

Armin Bacher BSc

Delamination von dielektrischen Schichten unter Einwirkung von Feuchtestress

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Chemie

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Klaus Reichmann

Institut für Chemische Technologie von Materialien
Institut für Anorganische Chemie

Dipl.Ing. Helmut Schönherr
Infineon AG

Graz, 12 und 2014

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

14.01.2015
Datum

Armin Koch
Unterschrift

Danksagung

Vielen Dank für die Unterstützung und die Motivation gehen an

Irene Bacher
Rudolf Bacher

Maria Schenk

Markus Kahn
Helmut Schönherr
Elfriede Wellenzohn

Klaus Reichmann
Frank Uhlig

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung	6
2. Aufgabenstellung	8
2.1 Übersicht zur Arbeitsumgebung	10
2.2 Übersicht zur Probenherstellung	10
2.3 Übersicht zur Probenbelastung	10
2.4 Übersicht zur Probenanalyse	11
3. Grundlagen	12
3.1 Chemical Vapor Deposition	12
3.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition	12
3.3 Atmospheric Pressure CVD	14
3.4 Low Pressure CVD	15
3.5 Stress	17
3.6 Haftung	21
4. Experimentelle Durchführung	23
4.1 Analysen der Proben	23
4.10 Die Cenura-HDP	34
4.11 Die P5000/48	39
4.12 Die P5000/46	42
4.13 Die Producer 1	43
4.14 Zusammenfassung der Anlagentypen	44
4.15. Bedienung der Abscheideanlagen	45
4.16 Beschreibung der Rezepte	45
4.17 Beschreibung der Sequenzen	47
4.2 Fourier Transformation-Infrarotspektroskopie	23
4.3 Dickenmessung und Brechungsindex mittels Optiprobe 2690	24
4.4 Stressmessung durch das MX-204	27
4.5 TOF-Elastic Recoil Detection Analysis	30
4.6 XPS Analysen	32
4.7 Rasterelektronenmikroskopie, Energiedispersive Röntgenspektroskopie und lichtmikroskopische Aufnahmen	32
4.8 Kontaktwinkel	33
4.9. Beschreibung der Beschichtungsanlagen	34
5. Experimenteller Teil der Masterarbeit	48
5.1 Ergebnisse der Arbeit	48
5.10 Verhalten von α -SiO ₂ unterschiedlicher Precursorstypen gegenüber Feuchtestress	65
5.11 FT - IR Untersuchung der USG - Spezies nach dem N ₂ Tempern	70
5.12 Verhalten des Volumens von α -SiO ₂ durch Feuchteinfluss	72
5.13 Ätzttest zur Analyse von Veränderungen im Silan - USG	74
5.14 Vergleich von Silan-TEOS- und HDP-USG mittels IR-Spektrum	76
5.15 Verdünnung der Silan – USG Prozessgase mit Argon und Helium	79
5.16 Untersuchung von Silan-, TEOS- und HDP-USG mittels TOF-ERDA	83
5.17 Reaktionen in der USG-Schicht durch Feuchteinfluss und Temperung	84
5.2 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und Silan - USG	50
5.3 Variationen an den Rezepten	50
5.4 Blisteranalyse mittels REM und Lichtmikroskop von SiON Silan - USG	56
5.5 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und TEOS - USG	58
5.6 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und high density plasma - USG	59
5.7 Stressverhalten von SiON und Silan -, TEOS - und HDP - USG	60
5.8 TOF - ERDA Analysen des SiON Silan - USG Schichtsystems	62
5.9 XPS Analyse des Lachgasplasmas auf SiON und Heliumplasmas auf USG	64
6. Zusammenfassung und Ausblick	86
7. Anhang	87
7.1 Abbildungsverzeichnis	87
7.2 Literaturverzeichnis	91

Liste der Akronyme

AC – Autoklav

APCVD – Atmospheric Pressure CVD

LPCVD – Low Pressure CVD

CVD – Chemical Vapor Deposition

USG – undotiertes Silanglas

SiON – Siliziumoxynitrid

HDP – High Density Plasma

PECVD – Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

TEOS – Tetraethyl-orthosilan

XPS – Photoelektronenspektroskopie

TOF – Time of Flight

ERDA – Elastic Recoil Detection Analysis

REM – Rasterelektronenspektroskopie

EDX – Energiedispersive Röntgenspektroskopie

FT-IR – Fouriertransformations – Infrarotspektroskopie

σ – Stress

ϵ - Dehnung

Y – Young Modul

1 Kurzfassung

Bei der hier vorgestellten Arbeit wurde die Haftung von dielektrischen Zweischichtsystemen, wie sie in der Halbleiterindustrie zur Erzeugung von integrierten Schaltkreisen Anwendung findet, unter Feuchtebelastung untersucht. Bei den dielektrischen Schichten handelt es sich um amorphes undotiertes Siliziumdioxid (USG) und amorphes Siliziumoxinitrid (SiON). Alle Schichten wurden mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) auf 200mm Siliziumwafern abgeschieden. Bei den Zweischichtsystemen handelte es sich um den SiON:USG Schichtaufbau.

Diese Schichtzusammensetzung ist Teil der letzten Schichten, die auf den Wafern abgeschieden werden um die Chiparchitektur zu schützen.

Durch die Änderung der Abscheideprozesse konnte gezeigt werden, dass sich die Haftung zwischen SiON und USG durch das Einführen von Plasma- und Gasbehandlungen nach der Abscheidung von SiON verbessern oder verschlechtern ließen. Im Laufe der Arbeit konnte gezeigt werden, dass das Interface zwischen den beiden Schichten verantwortlich für die Haftung war. Hier konnten XPS Analysen und Kontaktwinkelmessungen zeigen, dass nach einem Lachgasplasma auf SiON der Kontaktwinkel von 37Grad auf 0 – 2 Grad sank und die Sauerstoffkonzentration auf Kosten der Stickstoffkonzentration stark anstieg. Eine Änderung der stöchiometrischen Zusammensetzung oder eine Reinigung der SiON – Oberfläche waren in diesem Fall hauptverantwortlich für die Haftung zwischen den beiden Schichten. Weitere Plasmabehandlungen der SiON Oberfläche lieferten auf jeden Fall eine bessere Haftung unabhängig von der Qualität der SiON - Abscheidung.

Mittels Autoklaven wurden die passenden Bedingungen zum Belasten der Schichten geschaffen. Schlechte Haftung fand Ausdruck durch das Entstehen von punktförmigen Abhebungen (Blistern) zwischen den Schichten, die zwischen 20 und 30µm im Durchmesser waren.

Weiter konnte gezeigt werden, dass durch das Beimischen von Helium und Argon zu den Prozessgasen von USG die Haftung nach der Belastung im Autoklaven (AC - Test) deutlich verbessert werden konnte, ohne die für die Schicht wesentlichen Qualitätsmerkmale wie Uniformität oder Brechungsindex zu verschlechtern.

Durch den Vergleich von drei unterschiedlichen USG – Arten konnte außerdem ein qualitativer Vergleich zwischen Silan -, TEOS - und HDP - USG gezogen werden. Alle USG Arten gehen von unterschiedliche Prozesschemikalien aus und wiesen auch nach dem Autoklaventest unterschiedliche Merkmale auf. So wurde Silan – USG als anfälligste Schicht gegenüber Feuchtigkeit identifiziert, da hier die größte Anzahl von Blistern festzustellen war.

Abstract

In this work the adhesion between dielectric layers used in the semiconductor industry had been analyzed by stressing the layers under moisture conditions. The dielectric layers are amorphous undoped silicon oxide (USG) and amorphous silicon nitride (SiON). All layers have been deposited by plasma enhanced chemical vapor deposition on 200mm silicon wafer. The bilayer-sequence was SiON:USG.

This kind of bilayer-system is used to protect the integrated circuit at the end of the processing.

By changing the deposition processes of the layers it was able to change the adhesion between SiON and USG by using plasma- and gas treatment making the adhesion better or worse. In the course of the work it was shown that the interface between the layers was responsible for the delamination of the upper layer. Analysis by XPS and measurements of the contact angle have shown the effect of the laughing gas on the SiON surface. The contact angle changed from 37 degree to 0 – 2 degree and the oxygen concentration was rising at the expense of nitrogen. The cleaning of the SiON surface or the change of the SiON stoichiometry had been responsible for the adhesion of the layers. Different gas treatments of the SiON surface show improvements in the adhesion between the layers.

The layers had been stressed by an autoclave which delivered the suitable conditions to test the quality of the layers. Bad adhesion was expressed by small blisters with a diameter between 20 and 30 μ m.

Furthermore it could be shown that the mixture of the process gases of USG with argon and helium improved the adhesion of the layers using the autoclave as well. The quality of the layers did not harm which was tested by the refracting index and the uniformity.

Three different types of USG were compared to get a qualitative comparison between them. This USG types were silane-, TEOS- and HDP – USG. All three USG types started from different kind of process gases and show different characteristics after the autoclave test. Silane USG was the most susceptible layer to moisture. This attribute alone is no guarantee for good adhesion between the layers. Concerning the best stability against moisture, the HDP – USG on SiON was the most solid.

2 Aufgabenstellung

Ziel der Diplomarbeit war die Feststellung des oder der Gründe für das blasenartige Delaminieren zweier dielektrischer Schichten, wie sie in der Halbleiterindustrie verwendet werden. Schon im Vorhinein wurde das Schichtsystem Siliziumwafer:SiON:USG (Siliziumoxinitrid und undotiertes Silanglas) bewusst auf alternative Belastungsfaktoren wie Hitze getestet. Schlussendlich verdichteten sich die Hinweise darauf, dass diese Art der Delamination nur bei Feuchte auftrat, was mittels Autoklaven im Zeitraffer getestet werden konnte. Delaminationen, die ansonsten erst nach Wochen oder Monaten auftraten, konnten so schon nach wenigen Tagen hervorgerufen werden (Abbildung 2.1).

Im Allgemeinen sind die Schichtsysteme in der Halbleiterindustrie sehr dünn. Sie spielen sich im unteren zweistelligen Nanometerbereich ab und gehen hinauf bis in den unteren zweistelligen μm – Bereich.

Für die Diplomarbeit waren die Passivierungsschichten das Ziel der Analysen, welche die Architektur des Chips nach außen hin gegenüber Alkali und Erdalkalitionen, sowie gegen Lösungsmittel abschirmen sollen. Delaminieren diese Schichten, ist der Chip nicht mehr gegen äußere Einflüsse geschützt und er kann Schaden nehmen. Die untersuchten Schichtsysteme hatten eine Dicke von mehreren hundert Nanometern und wurden mittels PECVD (plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung) hergestellt.

Um den Grund der Delaminierungen festzustellen, wurde das Problem von zwei Seiten her untersucht. Auf der einen Seite wurde der Abscheidungsprozess in der Abscheidungskammer in unterschiedliche Richtungen verändert, um damit eine Verschlechterung oder eine Verbesserung des Verhaltens bei Feuchtebelastung zu erhalten.

Auf der anderen Seite waren sowohl die Schichten selbst interessant, da ihr Verhalten im Autoklaven noch nicht genau untersucht worden waren, wie auch die Grenzschicht zwischen SiON und USG. Die Chemie und die Topografie am Interface bestimmen unter anderem die Qualität der Haftung, weshalb diese beiden wesentlichen Faktoren ebenfalls untersucht worden waren. Da die Chemie der Grenzschicht oft nur wenige Atomlagen ausmacht, kommen nur sehr sensible und nicht invasive Analysemethoden zur Anwendung. In dieser Arbeit wurde der Kontaktwinkel von Wasser auf den unterschiedlichen Oberflächen untersucht und von den interessanten Grenzschichten eine XPS (Photoelektronenspektroskopie) Analyse in Auftrag gegeben.

Ferner werden unterschiedliche Arten der USG-Beschichtungen in der Halbleiterindustrie, je nach Anwendungsgebiet, verwendet. In dieser Arbeit wurden das Silan-USG, das TEOS-USG (Tetraethylorthosilan) und das HDP-USG (High Density Plasma) untersucht.

Analysiert wurde die Chemie der Schichten in erster Linie mittels FT – IR und TOF – ERDA, sowie mittels XPS. Vor allem mittels der Daten des FT – IR, zusammen mit den TOF – ERDA Analysen konnte ein ganzheitliches Bild der Schichtzusammensetzungen vor und nach dem AC-Test sowie nach dem Tempern gezeichnet werden.

In den Abbildungen 2.1 und 2.2 sind zwei lichtmikroskopische Aufnahmen zu sehen, die zeigen sollen, wie die Oberfläche nach dem Autoklaventest aussehen, wenn Blisterentstehung vorliegt und wenn die Schichten nicht delaminieren.

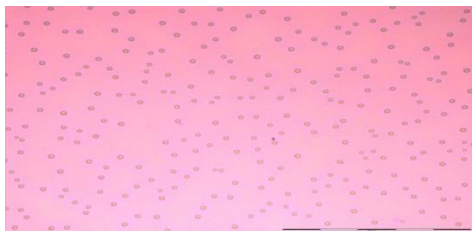


Abbildung 2. 1: Blisterbild nach dem Aufenthalt des Wafers für 96h im Autoklaven.

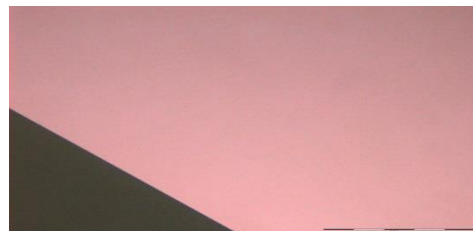


Abbildung 2. 2: Blisterfreier Wafer nach 96h im Autoklaven

2.1 Übersicht zur Arbeitsumgebung

Die Diplomarbeit wurde bei der Firma Infineon am Standort Villach durchgeführt. Die Proben wurden im Reinraum der Klasse 1/ISO 3 hergestellt. Klasse 1 Reinräume zeichnen sich dadurch aus, dass nicht mehr als 35 Partikel, die größer oder gleich $0,5\mu\text{m}$ sind, pro Kubikmeter, in der Luft sein dürfen. Um diesen Standard technisch und logistisch einzuhalten ist eine große Anzahl an Vorkehrungen nötig. Die wichtigsten sind dabei das Tragen von spezieller fusselfreier Reinraumkleidung, die sich zusätzlich schwer elektrisch aufladen kann. Im Reinraum selbst herrscht ein ständiger Überdruck um keine kontaminierte Luft von außen eindringen lassen zu können. Die Luftströmung im Reinraum ist von oben nach unten gerichtet um Aufwirbelungen zu vermeiden und in der Luft befindliche Teilchen nach unten zu drücken. Die ganze Decke im Reinraum ist als ein durchgehender Filter konzipiert, der die Luft, welche durch den Vorfilter gefiltert wurde, noch einmal fein filtert. Der Boden des Reinraums ist perforiert damit die Luft ungehindert von oben nach unten in den darunterliegenden Stock strömen kann, der als Grauraum bezeichnet wird.

Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit sind neben dem Luftdruck ebenfalls standardisiert. Die Temperatur wird konstant bei 22C° und die Luftfeuchte bei ca. 40% gehalten.

Durch diese über das ganze Jahr durchgehenden Standardbedingungen können vor allem die sich im Reinraum befindlichen Messgeräte und Abscheideanlagen eine hohe Wiederholgenauigkeit bei den Messungen und den Prozessen garantieren. Viele der Messungen welche in dieser Diplomarbeit vorgestellt werden, wurden auf diesen sogenannten Inlinegeräten getätigt.

Dazu zählen Messungen von Brechungsindex und der Dicke von Schichten, sowie Stressmessungen und FT-IR-Messungen wie auch Kontaktwinkelmessungen.

2.2 Übersicht zur Probenherstellung

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden drei unterschiedliche PECVD Gerätetypen verwendet. Mittels plasmaunterstützter Gasphasenabscheidung ist es möglich auf Oberflächen sehr dünne Filme sehr schnell abzuschneiden. Alle in der Diplomarbeit untersuchten Schichten wurden auf 200mm Wafern hergestellt. Die Wafer befanden sich zum Schutz vor äußeren Einflüssen zu je 25 Stück in Kassetten geschichtet in dafür vorgesehenen Boxen.

Die Abscheideanlagen werden mit den Kassetten bestückt und arbeiten dann vollautomatisch mit Hilfe von Robotern weiter. Herzstück einer jeden Abscheideanlage sind die Abscheidekammern, in der die Wafer liegend beschichtet werden. Die Art der Schichten ist vom zur Verfügung stehenden Prozessgasangebot abhängig wie auch von den Kammerspezifikationen.

