L-43

同軸プラズマガンによるホイスラー合金堆積装置の開発

Development of a Deposition Apparatus for a Heusler Alloy by Utilizing a Coaxial Plasma Gun

○橋口 舞[1]，新井 聡哉[2]，胡桃 聡[3]，松田 健一[3]
鈴木 薫[3]，石川 有宰[4]，関口 純一[5]，浅井 朋彦[5]
*Mai Hashiguchi[1], Soya Arai[2], Satoshi Kurumi[3], Ken-ichi Matsuda[3],
Kaoru Suzuki[3], Yusai Ishikawa[4], Junichi Sekiguchi[5], Tomohiko Asai[5]

Abstract: We attempted to develop a deposition apparatus for a Heusler alloy by utilizing a coaxial plasma gun (CPG). A CPG consists of concentric Al inner and SUS external electrodes. He gas was flowed between them. The pulsed-discharge circuit provided high discharge pulse current (3.7 kA). Its pulse width of first half-wave was 73.4 μs. The emission of He(I) and Al(II) were observed in the plasma. The plasma temperature was approximately 8000 K calculated by two-line ratio method.

１．はじめに

エネルギー・環境問題への関心が高まる現在，廃熱を電気に変換する熱電変換材料の一つとして，Fe_2VAl 系フルホイスラー合金が注目されている[1]．Fe_2VAl は，理論的に，従来材料である BiTe と同等以上の性能を有すると考えられ，有害元素を含まない等の特徴を持つ．しかし，熱伝導率が高く，性能指数の高い素子を作る事が難しい，またわずかな組成比のずれにより大きく熱電能が変化するという性質を持つため，実用化には至っていない．そこで我々が着目したのが，同軸プラズマガン（Coaxial Plasma Gun, CPG）[2][3]を用いた堆積法である．この手法は，放電によりターゲットとなる金属をイオン化および電磁加速し，プラズマ生成領域から離れた基板上に堆積させるものである．これにより，融点の異なる複数の金属を合金化し，その組成比を容易に制御できることが期待される．本稿では，CPG による金属堆積装置の開発を行い，放電電流，電圧特性，放電時の電力と消費エネルギー，プラズマの発光スペクトルおよびプラズマ温度を評価した実験結果について報告する．

２．実験方法

Figure 1 に CPG による堆積装置の構造図，Figure 2 に放電を起こすためのパルス放電回路の回路図を示す．CPG は中心電極と同心円筒状の外部電極で構成され，基板はその軸方向と垂直に配置している．ターゲットとして Al 棒（12×12×70 mm）を内部電極に設置し，動作ガスとして He を電極間に流入する．パルス放電回路では，コンデンサに充電がされた後，通電スイッチを始動し，充電電圧 1.14 kV を内部電極に印加させる．電極間で絶縁破壊が生じプラズマが生成されると電極間に流れる放電電流 I と電流によって生じた磁場 B よりローレンツ力（$I \times B$）が働き，プラズモイドは軸方向に電磁加速され基板へ到達する．

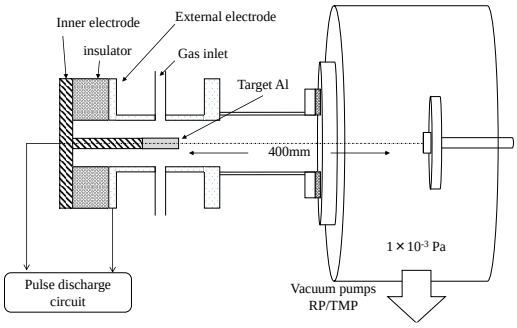

Figure 1. Experimental apparatus of the CPG deposition system

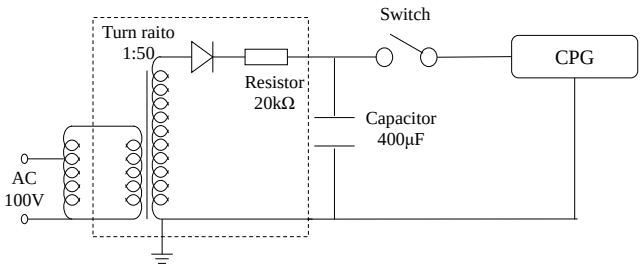

Figure 2. Schematic diagram of the pulsed-discharge circuit for CPG

放電電流はロゴスキーコイル式電流プローブ（Pearson,110A）を用い，放電電圧は高電圧プローブ（Tektronix,P5100A）をスイッチの直後に接続して測定し，その時の電力と消費エネルギーの算出を行った．放電時の発光スペクトルは，感度補正された CCD 分光器（StellarNet, EPP2000）によって測定し，プラズマ温度の算出を行った．[4]

