

APPLIKATION INFORMATION

aus JENA

JENOPTIK JENA GmbH

Carl-Zeiss-Straße 1

Jena

DDR-6900

MIKROSKOPIE

3/87

Hinweise zum Einsatz von Interferenzmikroskopen zur Schichtdickenmessung in der Halbleitertechnik

Seit mehr als 15 Jahren bewähren sich Jenaer Interferenzmikroskope vom Typ INTERPHAKO zur Lösung unterschiedlichster Aufgaben. Als eine der Hauptanwendungen hat sich die Bestimmung von Schichtdicken in der Halbleiterforschung und -industrie herauskristallisiert.

Das bisher für dieses Meßproblem angebotene Auflicht-Interferenzmikroskop EPIVAL interphako wurde im Rahmen der Einführung der neuen Reihe der JENA-MIKROSKOPE 250-CF durch das JENAVERT interphako ersetzt. Unter Beibehaltung des bewährten Meßprinzips konnten die Justierung und die Messung mit dem Gerät wesentlich vereinfacht und die Abbildungsqualität erhöht werden.

Die folgenden Ausführungen sollen dem Anwender die Spezifik der Interferenzmikroskopie gegenüber anderen gebräuchlichen Schichtdickenmeßverfahren erläutern, einen Überblick zu den am JENAVERT interphako möglichen Meßmethoden geben und Hinweise zur Auswahl einer optimalen Gerätekonfiguration liefern.

1. Verfahren der Schichtdickenmessung im Nanometerbereich

In der Halbleitertechnik existiert ein breites Spektrum von elektrischen, optischen und mechanischen Meßverfahren zur Bestimmung der Dicke von Leiterzügen und ähnlichen durch Aufdampfen oder Aufputtern bzw. durch Herausätzen entstandenen Strukturen.

Mit der Messung des Widerstandes bzw. der Kapazität bei leitenden bzw. nichtleitenden Schichten sind Dicken bis 1 nm prinzipiell meßbar. Bei komplexen Strukturen sind der Methode jedoch Grenzen gesetzt.

Eine weit verbreitete Meßtechnik beruht auf dem Schwingquarzverfahren, bei dem über die Verstimmung eines Oszillators die Schichtdicke bestimmbar ist. Sie eignet sich für die Messung während der Schichtherstellung im Vakuum. Die minimale Dicke liegt bei 0,5nm, eine zusätzliche Kalibrierung ist unvermeidbar.

Unter den optischen Methoden besitzt die Fotometrie eine besondere Bedeutung. Im Gegensatz zu der schnellen und einfachen Meßwertgewinnung, ist die Auswertung nur unter Einsatz von Rechentechnik und unter Einbeziehung von entsprechenden Eichwerten möglich, da die Reflexions- und Transmissionswerte stark material- und wellenlängenabhängig sind. Der Meßbereich liegt zwischen 5nm und 2 μm .

Höchste Genauigkeit und den Vorteil der Absolutmessung bietet die Ellipsometrie. Sie ist vorwiegend für nicht absorbierende Materialien geeignet. Der Durchmesser des Lichtstrahls liegt bei etwa 1mm und kann durch Zusatzoptik auf 25 μm eingeengt werden. Kleinere Details sind nicht erfaßbar. Der Meßbereich liegt zwischen 1nm und 2 μm . Die Berechnung von Dicke und Brechungsindex erfolgt mit Hilfe von Rechnerprogrammen. Für größere Probenmengen sind entsprechende automatisierte Geräte im Einsatz.

Eine direkte Messung von Schichtdicken ist auch durch mechanisches Antasten möglich. Hochwertige Geräte erlauben Messungen bis unter 100 nm. Die Handhabung ist relativ kompliziert. Die Beschädigung der Oberfläche ist bei leistungsfähigen Geräten gering, kann aber nicht völlig ausgeschlossen werden.

In der Praxis wird nur die Kombination verschiedener Meßverfahren in Abhängigkeit von der konkreten Problemstellung ein Optimum an Aufwand und Meßgenauigkeit erzielt. Die Interferenzmikroskope vom Typ INTERPHAKO zeichnen sich innerhalb dieser Gerätegruppe durch folgende Vorteile aus:

- Absolutmessung durch Vergleich der Schichtdicke mit der Wellenlänge des eingesetzten Lichtes
- Anwendbarkeit verschiedener Verfahren, die sowohl die schnelle Orientierungsmessung (Streifenmethode), als auch die Arbeit in der Größenordnung der Anzeigeeinheit (0,5 nm) bezüglich Fehler und Absolutwert ermöglichen
- Meßbarkeit kleinster Strukturdetails (10 µm typisch, bis unter 1 µm möglich)
- Kombination mit üblichen lichtmikroskopischen Techniken (Kontrastierung, Breitenmessung, Fotometrie, Mikrofotografie)
- einfache Handhabung, Meßwertgewinnung und Schichtdickenberechnung
- Untersuchungen an reflektierenden und auch lichtdurchlässigen Schichten möglich

