

# Spektroskopische und *in situ*-Ellipsometrie: Stand der Technik

Karl Riedling

Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik, TU Wien,  
1040 Wien

Komplexere ellipsometrische Methoden wie *Multiple Angle of Incidence*, spektroskopische und *in situ*-Verfahren, haben in den vergangenen Jahren in zunehmendem Maß an Bedeutung in der Analyse, Überwachung und Kontrolle verschiedener technologischer Prozesse in der Mikroelektronik gewonnen. Eine große Auswahl von Ellipsometern, die speziell für die Anforderungen im technisch-industriellen Bereich konzipiert sind, ist heute kommerziell verfügbar. Dieser Beitrag versucht, den Stand der Technik aufgrund der Beiträge zur jüngsten internationalen Ellipsometrie-Konferenz [1] zu illustrieren.

## 1. Prinzipien der Ellipsometrie

Ellipsometrie ist ein optisches und daher weitgehend störungs- und zerstörungsfreies Verfahren zur Untersuchung der Grenzflächen zwischen Medien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften [2], [3]. Sie beruht auf der Tatsache, daß die parallel bzw. normal zur Einfallsebene polarisierten orthogonalen Komponenten einer schräg auf eine Grenzfläche einfallenden (monochromatischen) elektromagnetischen Welle in unterschiedlichem Ausmaß reflektiert und transmittiert werden, was quantitativ durch die *Fresnelschen* Gleichungen [4] beschrieben werden kann. Wenn mindestens eines der involvierten Materialien verlustbehaftet ist, oder wenn sich Vielfachreflexionen von den beiden Grenzflächen einer dünnen Schicht überlagern können, tritt zusätzlich eine Phasenverschiebung zwischen der einfallenden und der reflektierten (bzw. transmittierten) Welle auf, die wiederum für die beiden orthogonalen Komponenten im allgemeinen verschieden ist. Eine linear polarisierte einfallende Welle (für die also beide orthogonalen Komponenten gleich- oder genau gegenphasig schwingen) wird daher durch die Reflexion oder Transmission an einer Grenzfläche im allgemeinen in eine elliptisch polarisierte Welle umgewandelt. Diese Änderung des Polarisationszustandes hängt von den Brechungsindizes der involvierten Materialien und — im Falle dünner Schichten — von der Schichtdicke ab. Ziel der Ellipsometrie ist es, aus einer Messung der Änderung des Polarisationszustandes einer elektromagnetischen Welle Rückschlüsse auf eben diese Parameter zu ziehen. Wenn auch der überwiegende Teil aller ellipsometrischen Anwendungen sich auf den sichtbaren Bereich und die anschließenden Bereiche des Infrarot und Ultraviolett beschränkt, so stellt dies doch keine zwingende Einschränkung dar: Ellipsometrie kann im fernen Infrarot [5], [6] ebenso wie im Röntgenbereich [7] betrieben werden; eine Anwendung im Mikrowellenbereich (ein Sensor für Wasserbedeckung und Eisbildung an Fahrbahnoberflächen) wurde sogar an der TU Wien entwickelt [8], [9].

Üblicherweise wird in der Ellipsometrie ein "komplexer Reflexionskoeffizient"  $\rho$  gemessen, der als das Verhältnis der beiden (im allgemeinen ebenfalls komplexen) Reflexionskoeffizienten für die parallel ( $R_p$ ) bzw. senkrecht zur Einfallsebene ( $R_s$ ) polarisierten Teilwellen definiert ist und durch die (reellen) "ellipsometrischen Winkel"  $\Psi$  und  $\Delta$  dargestellt wird:

$$\rho = R_p / R_s = \tan \Psi \cdot \exp(j\Delta)$$

Für die Messung von  $\rho$  bzw.  $\Psi$  und  $\Delta$  existiert eine Vielzahl von Verfahren, die hier nicht näher beschrieben werden sollen. Je nach dem verwendeten Meßprinzip kann für jede Messung

aus der Intensitätsverteilung der Welle nach der Reflexion oder Transmission und aus der Orientierung polarisationsbeeinflussender Komponenten ein komplexer Wert  $\rho$  bzw. ein  $\Psi$ - $\Delta$ -Wertepaar ermittelt werden. Aus diesen zwei skalaren Parametern können — im allgemeinen durch Lösung eines transzendenten komplexen Gleichungssystems — genau zwei Parameter der untersuchten Probe ermittelt werden, im "klassischen" Fall Real- und Imaginärteil des komplexen Brechungsindex eines homogenen Mediums, oder Dicke und (reeller) Brechungsindex einer dünnen Schicht, vorausgesetzt, alle übrigen Parameter des Meßgeräts und der Probe sind bekannt. Ellipsometrisch können Schichtdicken von Sub-Monolagen bis zu einigen Mikrometern bestimmt werden; die Auflösung der gemessenen Brechungsindizes liegt typisch bei  $10^{-3}$  oder noch besser. Voraussetzung ist im allgemeinen eine laterale Homogenität der untersuchten Probe über die vom Meßstrahl erfaßte Fläche; der Durchmesser der Meßstrahlen liegt bei den handelsüblichen Geräten für den sichtbaren Bereich in der Größenordnung von einigen Millimetern, kann aber (bei gleichzeitigem Verlust an Meßgenauigkeit) durch ein optisches System auf größenordnungsmäßig etwa 100  $\mu\text{m}$  reduziert werden.

