

高機能成膜を実現させるアーク抑制型 HiPIMS 電源の開発

Development of the arc restraint type HiPIMS power supply to achieve

high-performance film formation

黒岩 雅英¹, 岡野 忠之¹, 中谷 達行², 福江 紘幸³

Masahide Kuroiwa¹, Tadayuki Okano¹, Tatsuyuki Nakatani², Hiroyuki Fukue³

東京電子株式会社¹, 岡山理科大学技術科学研究所²,

岡山理科大学大学院工学研究科³

Tokyo Electronics Co., Ltd.¹, Research Institute of Technology, Okayama University of Science²

Graduate School of Engineering, Okayama University of Science³,

1. はじめに

HiPIMS(High Power Impulse Magnetron Sputtering、大電力パルスマグネトロンスパッタリング)は低い Duty 比で高い電力を瞬間的にカソードに投入し高密度のプラズマを形成する手法であり、高性能な機能性薄膜を作製するには極めて有効な手段である。昨今 HiPIMS に関する研究開発が進められ自動車部品用、機械工具用のハードコーティング等では製品化が進んでいる。またセンサーデバイス用の反射防止膜、電子デバイス用のバリア膜等、多様なアプリケーションでの応用が期待される。

HiPIMS はパルス技術を使用したスパッタ成膜であるので電源性能に依るところが非常に大きい。つまり膜性能を向上させるためには高性能な電源が求められ、その電源開発は常に成膜アプリケーションと一体になって行わなければならない。弊社では HiPIMS による医療インプラント向け生体適合化膜の開発をテーマにそのノウハウをもつ岡山理科大学と共同研究を進め、HiPIMS 用パルス電源の開発を行っている。アプリケーションである医療インプラントへの DLC 成膜を電源メーカーとして研究し、成膜中に起こる問題点を電源開発に生かしている。その中で膜品質を低下させるアーク異常放電、生産性を損なう低い成膜レートなどの実際に起こる問題を克服するために開発されたのが HF-HiPIMS である。これを主題として以下報告をする。

2. HiPIMSの概要

まずはHiPIMSの概要を説明する。

図1でHiPIMSのパルス波形をイメージで示す。Duty比を下げ短いon時間で、周波数を数百ヘルツに抑え、蓄積された大電力を瞬間的にターゲットに印加する。このことにより電子密度が高まり、高密度プラズマを生成させ、イオン化率を向上することが可能となり、硬度が高くで耐久性の高い機能性成膜が実現できる。一般的にHiPIMSの定義としては図2^[1]の通りduty比が5%以下、単位面積あたりのピーク電力密度が500 W/cm²以上とされている。パルス幅を下げ平均電力密度を小さくすることにより高いピーク電力密度が得られHiPIMSとなる。詳細に述べると、パルスのon時間を極端に小さくしoff時間を長くすることにより、蓄積された電力を瞬間的に放電し、off時間が長いことでターゲットが冷却され、繰り返し放電を可能としている。そうすることによりピーク時のプラズマ密度はDCと比べ3桁程度向上する。図3^[2]は従来型のマグネトロンスパッタとHiPIMSの各ターゲット材料のイオン化率の比較である。このように各材料ともピーク電力密度が高いHiPIMSではイオン化率が著しく高くなっていることが示され