Über ein Interface sind die Steuerung der Geräte und die Programmierung von Abscheidesequenzen möglich. Im Rahmen der Diplomarbeit wurden vor allem die Schichtdicken und die Schichtzusammensetzungen variiert, was über die Erstellung sogenannter Rezepte passiert, die in Abscheidesequenzen zusammengefasst werden. Mittels PECVD (plasma enhanced chemical vapor deposition) wurden die Schichttypen Siliziumoxynitrid und Siliziumoxid mit Dicken zwischen 100 und 1300 Nanometern abgeschieden.

Die so hergestellten Proben wurden im Reinraum auf Dicke, Brechungsindex und Stress vermessen. Darüber hinaus wurden Infrarotspektren aufgenommen.

2.3 Übersicht zur Probenbelastung

Wie schon erwähnt sind die Schichten Siliziumoxynitrid und Siliziumoxid auf Feuchtestress hin untersucht worden. Dafür standen bei Infineon Belastungsgeräte, sogenannte Autoklaven außerhalb des Reinraums zur Verfügung. Die Autoklaven konnten mit bis zu zehn Wafern in einer eigenen Waferhalterung aus Quarz, stehend befüllt werden.

Das im Autoklaven verwendete Wasser war deionisiert um die Ergebnisse vergleichbar zu halten. Alle Geräte waren computergesteuert, wobei hier die Zeit und die Temperatur eingestellt werden konnte.

2.4 Übersicht zur Probenanalyse

Nach dem Autoklaventest wurden die Scheiben sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch teilweise mittels REM untersucht. Beide Geräte waren außerhalb des Reinraums zugänglich. Von manchen Proben wurden auch EDX-Analysen auf demselben REM hergestellt, mit welchem Bilder aufgenommen wurden. Externe Analysen wurden teilweise mittels TOF-ERDA und XPS gemacht.

Inline wurden die Proben nach dem Autoklaventest (AC-Test) am FT-IR, mittels Optiprobe (Dicke und Brechungsindex) und dem Stressmessgerät (MX-204)vermessen.

3 Grundlagen

3.1 Chemical Vapor Deposition

Anwendungen in der Halbleiterindustrie für CVD

Zur Herstellung integrierter Schaltkreise hat sich die CVD (chemical vapor deposition) durchgesetzt, die es ermöglicht, sehr dünne Schichten auf Siliziumwafern sehr schnell abzuscheiden. Abhängig von der Anwendung werden unterschiedliche CVD – Verfahren angewendet. Je nach Anforderungen der Schicht werden die Abscheideprozesse auf unterschiedlichen Anlagen mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt. Hier werden drei in der Halbleiterindustrie wichtige Abscheidungsverfahren kurz vorgestellt. Hierzu zählen die Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD), die Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition (APCVD) und die Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD).

Innerhalb des Bauteiles werden dielektrische Zwischenschichten verwendet, um auf verschiedenen Ebenen Strukturen metallisieren zu können, sie finden aber auch als kapazitiver Widerstand, Diffusionsmasken, fotolithographische Masken oder als optische Antirefleksbeschichtungen Anwendung.

3.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

PECVD in der Halbleiterindustrie

Dünne Filme können mittels kalten Plasmas bei viel tieferen Temperaturen hergestellt werden als dies bei thermochemischen Reaktionen möglich wäre.

Die Reaktionsmechanismen in kalten Plasmen sind wegen ihrer Komplexität bisher noch nicht ganz verstanden. Der Grund ist, dass das kalte Plasma nicht im thermischen Gleichgewicht ist, die verwendeten Gase oft polyatomare Moleküle sind und Daten über den Reaktionsquerschnitt nicht vorhanden sind. Außerdem tragen Gasphasenreaktionen und Reaktionen auf der Substratoberfläche etwa gleich viel zum Filmbildungsprozess bei.

Durch das Plasma sind die Reaktionsgase ionisiert, dissoziiert und im angeregten Zustand ⁽¹⁾. Man findet im Plasma Atome, Ionen, Molekülonen sowie Radikale. Sie erreichen die Substratoberfläche durch Diffusion. Die Lage des Substrates, der Gasfluss und die Elektrodenkonfiguration führen zu einer räumlichen Verteilung der Partikeldichte. Die auf die Substratoberfläche treffenden Reaktanten migrieren so lange auf der Oberfläche, bis sie eine Adsorptionsmöglichkeit finden. Dann reagieren sie miteinander und bilden einen Film. Beschleunigte Ionen, welche an der Reaktionskammer entstehen, beeinflussen die Oberflächenreaktionen ebenfalls.

Herkömmliche CVD-Prozesse erzeugen die Filme alleine durch thermochemische Reaktionen auf der Substratoberfläche, durch Gase im Grundzustand unter Bedingungen des thermodynamischen Gleichgewichtes. Hohe Temperaturen sind nötig um die Aktivierungsenergie zu erreichen.

Um kaltes Plasma durch Entladung zu generieren sind Drücke von 0,1 – 10 Torr nötig. Je mehr aktive Spezies im Plasma vorhanden sind, je schneller kann die Schicht wachsen. Die mittlere Weglänge der Partikel liegt bei einigen hundert μm , was einem wenig dichten Plasma entspricht. Die meisten Elektronenenergien liegen bei 0,5 – 10 eV und die Plasmadichte bei $10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Der Grad der Ionisierung ist weniger als 10^{-5} .

Freie Radikale finden sich häufiger als Ionen im Plasma und manche Radikale haben eine längere Lebensdauer als Ionen. Die meisten Reaktionen passieren zwischen angeregten Molekülen sowie zwischen Ionen und Molekülen, was die Voraussagekraft für Reaktionen im Plasma weiter erschwert.

Ist die Flussrate des Gases verglichen mit der Energie zur Erzeugung des Plasmas gering, so ist die Depositionsrate durch den Gasfluss limitiert. Ist der Gasfluss hoch, so ist die Depositionsrate durch die Plasmaenergie limitiert. Die Substrattemperatur beeinflusst die Deposition in geringerem Maße, da die Aktivierungsenergie für die Depositionsrate gering ist. Obwohl die Reaktionsmechanismen noch wenig verstanden sind, haben der technische Fortschritt und die Industrie die Entwicklung von PECVD vorangetrieben. In Tabelle 3.1 sind Filme, die mittels PECVD erzeugt werden aufgelistet.

Prinzipiell können mittels PECVD alle Filme erzeugt werden, deren Komponenten gasförmig bereitgestellt werden können, wie man aus der Tabelle 3.2.1 ersehen kann. Hydride und Halogenide sind am meisten verbreitet wie auch organometallische Verbindungen. Detaillierte Studien gibt es vor allem zu Schichten, die Si-, SiN und SiO beinhalten. Diese Komponenten werden vor allem in der Halbleiterindustrie verwendet.

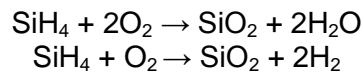
Tabelle 3.2 1: Ein Auzug der Filme die mittels PECVD hergestellt werden können (1)

Film	Deposittemperatur[C]	Depositionsrate[x10nm]	Prozessgas
a-Si (amorphes Si)	25 – 400	0,5 – 50	SiH ₄
			SiH ₄ /H ₂
			SiH ₄ /Ar
			SiF ₂ /H ₂
			SiF ₄ /H ₂
			SiCl ₄ /Ar,H ₂
			Si ₂ H ₆ /H ₂
µc-Si	100 – 500	0,5 – 8	SiH ₄ /H ₂
a - Ge	250 – 650	1 – 10	GeH ₄
a - C	25 – 250	0,5 – 200	C _n H _m /H ₂ ,Ar
			C ₆ H _{6-m} F _m
B	400	1 -10	B ₂ H ₆
			BCl ₃ /H ₂
			BBr ₃
As	<100	<100	AsH ₃
Al	100-250	1 – 4	Al(CH ₃) ₃
			AlCl ₃ /H ₂
Ti	500		TiCl ₄ /H ₂ /Ar
Mo	200 – 400		MoF ₆ /H ₂
			MoCl ₆ /H ₂
			MoCO ₆ /Ar,H ₂
W	25 – 500	1	WF ₆ /H ₂
Ni		1	Ni(CO) ₄
Cu	30 – 200		Cu(C ₂ HF ₃ O ₂) ₂ /Ar
Au	25 – 200	0,1 – 0,2	Me ₂ Au(acac)
Pd	30 – 200		Allyl-Cp-Pd
Pt	25 – 200	0,1 – 1	Cp-Pt-Me ₃

3.3 Atmospheric Pressure CVD

Cemische Abscheidung bei Normaldruck

Die APCVD wird zur Herstellung von undotierten und dotierten Oxiden im Strömungsverfahren genutzt (2). Als Quellgase für die Oxiddeposition dienen Silan und Sauerstoff, die sich bei ca. 400 Grad nach den folgenden Reaktionsgleichungen thermisch zersetzen und miteinander reagieren.



Es entsteht ein poröses instabiles Oxid, das durch Temperung verdichtet werden kann. Aufgrund der niedrigen Depositionstemperatur ist die Oberflächendiffusion der Moleküle recht gering, sodass die Konformität der Abscheidung niedrig ist. Die Aufwachsrate beträgt ca. 100 nm/min (PECVD um 900 nm/min)

Zur Erniedrigung des Glaspunktes des Silanoxides werden der Abscheidung häufig die Dotiergase Diboran und Phosphin beigefügt, sodass sich im Oxid ca. 2-4% Phosphor und bis zu 6% Bor einlagern. Dieses Bor – Phosphor - Silanglas verformt bereits bei einer Temperatur unterhalb von 900 Grad. Es wird als Zwischenoxid eingesetzt und bei einem Reflow-Prozess – einer kurzzeitigen Temperung bei hoher Temperatur - verformt. Infolge der Oberflächenspannung des BPSG ebnet sich die Oberfläche der Scheibe während der Temperaturbehandlung ein. Abrisse von Leiterbahnen an den Stufen können nicht mehr auftreten.

Um die Konformität der Abscheidung zu verbessern kann dem APCVD Prozess 3-8% Ozon beigefügt werden. Das äußerst reaktive O₃ erhöht die Oberflächendiffusion der sich anlagernden Moleküle und sorgt damit für eine gleichmäßige Stufenbedeckung.

Da unverdünntes Silan hochexplosiv und selbstentzündlich ist, wird für die APCVD-Prozesse eine Konzentration von ca. 2% Silan in Stickstoff oder Argon genutzt. Die geringe Konzentration verhindert gleichzeitig eine Gasphasenreaktion des Silans. Auch die extrem toxischen Dotiergase werden nur stark in N₂ verdünnt (1:1000) eingesetzt.

Aufgrund der relativ geringen Konformität und der niedrigen elektrischen Stabilität sind die Standard – APCVD – Verfahren heute nur noch selten anzutreffen.

Als Anwendungsbeispiel für die APCVD dient die Watkins-Johnson-Anlage (Abbildung 3.3.1). Diese Anlage arbeitet bei Atmosphärendruck und beschichtet kontinuierlich. Mit diesem Anlagentyp werden Wafer mit undotiertem oder dotiertem Silanglas beschichtet. Der Vorteil ist der große Probendurchsatz, der Nachteil ist eine hohe Anfälligkeit der Maschine durch die vielen beweglichen Teile und die schwierige Reinigung der mit den Prozessgasen in Berührung kommenden Teile. Das sind vor allem das Band auf welchem die Wafer laufen und die Injektoren.

Probleme bei der Schicht sind eine schlechtere Uniformität und eine höhere Defektdichte, die auch durch die beweglichen Teile verursacht werden. Durch das aneinander reiben der Kettenglieder des Bandes auf dem die Wafer liegen, werden Partikel frei.

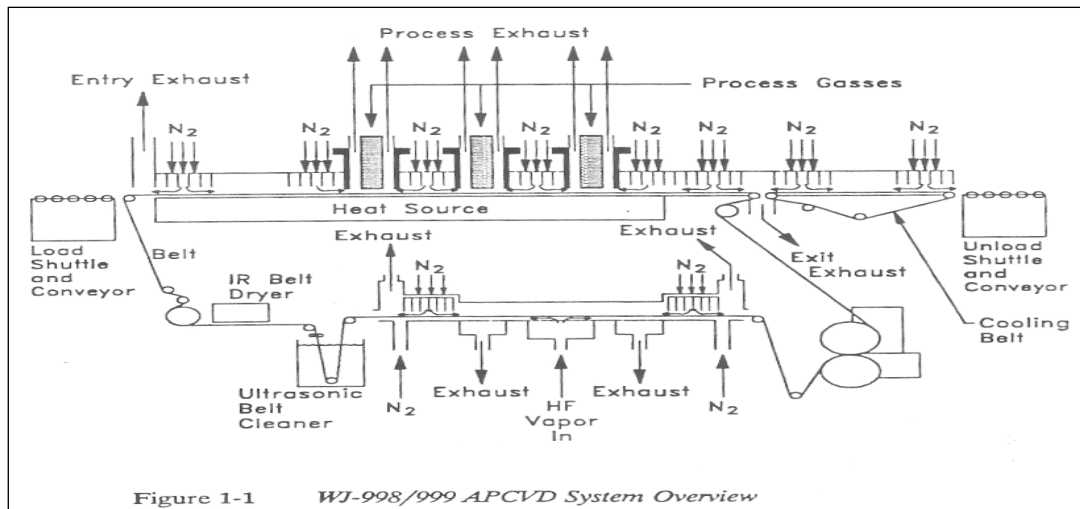


Figure 1-1 WJ-998/999 APCVD System Overview

Abbildung 3.3 1: Die Watkins Johnson Anlage ist ein Beispiel für APCVD – Anlagen die gebräuchlich sind. Durch die erwähnten Nachteile versucht man die WJ durch Alternativmethoden zu substituieren (3)

3.4 Low Pressure CVD

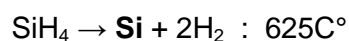
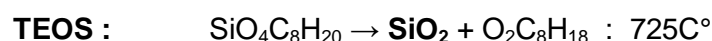
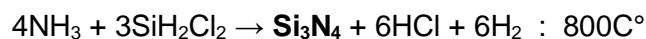
Niederdruck-CVD in der Halbleiterindustrie

Das LPCVD – Verfahren ist eine Unterdruckabscheidung durch pyrolytische Zersetzung von Gasen (2). Es eignet sich zur Herstellung von dünnen Schichten aus Siliziumoxinitrid (SiON), Siliziumnitrid (Si₃N₄), Polysilizium, Wolfram, Titan und vielen weiteren Materialien.

Die Abscheiderate wird wesentlich von der Prozesstemperatur bestimmt, die als Aktivierungsenergie zur Gaszersetzung dient. Bei geringer Temperatur ist die Rate reaktionsbegrenzt. D.h. es werden mehr reaktionsfähige Moleküle im Gasstrom geführt als an der Scheibenoberfläche adsorbieren. Mit wachsender Temperatur nimmt der Zersetzungsgrad an der Scheibenoberfläche zu, bis nicht mehr genügend Gas zugeführt wird. Die Abscheiderate ist nun diffusionsbegrenzt. In diesem Fall nimmt die Homogenität der Abscheidung aufgrund der Verarmung des Gases an reaktionsfähigen Molekülen ab. Daher ist für eine gleichmäßige Beschichtung der Wafer ein reaktionsbegrenzter Prozess erforderlich.

Infolge des niedrigen Drucks von ca. 10 – 100 Pa ist die Dichte des Quellgases im Reaktor gering, sodass keine Gasphasenreaktionen stattfinden und bei regelmäßiger Reinigung des Rezipienten auch keine Partikelbildung auftreten kann. Die hohe Oberflächendiffusion resultiert aus der im Vergleich zum APCVD – Verfahren hohen Prozesstemperatur und führt bei einer reaktionsbegrenzten Abscheidung zu einer weitgehend konformen Stufenabdeckung (K = 0,90 – 0,98), wobei K das Verhältnis zwischen dem Schichtwachstum auf vertikalen und horizontalen Flächen ist. Das Verfahren liefert hochwertige, dichte Schichten und die Oxide weisen eine hohe elektrische Stabilität auf.

In Abhängigkeit von der abzuscheidenden Schicht und den verwendeten Quellgasen variieren die Prozesstemperaturen der LPCVD – Abscheidungen im Bereich von 400 – 900 Grad.



Die Wolframabscheidung benötigt einen Nukleationskeim aus Si, Al oder W selbst, sodass bei 400C° nur auf den Si- oder Al/Si – Oberflächen ein Wachstum stattfindet, nicht jedoch auf Oxid. Folglich lässt sich dieses selektive Verfahren zum auffüllen von freigeätzten Kontaktöffnungen bzw. zur vertikalen Verbindung in der Mehrlagenverdrahtung verwenden. Für eine ganzflächige Abscheidung ist zu Beginn des Prozesses eine Zugabe von Silan zu WF₆-Quellgas erforderlich, um durch Si-Abscheidung auf dem Oxid Nukleationskeime zu erzeugen.