Da vielfach mehr als zwei Parameter einer Probe unbekannt sind, wird es notwendig, *mehrere* voneinander unabhängige ellipsometrische Messungen miteinander zu kombinieren; für jede dieser Messungen können dann theoretisch zwei Parameter der Probe ermittelt werden. In der Praxis erweist es sich allerdings als vorteilhaft, wesentlich mehr Messungen vorzunehmen, als aufgrund der Anzahl der unbekanntenen Probenparameter notwendig wären, weil durch diese Redundanz eine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Meßergebnisse erreicht werden kann. Vielfachmessungen können unter Verwendung einer oder durch Kombination mehrerer der folgenden Techniken vorgenommen werden:

1. Variation des Einfallswinkels (*Multiple* oder *Variable Angle of Incidence*-Ellipsometrie): Dieses Verfahren ist apparativ sehr einfach, weil dafür zusätzlich nur ein genaues Goniometer erforderlich ist, mit dem der Einfallswinkel des Lichts auf die Probe variiert werden kann. Die Auswertung der Messungen ist relativ unproblematisch, insbesondere dann, wenn die Eigenschaften der allenfalls in der Probe vorhandenen Materialien nicht bekannt sind. Von Nachteil ist der relativ große Zeitaufwand für das Einstellen des Einfallswinkels, das nur bei wenigen Geräten halb- oder vollautomatisch möglich ist. Insbesondere für *in situ*-Anwendungen scheidet dieses Verfahren aus, einerseits wegen seines intrinsisch größeren Zeitaufwandes, andererseits wegen der vielfach fix vorgegebenen Meßgeometrie (beispielsweise durch die Fenster in einer Vakuumkammer).
2. Variation der Wellenlänge (spektroskopische Ellipsometrie): Hier werden Messungen bei einer Reihe von Wellenlängen über einen Bereich des Spektrums vorgenommen. Damit ist es möglich, Informationen über den spektralen Verlauf der Materialparameter (Real- und Imaginärteil der Brechungsindizes oder Dielektrizitätskonstanten) zu erhalten, die die Identifizierung von Gemischkomponenten erleichtern und für Untersuchungen der Bandstruktur von (Halbleiter-) Materialien herangezogen werden können. Von Nachteil ist der nicht unerhebliche zusätzliche Aufwand, der durch eine leistungsfähige Weißlichtquelle (meist eine Xenon-Hochdrucklampe) und einen Monochromator gegenüber den in der Regel mit Laserquellen ausgerüsteten nicht-spektroskopischen Geräten erforderlich ist. (Andererseits ermöglicht aber die freie Wahl der Arbeits-Wellenlänge, die mit einem spektroskopischen Ellipsometer möglich ist, auch eine Verbesserung der Genauigkeit nicht-spektroskopischer Messungen, weil die Wellenlänge immer so eingestellt werden kann, daß kritische Bereiche mit hohen intrinsischen Fehlern vermieden werden können, deren Lage von den Parametern der Messung *und* den Probeneigenschaften abhängt.)
3. Variation der Zeit (dynamische oder *in situ*-Ellipsometrie): Durch wiederholte Messung an einer Probe, deren Oberfläche irgendwelchen Veränderungen, beispielsweise durch

eine Schichtabscheidung oder einen Ätzprozeß, unterworfen ist, können Informationen über schichtdickenabhängige Parameter und damit über die Dynamik der involvierten Prozesse gewonnen werden. Nicht zuletzt ist diese Anwendung von zunehmender Bedeutung im Bereich der Prozeßkontrolle, weil eine *in situ*-Messung beispielsweise zur Kontrolle des Wachstums von Schichten mit genau definierten Eigenschaften herangezogen werden kann.

## 2. Anwendungen der Ellipsometrie in der Mikroelektronik und Halbleiterphysik

Die Technologie mikroelektronischer Bauelemente und die Halbleiterphysik sind wichtige, wenn auch beileibe nicht die einzigen Anwendungsgebiete ellipsometrischer Techniken: von den insgesamt 165 Beiträgen (36 Vorträgen und 129 Poster) der Ellipsometrie-Konferenz in Paris im Jänner 1993 [1] entfielen etwa 60, also mehr als ein Drittel, auf Anwendungen in den Bereichen der Mikroelektronik, Technologie und Halbleiterphysik (und stellten damit im übrigen das größte Kontingent an Beiträgen). Schon allein aufgrund dieser großen Zahl ist es nicht möglich, hier einen kompletten Überblick zu vermitteln; die wesentlichen Ergebnisse sollen aber in der Folge zusammengefaßt werden. (Die in den Literaturreferenzen mit "ICSE '93" gekennzeichneten Beiträge werden in den nächsten Monaten in einem Sonderband von *Thin Solid Films* veröffentlicht werden.)