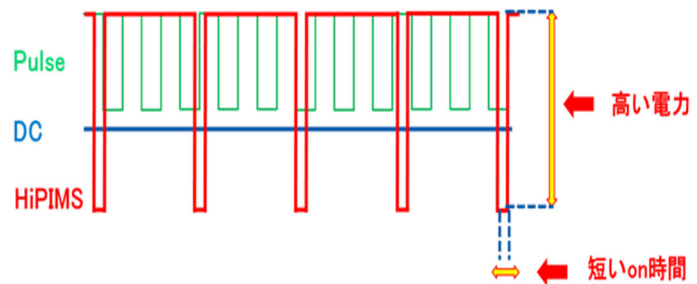


図1. HiPIMSの電圧波形イメージ

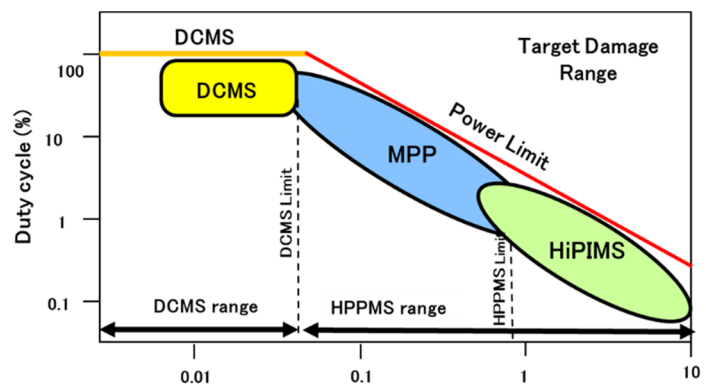


図2. 各種法によるピーク電力密度

ている。図4^[3]はHiPIMSとDCマグネトロンスパッタ (DC Magnetron Sputtering : DCMS) で成膜した場合の膜構造のモデルの違いを示しているが、DCMSの場合は結晶構造が粗大であり表面形状も粗い。それに対してHiPIMSはイオンボンバードの強度が高くなることにより、結晶粒が細かく膜の緻密化および表面状態の平滑化が生じているのが分かる。再結晶化はプラズマによるイオン化が進行し、基板イオン電流が増加する。すなわちターゲット電流が増

Conventional MS領域 HiPIMS領域

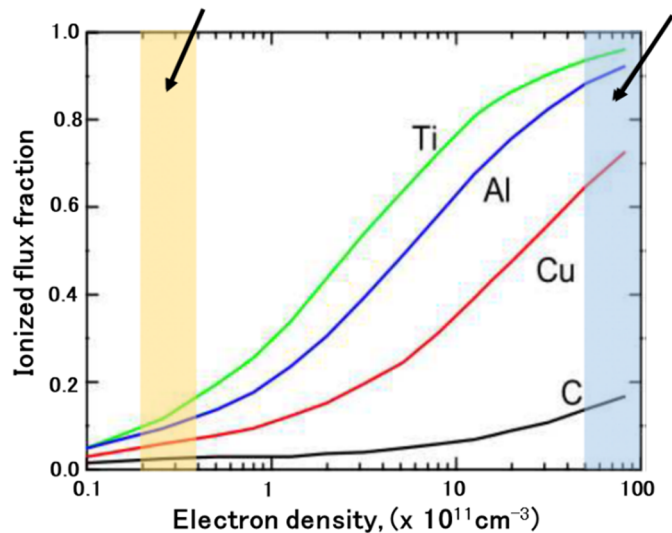


図3. 各材料のイオン化率

えている。図4^[3]はHiPIMSとDCマグネトロンスパッタ (DC Magnetron Sputtering : DCMS) で成膜した場合の膜構造のモデルの違いを示しているが、DCMSの場合は結晶構造が粗大であり表面形状も粗い。それに対してHiPIMSはイオンボンバードの強度が高くなることにより、結晶粒が細かく膜の緻密化および表面状態の平滑化が生じているのが分かる。再結晶化はプラズマによるイオン化が進行し、基板イオン電流が増加する。すなわちターゲット電流が増

加することにより促進される。結果として微少な結晶（ナノクリスタル）化が進み、緻密であり高硬度、高平滑性、耐摩擦・摩耗特性の向上、密着性の向上が図られる。

3. HiPIMS法による医療用DLC成膜技術の開発

弊社ではHiPIMS電源の性能、信頼性をより高める為に岡山理科大学中谷達行教授、広島大学歯学部二川浩樹教授と共に「医療デバイスに有効な成膜法と電源の開発」をテーマにHiPIMS-DLC成膜技術を高めるための共同研究を行っている。

HiPIMS-DLC 成膜技術の開発を進め、HiPIMSで生じる高密度のプラズマによってイオン化率を高め、強力なスパッタエネルギーにより sp^3 共有結合の割合を高め、高硬度且つ高密着性の生体適合化水素含有テトラヘドラル アモルファスカーボン（Hydrogenated Tetrahedral Amorphous Carbon: ta-C : H）を成膜することを目的としている。

