

## 3 Untersuchungsmethoden

In diesem Kapitel sollen die in dieser Arbeit verwendeten Untersuchungsmethoden vorgestellt werden. Es wurden die etablierten Methoden des elektronenstrahl-induzierten Stromes (EBIC), der Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM) und der Energiedispersiven Röntgenanalyse (EDX) verwendet. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die Anwendung der Lock-in IR-Thermographie, die im Rahmen dieser Arbeit zum ersten mal für die Lokalisierung einzelner GOI-Defekte, für die Bestimmung der GOI-Defektdichte, sowie für die großflächige Abbildung von GOI-Defekten eingesetzt wurde. Da diese Methode verhältnismäßig neu ist, wird besonders auf sie eingegangen.

### 3.1 Elektronenstrahl-induzierter Strom (EBIC)

Die Methode des elektronenstrahl-induzierten Stromes (Electron Beam Induced Current, EBIC) ist ein spezieller Modus der Rasterelektronenmikroskopie. Bei Bestrahlung eines Halbleiters mit einem Elektronenstrahl werden durch die hochenergetischen Primärelektronen Elektron-Loch-Paare generiert, die an einer Potenzialbarriere (z.B. pn-Übergang) durch Diffusions- bzw. Driftvorgänge getrennt werden. In einem Außenkreis des untersuchten Objektes kann ein Stromsignal erfasst werden, das dem lokalen Generations-Rekombinations-Verhältnis von Elektron-Loch-Paaren entspricht. Durch Abrastern der Probe können rekombinationsaktive Defekte wie z.B. Kristallbaufehler, Verunreinigungen und Ausscheidungen detektiert werden. Für die Interpretation des EBIC-Bildkontrastes ist die Kenntnis der Tiefendosisverteilung der erzeugten Elektron-Loch-Paare im Halbleiter nötig. Sie ist von dem Anteil der rückgestreuten Elektronen, der Primärenergie des Elektronenstrahles, und der spezifischen Ionisationsenergie des untersuchten Materials (3,65 eV für Silizium) [Hol74] abhängig. In Silizium variiert die mittlere Eindringtiefe von 0.03...7  $\mu\text{m}$  für Elektronenstrahlenergien von 1...30 keV. Detaillierte Beschreibungen des EBIC-Effektes gehen auf Ehrenberg zurück, der EBIC zuerst an pn-Übergängen untersuchte [Ehr51, Ehr53]. Verschiedene Anwendungen der EBIC-Methode sind in der Literatur beschrieben [Lea82, Hol89, Yak92].

In dieser Arbeit wurde für die EBIC Untersuchungen ein Rasterelektronenmikroskop JSM6400 von Jeol benutzt. Dabei wurden auch EBIC-Untersuchungen mit Probenvorspannung durchgeführt. EBIC wurde jedoch vor allem für die Lokalisierung von GOI-Defekten für die spätere TEM-Zielpräparation verwendet. Die Abbildung großflächiger Schwankungen bzw. lokaler Variationen in der GOI-Defektdichte ist mit EBIC nicht möglich, da die größte abbildbare Fläche nur etwa  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  beträgt.

### 3.1.1 Abbildung von GOI-Defekten mit EBIC

Für die Abbildung und Lokalisierung von GOI-Defekten stehen EBIC, OBIC („Optical Beam Induced Current“) und die Kupferdekorations-Methode [Its96c] zur Verfügung. Bei der Kupferdekorationsmethode wird durch elektrolytische Abscheidung von Kupfer die Defektposition markiert. Diese Methode wurde in dieser Arbeit nicht verwendet, da auch die Anreicherung von kontaminierendem Kupfer in der GOI-Defektursache untersucht werden soll.