### 2.1 Halbleitermaterialien

Mit ihrer Fähigkeit, mit Hilfe spektroskopische Methoden das Energiespektrum der Absorption von Halbleitermaterialien messen zu können, erlaubt die Ellipsometrie eine Vielfalt von Untersuchungen der dielektrischen Funktion und damit der Bänderstruktur [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], und ist daher aus der Materialforschung nicht mehr wegzudenken. Da zudem die Ellipsometrie prinzipiell in der Lage ist, selbst Zonen mit submonomolekularer Dicke auf Substraten mit bekannten Eigenschaften nachzuweisen, wie sie durch die Rekonstruktion von Halbleiteroberflächen oder Belegungen mit anderen Materialien entstehen, fehlen auch nicht Anwendungen aus dem Bereich der Oberflächenforschung. Mehrere Beiträge haben Untersuchungen der Rekonstruktion von Halbleiteroberflächen und der Adsorption von Wasserstoff und anderen Materialien mit Ellipsometrie oder verwandten Verfahren zum Thema [21], [22], [23], [24], [25], [26]. Eine vor allem für Einzelwafer-Prozesse wie *Rapid Thermal Annealing* interessante potentielle Anwendung der (*in situ*-) Ellipsometrie im industriellen Bereich könnte auf der Temperaturabhängigkeit der ellipsometrisch bestimmbaren optischen Parameter von Halbleitern [10], [11], [12], [27] beruhen, über die eine präzise lokale und dynamische Temperaturmessung realisiert werden könnte.

### 2.2 Ionenimplantation und Gitterstörungen

Die ellipsometrisch aufgenommenen Spektren von implantierten Si-Substraten zeigen charakteristische Strukturen, die von der Art der implantierten Ionen abhängen [27]. Die ellipsometrische Untersuchung ionenimplantierter Substrate erlaubt nicht nur eine qualitative Abschätzung der implantationsbedingten Gitterstörungen, sondern kann auch die Ermittlung von Implantations- (oder zumindest von Damage-) Profilen erlauben [28], [29], [30]. Diese Untersuchungen sind selbstverständlich nicht nur für Siliziumsubstrate möglich, sondern auch für Verbindungshalbleiter [31]. Voraussetzung dafür sind jedoch auch hier Vielfachmessungen; vielfach sind *Multiple Angle of Incidence*-Messungen bei einer einzigen (günstig gewählten) Wellenlänge ausreichend.

### 2.3 Halbleiterschichten auf Isolatoren

*Silicon on Insulator*- (SOI-) Strukturen sind besonders attraktive Kandidaten für ellipsometrische Messungen im allgemeinen und für die erwähnten fortgeschrittenen Techniken im besonderen [32], [33], [34], [35], [36]. (Gerade die ersten beiden hier zitierten Beiträge beweisen, daß durch mehrfache Messungen im Frequenz-, Zeit- oder Ortsbereich (spektroskopische, *in situ*- oder *Variable Angle of Incidence*-Messungen) vergleichbare Informationen gewonnen werden können.)

### 2.4 Dünne Schichten von Halbleitern und Isolatoren

Die Anwendung der Ellipsometrie auf die Untersuchung dünner dielektrischer oder absorbierender Schichten auf einem bekannten Substrat ist seit langem Stand der Technik. Mittels spektroskopischer Methoden konnten II-VI- und III-V-Epitaxieschichten auf III-V-Substraten analysiert werden [13], [14], [37]. Interessant sind Untersuchungen der Mikrorauigkeit von Si-Epitaxieschichten [38], wo die ellipsometrisch erhaltenen Ergebnisse die mit Atomic Force- und optischer Raster-Mikroskopie erlangten bestätigen. Wenngleich die intrinsische Anisotropie vorgespannter Schichten die Anwendung ellipsometrischer Methoden erschwert, wurde auch mehrfach über (erfolgreiche) derartige Messungen berichtet [39], [40], [41], [42].

Zur "klassischen" Diskussion über das Vorhandensein einer Zwischenschicht zwischen dem Silizium-Substrat und einer thermisch gewachsenen SiO<sub>2</sub>-Schicht konnte die spektroskopische Ellipsometrie einen neuen Beitrag leisten: eine 1,7 nm dicke Grenzschicht aus 72 % SiO<sub>2</sub> und 28 %  $\alpha$ -Si konnte durch eine raue Grenzfläche zwischen Substrat und Oxid erklärt werden [27], [43]. Ähnliche Untersuchungen wurden auch an den Systemen GaAs/SiO<sub>2</sub> [44] und InSb/SiO<sub>2</sub> [45] vorgenommen.

