

THE IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会
論文誌 エレクトロニクス

VOL. J106-C NO. 1

JANUARY 2023

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

エレクトロニクスソサイエティ

一般社団法人 **電子情報通信学会**

THE ELECTRONICS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

無電極ランプを熱源とした加熱装置によるリンイオン注入 300 mm 径シリコン基板の活性化

宮崎 智由^{†,††a)} 鮫島 俊之[†] 齋藤 宗平[†] 小野寺 航[†]
 上原 琢磨[†] 有馬 卓司[†] 蓮見 真彦[†] 小林 剛^{†††}
 芹澤 和泉^{†††} 久保 若奈[†] 上野 智雄[†]

Activation of Phosphorus Implanted Silicon Substrate with a Diameter of 300 mm by a Heating System using a Wireless Lamp as the Heat Source

Tomoyoshi MIYAZAKI^{†,††a)}, Toshiyuki SAMESHIMA[†], Sohei SAITO[†], Ko ONODERA[†], Takuma UEHARA[†], Takuji ARIMA[†], Masahiko HASUMI[†], Go KOBAYASHI^{†††}, Izumi SERIZAWA^{†††}, Wakana KUBO[†], and Tomoo UENO[†]

あらまし 長さ 330 mm, 55 本の無電極カーボンヒーティングチューブ (CHT) の加熱ユニットを備えた 2.45 GHz マイクロ波誘導加熱装置を開発し, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のリン原子を注入した 300 mm 径シリコン基板の均一熱活性化を試みた. 直径 330 mm のキャビティ内のマイクロ波電界強度分布の最適化のためにプロペラ型変調角速度回転アンテナを導入した. 数値計算により変調角速度の最適化を行った結果, 5.3 kW のマイクロ波を照射した場合, 電界強度分布の平均 2 乗偏差は 3.1 kV/m と, アンテナなしの場合の 7.4 kV/m から大幅に低減した. 最適化したプロペラ型変調角速度回転アンテナを用いたマイクロ波照射により CHT を 800°C で 170 秒発熱したときリン注入基板は加熱され, シート抵抗が 60 から 80 Ω/sq の範囲に減少した. 300 mm 径基板面内の平均活性化率 0.77, その平均 2 乗偏差 0.05 を得た. これに対し, アンテナなしで加熱した場合の平均活性化率とその平均 2 乗偏差は 0.73 及び 0.06 だった.

キーワード マイクロ波, アンテナ, カーボン, CHT

1. ま え が き

電界効果トランジスタ, 薄膜トランジスタ, pn 接合ダイオード, 太陽電池等の多くの半導体デバイス製造に, イオン注入不純物の活性化が重要である [1]. これまで, レーザーアニーリング, プラズマジェットアニーリング, 急速サーマルアニーリングなど, 多くの加熱技術が開発され, 実用化されてきた [2]~[4]. 我々は最

近, 石英管内に導電性カーボン粉末を充てんしたカーボンヒーティングチューブ (CHT) 無電極ランプと CHT を備えたマイクロ波誘導加熱システムを開発した [5]~[9]. 導電性カーボンは, 低比熱と高耐熱性という優れた熱特性を備え, フリーキャリア吸収効果によってマイクロ波を効率的に吸収し, 速やかに高温に発熱する [10]. これまでに我々は, 長さ 60 mm, 内径 4 mm, 外径 6 mm の単一 CHT を使用し, 200 W の低電力でのマイクロ波照射により 1200°C 以上の発熱を実証した. また, proportional-integral-differential (PID) 制御により, マグネトロン電源出力をコントロールして 1100°C の一定加熱温度制御を達成した. そして, 直径 4 インチのガラス基板上に形成した厚さ 58 nm のアモルファスシリコン (a-Si) 薄膜上を, CHT を掃引移動させることにより a-Si 膜の加熱結晶化を達成し, 0.92 の高い結晶化率を得た. 更に, $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ のリン及びボ

[†] 東京農工大学工学部, 小金井市

Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, 184-8588 Japan

^{††} テクノリサーチ株式会社, 小金井市

Techno Research, Ltd., 2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, 184-0012 Japan