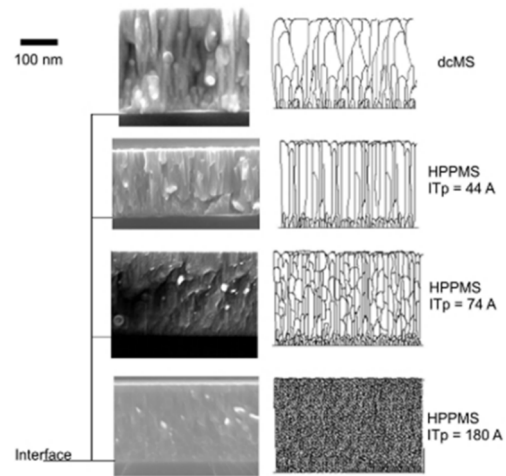


図4. CrN膜のSEM画像

4. HiPIMS の課題

しかしながら、このように高機能成膜に有効な HiPIMS であるが、大電力スパッタリングに起因するアーク異常放電、また低い duty 比であるが故の成膜レートの低下が課題とされている。現に弊社の顧客からも相談を受けた経験もあった。また共同研究の過程でイオン化率の低いカーボンに大電力を印可したことによるアーク異常放電で成膜が上手くいかない場合もあった。こうした経験値を基にアーク異常放電、成膜レートの問題を克服するために工夫と電源改造を繰り返し行い開発されたのが HF-HiPIMS 電源である。

5. アーク発生のメカニズム

ターゲット上は Ar イオンによりスパッタされ、スパッタ粒子が飛んでいくエロージョン領域とその周辺に広がる非エロージョン領域に分れる。スパッタされた粒子は基板だけでなく、ターゲットの非エロージョン領域にも絶縁物として堆積し、またその上にも Ar イオンが降り注ぎ、その表面には Ar^+ イオンが蓄積される。これがチャージアップされやがて絶縁破壊を起こし、アーキングが生じる^[4]。

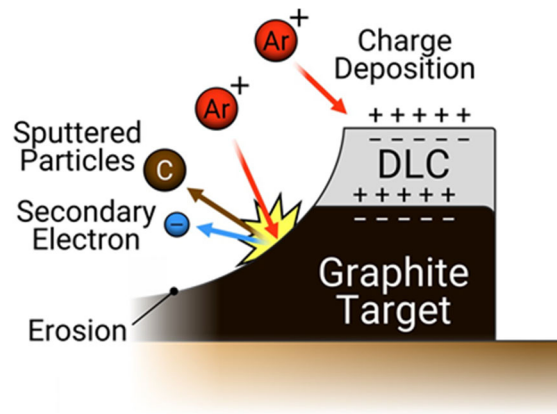


図5. ターゲット上でのチャージアップ

このアーキングを減らす一つの手法が絶縁物のチャージアップを電氣的に中和するというものである。

6. HF パルスによるアーキング抑制の手法

チャージアップの問題を解決するために新たに考案したのが弊社独自の HF (Hi-Frequency) パルスである。(特願 No.2018-007823 平成 30 年 12 月 18 日 特許成立済) これは通常の HiPIMS の 1 パルスの中に 3 つの異なるパルスを入れる手法である。波形の詳細は図 6 で示すとおり、まず予備放電を起こすためのパルス①、次に一旦オフの状態にし、そしてメイン放電を起こすパルス②、その後に高周波のパルス③、そしてオフでカソード冷却となりこれで一連の動作となる。図 7 で電圧、電流の実波形を示す。このように①の予備放電波形は②のメイン放電の立ち上がりを急峻にする役目を担っている。立ち上がりを急峻にする

ことにより、HiPIMS の特徴である高いピーク電力密度、強いイオン化を引き出している。そして③の高周波パルスは②のメインパルスのおよ 1000 倍の周期でオンオフを繰り返す。図 6 の T5、T6 とオンオフを繰り返し、瞬間的に 0V にすることで電子を引っ張り中和する効果がある。つまりマイナス電位でスパッタが生じ、T5 で 0 電位を繰り返すことによりターゲット上の非エロージョン領域のチャージアップを中和している。この HF パルスを生成するための回路が図 8 である。通常の HiPIMS は DC 電源と 1 つのパルスユニットにて構成されるが、新規回路はメインパルスを生成するノーマルパルスユニットの後段に高周波を生成する HF パルスユニット配置した。スイッチング素子としてノーマルパルスユニットは IGBT を HF パルスユニットは高速