Mittels spektroskopischer Ellipsometrie konnten Aussagen über die Zusammensetzung von isolierenden Schichten gewonnen werden, die mit PECVD [46], [47], [48], [49], [50] oder anderen Abscheidungsmethoden [51], [52] deponiert worden waren; ähnlich konnten poröse [53], polykristalline [54] und amorphe Si-Schichten analysiert werden [55], [56], wobei die Untersuchung der Einleitungsphase des Wachstums dieser Schichten [57] oder der chemischen Wechselwirkung zwischen der amorphen Si:H-Schicht und benachbarten Materialien [58] besonders interessant erscheint.

### 2.5 Übergitter und Quantenstrukturen

Auch für die Untersuchung von kristallinen und amorphen [59] Übergittern und anderen aus dünnen homogenen Schichten unterschiedlicher Halbleitermaterialien bestehenden Strukturen erweisen sich ellipsometrische Verfahren, insbesondere spektroskopische und *in situ*-Anwendungen, als äußerst attraktiv [15], [16], [41], [60]. Die ellipsometrisch erhaltenen Daten können nicht nur die auf anderem Weg gemessenen Dicken der Einzelschichten verifizieren, sie erlauben darüber hinaus Aussagen über die Bandstruktur der untersuchten Materialien [15], [17]. Vielfach sind aber die Unterschiede zwischen den Brechungsindizes der involvierten Materialien sehr gering (speziell dann, wenn eine Optimierung der Arbeits-Wellenlänge nicht möglich ist); in diesem Fall erweisen sich Verfahren als vorteilhaft, bei denen die Ladungsträgerdichte und damit die Absorption in einzelnen Schichten durch Bestrahlung mit moduliertem Laserlicht periodisch verändert wird und die Messung phasensynchron erfolgt [18], [61].

### 2.6 *In situ*-Messungen und Prozeßkontrolle

Viele der hier bereits erwähnten Untersuchungen basieren auf *in situ*-Untersuchungen, nicht zuletzt, weil vielfach eine spezielle Umgebung (z.B. Ultra-Hochvakuum) Voraussetzung für

diese Messungen ist. In Anbetracht der primären Ausrichtung der Ellipsometrie-Konferenz auf den Bereich der physikalischen Grundlagenforschung waren Prozeßkontroll-Anwendungen der *in situ*-Ellipsometrie eher spärlich vertreten [62]. Waren vor wenigen Jahren noch spektroskopische und dynamische *in situ*-Messungen wegen des größeren Zeitbedarfs der spektroskopischen Verfahren wechselseitig ausschließend, so konnten dank der Entwicklung schneller Meßsysteme [63] nun auch spektroskopische dynamische *in situ*-Messungen realisiert werden [64]. Zur Illustration der Geschwindigkeit, mit der heute ellipsometrische Messungen vorgenommen werden können, mag ein Experiment dienen, bei dem die Verformungen der Oberfläche eines Siliziumkristalls während der Behandlung mit Laserpulsen mit einer Zeitauflösung von Nanosekunden beobachtet wurden [65]. Da allerdings derartige Instrumente für einen breiten Einsatz, etwa in einem industriellen Bereich, noch viel zu aufwendig sind, wurde als alternative Strategie vorgeschlagen, einen Prozeß zuerst mit spektroskopischer Ellipsometrie zu analysieren, eine günstige Wellenlänge zu ermitteln, bei der die prozeßspezifischen Parameter oder Effekte optimal beobachtet werden können, und diese Wellenlänge (oder eine Anzahl ausgewählter diskreter Wellenlängen [66]) für Prozeßkontroll-Anwendungen zu verwenden [27]. Nicht ganz unproblematisch für eine Prozeßkontrolle auf ellipsometrischer Basis sind die Abweichungen vom theoretisch erwarteten "idealen" Verlauf der optischen Eigenschaften der Probe infolge von Poren, Inselbildungen und dem Vorhandensein von Übergangszonen, speziell bei ultra-dünnen Einzelschichten (etwa einem Vielschicht-Sandwich aus 5 nm Gold- und 5 nm Kohlenstoff-Schichten [67]).