Optimale Meßergebnisse erreicht man mit INTERPHAKO-Mikroskopen nur unter bestimmten Voraussetzungen:

- Bei dem in der Mehrzahl der Fälle eingesetzten Shearing-Verfahren wird ein Doppelbild der Struktur zur Messung benutzt. Gemessen wird an Kanten, wobei vereinzelt Strukturelemente oder Randkanten ausgewählt werden sollten.
- Unterschiedliche Materialien prägen dem Licht bei Reflexion unterschiedliche Phasensprünge auf, sodaß der gemessene Gangunterschied bis maximal 30 nm abweichen kann. Für exakte Messungen wird der entsprechende Probenbereich beim Arbeiten im Auflicht mit einer Metallschicht überzogen.
- Bei Objektiven hoher Apertur weicht der Gangunterschied zwischen senkrechten und Randstrahlen voneinander ab, sodaß eine zu geringe Schichtdicke gemessen wird. Bevorzugt wird deshalb ein Objektiv 12,5x oder 10x eingesetzt (Fehler < 1%) oder die Aperturblende eingeeengt.

Prinzip der INTERPHAKO-Mikroskope

Die Überlagerung von Lichtwellen in einem bestimmten Raum-
punkt kann je nach Phasenlage zu Verstärkungs oder Aus-
löschungseffekten führen.

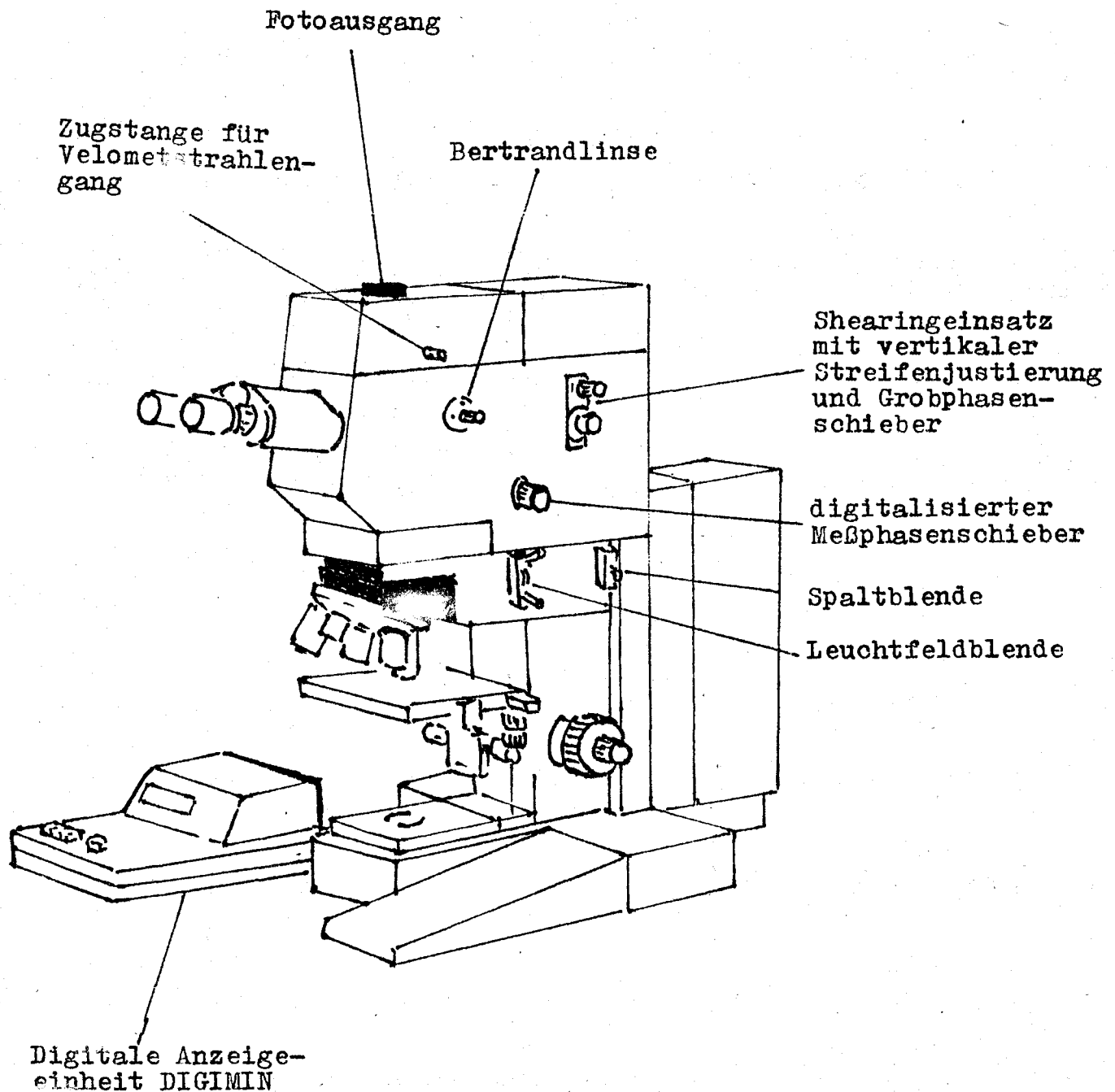
Voraussetzung ist die Kohärenz der Lichtanteile: gleiche
Wellenlänge, gleiche Schwingungsebene, genügend lange gleich-
zeitige Einwirkungsdauer und nicht zu große Divergenzwinkel.

