

Analytische und numerische Untersuchung von 'High Power Impulse Magnetron Sputtering'-Entladungen

Kurzfassung

Das High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS) ist eine neuartige Technologie aus dem Bereich der ionenunterstützten physikalischen Gasphasenabscheidung, welche in der Lage ist, hochdichte Plasmen mit einem hohen Ionisationsgrad gesputterten Atome zu erzeugen. Diese Charakteristik ist von besonderer Bedeutung für die Kontrolle von sowohl Wachstum als auch Qualität der abgeschiedenen Schicht. Eine hohe Plasmadichte wird durch Anlegen einer hohen kurz gepulsten Spannung an der Kathode mit niedrigem Tastverhältnis erzeugt: Im Gegensatz zur Gleichstromkathodenzerstäubung (dcMS) werden HiPIMS-Entladungen mit einer gepulsten Leistungsversorgung betrieben, mit Spitzenleistungsdichten von bis zu einigen kW/cm², bei Pulsedauern von wenigen hundert Mikrosekunden und Wiederholungsraten im Bereich von einigen 10 Hertz. Die Kombination eines hochdichten Plasmas mit hohem Ionisationsgrad unterstützt durch ein starkes magnetisches Feld führt zu einer Entladung mit ausgeprägten Skalen der Plasmaparametern und ausgeprägten Instabilitäten.

Für die meisten HiPIMS-Entladungen können die räumlichen Größen wie folgt sortiert/angeordnet werden: $\lambda_{De} \ll s \approx r_{Le} \ll \lambda_{ce} \approx L_{typ} \ll \lambda_{ce,in}$, in. Hierbei ist λ_{De} die Debyelänge, s die Schichtdicke der Plasmarandschicht, r_{Le} der Larmor-Radius der Elektronen, L_{typ} eine charakteristische Längenskala des Systems. λ_{ce} und $\lambda_{ce,in}$ sind die mittleren Weglängen der Elektronen für elastische und unelastische Stöße.

Mithilfe dieser Skalenüberlegungen kann festgestellt werden, dass Elektronen wegen einer nicht ausreichenden Anzahl an Interaktionen kein thermisches Gleichgewicht erreichen können. Aus diesem Grund ist für sie eine kinetische Beschreibung notwendig. Weil die charakteristischen Längen- und Zeitskalen mehrere Größenordnungen überstreichen, sind konventionelle kinetische Simulationsmodelle jedoch häufig wegen des hohen Rechenaufwands nicht zur Problembeschreibung geeignet. In der vorliegenden Arbeit werden die komplizierten Zusammenhänge mit Hilfe einzelner, reduzierter Modelle erfasst, welche jeweils spezifische Aspekte der physikalischen Mechanismen erfassen.

Grundsätzlich sei angemerkt, dass mittels geeigneter Mittelung darauf verzichtet werden kann die schnellste zeitliche Dynamik des Systems aufzulösen, wodurch die Anzahl der zu lösenden Variablen drastisch reduziert werden kann. Der vermutlich zweckdienlichste Ansatz zur Modellierung dieser Klasse magnetisierter technischer Plasmen ist der der Gyrokinetik, wenngleich für diese technischen Plasmen streng genommen keine Theorie bezüglich der charakteristischen Parameter existiert. Im ersten Modellansatz werden aus diesem Grund alle räumlichen Abhängigkeiten vernachlässigt. Nur die Zeit- und die Energieabhängigkeit werden berücksichtigt.

Kinetische volumengemittelte oder globale Modelle (KGM) sind insbesondere geeignet zur Untersuchung der zeitlichen Entwicklung der chemischen Spezies (einschließlich Oberflächeninteraktionen), welche im Bereich der Ionisationszone der HiPIMS-Entladung ablaufen. Ein KGM-Modell – realisiert in zwei Versionen – wird zur Untersuchung von zwei Referenzregimen niedriger und mittlerer Leistungsdichten angewendet, welche sich sowohl bezüglich der chemischen Zusammensetzung als auch der räumlichen Organisation unterscheiden. Innerhalb des KGM wird die Entwicklung der Elektronenenergieverteilungsfunktion (EEDF) zusammen mit den Dichten der Schwerteilchen beschrieben. Es erlaubt damit den Einfluss der verschiedenen Stoßprozesse auf die EEDF zu untersuchen. Mit Hilfe des KGM kann gezeigt werden, dass die Verteilungsfunktion der Elektronen in zwei klar getrennte Bereiche unterteilt werden kann: Eine kalte Maxwellverteilte Komponente und eine energetische, plateauhafte Besetzung im Schwanz der Verteilung. Dieses Ergebnis motiviert die Entwicklung eines analytischen Modells zur Beschreibung lediglich des energetischen Elektronenanteils.

Diese energetischen Elektronen werden an der Targetoberfläche durch Sekundärelektronenemission erzeugt und treten nach Beschleunigung im Kathodenfall in den magnetisierten Bereich des Plasmas in Form eines monoenergetischen Elektronenbeams. Im ionisierten Bereich werden diese Elektronen durch Coulomb-Wechselwirkung mit dem Anteil langsamer, thermischer Elektronen der EEDF bzw. mittels inelastischer Stöße mit den Neutralteilchen abgebremst. Die analytischen Berechnungen, welche unter der Annahme eines eingeschwungenen Zustands bestimmt wurden, sind in ausgezeichneter Übereinstimmung mit den numerischen Ergebnissen aus dem KGM.

Schließlich, im Regime mittlerer Leistungsdichten, sind HiPIMS-Entladungen charakterisiert durch die Anwesenheit eines klar ausgeprägten Bereichs hoher Emissivität. Für diese Strukturen, häufig auch „Spokes“ genannt, zeigt sich eine ausgeprägte Anzahl von Moden, welche mit konstanter Frequenz in $\vec{E} \times \vec{B}$ -Richtung rotieren. Unter Ausnutzung dieses stabilen Bereichs wird ein phänomenologisches Modell des eingeschwungenen Zustands (im mitbewegten Koordinatensystem des Spokes) formuliert und analytisch gelöst. Das Modell besteht aus einem System von Advektions-Diffusions-Reaktionsgleichungen für Elektronen und neutrale Spezies. Unter Annahme eines Profils der Elektronendichte liefert die Lösung des Systems die Dichten von neutralen und geladenen Spezies. Darüber hinaus kann gezeigt werden, dass die Spokekonfiguration allein durch diese stark vereinfachte Kombination von Prozessen beschrieben werden kann. Dieser Argumentation folgend kann ein zusätzlicher Koeffizient für das KGM bestimmt werden, welcher die Bewegung des Spokes erfasst. Es kann gezeigt werden, dass das KGM selbst für den Fall eines sehr niedrigen Drucks (0.2 Pa), welche insbesondere durch Spokes charakterisiert ist, eine geeignete Beschreibung erlaubt.