

Abstract

This thesis investigates the nonlinear reactive sputter process in a novel way: both from the control-theoretical side and from the plasma-physical side. The plasma behavior is explicitly considered for the process modeling and for the design of the control system to establish steady-state plasma conditions. By use of one of the presented control systems an unstable operation point of the process can be stabilized, which enables high deposition speed and a stoichiometric thin film subject to steady-state plasma conditions. In this framework, the plasma state is either defined by the self-bias voltage or the electron density. The application of the Multipole Resonance Probe allows to control the electron density as a quantity that directly characterizes the plasma state. Experimental results validate the applicability of the developed models and of the developed control systems for various process conditions.

Potential drifts and disturbances of reactive sputtering are discussed in Chapter 4. Slow-transient processes are typically not discussed in process-control-oriented literature, even though they affect the relationship between the manipulated variables and the output variables. Hence, feedback control is necessary to compensate their influence on the process behavior.

The process run-up to obtain the required initial conditions for the reactive sputtering operation is described in Chapter 5. A multivariable sputter model is developed as a basis to design a model predictive controller. By application of this control system an operation point can be settled without violating input or state constraints.

High-rate reactive sputtering is studied in Chapter 6. Therefore, the established Berg model is analyzed and is reduced to present a control-oriented input/output model, which is suitable to systematically design a stabilizing control system. As the process aim of steady-state conditions is not completely defined by the goal of high-rate sputtering, the Berg model is extended to describe the multivariable behavior of the process. The multi-input multi-output model also includes the impact of the plasma on the sputtering and it is used to present a design method for a multivariable control system with the aim to establish steady-state process conditions.

In Chapter 7 three control systems are developed, which can set a specific electron density value based on the application of the Multipole Resonance Probe. For their systematic design a control-oriented plasma model is posed as well as a reduced model is presented. The ambiguous loop-shaped characteristics of the plasma state in dependence upon the reactive gas flow is initially measured in the context of the development of new plasma-defined control strategies. Despite of this nonlinear non-monotonous process behavior, the application of the developed control systems leads to steady-state plasma conditions.

Kurzfassung (abstract)

In dieser Arbeit wird der nichtlineare reaktive Zerstäubungsprozess zum ersten Mal sowohl von der systemtheoretischen Seite als auch von der plasmaphysikalischen Seite aus untersucht. Das Verhalten des Plasmas wird explizit für die Modellbildung und dem Entwurf von Regelungssystemen zur Herstellung von stationären Plasmabedingungen berücksichtigt. Hierbei ist der Plasmazustand entweder durch die Self-Bias-Spannung oder die Elektronendichte bestimmt. Unter konstanten Plasmabedingungen kann außerdem ein instabiler Arbeitspunkt stabilisiert werden, welcher sowohl eine hohe Abscheiderrate als auch die Erzeugung eines stöchiometrischen Dünnfilms realisiert. Mittels Nutzung der Multipol-Resonanz-Sonde wird die Plasmadichte geregelt, welche den Plasmazustand direkt beschreibt. Die Anwendbarkeit der entwickelten Modelle und der entwickelten Regelungssysteme wird durch experimentelle Ergebnisse validiert.

Mögliche Drifts und Störungen bezüglich des reaktiven Prozesses werden in Kapitel 4 untersucht. Diese langsamen transienten Vorgänge werden typischerweise nicht in der entsprechenden Literatur zur Prozessführung diskutiert, obwohl sie die Beziehung zwischen den Stellgrößen und den Ausgangsgrößen beeinflussen und somit durch eine Regelung kompensiert werden müssen.

Das Anfahren des Prozesses zur Herstellung von günstigen Anfangsbedingungen für das reaktive Zerstäuben wird in Kapitel 5 erläutert. Ein Mehrgrößenmodell wird als Basis zum Entwurf einer modellprädiktiven Regelung entwickelt. Mit Hilfe dieses Regelungssystems kann ein gewünschter Arbeitspunkt ohne Verletzung von Eingangs- und Zustandsbeschränkungen erreicht und gehalten werden.

In Kapitel 6 wird das Hochratenzerstäuben betrachtet. Hierzu wird das etablierte Bergmodell analysiert und reduziert um ein geeignetes Eingangs-/Ausgangsmodell zu erhalten, welches als Grundlage für den systematischen Entwurf von Regelungssystemen eingesetzt wird. Da das Ziel von stationären Prozessbedingungen nicht gleichzusetzen ist mit dem Wunsch nach Hochratenzerstäubung, muss das Bergmodell zur Beschreibung des Mehrgrößenprozesses erweitert werden. Das erweiterte Modell beinhaltet ebenfalls das Verhalten des Plasmas, welches die Festkörperzerstäubung antreibt, und es wird zum Entwurf eines Mehrgrößenregler eingesetzt, um Sollwertfolge bezüglich aller relevanten Prozessgrößen zu erreichen.

Drei Systeme zur Regelung der Elektronendichte werden in Kapitel 7 vorgestellt, welche auf der Anwendung der Multipol-Resonanz-Sonde basieren. Um diese Systeme systematisch zu entwerfen, werden geeignete Plasmamodelle aufgestellt. Das mehrdeutige Verhalten des Plasmazustandes in Abhängigkeit des Reaktivgasflusses wurde erstmals in dieser Arbeit, im Kontext der Entwicklung neuer Regelungssysteme, gemessen. Trotz dieses nichtlinearen und nicht-monotonen Prozessverhaltens führt die Nutzung der entwickelten Regelungssysteme auf stationäre Plasmabedingungen.