

# 博士学位論文審査要旨

2011年2月13日

論文題目: **Production and Transport of Low-energy Ion Beams for Thin Film Deposition**  
(薄膜形成のための低エネルギーイオンビームの生成と輸送)

学位申請者: Vasquez Magdaleno Jr.

審査委員:

主査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 和田 元

副査: 同志社大学大学院工学研究科 教授 大鉢 忠

副査: 東北大学大学院工学研究科 教授 笹尾 真実子

要 旨:

新たな機能性材料を創製する上で、100 eV 程度以下の低エネルギーイオンビームを用いた原子堆積過程の利用が有望視されている。しかしながら、低エネルギーイオンビームは強い空間電荷を形成することからビーム輸送時の発散が大きく、実際の材料開発への応用は困難と考えられてきた。本論文は低エネルギーイオンビーム堆積技術の、材料科学分野への応用可能性を探るため、低エネルギービームの生成と輸送について行った研究成果をまとめたものである。

第1章序論では研究の動機と、イオンビーム堆積技術に関連して行われてきたこれまでの研究内容をまとめている。第2章では様々な方式によるプラズマ生成とプラズマ計測の原理、およびこれらの原理検証実験の結果についてまとめ、不純物抑制と電力効率の観点から、誘導結合による交流放電プラズマ生成が、低エネルギーイオンビーム装置を構成する上で適していることを明らかにしている。第3章では、低温で材料原子をプラズマ中に導入するために利用するスパッタリング現象の基本事項をまとめた上で、粒子測定法の原理について説明し、プラズマスパッターによって金属ガリウムイオンを生成した場合に得られる粒子束の評価を行っている。低エネルギーイオン引き出しの原理試験結果を紹介している4章において、論文提出者は低エネルギーイオン引き出しに適した細線引き出し構造を提案している。提案構造の性能確認のため、プラズマ電位揺動

の少ない熱陰極放電を利用し、実際に 10 eV のイオンビームが形成可能であること、低エネルギーイオンの輸送を可能とする基本機構が、細線引き出し構造を通過する弱電離プラズマによる空間電荷の中和であることを実験的に検証している。

第 5 章では 2 章で明らかにした容量性結合交流プラズマ励起法の長所を生かし、正イオンと負イオンを同時に引き出し、空間電荷が中和された状態での低エネルギーイオンビーム輸送可能性を調査している。チタンを正イオン化、酸素を負イオン化して混合・輸送したところ、理論的に予想されるビーム比率が得られることを示し、理論モデルの妥当性を検証している。6 章では、2 章から 4 章までに紹介された研究成果・知見にもとづいて、低エネルギーイオンビーム堆積を実現するためのシステム設計について提案している。また、この提案にもとづいて設計した遠隔プラズマ生成型プラズマスパッター薄膜形成装置を用い、窒化ガリウム薄膜を形成可能であることを報告している。各章の結論をまとめた 7 章においては、研究全体を統合的に概観し、低エネルギーイオン堆積システムの改良可能性とともに、各種新規材料創生への応用可能性について議論している。

以上の通り、本論文は低エネルギーイオンの生成と輸送に関連する基礎過程を体系的に整理し、それらを低エネルギーイオンビーム堆積システムを構築するために活用できるように、実験的検証を行っている。論文中で堆積面へのイオンビーム輸送についての有用な情報を数多く提供しており、特に独自アイデアである細線引き出し構造によって、最高水準の低エネルギーイオンビームの品質を実現している。よって本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。

## 総合試験結果の要旨

2011年2月13日

論文題目: **Production and Transport of Low-energy Ion Beams for Thin Film Deposition**

(薄膜形成のための低エネルギーイオンビームの生成と輸送)

学位申請者: **Vasquez Magdaleno Jr.**

審査委員:

主査:	同志社大学大学院工学研究科	教授	和田 元
副査:	同志社大学大学院工学研究科	教授	大鉢 忠
副査:	東北大学大学院工学研究科	教授	笹尾 真実子

### 要 旨:

本論文の提出者は2008年4月より本学大学院工学研究科電気電子工学専攻に進学し、研究を開始した。各年度において優れた研究成果を挙げ、一部の研究会発表を日本語で行い、国際会議の口頭発表2件を英語で行っている。本論文の主たる内容は、プラズマプロセッシング国際会議抄録1件、Review of Scientific Instruments誌1件、同志社大学理工学研究報告1件に掲載されている。さらに、米国物理学会 Conference Proceedings に2件、理工学研究報告に1件掲載が決定しており、すでに十分な評価を得ている。

本年1月22日午後2時より約2時間に亘り、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれた。論文概要講演の後、種々の質疑討論が行われ、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により論文に関する諸問題につき口頭試験を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。また、公聴会資料の一部は日本語で準備され、発表の一部も日本語で行われた。以上により、本論文提出者の専門分野に関する学力ならびに語学力は十分であることを確認した。

よって総合試験の結果は合格であると判定した。

# 博 士 学 位 论 文 要 旨

論文題目 : Production and Transport of Low-energy Ion Beams for Thin Film Deposition

氏 名 : Vasquez Magdaleno Jr.

要 旨 :

Extraction of low-energy ions from an ion source has earned considerable attention in recent years due to possible applications in technologically important fields. However, severe space-charge effects cause the beam to be divergent and rarefy ion current density. To mitigate space-charge, creation of plasma along the beamline is commonly employed. Plasma is usually created downstream by ionizing a background gas with electrons emitted from a cathode or through charge-exchange processes with energetic ions extracted from the source. However, for low-energy ions, ionization of the background gas downstream is extremely difficult. Thus, alternative means of space-charge mitigation is necessary.