１：日大理工・学部・電気　２：日立製作所　３：日大理工・教員・電気　４：日大理工・院（前）・物理
５：日大理工・教員・物理

３．実験結果

Figure 3 に放電電流および電極間電圧波形，Figure 4 にこれより算出した電力と消費エネルギーを示す．放電電流は減衰振動波形を示し，ピーク値は 3.7 kA，第 1 半波の半値幅は 73.4 μs であった．放電に使われた消費エネルギー約 30 J と計算され，コンデンサに充電されたエネルギー260 J のうち，およそ 12 %が放電に使われたことがわかる. Figure 5 に放電時のプラズマの発光スペクトルを示す．ターゲット材料である Al II，動作ガスである He I の発光が検出された．プラズマ温度は, Al II の線スペクトル（263.8 nm, 281.7 nm, 358.8 nm）を使用し，その強度比から二線強度比法を用いて算出した．この時，各波長におけるスペクトル線強度とエネルギー準位の関係は（1）式で表され，プラズマ温度は約 8000 K と求められた．

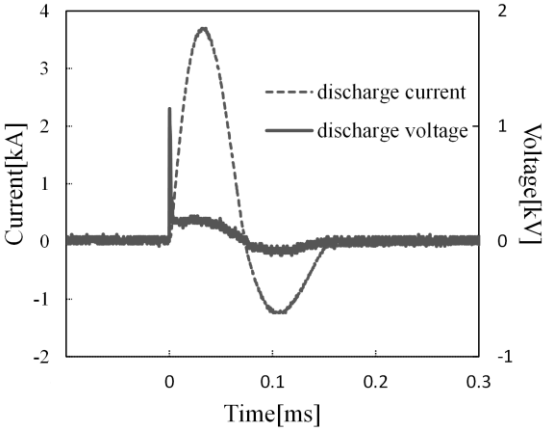

Figure 3. Waveforms of discharge current and voltage between electrodes of the CPG

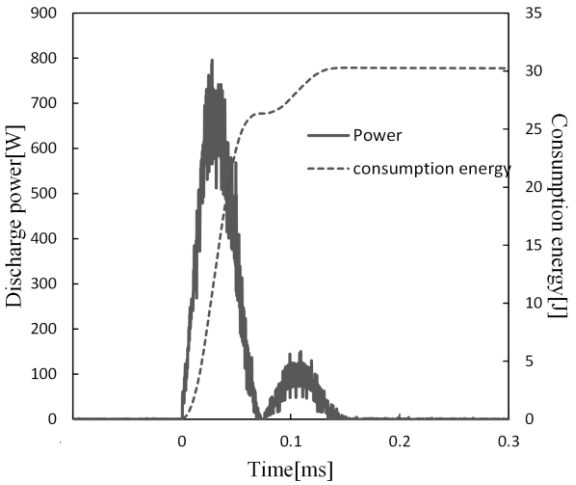

Figure 4. Relationship between discharge power and consumption energy

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{Ag_u}\right) = -\frac{E_u}{kT} + \ln C \qquad (1)$$

（I:スペクトル線強度，λ:波長，A:遷移確率，g_u:電子が上準位にある統計的な重み，E_u:エネルギー準位，k:ボルツマン係数，T:プラズマ温度，C:粒子の種類によって決まる定数である.）

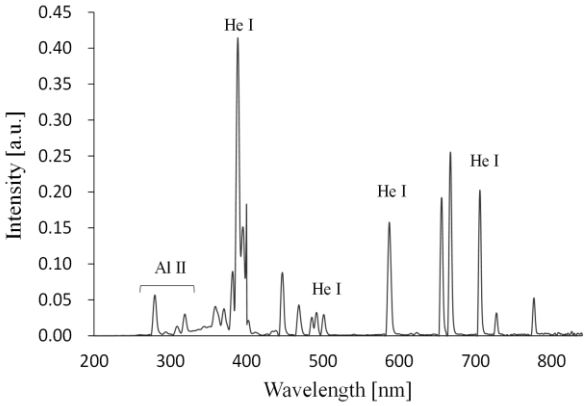

Figure 5. The emission spectrum of discharge plasma

４．まとめ

ホイスラー合金の生成の為に CPG を用いた堆積法の開発を行った．放電電流のピーク値 3.7 kA，第 1 半波の半値幅 73.4 μs，消費エネルギー30 J が得られた．また発光スペクトル測定によりプラズマ温度は 8000 K と試算された．今後は，放電電圧値を変化させた際のプラズマ温度の評価，また薄膜生成に向け，繰り返し放電を行う制御機構の開発などを検討する．

５．参考文献

[1] 鹿又武，「機能材料としてのホイスラー合金」，pp. 271-300，(2011).

[2] M. Takatsu et. al.: “Application of Coaxial Ion Gun for Film Generation and Ion Implantation”, JPS Conf. Proc., Vol.1, pp. 01586-1-5, (2014).

[3] S. Woodruff : “New Mode of Operating a Magnetized Coaxial Plasma Gun for Injecting Magnetic Helicity into a Spheromak”, Phy. Rev. Let., Vol.90, No.9, pp. 095001-1-4, (2003).

[4] 山中千代衛，横山昌弘 :「プラズマとその応用装置」, pp. 156-158，(1966).