### 3. Gerätetechnik

Die wachsende technische Bedeutung ellipsometrischer Methoden hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten einen nicht unerheblichen Einfluß auf die Konzeption der Instrumente, selbst der für Forschungsanwendungen vorgesehenen Spitzengeräte, ausgeübt. Konnte noch vor wenigen Jahren eine klare Grenze zwischen primitiven Industrie- und hochkomplizierten (und nur von Spezialisten bedienbaren) Laborgeräten gezogen werden, so verschwimmen heute diese Grenzen: Praktisch jeder ernst zu nehmende kommerzielle Hersteller von Ellipsometern (weltweit kaum mehr als ein halbes Dutzend) bietet heute spektroskopische Ellipsometer an (vielfach mit modularem Aufbau, sodaß eine Adaptierung für *in situ*-Messungen möglich ist), bei denen — analog zu den einfacheren Geräten für den industriellen Einsatz — praktisch alle Parameter unter Computerkontrolle eingestellt werden können und Meßdurchführung und -auswertung durch mehr oder weniger bedienungsfreundliche Software weitgehend automatisiert ist (wobei allerdings noch immer ein hohes Maß an Expertise des Benützers vorausgesetzt wird). Tatsächlich ist trotz des relativ hohen apparativen Aufwandes ein Einsatz spektroskopischer Ellipsometer auch in der industriellen Qualitätskontrolle vorhersehbar [68]. (Das Preisniveau der spektroskopischen Ellipsometer liegt — fast unabhängig vom Hersteller — gegenwärtig bei 2 bis 2,5 Mio.S; die Geräte verschiedener Firmen unterscheiden sich jedoch wesentlich in den Details ihrer Konzeption, Hardware und Software, sodaß für jeden Anwendungsfall gesondert ein optimales Gerät gefunden werden muß.) Gemeinsam ist allen modernen kommerziellen spektroskopischen Ellipsometern die automatisierte Variation der Arbeitswellenlänge und die automatische Durchführung der Messungen; bei den meisten Geräten kann zudem der Einfallswinkel ebenfalls rechnergesteuert variiert werden, sodaß mit diesen Instrumenten auch *Variable Angle of Incidence*-Messungen automatisierbar und daher mit guter Reproduzierbarkeit durchführbar sind.

Die derzeit kommerziell verfügbaren spektroskopischen Ellipsometer überdecken in der Regel den sichtbaren Bereich und — je nach verwendetem Detektor — größere oder kleinere Bereiche des nahen Ultraviolett und Infrarot. Nichtsdestoweniger ist derzeit auch schon mindestens ein spezielles Infrarot-Ellipsometer für den mittleren Infrarot-Bereich

kommerziell verfügbar [69]. Während die (kommerziellen wie experimentellen) Infrarot-Geräte praktisch durchwegs auf *Fourier Transform Spectrometer*-Basis arbeiten [5], [70], werden von verschiedenen Herstellern für den sichtbaren Bereich Geräte angeboten, die unter Verwendung von *Optical Multichannel Analysers* (OMAs) die Aufnahme von Spektren (durch "Parallelisierung" von Messungen mit unterschiedlichen Wellenlängen) wesentlich beschleunigen können [71], allerdings auf Kosten der Meßgenauigkeit.

Noch arbeiten praktisch alle kommerziell erhältlichen Geräte mit rotierenden Komponenten (rotierenden Polarisatoren oder Analysatoren); die für die (nicht kommerziell verfügbaren) extrem schnellen Laborgeräte verwendeten elektrooptischen Systeme sind offensichtlich zu aufwendig und zu wenig stabil [72] für einen problemlosen Dauerbetrieb. Eine interessante Alternative zu polarisationsmodulierenden Komponenten wurde in Form eines polarisationsempfindlichen Detektors (*Four Detector Photopolarimeter* [73], [74], [75]) vorgestellt, bei dem vier (fast) gewöhnliche Silizium-Photodioden verwendet werden, die so angeordnet sind, daß der Meßstrahl nacheinander an den Oberflächen aller vier Dioden schräg reflektiert wird; da mit jeder dieser Reflexionen eine Änderung des Polarisationszustandes verbunden ist, hängt das Verhältnis der vier Detektor-Ausgangssignale zueinander vom ursprünglichen Polarisationszustand des Lichtes ab. Nach einer entsprechenden Kalibrierung können aus den Ausgangssignalen direkt die ellipsometrischen Winkel  $\Psi$  und  $\Delta$  erhalten werden.

Der derzeitige Stand der Technik auf dem Gebiet der Auswertung von ellipsometrischen Vielfach-Messungen ist eine Simulation der Werte von  $\Psi$  und  $\Delta$  für die bei der Messung verwendeten Wellenlängen und/oder Einfallswinkel unter Zugrundelegung plausibler Schätzwerte für die Probenparameter und eine nachfolgende Minimierung der Abweichung zwischen den gemessenen und den simulierten Werten durch eine gezielte Variation der unbekanntenen Probenparameter. Obwohl die dafür verfügbaren Algorithmen relativ schnell sind, ist doch die Auswertung einer spektroskopischen Messung vielfach recht zeitaufwendig. Als Alternative dazu wurde der Einsatz eines neuronalen Netzwerks vorgeschlagen [76], das zuerst mit günstig gewählten Sätzen von Probenparametern "trainiert" wird und dann in wesentlich kürzerer Zeit die eigentlichen Messungen auszuwerten erlaubt, was vor allem für Serienmessungen interessant sein sollte, bei denen die Probenparameter innerhalb eines relativ beschränkten Wertebereichs liegen sollten.

#### 4. Zusammenfassung

Die potentiellen Anwendungen der Ellipsometrie reichen weit über die oben beschriebenen Bereiche hinaus: Untersuchungen an Polymerschichten und an Hochtemperatur-Supraleitern konnten hier aus Platzgründen ebensowenig erörtert werden wie Messungen an Elektroden und sogar an Flüssigkeiten und Metallschmelzen. Mehr denn je demonstrierten die Präsentationen auf der Pariser Ellipsometrie-Konferenz, daß heute die Ellipsometrie, insbesondere in ihrer spektroskopischen Variante, in keiner ernstzunehmenden Mikroelektronik-Technologie (und allgemein in keinem materialorientierten Forschungsbereich) fehlen sollte.