^{†††} 株式会社オーク製作所, 茅野市

ORC MANUFACTURING Co., Ltd., 4896 Tamagawa, Chino-shi, 391-0011 Japan

a) E-mail: miyazaki-tom@tec-research.co.jp

DOI: 10.14923/transelej.2022MWP0003

ロン原子をイオン注入した厚さ $500\ \mu\text{m}$ の n 型シリコン基板を CHT で加熱してドーパントを活性化し、PN 接合の整流特性とソーラーセル特性を得た [6], [7]. その後、大面積基板の加熱を実現するために長さ 330 mm の CHT ロッドを 55 本並べた $330 \times 330\ \text{mm}^2$ CHT 加熱ユニットを開発した [8]. 800 から 1000°C の高温加熱を実現したが、キャビティ内の三次元フレネル干渉効果によって引き起こされたマイクロ波強度の分布による不均一加熱の問題が残った. この問題を解決するために、キャビティ内に回転アンテナを導入したマイクロ波の空間平均強度均一化を提案した [9]. 本論文では、まず回転アンテナ付 CHT 加熱システムの詳細を報告する. CHT 加熱ユニット、マイクロ波キャビティ、回転アンテナの構造について説明する. 次に、キャビティ内のマイクロ波の電界強度の数値計算結果を報告する. マイクロ波の電界強度の均一化を達成するためのアンテナの適切な構造、変調回転モードについて議論する. 次に、直径 300 mm のシリコンウェーハにイオン注入したリン原子の熱活性化について報告する. 変調回転アンテナを用いた、より均一な基板面内シート抵抗分布を報告する. 最後に、活性化率について議論する.

2. 実験と計算方法

2.1 CHT 加熱装置

図 1 に、(a) CHT 加熱装置の立体的概念図、(b) 回転アンテナの概念図、(c) 単一 CHT の概念図、(d) CHT 加熱ユニットの概念図を示す. 図 1 (a) に示すように、CHT 加熱装置はステンレス鋼で作られ、上部が試料室、CHT 加熱ユニット、マイクロ波キャビティからなり、下部はマイクロ波導入部、アンテナ導入及び回転機構からなる. 波長 700 nm の放射温度計 KEYENCE FT-H40K 測定用の小さな穴をあけた試料室の上蓋を取り外して試料を CHT 加熱ユニット上に置く仕様であり、試料室の高さは 70 mm とした. CHT 加熱ユニット設置用の長方形ステンレス枠前面は着脱式の扉とした. CHT 加熱ユニット下部の円筒形キャビティは直径 330 mm、高さ 198 mm とした. 底面に導波管を 2 個設置し、2 台のマグネトロンから最大強度 6 kW の 2.45 GHz マイクロ波を導入した. キャビティとマグネトロンの間にインピーダンス整合ユニットを取り付けて反射波を抑えた. キャビティと導波管は電氣的に接地した. 更に、キャビティ内にアンテナを設置した. キャビティ底面の中心にあけた小さな穴を通