Tetraethyl-orthosilan-LPCVD

Eine Besonderheit stellt die Oxidabscheidung durch den TEOS–Prozess dar. Hier dient eine organische Flüssigkeit als Si – Quelle. Im Unterschied zu den gasförmigen Verwandten ist die organische Flüssigkeit Tetraethyl-ortho-silan relativ ungefährlich. Das aus dem Dampf der Flüssigkeit entstehende Oxid weist neben der konformen Stufenabdeckung eine hohe elektrische Stabilität auf. Durch Beimischung der flüssigen Dotierstoffquellen Trimethylborat und Trimethylphosphat, welche ebenfalls verdampft werden, zu TEOS, lassen sich dotierte Gläser abscheiden, die einen niedrigen Glaspunkt (900C°) aufweisen.

Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit mittels eines Plasmas, aber auch ohne Plasma, abzuscheiden. Statt eines Plasmas kann auch ein Ozon-Sauerstoffgemisch als Reaktionsstarter verwendet werden. In diesen USG-Schichten findet man reaktionsbedingt auch einen geringen Kohlenstoffanteil.

Weitere Flüssigquellen für die Oxidabscheidung sind Diethylsilan, Dibutylsilan SiH₂C₈H₁₈ und Tetramethylcyclotetrasiloxan (Si₄O₄C₄H₁₆). Der Vorteil ist, dass diese eine Erniedrigung der Abscheidetemperatur auf 380 – 650C° unter Zugabe von O₂ ermöglichen.

3.5 Stress

Allgemein

Die Haftung zwischen zwei Schichten, wie beispielsweise dem Siliziumwafer und einer Siliziumoxidschicht, hat physikalische wie auch chemische Gründe. Unterschiedliche Längen- bzw. Volumensänderungen der Schichten bzw. einer Schicht und dem Substrat, haben einen tensilen oder kompressiblen Stress zur Folge, welcher über das Interface übertragen wird. Durch den Stress kann die Qualität der Schicht leiden, Stress liefert aber auch Informationen über den Abscheideprozess. Der Stress kann durch Prozessbedingungen und den physikalischen Eigenschaften der Schicht in einem weiten Bereich schwanken.

Physikalische Grundlagen

Das mechanische Verhalten von Feststoffen kann über eine Stress-Spannungskurve beschrieben werden. Die Kraft die pro Flächeneinheit auf das Material wirkt, wird als Stress σ [N/m² oder Pascal], bezeichnet (4). Zugspannung ist laut definition positiv und kompressible Spannung ist negativ definiert. Zugspannung in eine Richtung heißt, dass das Material in diese Richtung gedehnt wird, in x-Richtung Beispielsweise wird es als $\epsilon_x = \Delta x/x$ definiert (Abbildung 3.5.1).

Bis zu einem gewissen Punkt verläuft die Stress-Spannungskurve linear, was bedeutet, dass das Material bis dorthin elastisch ist. Dort, wo die Ableitung der Steigung 0,2 Prozent erreicht, wird der Übergangspunkt festgelegt. Die Steigung im linearen Teil ist ein Maß für die Steifheit des Materials und wird Young-Modul genannt. Stress ist definiert als das Produkt aus der Spannung ϵ_x und dem Young-Modul, wobei das Young-Modul „Y“ bekannt sein muss.

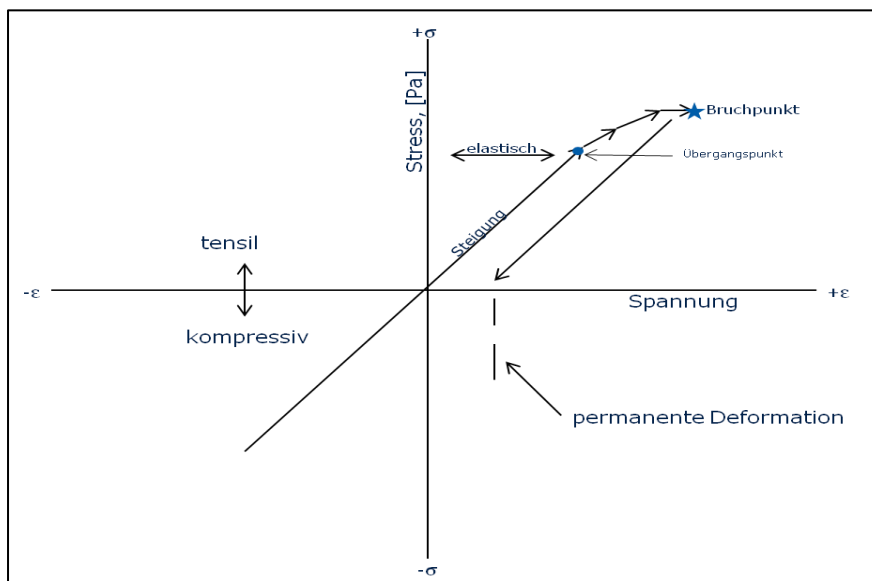


Abbildung 3.5 1: Anhand der Stress-Spannungskurve können die markanten Punkte abgelesen werden (Abbildung: Thin-Film Deposition, Principles and Practice, Donald L.Smith; S 186)

Nimmt man im linearen Teil der Stress-Spannungskurve den Stress weg, so kehrt das Material in seine Ausgangskonfiguration zurück. Geht man darüber hinaus, bleibt das Material in einem deformierten Zustand. Geht man noch weiter, bricht das Material.

Die Form der Stress – Spannungskurve für ein gegebenes Material hängt von der kristallinen Kornstruktur, der Temperatur und der Spannung ab. Ist die Temperatur unter dem Schmelzpunkt T_m , gibt es eine gut abgegrenzte elastische Region und die Steigung bleibt dort linear. Ab einem gewissen Punkt beginnen die kristallinen Dislokationen zu wandern.

Bei noch höherer Temperatur beginnt das Material speziell an den Korngrenzen zu kriechen und die elastische Region wird kleiner.

Betrachtet man Stress, so ist der einfachste Fall ein uniaxialer Stress, beispielsweise in x – Richtung. Während es in die x – Richtung eine Zugspannung gibt muss es in die y - und z – Richtung eine Kompressionsspannung geben. Mit der vorher gemachten Definition ist ϵ_x positiv und ϵ_y und ϵ_z negativ. Damit ist das Poisson Verhältnis $\nu = - \epsilon_y / \epsilon_x$ und $\nu = - \epsilon_z / \epsilon_x$. Wenn sich das Volumen durch den Einfluss von Stress nicht ändert, dann ist die Summe von $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ Null und $\nu = 0,5$, wobei das gleichzeitig das obere Limit von ν ist.

Bei dünnen Schichten kann man Stress in nur zwei Richtungen beobachten. Das ändert das Stress – Spannungsverhalten von $\sigma_x = Y\epsilon_x$. D.h. σ_x ist die Zugspannung in x-Richtung was als σ_x/E mit der Steigung E, geschrieben werden kann während σ_y eine Schrumpfung in y – Richtung bedeutet weshalb man $-\nu\sigma_x/E$ schreibt. Die Gesamtspannung der x-, y – Richtungen kann also als:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{(1 - \nu)}{Y} \sigma_{x,y} = \frac{\sigma_{x,y}}{Y'}$$

geschrieben werden, wobei Y' das biaxiale elastische Modul ist, Y das Young Modul, ν die Poissonzahl und σ der Stress ist.

Dünne Filme beinhalten sowohl extrinsische wie auch intrinsische Stressfaktoren. Der intrinsische Stress der Schicht entsteht entweder während der Abscheidung oder durch nacharbeiten, wie Partikelbeschuss, der Schicht. Extrinsische Faktoren sind von außen einwirkende Einflüsse wie beispielsweise thermale Expansion. Normalerweise werden Schichten bei erhöhter Temperatur abgeschieden und nach der Prozessierung wieder abgekühlt. Hat beispielsweise ein abgeschiedenes Material einen geringeren thermalen Ausdehnungskoeffizienten α_T als das Substrat, hat der Film nach dem Abkühlen eine größere Ausdehnung als das Substrat. Die Mitte eines Wafers wäre in dem Fall beispielsweise nach oben gebogen. Der Druck des Films auf das Substrat wird durch den Gegendruck des Substrats wieder ausgeglichen.

Ist die Schichthöhe h_F und die Waferdicke h_S und $h_F \ll h_S$ dann ist die Spannung $\epsilon_F \gg \epsilon_S$ und der Zusammenhang

$$\sigma_F \cdot h_F = - \sigma_S \cdot h_S$$

Wichtig ist zu erwähnen, dass der auftretende Stress alleine vom abgeschiedenen Film herrührt und nicht vom Substrat und die laterale Ausdehnung des Films durch den Durchmesser des Substrates begrenzt ist.

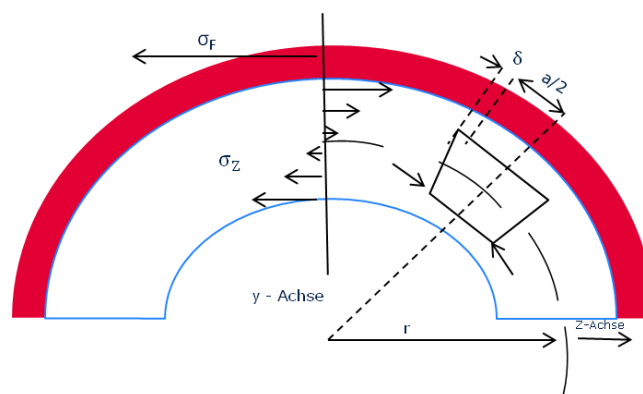


Abbildung 3.5 2: Wird ein Wafer beschichtet, übt die Schicht einen Druck auf den Wafer aus, der ihn in eine Richtung verbiegt.

Bei Abbildung 3.5.2 wird nur der vom Film ausgehende Stress betrachtet welcher eine Krümmung ausbildet. Diese Krümmung verursacht ein Drehmoment M_F entlang der y-

Achse, welcher durch ein Drehmoment des Substrates ausgeglichen werden muss. Der Drehmoment des Films in der Mitte des Wafers ist:

$$M_F = \sigma_F h_F (h_s/2)$$

Hier ist σ_F der Filmstress, h_F die Stärke des Films und h_s die Stärke des Substrates. Der Biegestress σ_z des Substrates setzt sich dabei aus dem tensilen Stress an der Stirnseite $z = +h_s/2$ und aus dem Stress auf der Rückseite des Wafers mit $z = -h_s/2$, zusammen.

Der Stress kann mit dem Radius r der Biegung in Verbindung gebracht werden. Sichtbar wird das im Diagramm als trapezoidaler Schnitt. Wenn man die halbe breite $z/2$ und die halbe Höhe $a/2$ des Trapezes ansieht, dann ist δ der Unterschied in der Biegung und die Spannung ist $\epsilon_z = \delta/(a/2)$.

Es ist unter bestimmten Bedingungen möglich den Filmstress zu minimieren. Entweder wenn die Schichtdicke h_F größer oder gleich dem Substratdurchmesser ist, oder sie passt sich der Deformation ohne zu delaminieren an, wie bei Iridium beobachtbar, oder sie ändert den intrinsischen Stress des abgeschiedenen Films indem sich die Kristallkörnung ändert.

Werden Filme bei hohen Temperaturen abgeschieden, so kann die Filmspannung vor allem bei großem Unterschied des Wärmeausdehnungskoeffizienten α_T sehr groß werden und beim wieder abkühlen die Schicht ablättern oder das Produkt als Ganzes brechen. Die Filmspannung ist gegeben als:

$$\epsilon_F = \left(\frac{1 - \vartheta}{Y} \right)_F * \sigma_F$$

Hier ist wieder Y das Young Modul, ϑ die Poissonzahl und σ_F der Filmstress. Diese Formel beschreibt nur die extrinsische Komponente des Stresses. Für den intrinsischen Stress muss der Gesamtstress gemessen werden und die extrinsische Komponente des Stresses, ϵ , abgezogen werden. Spannungen, die durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Substrat und Film entstehen, werden als extrinsische Eigenspannung und solche die nur im Film entstehen intrinsische Eigenspannung bezeichnet.

Probleme die durch Stress entstehen

Betrachtet man Stress, so ist dabei der Grad des Stresses sehr wichtig, da es unter anderem auf die Anwendung ankommt, für die ein Produkt eingesetzt wird. Wenig kompressiver Stress kann einen Film verstärken, da es die Eigenschaften des Films nicht verändert, sollte das Produkt einen tensilen Stress ausgesetzt werden. Korrosion kann beispielsweise durch verhindern von tensilen Stress verlangsamt werden.

Zu viel Stress kann aber zu Problemen führen, wie man anhand der Stress–Spannungskurve sieht, bei der ab dem Übergangspunkt vom linearen Bereich zur Kurve das Material degradiert. Zu großer tensiler Stress führt bei einer dünnen Schicht am Wafer zu mosaikartigen Brüchen der Schicht. Der zerstückelte Film kann dann leicht ablättern. Bei kompressiblem Stress führt das zu Aufwellungen die domartig oder blasenartig sein können oder auch zu welligen Mäandermustern führt.



Abbildung 3.5 3: Bei tensilen Stress kann die Schicht reißen, bei kompressiven Stress können mäandernförmige oder blasenförmige Muster entstehen.

Intrinsischer Stress

Betrachtet man Stress als gesamtes, so setzt er sich aus intrinsischen und extrinsischen Stress zusammen. Der intrinsische Stress wird entweder schon während des Prozesses in der Schicht erzeugt oder durch nacharbeiten nach dem Abscheiden.

Betrachtet man nur den Stress der während des Abscheideprozesses entsteht, dann sind die Quellen dafür die Chemie und die Mikrostruktur der Schicht und bei Prozessen, bei denen während der Abscheidung mit Ionen gesputtert wird, auch der Partikelbeschuss.

Chemische Prozesse verursachen Stress wann immer eine Reaktion auftritt, auch wenn sie unter der Oberfläche stattfindet, wo der Film schon seine feste Struktur eingenommen hat. Reaktionen bei denen Materialien zu einer Struktur dazukommen verursachen kompressiven Stress, Reaktionen die Materialien wegnehmen tensilen Stress. Ein Beispiel für das Entstehen von tensilem Stress ist die Siliziumnitridschicht. Für den Prozess werden Silan und Ammoniak verwendet. Der Grund ist die Reaktion aus dem Triaminosilanprecursor in der Schicht bei der unter der Oberfläche Ammoniak frei wird und aus dem Precursor Si_3N_4 kondensiert, was den Stress nach der Filmbildung verändert. Auch während einer Nachbearbeitung kann diese Reaktion passieren und damit den Stress noch verändern.

Wird während der Abscheidung mit Ionen oder energetischen Neutralteilchen bombardiert, kann kompressiver Stress entstehen, da diese Partikel in die Schicht implantiert werden können oder den Teilchen in der Schicht einen Impuls geben können. Dieser führt dazu, dass Atome an der Oberfläche näher zusammenrücken, als sie es im entspannten Zustand tun würden. Dadurch kann die Bindungslänge zwischen den Atomen verkürzt werden. Bei niedrigerer Temperatur werden sie in diesem Zustand gefangen. Bei hochenergetischen Abscheideprozessen wie sie mittels HDP realisiert werden, kann man damit gezielt tensilen Stress entgegenwirken, welcher ansonsten von chemischen oder mikrostrukturellen Eigenschaften verursacht wird.

Bei der Sputterabscheidung wie sie mittels HDP durchführbar ist, werden folgende Effekte sichtbar. Der Übergang von Z1 zu ZT bei abnehmendem Druck korreliert mit einem geringeren Unterschied des Einfallswinkels der auf die Oberfläche treffenden Teilchen, wie auch mit einer steigenden kinetischen Energie der Teilchen (Abbildung 3.5.4). Z1 ist ein Schichtaufbau, der bei geringem Verhältnis der Abscheide- zur Schmelztemperatur T_A/T_{SM} , beobachtbar ist. Oberflächendiffusion ist dabei nicht ausschlaggebend da sie kleiner dem Atomradius ist. Die Schicht besteht aus Säulen geringer Kristallinität, vielen Defekten oder sie ist amorph. Bei dickeren Schichten sind die Säulen übereinander gestapelt mit Hohlräumen zwischen den Schichten. Auf der Oberfläche sind Kuppen sichtbar, die mit der Filmdicke größer werden.

