではSi(111)面のハロー・リングがみられる。2時間の熱処理では非晶質と結晶粒を明確に分けることができる。結晶部は基板界面から膜表面近傍まで粒成長した大粒径Siである。基板界面で結晶核が発生し，膜上部へと固相成長が進行していることがわかる。また，結晶核の発生率が極めて低く，粒成長は膜厚方向に優先的に進むものと推察される。3時間以上の熱処理では，非晶質部はなくなり基板界面から膜上部に至る大粒径Siが隙間なく並んだ状態になっている。結晶粒界は

膜の上下方向に走っている。これら結晶化試料の大粒径Si粒内には数多くの転位が見られるが，熱処理時間の増大に伴って転位数が減少するという傾向がみられないことから，600˚Cの熱処理温度では結晶格子を再構成する（転位の移動のための）活性化エネルギーが与えられないことがわかる。

Fig. 2に，SiのTOフォノンのラマン分光スペクトルの熱処理時間依存性を示す。as-depo.状態では480cm^{-1}付近に非晶質Si特有のブロードなピークのみが見られる。1時間の熱処理では非晶質ピークのほかに520cm^{-1}付近に結晶Si特有の比較的シャープなピークが若干見られる。電子線・X線回折の結果を考慮すると，1時間の熱処理ではラマン分光で検出できる程度（30～75Å）の微結晶Siが存在していると考えられる。また，非晶質ピークは2時間の熱処理ではまだ見られるが，3時間以上の熱処理ではなくなり結晶ピーク強度の顕著な増加と低波数側へのピーク・シフトが認められ，引張応力の発生を伴う結晶化が急激に起こっていることがわかる。それぞれのピークの積分強度比から結晶化率を算出[6]すると，1時間の熱処理では結晶化率7vol%, 2時間では64vol%, 3時間以上では100%に近い状態となり多結晶化が進行しているものと推定される。ただし，この値はラマン分光の深さ分解能である膜表面から約0.3μm以内での結晶化率である。また，熱処理時間が長くなるに従って，結晶ピークの半値幅が徐々に小さくなり結晶性が良好になっていくことがわかる。

アドミッタンス測定から求めた電子の熱放出速度のアレニウス・プロットから，式(3)を用いて熱処理試料の粒界準位の各パラメータを算出した(**Table 1**)。**Fig. 3**(a)に，結晶化過程における300Kでの粒界準位のエネルギー状態分布を示す。粒界準位の各パラメータの熱的挙動は結晶性により2段階に分類できる。第1段階は（非晶質＋結晶子）

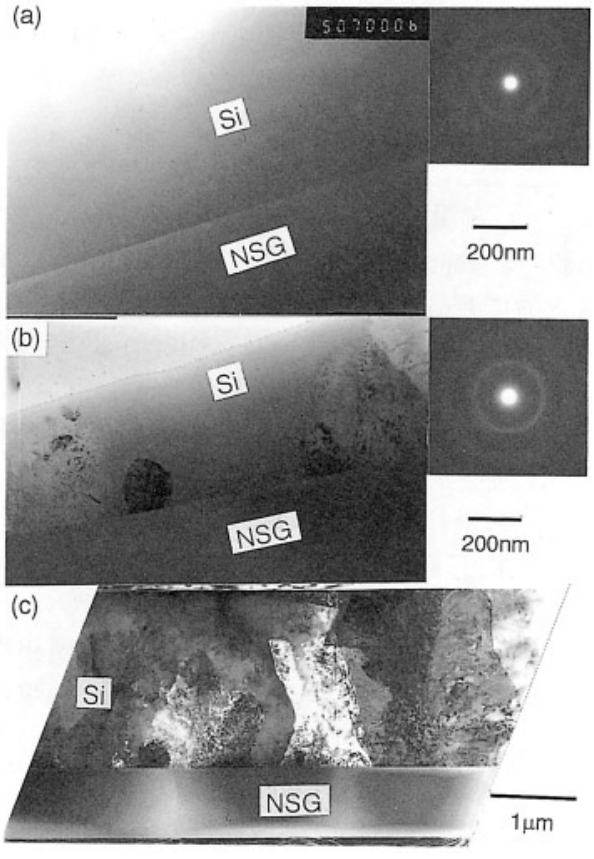

Fig. 1 Cross-sectional TEM images of the Si films. (a) 600˚C・1h, (b) 600˚C・2h, (c) 600˚C・12h

