Modulares Steuerungskonzept für integrierte Messtechnik in der Halbleiterfertigung am Beispiel einer Mehrkammerprozessanlage

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von

Martin Schellenberger

Erlangen – 2011

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	9. September 2010
Tag der Promotion:	6. Juni 2011
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Reinhard German
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel Prof. Dr. Cor Claeys

Erlanger Berichte Mikroelektronik

Band 3/2011

Martin Schellenberger

Modulares Steuerungskonzept für integrierte Messtechnik in der Halbleiterfertigung am Beispiel einer Mehrkammerprozessanlage

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0264-5
ISSN 0948-3462

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Meiner Frau

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines neuen, modularen Steuerungskonzepts für die Integration und Steuerung von Messtechnik in der Halbleiterfertigung. Der wesentliche Anwendungsbereich ist der Ein- oder der Anbau von Sensoren oder Messköpfen in Produktionsanlagen oder Handhabungsgeräten mit dem Ziel, Messungen während oder kurz nach einem Prozessschritt durchführen zu können. Eine solche zeitnahe Charakterisierung von Produkt- oder Scheibenparametern ist die Basis für weiterführende Methoden zur automatisierten Prozesskontrolle.

Viele Integrationsansätze haben die instrumentelle Integration, also den physischen Einbau eines Sensors oder Messkopfs im Fokus. Die ebenso notwendige Software zur Bedienung und Steuerung des Messinstruments auch im komplexen Verbund einer Produktionsanlage spielt häufig eine untergeordnete Rolle – mit bekannt nachteiligen Auswirkungen auf die zeitgerechte Fertigstellung einer Integration und deren korrekten und vollständigen Funktionsweise, Erweiterbarkeit, Wartbarkeit etc.

Im Zentrum dieser Arbeit steht deshalb ein breit anwendbares Steuerungskonzept zur Realisierung von Steuerungssoftware, das flexibel an verschiedene Integrationsszenarien angepasst werden kann. Um ein solches Steuerungskonzept möglichst vollständig entwerfen zu können, werden existierende Lösungsansätze für die Integration von Messtechnik diskutiert und systematisiert. Diese Systematisierung dient als Basis für den ersten Schwerpunkt der Arbeit: den Entwurf der neuen, modularen Softwarearchitektur für die Integration von Messtechnik. Wesentliche Merkmale dieser Architektur sind ihr umfassender Ansatz, ihr modularer Aufbau und ihre Flexibilität.

Im zweiten Schwerpunkt der Arbeit wurde das Steuerungskonzept für die Anwendung an einem Messsystem in einer Mehrkammerprozessanlage umgesetzt und die Steuerungssoftware „EasyControl M“ programmiert. Basierend auf den Erfahrungen mit der realisierten Steuersoftware wird das erarbeitete Steuerungskonzept diskutiert, insbesondere im Hinblick auf den geleisteten Implementierungsaufwand, die durchgeführten Tests mit der Steuerungssoftware und das weitere Nutzungspotential.

Hervorzuheben ist der im Steuerungskonzept vorgesehene und in der Steuerungssoftware umgesetzte Simulationsmodus, der die schrittweise Implementierung und den Test einzelner Softwarekomponenten erlaubt und die Nutzung der Steuerungssoftware zu Demonstrations- oder Schulungszwecken ermöglicht, ohne dass das zu steuernde Gerät vorhanden sein muss.

Abstract

This work describes the development of a novel modular control concept for the integration and control of metrology in semiconductor manufacturing. The main scope is the integration or extension of sensors or measuring heads in manufacturing equipment or handling equipment with the objective to carry out measurements during or immediately after a process step. Such a timely characterization of product parameters or wafer parameters is the basis for the subsequent application of methods for automated process control.

Many integration approaches have the instrumental integration in focus, which is the physical installation of a sensor or measuring head. Yet, the likewise essential software to operate and control metrology in the complex environment of a production equipment often plays a minor role in those considerations – with known adverse effects on the timely completion of integration solutions and their correct and thorough functionality, extensibility, maintainability etc.