#### Literaturverzeichnis

- [1] First International Conference on Spectroscopic Ellipsometry (ICSE '93), Paris, 11. – 14. Jänner 1993.
- [2] R.M.A. Azzam, N.M. Bashara, *Ellipsometry and polarised light*. North Holland, Amsterdam, 1977.

- [3] K.H. Zaininger, A.G. Revesz, Ellipsometry — a valuable tool in surface research. *RCA Rev.*, **25** (1964), 85.
- [4] A. Fresnel, *Ann. Chim. et Phys.*, **28** (1825), 147.
- [5] A. Röseler, Infrared ellipsometry — instrumentation and results. ICSE '93, Paris, 1993.
- [6] G. Dittmar, V. Offermann, M. Pohlen, P. Grosse, Extension of spectroscopic ellipsometry to the far infrared. ICSE '93, Paris, 1993.
- [7] M. Yamamoto, K. Mayama, M. Furudate, Development of the first soft X-ray laboratory ellipsometer. ICSE '93, Paris, 1993.
- [8] S. Hertl, G. Schaffar, H. Störi, Contactless determination of the properties of water films on roads. *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **21** (1988), 955–958.
- [9] G. Magerl, W. Pritzl, P. Fröhling, Remote sensing of road condition, *Proc. 1991 Intern. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS '91)*, Vol. IV (1991), 2137–2140.
- [10] G. Vuye, S. Fisson, V. Nguyen Van, Y. Wang, J. Rivory, F. Abelès, Temperature dependence of the dielectric function of silicon using *in situ* spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [11] S. Zollner, M. Garriga, J. Kircher, J. Humlicek, M. Cardona, G. Neuhold, Temperature dependence of the dielectric function and the interband critical point parameters of GaP. ICSE '93, Paris, 1993.
- [12] M. Garriga, M. Kelly, K. Ploog, Temperature dependence of the dielectric function and interband critical points of AlAs obtained on a MBE grown layer. ICSE '93, Paris, 1993.
- [13] U. Rossow, A. Krost, A. Hase, U. Frotscher, T. Werninghaus, W. Richter, Ellipsometric characterisation of InP based ternary and quaternary materials. ICSE '93, Paris, 1993.
- [14] H.W. Dinges, H. Burkhard, R. Lösch, H. Nickel, W. Schlapp, Spectroscopic ellipsometry: A useful tool to determine the refractive indices and interfaces of  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  and  $\text{In}_{0.53}\text{Al}_x\text{Ga}_{0.47-x}\text{As}$  on InP in the wavelength range from 280 to 1900 nm. ICSE '93, Paris, 1993.
- [15] F. Lukes, K. Ploog, Dielectric function of GaAs/AlAs superlattices grown on GaAs substrates with different orientation. ICSE '93, Paris, 1993.
- [16] K.B. Ozanyan, O. Hunderi, Spectroscopic transmission ellipsometry assessment of intersubband transitions in n-GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As quantum wells. ICSE '93, Paris, 1993.
- [17] J.W. Garland, C.C. Kim, P.M. Raccah, Determination of accurate critical-point energies, line widths and line shapes from spectroscopic ellipsometry data. ICSE '93, Paris, 1993.
- [18] Y.M. Xiong, P.G. Snyder, J.A. Woollam, Photo-ellipsometry: A new modulation spectroscopy method applied to n-GaAs. ICSE '93, Paris, 1993.
- [19] J.W. Garland, C.C. Kim, New model for the optical dielectric function of semiconductors: Application to spectroscopic ellipsometry data for GaAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . ICSE '93, Paris, 1993.
- [20] H.V. Nguyen, R.W. Collins, Analysis of critical points in semiconductor optical functions from *in situ* and real time spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [21] A.B. Müller, K. Rose, U. Rossow, U. Resch, W. Richter, Hydrogen terminated Si (100) surface investigated by reflectance anisotropy spectroscopy. ICSE '93, Paris, 1993.