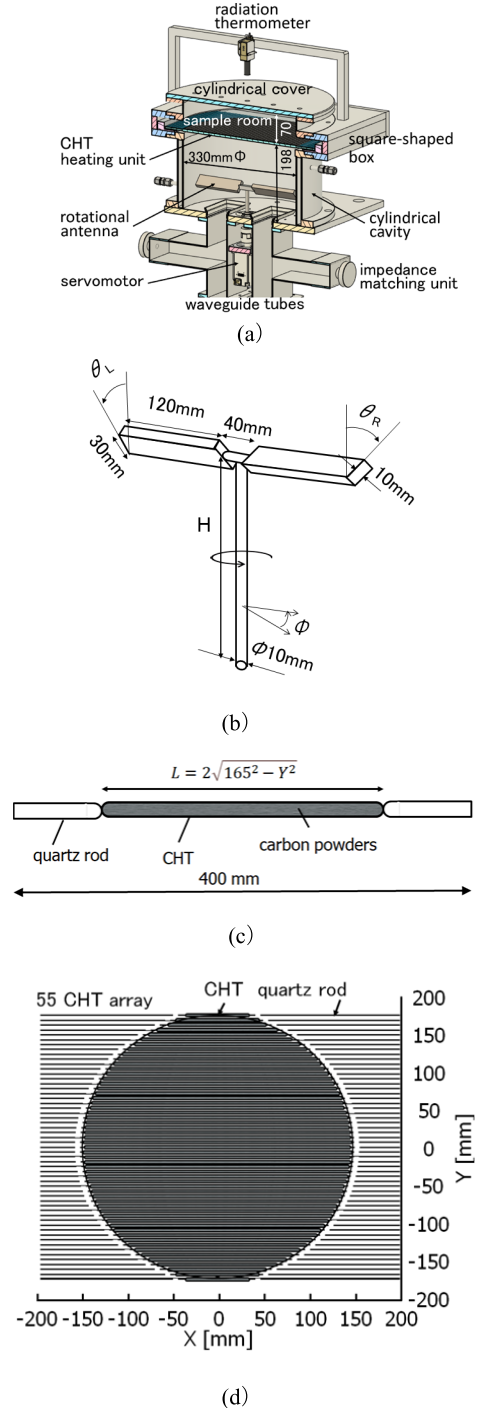


図 1 (a) CHT 加熱装置の立体的概念図、(b) 回転アンテナの概念図、(c) 単一 CHT の概念図、(d) CHT 加熱ユニットの概念図

してステンレス製の直径 10 mm のセンターポール取付け、図 1 (b) に示すように、幅、長さ、厚さがそれぞれ 30, 120, 10 mm の二つの水平方向に伸びるステンレス鋼ブレードをセンターポールに取り付けた。キャビティ底部とブレードの中心との距離（アンテナ高さ H ）は 55（最小）、100, 155 mm とした。そして、左右のブレードをそれぞれ $-60, -45, 45, 60$ 度傾けた場合について検討した。センターポールはセラミックを介して電氣的に絶縁し、最大 3 Hz の周波数可変を可能にするサーボモータに接続した。アンテナの回転周期は 1 秒とした。図 1 (c) に示すように、先行研究 [8], [9] から CHT は外径 6 mm, 内径 4 mm の石英管とし、 $5 \mu\text{m}$ 径のカーボン粉末を密度 0.12 で充てんした。これは、平均導電率 73 S/m の導電体に相当する。石英管に不活性ガス Ar を圧力 1400 Pa で充てんし、両端を封止し、その後、CHT を保持する 2 本の石英棒を両端に熱溶接した。CHT 加熱ユニット形成のために、図 1 (d) に示すように、55 本の CHT ロッドを接して配置し、長方形のステンレスフレームに設置した。各 CHT の長さは、円筒形キャビティの上面の直径 330 mm の円形領域をカバーするように調整した。すなわち、CHT の長さ L を中央位置 ($Y = 0$) で最大 330 mm とし、エッジ領域に近づくにつれて位置 Y の関数として $L = 2\sqrt{165^2 - Y^2}$ とした。全長を 400 mm に保つように CHT の長さの変化に伴い、石英ロッドの長さを調整した。

2.2 数値計算

マイクロ波照射中のキャビティ内の電界強度を調査するために、3次元有限要素モーメント法による数値解析を行った [11]。キャビティ等の金属部分は完全導電体でありマイクロ波を完全反射すると仮定し、導電率 73 S/m の CHT のみにマイクロ波が吸収されるとした。キャビティ及びサンプルルーム内面、導波管の界面、回転アンテナの外表面、及び CHT 外表面に 1~4 mm の三角形要素の有限要素グリッドシステムを作成して計算を行った。予備的計算により本条件で 7% 以内の誤差で電界強度を計算できると見積られた。まず、アンテナなしの場合についてキャビティ内のマイクロ波電界強度分布を計算した。次に、回転アンテナを導入して計算を実施した。アンテナの H が 55, 105, 155 mm, ブレードの角度 θ_L 及び θ_R がそれぞれ $-60, -45, 45, 60$ 度の条件について計算した。各条件において、アンテナの回転角度 ϕ を 10 度ごとに 0 から 350 度まで 36 通りの計算を行った。そして、回転角度 $\phi_i (= 10i)$ の

ときの重み a_i を導入して電界強度の加重平均分布を計算し、電界強度の最も均一になる条件を調査した。CHT 加熱ユニット直下の電界の平均分布 $E_{av}(x, y)$ は以下のように与えられる。

$$E_{av}(x, y) = \sum_{i=0}^{35} a_i E_i(x, y) \quad (1)$$

ここで、 $E_i(x, y)$ は角度 ϕ_i における CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布であり、 $\sum_{i=0}^{35} a_i = 1$ を規格化条件とした。0 から 350 度までの全ての回転角に対して、同じ重み $a_i (= 1/36)$ の場合は、 $E_{av}(x, y)$ は単純な加重平均分布となり、アンテナが一定速度で回転した場合に相当する。更に、空間平均電界強度 E_{AV} とその平均 2 乗偏差 (RMSD) E_{RMSD} を、直径 330 mm の円形領域 S にわたって $E_{av}(x, y)$ を積分することによって定義した。

$$E_{AV} = \frac{1}{S} \iint E_{av}(x, y) dx dy \quad (2)$$

$$E_{RMSD} = \frac{1}{\sqrt{S}} \sqrt{\iint (E_{av}(x, y) - E_{AV})^2 dx dy} \quad (3)$$