Therefore, the core of this work is a widely applicable control concept for the realization of control software, which can be flexibly adapted to various integration scenarios. In order to design such a control concept as complete as possible, existing approaches for the integration of metrology are discussed and systematized. This systematization serves as the basis for the first focus of the work: the design of the new, modular software architecture for the integration of metrology. Key characteristics of this architecture are its comprehensive approach, its modular design and its flexibility.

The second focus of the work was to realize the control concept for the application of a measuring system in a cluster tool and to code the control software "EasyControl M". Based on the findings and experiences with the realized control software, the control concept itself will be discussed, especially in view of the implementation effort, the testing carried out and further potential applications.

In addition, the simulation mode should be noted, which was included in the control concept and actually implemented in the control software: this approach allows for the gradual implementation and testing of individual software components and enables the use of the control software for demonstration or training purposes without the controlled equipment actually being present.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen, die das Gelingen dieser Arbeit ermöglicht und mich im Laufe der Zeit, in der diese Arbeit entstanden ist, begleitet haben. Insbesondere gilt mein Dank:

Herrn Prof. Heiner Ryssel für die Bereitstellung und Betreuung dieses Forschungsthemas und die Möglichkeit, die notwendigen Arbeiten am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie durchzuführen – und für so manche entscheidende Frage und Gedankenanstoß;

Herrn Prof. Cor Claeys für die Übernahme des Zweitgutachtens;

Herrn Prof. Lothar Pfitzner für die Arbeitsmöglichkeit im faszinierenden Gebiet der Halbleiterfertigungsgeräte und -methoden – ich habe weit mehr gelernt, als sich in den Zeilen einer Doktorarbeit zusammenfassen lässt;

Herrn Dr. Claus Schneider, der leider zu früh verstorben ist, für zahlreiche fachliche Diskussionen und Unterstützung zu Beginn der Arbeit – und die Finanzierung eines Projekts zur industrienahen Integration von Messtechnik mit der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg zur Durchführung von Programmierarbeiten;

allen Mitarbeitern der Gruppe Geräte und Prozessautomatisierung für die gemeinsame Arbeit an dem großen Themenfeld der integrierten Messtechnik, von dem die vorliegende Arbeit einen Ausschnitt zum Thema hat, und viele anregende Diskussionen auch darüber hinaus;

Herrn Harry Uhl und Herrn Henning Mauermann, von der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg, für die Diskussionen zur industrienahen Integration von Messtechnik und die Durchführung von Programmierarbeiten;

Herrn Michel van Staveren, von der Firma ASM International, für praktische und informelle Unterstützung bei der Integration in die ASM-Mehrkammerprozessanlage;

allen Mitarbeitern des Fraunhofer IISB und des Lehrstuhls für elektronische Bauelemente für eine außergewöhnlich angenehme, konstruktive und kollegiale Arbeitsatmosphäre;

meiner Frau Gudrun und meinen Kindern Andreas, Rebekka und Matthias für ihre Geduld und Unterstützung über den nicht eben kurzen Zeitraum der Promotion hinweg;

meinen Eltern Hildegard und Konrad, die wesentliche Werte in mein Leben gelegt und mir die Möglichkeiten für diese Ausbildung geboten haben.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Technologische Motivation 5

