

Thesen zur Dissertation

Beiträge zur Regelung des
Vertical-Gradient-Freeze-Kristallzüchtungsprozesses auf
Basis verteiltparametrischer Modelle

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Stefan Ecklebe

1. Der Vertical-Gradient-Freeze-(VGF)-Prozess ist ein modernes Verfahren zur Herstellung von Einkristallen, welche zersägt als Wafer die Grundlage der gesamten Halbleiterindustrie bilden. Speziell für die Herstellung von sogenannten Verbindungshalbleitern wie Gallium-Arsenid zur Fertigung hochempfindlicher Detektoren oder von Schaltkreisen in der Hochfrequenztechnik spielt der VGF-Prozess eine führende Rolle.
2. Die Züchtung eines Einkristalls wird in der VGF-Anlage durch die sukzessive Erstarrung der Schmelze von unten nach oben realisiert. Um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten, muss das Temperaturprofil in der gesamten Anlage genaue Vorgaben einhalten, wofür die Heizer in der Anlage geeignet angesteuert werden müssen.
3. Nach dem aktuellen Stand der Technik werden im Prozess vorher fest definierte Heizkurven abgefahren und dieser somit im offenen Kreis betrieben. Diese Variante ist anfällig für externe Störungen und ist nicht in der Lage Abweichungen durch Alterungsprozesse an der Anlage zu kompensieren. Für die zukünftige Steigerung der Geschwindigkeit des Prozesses und der Qualität der Erzeugnisse ist der Einsatz einer modellbasierten Regelung notwendig.
4. Der Prozess kann für die Modellierung als Vertreter der sogenannten verteiltparametrischen Systeme aufgefasst werden, bei denen die betrachteten Größen nicht in wenigen Punkten konzentriert sondern örtlich verteilt sind. Im Gegensatz zu den *konzentriertparametrischen* Problemen, die sich durch gewöhnliche Differentialgleichungen (ODEs) beschreiben lassen, wird die Dynamik *verteiltparametrischer* Prozesse mit partiellen Differentialgleichungen (PDEs) beschrieben.
5. Beim Regelungsentwurf für verteiltparametrische Systeme unterscheidet man zwischen Methoden mit früher und später Approximation. Bei der frühen Approximation werden die PDEs zunächst durch ODEs approximiert und im Anschluss mit etablierten Verfahren die Regelung entworfen. Die Ansätze mit später Approximation entwerfen die Regelung direkt anhand der PDEs, erst für die Implementierung wird die Regelung diskretisiert. Entwürfe mit später Approximation stellen elegante Zugänge dar, sind aber noch selten in der industriellen Praxis.
6. Der VGF-Prozess lässt sich durch zwei Wärmeleitungsprobleme in Kristall und Schmelze modellieren, deren Ortsgebiete sich aufgrund des Wachstums des Kristalls während des Züchtungsvorgangs ändern. Das Wachstum des Kristalls selbst wird durch die sog. *Stefan-Bedingung* beschrieben

und hängt von den Gradienten in Kristall und Schmelze an der Phasengrenze ab. Bei dem resultierenden Gesamtmodell handelt es sich um ein nichtlineares parabolisches Anfangs-Randwert-Problem mit freiem Rand.

7. Das ursprüngliche dreidimensionale Modell kann ohne Abstriche auf ein Modell in zwei Ortsdimensionen reduziert werden. Unter Annahme einer langsamen Wachstumsrate lässt sich ebenfalls eine eindimensionale Beschreibung angeben.
8. Das verteiltparametrische eindimensionale Prozessmodell kann sowohl mit einem Potenzreihenansatz als mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) hinreichend genau approximiert und auf ein System von ODEs überführt werden.
9. Für die potenzreihenbasierte Approximation lässt sich ein sog. *flacher Ausgang* angeben, mithilfe dessen sich leicht eine Steuerung und eine Regelung für den Prozess entwerfen lässt. Beide zeigen für eine ausreichend hohe Approximationsordnung sehr gute Resultate.
10. Die Approximation auf Basis der FEM eignet sich zum Entwurf einer modellprädiktiven Regelung, bei der in jedem Schritt ein Optimalsteuerungsproblem gelöst wird und somit Prozessbeschränkungen erfolgreich berücksichtigt werden können.
11. Den einfachsten Entwurf mit später Approximation stellt eine einfache Randwertrückführung dar, die gemessen am Implementierungsaufwand respektable Ergebnisse zeigt aber keine direkten Zugriff auf die Wachstumsgeschwindigkeit ermöglicht.
12. Mit der Methode des verteiltparametrischen Backsteppings lassen sich getrennt für Kristall und Schmelze verteiltparametrische Regelungen entwerfen, die eine gezielte Beeinflussung der Temperaturen in der Anlage ermöglichen. Beim Entwurf ignorierte Verkopplungen zwischen den Phasen wirken sich negativ auf die Regelgüte aus.
13. Durch einen Mehrschritt-Backsteppingentwurf, welcher die Verkopplungen zwischen den Phasen berücksichtigt, ist es möglich das Fehlerverhalten bezüglich der Phasengrenze und das Fehlerverhalten bezüglich der Temperatur gleichzeitig und unabhängig voneinander vorzugeben.