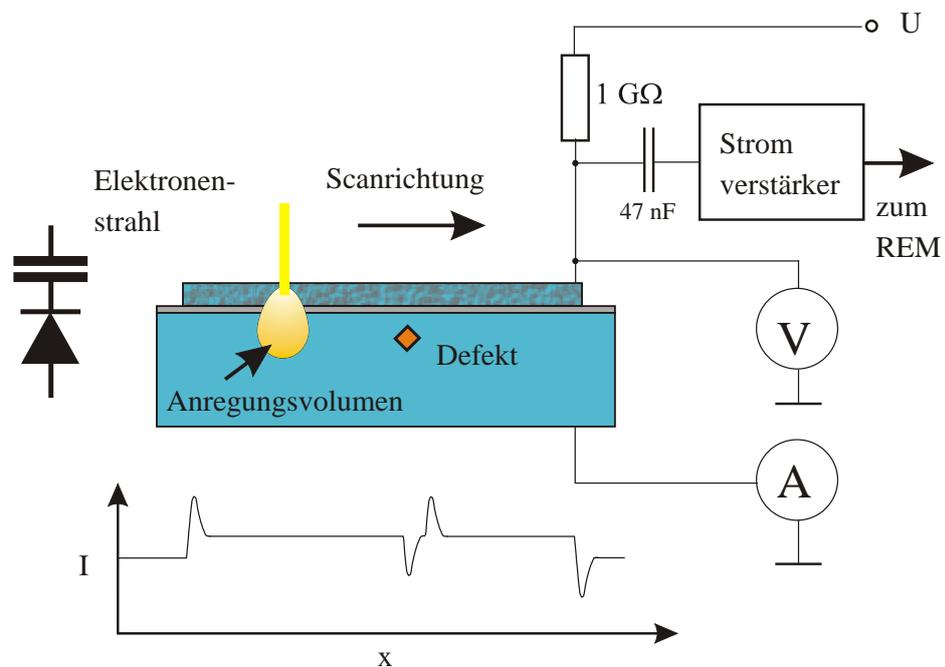
Bei der Lokalisierung von GOI-Defekten mit EBIC wird im wesentlichen ausgenutzt, dass das isolierende Oxid die Erzeugung eines EBIC Stromes zwischen dem Halbleiter und dem Gate zunächst verhindert. An der Stelle des GOI-Defektes besitzt das Oxid jedoch eine verminderte isolierende Eigenschaft. Die MOS Struktur verhält sich an dieser Stelle wie ein pn-Übergang. Die vom Elektronenstrahl generierten Ladungsträger können daher das Gate erreichen und so ein EBIC-Signal erzeugen. Bedingung für eine Abbildung von GOI-Defekten mit EBIC ist jedoch, dass der GOI-Defekt bereits durchgebrochen ist.

GOI-Defekte haben strukturelle Ursachen, die eventuell auch mit einer erhöhten Rekombination von Elektron-Loch-Paaren verbunden ist. Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie an MOS Strukturen solche rekombinationsaktiven Defekte mit Hilfe von EBIC abgebildet werden können.

### 3.1.2 Abbildung von rekombinationsaktiven Defekten mit EBIC an MOS Strukturen

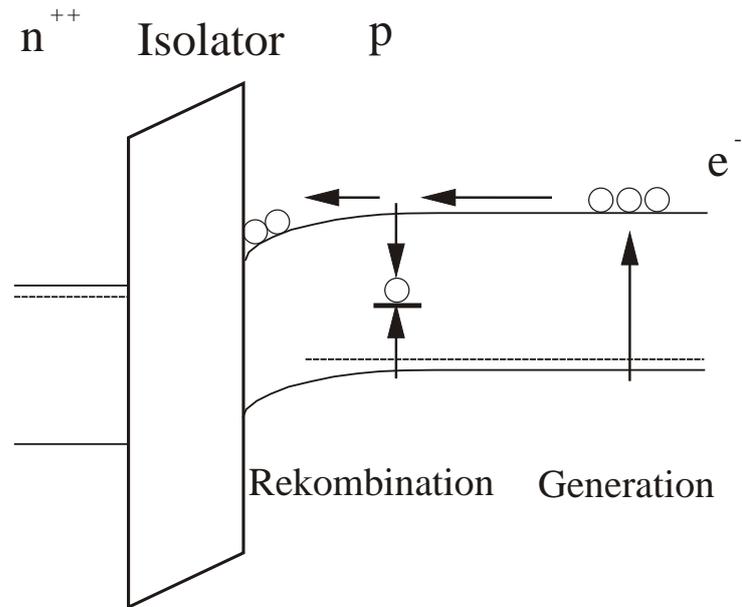
Die EBIC-Untersuchungsmethode hat, insbesondere in Verbindung mit einer TEM Zielpräparation, in den letzten Jahren für die Charakterisierung von rekombinationsaktiven Defekten in MOS Strukturen an Bedeutung gewonnen. Bedingt durch die isolierende Oxidschicht sind EBIC Untersuchungen von MOS Strukturen jedoch komplexer als Untersuchungen an pn- bzw. Schottky-Übergängen. Im Gegensatz zur Untersuchung von pn-Übergängen ist das EBIC-Signal an einer MOS-Struktur kapazitiv gekoppelt.

In dieser Arbeit wird dem Strom, bei dem Elektronen im Außenkreis vom Gate zum Halbleiter fließen, ein heller Bildkontrast zugeordnet. Im Gegensatz dazu verursacht der Elektronenfluss vom Halbleiter zum Gate einen dunklen Bildkontrast. Fließt kein Strom, so liegt der zugeordnete Wert in der Mitte der Grauskala. Diese Zuordnung ist willkürlich und kann auch umgekehrt werden. Sie wird im Allg. so gewählt, dass rekombinationsaktive Defekte dunkel erscheinen.