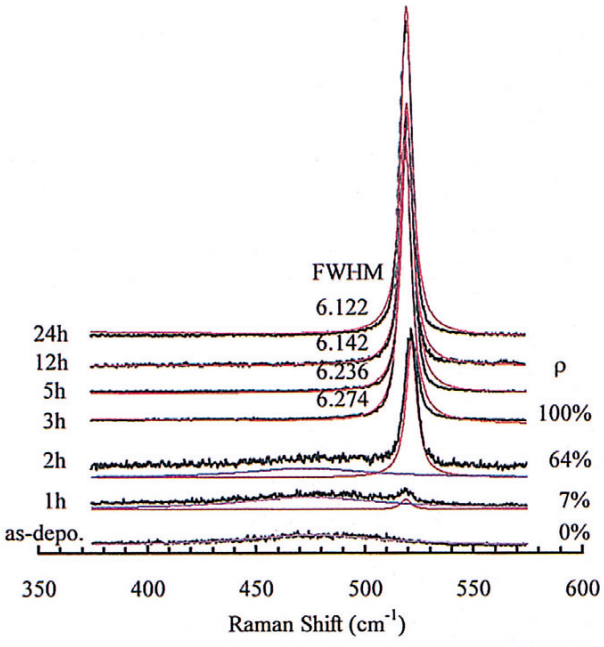

Fig. 2 Raman spectra of the Si films annealed at 600˚C for various time. The measured data (–) are fitted with one or two lorentzians (–. –).

が混在している結晶化初期過程であり多結晶化への過渡的状態に相当し，第2段階は多結晶状態に相当する。第1段階では粒界準位は結晶性の向上に従って伝導帯近傍からミッドギャップ近くまで深くなり準位密度も急激に増加することがわかる。第2段階ではミッドギャップ付近に局在した粒界準位は結晶性向上に伴い微深し準位密度は漸減する傾向がみられる。ここで，非晶質中に存在する結晶子の固相成長過程では結晶子表面でボンドの切断･再結合･再構成という過程を繰り返しながら粒成長することを考慮すると，第1段階では粒成長に伴う実質的な結晶子表面積の増加とボンドの再結合･再構成が支配的であり，第2段階では粒界面での歪増加とボンドの切断･再構成が支配的であると考えられる[7]。すなわち，粒界部の電気的構造は，第1段階では大きなボンド歪により強く局在化したバンドテールであるウィークボンド状態に相当し，第2段階ではダングリングボンド状態に相当するものと思われる。結晶化過程での粒界準位のキャリア捕獲断面積σ_nの急激な増加も結晶表面での構造変態を裏付けるものである。

４．２　再アニーリング挙動

Si膜を600˚C･12hの結晶化アニール後に再アニールする目的は，粒径を固定したまま高温度でアニールすることで粒径の効果を無視し純粋に結晶性の影響だけを取り出すことにある。再アニール前後のＸ線回折から，再アニールを行うとSi(111)のピーク強度比が小さくなり，(111)面の優先配向が弱まることがわかった。この傾向は再アニール温度が高くなるほど顕著に現れる。また，再アニール前後のラマン分光から，800˚Cの再アニールで結晶ピークが一旦低波数側へ大きくシフトし，さらに高温度の再アニールではそのシフト量が減少する傾向がみられた。このＵターン･シフトはSi膜内部の応力変化によるものである。この変化は，800˚Cの再アニールで一旦膜応力の緩和が起こり，さらに高温度の再アニールで逆に応力が加わっていくことを意味している。結晶ピークの半値幅から，高温度の再アニールは結晶粒内部だけでなく粒界部でも結晶性が向上していることがわ

Table 1 Survey of GBs states observed in the crystallized Si films annealed in various conditions.

