

Hochauflösende schreibende Elektronenstrahl-Lithographie und Electron-Beam-Testing

P. Hudek, V. Barák, I. Kostic, M. Kovác
Institut für Computer Systeme (ICS), Slowakische Akademie der Wissenschaften,
842 37 Bratislava, Slowakische Republik

Es wird über den Stand der Elektronenstrahl-Lithographie (EL) und der Elektronenstrahl-Funktionsprüfung (Electron-Beam-Testing — EBT) berichtet, wie er mit den augenblicklich zur Verfügung stehenden Anlagen (Elektronenstrahl-Patterngenerator: modifizierter ZBA 10/1 von Carl-Zeiss-Jena und Elektronenstrahl-Tester EDS) an unserem Institut in Bratislava zu erreichen ist.

1. Einleitung

Die EL und EBT gehören zu den nichtkonventionellen Methoden in der Halbleitertechnologie und benötigen gegenüber der lichteoptischen Lithographie sowie der klassischen Testierung von IC-Bauelementen völlig neu zu entwickelnde Geräte. Diese Geräte stehen nun in serien-nahen Versionen für die industrielle Anwendung bei der Herstellung von VLSI Schaltkreisen fast vollständig zur Verfügung. Bei diesen Anwendungen sind die erwähnten Geräte zumeist stark auf konkrete Anwendungen in der VLSI-Schaltkreistechnik ausgerichtet. Das Verlangen nach speziellen Bauelementen mit höheren Integrationsdichten und wachsender Funktionalität macht eine ständige Verkleinerung der Strukturen unumgänglich. Damit sind auch die Anforderungen an Lithographie und Funktionsprüfung immer höher geworden.

In unserem Beitrag wollen wir die Eignung ursprünglich laborzweckmäßiger Elektronenstrahlgeräte für typische Aufgabestellungen der Primärstrukturierung und Funktionsprüfung von Komponenten der ASIC-Schaltkreistechnik in Wechselbeziehung mit den Lithographieverfahren und Materialien untersuchen. Nach einer kurzen Erläuterung des Aufbaus und der Spezifikation des EL-Schreibers und EBT-Gerätes wollen wir an ausgewählten Applikationsbeispielen untersuchen, in welchem Maße unsere Anlagen den spezifischen Anforderungen der Forschung in der Halbleitertechnologie gerecht werden.

2. Elektronenstrahl-Lithographie

Die weiterhin zunehmende Miniaturisierung mikroelektronischer und mechanischer Bauelemente (Micro-Machining) verlangt Lithographieverfahren für den Mikro- (bis 1 μm), Submikro- (bis 0.1 μm) und Nanometer- (unter 0.1 μm) Strukturbereich. Mit der direktschreibenden EL, die die vorbereiteten Strukturdaten einer Maske mit Hilfe eines Elektronenstrahls direkt in den elektronenempfindlichen Resist überträgt, steht ein derartiges Verfahren zu Verfügung.

Eine ausführliche Darstellung unserer EL-Anlage erfolgte durch einen Beitrag hier in der letzten Veranstaltung im Jahre 1991 [1]. Es handelt sich um eine stark modifizierte Variable-Shaped-Beam Anlage mit einer Auflösung von etwa 50 nm und mit 30 KeV Elektronenenergie. Die umfangreichsten Modifikationen und Erweiterungen, die eine labormäßige EL-Anlage erfahren muß, um als Kleinproduktions-Lithographieanlage einsetzbar zu sein, ist jedoch an der Steuerelektronik, Steuersoftware und am Masken-Entwurfssystem (CAD) vorzu-

nehmen. Neben den erwähnten technischen Anforderungen kommt auch der Belichtungstechnologie eine große Bedeutung zu. In der Belichtungssoftware wurde ein Markenerkennungssystem implementiert (das die Detektion dieser Marken aus dem Rückstreusignal ermittelt) und ein Modul für effektive Unterdrückung des Intra-Proximity-Effektes. Es sind somit die Voraussetzungen gegeben, Strukturen bis an die Auflösungsgrenze des Gerätes zu kreieren, sowie fast alle EL-Forderungen (Fotomasken für DUV-Lithographie, Übertragung aufeinanderfolgenden Maskenebenen direkt an der Substratoberfläche) zu erfüllen.