ZT enthält ebenfalls defekte Säulen wie Z1, jedoch ohne Hohlräume und Kuppen auf der Oberfläche. ZT beobachtet man vor allem bei energieunterstützten Prozessen wie PECVD.

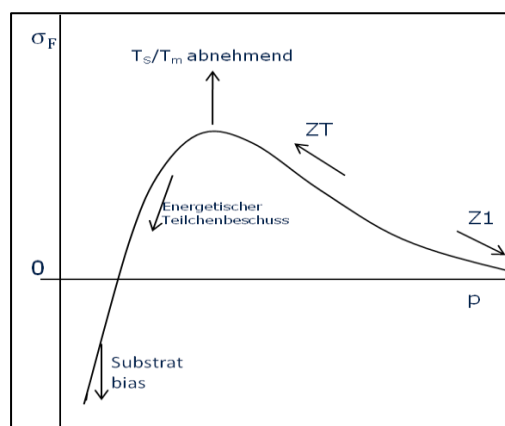


Abbildung 3.5 4: Arbeitet man mittels high density plasma, ändert sich der Schichtaufbau. Bei höheren Drücken weist die Schicht Säulen geringer Kristallinität (viele Defekte) auf oder sie ist amorph (Z1). Mit geringer werdendem Druck bleiben die Spalten bestehen, die Hohlräume und Kuppen verschwinden aber mit dem Einsatz von energieaufwendigeren Beschichtungsmethoden (ZT) und der tensile Stress nimmt anfänglich zu, bevor er kompressiv wird.

Dieser Übergang von Z1 zu ZT geht mit einem steigenden tensilen Stress einher, da die Hohlräume und Fehlstellen in der Schicht geringer werden. Die Höhe des tensilen Stresses korreliert mit absteigendem Verhältnis von T_A/T_{SM} für viele Metalle. Der Stress kann sich bei geringerem T_A/T_{SM} Verhältnis nicht selbst ausheilen. Bei noch geringererem Druck geht der Stress durch weitere Kompaktierung der Schicht zurück und wird kompressiv (Abbildung 3.5.4). Kompressiver Stress kann durch Erhöhung des negativen Bias am Substrat erhöht werden da dadurch der Teilchenbeschuss intensiviert wird.

3.6 Haftung

Adhäsion zwischen Schichten

Bei schlechter Haftung zwischen Schichten und hohem Stress kann die Adhäsion zwischen den Schichten verloren gehen. Dadurch können je nach Art des Stresses entweder Risse oder Buckel/Blister entstehen ⁽¹⁾. Da die Scherkräfte bei großer Filmdicke höher sind als bei dünnen Filmen wird fehlende Adhäsion dadurch noch verstärkt. Die Entstehung von Gas in der Schicht welches nicht abgehen kann und dadurch in der Schicht gefangen ist, kann ebenfalls zu Fehlern in der Schicht führen. Speziell bei PECVD kann sehr viel Wasserstoff in der Schicht eingeschlossen werden, bei Sputterabscheidungen kann es dagegen Argon sein. Da chemische Bindungskräfte nur wenige Nanometer weit wirken kann ein schlecht haftender Layer oder Kontaminierung die Adhäsion verschlechtern.

Bindungsmöglichkeiten am Interface

Hat man eine chemisch reine Oberfläche in der Abscheidungskammer, kann die Bindung am Interface zwischen den Schichten trotzdem schlecht sein wenn der Bindungscharakter (kovalent, ionisch oder metallisch) der beiden Schichtsysteme zu unterschiedlich ist. Ein Beispiel für schlechte Haftung zwischen zwei Schichten sind Gold und Siliziumoxid. Deshalb ist man auf eine Zwischenschicht aus Titan angewiesen. Sie bildet eine metallische Bindung mit Gold und eine kovalente Bindung zu Siliziumoxid.

Hat man physisorbierte Moleküle auf der Waferoberfläche, hat man einige Möglichkeiten diese Verunreinigungen in der Abscheidungskammer los zu werden. Erhitzt man den Wafer, so werden die unerwünschten Moleküle desorbiert oder sie gehen in einen chemisorbierten Zustand über. Im chemisorbierten Zustand verhindern sie die chemische Bindung nicht mehr weiter. Das Desorbieren von Molekülen kann mittels Spektrometer beobachtet werden oder durch den sich einstellenden Druck abgelesen werden.

Wenn man die Oberfläche mit Wasserstoffplasma behandelt kann man angelagerte Oxide von der Oberfläche als H_2O entfernen. Bombardiert man die Oberfläche mit Ionen mit einer Energie $> 100eV$ von einem Plasma oder Ionenkanone aus, kann man so gut wie jede Spezies von der Oberfläche entfernen. Die Ionen können bei falscher Energieeinstellung die oben haftende Spezies auch weiter ins Material hineindrücken.

Energieübertragung auf die Oberfläche mittels Ionen, Elektronenstrahlen oder UV – Licht kann Kontaminanten desorbieren indem es unter anderem die Bindungen zur Oberfläche bricht bei gleichzeitiger Aktivierung der Oberfläche.

Nach der Abscheidung ist es bei dünnen Filmen auch möglich sie bei bestimmten Wellenlängen mit Licht zu bestrahlen um die Adhäsion zu verbessern. Dabei darf die Schicht nicht zu dick sein, da ansonsten die Strahlung nicht bis zum Interface dringen kann. Bei sehr energiereichen Abscheidungsprozessen wie es bei der Sputterabscheidung umgesetzt wird, kann die Adhäsion am Interface durch einbringen einer hohen Energiedichte verbessert werden. Hier ist die Adhäsion auch besser als bei rein thermischen Prozessen.

Durch mechanische oder chemische Aufrauung der Oberfläche wird die Oberfläche vergrößert und dadurch die Anzahl der möglichen Bindungsstellen erhöht und das Material auf mikroskopischer Ebene mechanisch verbunden.

Weiters kann man durch absichtliches graduelles einstellen der Zusammensetzung am Interface Adhäsion auf unterschiedliche Weise verbessern. Kontaminanten werden dispergiert, die Anzahl der Bindungsstellen zwischen den Schichten wird erhöht und die Ausbreitung von Bruchlinien wird verhindert.

Interdiffusion von Teilchen zwischen den Schichten kann die Adhäsion verschlechtern, wenn damit Fehlstellen gebildet werden. Durch das Mischen von Ionen im keV – Bereich werden von Anfang an Ionen in das Substrat hineingetrieben und damit das Substrat mit dem Abscheidematerial vermischt. Sind die Ionen aus dem gleichen Material wie das Substrat, dann mischen sie sich aus sich selbst heraus. Dieser Effekt kann einige Nanometer betragen. Bei zwei aufeinanderfolgenden Schichttypen kann der graduelle Wechsel von einer Schicht zur anderen die Adhäsion verbessern.

4 Experimentelle Durchführung

4.1 Analysen der Proben

Übersicht

Ziel war es über den Einsatz von unterschiedlichen Analysemethoden die Schichteigenschaften zu untersuchen. Da die Haftung zwischen Schichten oft von der chemischen und physikalischen Beschaffenheit der Grenzfläche abhängt, wurde sie mit XPS und Kontaktwinkelmessungen untersucht. Analysen die die ganze Schicht betrafen waren das FT-IR, die Schichtdickenmessung und der Brechungsindex wie auch die Stressmessung zusammen mit den TOF – ERDA Messungen. Im Folgenden werden die Methoden genauer beschrieben.

4.2 Fourier Transformation-Infrarotspektroskopie

Aufbau und Funktion

Die Proben wurden mittels FT-IR Spektrometer (Fourier Transformationsspektroskopie) nach dem beschichten und nach den einzelnen Versuchsschritten vermessen. Das Spektrometer mit dem Namen Qualimatic 200 von der Firma Biorad konnte sowohl 150mm als auch 200mm Wafer prozessieren.

Wichtigster Anlagenteil des Spektrometers ist ein modifiziertes Michelson Interferometer (5). Dafür wird eine thermische Lichtquelle wie ein Globar verwendet, der einen mittleren IR - Bereich von 2,5 bis 25 μm oder 400 – 4000 cm^{-1} abdecken kann.

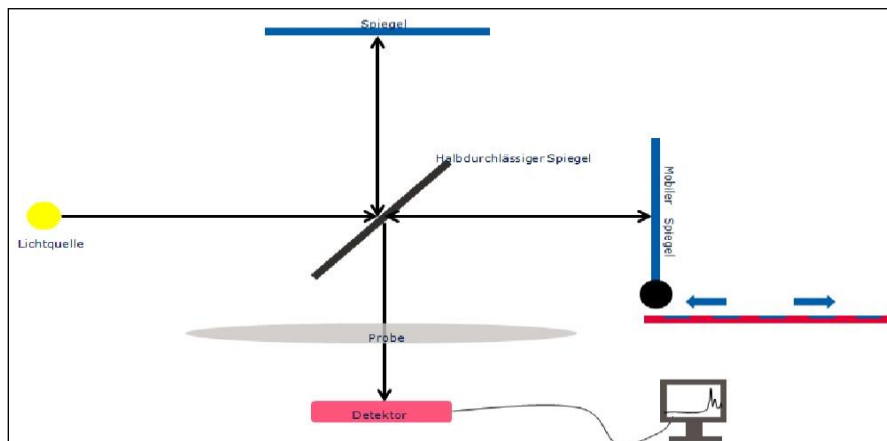


Abbildung 4.2 1: Der schematische Aufbau des FT-IR zeigt den Lichtweg, der mittels mobilen Spiegel verlängert und verkürzt werden kann. Dabei interferieren gewisse Wellenlängen. Das dabei entstehende Interferogramm wird mittels Fouriertransformation ausgewertet.

Das Michelson Interferometer besteht aus der beschriebenen Lichtquelle, einem Halbdurchlässigen Spiegel, einem fixen und einem mobilen Spiegel, dem Detektor und einem Ausgabegerät. Das Licht geht dabei durch den halbdurchlässigen Spiegel zum mobilen und fixierten Spiegel, wird dort reflektiert und anschließend vom halbdurchlässigen Spiegel durch die Probe zum Detektor geleitet.

Sind beide Spiegel gleich weit vom halbdurchlässigen Spiegel entfernt, so gibt es keine Interferenz zwischen den geteilten Strahlen wenn sie wieder vereinigt werden, da es hier auch keine Phasenverschiebung bei gleicher Frequenz gibt. Wird der Spiegel in die eine oder andere Richtung verschoben so gibt es bei bestimmten Wellenlängen Interferenz. Somit kann bei unterschiedlichen Interferenzen über die Probe gescannt werden. Dabei geht ein Scan über den gesamten Frequenzbereich.

Da beim Scannen immer nur ein kleiner Frequenzbereich durch destruktive Interferenz von der Gesamtlichtintensität ausfällt, kommt man mit der Methode in einen niederen analytischen Bereich. Ein Scan ist die Distanz zwischen der Nullposition und der Maximalauslenkung des Spiegels. Dabei ist die Auflösung von der Distanz zwischen den

beiden Randpositionen des Spiegels abhängig. Je größer die Distanz ist, je besser ist die Auflösung. Mittels vieler Scans kann das Signal – Rausch Verhältnis des Spektrums verbessert werden. Die Position des Spiegels muss immer genau bekannt sein weshalb ein Na/He – Laser zur Positionsbestimmung eingesetzt wird, welcher eine konstante Frequenz und eine konstante Lichtstärke hat.

Die Energien der Schwingungen werden im Spektrum ausgedrückt und hängen mit der Bindungsstärke als auch mit der Masse der Bindungspartner zusammen. Es können somit quantitative Größen über die Peakhöhe und qualitative Größen über die Peakposition ermittelt werden.

4.3 Dickenmessung und Brechungsindexbestimmung mittels Optiprobe 2690

Übersicht

Mittels Optiprobe ist es möglich drei Charaktereigenschaften von Oxidschichten zu messen. Die gebräuchlichste Eigenschaft ist die Schichtdicke, da diese auch am wichtigsten für die Abscheiderate und damit die Anlagenkontrollen ist. Die Uniformität wird während der Schichtdickenmessung bestimmt und gibt Informationen über die Dickenunterschiede der Schicht.

Über den Brechungsindex (refractive index) RI erhält man Informationen über die Stöchiometrie der Schicht sowie deren Dichte. Die Mittel mit denen die Optiprobe arbeitet sind das **BPR** (Beam Profile Reflectometry), die **Spektrometrie** und die **Ellipsometrie**.

Das BPR ist dabei das wichtigste Instrument der Optiprobe (6). Es misst reflektiertes Licht eines Diodenlasers, der polarisiertes Licht aussendet. Über den Winkel den das s- und p-polarisierte Licht nimmt können zwei Diodenarrayspektrometer die Schichtdicke vor allem bei dünnen Oxidfilmen auswerten.

Das Spektrometer misst die Reflektivität bei einer fixen Wellenlänge. Das Ellipsometer besteht aus einem Vierzellendetektor, einem Kompensator und einem Analysator, der die **Phase** des reflektierten Lichtes misst. Diese Messung ist bei dünnen Filmen mit wenig Änderung in der Reflektivität praktisch.

Prinzip des BPR

Das BPR nutzt paralleles monochromatisches s – und p - polarisiertes Licht eines Diodenlasers bei einer Wellenlänge von **675nm**. Der Lichtweg führt vom Laser durch eine Kollimatorlinse zum Wafer. Das Licht trifft simultan in einem Winkel zwischen 0 und \sin^{-1} (NA) auf den Wafer. Es reicht wenn der Einfallswinkel des s – und p – polarisierten Lichtes zwischen 0 und 64 Grad liegt, da bei 64 Grad die Intensität des p – polarisierte Lichts null wird. Je nach Einfallswinkel auf den Wafer erleidet das Licht in den Schichten Interferenz. An den Schichtgrenzen wird ein Teil des Lichtes reflektiert, ein anderer Teil absorbiert. Das reflektierte Licht erzeugt ein Interferenzmuster, welches bei größerer Schichtdicke mehr hell – dunkel – Ringe zeigt.

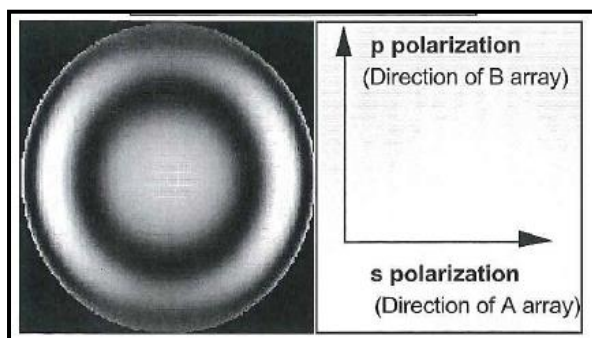


Abbildung 4.3 1: Interferenzmuster der mittels BPR erhaltenen Profile

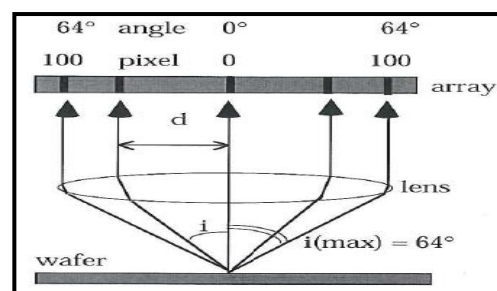


Abbildung 4.3 2 :Das an der Probe und an den Schichten reflektierte Licht wird bis zu einem Winkel von 64 Grad detektiert

Das reflektierte Licht wird von vier Detektoren gemessen. Zwei davon sind Diodenarrayspektrometer, von denen einer das p – und der andere das s – polarisierte Licht detektiert. Das BPR nutzt von den 256 zur Verfügung stehenden Pixeln 100 Pixel für 64° ,

womit die Auflösung bei $0,64^\circ$ liegt. Jedes p – und s- Interferenzprofil ist das Verhältnis von Intensität zu Einfallswinkel.

Der dritte Detektor ist eine Diode die die Gesamtintensität misst womit die nicht p – und s – polarisierten Lichtstrahlen wie auch die p – und s - polarisierten Lichtstrahlen gemeint sind. Der vierte Detektor ist ein Autofokusedetektor.