**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der EBIC Untersuchung einer MOS Struktur.

Abbildung 3.1 zeigt die schematische Darstellung des Untersuchungsaufbaues, des Ersatzschaltbildes, sowie des EBIC-Signalverlaufes an einem detektierten Defekt. Die dargestellte Versuchsanordnung ermöglicht es, eine Spannung ( $U$ ) an ein Testfeld anzulegen, wobei der Strom durch einen Vorwiderstand begrenzt wird. Diese Spannung kann dafür genutzt werden, einen GOI-Defekt durchzubrechen. Die kapazitive Signalauskopplung ( $47\text{ nF}$ ) erlaubt jedoch auch die Untersuchung der MOS Struktur unter Anlegen einer Vorspannung (siehe unten). Das mit einem Eingangswiderstand von  $> 10\text{ G}\Omega$  sehr hochohmige Digitalvoltmeter und das Amperemeter erlauben es, mit dieser Anordnung auch den FN-Tunnelstrom zu untersuchen. Dabei wirkt der Vorwiderstand von  $1\text{ G}\Omega$  wie eine Konstantstromquelle, die nach dem Durchbruch eines GOI-Defektes den Strom limitiert.



**Abbildung 3.2:** Bandschema eines MOS Kondensators in Verarmung zur Darstellung der physikalischen Prozesse bei Elektronenbestrahlung.

Abbildung 3.2 zeigt schematisch den Bandverlauf einer MOS Struktur, die aus einem  $n^{++}$  dotierten Gate, einem Isolator ( $SiO_2$ ) und einem p-dotierten Halbleiter besteht. Zunächst sollen die physikalischen Vorgänge bei der Elektronenbestrahlung dieser MOS Struktur diskutiert werden. Die Bandverbiegung an der MOS Grenzfläche (Anreicherung, Verarmung, Inversion) stellt sich durch die Wirkung von Oxidladungen, Grenzflächenladungen und angelegter Vorspannung ein. In Abbildung 3.2 wurde die Vorspannung genau so gewählt, dass sich die Struktur im Zustand der Verarmung befindet. Im gezeigten Fall weist das p-Material daher eine Bandverbiegung von etwa  $E_g/2$  auf ( $E_g$  ist die Bandlücke). Bei der Bestrahlung der MOS-Struktur mit hochenergetischen Elektronen werden im Anregungsvolumen Elektron-Loch-Paare gebildet. Die generierten Minoritätsladungsträger (Elektronen) werden durch das Feld der Verarmungszone zur Grenzfläche befördert. Dort erzeugen sie eine negative Grenzflächenladung, die die Bandverbiegung an der Grenzfläche reduziert. Die Erzeugung von zusätzlichen Minoritätsladungsträgern führt also zu einer Potenzialverschiebung an der Halbleiter-Isolator-Grenzfläche. Diese Potenzialverschiebung verursacht beim Anschalten des Elektronenstrahles einen kurzzeitigen Probenstrom im Außenkreis, der für eine Potenzialkompensation durch eine entsprechende Aufladung

(Elektronen fließen vom Gate ab) des MOS Kondensators sorgt. Dieser Probenstrom wird im EBIC z.B. an senkrechten Probenkanten bzw. an den Rändern von MOS Kondensatoren beobachtet. Wird der Elektronenstrahl von links nach rechts über ein begrenztes Gate (ein Testfeld) gerastert, so wird an der linken Gatekante ein helles Signal beobachtet (Elektronen fließen im Außenkreis vom Gate zum Halbleiter), während an der rechten Gatekante ein dunkles Signal beobachtet wird. Die auftretende Potenzialverschiebung auf der Gatefläche ist abhängig von der Minoritätladungsträgerkonzentration an der Grenzfläche an der untersuchten Probenstelle. Ist die Lebensdauer der Minoritätladungsträger über die Gatefläche homogen, so wird beim Abrastern innerhalb der Probe nur der durch den Elektronenstrahl generierte Feldstrom detektiert. Sind jedoch rekombinationsaktive Defekte vorhanden, so werden einige der generierten Elektron-Loch-Paare an diesen Defekten rekombinieren, und die Anzahl der Elektronen, die zur Halbleiter-Isolator-Grenzfläche gelangen, wird reduziert. Damit wird an der Defektposition auch die Potenzialverschiebung geringer, was auf Grund der kapazitiven Kopplung des Signals über die Oxidkapazität zu dem in Abbildung 3.1 skizzierten differenzierten Signalverlauf führt [Kir99]. Da die MOS Struktur einen Kondensator darstellt, ist die Höhe des detektierten Strom-Signals wesentlich von der Höhe der Potenzialverschiebung, von der Probenkapazität, aber auch von der Rastergeschwindigkeit abhängig. So nimmt bei geringen Rastergeschwindigkeiten das Signal ab und der durch den Elektronenstrahl im Oxid generierte Feldstrom wird zur dominierenden Signalquelle.