In der Mikroskopie werden diese Bedingungen von Lichtstrahlen,
die vom gleichen Punkt der Lichtquelle ausgehen und keinen zu
großen Gangunterschied besitzen, erfüllt. Die gesamte Bildent-
stehung im Mikroskop basiert auf Interferenzeffekten.

Bei Aufspaltung des Lichtes in mindestens zwei Anteile, die
unterschiedlich beeinflusst werden (Änderung des Gangunter-
schiedes) können mit Hilfe von Interferenzmikroskopen Gang-
unterschiede, Dicken und Brechzahlen von Objekten bestimmt
werden. Derartige Einrichtungen existieren für Auflicht-
(Mirau, Linnik bzw. Michelson) und für Durchlichtmikroskope
(Jamin-Lebedeff) bzw. für beide Verfahren (INTERPHAKO)
(siehe Literatur /3/, /5/).

Es soll hier nur auf die INTERPHAKO-Geräte aus der Serie der
JENA-Mikroskope eingegangen werden. Sie zeichnen sich durch
durch die folgenden Vorteile gegenüber den anderen Typen aus:

- Nutzung verschiedener Interferenzverfahren (Shearing,
Interphako, homogenes Feld, Interferenzstreifen)
- Digitalisierung des Meßwertes und Möglichkeit der
objektiven Messung
- Einsetzbarkeit von Standardobjektiven (6,3x - 100x)
und LD-Objektiven (8x, 16x, 25x)
- Variation der Aufspaltung beim Shearingverfahren zwischen
Auflösungsgrenze des Mikroskops und ca. 500µm.



Auflichtinterferenzmikroskop
JENA VERT interphako

Die Interferenzmikroskope JENAVERT, JENAVAL und JENAPOL INTERPHAKO basieren auf den Grundstativen der Auflicht-, Durchlicht- und Polarisationsforschungsmikroskope aus der Serie der JENAMIKROSKOPE 250-CF auf, sodaß eine Nutzung des entsprechenden Zubehörsortiments möglich ist. Als Lichtquelle dient eine 12V/100W-Halogenleuchte. In einen Filterrevolver können Interferenzfilter zur Erzeugung von monochromatischem Licht eingesetzt werden.