Annealing condition	Gap position Ec-Egb (meV)	GBs trap density ($cm^{-2}\cdot eV^{-1}$)	Capture cross-section (cm^2)
as-depo.	----	----	----
600℃･1h	107	4.0×10^{12}	1.9×10^{-20}
600℃･2h	326	5.7×10^{12}	1.5×10^{-16}
600℃･3h	466	7.8×10^{12}	1.0×10^{-13}
600℃･5h	468	9.1×10^{12}	1.5×10^{-13}
600℃･12h	493	7.8×10^{12}	2.3×10^{-13}
600℃･24h	503	7.4×10^{12}	3.2×10^{-13}
800℃･1h *	351	6.2×10^{12}	2.3×10^{-15}
900℃･1h *	417	6.6×10^{12}	1.8×10^{-14}
1000℃･1h *	436	7.4×10^{12}	1.5×10^{-14}

*) second anneal after 600℃･12h

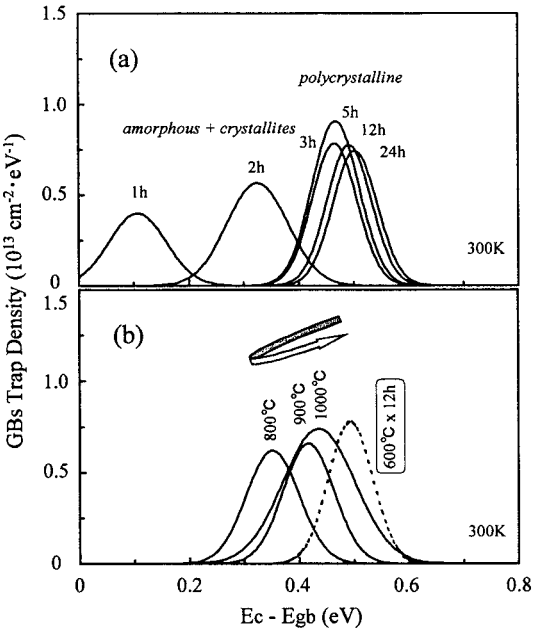

Fig. 3 Energy distribution of the GBs states in the crystallized Si films annealed in various conditions. (a) annealed at 600˚C for various time (b) second-annealed at various temperature after annealing at 600˚C for 12h

かる。再アニール前後試料のアドミッタンス測定から，粒界準位の深さE_c-E_{gb}及びキャリア捕獲断面積σ_nを算出した (Table 1)。再アニール温度の増大に伴ってE_c-E_{gb}及びσ_nにも膜応力と同様のUターン的な変化がみられる。Fig. 3(b)に，再アニール前後における300Kでの粒界準位のエネルギー状態分布を示す。粒界準位は800˚Cの再アニールで大幅に浅くなり準位密度も減少するが，再アニール温度が高くなるほど逆に深くなり準位密度も増加する傾向を示す。このような再アニールによる粒界準位の熱的挙動も，結晶表面での構造変化でうまく説明できる。多結晶Si粒界は，原子オーダー・レベルでは数原子層のアモルファスライクな層が結晶粒表面を覆い結晶粒界として機能していると考えられる。上述したように，再アニール前では粒界面はボンド再構成により大きなボンド歪みを有しているが，800˚Cの再アニールを行うと系全体のエネルギー安定性から粒界面のアモルファスライクなネットワーク構造全体の緩和が引き起こされ蓄えられていたボンド歪を解放する結果，粒界のダングリングボンド準位は一時的に浅いほうへシフトしたものと思われる。この粒界部での構造緩和のため，結晶粒同士の相対的な位置関係も安定化し，X線回折やラマン分光スペクトルにみられるSi(111)面の優先配向の弱体化やマクロ的な膜応力の緩和現象に繋がったと考えられる。900˚C・1000˚Cの再アニールでは，結晶質／結晶質界面に挟まれた非晶質ライクな相の結晶化に伴う粒界幅の縮小が急激に進むことで，粒界構造は非晶質相を介さない界面に近づくためボンドの再構成が起こりにくくなった状態であり，準位密度の低下は起こらなかったものと考えられる。以上から，粒界準位と膜応力のような機械的性質とは何らかの相関があることが予想される。