Die Höhe der Potenzialverschiebung ist einerseits von der Höhe des generierten Elektronenstromes, andererseits aber auch von der Gleichgewichts-Ladungsträgerkonzentration an der Halbleiter-Oxid-Grenzfläche abhängig. Sind dort viele Ladungsträger vorhanden, so haben die zusätzlich generierten Elektronen auf Grund ihrer geringen Anzahl nur einen kleinen Einfluss auf das Potenzial. Durch Anlegen einer Vorspannung an die MOS Struktur läßt sich die Ladungsträgerkonzentration an der Halbleiter-Oxid-Grenzfläche variieren. Wird eine hohe negative Vorspannung an die MOS Struktur angelegt, so befindet sich die Halbleiter-Oxid-Grenzfläche in Anreicherung (Akkumulation). Der vom Elektronenstrahl generierte Elektronenstrom wird das Grenzflächenpotential daher kaum beeinflussen. Wird die angelegte Spannung reduziert, geht die Halbleiter-Isolator-Grenzfläche in Verarmung über und die Ladungsträgerdichte nimmt ab. Das Potenzial an der Grenzfläche wird in diesem Fall wesentlich von der Anzahl der sie erreichenden Elektronen beeinflusst. Nur unter dieser Bedingung ist die oben beschriebene Abbildung von rekombinationsaktiven Defekten im MOS Strukturen möglich. Wird dagegen eine genügend hohe positive Spannung an die MOS-Struktur angelegt, so befindet sich die Halbleiter-Isolator-Grenzfläche in Inversion. Die dominierende Ladungsträgerart sind dann Elektronen (Minoritätladungsträger),

die in großer Zahl an der Grenzfläche vorliegen. Der vom Elektronenstrahl erzeugte Elektronenfluss hat auch in diesem Fall kaum Einfluss auf das Potenzial. Um rekombinationsaktive Defekte, die sich an der Halbleiter-Isolator-Grenzfläche befinden, mit EBIC abbilden zu können, muss diese Grenzfläche also durch Anlegen einer geeigneten Vorspannung in Verarmung gebracht werden.

### 3.1.3 Kohlenstoff-Kontaminationsmethode

Mit Hilfe der Kohlenstoff-Kontaminationsmethode lassen sich einzelne mit Hilfe von EBIC beobachtete Defekte markieren. Dabei wird ausgenutzt, dass hochenergetische Elektronen an der Probenoberfläche adsorbierte organische Moleküle, die sich im Vakuum befinden, spalten. Dabei entsteht als ein Spaltprodukt Kohlenstoff, der sich auf der Probenoberfläche ablagert. Wird der Elektronenstrahl im Linienscan über die Position des Defektes geführt, so läßt sich eine Linie aus abgelagertem Kohlenstoff auf die Probenoberfläche schreiben. Diese Kohlenstofflinie ist im REM und auch im optischen Mikroskop sichtbar. Durch Drehen der Probe um einen Winkel von  $90^\circ$  läßt sich der Defekt z.B. für eine TEM Querschnittspräparation mit einem Kreuz markieren.

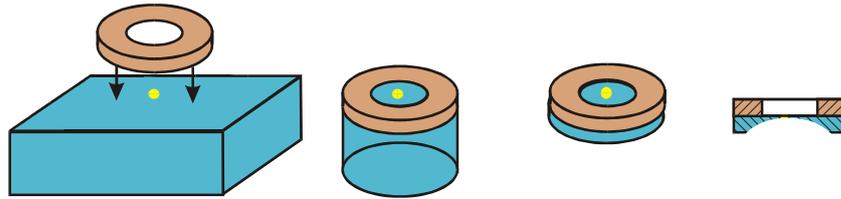
## 3.2 Transmissions-Elektronenmikroskopie (TEM)

Die Transmissions-Elektronenmikroskopie ist eine Methode zur direkten Abbildung submikroskopischer Strukturen. Dabei wird ein Elektronenstrahl durch eine sehr dünne ( $< 2 \mu\text{m}$ ) Probe geschickt, wobei die Elektronen in Wechselwirkung mit dem Kristallgitter treten und an den Gitterebenen gebeugt werden. Aus der Probe treten ungebeugte (Primärstrahl) sowie gebeugte Elektronen aus. Zur Bildentstehung können der Beugungscontrast, der Phasencontrast bzw. der Absorptionscontrast beitragen. Vorzugsweise wird der Beugungscontrast verwendet. Dabei entsteht eine Abbildung des Objektes durch die Wirkung der Objektivlinse in der zugeordneten Bildebene. Durch Benutzen einer Blende kann nur der Primärstrahl zur Abbildung ausgewählt werden (Hellfeldbild). In der hinteren Brennebene der Objektivlinse entstehen Beugungspunkte, deren Abbildung als Beugungsbild bezeichnet wird. In diesem sind wichtige Informationen wie Probenorientierung und Netzebenenabstand enthalten. Eine detaillierte Beschreibung der Transmissions-Elektronenmikroskopie findet man in [Bet82].

In dieser Arbeit wurden ein Philips Transmissions-Elektronenmikroskop „CM20T“ mit einer Beschleunigungsspannung von 200 kV sowie das 1 MV Höchstspannungs-Elektronenmikroskop (HEM) von Jeol für die Untersuchung von GOI-Defekten verwendet.