$\sum_{i=0}^{35} a_i = 1$ と回転周期 1 秒の条件により、角度 ϕ_i のときのアンテナの回転角速度 ω_i と a_i の関係は以下のような。

$$\omega_i = \frac{\pi}{18a_i} \quad (4)$$

更に最大周波数 3 Hz から、 ω_i の上限が以下のように定まる。

$$\omega_i^{max} = 6\pi \quad (5)$$

そして ω_i の下限は以下のように与えられる。

$$\omega_i^{min} = \frac{2\pi}{36} \left(1 - \frac{1}{6\pi} \times \frac{35}{36} \times 2\pi \right)^{-1} = \frac{6\pi}{73} \quad (6)$$

E_{RMSD} を最小にする ω_i の組を ω_i^{min} と ω_i^{max} の間で調べ、決定した。

2.3 試料準備

直径 300 mm, 厚さ 700 μm , 抵抗率 1000 Ωcm を超える半絶縁性 n 型単結晶シリコン基板を準備した。基板表面にリン原子をドーズ量 $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, 加速エネルギー 70 keV でイオン注入した。試料を CHT 加熱ユニットに配置し、5.3 kW のマイクロ波出力で 300 秒間加熱した。温度 T は初期 30°C から時間 t (s) に対

しおおむね $T = 110 \times t^{0.4} + 30$ (°C) となり, 130 秒後に 800°C に達し, その後マイクロ波電力を調整して約 800°C で一定に保った. その間, アンテナは前節の数値計算から得られた最適な変調角速度パターンを用いて 1 秒周期で回転させた. 比較のため, アンテナなしで同条件の加熱を施した試料を用意した. 4 探針プローブ電圧測定システムを用いて試料面上を 10 mm 間隔で合計 693 ポイント測定してシート抵抗率分布を得た.

3. 結果と考察

図 2 に 5.3 kW のマイクロ波照射, アンテナなしの条件下での CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布計算結果を示す. E_{AV} は CHT による吸収により 12.4 kV/m と低い値であり, $330 \times 330 \text{ mm}^2$ の正方形形状 CHT 加熱ユニットを用いた先行計算と同レベルであった [8]. ただし, 先行研究は 3 kW のマイクロ波照射時の計算であり, 本研究の 300 mm 円形 CHT ユニットの用いた加熱システムの方が CHT 吸収によるキャビティの全領域の電界強度を減少させる効果が高かった. しかし, 図 2 に示したように, 電界強度に独特の空間分布が見られた. 中央領域の電界強度は 7.3 kV/m 未満と低かったが, 周辺に 7.3~21.9 kV/m の高い電界強度スポットが 4 箇所見られた. 3 次元フレネル干渉効果によって引き起こされるマイクロ波定在波の存在を示している. そして, キャビティ端では 51.1 kV/m に至る高い電界強度となり, E_{RMSD} は 7.4 kV/m であった. 電界強度が高い領域は CHT ユニットのマイクロ波の吸収が低いことを示しており, 電界強度空間分布に伴う CHT の不均一温度分布の可能性を示唆している. キャビティ断面は X 軸と Y 軸に対称な構造であるが,

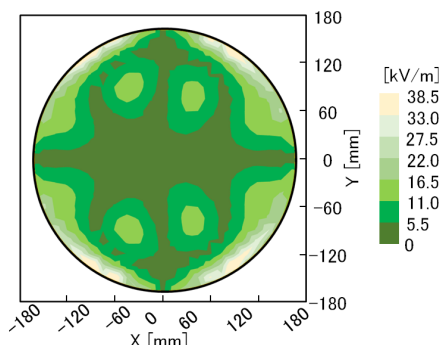


図 2 アンテナなしの場合の CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布

図 2 に示す電界強度計算結果は完全な対称にはならなかった. それは, 有限要素数値計算の計算誤差によるものと思われる. 図 3 に本研究で最も低い E_{RMSD} が得られたアンテナの条件, $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_L = 45$ 度, $\theta_R = -45$ 度で, アンテナの回転角度 ϕ を 0 から 350 度まで変化させたときの CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布の計算結果を示す. 電界強度分布は角度によって変化し, ϕ が 90 及び 270 度のときに低い電界強度が観察された. 一方, ϕ が 20, 30, 130, 160, 200, 210, 310, 及び 340 度のときに, 電界強度の高いドメインが観測された. これは, フレネル干渉効果がアンテナの回転角度によって変化することを明確に示している. 電界強度の分布はおおむね 180 度の周期で変化した. これは, $\theta_L = 45$ 度, $\theta_R = -45$ 度のアンテナを備えた円筒形のキャビティ断面が点対称な構造であることによる. しかし, 各角度の電界分布には計算誤差があり, 完全に点対称な結果とはならなかった.

