

OPTISCHES TESTEN VON ICS IN DER PRODUKTION

— Abschlußbericht der TU Berlin —

Institut für Mikroelektronik und Festkörperelektronik
der Technischen Universität Berlin
Prof. Dr.-Ing. Horst H. Berger
Jebensstraße 1
10623 Berlin

Telefon: (030) 314 25880
Fax: (030) 314 24597

Das diesem Bericht zugrundeliegende Verfahren wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie unter dem Förderkennzeichen 01M2932A gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhalt

Vorwort	6
Übersicht	8
1 Laserdioden als Lichtquellen	10
1.1 Strahlparameter von Laserdioden	10
1.2 Optische Leistung-Strom-Kennlinie von Laserdioden	11
1.3 Intensitätsmodulation der Laserdioden	13
1.3.1 Strommodulation	15
1.3.2 Modulation mit Hilfe eines BIAS-T	15
1.4 Digitale Laserdiodensteuerung	20
1.4.1 Laserdiodentreiber	21
1.4.2 Temperaturregelung	21
2 Strahlführungssysteme	24
2.1 Mikroskopaufbau	24
2.2 Aufbau mit Lichtleitfasern	27
2.2.1 Funktionsprinzip	28
2.2.2 Single-Mode-Lichtleitfasern	30
2.2.3 Signallaufzeiten und Dispersion in Single-Mode-Fasern	31
2.2.4 Signaldämpfung	33
2.2.5 Aufbau des faseroptischen Meßplatzes	36
2.2.6 Polarisation und schräger Lichteinfall	40
2.3 Lichteinstrahlung auf Halbleiteroberflächen	40
2.4 Zusammenfassung des Kapitels	45
3 Fotodioden	47
3.1 Überblick über die Chipentwürfe	48
3.2 Funktionsweisen und Kenngrößen von Fotodioden	49
3.3 Statische Untersuchungen verschiedener CMOS-Dioden	51

3.3.1	Kennlinien der Dioden	51
3.3.2	Einfluß der Sperrspannung	51
3.3.3	Produktionsbedingte Streuung der Stromausbeuten	55
3.3.4	Fotostrom bei Fehljustage	56
3.3.5	Übersprechverhalten von Fotodioden	58
3.3.6	Zusammenfassung der statischen Meßergebnisse, Schlußfolgerungen	59
3.4	Dynamische Messungen an verschiedenen Diodentypen	61
3.4.1	Einfluß von Größe und Typ der Dioden	65
3.4.2	Abhängigkeit der Grenzfrequenz von der Eindringtiefe des Lichts	65
3.4.3	Grenzfrequenzen bei lateraler Fehlpositionierung	66
3.4.4	Schlußfolgerungen aus den Meßergebnissen an CMOS-Dioden	66
3.5	Messungen an in Bipolar-Technologie hergestellten Dioden	68
3.5.1	Statische Messungen an Dioden in Bipolar-Technologie	68
4	Verbesserung der Eingangsschaltungen	74
4.1	Eingangsschaltungen in CMOS/BiCMOS-Schaltungstechnik	74
4.1.1	Einfache Stromspiegelschaltung mit Referenzdiode	74
4.1.2	Doppelter Stromspiegel	77
4.2	ECL-Schaltungen	81
5	Untersuchungen mit elektrischen und optischen Probecards	89
5.1	Hybridsondenkarte, 1. Versuch	90
5.1.1	Aufbau und Justage der ersten Probecard	90
5.1.2	Testmessungen mit der ersten Probecard	90
5.1.3	Schlußfolgerungen aus den Messungen mit der ersten Probecard	93
5.2	Hybridsondenkarte, 2. Versuch	93
5.2.1	Herstellung des Trägers	94
5.2.2	Aufbau und Ergebnisse	96
6	Anwendung des elektro-optischen Effekts zur Signalauskopplung	100
7	Kapazitive Kopplung	105
7.1	Physikalisches Prinzip	105
7.2	Stand zu Projektbeginn	106
7.3	Grundkonzeption zur Realisierung der kapazitiven Signalauskopplung	108
7.4	Elektroden	109
7.5	Vorverstärker	113
7.6	Eignung von Picoprobes	118
7.7	Endverstärker	124
7.8	Gestaltung der Ausgangspads	126