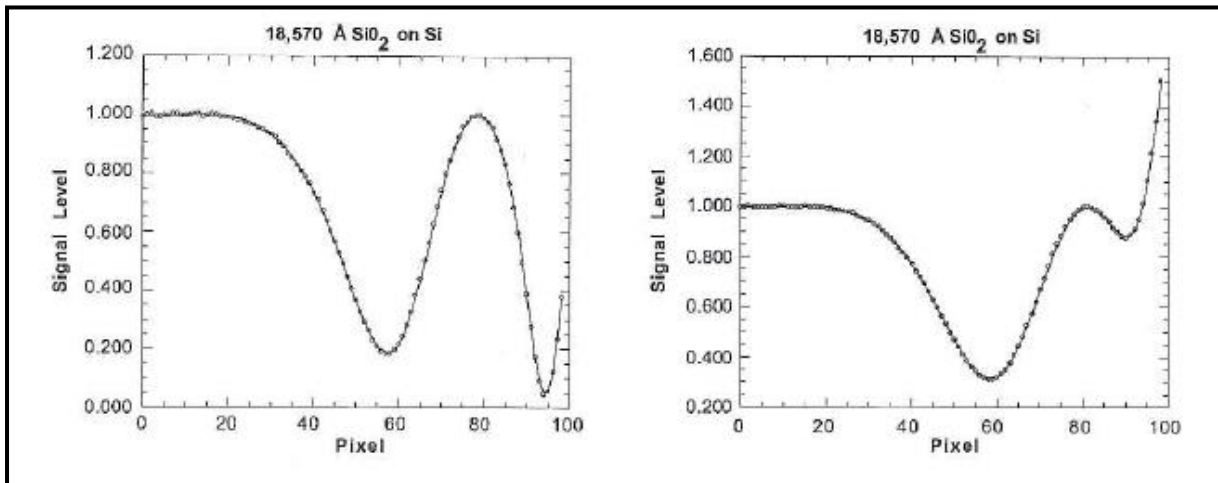


Abbildung 4.3 3: Links sieht man das Signal des p-polarisierten Lichtes, rechts das des s-polarisierten Lichtes

Da das s – und p – polarisierte Licht simultan auf die Waferoberfläche trifft wird auch die gleiche Information geliefert. Oben sieht man die Spekten der beiden Polarisationsarten von einer Aufnahme eines Oxides mit 1857 nm .

Aufbau des Spektrometers

Als Lichtquelle wird eine Wolframlampe verwendet. Der Lichtweg ist derselbe wie der des BPR Lasers, weshalb während der Messungen die eine oder andere Lichtquelle abgeschottet werden muss. Fluktuationen in der Lichtleistung werden mit dem Lichtsensor, welcher auch das Laserlicht überprüft, ermittelt. Da die bestrahlte Fläche am Wafer relativ groß ist, kann diese mit einer Videokamera gefilmt werden und damit der Messpunkt eingerichtet werden. Der Lichtweg des reflektierten Lichtes ist für die Videokamera der gleiche wie der zum Spektrometer. Die Apertur im Spektrometer bestimmt den Messausschnitt des vom Wafer reflektierten Lichtes. Nach der Apertur zerlegt ein Gitter das weiße Licht in seine Spektralfarben und ein Diodenarrayspektrometer misst die Intensitäten der einzelnen Wellenlängen. Die Bandbreite des Arrays reicht von $470 - 870 \text{ nm}$.

Während einer Messung ist der Messpunkt am Wafer nur 12 \mu m groß, was für strukturierte Wafer sinnvoll ist.

Vorteil des Spektrometers

Das BPR misst bei gegebener Wellenlänge und nimmt bei der Berechnung der Schichtdicke Rücksicht auf die Winkel zwischen 0 und 64 Grad. Am effektivsten misst das BPR bei einem großen Unterschied im Reflektionswinkel und wenn daher viele Maxima und Minima im Spektrum vorliegen.

Das kann erreicht werden indem durch eine große Variation des Einfallswinkels eine große Anzahl von Winkeln im Film erzeugt wird und damit die Weglänge des Lichts in der Schicht groß ist. Bei niederen Brechungsindizes wie es bei Oxiden vorliegt variiert der Winkel stark. Bei einem Einfallswinkel zwischen 0 und 64 Grad schwankt der Winkel in der Schicht zwischen 0 und 38 Grad.

Für Filme mit höherem Brechungsindex wird der Lichtweg in der Schicht kürzer und damit der Bereich der Winkel geringer. Ein Beispiel ist Polysilikon mit einem Brechungsindex von $4,000$. Hier variieren die Abstrahlwinkel bei einem Einfallswinkel zwischen 0 und 64 Grad

zwischen 0 und 13 Grad. Sogar bei großen Schichtdicken ist eine Variation der Amplituden gering.

Im Falle der BPR können daher zwei Ergebnisse einer Schicht unterschiedlich ausfallen. D.h. die Phasendifferenz zwischen dem an der Oberfläche reflektierten Lichtes und dem an der Grenzfläche Polysilikon:Wafer reflektierten Lichtes ist für die unterschiedlichen Werte fast gleich. Die Phasendifferenz der zwei Werte die zur Zeit t und t plus Δt gemessen werden ist für den gesamten Bereich des Einfallwinkels ununterscheidbar. Würde die falsche Lösung der beiden berechneten Lösungen genommen, erhielte man ein falsches Ergebnis.

Da das Spektrometer mit weißem Licht arbeitet und daher mit einer Mischung aus allen Wellenlängen des sichtbaren Lichtes ist hier die Variation der Reflektivität eine Funktion der Wellenlänge und nicht des Winkels wie bei der BPR. Daher ist das Spektrometer bei großen Brechungsindizes besser geeignet. Im Spektrum macht sich das durch mehr Maxima und Minima bemerkbar.

Ellipsometrie BPE

Bei sehr dünnen Filmen kann mittels BPR die Messung verbessert werden indem man die Gesamtintensität des reflektierten Lasers verwendet. Für sehr dünne Filme die kleiner als 10nm sind wird die Performance sehr schlecht, da die Reflektivität für diese Schichtdicken fast gleich ist wie jene am blanken Wafer. Daher wird die phasenselektive Technik der Ellipsometrie angewendet.

Für diese Technik wird der Diodenlaser der auch für die BPR verwendet wird genommen. Dabei wird der Durchmesser des Laserstrahls $0.9 \mu\text{m}$ klein und damit die Messung sehr genau. Für das s- und p- polarisierte Licht wird ein Vierzellendetektor verwendet. Dem Detektor vorgeschaltet sind eine Wellenplatte und ein Polarisator.

Die Wellenplatte verschiebt die Phase der beiden 90° aufeinander stehenden s- und p- polarisierten Wellen.

Genaue Beschreibung

Sind Filme sehr dünn, ist die reflektierte Intensität unabhängig von der Dicke, da die Phase des reflektierten Lichtes nur sehr wenig variiert. Es wird nicht mehr die absolute Phase gemessen, sondern nur die Phasendifferenz zwischen s und p.

Bei Ellipsometern wird die Reflektivität von s und p polarisiertem Licht bei bestimmten Winkeln betrachtet. Die Polarisationsrichtungen des eingestrahnten und reflektierten Lichts werden kontrolliert und von einem rotierendem Polarisator bzw. einem Analysator am Rand des optischen Pfades gemessen.

Die Wellenplatte hilft die kleinen Verschiebungen in der s – p - Polarisation zu detektieren. In einigen Ellipsometern sind Polarisator und Analysator so geschaltet, dass sie den Lichtdurchsatz auf Null minimieren können. Je nach Winkel zwischen Analysator und Polarisator kann die Filmdicke berechnet werden.

Bei der Optiprobe geht das Licht durch die Wellenplatte wobei es einen Interferenzeffekt zwischen dem Licht außerhalb der x-y – Achse gibt. Variationen in der Phase der s- und p- polarisierten Lichtstrahlen werden in Intensitäten umgerechnet. Spannungsunterschiede die über den Vierzonendetektor aufgenommen werden repräsentieren die Intensitäten die über alle Einstrahlwinkel integriert werden.

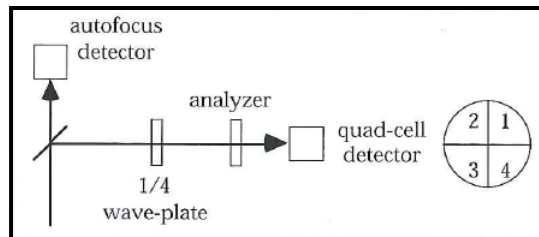


Abbildung 4.3 4: der Vierzellendetektor misst Winkelabhängig die Intensitäten des einfallenden Lichtes

Das System addiert dabei einmal über alle Intensitäten R_{sum} und berechnet auf der anderen Seite die Differenzen R_{diff} .

$$R_{\text{sum}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_{\text{diff}} = R_1 - R_2 + R_3 - R_4$$

R_{sum} ist die Summe der Intensitäten des reflektierten Laserlichts. Sie ist unabhängig von den Phasendifferenzen zwischen den s- und p- Komponenten.

R_{diff} zeigt die Signale der Phasendifferenz zwischen den s- und p- Komponenten des elliptisch reflektierten Lichts. Dieses Signal ist Dickenabhängig. Integriert man die Intensität über die gesamten Quadranten erhält man ein besseres Signal - zu Rauschverhältnis.

Das Verhalten von R_{diff} und R_{sum} ist komplementär. Wenn ein Signal bei einem Maximum oder Minimum ist, ist das andere Signal bei einer großen Steigung. Je dicker ein Material wird, je geringer wird die Amplitude der Signale, da über die Einfallwinkel integriert wird.

Vor- und Nachteile

Ellipsometrie wird für eine oder mehrere Schichten verwendet wobei die oberste Schicht die dünnste sein muss. Über den Vierzellendetektor kann ein weiter Bereich von Dicken abgedeckt werden die bis zu mehreren 100nm betragen können.

Der Nachteil ist das zyklische wiederkehren von gleichen Phasendifferenzen. Da die Wiederholzyklen relativ groß sind, BPE aber mit BPR und Spektrometer abgeglichen wird, ist dieser Nachteil zu vernachlässigen.

4.4 Stressmessung durch das MX-204

Übersicht

Jeder beschichtete Wafer unterliegt durch die in der Schicht inhärenten Charakteristika entweder einem tensilen oder kompressiblen Stress. Dieses Verhalten bringt den Wafer dazu sich zu verbiegen. Dabei gibt es eine Hauptrichtung die den Wafer entweder konkav oder konvex erscheinen lässt. Außer dieser Hauptbiegerichtung wirft der Wafer noch Wellen, die die Schicht noch zusätzlich Stressen.

Bei zu großem Stress kann sich die Schicht vom Wafer ablösen oder der Wafer kann im Extremfall brechen. Es wird daher beim Abscheiden auch immer darauf geachtet, inwieweit sich der Wafer konvex oder konkav verbiegt und wie groß der Stress in der Schicht ist.

Aufbau des MX 204

Das Gerät besteht aus zwei Stationen um die Kassette abzustellen, einem Roboterarm der die Wafer aus der Kassette nimmt und in die Kassette zurücklegt, einem Lesegerät das die Laserbeschriftung am Wafer ausliest und einem Lift mit dem die 150 oder 200mm Wafer in das Gerät eingeführt werden.

Arbeitsweise

Der Wafer wird im Gerät auf drei Pins zwischen zwei Edelstahlplatten abgelegt. Jede Seite der Platte beinhaltet eine wie auf dem Bild angeordneten Satz kapazitiver Sensoren (7). Für 8"

Wafer sind also 37 Sensoren auf der Platte über dem Wafer und unterhalb des Wafers installiert.

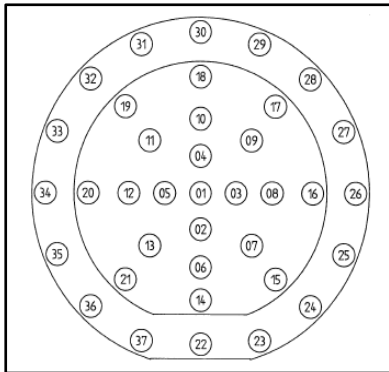


Abbildung 4.4 1: Schematische Ansicht des Deckels und des Bodens ober- und unterhalb des Wafers



Abbildung 4.4 2: Aussenansicht des MX 204 mit einem Wafer am Wafereinzug.

Messprinzip

Sensor und Messobjekt bilden dabei einen idealen Plattenkondensator. Der Sensor besteht aus einem Kondensator, einem Schutzring und einem Gehäuse. Ein Wechselstrom konstanter Frequenz und gleicher Amplitude durchfließt den Sensorkondensator. Dabei ist die Amplitude der Wechselspannung dem Abstand zum Messobjekt proportional.

Damit man also ein Aussagekräftiges Ergebnis bekommt sind zumindest eine Messung vor dem Beschichten und eine Messung nach dem Beschichten notwendig. Ändert sich die Amplitude zwischen zwei Messungen hat sich der Abstand verändert.

Messvorgang

Das Gerät misst drei unterschiedliche Sorten von Stress:

- Stress in der Mitte des Wafers bei 01 (Abbildung 4.4.1)
- Den Maximalstress
- Den durchschnittlichen Stress

Für den Stress in der Mitte des Wafers werden für einen 8" Wafer 8 Triplets von Messungen zusammengenommen. Die Triplets bestehen aus zwei diametral entgegengesetzten Punkten am Rand der Messanordnung und dem Mittleren Wert.

Berechnung des Stresses

Der Stress in der Mitte des Wafer ist der Mittelwert der Einzelstresswerte. Für einen 8" Wafer sind die Triplets mittels derer gerechnet wird:

22-01-30; 23-01-31; 24-01-32; 25-01-33; 26-01-34; 27-01-35; 28-01-36; 29-01-37;

Für den maximalen Stresswert werden Triplets aus den unmittelbar benachbarten Messpunkten generiert die auf einer radialen Linie liegen:

22-14-06; 14-06-02; 06-02-01...

24-15-07; 15-07-01; 07-01-11...

Der maximale Stress wird aus den Maximalwerten plus dem Stress im Zentrum des Wafers berechnet. Der Mittelwert des Stresses wird aus dem Mittelwert der aus den maximalen

Stresswerten berechneten Ergebnissen aber ohne dem Stress aus der Mitte des Wafers berechnet.

Bow

Während man für die Bestimmung des Stresses den Vorher-, Nachhervergleich braucht ist der Bow, der in μm angegeben wird eine Absolutgröße, die sofort bestimmt wird und in die Stoney – Gleichung für den Stress eingeht. Unten sieht man die Hauptzugrichtungen, die den Wafer verformen können und auf welche die Kondensatoren ansprechen.



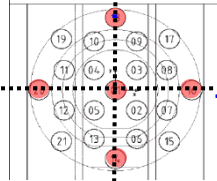
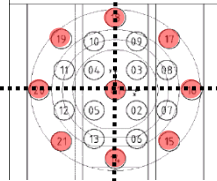
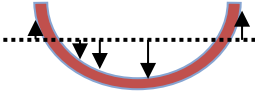
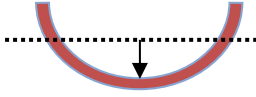
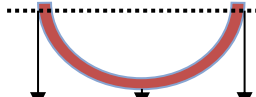
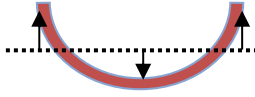
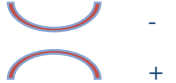
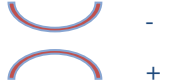
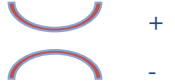
total warpage	bow-bf	bow-x / bow-y maxbow-xy	center bow
			
			
$\text{abs}(\text{max_pos}) + \text{abs}(\text{min_neg})$	<p>local warp value in the center of wafer</p>	$\text{bow-x} = c - (a+b)/2$ $\text{bow-y} = c - (d+e)/2$	$\text{cbow} = \text{average}(\text{outside}) - \text{center of wafer}$
<p>absolut (positiv) as CALZONE bow</p>			

Abbildung 4.4 3 : Das Ansprechverhalten der Kondensatoren spiegelt das Bowverhalten des jeweiligen Wafers wider.

4.5 TOF-Elastic Recoil Detection Analysis

Übersicht

Um einen genauen tiefenaufgelösten Überblick über die Stöchiometrie der Schichtsysteme zu erhalten wurden die Scheiben mittels TOF – ERDA (**Elastic Recoil Detection Analysis**) untersucht. Durch die Verwendung schwerer Ionen können Tiefenprofile erhalten sowie die stöchiometrische Zusammensetzung einer Schicht untersucht werden.

