

639 微小重力環境下での化合物半導体材料プロセッシングにおける諸移動現象の数値解析

Numerical Simulation of Transport Phenomena in processing of the compound semiconductor under the microgravity

○ 梅村 鎮基 (静大院) 鈴村 貴弘 (静大院) 鈴木美穂子 (静大学) 正 岡野 泰則 (静大工)

Shigeki UMEMURA, Takahiro SUZUMURA, Mihoko SUZUKI, Yasunori OKANO
Department of Materials Science & Chemical Engineering, Shizuoka University,
Johoku 3-5-1, Hamamatsu 432-8561

【1. 緒言】

筆者らは以前、中国回収衛星を利用し、微小重力環境下における溶融・凝固実験を行った。この実験結果より地上実験試料に比べ、微小重力実験試料の再結晶領域における組成比はより均一であることが示された^[1]。これは微小重力下では地上と比較し、重力が小さいため、密度差による対流が生じ難いことによる。しかし、微小重力実験試料においても僅かに組成比の揺らぎが生じた。これは微小重力下においても僅かな重力(残留重力)が存在し、さらには g-jitter と呼ばれる重力の揺らぎ現象が存在することによると考えられる。これらは融液内に対流を引き起こし、固液界面形状や組成比などに影響を及ぼす可能性があり、高品質な結晶を得るためには生じた対流が及ぼす影響について調べる必要がある。そこで本研究では重力の揺らぎが融液内対流に及ぼす影響について数値解析を行った。

【2. 解析方法】

最初に溶融モデルを用いた解析結果を示し、融液内における g-jitter が及ぼす影響を明確にするため、次に矩形モデルによる解析結果より論じた。なお、g-jitter は以下の式により与えた。

$$g = \{0.5\sin(2\pi\omega t - 0.5\pi) + 0.5\}g_a$$

g; 重力加速度、 ω ; 周波数、t; 時間、 g_a ; 振幅

2-1 溶融モデル

溶融解析におけるモデル図を Fig.1 a) に示す^[1]。解析領域は対称軸より半分のみとし、二次元矩形とした。るつぼ壁における温度分布は対称軸上で最高温度(T_H)、領域の端で最低温度(T_C)とした一定温度勾配を維持したまま 1.0[K/min]で温度上昇させた。連続式、Navier-Stokes 式、エネルギー方程式、拡散方程式を無次元化し、境界固定法により座標変換を行った後、有限差分法で解析を行った。初期値は $T_H=810$ [K]、 $T_C=763.3$ [K]の熱伝導のみより決定した温度分布を用いた。物性値には、結晶に GaSb、溶液に InSb、るつぼに石英を用いた。固液界面は InSb-GaSb 擬似二元相図により濃度、熱のバランス式を用いて決定した。

2-2 矩形モデル

矩形モデル図を Fig.1 b) に示す。解析は二次元及び三次元で行い、残留重力を考慮し、温度分布については一つの面を 810[K]、これに対する面を 798[K]、他の面は断熱条件とした。物性値には InSb を用い、不純物として濃度には GaSb を使用した。解析式には溶融モデルと同様に連続式、Navier-Stokes 式、エネルギー方程式、拡散方程式を用い、HSMAC により解析を行った。

【3. 結果及び考察】

Fig.2 に溶融モデルにおいて g-jitter の周波数を変化させた

場合の結果を示す。なお、 $g_0=9.8$ [m/s²]とする。g-jitter は下方向に発生するとし、初期値には無重力で 50 分後の結果を用いた。周波数の異なる(a)と(b)を比較すると、小さい周波数の(a)は流れの変化が大きいことがわかる。また、振幅の小さい場合(amplitude: $10^{-4}g_0$)では、ほとんど流れは誘起されなかった。