2.1. Master-Mask-Herstellung

Bei den Master-Masks geht es uns vor allem darum, die Kantenqualität auch bei nichtorthogonal begrenzten Strukturen mit hoher Genauigkeit im Submikrometer-Bereich ($0.3 \mu\text{m}$) in Cr-Schichten zu realisieren. Der direkte Einsatz dieser Fotomasken liefert dann die höhere Lagegenauigkeit und die bessere Strukturtreue, ist aber zeitaufwendig und kostenintensiv. Als Elektronenresist wurden der Positivresist ELVACITE 2041 und 2010 (PMMA-DuPont) und der Negativresist NS-125 (Microimage Technology) verwendet. Die optimale Abbildung schmalere und breitere Strukturen läuft unter Nutzung der implementierten Dosis, Proximitykorrektur und effektiven Unterdrückung des lokalen Thermoeffektes durch "Multiple-Exposure-Technique" [2]. Die Resist-Strukturübertragung in antireflektierende Cr-Schichten wurde mittels naßchemischer Ätzung oder Ion-Milling realisiert.

2.2. Resist-Reliefstrukturierung für spezielle Anwendungen

Das Ziel hierbei ist die Herstellung von Strukturen mit minimalen lateralen Abmessungen bis hinab in den Nanometerbereich. Meist handelt es sich um Elektronenlack-Relief-Strukturen auf Halbleiter-Substraten. Bei diesen Anwendungen gilt es Technologien zu entwickeln, welche die hochauflösenden Eigenschaften der EL und Trockenätzanlagen voll unterstützen und dazu ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit aufweisen. Diese Vorhaben lassen sich bisher nur mit speziellen Mehrlagen-Resistsystemen realisieren, welche den Schwerpunkt mehrerer Arbeiten bilden [3], [4], [5]. Die Simulationsmöglichkeiten und die Reproduzierbarkeit sind bei diesen komplizierten Systemen sehr gering, denn die notwendigen technologischen Prozesse vor und nach der Lithographie sind sehr kompliziert.

Unsere Abteilung der EL am ICS in Bratislava arbeitet schon 3 Jahre mit der TU-Wien–GMe (Prof. W. Fallmann, Univ. Lektor G. Stangl und D.-Ing. E. Cekan) und 2 Jahre mit der Gruppe für Mikrostrukturierung am Institut für Technische Physik (Prof. R. Kassing, Dr. I. W. Rangelow) auf dem Gebiet der Elektronen-, Ionenprojektionslithographie und Trockenätzung zusammen. Dabei handelt es sich um eine optimierte Behandlung von neuen 1-Lagen, plasmaätzbeständigen, hochempfindlichen 3-Komponenten Resistmaterialien auf Novolack-Basis, (Hersteller: Kalle HOECHST AG) positiven — AZ PF514 — wie negativen — AZ PN114.

Unsere ersten Untersuchungen mit dem positiven Lack zeigten, daß nach einer Prozessoptimierung eine höhere Auflösung im Zusammenhang mit einem tiefen, hochselektiven und anisotropen RIE Trockenätzprozess erzielbar ist.

Die Prüfung dieser Resistmaterialien auf seine Eignung zur Herstellung von Maskenstrukturen konzentrierte sich auf die Optimierung der Dosis sowie auf die Behandlung vor und nach der Belichtung. Die sogenannten Gradationskurven sind in der Abb. 1 und 2 dargestellt.