7.9	Messungen am TH 7001	130
7.10	Einfluß externer Störquellen	132
7.11	Optoelektronisches Sampling	135
7.11.1	Meßprinzip	135
7.11.2	Experimentelle Ergebnisse	141
7.12	Einige Schlußbemerkungen	145
8	Gemeinsame Spannungsversorgung der Chips	147
8.1	Vorüberlegungen zur Leiterbahnführung	148
8.2	Realisierung der waferzentralen Spannungsversorgung in der Thesys-BiCMOS-Technologie	155
8.2.1	Leiterbahnführung	155
8.2.2	Waferkontaktierung	155
8.2.3	Der optische Schalter	157
8.2.4	Die Widerstände	158
8.3	Ergebnisse der Messungen in BiCMOS-Technologie	158
8.4	Gemeinsame Spannungsversorgung für zwei ECL-Schaltkreise	159
9	Aufbau und Test des Prototyps	161
9.1	Prototyp-Schaltkreise	161
9.1.1	BiCMOS-Schaltkreis TH 7001	162
9.1.2	ECL-Schaltkreis SY100EL31	174
9.2	Apparativer Aufbau	176
9.3	Meßergebnisse am Prototyp TH 7001	178
9.4	Test des TH 7001 unter Produktionsbedingungen	180
9.5	Meßergebnisse am Prototyp SY100EL31	182
10	Zusammenfassung	184
A	Lichteinstrahlung auf Halbleiteroberflächen	186
A.1	Lichtausbreitung in Materie	186
A.2	Reflexion an Grenzflächen	187
A.3	Lichtabsorption	195
B	Pflichtenheft	198
B.1	Prototypenchips	199
B.2	Allgemeine Eigenschaften der Testeinrichtung	201
B.2.1	Meßaufbau am Mixed-Signal-Tester bei Thesys	201
B.2.2	Komplettes optisches Testsystem	202
B.2.3	Meßaufbau zur gemeinsamen Spannungsversorgung	204

B.3	Spezifikationen der Einzelkomponenten der Produktionstesteinrichtungen . . .	204
B.3.1	Laserdioden und Laserdiodentreiber	204
B.3.2	Vorverstärker für kapazitive Signalauskopplung	205
B.3.3	Verstärker und Signalformer	205
B.4	Steuerungssoftware	205
C	Firmenprofil der Thesys GmbH	206
D	Profil der Firma SMI GmbH	209
E	Firmenprofil der Phoenicon GmbH	211
F	Firmenprofil der Raith GmbH	212
G	Firmenportrait der KARL SUSS Dresden GmbH	213
H	Profil des Instituts für Optik und Quantenelektronik der FSU Jena	215
I	Profil des Instituts für Mikroelektronik und Festkörperelektronik der Technischen Universität Berlin	216
	Abbildungsverzeichnis	218
	Tabellenverzeichnis	229
	Literaturverzeichnis	230

Vorwort

Der hier vorgelegte Bericht beschreibt die Ergebnisse einer dreijährigen Forschungszusammenarbeit von sieben Partnern, davon fünf industrielle Unternehmen (Thesys GmbH, SMI GmbH, KARL SUSS Dresden GmbH, Phoenicon GmbH, Raith GmbH) und zwei Universitäten (Friedrich-Schiller-Universität Jena und Technische Universität Berlin). Ziel war der Nachweis des Nutzungspotentials optoelektrischer oder kapazitiver Einrichtungen zur berührungslosen Ein- und Auskopplung digitaler Signale beim Test integrierter Schaltungen auf dem Wafer in einer realen Produktionsumgebung.