対流に及ぼす g-jitter の影響を詳しく調べるため、矩形モデルを使用し、二次元及び三次元の解析を行った。二次元矩形モデルによる解析結果を Fig.3 に示す。解析は微小重力下 ($10^{-4}g_0$) で 30 分後の解を初期値とし、縦方向に g-jitter が加わった場合を想定した。Fig.3 において(a)は濃度分布を(b)(c)において上段は速度ベクトル、下段は濃度分布を示す。溶融モデルの結果と同様に低周波数である(b)の結果は流れが揺らいでいることが分かる。また、g-jitter が存在しない場合(a)では濃度分布は拡散支配であるが、g-jitter が存在する場合(b,c)では流れに対応して等濃度線に歪みが生じた。この解析における無次元速度の最大値変化を Fig.4 に示す。周波数が 0.01Hz の場合では重力変化に対応して流れも大きく変化しているが、周波数が 1Hz の場合、流速は g-jitter 発生から約 100 秒まで単調増加し、その後ほぼ一定となった。g-jitter が無い場合と比較すると流速は極めて大きく、周波数に関わらず g-jitter の存在により融液内に対流を引き起こすことが分かった。

次に g-jitter の発生方向に対する影響を調べるため三次元解析を行った。Fig.5 は g-jitter 発生から 60 秒後の結果を示し、周波数は 0.01Hz、振幅は $10^{-2}g_0$ とした。x 方向、z 方向に g-jitter が発生した場合ではその方向に対応して流れが生じたのに対し、y 方向に発生した場合では流れに影響は見られなかった。即ち、これより融液内の温度勾配に対して平行に g-jitter が加わった場合では流れに影響を及ぼさないが、垂直に加わった場合では対流を引き起こすことが示された。

落下塔実験を想定し、定常状態(30分後)から重力を $1g_0$ から 1 秒間で $10^{-4}g_0$ まで減少させた場合の結果を Fig.6 に示す。これより約 70 秒まで流速が減少しており、落下塔実験では流れが僅かに残留する可能性を示唆する結果となった。

【4. 結言】

- 低周波数の g-jitter は重力変化に対応して流れも変化するのに対し、高周波数では流れが単調に増加し、その後一定となった。
- 温度勾配に対し、平行に g-jitter が加わった場合では流れに影響を及ぼさないが、垂直に発生した場合では対流を引き起こした。
- 重力を $1g_0$ から $10^{-4}g_0$ まで変化させた解析では約 70 秒までは流れが僅かに残留する可能性が示唆された。

[5. 引用文献]

[1]Y.Hayakawa, Y.Okano et al., J. Crystal Growth. 213 (2000) 40-50.

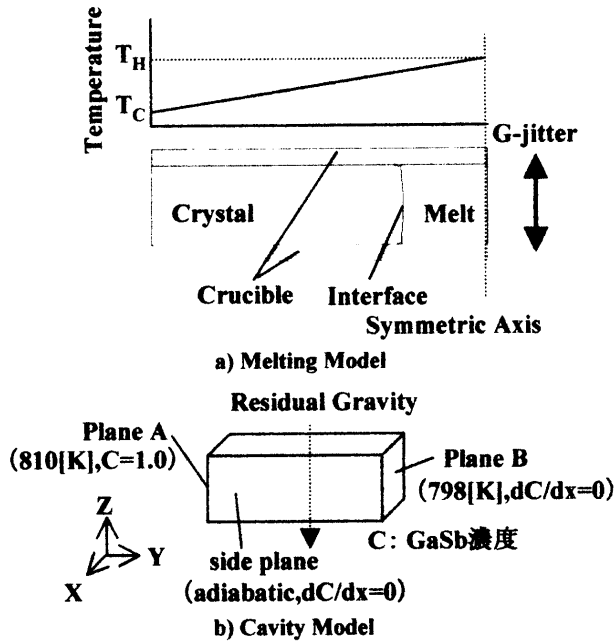


Fig.1. Configurations for the analysis

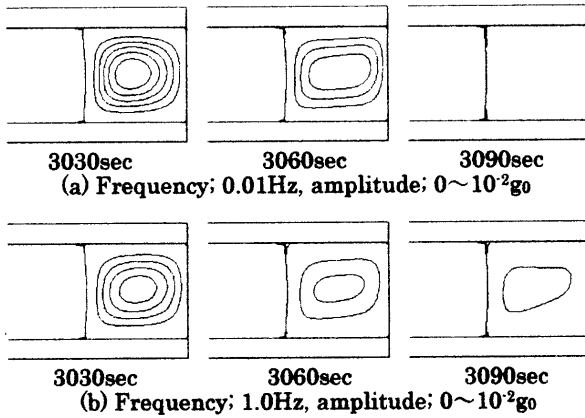


Fig.2 Effect of frequency on the flow in the melting model ($\Delta \phi = 0.005[-]$)