- [22] C.M.J. Wijers, Surface ellipsometry of the Si (100) 2 x 1 surface using a full microscopic model. ICSE '93, Paris, 1993.
- [23] M. Gauch, P. Müller, G. Zerwetz, G. Quentel, Spectroscopic ellipsometry of Si (110) surfaces near the pseudo Brewster angle at different temperatures: Determination of the (7x7)  $\leftrightarrow$  (1x1) surface transition. ICSE '93, Paris, 1993.
- [24] C.F.J. Flipse, M.H.W. Verbruggen, J.D. O'Mahony, J.F. McGilp, Optical study of the initial ordered growth of Au on Si (111). ICSE '93, Paris, 1993.
- [25] M. Abraham, G. LeLay, Spectroellipsometric study of the growth and phase transitions of a two-dimensional metal: Pb on Ge (111). ICSE '93, Paris, 1993.
- [26] H. Wormeester, D.J. Wentink, P.L. de Boeij, A. van Silfhout, Optical anisotropy of Ge(001)2x1. ICSE '93, Paris, 1993.
- [27] E.A. Irene, Applications of spectroscopic ellipsometry to microelectronics. ICSE '93, Paris, 1993.
- [28] T. Lohner, M. Fried, J. Gyulai, K. Vedam, N.V. Nguyen, L.J. Hanekamp, A. van Silfhout, Ion implantation caused special damage profiles determined by spectroscopic ellipsometry in crystalline and relaxed (annealed) amorphous silicon. ICSE '93, Paris, 1993.
- [29] G. Popescu, I. Boca, An ellipsometric investigation of ion-implanted silicon. ICSE '93, Paris, 1993.
- [30] M. Murtagh, S. Lynch, G.M. Crean, P.V. Kelly, C. Jeynes, Non destructive depth profiling of silicon and germanium ion implantation induced damage in silicon (100) substrates. ICSE '93, Paris, 1993.
- [31] M. Kulik, J. Zuk, Ellipsometric investigation of damage in ion implanted GaAs. ICSE '93, Paris, 1993.
- [32] R. Greef, D.E. Gray, S. Lynch, G.M. Crean, Characterisation of SOI multilayers using *ex-situ* SE and *in-situ* monochromatic ellipsometry during plasma etching. ICSE '93, Paris, 1993.
- [33] S. Lynch, T. Saleh, G.M. Crean, J.A. Woollam, Variable angle spectroscopic ellipsometry analysis of silicon-on-insulator substrates.
- [34] L. Asinovsky, Optimisation of the silicon-on-insulator characterisation process using spectroscopic ellipsometry measurements. ICSE '93, Paris, 1993.
- [35] O. Buiu, G. Dobrescu, Computer modelling of SE spectra for a buried dielectric layer structure. ICSE '93, Paris, 1993.
- [36] T. Saitoh, M.E. El-Ghazzawi, N. Hori, T. Oka, N. Natsuaki, Spectroellipsometry characterisation of directly bonded silicon-on-insulator structures. ICSE '93, Paris, 1993.
- [37] U. Rossow, T. Werninghaus, D.R.T. Zahn, W. Richter, K. Horn, Thin epitaxial films of wide-gap II-VI compounds studied by spectroscopic ellipsometry. ICSE'93, Paris, 1993.
- [38] V. Nayar, C. Pickering, W.Y. Leong, A.J. Pidduck, R.T. Carline, D.J. Robbins, Surface roughness and optical properties of high quality Si epitaxial layers. ICSE '93, Paris, 1993.



- [39] C. Pickering, N.S. Garawal, R.T. Carline, J.L. Stehle, J.P. Piel, R. Blunt, P. Kirby, Non-destructive characterisation of III-V alloy multilayer structures using spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [40] M. Libezny, J. Poortmans, M. Caymax, A. Van Ammel, J. Vanhellefont, Spectroscopic ellipsometry of strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  layers. ICSE '93, Paris, 1993.
- [41] C. Pickering, R.T. Carline, D.J. Robbins, W.Y. Leong, D.E. Gray, R. Greef, *In-situ* dual wavelength and *ex-situ* spectroscopic ellipsometry studies of strained SiGe epitaxial layers and multi-quantum well structures. ICSE '93, Paris, 1993.
- [42] J. Humlicek, A. Röseler, Infrared ellipsometry of highly anisotropic materials:  $\alpha\text{-SiO}_2$  and  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . ICSE '93, Paris, 1993.
- [43] B. Agius, M.C. Hugon, E.A. Irene, N. Jiang, F. Varniere, M. Froment, Spectroscopic ellipsometry combined with high resolution transmission electron microscopy for characterisation of the  $\text{SiO}_2/(100)\text{Si}$  interface. ICSE '93, Paris, 1993.
- [44] Y. Watanabe, K. Suzuki, T. Saitoh, Characterisation of  $\text{SiO}_2/\text{GaAs}$  interface structures using spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [45] S. Russev, E. Valcheva, K. Germanova, Investigation of the system  $\text{InSb-SiO}_2$  by spectroscopic multiangle ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [46] B. Gruska, K. Wandel, The influence of pressure and temperature on the structure of remote-PECVD- $\text{SiO}_2$  investigated by spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [47] J. Campmany, A. Canillas, J.L. Andújar, J. Costa, E. Bertran, Study of thin films of transparent electronic materials by phase modulated spectroellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [48] A. Sassella, A. Borghesi, S. Rojas, Ellipsometric characterisation of hydrogen-rich oxynitride films. ICSE '93, Paris, 1993.
- [49] R. Rochotzki, M. Arzt, F. Blaschta, E. Kreyßig, H.U. Poll, Optical properties of plasma polymer films. ICSE '93, Paris, 1993.
- [50] P. Siroky, P.G. Snyder, L. Soukup, V. Dusek, J. Sobota, Ellipsometry of bulk glassy carbon and diamond-like carbon thin films. ICSE '93, Paris, 1993.
- [51] M. Weidner, A. Röseler, IR-ellipsometrical investigations at  $\text{N}_2\text{O}$ -nitrided silicon oxide thin films on silicon. ICSE '93, Paris, 1993.
- [52] S. Pittal, P.G. Snyder, N.J. Ianno, *In-situ* and *ex-situ* ellipsometry study of non uniform lateral growth of ZnO thin films. ICSE '93, Paris, 1993.
- [53] P. Basmaji, V.S. Bagnato, V. Grivickas, G.I. Sutdutovich, R. Vitlina, Determination of porous silicon film parameters by the polarised light reflectance measurements. ICSE '93, Paris, 1993.
- [54] N. Layadi, P. Roca i Cabarrocas, V. Yakovlev, B. Drévillon, Real time ellipsometry study of polycrystalline silicon thin films combining glow discharge decomposition and UV light irradiation. ICSE '93, Paris, 1993.
- [55] R. Reitano, M.G. Grimaldi, P. Baeri, S. Borghesi, Spectroscopic ellipsometry of the relaxation state of amorphous silicon. ICSE '93, Paris, 1993.
- [56] R. Ossikovski, G. Drévillon, *In situ* investigation by infrared ellipsometry of the growth and interfaces of amorphous silicon and related materials. ICSE '93, Paris, 1993.