次に, 最小の E_{RMSD} を得るために, 角速度 ω_i の最適シーケンスを調査した. 図 4 に最小の $E_{RMSD} = 3.1 \text{ kV/m}$ が得られた $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_L = 45$ 度,

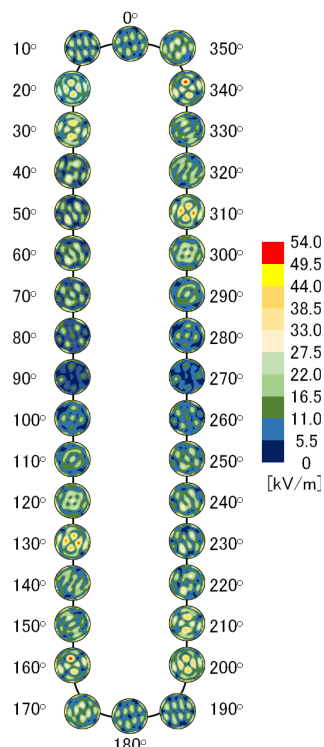


図 3 $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_L = 45$ 度, $\theta_R = -45$ 度アンテナ条件における回転角度 0~350 度の電界強度分布

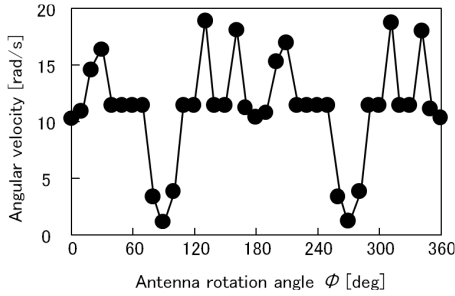


図4 最小 E_{RMSD} が得られた $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_{\text{L}} = 45 \text{ 度}$, $\theta_{\text{R}} = -45 \text{ 度}$ アンテナ条件のときの回転角速度の回転角度による変化

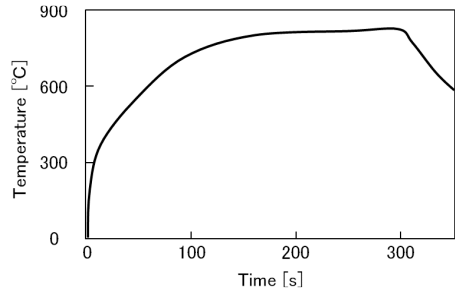


図6 アンテナ ($H = 105 \text{ mm}$, $\theta_{\text{L}} = 45 \text{ 度}$, $\theta_{\text{R}} = -45 \text{ 度}$) を図4の角速度変調回転により加熱したときの試料温度変化

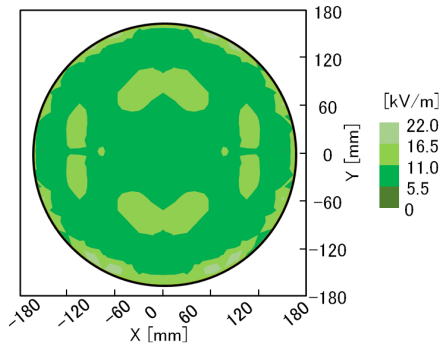


図5 図4のアンテナ変調角速度回転の場合の CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布

$\theta_{\text{R}} = -45 \text{ 度}$ アンテナの角速度 ω_i と回転角度 ϕ_i との関係を示す。 ϕ_i が 30, 130, 160, 210, 310, 及び 340 度のときに、回転角速度の上限 $\omega_i^{\text{max}} = 18.8 \text{ rad/s}$ (3 Hz) に近いまたは等しい角速度をもち、電界強度の大きな角度でのアンテナの滞在時間を短くするため急回転した。一方、 ϕ が 80, 90, 100, 260, 270, 及び 280 度では低電界強度条件となり、アンテナを長期間滞在させるために ω は小さくなった。