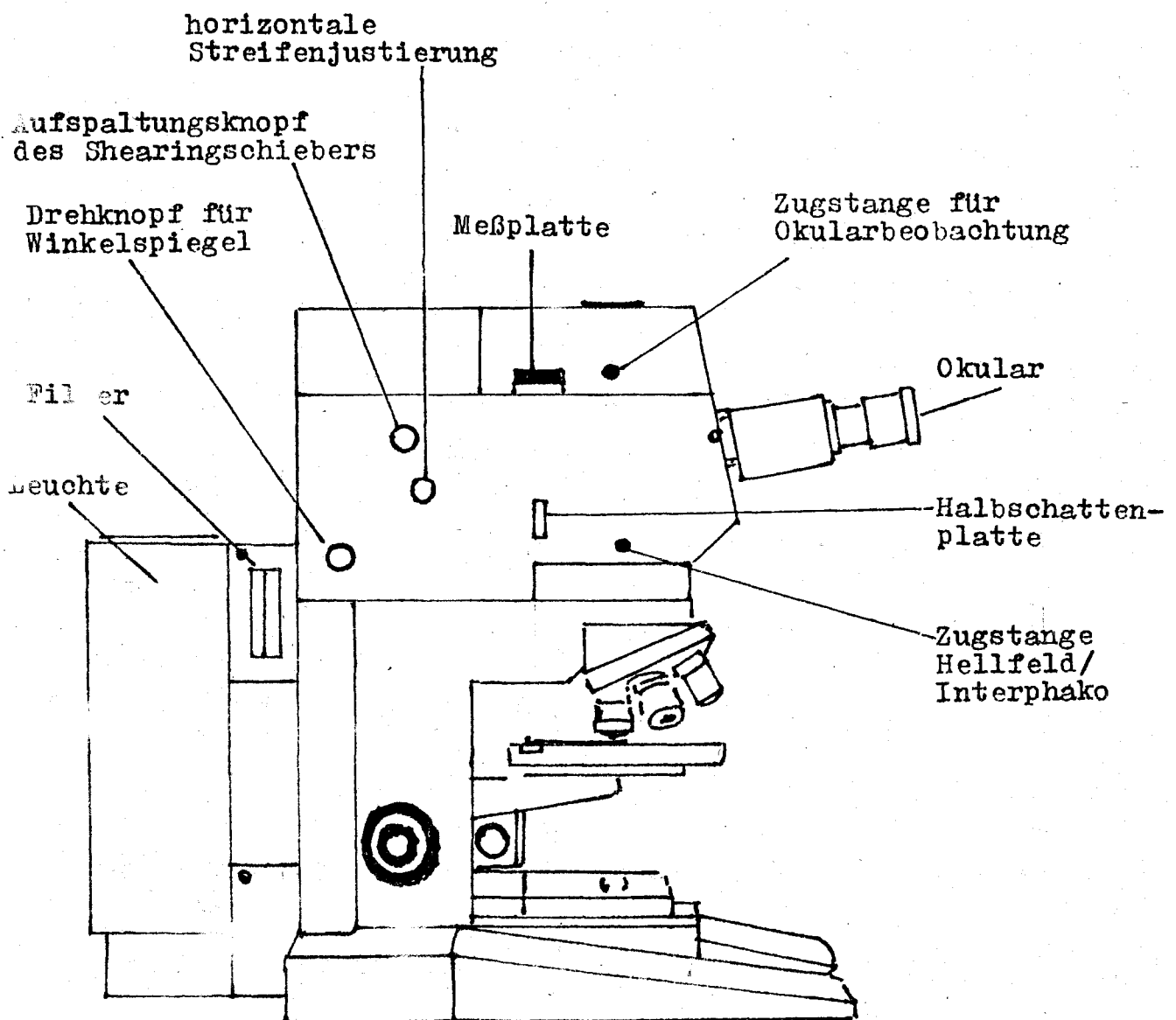
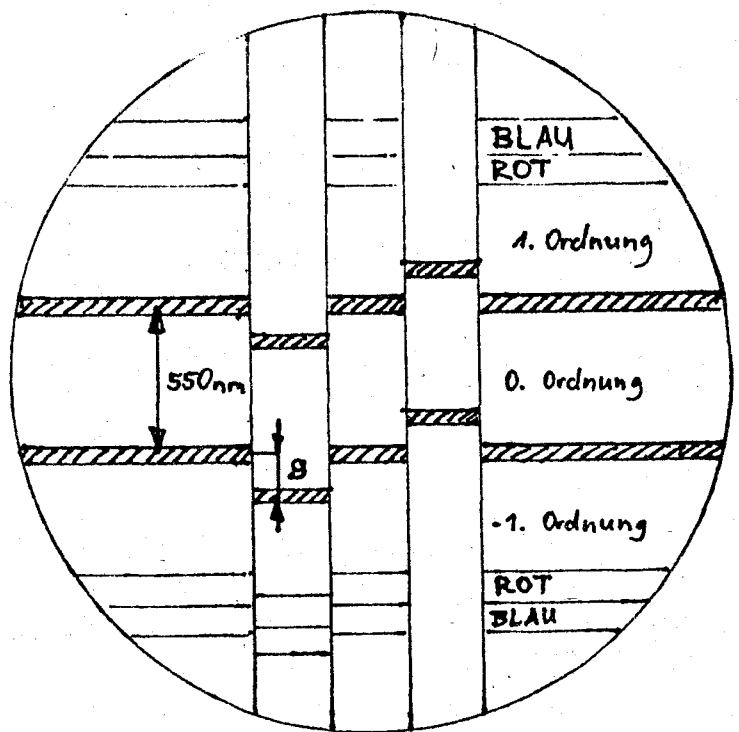
Ein spezieller Interferenzhubus mit einem modifizierten Michelson-Interferometer wird auf das Grundstativ aufgesetzt. Eine erste Zwischenabbildung des Objektes liegt in diesem Hubus noch vor dem Interferometer und gestattet es eine Halbschattenplatte mit der Objektstruktur zu überlagern. Ein optisches System bildet die Austrittspupille der Objektive bzw. die Aperturblendenebene in das Interferometer ab. Die optimale Abbildung in das Interferometer und damit die Sichtbarkeit der Spaltblenden bei der Justierung wird durch Verschieben eines Winkelspiegels mittels Drehknopf gewährleistet.

Im Interferometer wird das Licht in zwei Strahlengänge aufgespalten, die getrennt beeinflussbar sind (Änderung des Gangunterschiedes, Richtungsjustierung, seitliche Verschiebung u.a.) Das Verständnis der richtigen Manipulation dieser Teilstrahlengänge im Zusammenspiel mit den aperturbegrenzenden Einheiten ist die Voraussetzung für die Bedienung dieser Geräte.

Der digitalisierte Meßphasenschieber dient zur definierten Änderung des optischen Gangunterschiedes zwischen beiden Teilstrahlengängen, sodaß durch Einstellen bestimmter Farben bzw. Helligkeiten an den Referenzpunkten eine Messung erfolgen kann. Der Meßbereich beträgt etwa 5000nm, die Anzeige befindet sich am elektronischen Bedienpult DIGIMIN. Als kleinste angezeigte Einheit sind 0,5nm ablesbar.

Am Drehknopf zur vertikalen Bildaufspaltung (linke Geräteseite) werden die Strahlengänge seitlich zueinander justiert. Auf der rechten Geräteseite können Verfahrensschieber für Leaving und Interphako eingesetzt werden.