- [57] U.I. Schmidt, B. Schroeder, H. Oechsner, *In situ* ellipsometric study of the influence of powder formation on the initial growth of glow discharge a-Si:H. ICSE '93, Paris, 1993.
- [58] Y. Toyoshima, *In situ* diagnosis of a-Si:H/metal interface reactions by use of IR spectroscopic reflectometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [59] K. Järrendahl, J.E. Sundgren, H. Arwin, Optical studies of periodic and aperiodic amorphous Ge/Si superlattices with variable angle of incidence ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [60] J.C. Jans, R.W.J. Hollering, D.J. Gravesteijn, C.W. Fredriksz, Ge- and Si-like features in the dielectric function of Si-Ge superlattices. ICSE '93, Paris, 1993.
- [61] J.-Th. Zettler, H. Mikkelsen, K. Leo, H. Kurz, W. Richter, Modulated ellipsometry for characterisation of multiple quantum wells and superlattices. ICSE '93, Paris, 1993.
- [62] S. Nafis, N.J. Ianno, B. Johs, P.G. Snyder, J.A. Woollam, ECR etching of semiconductor structures studied by *in situ* spectroscopic ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [63] K. Hemmes, M.M. Wind, Ultra fast ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [64] R.W. Collins, I. An, H.V. Nguyen, Y. Lu, Real time spectroscopic ellipsometry for characterisation of nucleation, growth and optical functions of thin films. ICSE '93, Paris, 1993.
- [65] D.J. Brink, Detection and characterisation of transient surface periodic structures formed during pulsed laser annealing of semiconductor surfaces. ICSE '93, Paris, 1993.
- [66] B. Johs, D. Doerr, S. Pittal, Real-time monitoring and control of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  composition during MOVPE growth using multi-wavelength ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [67] M. Yamamoto, *In-situ* ellipsometry of soft X-ray multilayer fabrication. ICSE '93, Paris, 1993.
- [68] D. Zahorski, J.L. Mariani, L. Escadafals, Spectroscopic ellipsometry: A new tool for 'on line' quality control. ICSE '93, Paris, 1993.
- [69] G. Zcalcer, O. Thomas, J.P. Piel, J.L. Stehle, Infra-red spectroscopic ellipsometry: Instrumentation and applications in semiconductors. ICSE '93, Paris, 1993
- [70] E. Wold, J. Bremer, O. Hunderi, Infrared ellipsometry; methods and measurements. ICSE '93, Paris, 1993.
- [71] J.P. Piel, J.L. Stehle, O. Thomas, Real-time spectroscopic ellipsometry, the fastest RTSE: Applications and limitations for *in-situ* and quality control. ICSE'93, Paris, 1993.
- [72] T. Fukazawa, M. Sano, Y. Yoshida, N. Sakayanagi, A novel method to stabilise a PEM used in a polarisation modulated spectroscopic ellipsometer. ICSE '93, Paris, 1993.
- [73] R.M.A. Azzam, Multichannel polarisation-state detectors for time-resolved ellipsometry. ICSE '93, Paris, 1993.
- [74] R.M.A. Azzam, A.G. Lopez, Spectral calibration of the Four-Detector Photopolarimeter (FDP) and its use for the determination of the light-path and detector-surface parameters. ICSE '93, Paris, 1993.
- [75] E. Masetti, M.P. da Silva, Construction and test of a time resolved spectro-ellipsometer based on the four-detector photopolarimeter. ICSE '93, Paris, 1993.

- 
- [76] M. Fried, P. Masa, Back propagation (neural) networks for fast evaluation of spectroscopic ellipsometric measurements. ICSE '93, Paris, 1993.