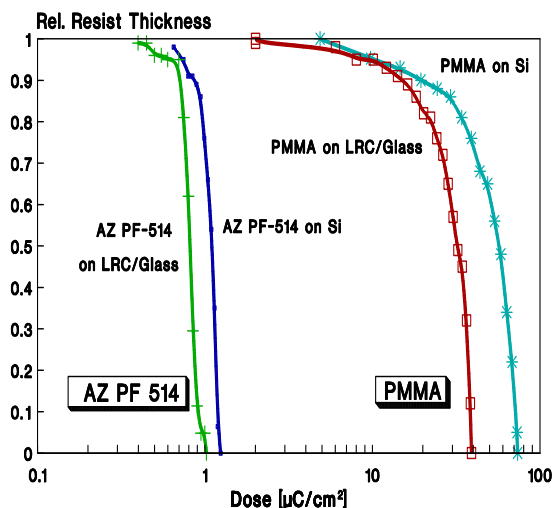


Abb. 1: AZ PF514 und PMMA Positivresist-Gradationskurven

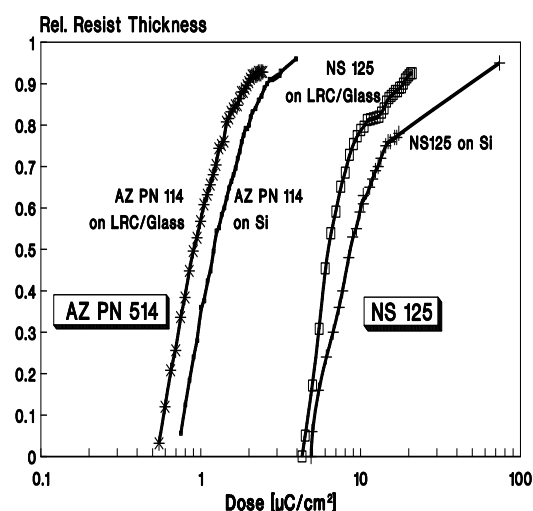


Abb. 2: AZ PN114 und NS125 Negativresist-Gradationskurven

Erwähnenswert ist hier die sehr hohe Sensitivität ($3\text{--}5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) und ein hoher Kontrast der beiden Resists bei relativ dicker Polymerschicht ($1\text{--}2 \mu\text{m}$) auf Si bzw. SiO_2 Substraten. In der Praxis ist es fast unmöglich die Optimierung der Belichtungsbedingungen für einen positiven Lack (AZ PF514) mit solchen Parametern auf experimentellem Wege zu erreichen. Dies läßt sich nur über Computersimulationen realisieren. Aufgrund des hohen Kontrastes zeigten die Experimente eine starke optimale Dosisabhängigkeit von der Strukturdimension (Abb.3 — Intra-Proximityeffekt). Für konventionelle EL-Lacke, wie PMMA und ähnliche oft verwendete, nur aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff bestehende Resistmaterialien, existieren bereits Modellvorstellungen für die Berechnung der Energiedichteverteilung, sodaß die Berechnung der notwendigen Proximity-Dosis oder Geometrie-Korrektur schon mit ausreichendem Erfolg durchführbar ist [3], [4], [5]. Dieses Gebiet wurde für die konventionelle EL behandelt, obwohl bis heute noch kein universeller Lösungsansatz existiert. Auf dem Gebiet der Nanometerlithographie sind derartige Untersuchungen noch kaum durchgeführt worden.

Im Gegensatz zu den konventionellen EL-Lacken, sind für die erwähnten neuen Resistmaterialien noch keine Simulationen und Modellierungen für die EL und Trockenätzprozesse vorhanden. Unsere bisherigen technologischen Verfahren sind aufgrund der Resultate der eigenen Forschung an den erwähnten Instituten entwickelt und teilweise veröffentlicht worden [6], [7].