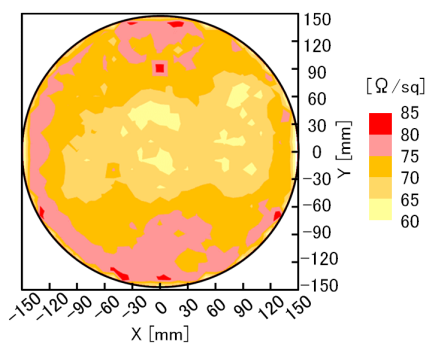
図5に図4に示した変調角速度でアンテナを回転したときの CHT 加熱ユニット直下の電界強度分布 $E_{\text{av}}(x, y)$ を示す。アンテナなしの図2と比較してより均一な電界強度分布が得られた。回転角に依存して発生する電界ドメインが変調回転中に打ち消しあって電界強度がより均一になったことを示している。 E_{AV} は 12.0 kV/m とアンテナなしの場合とほぼ同等であったが、 E_{RMSD} は最小値の 3.1 kV/m になり、アンテナなしの 7.4 kV/m から大幅に低減し、計算誤差最大 7% を超えて変調回転アンテナの電界強度均一化の効果が確認された。他の H , θ_{L} , θ_{R} の組み合わせについても変調角速度の最適シーケンスを調査したところ、 E_{RMSD}

は $3.3 \sim 4.7 \text{ kV/m}$ の範囲であった。

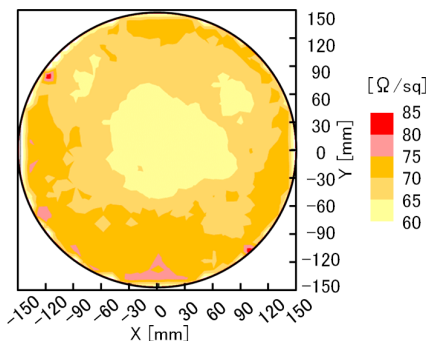
図6に $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_{\text{L}} = 45 \text{ 度}$, $\theta_{\text{R}} = -45 \text{ 度}$ のアンテナを図4に示す角速度変調回転を行い CHT を 300 秒間加熱したときの試料の温度変化を示す。温度は滑らかに上昇しておりアンテナを 1 秒周期で回転することによる温度変動は見られなかった。

図7に (a) アンテナなし及び (b) $H = 105 \text{ mm}$, $\theta_{\text{L}} = 45 \text{ 度}$, $\theta_{\text{R}} = -45 \text{ 度}$ アンテナを図4に示す変調回転を行いながら試料加熱したときのシート抵抗率の分布を示す。リン注入直後の試料のシート抵抗率は $20000 \Omega/\text{sq}$ を超えており、キャリア濃度は無視できる程度に少なかった。図7 (a) に示すアンテナなしの加熱では、シート抵抗率は 60 から $85 \Omega/\text{sq}$ の範囲に大きく減少した。CHT 加熱により表面領域に注入されたリン原子が活性化し、電子キャリアが生成されたことを示している。試料中央領域では $70 \Omega/\text{sq}$ 未満の低シート抵抗率が達成された一方、試料端でのシート抵抗率はかなり高くなった。図2より、マイクロ波の電界強度は試料中央で低く、CHT 加熱の効率が高い事が予想された。試料中央領域での低いシート抵抗は計算による予想を実証する結果と思われる。しかし、図2に示す電界強度の高い四つのドメインはシート抵抗分布には明確に現れなかった。試料加熱中の熱伝導により CHT 加熱効率が低いドメイン部分も良く加熱され活性化したことが予想される。一方、図7 (b) に示すように、アンテナを用いた場合のシート抵抗率は 60 から $80 \Omega/\text{sq}$ の範囲に分布した。シート抵抗率が $70 \Omega/\text{sq}$ 未満の領域はアンテナなしより増加した。試料周辺領域には未だシート抵抗率が高い領域が残ったが、明らかにシート抵抗率の分布はより均一になった。

ドーピングシリコンの電子移動度を $120 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ [12] と仮定して試料内の点 (x, y) での活性化率 $P(x, y)$ をシー

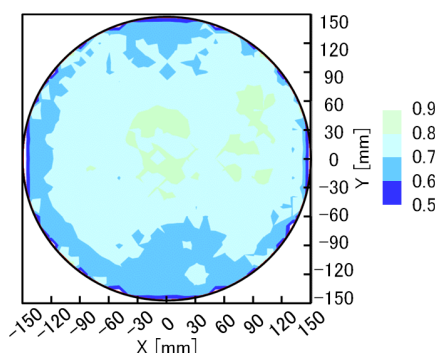


(a)

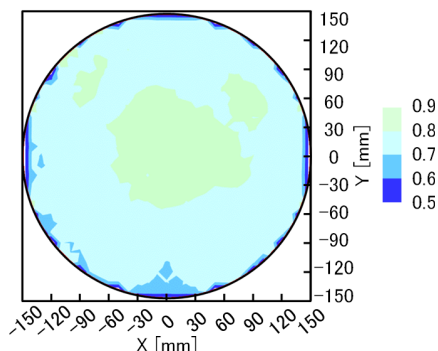


(b)