4．3　外部応力付与の影響

Table 2に，バルジ法の圧力－たわみ特性から求めた3水準のメンブレン多結晶Si膜の内部応力・ヤング率を示す。内部応力・ヤング率ともに熱処理温度に対し単調な変化を示す。この3水準の多結晶Si膜の外部応力の有無状態でのアドミッタンス測定を行い，粒界準位の各パラメーターを算出した。3水準の熱処理試料ともに，外部応力付与に伴い粒界準位深さ・キャリア捕獲断面積・粒界準位分布幅・準位密度といった各パラメータに変化が認められた。その中でも，粒界準位の深さに最も有意な差があった。**Fig. 4**に，3水準の多結晶Si膜の外部応力の有無状態での粒界準位深さの熱処理温度依存性を示す。外部応力がない状態では，粒界準位は600˚C > 700˚C > 1000˚Cの順に深くなるが，外部応力付与状態では1000˚C > 700˚C > 600˚Cの順に深くなるという正反対の傾向を示す。外部応力付与に伴う粒界準位の変化量は，1000˚C > 700˚C >600˚Cの順に大きく明確な差が認められる。ここで，粒界準位深さと機械物性値との関係

Table 2 Internal stress and Young's modulus in the crystallized Si films annealed in various conditions.

Annealing condition	Internal stress (MPa)	Young's modulus (GPa)
600℃・24h	391	132
700℃・2h	368	136
1000℃・1h	78.3	252

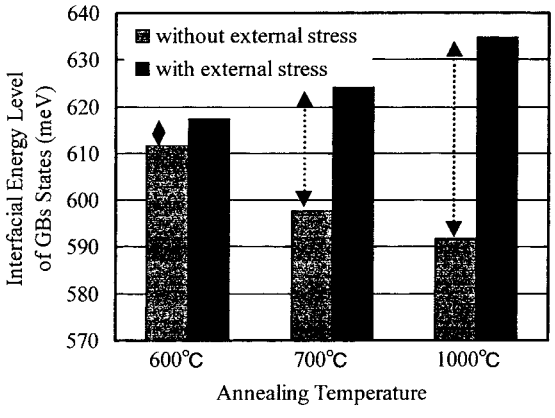

Fig. 4 Interfacial energy level of GBs states in the crystallized Si films annealed in various conditions with / without external stress of 300MPa.

をまとめる。**Fig. 5**に，外部応力付与に伴う粒界準位深さの変化量とヤング率の関係を示す。ヤング率が大きいほど粒界準位深さの変化量は大きくなることがわかる。これより，多結晶Si膜の粒界準位と機械物性値の間には，外部応力付与により粒界準位はエネルギー的に深くなり，そのシフト量はヤング率に依存する関係があることがわかる。

アドミッタンス法から得られる粒界準位の深さE_c-E_{gb}とは，粒界準位から伝導帯への電子の熱的放出エネルギーΔEであり，厳密にはフォノンが介在しているため光学的な粒界準位深さΔE_{opt}とフォノン介在分ΔE_{ph}（配位座標のずれ）の和に相当する。これら2つの項と機械物性値の関係では，粒界部の応力は粒界準位のk空間的な歪み（界面歪み）に影響するものでありΔE_{ph}に寄与するが，粒界部のヤング率は光学的バンドギャップに影響するものでありΔE_{opt}に寄与する。だだし、結晶粒界ではある程度の結晶性を有しているためΔE_{opt}の寄与度は比較的小さいと考えられる。粒界部の応力とヤング率は互いに密接な関係にあるため独立に扱えないが，外部応力がない場合，内部応力が大きいほどk空間的な歪みが増大するためE_c-E_{gb}は増大すると考えられる。また，外部応力付与に伴う粒界準位深さのシフト量は明らかに粒界部の応力増加によるものであり，ヤング率の差及び粒界層厚の差による粒界部での実効的な界面歪を反映しているものと思われる。したがって，同じ大きさの外部応力に対し大きなヤング率を有する粒界部ほど，局所的な界面歪が増大するため，E_c-E_{gb}は深くなったものと予想される。逆に，粒界部のヤング率が小さいほど粒界層はスポンジ的に働き，粒界での界面歪みは発生しにくくなると考えられる。