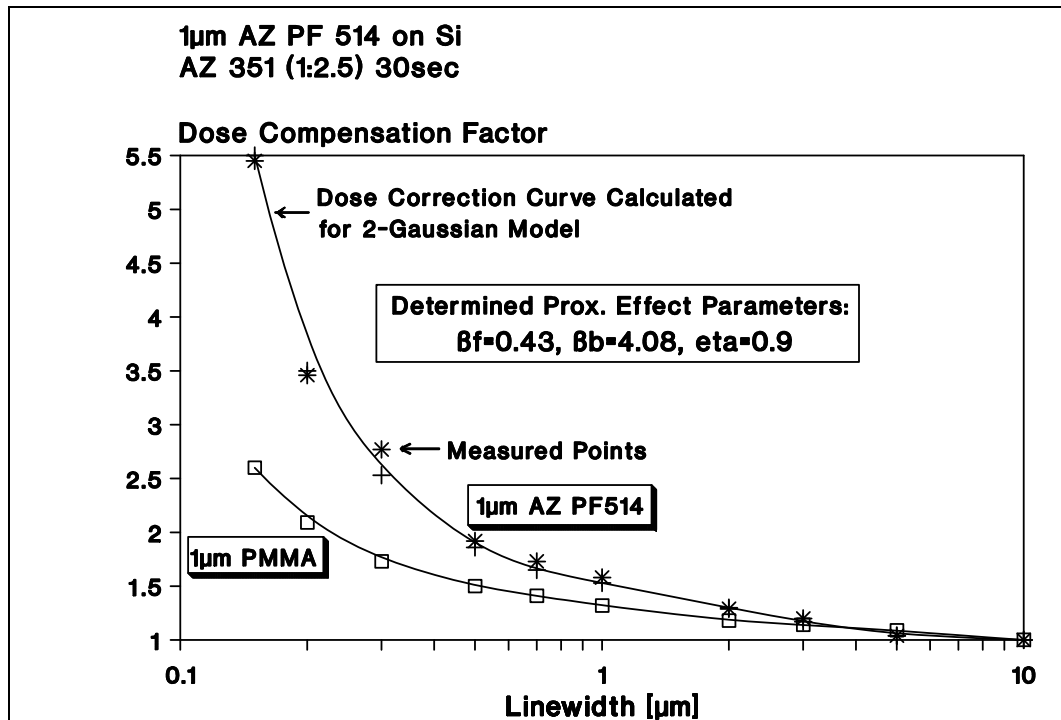


Abb. 3: Dosis-Korrekturkurven für AZ PF514 und PMMA mit den ermittelten Proximity-effekt-Parametern für AZ PF514 Resist.

REM-Aufnahmen von Resistpattern ausgewählter Ausschnitte des Maskenlayouts sind in Abb. 4–6 von Experimenten zur :

- 1.) Tiefenstrukturierung von Resistschichten für die Herstellung von mikromechanischen Elementen im mikrometrischen Bereich (Abb. 4),
- 2.) Submikrometer-Strukturierung mit steilen Lackkanten (Abb. 5) und
- 3.) Nanometer-Strukturierung (Abb. 6)

im AZ PF514 Positivresist sowie mittels Trockenätzprozesse im Silizium-Substrat dargestellt. Masken, die unter optimalen Belichtungs- und Prozessbedingungen hergestellt wurden, haben steile Lackkanten ohne Überhänge.

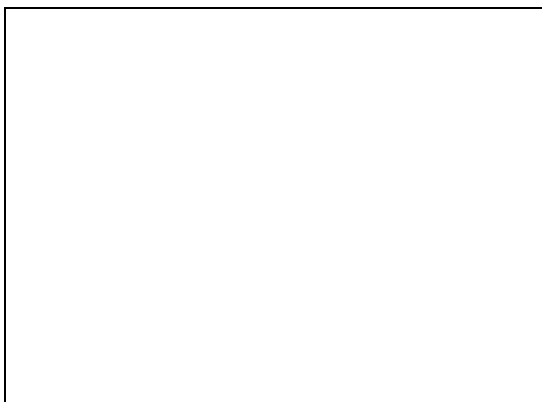


Abb. 4a: 2μm AZ PF514 Resist- und 2.8μm SiO₂-Schicht.

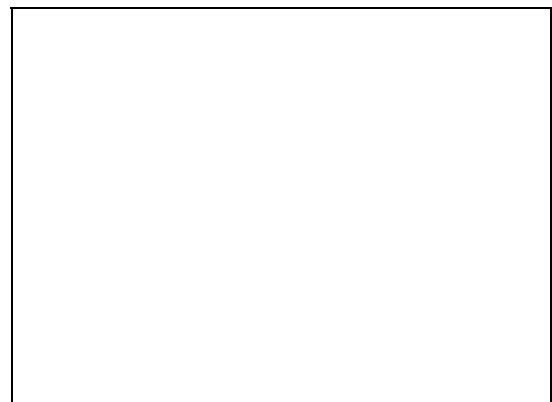


Abb. 4b: Hochanisotrope, 25μm tief geätzte Mikroturbine in Silizium.

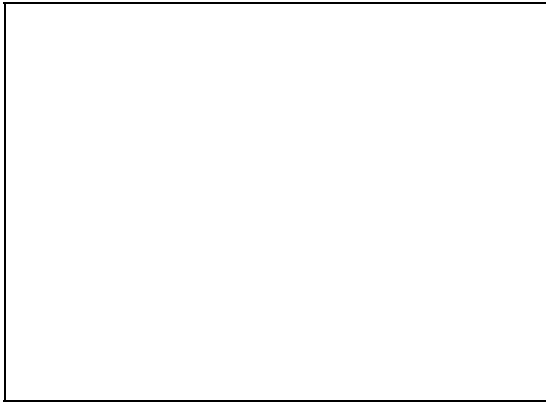


Abb. 7a: Plot der Zerlegung einer Ringstruktur.