### 3.2.1 TEM-Zielpräparation (planar/Querschnitt)

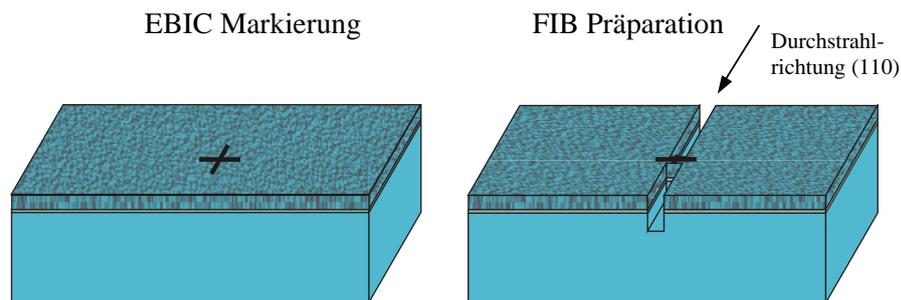
Für die Untersuchung mit TEM müssen durchstrahlbare Objektfolien hergestellt werden. Die für eine planare Präparation durchzuführenden Arbeitsschritte sind in Abbildung 3.3 dargestellt.



**Abbildung 3.3:** Darstellung der Arbeitsschritte zu Herstellung einer planaren TEM Probe.

Zunächst wird die zu untersuchende Stelle durch Aufkleben eines Kupferringes markiert. Dieser Kupferring wird zusammen mit dem Material ausgebohrt und so ein Bohrkern von 3 mm Durchmesser gewonnen. Dieser wird auf etwa 100 µm durch Schleifen gedünnt. Anschließend wird die Probe durch Dimpeln bis auf etwa 10 µm abgetragen. Mit Hilfe von Argon-Ionen wird weiter Material abgetragen, bis eine Dicke von etwa 1...2 µm erreicht ist.

Im Rahmen dieser Arbeit sollten auch einzelne Defekte im Querschnitt untersucht werden. Dazu müssen diese zunächst lokalisiert werden, was z.B. mit EBIC möglich ist. Anschließend können die Defekte mit der Kohlenstoff-Kontaminationsmethode markiert werden. Die zielgenaue Präparation erfolgt mit Hilfe der FIB-Technik (Focused Ion Beam, [Ish98, Sai98]). Zunächst wird ein etwa 50...100 µm breiter und 3 mm langer Steg aus den markierten Proben ausgesägt. Abbildung 3.4 zeigt schematisch einen solchen ausgesägten Steg. Mit Hilfe der fokussierenden Ionenstrahlanlage wird links und rechts der Kreuz-Markierung ein schmaler Kanal abgetragen und somit ein für TEM geeigneter Querschnitt hergestellt. Bei einer Beschleunigungsspannung von 200 kV beträgt die maximale Proben-dicke, die noch im TEM durchstrahlt werden kann, etwa 2 µm. Der durchstrahlbare Bereich senkrecht zur Gatefläche ist etwa  $4 \times 15$  µm groß. Nachdem der präparierte Bereich genügend dünn ist, können erste TEM-Aufnahmen gemacht werden. Die Qualität der TEM-Aufnahmen läßt sich wesentlich durch weiteres sukzessives Abdünnen des durchstrahlbaren



**Abbildung 3.4:** Darstellung der FIB Querschnittspräparation.

Bereiches verbessern, wobei allerdings die Gefahr besteht, dass der interessierende Defekt ebenfalls mit abgetragen wird.

Die in dieser Arbeit verwendete fokussierende Ionenstrahlanlage „FIB 611“ der Firma „FEI“ hat eine laterale Auflösung von 5 nm.

### 3.3 Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)

Bei der Bestrahlung eines Festkörpers mit hochenergetischen Elektronen im Energiebereich von etwa 1 keV bis 1 MeV werden einzelne Festkörperelektronen (Ionisation, Interbandübergänge) aber auch kollektive Zustände (Plasmonen, Phononen) angeregt. Nach einer für jeden Anregungszustand charakteristischen Lebensdauer geht das angeregte Festkörperelektron wieder in seinen Grundzustand über. Die freiwerdende Energie führt dabei zur Emission von Röntgenquanten, Lichtquanten oder Auger-Elektronen. Die beim Übergang in den Grundzustand freiwerdenden Energiebeträge sind materieszpezifisch und können so zu analytischen Aussagen über den bestrahlten Festkörper benutzt werden.