2.1 Aktuelle Herausforderungen in der Halbleiterindustrie 6

2.2 „Automatisierte Prozesskontrolle“ als Lösungsansatz 10

2.2.1 Verfahren der automatisierten Prozesskontrolle 13

2.2.2 Herausforderungen bei der Anwendung der automatisierten Prozesskontrolle 17

2.3 Messtechnik als Basis für die „automatisierte Prozesskontrolle“ 20

2.4 Anwendung: Schichterzeugung in einer Mehrkammerprozessanlage 24

2.4.1 Mehrkammerprozessanlage für Prozessierung und Charakterisierung 24

2.4.2 Schichterzeugung und Prozesskontrolle 28

2.4.2.1 Technologie und Einsatzbereiche von Schichten mit hoher Dielektrizitätszahl 28

2.4.2.2 Technologie und Einsatzbereiche ferroelektrischer Schichten 31

2.4.2.3 Herausforderungen bei der Schichterzeugung 32

2.4.2.4 Herausforderungen bei der Prozesskontrolle 32

2.4.3 Vorteile der Anwendung von integrierter Messtechnik 33

2.4.3.1 Bestimmung der Schichtzusammensetzung 33

2.4.3.2 Bestimmung der Schichtdicke 34

3 Integrierte Messtechnik 37

3.1 Einführung in die integrierte Messtechnik 38

3.1.1 Parameterkategorien 38

3.1.2 Wahl des Integrationsortes für Messtechnik 39

3.1.3 Prinzipien für die softwaretechnische Anbindung von integrierter Messtechnik 41

3.2 Unterschiede zur stand-alone Messtechnik 42

3.3 Kostenaspekte von integrierter Messtechnik 46

3.4 Herausforderungen bei der Integration 49
3.4.1 Standardisierungsaktivitäten in der Halbleiterindustrie..... 49
3.4.2 Das OSI-Referenzmodell für Kommunikationssysteme 50
3.4.3 Kommunikationsstandards für Halbleiterfertigungsgeräte..... 54
3.5 Lösungsansätze für die Integration von Messtechnik 60
3.5.1 Ansätze für die physikalische Integration..... 60
3.5.2 Ansätze für die softwaretechnische Integration..... 62
4 Modulares Steuerungskonzept für die Integration von Messtechnik 65
4.1 Modulare Messtechnik 65
4.1.1 Prinzip modularer Systeme 65
4.1.2 Definition der modularen Messtechnik..... 67
4.1.3 Bewertung der modularen Messtechnik 69
4.1.3.1 Vorteile modularer Messtechnik..... 69
4.1.3.2 Nachteile modularer Messtechnik 71
4.1.3.3 Diskussion und Bewertung 73
4.2 Vergleich mit dem Stand der Technik hinsichtlich der Integration von Messtechnik 75
4.3 Die modulare Softwarearchitektur 78
4.3.1 Kriterien für die Entwicklung 79
4.3.2 Aufbau der modularen Softwarearchitektur 80
5 Realisierung des modularen Steuerungskonzepts..... 87
5.1 Vorgehensweise..... 87
5.1.1 Spezifikationsphase..... 88
5.1.2 Entwurfsphase 89
5.1.3 Implementierungsphase 90
5.1.4 Testphase..... 91
5.2 Das modulare Messmodul einer Mehrkammerprozessanlage 91
5.2.1 Übersicht über das modulare Messmodul..... 92
5.2.2 Übersicht über die Mehrkammerprozessanlage..... 93
5.2.3 Hardware und Software zum Aufbau der Steuerung 94

5.2.4 Entwicklungsumgebung 101
5.3 Spezifikation und Programmierung der Steuerungssoftware 101
5.3.1 Hardware und Treiber 102
5.3.2 Steuerobjekte 104
5.3.3 Steuergruppen 108
5.3.4 Kontrollverfahren 110
5.3.5 Bedienung und Steuerung 110
5.3.5.1 Benutzerschnittstelle 111
5.3.5.2 Hilfefunktion und Benachrichtigung von Nutzern 116
5.3.5.3 Kommunikationsschnittstelle 118
5.3.6 Verwaltung 122
5.4 Diskussion der Softwarearchitektur 123
5.4.1 Aufwand für die Implementierung 123
5.4.2 Test der neuen Steuerungssoftware 126
5.4.3 Nutzungspotential 129
6 Zusammenfassung und Ausblick 133
6.1 Zusammenfassung 133
6.2 Ausblick 136
7 Literaturverzeichnis 139
8 Abbildungsverzeichnis 147
9 Schlagwortverzeichnis 151
Anhang – Realisierung in LabView-Code 155
A.1 Grundstruktur des Steuerungsprogramms 156
A.2 Der „Objects“-Funktionsblock 157
A.3 Code-Beispiel für das Belüftungsventil 159
A.4 Code-Beispiel für das simulierte Belüftungsventil 162