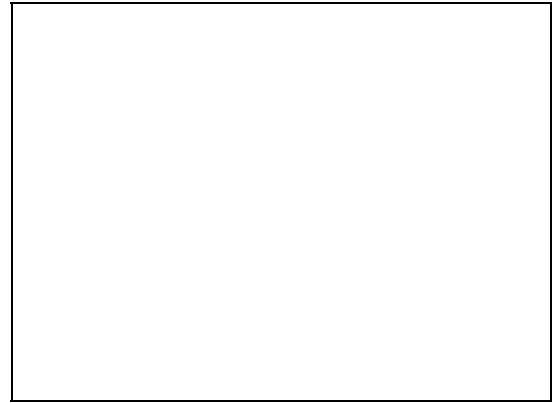


Abb. 5a: Ringstruktur in Resist — Dosis $5,2 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

Abb. 7a und 7b sowie Abb. 5a und 5b zeigen Submikrometer Resist-Relief-Strukturierung und Modellierung (Abb. 7b) in $1 \mu\text{m}$ dicker AZ PF514 Resistschicht. Der Plot der Ringstruktur (Abb. 7a) zeigt die Zerlegung des Musters mit einer Kantenrauigkeit von 50 nm . Nach einer optimalen Resist-Technologieanpassung und Belichtung wurde die geforderte Strukturform- und Maßtreue im Resist erreicht (Abb. 5a und 5b).

Dank der Stufenverwaschung bei einer angepaßten Belichtungsdosis-Staffelung in Abhängigkeit von der Sondenformatgröße kann die Kantenrauigkeit der realen Resiststruktur vermieden werden.



Abb. 7a: Modellierung der Elektronenstrahlbelichtung einer Resiststruktur.



Abb. 5a: Ringstruktur in Resist — Dosis $4,4 \mu\text{C}/\text{cm}^2$.

Abb. 6a und 6b zeigen Beispiele von Nanometerstrukturierung: $1 \mu\text{m}$ tief geätzte 60 nm breite Struktur in Silizium durch Mono-Lagen AZ PN114 und AZ PF514 Resist.

Mit Hilfe unserer EL Anlage ist es, wie gezeigt, durchaus möglich, Resist-Relief-Strukturen mit Lateralen Ausdehnungen von etwa $60\text{--}50 \text{ nm}$ herzustellen. Bei einer erfolgreichen Strukturübertragung derartig geringer Abmessungen (Anisotrope Ätzung, Lift-Off) befinden wir uns schon sehr nahe an der Schwelle vom klassischen zum quantenmechanischen Verhalten.

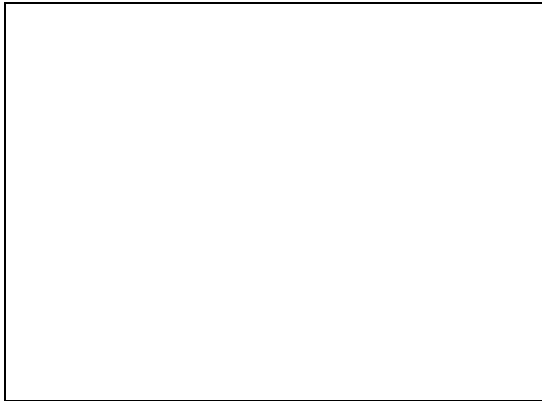


Abb. 6a: 25 nm breite Struktur in AZ PN114.

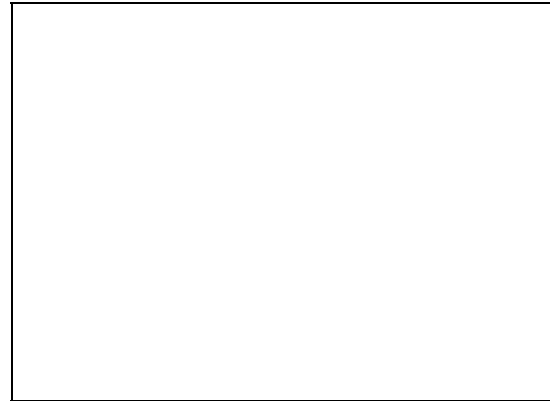


Abb. 6b: 60 nm breite Struktur in AZ PF114.