Darstellung eines Objektes
(vertikaler Streifen)
im Verfahren mit
horizontalen Interferenz-
streifen



Sie enthalten die Vertikaljustierung die Interferenzstreifen und einen Drehknopf für Gangunterschiedsänderungen bis zu 40 Wellenlängen.

Bildaufspaltung dient am Shearingschieber ein dritter Drehknopf der auf der linken Geräteseite liegt.

Der Gang und Abstand der Interferenzstreifen sind variierbar. Man erhält vertikale Streifen mit geringem Abstand oder homogenes Feld (Streifenabstand größer als das Okularsehfeld).

Vor dem Okular existiert noch ein zweites reelles Zwischenbild, wo Meßblenden oder ein Fadenkreuz dem mikroskopischen Bild überlagert werden können. Zum Okular gelangt der Strahlengang über ein ausschaltbares Prisma. Wird dieses Prisma mit der entsprechenden Zugstange (linke Geräteseite) ausgeschaltet, geht das Licht direkt zum Fotoausgang oder wird durch Einlegen eines zweiten Prismas (Zugstange auf der rechten Geräteseite) über die Velomet-Meßblenden zum Okular geleitet.

Um Hellfeldbeobachtungen höchster Qualität durchzuführen kann der Strahlengang auch unter Umgehung des Interferenztubus direkt zum Okular oder zum Fotoausgang geleitet werden.

Shearing-Verfahren

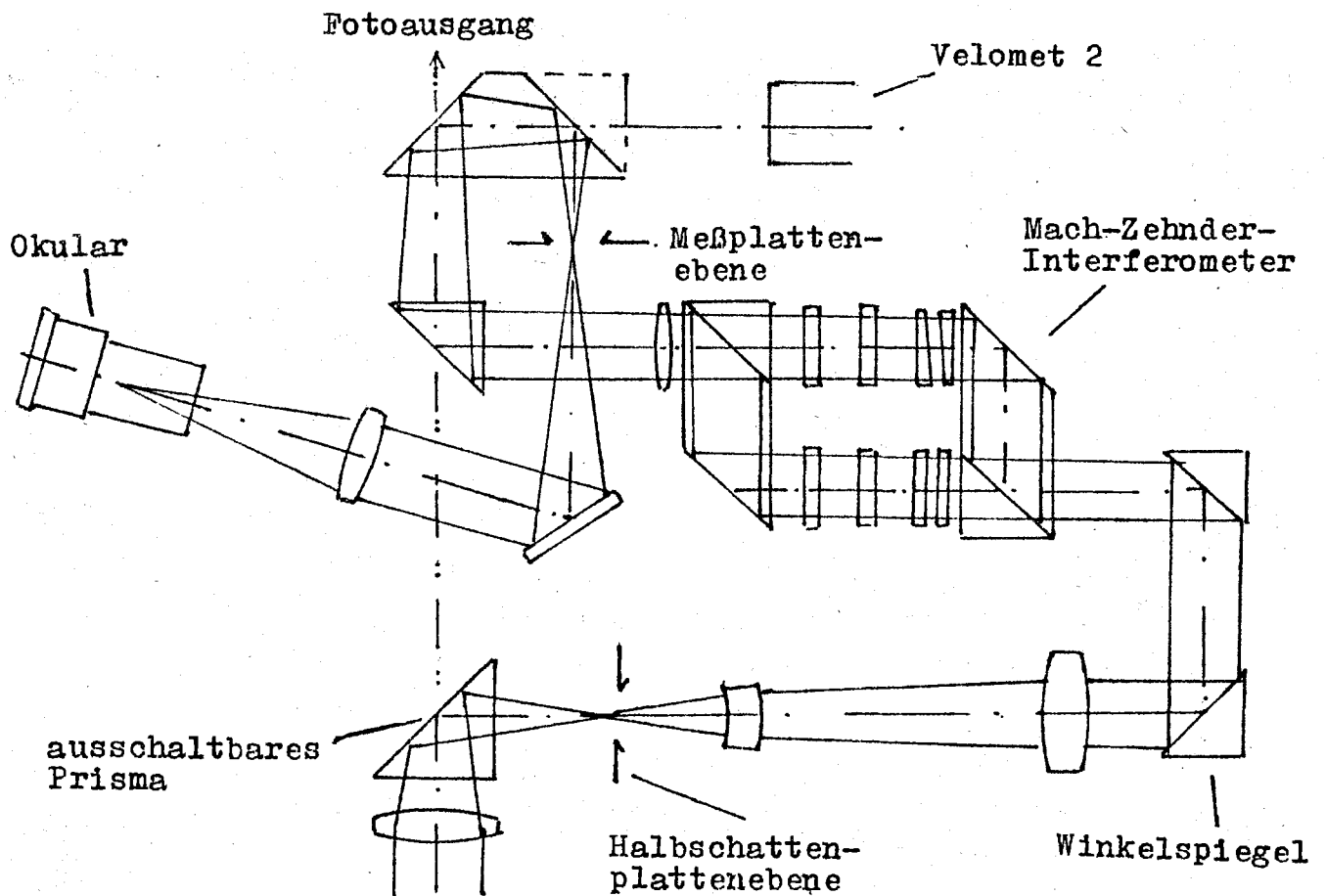
Durch seitliches Verschieben der beiden Teilstrahlengänge zueinander entsteht ein Doppelbild. Voraussetzung für die Messung ist eine Überlagerung der Objektstruktur oder -kante mit der Umgebung bzw. dem Untergrund.