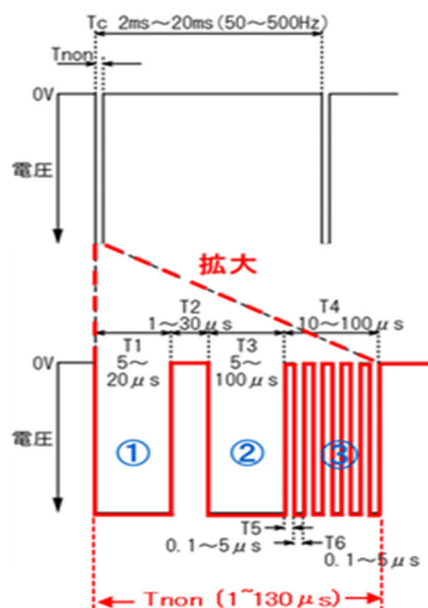


図6. HFのパルス波形

- ① Preparatory discharge (short pulse)
- ② Main discharge
- ③ HF (High Frequency) pulses

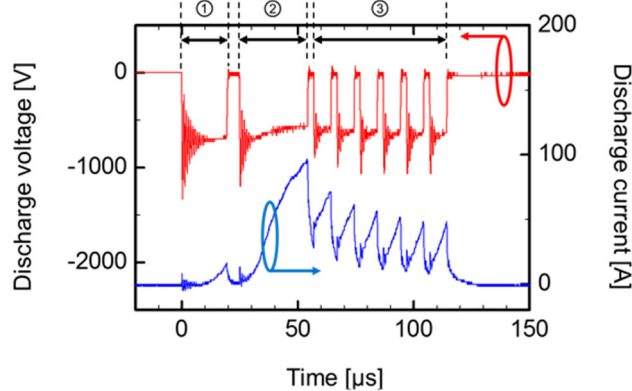


図7. HFの電圧・電流波形

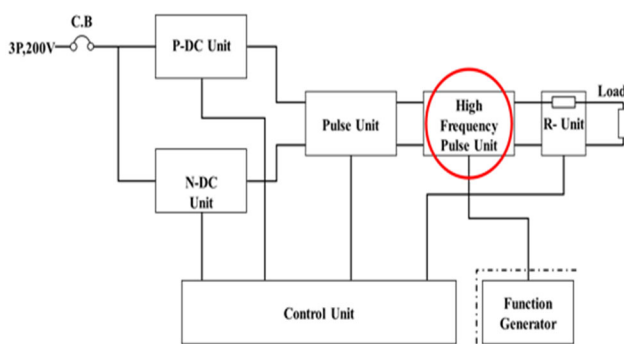


図8. HiPIMS電源の回路構成

の SiC-FET を採用している。これにより先に述べた 3 つの異なる波形を組み合わせることで出力することができる。

次に HF モードにおけるマイクロアーキング率の実測値を示す。図 9 は測定条件である。アークカウントの方法はピーク放電電流が I_p になるように負印加電圧に調節し、 α の値を調節して β の値を設定し青色の範囲（マスク）を設定、これをオシロスコープのパス/フェイル（合否）テスト機能を用いて、次のトリガまで波形全体がマスク内にあればアーキングとしてカウントした。この方法にて取得したデータが図 10 である。このようにノーマルモード（Non-HF）と比べ HF モードの 200KHz では半分以下の 2.3% までマイクロアーキングを低減できることができた。