3. Electron Beam Testing

In diesem Abschnitt möchten wir eine weitere Elektronenstrahl-Technik, mit der wir uns an unserem Institut befassen, kurz beschreiben. Es handelt sich um die kontaktlose Messung von Spannungen in integrierten Schaltkreisen (IC's) mittels eines Elektronenstrahls (Electron-Beam-Testing, EBT). Diese Messmethode wurde durch ständige Miniaturisierung der aktiven Elemente und wachsender Komplexität von IC's hervorgerufen.

EBT basiert auf dem sogenannten Potentialkontrast, d.h. Zusatzkontrast im Bild von einem Raster-Elektronen-Mikroskop der vom Potential des Elektronenstrahl-Einfallspunktes abhängig ist. Dieser Kontrast ist durch Veränderungen der Energie der Sekundärelektronen, die bei der Interaktion des Elektronenstrahls mit der Probe (also einem zu messenden IC) entstehen, verursacht. Die Verschiebung des SE-Spektrums ist linear abhängig von Potentialveränderungen im Einfallspunkt.

Durch Auswertung dieser Verschiebung mittels eines Spektrometers bekommt man genaue quantitative Informationen über Potentialwerte im gegebenen Punkt des IC's. Dank der Implementierung des stroboskopischen Prinzips ist es möglich, Signalverläufe bis zu Frequenzen im GHz-Bereich zu messen.

Bei entsprechender Wahl des Messpunktes und der Elektronenstrahlparameter (Strom und Energie) beeinflusst der Elektronenstrahl auf keine Weise die Tätigkeit des Prüfobjekts.

An unserem Institut benutzen wir für Forschungszwecke auf diesem Gebiet ein sogenanntes Elektronen-Diagnostisches-System (EDS) [8]. Dieses Gerät wurde in den Jahren 1986-1990 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Instrumententechnik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften entwickelt. Es handelt sich um eine UHV-Anlage, speziell für Electron-Beam-Testing konzipiert. Die elektronenoptische Säule setzt sich aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- Primärelektronenquelle (mit ZrO aktivierte "Thermoautoemissions-Wolframkathode")
- Elektronenoptisches System bestehend aus zwei Linsen, zwei 8-poligen Stigmatoren und zwei Gruppen mit je 4 Zentrierspulen.
- Detektionssystem, bestehend aus einem Paar symmetrisch angeordneter SE-Detektoren und einem Planar-Spektrometer.

Das Gerät ist mit einer 64-poligen Vakuum-Durchführung ausgestattet (auf 128 erweiterbar).

Die Grundparameter sind folgende:

- Beschleunigungsspannung im Bereich $0.3 \div 5$ kV
- Elektronenstrahlstrom $10^{-7} \div 10^{-12}$ A
- Elektronenstrahldurchmesser kleiner als $0.1 \mu\text{m}$
- Spannungs-Messgenauigkeit $\pm 50\text{mV}$ im Bereich von ± 15 V
- Zeitauflösung der stroboskopischen Einheit 10 ns

EDS ist durch einen IBM-kompatiblen PC gesteuert; die Steuerprogramme wurden unter OS MS-DOS in der Programmiersprache C und Assembler geschrieben.

Das Gerät arbeitet in zwei Grund-Arbeits-Moden:

a) Bildbeobachtung:

In diesem Modus ist es möglich, zwischen TV-Ablenk-Frequenz (Analog-Elektronenstrahlablenkung) oder Vector-Scan (256×256 Punkte x 8 bit, max. Raster-Geschwindigkeit ca. 3 Bilder/sek.) zu wählen. Bei Stroboskopie-Benutzung bekommt man Bilder, die die Potential-Aufteilung im IC in einzelnen Phasen des Clock-Signals zeigen.

b) Spannungs-Messungs-Modus:

In diesem Fall wird der Elektronenstrahl auf ausgewählte Punkte des IC-s abgelenkt. Die statischen oder dynamischen Spannungs-Werte werden in diesen Punkten gemessen und mit Hilfe eines Spektrometers bzw. mit Stroboskopie angezeigt.

