回転磁場および電流-磁場印加がCZ法融液流れの 過渡変化に及ぼす影響の数値解析

Numerical computation of transient melt flow under RMCZ and EMCZ method.

○学 本田 美由紀 (大分大院) 学 吉兼 憲一 学 阿部 雄太

正 齋藤 晋一 (大分大工) 正 岩本 光生

Miyuki HONDA, Kenichi YOSHIKANE, Yuta ABE, Shinichi SAITO, Mitsuo IWAMOTO,
OITA University, 700 Dannoharu, Oita-shi

Key Words: Rotational magnetic field, Electro magnetic field, Czochralski melt flow, Numerical computation

1. 緒言

半導体基板に用いられるシリコン単結晶は主にチョクラスキー法(CZ法)により製造されており、CZ法は図1に示すように、石英ルツボ内に原料となる高純度の多結晶シリコンを充填し、ルツボ周囲に設置したヒーターで加熱融解し、融液上部に単結晶の元となる種結晶を降ろし、種結晶と同じ方位を持つ大口径のシリコン単結晶を成長させる方法である。このとき融液内には、結晶界面とルツボの温度差に起因する自然対流と、結晶回転により生じる強制対流による流れが共存している。この流れによりルツボから融け出る酸素が結晶成長界面に運ばれ、この濃度は育成した結晶品位を左右するため、ルツボ内の流れの制御が必要となる。現在結晶の大口径化に対応し、シリコン融液に磁場を印加することにより流れを制御する水平磁場印加チョクラスキー法(MCZ法)が用いられている。しかしこの方法では、流れの安定化には有効だが融液内に非軸対称な温度・濃度分布が形成されることが報告されている[1][2]。これに対し、水平磁場が時間とともに回転する回転磁場(RMCZ法)や、垂直磁場を印加した状態でルツボ中心から側面に電流を印加する電流-磁場印加法(EMCZ法)が提案されており、これらの方法では周方向のローレンツ力を発生させ、これより生じる旋回流による遠心力により流れを制御する。我々は先に[3]、ガリウムを用いたモデル実験によりRMCZ法やEMCZ法融液内流れを超音波流速計(UVP法)により測定したが、超音波進行方向の一次元的な流れの分布の測定であり、ルツボ全体の流れ構造や温度分布の詳細は不明である。このため本研究では数値解析的に回転磁場や電流-磁場印加がCZ法融液流れに及ぼす影響を検討した。

2. 解析モデル

図2,3にRMCZ法とEMCZ法の解析モデルを示す。まず図2のRMCZ法では、下部の円筒が融液であり側面および底面が加熱され、上部円柱が冷却された結晶棒であり、一定角速度で回転している。融液には側面より水平磁場が印加され、これが Ω_B の角速度で回転している。次に図3のEMCZ法では、垂直方向の磁場を印加した状態で、中央の電極から周辺の電極に電流を印加し周方向のローレンツ力を発生させた。

計算は三次元円筒座標を用い基礎式は、連続の式、運動方程式、エネルギー方程式を用い、対流項は三次精度風上差分、拡散項は4次精度中心差分、圧力項はHS-MAC法を用いて、陽的には離散化した。この系に外力としてローレンツ力が働くものとした。

3. 結果と考察

解析条件は佐藤[3]の実験に対応し、RMCZ法では水平磁束密度Bと磁場回転数 N_B 、EMCZ法では垂直磁束密度B

Fig.1 The flow pattern in the CZ system. Fig.2 The model system of the RMCZ method.