Bei der Energiedispersive Röntgenanalyse wird die frei werdende Röntgenstrahlung mit einer Energie im Bereich von etwa 100 eV bis zu einigen 10 keV detektiert. Die vom Festkörper ausgehende Röntgenstrahlung besteht aus einer Überlagerung der kontinuierlichen Bremsstrahlung und einem elementspezifischen Linienspektrum, das sich in Spektralserien (K-, L-, M-Serien) unterteilt. Die Nachweiswahrscheinlichkeit einzelner Elemente hängt von der Energie der zugehörigen Strahlung ab. Niederenergetische Röntgenstrahlung wird durch ein nur wenige  $\mu\text{m}$  dickes Be-Fenster, das den Detektor vor Kontamination und niederenergetischen Streuelektronen schützt, absorbiert. Leichte Elemente mit einer Kernla-

dungszahl  $Z < 9$  können daher nicht nachgewiesen werden. Bei höheren Röntgenenergien steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Röntgenquanten den Detektor ohne Wechselwirkung passieren. Deshalb können schwere Elemente nicht durch ihre K-Strahlung sondern nur durch die L- oder M-Strahlung nachgewiesen werden. Die untere Nachweisgrenze für Nickel und Kupfer liegt bei etwa einem Atomprozent. Weiterführende Informationen findet man in [Ree75, Gol75].

### 3.4 Sekundärionen Massenspektrometrie (SIMS)

Die Sekundärionen Massenspektrometrie (SIMS) ist eine leistungsfähige Methode zur tiefenaufgelösten Analyse der Zusammensetzung von Festkörpern. SIMS kann zum Nachweis der Isotope aller Elemente, einschließlich Wasserstoff, angewandt werden. Hierbei können meist Nachweisgrenzen im ppm-Bereich, in günstigen Fällen auch im ppb-Bereich, realisiert werden [Wil89]. Die zu untersuchende Probe wird mit Primärteilchen z.B. Sauerstoff beschossen und die von der Probe abgetragenen Sekundärionen werden massenspektrometrisch analysiert. Der resultierende Abtrag von Sekundärionen ermöglicht die Aufnahme von sogenannten Tiefenprofilen mit einer erreichbaren Tiefenauflösung von 2-5 nm [Hör93]. Weiterführende Informationen findet man in [Brü79].

### 3.5 Lock-in IR-Thermographie

Die Lock-in IR-Thermographie ist eine Methode zur zerstörungsfreien und kontaktlosen Abbildung von elektrischen Fehlerströmen in Halbleiter-Strukturen und Materialien. Das Prinzip besteht aus der Detektion einer lokalen Temperaturmodulation an der betrachteten Probenoberfläche. Diese Temperaturmodulation wird durch die Modulation der von außen eingebrachten elektrischen Verlustleistung erzeugt.

Seit etwa 40 Jahren gibt es Bemühungen, Fehlerströme in elektronischen Bauelementen und Materialien anhand der von ihnen erzeugten Joule'schen Wärme zu lokalisieren. So wurden z.B. für die Abbildung der Oberflächentemperaturverteilung nematische und thermochrome Flüssigkristalle [Asz81] verwendet. Flüssigkristalle sind eine Phase der Materie, deren Ordnung zwischen der einer Flüssigkeit und der eines Kristalls liegt. Beim temperaturabhängigen Phasenübergang verändern sich die optischen Eigenschaften des verwendeten Flüssigkristalles. Im flüssigkristallinen Zustand polarisieren nematische Flüssigkristalle einfallendes Licht während thermochrome Flüssigkristalle in Abhängigkeit von ihrer Tem-

peratur nur einen bestimmten Wellenlängenbereich reflektieren und daher farbig erscheinen.

Auch die Methode des „fluorescent microthermal imaging“ (FMI) [Bar96] wurde zur Untersuchung der Oberflächentemperatur entwickelt. Dabei wird ein dünner Film eines Farbstoffes auf die Probe aufgetragen, der unter Beleuchtung mit UV-Licht eine temperaturabhängige Fluoreszenz zeigt. Die genannten Methoden haben den Nachteil, dass die Probe mit einem dünnen Film bedeckt werden muss, was bei der Untersuchung von elektronischen Bauelementen nicht immer möglich ist. Simo und Martinuzzi [Sim90] verwendeten eine IR-Kamera für die Detektion des Oberflächentemperaturprofils. Die „klassische“ stationäre IR-Thermographie wurde von ihnen für die Untersuchung von Fehlerströmen in Solarzellen (sogenannte „shunts“) verwendet. Die erreichte thermische Auflösung aller bisher erwähnten Methoden beträgt etwa 0,1 K. Die vorgestellten Methoden sind daher nicht empfindlich genug, um Temperatursignale von einigen  $\mu\text{K}$  detektieren zu können, wie sie bei Verlustleistungen von einigen  $\mu\text{W}$  in elektronischen Bauelementen entstehen. Stationäre Methoden haben auch den Nachteil, dass die erreichbare Ortsauflösung durch die Wärmeleitung des untersuchten Materials limitiert ist.

Sowohl die Signal- als auch die Ortsauflösung können durch das Lock-in Verfahren erheblich verbessert werden. Basierend auf der Arbeit von Busse et al. [Bus92] wurde das erste kommerzielle, zerstörungsfreie und kontaktlose Lock-in Thermographie System entwickelt (Lock-in Option für AGEMA Thermovision 900 Mirror Scanner Thermocamera). Die Oberflächentemperatur wurde dabei mit Hilfe einer IR-Kamera gemessen. Dieses System erreichte eine Temperaturauflösung von 15 mK [Bre97] und blieb in seiner Anwendung auf Untersuchungen zur nichtzerstörenden Werkstoffprüfung (non-destructive testing, NDT) beschränkt.