Die Projektkoordinierung lag bei der Technische Universität Berlin, Institut für Mikro- und Festkörperelektronik. Dies führte aber nicht zu einer in jedem Detail wissenschaftlich akribischen Vorgehensweise. Die Komplexität der Aufgabe und die begrenzte Zeit erforderten es vielmehr, durch viele schnell zu realisierende Experimente und mit auf groben physikalischen Überlegungen beruhenden Entscheidungen einen baldigen Überblick über die verzahnten Probleme zu gewinnen und erste Lösungen zu finden.

Die jeweils zu verwendenden Bauelemente, Materialien und Konstruktionen mußten -wo immer möglich- aus Vorhandenem, leicht Beschaffbarem oder Abwandelbarem kommen. Jeder Einzelschritt wurde immer direkt auf das Endziel eines funktionierenden Prototypen ausgerichtet. Richtschnur war dabei das Pflichtenheft, das laufend aufgrund gewonnener Erkenntnisse aktualisiert wurde. So konnte unser Ziel eines in echter Produktionsumgebung funktionierenden Prototypen relativ geradlinig und rechtzeitig erreicht werden. Die Folgerung aus dieser Vorgehensweise, daß das Ergebnis sicherlich noch nicht die Grenze des Erreichbaren darstellt, ist angesichts der bereits guten Daten eher ermunternd.

Trotz einer sehr definierten Zielstellung sollte nicht außer acht gelassen werden, daß die vielen Teilerkenntnisse fruchtbringend auch auf verwandte Problemstellungen übertragen werden können. Z.B. fehlen Testvorrichtungen und Testmethoden für solche integrierte Schaltungen, die durch ihre funktionelle Anwendung bedingt mit optischen Sensoren versehen sind.

Auf keinen Fall sollte aber der Gewinn aus der Erfahrung der Zusammenarbeit der sehr verschiedenen Partner unerwähnt bleiben. Es sind Kontakte aufgebaut worden, die zweifellos auch in Zukunft für alle von Nutzen sein werden.

Es war für den Projektkoordinator besonders erfreulich zu beobachten, welch hohen persönlichen Einsatz viele der direkt im Projekt Verankerten für das Gelingen des gemeinsamen Projekts erbracht haben.

Daß dies besonders bei den industriellen Partnern in Anbetracht auch anderer Aufgaben und Prioritäten nicht immer einfach war, sei hier ausdrücklich anerkannt.

Ohne damit die Verdienste der nicht genannten Beteiligten schmälern zu wollen, möchte ich eher stellvertretend auch für diese Herrn Dr. J. Sturm namentlich erwähnen. Er hat als die "rechte Hand" des Projektkoordinators neben der Bearbeitung seiner Teilthemen unermüdlich ermunternd und drängend Termine und Wegentscheidungen überwacht, Gesprächspartner zusammengebracht und die gesamte Dokumentation auf dem Laufenden gehalten.

Der besondere Dank aller Projektpartner gilt selbstverständlich dem BMBF und seinen Vertretern für die Förderung des Projektes und besonders unserem Projektbetreuer, Herrn Dr. Manfred Dietrich (DLR), der das Projekt stets mit großem Interesse und vielen guten Anregungen betreut hat.

Prof. Dr.-Ing. Horst H. Berger, Projektkordinator

Übersicht

Testsignale können im Prinzip relativ leicht auf optischem Wege in die integrierte Schaltung eingeprägt werden: In einem hochintegrierten Schaltkreis gibt es eine Vielzahl von pn-Übergängen, die als Fotodiode das optische Signal in ein elektrisches wandeln können. Von der prinzipiellen Machbarkeit bis zur Realisierung einer Standardlösung ist es nichtsdestoweniger ein großer Schritt. Die Gliederung des Berichts folgt dem Weg, den das Testsignal von der Quelle, d.h. von Lichtquelle und Signalgenerator, über das zu testende Chip bis zur Signalauskopplung nimmt.