Fig.4 Temperature, velocity and Lorentz force distribution for

と印加電流 I を変化させた。

図4にRMCZ法における $B=3.0\text{mT}$, $N_B=-10\text{rpm}$ における結果を示す。図3(I)は図2のJ位置における温度の時間変化であり周期的な変動がみられ、この一周期の中の時刻BとDの結果を図4(II), (III)に示す。図4(II)はルツボ水平および垂直断面の温度、速度分布を示しており、時刻(B)の垂直断面ではルツボ中央を横切る反時計回りの大きな流れがみられ、水平断面を見るとこれが時計回りに回転しており、時刻Dではこれが半周するため、縦断面では時計回りの流れとなった。このときローレンツ力を図4(III)に示す。時刻(B)の水平断面を見ると、時計回りのローレンツ力が見られたが、水平断面の黒線の角度の垂直断面を見ると、この時刻では磁場と面が平行であるためローレンツ力は見られないが、時刻(D)では磁場の回転により、ルツボ壁面に均等に周方向のローレンツ力が印加されていることがわかった。

図5にEMCZ法における $B=11.9\text{mT}$, $I=0.18\text{A}$ での結果を示す。図5(I)は図3のK位置における温度の時間変化でありRMCZ法と同様な周期的な温度変動がみられた。このときのルツボ内の流れも同様に、中央を横切る片流れが回転しているが、ローレンツ力は常に時計回りに印加され、また融液上部の電極付近に大きなローレンツ力が生じている。

図6はRMCZ法およびEMCZ法における B や N_B , B と I を増加させた場合のローレンツ力の変化を示しており、ローレンツ力は左図のRMCZ法では $B^2 N_B$, EMCZ法では $B \times I$ で増加する[3]。このためRMCZ法ではルツボ壁付近のローレンツ力が増加することにより周方向の流れが生じ、また右図のEMCZ法では融液上部の電極付近のローレンツ力が I や B の増加とともに大きくなり、さらにCase(b3)のルツボ底面には、横方向の流れと磁場により生じる誘導電流によりローレンツ力が発生することがわかった。

図7にローレンツ力と速度変動周期 τ の逆数の関係を示しており、 $1/\tau$ は流速に対応している。まず図7(a)のRMCZ法では $B^2 N_B$ が-40付近では結晶回転方向による遠心力とローレンツ力が釣り合っているが、+方向に増加させると結晶回転方向の流れとなり、マイナス方向に増加するとローレンツ力印加方向の流れが発達した。次に図7(b)のEMCZ法では、 $B \times I$ で示されるローレンツ力は結晶回転方向と逆方向に印加されるため、 $B \times I=1.6$ 付近を境にしてそれ以下では結晶回転方向の回転、それ以上ではローレンツ力印加方向の流れとなった。

4. 結言

- (1) RMCZ法およびEMCZ法において融液内に周期的温度変動が見られ、これは中央を横切る片流れの回転により生じることが示された。
- (2) RMCZ法において、ローレンツ力は主に壁付近に強く作用し、またEMCZ法では上部電極付近に強く作用し、この力は I や B , N_B の増加とともに増加した。
- (3) RMCZ法およびEMCZ法においてローレンツ力を変化させることにより、流れの方向や強さを制御できることが示された。

【参考文献】

- 1) M. Akamatsu et al., Numerical prediction on heat transfer phenomenon in paramagnetic and diamagnetic fields, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 14, 2, (2004), pp. 1674-1681
- 2) 岩本光生, 松久純, 赤松正人, 尾添徳之, Cz法融液内温度振動におよぼす回転磁場の影響, 化学工学学会論文集, 35巻5号(2009-10), pp. 425-430.
- 3) Daiki Satou et al., Measurement of transient velocity and temperature in the Cz melt under the rotational magnetic field, The 25th International Symposium on Chemical Engineering (201) No. OG-02, PP. 1-2

〒870-1192 大分市大字旦野原 700 番地
TEL. 097-554-7806 FAX 097-554-7790
E-mail: iwa@oita-u.ac.jp

Fig.5 Temperature, velocity and Lorentz force distribution for $B=11.9\text{mT}$, $I=0.18\text{A}$ (EMCZ)

Fig.6 Lorentz force distribution in the melt in the vertical cross section.

Fig.7 The inverse of oscillation period versus Lorentz force.