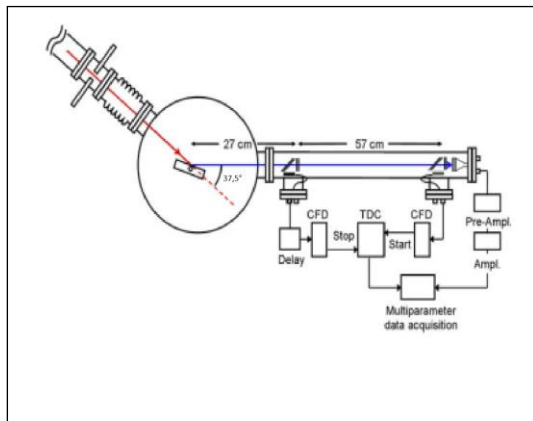


Abbildung 4.5 1 : Anhand des schematischen Aufbaues eines TOF-ERDAs sind die Hauptkomponenten und die Flugrichtung des Projektil- und des Targetions dargestellt.

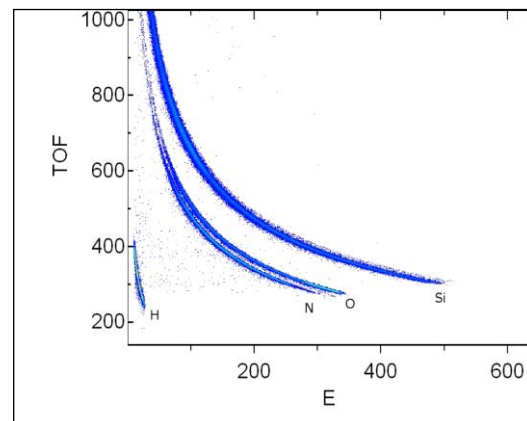


Abbildung 4.5 2 : Spektrum des TOF-ERDAs. Auf der x-Achse ist die Energie aufgetragen und auf der y-Achse die Flugzeit t_0-t in atomaren Masseneinheiten.

Prinzip

Ein fokussierter Strahl von Cl, I, Cu... - Ionen wird unter einem flachen Winkel auf eine Probe geschossen. Die Energien bewegen sich dabei für die Projektionen zwischen 10-30 MeV (8). Im Idealfall wird dabei unter Rückstoß des Projektils ein Targetatom herausgeschlagen. Das Targetatom wird unter einem flachen Winkel in Richtung Detektor geschossen, das Projektil prallt unter einem steileren Winkel ab.

Detektion der Targetionen

Die Elemente werden über ihre Geschwindigkeit und ihre Energie bestimmt. Die Geschwindigkeit wird über eine bestimmte Strecke zwischen zwei Punkten gemessen und die Energie über einen ionenselektiven Detektor wie einem PIPS (**P**assivation **I**mplanted **P**lanar **S**ilicon) oder einer Ionisationskammer.

Durch die Messung von Geschwindigkeit und Energie erhält man ein Histogramm bei dem die Signale des TOFs auf unterschiedlichen Kurven dargestellt werden.

Zeitmessung

Folienmaterial für die Zeitnehmung können Graphitfolien sein die auch als DLC – Material (**D**iamond **L**ike **C**arbon) angeboten werden. Das Zeitsignal wird über Sekundärelektronen gemessen die durch Ionen beim Durchgang durch die dünne Folie, welche unter negativer kV Spannung steht, entstehen. Die Elektronen in der Folie werden beschleunigt und in einem isochronen elektrostatischen Spiegel gesammelt. Die Ansprechzeit der Messanordnung ist dabei sehr kurz.

Detektor

Je nach Anwendungsgebiet werden Halbleiterdetektoren oder Ionisationskammern benutzt. Dabei ist die Auflösung des Halbleiterdetektors durch die Pixelgröße begrenzt. Werden vermehrt schwere Ionen gemessen, so wird der Detektor mit der Zeit zerschossen und die Messgenauigkeit nimmt ab. Die Ionisationskammer misst ionisiertes Gas beim Eintritt von Ionen. Da der Detektor durch eine Folie nach außen hin abgeschlossen sein muss, damit kein Gas aus dem Detektor austreten kann, bremst diese vor allem leichte Ionen ab und die Messung wird durch eine größere Energiestreuung ungenau.

Wechselwirkungen der Projektile

Dringen die Projektile in das Target ein so wechselwirken diese mit den Targetatomen. Dabei wird die kinetische Energie umgewandelt. Eine Reaktion ist das Ionisieren der Targetatome durch die Projektile, wobei die Elektronenstruktur der Targetatome verändert wird. Diesen Mechanismus bezeichnet man als elektronisches Stoppen (elektronic stopping). Die andere Reaktion ist das elastische Abbremsen (nuclear stopping) wobei Stoßenergie in Form von Wärme abgebaut wird.

Die kinetische Energie der Projektile wird durch diskrete Stöße mit den Targetatomen abgebaut bzw. umgewandelt. Dabei können die diskreten Stöße durch eine kontinuierliche Funktion der Energie beschrieben werden.

$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$

$S(E)$ ist der Energieverlust pro Länge (stopping power) durch ein Material der Dicke x . Der Energieverlust δE auf einer bestimmten Strecke δx kann man durch

$$\delta E = S(E) * \delta x$$

Ausdrücken. Ist die Dichte des Materials bekannt, so kann man die stopping power als keV/nm ausdrücken. Da die Dichte aber selten bekannt ist wird die stopping power $S(E)$ als $eV/10^{15} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$ ausgedrückt.

Die Abbremsenergie ist abhängig von der Geschwindigkeit der Projektile, dem Gewicht der Projektile, dem Ladungszustand der Projektile und der Zusammensetzung des Targets. Die Abbremsenergie ist also abhängig vom elektronischen und vom kinetischen abbremsen. Das kinetische abbremsen ist aber nur bei niedriger Energie ausschlaggebend.

Besteht die Probe aus mehreren Elementen so wird die stopping power gemäß der Bragg'schen Regel aus den gewichteten Anteilen der einzelnen Elemente zusammengesetzt. Jedes Element wird über die dichteunabhängige Einheit $eV/10^{15} \frac{\text{Atome}}{\text{cm}^2}$ ausgedrückt.

Tiefenprofil

Mit Hilfe der Abbremsenergie $S(E)$ lässt sich die Energieskala in eine Längenskala konvertieren. Dabei wird ein Targetatom in einer bestimmten Tiefe x der Probe mit der Energie des Projektils E_0 frei gesetzt. Das Targetatom hat nach dem Stoß die Energie E_T , womit die Energie folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$E_T(x) = (E_0 - \Delta E_{in}(x)) * k_r - \Delta E_{out}(x)$$

k_r ist dabei der kinematische Faktor, der das Verhältnis der Projektilenergie nach dem Stoß zur Energie vor dem Stoß ist, ΔE_{in} ist der Energieverlust des Projektils und ΔE_{out} der Energieverlust des Targetatoms.

4.6 XPS Analysen

Übersicht

Um mehr über die Chemie der Grenzflächen zu erfahren wurden manche Wafer mit XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) vermessen. Die Methode beruht auf dem äußeren Photoeffekt, d.h. es werden Photoelektronen aus den inneren Schalen eines Festkörpers mittels Röntgenstrahlung entfernt (9). Über die kinetische Energie der Photoelektronen kann die Bindungsenergie der Elektronen berechnet werden. Die Bindungsenergie ist dem Atom und dessen Orbital proportional.

4.7 Rasterelektronenmikroskop (REM), Energiedispersive Röntgenspektroskopie (XPS) und lichtmikroskopische Aufnahmen

Übersicht

Um einen genauen Eindruck der Bruchkanten der Blister und deren Form zu erhalten, wurden REM – und lichtmikroskopische Aufnahmen bei Infineon gemacht. Ferner konnte man einen Querschnitt der Schichten analysieren um hier Unterschiede zwischen den Abscheidearten zu detektieren. Für eine qualitative Analyse wurden bei manchen Proben auch EDX (energy dispersive x-ray spectroscopy) Aufnahmen gemacht.

Probenpräparation für das REM

Die Proben wurden aus dem 200mm Wafer herausgebrochen und zu 0,5 x 0,5 cm großen Stücken geschnitten. Danach wurden sie mit FAEL (Fenster Ätz Lösung) – Lösung (10%ige HF-Lösung) für 10 Sekunden geätzt und danach mittels Sputteranlage mit einer Gold/Palladium Mischung beschichtet, damit sich die Oberfläche im REM nicht aufladen konnte.

REM

Im REM wird mittels eines gebündelten Elektronenstrahles die Oberfläche eines Festkörpers abgerastert (10). Der Elektronenstrahl wird entweder über einen Wolframdraht oder einen LaB₆ Kristalles erzeugt, welche erhitzt werden und dadurch Elektronen emittieren. Mittels Feldemissionskathode (FEM) lassen sich qualitativ hochwertigere Elektronenstrahlen herstellen, da die Elektronen eine definierte Geschwindigkeit haben. Die FEM besteht aus einer Wolframspitze, aus der durch anlegen hoher elektrischer Felder Elektronen heraustunneln.

Der Primärelektronenstrahl erzeugt u.a. Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen mittels derer man die Topographie und den Materialkontrast detektieren kann.

EDX

Neben den Sekundärelektronen und Rückstreuielektronen werden auch Röntgenquanten erzeugt und analytisch verwertet, wenn der Elektronenstrahl ein inneres Elektron eines Atoms herausschlägt welches von einem anderen Elektron aus einer äußeren Schale nachbesetzt wird (10). Die Energiedifferenz der Orbitale ist der Energie des Röntgenquants äquivalent und spezifisch für ein Element. Die Konzentration eines Elementes ist wiederum äquivalent der Intensität der Röntgenquanten.

4.8 Kontaktwinkel

Übersicht

Die Versuche die bei den Wafern gemacht wurden umfassten auch das Ziel einer Funktionalisierung der Oberfläche. Eine schnelle Methode festzustellen, ob ein Versuch erfolgreich war oder nicht ist das Feststellen des Kontaktwinkels. Das Gerät mit dem bei Infineon gearbeitet wurde ist ein sehr einfaches Gerät, das jedoch zur schnellen Abschätzung des Kontaktwinkels ausreichte. Es bestand aus einer Lichtquelle, einem höhenverstellbaren Okular und dem in x-y-Richtung verstellbaren Proben­tisch (10). Mittels drehbaren Okulars wurde der Kontaktwinkel eingestellt und abgelesen. Das Lösungsmittel wurde händisch mittels Pipette auf die Waferoberfläche aufgetragen. Da im Reinraum, wo das Gerät sich befand, nicht mehr Flüssigkeiten als deionisiertes Wasser zur Verfügung gestanden sind, wurde nur mit dieser Substanz gearbeitet.

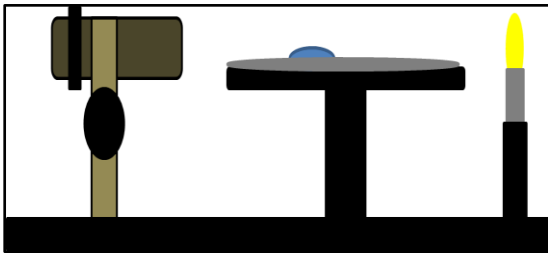


Abbildung 4.8 1: Das Kontaktwinkelmessgerät ist hier schematisch aufgezeichnet (Was sind die einzelnen Komponenten?). Der Tropfen wird mit einer Mikropipette auf den Wafer aufgebracht

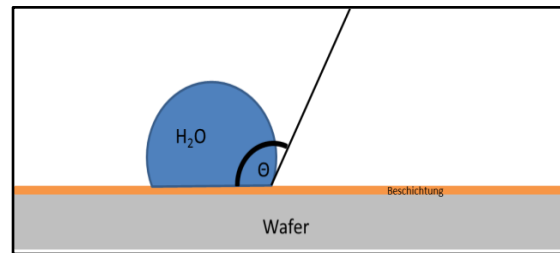


Abbildung 4.8 2: Der Kontaktwinkel wird wie in der Abbildung gezeigt, gemessen

Der Thetawinkel ist der gemessene Kontaktwinkel zwischen Tropfen und Oberfläche. Die folgenden Definitionen für den Kontaktwinkel sind gebräuchlich:

- 0 Grad ist die Oberfläche superhydrophil
- Bis 90 Grad ist die Oberfläche hydrophil
- 90 – 160 Grad ist die Oberfläche hydrophob
- > 160 Grad ist die Oberfläche superhydrophob

4.9 Beschreibung der Beschichtungsanlagen

Übersicht

Alle die in der Arbeit hergestellten Schichten wurden auf einer der vier beschriebenen Anlagen hergestellt. Dabei unterscheiden sich die Anlagen vor allem bei den zur Verfügung gestellten Gasen, der Leistung, der Waferhalterung und der Heizung der Waferhalterung. So ist es möglich USG auf allen vier Anlagen abzuscheiden. Der Unterschied zwischen den USG-Schichten liegt in der stöchiometrischen Zusammensetzung der Schicht sowie den Fremdatomen die teilweise mit den Prozessgasen mitgeliefert werden oder Verunreinigungen in der Kammer, die dann in die Schicht eingebaut werden können. Hier spielt beispielsweise Flur eine Rolle, da es zur Kammerreinigung verwendet wird.

Die Architektur der Abscheidekammern selbst ist bei allen verwendeten Kammertypen ähnlich, nur im Detail unterscheiden sie sich voneinander. So gibt es beispielsweise zwei unterschiedliche Möglichkeiten die Waferhalterung (Chuck) zu heizen oder die Möglichkeit von Doppelkammern, in der zwei Wafer gleichzeitig über eine Gasleitung beschichtet werden können.

4.10 Die Centura HDP

Einleitung

Eine der wichtigsten Anlagen mit der gearbeitet wurde ist die Centura HDP (11). Das Besondere an dieser Anlage ist die Anwesenheit zweier völlig unterschiedlicher Kammertypen. Der eine Kammertyp nennt sich DxZ und zählt zu den konventionellen PECVD Kammern. Die andere Kammer zählt zum HDP – Typ (High – Density - Plasma). Diese Kammer ist spezieller da mit dieser Kammer hohe Energiedichten im Plasma erreicht werden können.

Einsatzgebiet der HDP-Kammer

Die HDP in der Konfiguration wie sie bei Infineon verwendet wird dient zum Aufbringen von Silanglasschichten, die in der Halbleiterindustrie auch als Intermetallschichten oder als Passivierungsschichten dienen. Wafer sind durch Leiterbahnen strukturiert und besitzen daher auch Topographie. Sowohl der Raum horizontal zwischen den Leiterbahnen als auch der Raum vertikal zwischen den Schichten, der als IMD-Schicht (Intermetallschicht) bezeichnet wird, wird mit einem dielektrischen Material aufgefüllt das als dienen kann.

Durch die immer kleinere Architektur der Devices wird auch der Raum, auch als gap bezeichnet, zwischen den Leiterbahnen immer kleiner. In neueren Anwendungen sind 0,25µm durchaus Standard. Daher muss die Mobilität der Reaktanden zunehmen, da sie immer kleinere Zwischenräume mit einer gewissen Tiefe auffüllen müssen.

Eine höhere Mobilität der Ionen und Elektronen kann aber bei gleichbleibender oder immer größer werdender Wafergröße nur mit mehr Energieaufwand bewerkstelligt werden.

Die gaps zwischen den Leiterbahnen können mittels sputter-etch Verfahren zuverlässiger aufgefüllt werden, da während des aufwachsens der Schicht etwas von dem aufgewachsenem Material, physikalisch durch Ionenbeschuss, weider weggenommen (abgesputtert) wird.

Um den Anforderungen für kleinere Architekturen gerecht zu werden sind folgende Parameter wichtig:

- Niedere Drücke
- Höhere Elektronendichten
- Höhere Elektronen- und Ionenenergien
- Größere freie Weglänge der Elektronen

Einleitung zur Architektur:

Die Centura HDP 1 ist eine PECVD-Anlage die sowohl zum Beschichten wie auch zum Argon-Sputtern von Wafern verwendet werden kann. Sie hat zwei Ladestationen in die jeweils eine Kassette geladen werden kann. Von den sogenannten Load Chambers werden die Wafer in die Pufferchamber geladen, die ständig unter Vakuum stehen. Von der

Pufferchamber werden die Wafer in die Prozesskammern geladen. In jede Prozesskammer kann nur ein Wafer geladen werden. Die HDP in dieser Konfiguration hat drei Kammern. Die Kammern heißen A, B und C. Die Kammern A und C sind HDP-Kammern, d.h. high density plasma Kammern. Dieses hochdichte Plasma kann mit mehreren tausend Watt Leistung betrieben werden. Hingegen ist die Kammer B eine einfache PECVD Kammer welche eine geringere Leistung als die HDP Kammern besitzt und auch keine gesplittete Gaszuführung aufweist.