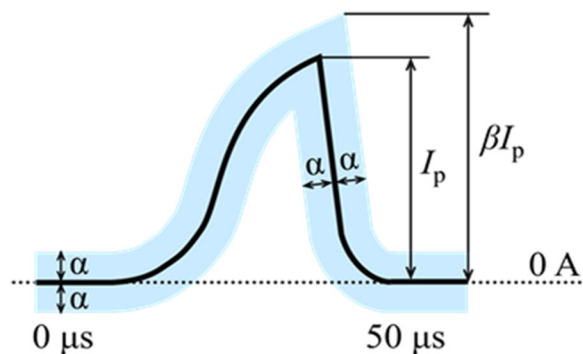


図9. マクロアーキング測定条件

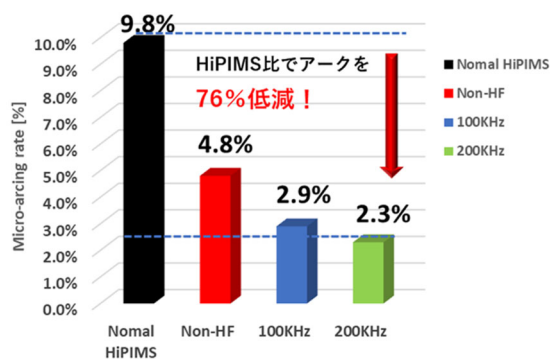


図10. マクロアーキング率

7. 成膜レートの向上

HF モードはアーク抑制だけでなく成膜レートを上げることにも効果がある。先にも述べたとおりパルスが 3 段階あり、メイン放電、HF 放電のアフターグローの時間が長くなる。このことは平均電力の増加につながり電流と時間の積分値である成膜能力を大幅に向上することができる。図 11 に示すとおりノーマルモードの HiPIMS（Unipolar HiPIMS）と比較して HF-HiPIMS は 4 割もの平均電力増加を実現できており、これが成膜レートの大幅向上につながる。このことは従来いわれてきた成膜レートが低く生産性低減につながると懸念されていた HiPIMS の弱点を克服する大きな成果である。

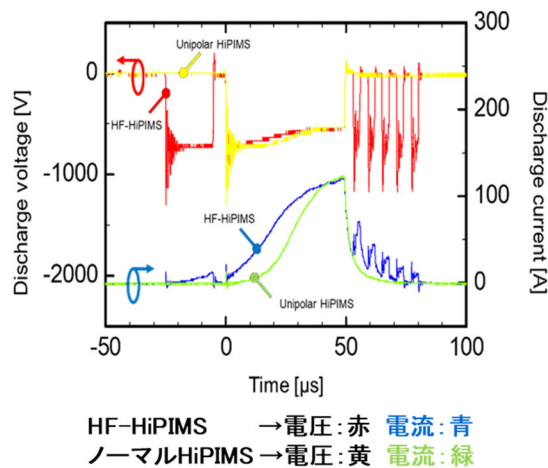


図11. HF-HiPIMSのパルス幅

8. HF-HiPIMS の有効性

現状、アーク異常放電の対処は、

- 1) 起きた瞬間に電源を停止してアークカットをする

2) デュアルカソードにして交互に sin 波を印可してチャージアップを中和させる手法である。しかしながら 1) は既に起こってしまったアークをカットする手法なのでエラーが発生する確率が極めて高い。2) はカソードが増えるので装置コストとして上がってしまうデメリットがある。本 HF パルスは抑制するという方法では 2) の手法に近いが電源側からのアプローチであり、デュアルカソードのようなコスト増にもならないで済む。

先にも述べたとおり HiPIMS の有効性は硬度、密着性、導電性が高く屈折率などの光学特性にも優れている。また低 duty のパルススパッタのため低温成膜にも有効である。従って、耐摩擦・摩耗特性を重視するハードコーティング、生体適合性を重視する医療デバイス向け DLC コーティング、反射防止などの光学薄膜、導電性を重視する電子デバイス向けのバリアコーティング、有機物への低温成膜など、さまざまな分野への波及が期待できる。さらに進化した HF-HiPIMS はその性能を高めたものとして有効性を確信している。

参考文献

- [1] J. T. Gudmundsson, N. Brenning, Daniel Lundin and Ulf Helmersson: J. Vac. Sci. Technol. A,30 (2012) 031507-1
- [2] After Hopwood: *Thin Films Ionized Physical Vapor Deposition*, (Academic press, 2000) p.181.
- [3] K. Sarakions, J. Alami, S. Konstantinidis: Surface and Coatings Technology,204 (2010)1661.
- [4] 小島啓安, “現場のスパッタリング薄膜Q&A 第2版,”日刊工業新聞, 2015.