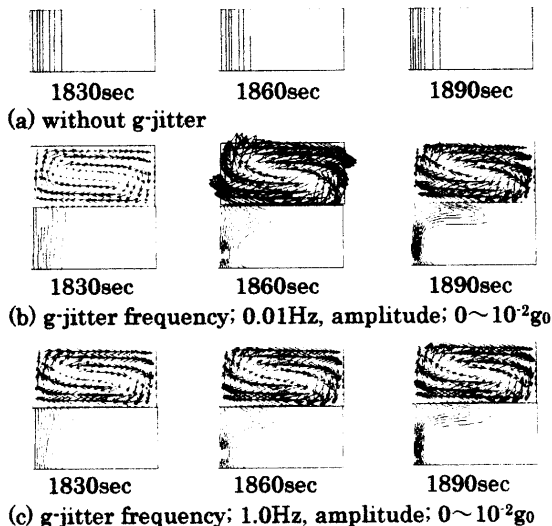


Fig.3 Effect of frequency on the flow and concentration in the cavity model ($\Delta C = 0.1$, residual gravity; $10^{-6}g_0$)

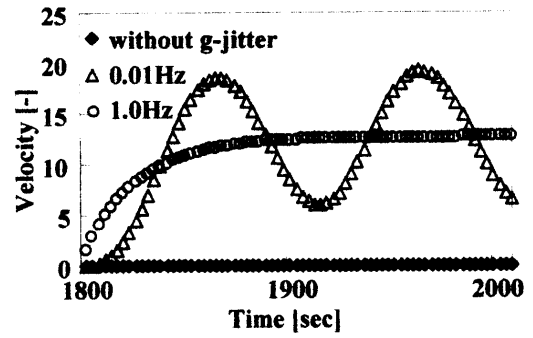


Fig.4 Effect of g-jitter on the change of maximum velocity (g-jitter amplitude; $0 \sim 10^{-2}g_0$, residual gravity; $10^{-6}g_0$)

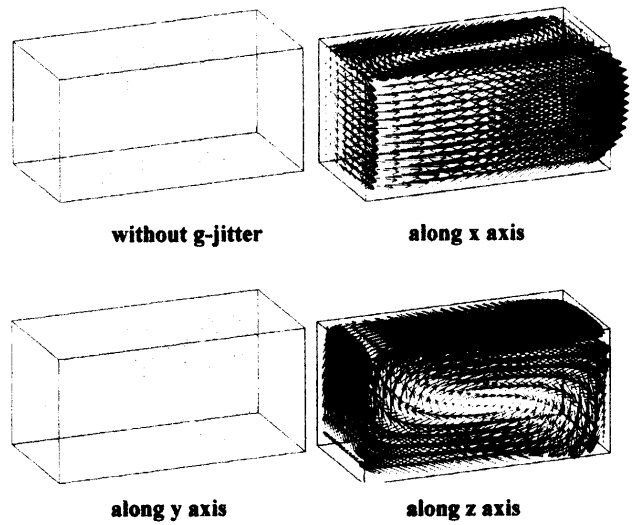


Fig.5 Effect of g-jitter direction on the flow (60sec, residual gravity; $10^{-4}g_0$)

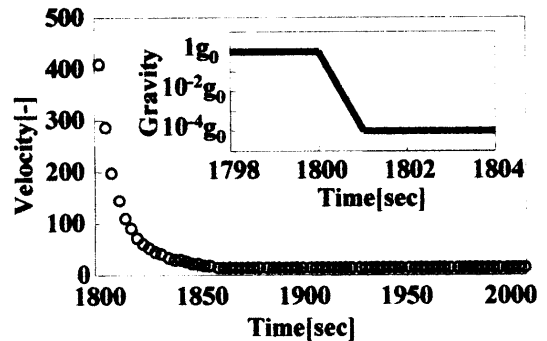


Fig.6 Maximum velocity with gravity changing from $1g_0$ to $10^{-4}g_0$