Zur Illustration der Möglichkeiten des Systems ist in Abb. 8 ein Beispiel vom Potential-Kontrast-Bild dargestellt. Es handelt sich um ein Kundenspezifisches-IC mit Strukturabmessungen von ca. $2 \mu\text{m}$. Abb. 9 zeigt gemessene Spannungsverläufe in 2 Punkten dieses IC's.

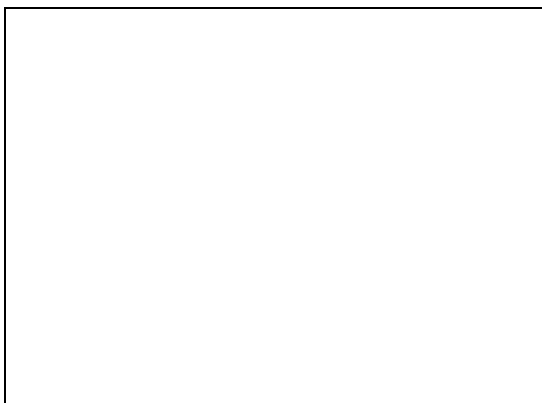


Abb. 8: Potential-Kontrast-Bild.

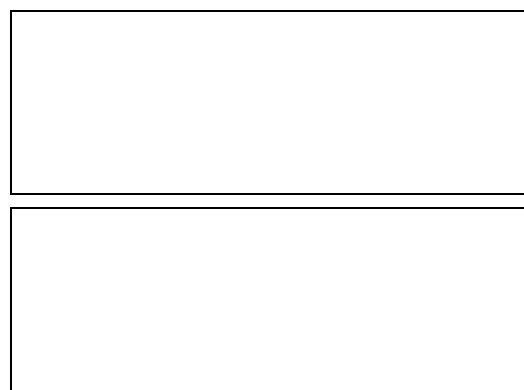


Abb. 9: Spannungsverläufe in zwei Punkten des ICs von Abb. 8.

Das beschriebene System wird an unserem Institut für IC-Messungen nach Kundenanforderungen benutzt, weiters für experimentelle Überprüfung von Möglichkeiten der Messungen an passivierten IC's, zur Erforschung der Einflüsse der lokalen Felder an IC-Oberflächen an die Positions-Genauigkeit des Elektronenstrahls. Wir beschäftigen uns auch mit partiellen Problemen der Prozess-Automation.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Professor W. Fallmann und Herrn Univ. Lektor G. Stangl von der TU-Wien für die Hilfe bei der Durchführung der Resistexperimente. Herrn Dr. I. W. Rangelow von der Universität Kassel (BRD) und Herrn Dr. Z. Borkowicz von der Universität Breslau (Polen) für die Durchführung von Experimenten zur Tiefentrockenätzung und hochauflösende Raster-Elektronenmikroskopie.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Hudek: "Elektronenstrahl-Lithographie zur Herstellung von Strukturen im Submikron- und Nanometerbereich", Tagungsband: Grundlagen und Technologie Elektronischer Bauelemente, (1991), Grossarl im Pongau, 27
- [2] S.V. Babin, I. Kostic, P. Hudek: "Experimental Investigation of the Resist Heating Effect in a Variably Shaped EBL System", Proc. Microcircuit Engineering '92, (1992), Erlangen
- [3] G. Owen, J.Vac.Sci.Technology, B8(6),(1990),1889
- [4] P. Hudek, I. Kostic: "A Practical Method for E/B-Lithographic Resist Patterning", Proc. of II.Int'l Conf.on E/B Technol.-EBT-88, Varna, Bulgaria (1988), 390
- [5] H. Hübner: Microelectronic Engineering 18, (1992), 275
- [6] I.W. Rangelow, Z. Borkowicz, P. Hudek, I. Kostic: "Transfer of Single Layer Positive Resist Submicro- and Nanometer Structures into Silicon", Microelectronic Eng. (to be published)
- [7] P. Hudek, Z. Borkowicz, I. Kostic, I.W. Rangelow, R. Kassing: "Single-Layer Resist for Deep, Micro- and Nanometer Structure Transfer", Microcircuit Engineering '92, (1992) Erlangen
- [8] M. Kovác, S. Bukovinská, Microelectronic Engineering, 17, (1992), 459