Übersicht:

Das Mainframe ist unten abgebildet. Die zwei Ladekammern (load chambers) sind hier im Vordergrund zu sehen. Die linke ist geöffnet, die rechte ist geschlossen. Die Schlitze in der geöffneten Ladekammer dienen dazu die Wafer mittels Roboterarm in die Pufferkammer zu transportieren. In der Pufferkammer haben bis zu 8 Wafer Platz. Von dieser Kammer aus werden sie dann in die weiteren Prozesskammern verteilt.

Über den Bildschirm rechts neben den schwarzen Boxen wird die Maschine bedient. Hier können über ein Graphical User Interface (GUI) alle Prozessparameter verändert oder während eines Prozesses beobachtet werden.

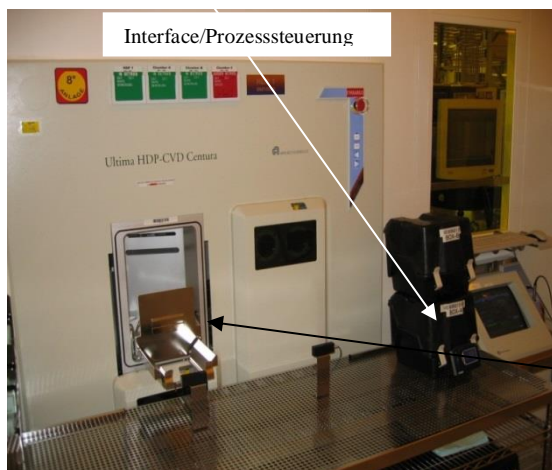


Abbildung 4.10 1: Die Vorderansicht der Centura HDP zeigt eine geöffnete und eine geschlossene Ladekammer sowie den Bildschirm der Prozesssteuerung

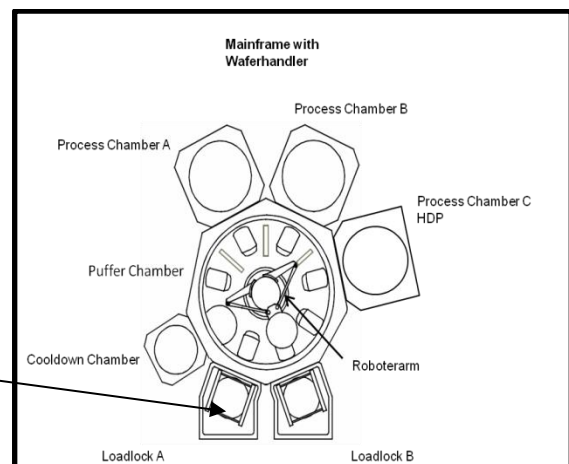


Abbildung 4.10 2: Anhand des schematischen Aufbaues der Centura HDP ist der Grundriss zu erkennen

Über den in der Abbildung 4.10.2 dargestellten schematischen Aufbau wird die Architektur der Anlage sichtbar. Wie man oben am Bild sieht ist der größere Teil der Anlage nicht vom Operator aus zu sehen.

Bisher wurde die Kühlkammer nicht erwähnt. Nach dem Beschichten hat der Wafer 300 - 400 Grad Celsius. Da die Kassette aus Plastik ist muss der Wafer vor dem Wiedereinordnen gekühlt werden. Wegen der geringen Drücke in den Kammern die im Millitorrbereich liegen ist zu wenig konvektive Kühlung vorhanden um die Scheiben auf diesem Weg wieder auf Raumtemperatur abzukühlen.

Der Weg den der Wafer nimmt bis er wieder in die Kassette kommt ist wie folgt:

1. Ladekammer A oder B wird evakuiert
2. Pufferkammer
3. Prozesskammer Beschichtung
4. Pufferkammer
5. Kühlkammer
6. Ladekammer A oder B
7. Ausladen

HDP-Kammeraufbau

Ein großer Vorteil der HDP-Kammer ist die Möglichkeit in situ abzuscheiden und sputterzuätzen. Das ist sowohl für Silanglas als auch für fluriertes Silanglas möglich. Indem man sowohl abscheidet als auch sputtert können die Kanten bei einem Graben verändert werden. Der Radius der Kantenbedeckung wird vergrößert oder das gesamte beschichtete Graben erst möglich. Die Energieeinkopplung über Radiofrequenz in die Kammer ist sowohl source wie auch bias gekoppelt.

Die Kammer besitzt drei unabhängige RF Generatoren. Zwei source RF Generatoren können über ein angepasstes Netzwerk bis zu 5000 Watt auf das Oberteil und 5000 Watt auf die Seite des induktiv gekoppelten Plasmas abgeben. Mittels dieser Energieeinkopplung können hochdichte Plasmen mit einer Dichte von $10^{11} - 10^{12}$ Ionen pro cm^3 erzeugt werden. Prozessgas wird über der Scheibe und seitlich in die Prozesskammer eingeströmt.

Der bias RF – Generator liefert bis zu 5000 Watt kapazitiv gekoppelten Plasmas. Der bias Generator wird gebraucht um den Ionen eine Richtung zu geben.

Der elektrostatische Chuck ist zum Festhalten des Wafers während des beschichtens nötig. Nachdem der Abscheidvorgang abgeschlossen wurde muss die Kammer gereinigt werden, da sich nicht nur am Wafer Rezipienten absetzen. Eine abseits liegende Plasmaquelle reinigt zusammen mit einem Mikrowellensystem die Kammer vor dem nächsten Beschichtungsvorgang durch Dissoziation von NF_3 .

Das nötige Vakuum wird von einer Turbopumpe erzeugt, welche ein Volumen von 1600 Liter pro Sekunde bewältigt.

Kammerkorpus

Die Kammerhülle besteht aus einem Aluminiumblock der symmetrisches abpumpen erlaubt. Ein Kühlkreislauf in der Kammerwand sorgt für die nötige Kühlung mittels Wärmetauscherflüssigkeit, was in den meisten Fällen deionisiertes Wasser ist. Ein kühlen der Kammerwand ist notwendig, da ansonsten zu viel des abzuscheidenden Materials an der Kammerwand abgeschieden werden würde.

Spulen für die RF

Die obere Spule liegt zwischen dem keramischen Dom und einer keramischen Platte welche

- a) Wärmeleitfähig ist
- b) Eine elektrische Isolation zur Kühlplatte ist

RF Energie wird durch die obere Spule welche eine variable Frequenz zwischen 0,2 und 2,0 MHz besitzt geliefert. Der obere Teil des Domes wird durch den Aufbau temperaturreguliert. Sie liefert maximal 5000 Watt Wärmeleistung und 3000 Watt Kühlleistung.

Die seitlichen Spulen liegen außerhalb des keramischen Domes. Die RF Energie wird wie am oberen Teil des Domes mittels Spule bei einer Maximalleistung von 5000 Watt und einer Frequenz zwischen 2.0 und 0.2 MHz an das Plasma vermittelt. Die seitlichen Spulen werden mit der Kühlflüssigkeit mitgekühlt. Der Seitenteil des Domes wird mit 4600 Watt Wärmeleistung und 2000 Watt Kühlleistung temperaturreguliert.

Damit die Spulen am oberen Teil und an der Seite bei richtiger Frequenz arbeiten kann, werden sie über die source abgeglichen.

Gaszuführung

Am oberen Teil des Domes wird Gas in die Kammer geleitet. Aufgabe der Gaszuführung ist eine uniforme Verteilung des Gases in die Kammer. Der Vorteil der Gaszuführung ist die unabhängige Gaseinleitung von Silan/Argon und Sauerstoff. Das Silan/Argon Gemisch wird über eine Düse an der Decke des Domes eingeleitet. Ringförmig um diese Düse sind an

einem Metallring mit zwei unabhängigen Gaseinleitungen 18 Düsen angebracht. Durch 12 Düsen wird Silan und durch 6 Sauerstoff eingeletet.

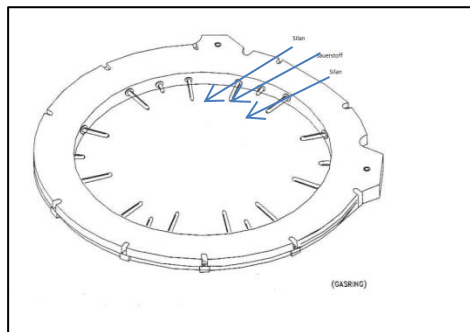


Abbildung 4.10 1 : Die Gaseinleitung wird mit dem Gaseinlassing realisiert. Über zwei separate Leitungen wird Silan und Sauerstoff eingeletet.

Elektrostatistischer Chuck

Die Waferhalterung wird in der Halbleiterindustrie auch Chuck genannt. Diese Halterung ist zusammen mit der Kathode ein Maschinenkörper. Der Chuck selbst muss gegen das Plasma geschützt werden, was zwei keramische Komponenten erledigen, das Coverteil und die darunter liegende Keramikmanschette. Vier mobile Pins die in den Chuck eingebaut sind sorgen dafür, dass die Scheibe mittels Roboterarm abgelegt werden kann. Der Wafer setzt auf den Pins auf, danach fahren die Pins in den Kathodenkörper zurück und legen den Wafer am Chuck ab.

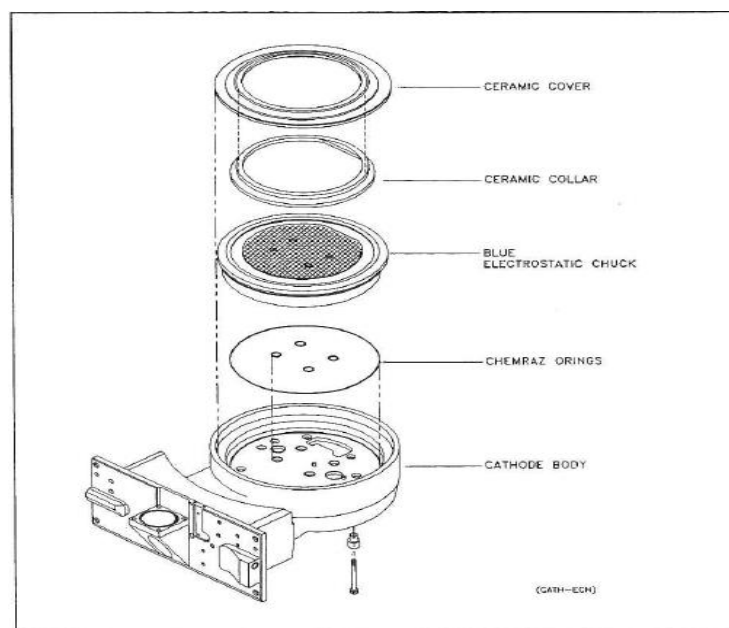


Abbildung 4.10 2 : Der elektrostatistische Chuck ist aus mehreren Elementen zusammengesetzt.

Durch den elektrostatisch aufgeladenen Chuck wird der Wafer auf der Waferhalterung festgehalten. Das ist nötig, da der Wafer von unten mittels Helium gekühlt werden muss. Um einen guten Temperaturtransport zu garantieren ist eine ausreichende Kontaktierung zwischen Chuck und Wafer nötig. Falls die nötige Depositionstemperatur erreicht werden muss ist zusätzlich eine Widerstandsheizung integriert.

Hohe Temperaturen am Wafer werden beim Sputterätzen durch die hohe kinetische Energie der Argonionen erzeugt. Dabei können die Temperaturen auf der Waferoberfläche ohne

einer Kühlung bis zu 750C° steigen. Bei diesen Temperaturen können die Strukturen auf den Wafern leiden. Leiterbahnen können defragmentieren oder andere Schichten schmelzen.

Konzepte des elektrostatischen Chucks

Wie erwähnt hält der elektrostatische Chuck den Wafer auf der Waferhalterung und gewährleistet einen guten Wärmetransport vom Wafer zum gekühlten Chuck. Dadurch ist es nicht nötig den Wafer auf der Waferoberfläche durch eine Klammer festzuhalten, welche durch den physischen Kontakt mit dem Wafer Partikel produzieren kann.

Das Prinzip ist eine Coloumb'sche Anziehung, welche durch separierte Ladungen wie sie in einem Kondensator vorkommen erhalten wird. Die elektrostatische Kraft ist proportional zur Wurzel der Potentialdifferenz und relativen dielektrischen Konstante und umgekehrt proportional zur Wurzel der Dicke des Dielektrikums.

Es gibt zwei Typen von Chucks, den monopolen und den bipolaren Chuck. Der monopolare Chuck funktioniert nur bei Anwesenheit von Plasma, der bipolare Chuck funktioniert auch ohne Plasma. Bipolare Chucks haben zwei unterschiedliche Zonen am Chuck, welche unterschiedlich geladen werden können, wodurch eine Haftkraft erzeugt wird. Monopolare Chucks werden relativ zum Untergrund positiv oder negativ geladen.

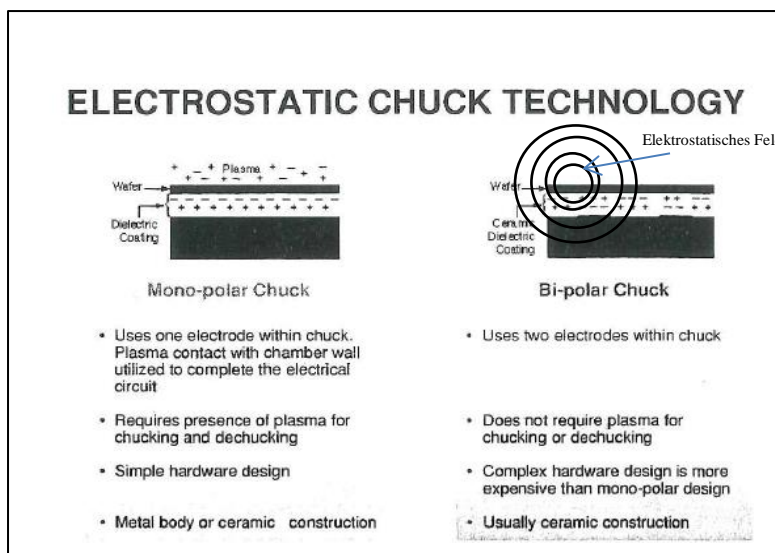


Abbildung 4.10 5: Vorteil des bipolaren Chucks ist die Unabhängigkeit der Haftung am Chuck vom Plasma.

4.11 Die P5000/48

Übersicht

Die P5000 ist in der PECVD die am häufigsten eingesetzte Anlage, da sie schon am längsten am Markt ist. In der benutzten Konfiguration besaß sie vier lamp heated Beschichtungskammern. Mit der P5000/48 wurde die USG – Passivierungsschicht auf das SiON standardmäßig abgeschieden wie auch der N₂O pre – clean im produktiven Prozess umgesetzt. Weil die mit der P5000/48 abgeschiedene USG – Schicht aus dem produktiven Prozess kam, ist diese auch die Referenzschicht für alle adaptierten USG – Schichten.

Architektur der P5000/48

Der augenscheinlich größte Unterschied zwischen der Centura HDP und der P5000 ist die Ladekammer. Sie besteht aus zwei mobilen Kassettenstationen die durch eine Türe beladen und entladen werden können. Die Kassettenstationen heißen A und B und können je nach bedarf mit einer Kassette mit maximal 25 Wafern bestückt werden, wobei die Stationen auf einem Schlitten parallel zur Türe hin und her gefahren werden.

Weiters besteht die P5000 aus einer Pufferchamber die, wie auch bei den anderen Anlagen, evakuiert werden kann und den vier Prozesskammern A,B,C,D welche immer unter Vakuum stehen. Alle Schritte werden wie auch bei den anderen Anlagen mittels Programmen und Sequenzen vollautomatisch gesteuert.