Den Gangunterschied erhält man durch Kompensation der Interferenzeffekte (Auslenkung der Interferenzstreifen, Farbverschiebung oder Helligkeit) im Bereich der Überlagerung des Objekts und Untergrund zu den Gebieten der Überlagerung des Objekts mit Untergrund.

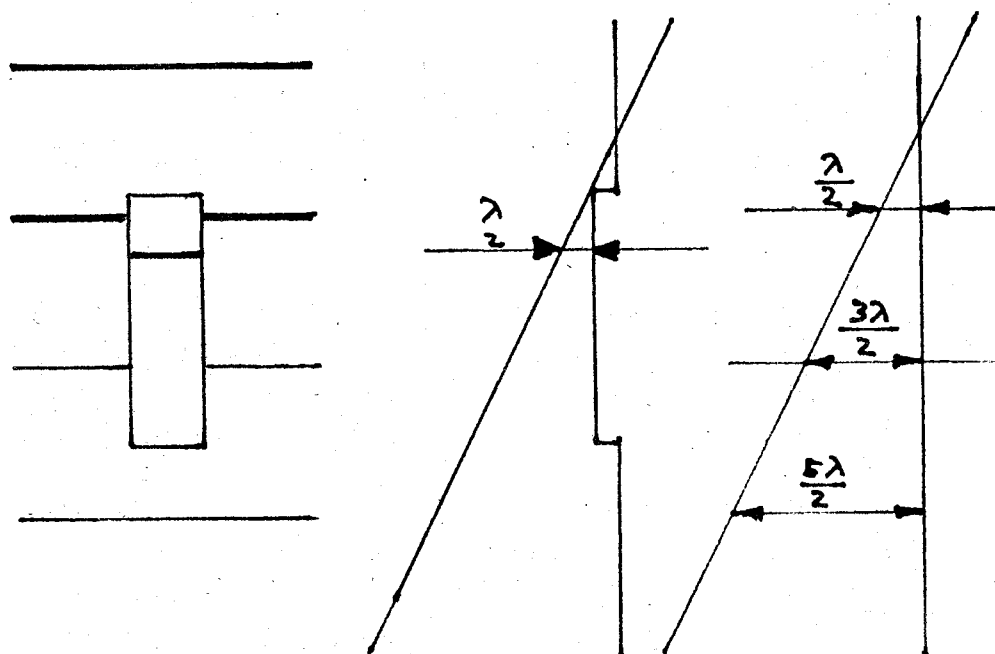
Die Objektaufspaltung kann bis 3 mm im Zwischenbild oder je nach verwendetem Objektiv bis 0,5 mm in der Objektebene erfolgen. Sie wird so gewählt, daß die Interferenzeffekte im aufgespaltenen Bereich noch gut erkennbar sind.

Während der Aufspaltung wird die Beleuchtungsspaltbreite auf die Gitterkonstante eingestellt.

Je nach Justierung der beiden Strahlengänge zueinander können Interferenzstreifen oder homogenes Feld erzeugt werden.



Interferenztubus der INTERPHAKO-Mikroskope



Streifenversetzung
im Objekt

Gangunterschied im Objekt und
in der Umgebung

Schichtdicke bei Auflichtmessungen ergibt sich als:

$$d = g/2 \quad d: \text{Schichtdicke} \quad g: \text{Gangunterschied}$$

Bei höchster Genauigkeit der Messungen ist noch der wellenlängenabhängige Gerätefaktor (Änderung ca. 1% auf 100nm) einzubeziehen.

Bei weißem Licht/Interferenzstreifen: Mit der Beobachtung der Verschiebung der dunklen Auslöschungstreifen der 0. Interferenzordnung beginnt jede Messung. Der Gangunterschied wird durch visuelle Abschätzung der Streifenversetzung oder durch Verschieben der Streifen mit dem Meßphasenschieber gegenüber einem Strichkreuz bestimmt. Bei Gangunterschieden größer als die Lichtwellenlänge kann der Anteil an Vielfachen von λ nur mit diesem Verfahren ermittelt werden.

- weißes Licht/homogenes Feld: Nutzung des Purpur der ersten Interferenzordnung als Referenzfarbe (höchste Empfindlichkeit des Auges für Farbänderungen), Kompensation mit dem Meßphasenschieber

monochromatisches Licht/Interferenzstreifen: Ihre Sichtbarkeit im ganzen Bereich des Grobphasenschiebers ermöglicht Messung größerer Gangunterschiede. Um die ordnungsmäßige Orientierung zu ermöglichen, wird abwechselnd mit weißem und monochromatischem Licht gearbeitet. Ein einfacher Wechsel ist bei Beleuchtung mit Spalt und monochromatischem Licht der Wellenlänge 589nm (orange) möglich.