図7 (a) アンテナなし及び (b) $H = 105$ mm, $\theta_L = 45$ 度, $\theta_R = -45$ 度アンテナを図4の変調回転させて試料加熱したときのシート抵抗率分布



(a)



(b)

図8 図7から算出した (a) アンテナなし (b) アンテナ付加熱の場合の活性化率分布

ト抵抗率の実験結果から見積った。図8に (a) アンテナなし、及び (b) $H = 105$ mm, $\theta_L = 45$ 度, $\theta_R = -45$ 度アンテナを図4に示す変調回転を行いながら試料加熱したときの活性化率分布を示す。アンテナなしの場合、活性化率は中央領域で0.7より高かったが、試料周辺領域では0.7より低くなった。693点の平均活性化率 P_{AV} とその平均2乗偏差 P_{RMSD} はそれぞれ0.73と0.06であった。一方、アンテナ付き CHT 加熱では、図8 (b) に示すように、ほぼ全領域で活性化率が0.7を上回った。 P_{AV} と P_{RMSD} はそれぞれ0.77と0.05となった。これらはキャビティ内でアンテナを変調回転することにより2.45 GHz マイクロ波の電界分布をより均一化し、直径300 mm 試料のより均一な加熱を実証した結果である。本論文の結果を基に、今後更なるアンテナ構造の改良を加え、より均一な加熱特性を実現できるものと期待する。

4. む す び

300 mm 径のシリコン基板の活性化を行うために、直径330 mm の無電極 CHT 加熱システムを開発した。平均導電率73 S/m のカーボン粒子を圧力1400 Pa の Ar ガスとともに封入した石英製 CHT を55本用いて加熱ユニットを構成した。円筒型のキャビティを通じてマイクロ波を CHT 加熱ユニットに照射した。キャビティ内にプロペラ型のアンテナを設置して最大3 Hz で周期1秒の変調回転を行い、マイクロ波強度の均一化を図った。有限要素モーメント法による数値計算により高さ105 mm, 長さ120 mm, 傾斜角度45度と-45度のブレードのアンテナ構造を決定した。更に、アンテナがない場合の平均電界強度の平均2乗偏差7.4 kV/m よりも十分低い3.1 kV/m を実現する最適変調回転モードを見出した。 1.0×10^{15} cm⁻² のリン原子をイオン注入した直径300 mm のシリコン基板をア

ンテナ変調回転を行いながら 800°C で 170 秒間加熱した。シート抵抗率は 60 から $80\ \Omega/\text{sq}$ の範囲に減少した。 $120\ \text{cm}^2/\text{Vs}$ の電子移動度を仮定して求めた基板面内平均活性化率 P_{AV} とその平均 2 乗偏差 P_{RMSD} は 0.77 と 0.05 となった。 P_{AV} はアンテナなし 800°C , 170 秒間加熱の場合の 0.73 より高く, P_{RMSD} はアンテナなしの場合の 0.06 より低くなり, 変調回転アンテナ導入による空間的均一加熱システム実現の可能性が確認できた。

謝辞 本研究の一部は科学技術振興機構 ASTEP (No. AS3015022S) 及び文部科学省科学研究費助成事業基盤研究 C (No. 21K04134) のサポートを受けた。