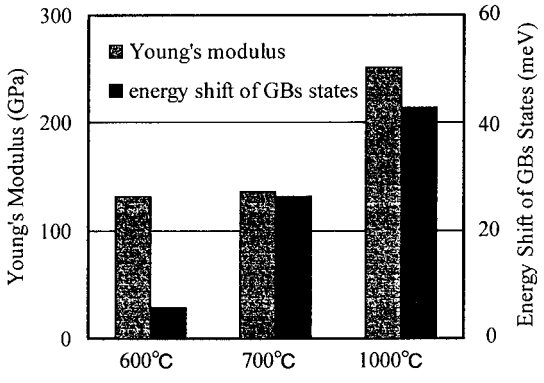

Fig. 5 Young's modulus and external stress induced energy shift of GBs states in the crystallized Si films annealed in various conditions.

5．まとめ

本研究では，原子オーダーの微少な構造変化でも明確に検出できる簡便な電気的評価法であるアドミッタンス法をSi結晶粒界に適用し，CVD法で成膜した非晶質Si膜の結晶化過程における粒界準位の発生およびその熱的な挙動を評価･解析した。また，ユニークな試みとして，異なる機械物性値を有する多結晶Si膜のメンブレンを用いて，外部応力の有無による粒界準位の挙動を評価し，粒界準位と機械的性質の関係について検討した。その結果，多結晶Si膜の粒界準位と機械物性値には相関関係があり，外部応力付与により粒界準位はエネルギー的に深くなり，そのシフト量はヤング率に依存することがわかった。これらの結果は，多結晶Si膜の疲労劣化現象のメカニズム解明に寄与するものと思われる。

謝辞

当所の佐藤敏一氏，鈴木教友氏には断面TEM観察において協力して頂いた。

参考文献

1) Kohyama, M. and Yamamoto, R. : Phys. Rev. B, **49**(1994), 17102
2) Kohyama, M. and Yamamoto, R. : Phys. Rev. B, **50**(1994), 8502
3) Lang, D. V., et al. : Phys. Rev. B, **25**(1982), 5285
4) Werner, J. and Peisl, M. : Phys. Rev. B, **31**(1985), 6881
5) Tabata, O., et al. : Sensors and Actuators, **20**(1989), 135
6) Tsu, R., et al. : Appl. Phys. Lett., **40**(1982), 534
7) Nakano, Y., et al. : Solid Sate Phenomena, **51-52**(1996), 205

著者紹介

中野由崇　Yoshitaka Nakano
生年：1966年。
所属：集積化デバイス研究室。
分野：半導体Deep Levelの評価・解析技術。
学会等：応用物理学会，Materials Research Society 会員。

井上敦子　Atuko Inoue
生年：1971年。
所属：機能デバイス研究室。
分野：薄膜物性評価。

土屋智由　Toshiyuki Tsuchiya
生年：1968年。
所属：機能デバイス研究室。
分野：シリコンマイクロマシニングとその応用デバイス，薄膜機械物性評価。
学会等：電気学会，日本金属学会，IEEE 会員。
1998年 R&D100 Award受賞。

坂田二郎　Jiro Sakata
生年：1954年。
所属：機能デバイス研究室。
分野：薄膜物性評価，材料から見た微細加工技術，センサ開発。
学会等：応用物理学会，日本化学会会員。
工学博士。

多賀康訓　Yasunori Taga
生年：1944年。
所属：第1特別研究室。
分野：薄膜物性の基礎研究と応用。
学会等：American Vacuum Society, Society for Information Display, IEEE, MRS 会員。
1998年 R&D100 Award受賞。
工学博士。