In this study, an ion source with a wire extractor geometry was conceived. The wire extractor was made of 0.1 mm diameter tungsten (W) wires with a transparency of 90%. It was demonstrated that low-energy ions can be extracted using this extractor geometry. It was clarified that the penetration of dilute plasma downstream was able to neutralize the low-energy ion beam and minimized beam broadening. This work also clarified that coextraction of low-energy positive and negative ions allow efficient transport of both ion polarities without space-charge blow-up. The proposed schemes of low-energy ion transport may become valuable for ion-beam-based applications such as thin film deposition. This dissertation is composed of 7 chapters which began with the investigation of fundamental topics ranging from plasma excitation to ion source operation and low-energy ion transport. Toward the end of this study, a broad beam low-energy sputter-type ion beam system was brought to fruition.

The first chapter provides an overview of the different concepts related to neutral and ionized beam applications to material science field and their present status. The chapter laid out the objectives and motivations behind this research. In addition, a brief review of related work was presented.

Chapter 2 presents methods to excite and diagnose plasmas. Plasma excitation by different modes of radio frequency (RF) coupling has been studied. This was chosen in order to determine the possibility of utilizing a contamination-free sputtering system. It was shown that having a thick dielectric layer diminished the RF power absorption which led to poor coupling in the capacitively coupled plasma (CCP) case. On the other hand, inductively coupled plasma (ICP) discharge exhibited stable plasma, good coupling efficiency, high plasma density and high incident RF power. However, CCP mode

revealed higher electron temperatures compared to ICP mode. A magnetron electrode was designed to prove that it can improve the ionization efficiency in plasma and allow confinement of plasma near the location of a target which improved sputtering efficiency. Physics of hot cathode arc discharges were summarized as it was extensively utilized in Chapter 4. Principles of Langmuir probe and those of optical emission spectrometry (OES) were introduced on how they characterize the gas discharges.

Issues on the sputtering of gallium (Ga) are reported in Chapter 3. The Yamamura sputtering yield formula and the binary-collision-approximation-based ACAT code were utilized to approximate the sputtering yield of Ga. It was demonstrated that two possible mechanisms exist for the emission of Ga from the target surface under argon (Ar) plasma. One is evaporation which was confirmed by the ICP mode. Even though ICP was characterized by high density, the low electron temperature was not enough to heat up the target material. The other is sputtering of the target with incident ions having energies above a certain threshold energy. This was demonstrated in CCP mode. The CCP mode was able to enhance target sputtering due to its high electron temperature. Under pure nitrogen plasma, sputtering efficiency of Ga decreased as a result of the growth of thin nitride layer on the target. The plasma and sputtered particles were monitored using OES and a quadrupole mass analyzer (QMA). For the synthesis of Ga-based materials, the two modes of particle emission could be considered which can be used in different applications.

A proof-of-principle type of experiment is discussed in Chapter 4. Extraction of low-energy Ar and Ga ion beams was conducted using a two-electrode highly transparent wire extractor geometry. Ion energies as low as 10 eV and 50 eV were extracted using a hot filament cathode discharge and RF excited plasma, respectively. The production of low-energy ion beams was made possible due to the presence of a space-charge mitigating plasma in the downstream region. Plasma downstream could not be created via ionization due to low energies of the beams. Instead, the penetration of plasma downstream assisted in minimizing beam divergence. This was achieved because of the high transparency of the extractors and the absence of a suppressor electrode which allowed the electrons from the upstream region to penetrate towards the downstream region. It was shown that space-charge mitigation for low-energy ion beams can be realized by the presence of dilute plasma in the downstream region. In this scheme, plasma penetration downstream was dependent on the extraction potential induced on the electrodes. Characteristics of the beam were determined using a Faraday cup and a single aperture retarding potential analyzer (RPA).

Chapter 5 describes the result of another proof-of-principle type of experiment. In this experiment, space-charge mitigation for low-energy ion transport was made possible by coextraction of ions of both polarities. Positive ions of Ar, titanium (Ti) and oxygen (O) together with negative ions of O were extracted from a sputter-type ion source with a Ti target at 100 eV beam energy. Coextraction were carried out by ionizing Ar and O<sub>2</sub> gases in bulk plasma, sputtering and postionizing Ti neutrals and surface-production and self-extraction of energetic negative O ions. The coextraction method was possible due to low extraction potentials induced on the extractors. Though the current of negative O was

small, it was able to traverse along the beam line due to the presence of positive ions in the background which minimized beam broadening of negative ions. The emission of surface-produced negative O was dependent on the Ar/O<sub>2</sub> partial pressure ratio. It was further shown through TRIM sputtering simulations that ejection of O was dependent on the thickness of the oxide formed on the target surface. A momentum mass analyzer was used in this study to characterize the ion beam. The present scheme can be used to transport low-energy ions by merging ions of opposing polarities.

Chapter 6 presents the results of positive Ga ion extraction. Gallium suspended on a W reservoir was first sputtered as a neutral and subsequently postionized in plasma prior to extraction. The experiments used a single chamber and dual chamber systems. In the single chamber apparatus, inductively coupled plasma was ignited in a cylindrical chamber where a Ga target was located. In the dual chamber system, plasma was remotely produced and guided through a sputtering chamber. This design was chosen because of three reasons. 1) To take advantage of the high density plasma produced by ICP discharges; 2) To minimize RF penetration, oscillations and interference in the downstream region, and; 3) The flexibility of inducing DC or RF with lower frequency bias on the target. Low-energy ions were extracted from both sources using the wire extractor geometry. It was demonstrated that ion current of extracted beams increased with the remote plasma production system. The sputtered neutrals and extracted beams were monitored by a QMA, RPA, OES and ExB mass analyzer.

Chapter 7 provides a brief summary of the important contributions of this work. Recommendations on how to proceed to the next level of research activities is also provided.