文 献

- [1] S.M. Sze, *Semiconductor Devices*, 3rd ed., Wiley, New York, pp.510–547, 1985.
- [2] T. Sameshima, S. Usui, and M. Sekiya, “XeCl excimer laser annealing used in the fabrication of poly-Si TFTs,” *IEEE Electron Device Lett.*, vol.EDL-7, pp.276–278, May 1986.
- [3] S. Higashi, H. Kaku H. Murakami, S. Miyazaki, H. Watakabe, N. Ando, and T. Sameshima, “Crystallization of a-Si films using thermal plasma jet and its application to thin film transistor fabrication,” *Proc. 1st Thin Film Materials & Devices Meeting*, Nara, p.25, Nov. 2004.
- [4] G. Mannino, “Effect of heating ramp rates on transient enhanced diffusion in ion-implanted silicon,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.78, no.7, p.889, Feb. 2001.
- [5] T. Miyazaki, G. Kobayashi, T. Sugawara, T. Kikuchi, M. Hasumi, and T. Sameshima, “Carbon heating tube used for rapid heating system for semiconductor annealing,” *Proc. 25th Int. Workshop Active-Matrix Flat Panel Displays and Devices*, pp.1–4, Kyoto, Japan, July 2018.
- [6] T. Sameshima, T. Miyazaki, G. Kobayashi, T. Arima, T. Kikuchi, T. Uehara, T. Sugawara, M. Hasumi, and I. Serizawa, “Carbon heating tube used for rapid heating system,” *IEEE Access*, vol.7, pp.23798–23805, Jan. 2019.
- [7] T. Sameshima, T. Kikuchi, T. Uehara, T. Arima, M. Hasumi, T. Miyazaki, G. Kobayashi, and I. Serizawa, “Microwave rapid heating system using carbon heating tube,” *17th International Conference on Microwave and High Frequency Heating 2019*, pp.318–325, Valencia, Spain, Sept. 2019.
- [8] T. Miyazaki, G. Kobayashi, I. Serizawa, T. Kikuchi, T. Uehara, T. Arima, M. Hasumi, and T. Sameshima, “Carbon heating tube rapid heating system for fabricating silicon solar cells,” *Proc. 26th Int. Workshop on Active-Matrix Flat Panel Display and Devices*, pp.1–4, Kyoto, Japan, July 2019.
- [9] S. Saito, K. Onodera, T. Miyazaki, T. Uehara, T. Arima, M. Hasumi, G. Kobayashi, I. Serizawa, W. Kubo, T. Ueno, and T. Sameshima, “Carbon heating tube rapid heating system for fabricating silicon solar cells,” *Proc. 28th Int. Workshop on Active-Matrix Flat Panel Display and Devices*, pp.11–14, Kyoto, Japan, July 2021.
- [10] S. Kimura, K. Ota, M. Hasumi, A. Suzuki, M. Ushijima, and T. Sameshima, “Crystallization and activation of silicon by microwave rapid annealing,” *Appl. Phys. A, Solids Surf.*, vol.122, p.695, July 2016.
- [11] J.H. Richmond, “A wire-grid model for scattering by conducting bodies,” *IEEE Trans. Antennas & Propagation*, vol.AP-14, no.6, pp.782–786, Nov. 1966.
- [12] Y. Taur and T. Ning, “*Fundamental of Modern VLSI Physics*,” Cambridge University Press, Cambridge, U. K., Chap. 2, 1998.

(2022 年 3 月 29 日受付, 7 月 20 日再受付,
9 月 16 日早期公開)

宮崎 智由



現在, 東京農工大学大学院博士課程在学中及びテクノロジーリサーチ株式会社 CEO. 2015 年会社設立, 研究開発用真空装置の開発に従事。

鮫島 俊之



1978 名古屋大学・工卒. 1980 静岡大大学院修士課程了. 現在, 東京農工大学工学部名誉教授. 半導体技術, 加工技術, 評価分析等研究に従事. 日本応用物理学会会員. 工博.

齋藤 宗平



2021 東京農工大学・工卒. 現在, 同大学院修士課程在学中.

小野寺 航



2021 東京農工大学・工卒.



上原 琢磨

2019 東京農工大学・工卒, 2019, 2020 東京農工大学産学連携研究員.



上野 智雄

1986 早稲田大学・理工卒, 1991 同大学院博士課程了. 現在, 東京農工大学工学研究院教授. 半導体デバイス・プロセス, 薄膜材料評価技術等に従事. 日本応用物理学会会員. 工博.



有馬 卓司 (正員)

2003 東京農工大大学院博士課程了, 博士(工学). 同年同大学助手, 2008 同講師, 2013 同准教授. 2012 米国ペンシルベニア州立大学客員研究員, 電磁界解析手法の開発, メタマテリアルの開発に従事.



蓮見 真彦

1992 東京大学大学院・理学系研究科博士課程了. 博士(理学). 現在, 東京農工大学・工学部電気電子工学科助教. 半導体技術, 加工技術, 評価分析の研究に従事. 応用物理学会会員.



小林 剛

2006 東京電気大学・工卒, 2006 年株式会社オーク製作所入社. 以来, 基礎化学, 材料科学, 新光源開発に従事.



芹澤 和泉

1986 東海大学・工卒, 1988 同大学院修士課程了, 1988 株式会社オーク製作所入社. 現在, 研究開発部部长, 紫外線光源開発及びその応用技術に従事.



久保 若奈

2006 東京大学大学院卒, 工博. 理化学研究所研究員, JST さきがけ研究員を経て, 2016 東京農工大学・大学院工学府電気電子工学専攻准教授.