Bei einer weiteren Lock-in Thermographie Technik, der dynamischen Präzisions Kontakt Thermographie (DPCT) [Bre98] wird die oberflächennahe periodische Temperaturmodulation durch Abrastern mit einem Miniatur-Thermistor gemessen. Zum ersten mal wurden Temperaturmodulationen von unter 100  $\mu\text{K}$  bei einer Ortsauflösung von 30  $\mu\text{m}$  detektierbar. Da diese Methode kontaktierend ist, eignet sie sich jedoch nur bedingt für die Untersuchung von empfindlichen Halbleiterbauelementen. Sie wurde vor allem für die Untersuchung von Solarzellen eingesetzt. Ein weiterer Nachteil ist durch die serielle Messwertfassung gegeben, da aus diesem Grund die Messdauer einige Stunden betragen kann.

Ab 1997 wurde am MPI für Mikrostrukturphysik in Halle ein hochempfindliches Lock-in IR-Thermographie System entwickelt. Die Basis dieses Systems bildet eine InSb IR-Kamera mit  $128 \times 128$  Pixel. Dieses System erreicht eine Signalauflösung von 20  $\mu\text{K}$  nach

1000 s Messdauer bei einer Ortsauflösung von  $5 \mu\text{m}$  [Bre00]. Ein Großteil der thermographischen Untersuchungen, insbesondere die Bestimmung von GOI-Defektdichten wurden mit Hilfe dieses Lock-in IR-Thermographie Systems durchgeführt. Seit Januar 2001 steht im MPI für Mikrostrukturphysik ein weiterentwickeltes industrielles System mit der Bezeichnung „TDL 384 M 'Lock-in'“ zur Verfügung. Hier findet eine Quecksilber Cadmium Tellurid (MCT) Kamera mit  $384 \times 288$  Pixeln Verwendung. Aufgrund der erhöhten Pixelanzahl ergibt sich ein verbesserter optischer Gesamteindruck der thermographischen Aufnahmen. Dieses neue System wurde für die Abbildung der GOI-Defektverteilung über 200 mm Wafer verwendet. Da nur diese neue Version kommerziell erhältlich ist, soll im Folgenden das Messprinzip der Lock-in IR-Thermographie sowie die technische Realisierung anhand des „TDL 384 M 'Lock-in'“ Systems beschrieben werden.

### 3.5.1 Messprinzip und technische Realisierung

Der schematische Aufbau des kommerziell erhältlichen Lock-in IR-Thermographie Systems „TDL 384 M 'Lock-in'“ ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

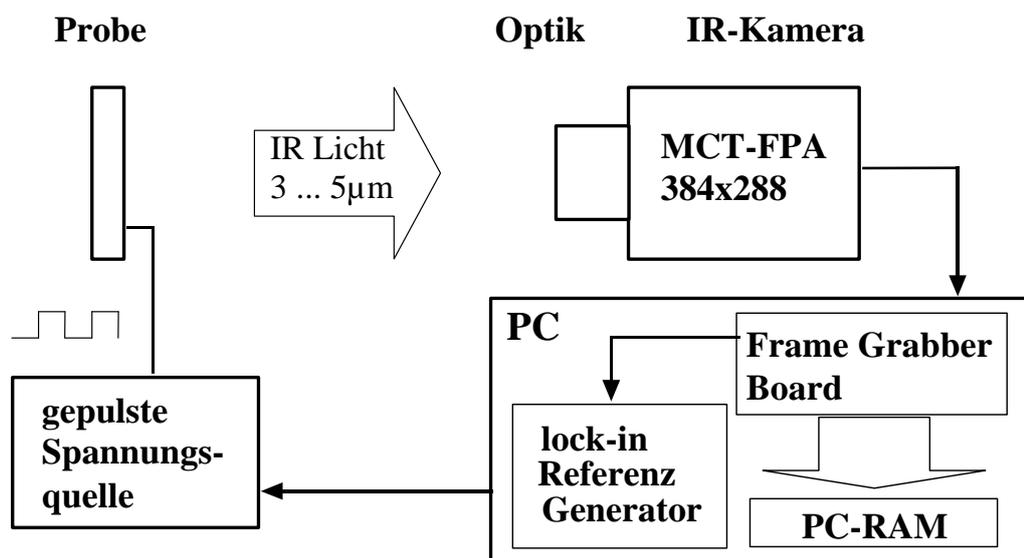


Abbildung 3.5: Prinzip des Lock-in IR-Thermographie Systems „TDL 384 M 'lock-in'“