- monochromatisches Licht/homogenes Feld: Als Referenzstelle wird gleiche Dunkelheit der Objektstelle genutzt, vorteilhaft ist die Verwendbarkeit des wellenlängenabhängigen Gerätefaktors.

monochromatisches Licht/homogenes Feld/Halbschattenplatte: Dem Objekt wird eine zusätzliche Phasenstruktur überlagert, dadurch kann als Meßpunkt gleiche Helligkeit in nebeneinander liegenden Bildbereichen verwendet werden.

- Zusatzvorrichtung: Die Helligkeitsdifferenz der Halbschattenplattenmethode wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das einen wesentlich schnelleren und genaueren Vergleich ermöglicht. Im Bereich bis 40nm ist eine direkte Gangunterschiedsanzeige realisierbar.

INTERPHAKO-Verfahren

In einem der beiden Teilstrahlbündel wird mit Hilfe von speziellen INTERPHAKO-Ringblenden die Strukturinformation des Objektes unterdrückt, sodaß die Helligkeitsinformation (ungebeugtes Licht) dem zweiten Teilbild überlagert wird. Grundlage dieses Verfahrens ist der auch beim Phasenkontrast und beim zentralen Dunkelfeld genutzte Effekt, daß in der hinteren Brennebene des Mikroskops Helligkeits- und Strukturinformation (vom Objekt unbeeinflusstes und am Objekt erzeugtes Licht) räumlich getrennt vorliegen und einzeln manipuliert werden können. Die Methode eignet sich nur für kleine Objekte, da sonst Randaufhellungen die Meßergebnisse verfälschen können. Die Maximalgröße liegt zwischen 25µm (Objektiv 6,3x) und 1,6µm (Objektiv 100x). Gangunterschiedsmessungen werden wie beim Shearingverfahren durchgeführt.

Digitalisierung, Meßreihenstatistik und Gangunterschiedsberechnung

Der entscheidende Vorzug der neuen INTERPHAKO-Mikroskope ist die digitale Anzeige der Meßphasenschichterstellung auf dem zur Grundausrüstung gehörenden Bedienpult DIGIMIN. Durch Tastendruck kann einer der beiden Referenzpunkte als Nullpunkt definiert werden. Bei Übersichtsmessungen ist der Gangunterschied sofort ablesbar. Für exakte Meßergebnisse muß der angezeigte Wert noch mit dem um 1 bis 2% abweichenden wellenlängenabhängigen Faktor multipliziert werden. Informationen über die Reproduzierbarkeit interferenzmikroskopischer Messungen lassen sich nur durch statistische Analyse der Meßdaten ermitteln. Hierfür kann das DIGIMIN gegen eine Auswerteeinheit RETARMET 2 ausgetauscht werden. Das RETARMET 2 berechnet außer dem Mittelwert $\bar{x}$ die Standardabweichung s und den Vertrauensbereich δ .

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$\delta = t_n \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Der Vertrauensbereich wird der Wert angegeben um den der Meßwert um gemessenen maximal abweichen kann (bei einer vorgegebenen Sicherheit von 95%). Dabei geht neben der Anzahl der Messungen ein Faktor t_n ein, der die Abweichung

Normalverteilung entspricht der Student- oder t-Verteilung berücksichtigt.

2 Messungen: $t_n = 12,7$ 5 Messungen: $t_n = 2,78$

10 Messungen: $t_n = 2,23$ 100 Messungen $t_n = 2,0$

Optional kann am RETARMET 2 ein digitaler Meßtubus oder ein Laserlängenmeßfühler angeschlossen werden.

Die Meßdaten werden automatisch mit den verfahrensbedingten Korrekturfaktoren multipliziert und angezeigt bzw. über einen Datenbus ausgegeben werden (V24/RS232-Schnittstelle).

Außerdem für polarisationsmikroskopische Kompensatormessungen enthält das RETARMET 2 die entsprechenden Meßprogramme.

Längenmessungen

Die Ausdehnung der Strukturen in der Bildebene kann mit

- Okularmeßplatten im Meßschieber (in Grundausrüstung)
- monokularem Meßtubus (Meßschraubenokular)
- binokularem Meßtubus (mit RETARMET 2) digitalisierbar

bestimmt werden

Sehr kleine Längen lassen sich im Shearing-Verfahren durch Aufheben der Objektparallaxe um die Objektgröße und Ausmessen des Interferenzstreifenabstandes in der hinteren Brennebene mit hoher Reproduzierbarkeit messen.

$$l = \frac{K}{d}$$

$$K = \frac{C}{M}$$

l : messende Länge
 d : Abstand der Interferenzstreifen

K : wellenlängen- und vergrößerungsabhängige Konstante

Neigungswinkelmessungen

Neigungswinkel von Oberflächen (z.B. von Schrägschliffen)

kann durch gleichzeitige Messung von Aufspaltung und Verschiebung im Shearingverfahren ermittelt werden.