Zunächst muß das digitale Spannungssignal des Testsignalgenerators zur Modulation einer Lichtquelle, in unserem Fall einer Laserdiode, genutzt werden (Kapitel 1).

Das Licht wird dann entweder durch ein Freistrahlsystem oder durch Lichtleitfasern zum Chip geführt, wie im Kapitel 2 beschrieben. Hier werden auch die Laboraufbauten vorgestellt, mit denen wir einzelne Fotoempfänger charakterisiert haben.

Je nach Einfallswinkel und Polarisation wird mehr oder weniger Licht in die Empfängerstrukturen eingekoppelt. Mit der Berechnung der günstigsten optischen Anordnung beschäftigt sich das Kapitel 2.3.

Die Funktionsweisen und Eigenschaften unterschiedlicher Fotoempfänger, wie sie in Standardprozessen realisiert werden können, werden im Kapitel 3 miteinander verglichen. Statische (Abschnitt 3.3) und dynamische Messungen an Teststrukturen lieferten einerseits die Daten für den Entwurf der nachfolgenden Verstärkerschaltung; andererseits ergeben sich aus den Messungen auch Anforderungen an den mechanischen Aufbau der Testvorrichtung, die für die Konstruktion des Prototypen wichtig sind.

Die Beschaltung der Fotodioden richtet sich in erster Linie nach den Pegelanforderungen der nachfolgenden Schaltungen, sie muß aber insbesondere auch für hohe Frequenzen geeignet sein und Fotostromstreuungen tolerieren (Kapitel 4).

Eine von uns entwickelte optische Probecard gestattet die Einkopplung mehrerer optischer Signale gleichzeitig zur elektrischen Kontaktierung des Schaltkreises. Aufbau und Funktionsweise sind im Kapitel 5 erläutert.

Die Auskopplung der Signalfolgen sollte berührungslos erfolgen. Für einen Funktionstest von Digitalschaltungen muß der logische Pegel an einem vorgegebenen Schaltungselement zu einem definierten Zeitpunkt bezogen auf den Signaleingang bestimmt werden. Der Test komplexer

Schaltungen erfordert das parallele Auslesen mehrerer Signale von Ausgangspads. u. U. auch von internen Schaltungsknoten. Es sollen periodische Signale (Frequenzmessung bis 1 GHz) und nichtperiodische Signalfolgen erfaßbar sein. Der minimal nachzuweisende Spannungshub liegt bei 0.8 V (ECL-Pegel).

Die Detektionseinheit muß in eine die (optische) Signalzuführung und die Betriebsspannung enthaltende Probecard integrierbar sein. Daraus leiten sich Anforderungen an den Platzbedarf, die Justage- und Positioniergenauigkeit gegenüber dem Wafer und die Anfälligkeit gegen elektrisches Übersprechen ab. Diese Randbedingungen werden hauptsächlich durch die Padgröße und den Padabstand auf dem Wafer und durch die Ebenheit der Waferoberfläche bestimmt. Die anvisierte minimale Padgröße liegt bei $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, der Padabstand im Bereich der Padgröße und die Ebenheit der Waferoberfläche bei 10 - 20 μm .

Zwei verschiedene Verfahren zur Signalauskopplung wurden untersucht: das elektro-optische Sampling (Kapitel 6) und die kapazitive Signalauskopplung (Kapitel 7)

Ein vollständig berührungsloser Test ist nur möglich, wenn die Betriebsspannung waferzentral, das heißt für alle Chips gleichzeitig, zugeführt wird. In Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern wurden zwei verschiedene Konzepte zu einer solchen waferzentralen Spannungsversorgung entwickelt (Kapitel 8).

Der Prototyp der Testeinrichtung und die Demonstratorschaltkreise werden im Kapitel 9 vorgestellt.