Das Prinzip der Lock-in IR-Thermographie besteht in der periodischen Anregung von Wärmequellen in dem zu untersuchenden Objekt und der anschließenden Detektion der Oberflächen-Temperaturmodulation. Dazu benötigt man eine mit der Lock-in Frequenz mo-

dulierte Rechteckspannung, die an die Probe angelegt wird. In der Probe fließende Fehlerströme sind die Ursache für lokale periodische Wärmequellen. Die durch die Erwärmung verursachte IR-Strahlung wird von der IR-Kamera detektiert. Diese Kamera besteht aus einem Quecksilber-Cadmium-Tellurid „Focal Plane Array“ (FPA) mit einer Auflösung von  $384 \times 288$  Pixel und einer Pixelgröße von  $20 \times 20 \mu\text{m}$ . Wird das gesamte Pixelfeld verwendet, können alle Pixel mit einer Frequenz von 140 Hz ausgelesen werden. Diese Bildwiederholfrequenz kann jedoch durch Auswahl nur eines Teiles des Detektorfeldes bis auf 850 Hz gesteigert werden. Es lassen sich z.B. Bereiche von  $288 \times 288$ ,  $256 \times 256$  und  $128 \times 128$  Pixel auswählen. Der Detektor ist im Wellenlängenbereich von  $3 \dots 5 \mu\text{m}$  sensitiv und wird durch einen Stirling Motor gekühlt. Die Kamera kann mit verschiedenen Objektiven ausgerüstet werden. Mit einem speziellen Mikroskopobjektiv läßt sich eine Ortsauflösung von  $5 \mu\text{m}$  erreichen. Die Informationen der einzelnen Pixel werden durch einen Frame-Grabber in den Computer eingelesen. Jedes Pixel in jedem Frame wird während der Messung Lock-in korreliert, d.h. in 2 Kanälen mit  $\sin$  und  $-\cos$  Gewichtsfaktoren multipliziert. Diese Gewichtsfaktoren approximieren harmonische Funktionen und sind zur vorgegebenen Lock-in Referenz synchronisiert. Die Addition der gewichteten Frames ergibt das  $0^\circ$  und das  $-90^\circ$  Bild. Aus diesen können dann das Amplituden- und das Phasen-Bild berechnet werden. Der Vorteil der Lock-in IR-Thermographie gegenüber stationären Methoden ist nicht nur die signifikant verbesserte Temperaturentauflösung sondern auch die verbesserte Ortsauflösung. Bei jeder stationären Thermographie-Methode ist die Ortsauflösung durch die laterale Wärmeleitung begrenzt. Bei einer periodischen Anregung der Wärmequelle wirkt diese als Ursprung einer thermischen Welle, die sich im Material ausbreitet und exponentiell gedämpft wird [Car59]. Bedingt durch die Wellenlänge der detektierten IR-Strahlung ist die optische Ortsauflösung der Lock-in Thermographie auf  $5 \mu\text{m}$  limitiert. Mit diesem System können Temperaturmodulationen einer Amplitude von  $35 \mu\text{K}$  nach 1000 s Messzeit abgebildet werden.

Für die Untersuchung von Solarzellen und MOS-Strukturen wird ein Probenhalter benötigt, der im Wesentlichen aus einer thermostatierten Kupferplatte besteht, auf der ein  $100 \mu\text{m}$  dickes Kupfernetz befestigt ist. Dieses Kupfernetz hat die Aufgabe den elektrischen Kontakt zur Probe herzustellen und das zum Andrücken der Probe auf die Unterlage verwendete Vakuum zu verteilen. Es stellt außerdem einen definierten Wärmewiderstand zwischen Probe und Probenhalter dar. Die Rückseite der zu untersuchenden Probe muss mit einem ohmschen Kontakt versehen werden. Dies geschieht entweder durch Aufdampfen von Aluminium oder durch Einreiben eines Gallium-Indium Eutektikums (Reibelot). Die Probe wird nun auf das Kupfernetz gelegt. Das Gate der Probe wird mit einer Nickel-

Folie kontaktiert. Diese Folie stellt sicher, dass elektrische Felder homogen über der ganzen Probenfläche anliegen. Durch das Auflegen einer etwa 20 µm dicken geschwärzten Hostaphan-Folie (Polyester) wird die Probe abgedeckt. Diese Folie wird durch ein Vakuum an den Probenhalter angesaugt und fixiert so die Probe. Sie hat außerdem die Aufgabe, das IR-Emissionsvermögen über der Probenfläche zu erhöhen und zu homogenisieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Probenhalter konstruiert, mit dem auch 300 mm Wafer untersucht werden können.

Bis zum Beginn dieser Arbeit wurde die Technik der Lock-in IR-Thermographie am MPI Halle zur Untersuchung von Shunts in Solarzellen [Bre01] sowie zur Funktionskontrolle von integrierten Schaltkreisen [Bre00] verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Technik erstmalig für die Untersuchung von GOI-Defekten eingesetzt. Die dazu entwickelte Vorgehensweise wird im folgenden Kapitel erläutert.