$$\tan \alpha = \frac{g}{2a}$$

α : Neigungswinkel der Oberfläche in Aufspaltungsrichtung

g : Verschiebung

a : Größe der Aufspaltung (siehe Messung kleiner Längen)

Ausbaustufen der JENA-Mikroskope vom Typ INTERPHAKO

1. Grundgeräte

1.1. JENAVAL interphako
(Auflicht)

Best.-nr.: 300437:761.20/7

1.2. JENAVAL interphako
(Durchlicht)

Bestellnr.: 300437:661.20/7

1.3. JENAPOL interphako
(Durchlicht, Auflicht)

Bestellnr.:

1.4. Durchlichteinr. für
JENAVAL interphako

Arbeitsmöglichkeiten

Halbfeld- und Interferenz-
kontrastmikroskopie (1.2. auch
Phasenkontrast)

Messung von Gangunterschieden:

- Streifenversetzung visuell
abschätzen (± 50 nm)
- Streifenversetzung mit Meßpha-
senschieber bestimmen ($\pm 10 \dots 20$ nm)
- Messung im homogenen Feld (weißes
Licht) ($\pm 2 \dots 10$ nm)
- Messung mit Halbschattenplatte
(monochr. Licht) ($\pm 1 \dots 5$ nm)

2. Objektivierete Messung

Einrichtung VELOMET 2

Bestellnr.: 300471:901.21/8

- elektronische Kompensations-
anzeige (Verkürzung der Meßzeit,
geringere Belastung des Messenden)
- bis 40 nm direkte Gangunterschieds-
anzeige ($\pm 0,5 \dots 2$ nm)
- Photometrie (bis minimal 0,1%
Reflexion oder Transmission)

3. Automatische Gangunter- schiebsberechnung und Meßreihenstatistik

Einrichtung RETERMET 2

Bestellnr.: 300471:500.21/0

- automatische Multiplikation der
der Meßergebnisse mit einem
einggegebenen Faktor
- Berechnung von Standardabweichung
 $s = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$
und Vertrauensbereich
 $\delta = t \cdot s / \sqrt{n}$
- Kopplung mit Drucker (V24-Schnitt-
stelle) möglich

Längenmessungen in der
Objektebene

binokulare Meßeinrichtung

Bestellnr.: 300463:301.21/2

smöglichkeiten

binokulare Messung mit Okular-
messschraube (bzw. Meßplatten)

Digitalisierung und Meßreihensta-
tistik mit 3. möglich

5. Mikrofotografie

Einrichtung mf-AKS 24x36

automatic 2 pol-mot

Bestellnr.: 390460:645.21/2

automatische Belichtung und

Filmtransport von Kleinbilddfilmen

mit Projektiven 3,2:1, 4:1, 5:1

und Bertrandsystem

6. Objektverschiebung, mo-
torisch

Einrichtung für stati-

stische Verfahren und

Koordinatenfindung

Bestellnr.: 300463:802.21/5

programmierbare motorische Objekt-

verschiebung in X-und Y-Richtung

(75 mm x 25 mm, Schrittweite: 10µm)

Autor: Wolfgang Degel

JENAVAL-Zusammenstellung

1. Schöppe, G. u.a.: JENAVAL interphako und JENAVERT INTERPHAKO - die Interferenzmikroskope der JENA-MIKROSKOPE 250-CF
in: JENAER RUNDSCHAU 32 (1987) 1 S.11-15
2. Beyer, H.: Theorie und Praxis der Interferenzmikroskopie
Verlagsges. Geest&Portig K.G., Leipzig 1974
3. Beyer, H.: Interferenzmikroskopie
Kap. 6.1.3 und 6.2.3. in Beyer, H.(Hrsg.): Handbuch der Mikroskopie. VEB Verlag Technik, Berlin 1977
(3. Auflage Hrsg.: Riesenbergr in Vorbereitung)
4. Gebrauchsanleitung JENAVAL interphako/JENAVERT interphako
Druckschriften-Nr. 30-G0320. Kombinat VEB Carl Zeiss JENA
5. Beyer, H.: Zur praktischen Durchführung interferenzmikroskopischer Messungen an Oberflächen, insbesondere in Halbleitertechnik und Mikroelektronik
in: JENAER RUNDSCHAU 22 (1977) 6 S.277-280
6. Werlich, R. u. a.: Digitalkompensator Retarmet 2 für Polarisations- und Interferenzmikroskope
in: JENAER RUNDSCHAU 32 (1987) 1 S. 18-20
7. Gäbel, K. u.a.: Einfluß der Beleuchtungsapertur auf interferenzmikroskopische Messungen
in: JENAER RUNDSCHAU 32 (1987) 2 S. 66-68
8. Schäfer, W. u. Terlecki, G.: Halbleiterprüfung. Licht- und Rasterelektronenmikroskopie
Dr. Alfred Hüthig Verlag, Heidelberg 1986