Abbildung 4.11 1: Ansicht der Front einer P5000. In der Mitte sieht man die Ladekammer

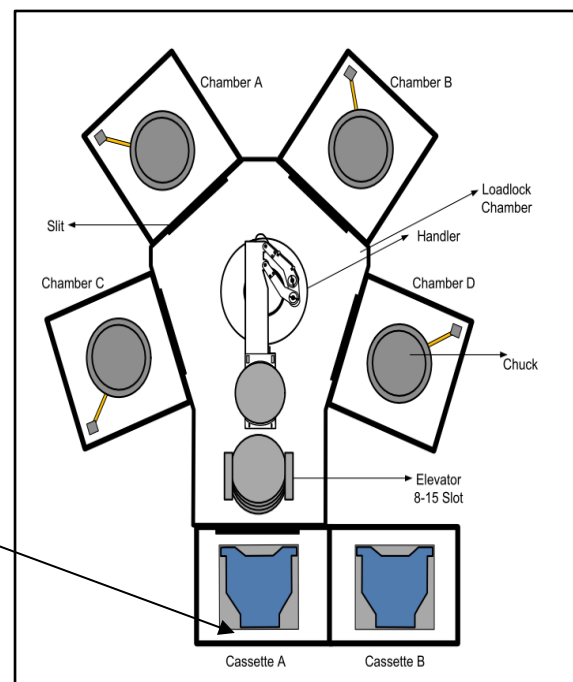


Abbildung 4.11 2 : Um eine Kassette in die Ladekammer einladen zu können, kann der Schlitten links bzw. rechts fahren

Die Prozesskammer DxZ und CxZ

Waferhalterung

Neben den HDP Kammern gibt es noch zwei weitere Kammertypen, welche sich CxZ und DxZ nennen. Diese Kammern arbeiten nicht nur mit geringerer Leistung, sie sind auch ansonsten unterschiedlich aufgebaut. Der Unterschied zwischen den beiden Kammertypen liegt am Chuck, auf dem die Wafer abgelegt werden. Bei der DxZ Kammer handelt es sich um einen Aluminiumblock auf dem eine Keramikplatte aufgesetzt ist, welche auf die Prozesstemperatur von 400C° aufgeheizt wird, bei der CxZ Kammer handelt es sich um einen mit Keramik (AlO₃) beschichteten Aluminiumblock, der ebenfalls auf 400C° aufgeheizt wird. Der Vorteil des beschichteten Aluminiumheizblocks in der CxZ Kammer ist die bessere

Temperaturverteilung und die längere Haltbarkeit, sowie der Vorteil nur mehr ein Teil verbauen zu müssen.

Heizung

Es gibt zwei unterschiedliche Möglichkeiten den Chuck aufzuheizen, die Widerstandsheizung und die Lampenheizung. Bei der Widerstandsheizung handelt es sich um eine Spule, die den Chuck heizt, bei der Lampenheizung sorgen zwanzig Lampenmodule à 1000 Watt dafür, dass der Chuck aufgeheizt wird. Stand der Technik ist heute die Widerstandsheizung, da damit der Temperaturverlauf konstanter eingestellt werden kann und damit bei der Abscheidung mögliche Fehler vermieden werden können. Der Chuck dient nicht nur als Auflage für den Wafer und als Heizeinheit, sondern auch als Elektrode.

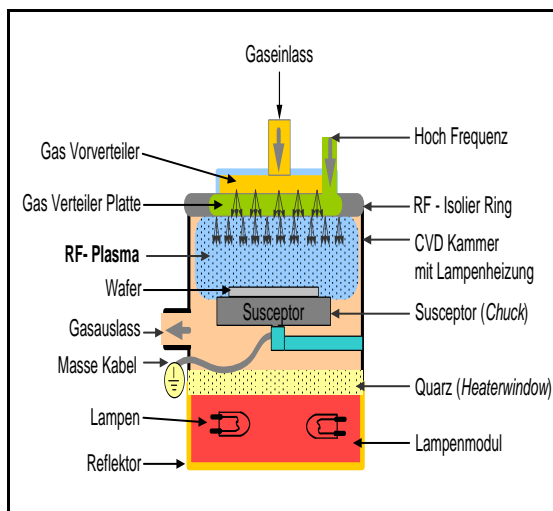


Abbildung 4.11 3: Innenansicht einer lampenbeheizten (LH Lamp Heated) Abscheidekammer.

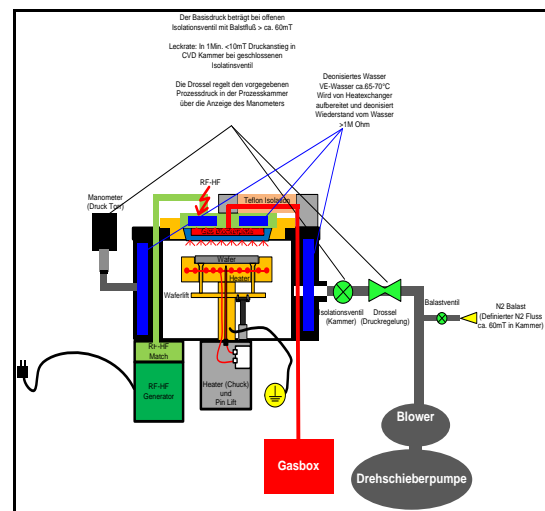


Abbildung 4.11 4 : Gesamtaufbau der DxZ/CxZ Kammer mit den wichtigsten Peripherieeinheiten neben der Abscheidekammer

Gasfluss

Jede Anlage ist an Gasleitungen angeschlossen die die Prozessgase bereitstellen. Der Gasfluss zu den Anlagen wird mittels Gasflusskontrollern gesteuert, wobei die Ströme über das Interface der Anlage eingestellt werden. Im Durchschnitt sind zehn Gase angeschlossen, die sich von Anlage zu Anlage unterscheiden können. Die Wichtigsten Gase in der PECVD sind Ar, He, SiH₄, N₂O, NH₃, N₂, NF₃, C₂H₄, CH₄, TEOS, WCl₆.

Im Unterschied zur HDP Kammer in der zwei Gasflüsse (SiH₄ und O₂) getrennt voneinander zugeführt werden können ist das bei der CxZ - und DxZ - Kammer nicht möglich. Die Gase werden nach dem Massenflüsskontroller (MFC) gemischt und dann in die Kammer eingeleitet. Um Fehler im Massenfluss zu vermeiden werden die Gase spätestens nachdem sie gemischt wurden geheizt, damit sie nicht kondensieren können und somit die Stöchiometrie nicht verfälscht und/oder die Leitung verlegt wird. Durch den Gaseinlass gelangt das Gasgemisch in die Kammer zum Gasvorverteiler und der Gasverteilerplatte in der das Gas bevor es zum Showerhead kommt verteilt wird.

Wird ein RF – Plasma gezündet, dienen der Showerhead als Elektrode und das Gasgemisch oder das Einzelgas wird am Showerhead zum Plasma geführt.

Showerhead

Einer der Faktoren die ein homogenes Plasma gewährleisten ist eine homogene Gaszuführung über den gesamten Showerhead. Wichtig ist dabei die Anzahl der Löcher im Showerhead, der Querschnitt der Löcher und die Form der Löcher. Der Showerhead selbst besteht aus Edelstahl und ist immer oberhalb des Wafers positioniert. Der maximale Abstand den der Showerhead zum Wafer besitzt ist dabei ein Zoll (2,54cm) oder 1000 Mils. Während

eines Beschichtungsprozesses ist der Showerhead, der gleichzeitig als Elektrode fungiert immer weniger als einen Zoll am Wafer.

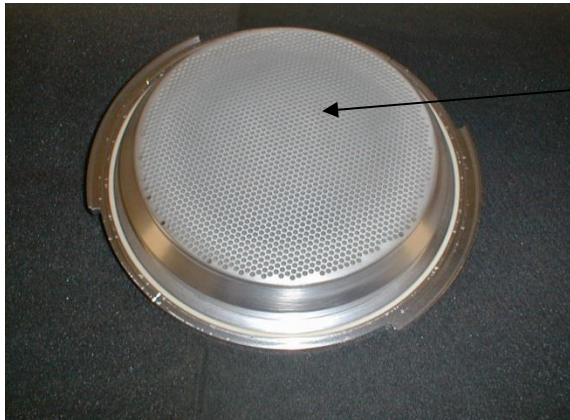


Abbildung 4.11 5 : Der Showerhead ist aus Edelstahl, in den eine große Anzahl Löcher gebohrt ist, die am unteren Ende konisch auslaufen.

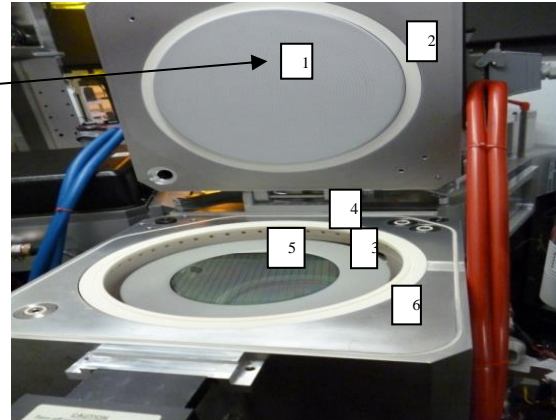


Abbildung 4.11 6: Ansicht einer geöffneten Abscheidungskammer mit den Unterschiedlichen beschriebenen Anlagenteilen

Die im Showerhead befindlichen Löcher werden konisch nach aussen hin größer, damit der Übergang Gas – Plasma ohne Rückkopplungen funktioniert. Das rechte Bild zeigt eine geöffnete Prozesskammer mit den sichtbaren Teilen:

1. Showerhead
2. Dichtungsring
3. Coverplate vom Chuck
4. Löcher für die Absaugung
5. Wafer
6. Kammerkörper

Kammerkörper

Der Kammerkörper besteht aus einem Aluminiumblock in dem Kanäle für die Wasserkühlung eingearbeitet sind. Um die Abscheidung möglichst auf den Wafer zu begrenzen wird der Kammerkörper kühl gehalten.

Druckeinstellung

Da die Abscheidung nur bei hohem Vakuum funktioniert sind Drehschieberpumpen nötig, die ein Vakuum von 0,1 Torr erzeugen können. Der Prozessdruck wird mit einer Drossel geregelt die am Kammerausgang zur Pumpe hin eingebaut ist. Je nach Drosselstellung wird mehr oder weniger Gas durchgelassen. Der Blower der sich vor der Pumpe befindet verhindert bei einem möglichen schlagartigen Rücklauf von der Pumpe zur Kammer ein Verschmutzen derselben.

Plasmaerzeugung

Das Radiofrequenzplasma wird kapazitiv eingekoppelt. Die Frequenz liegt in dem für die Industrie erlaubten Bereich von 13,56 MHz. Durch einen Hochfrequenzgenerator wird die Energie erzeugt und zur Kammer weitergeleitet. Über die RF – Match wird die Impedanz kontrolliert und bei Bedarf nachjustiert. Das ist nötig, da sich der Kammerkörper während des Abscheidungsprozesses mitbeschichtet und sich damit der Widerstand verändert.

4.12 Die P5000/46

Der Aufbau der P5000/46 ist praktisch gleich wie jener der P5000/48, der Unterschied liegt hier jedoch in der Art des Silan Precursors, welches TEOS (Tetraethoxysilan) ist. Mittels PECVD wird hier ebenfalls USG erzeugt. TEOS ist weniger giftig und weniger reaktiv als SiH_4 aber teurer.

4.13 Die Producer

Übersicht

Die Producer 1 unterscheidet sich nicht nur hinsichtlich der Ladekammer sondern auch hinsichtlich der Prozesskammer von den HDP, DxZ und CxZ Kammertypen. Mittels Producer können über PECVD ebenfalls die Schichten SiON und USG erzeugt werden. Die Producer war vor allem deshalb interessant, weil hier die Edelgase He und zusätzlich Ar angeschlossen waren.

Aufbau

Die Ladekammer der Producer ist über die gesamte breite des Mainframes zugänglich wie an den Bildern unten zu sehen ist, was vor allem das be- und entladen erleichtert. Die Ausnahme bei der Producer ist die Doppelkammer, in der zwei Wafer gleichzeitig prozessiert werden können. Daher kann man damit einen höheren Durchsatz erreichen als mit einer Einzelkammer. Der Nachteil ist aber eine gewisse Inhomogenität der Schichtdicke zwischen den beiden Wafers, da die Strömungsverhältnisse in der Kammer zwischen den Wafers unterschiedlich sein können.

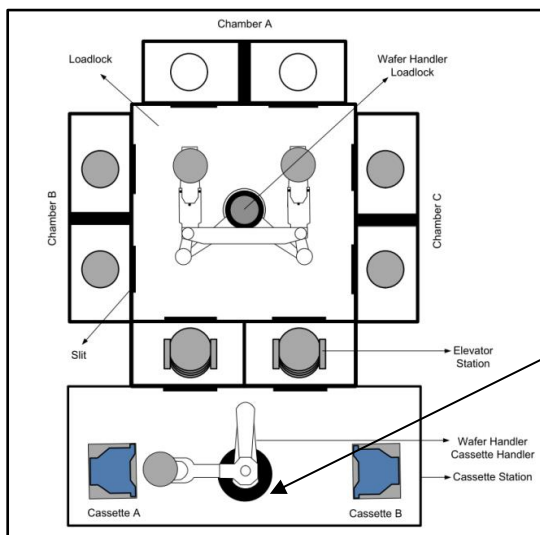


Abbildung 4.13 1: Das Doppelkammersystem der Producer erlaubt schnellere Durchsatzraten. Auf diesem Typ wurde in Helium verdünntes USG abgeschieden



Abbildung 4.13 2 : Frontansicht der Producer. Zu sehen ist die Ladekammer mit den beiden Plätzen für je eine Kassette und den schwarzen Klappen der Loadlock Chambers.

Prozesskammer

Anhand der Skizze sieht man die Doppelkammerkonfiguration. Dabei wird die Doppelkammer mit einer Drehschieberpumpe evakuiert und mit einer Gaszuleitung pro Doppelkammer versorgt, die sich auf die beiden Partitionen aufteilt. Kühlsystem, Druckregelung, Waferhalterung, Showerhead usw. sind gleich wie bei der DxZ - , CxZ - Kammer aufgebaut.

Da die Massenflusskontrollen vor dem Gasteiler sitzen kann es bei Defekten eines Gaszweiges zu ungleichem Gasfluss und damit unterschiedlicher Beschichtung kommen.

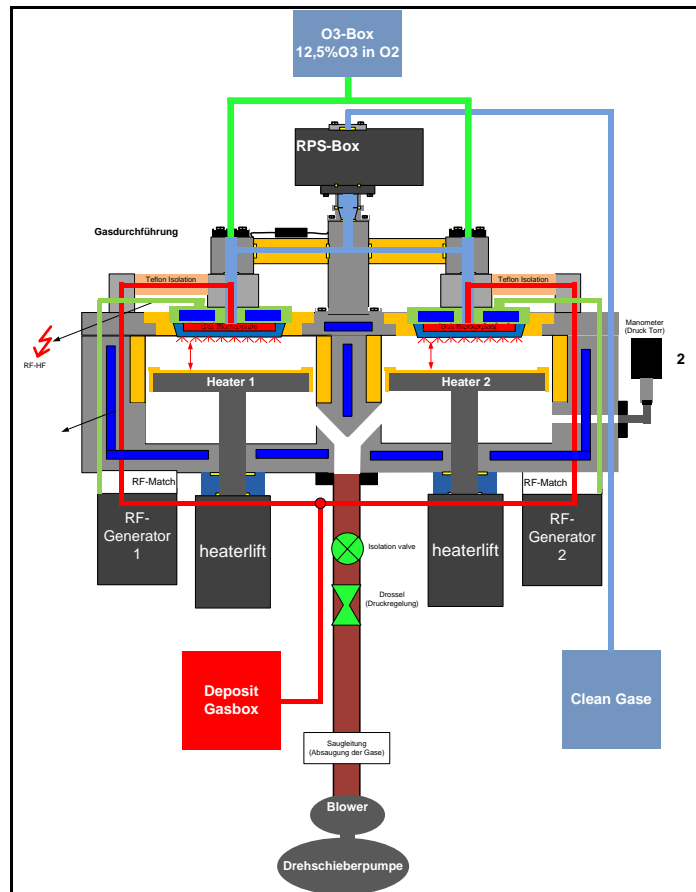


Abbildung 4.13 3 : Prinzipiell ist die Prozesskammer der Producer ähnlich aufgebaut wie jene der P5000. Auch die Gaszuführung ist für beide Kammern in einem gelöst.

RPS Box

Oberhalb der beiden Kammern sitzt die sogenannte RPS – Box (Remote Plasma Source), die für die Kammerreinigung eingesetzt wird. Mittels NF_3 wird die Kammer periodisch nach dem Beschichten von Wafern gereinigt, da ansonsten die gesamte Kammer zubeschichtet werden würde. Als Alternative zur direkten Kammerreinigung, bei der das Plasma direkt in die Kammer erzeugt wird, hat man mit der RPS – Reinigung ein umfassenderes und schonenderes Mittel zur Verfügung.

Die Reinigung ist mittels RPS - Box schonender, da die Geschwindigkeiten der Ionen und Radikale in der Kammer langsamer sind und vor allem den Chuck nicht beschädigen. Ein weiterer Vorteil ist das mitreinigen des Showerheads selbst sowie den Leitungen dahinter.

Während der Abscheidung beschichtet sich der Showehead und auch die Löcher im Showehead mit, was dazu führt, dass die Gaszuführung durch den Showerhead nicht mehr gleichmäßig ist. Mit der normalen Kammerreinigung ist das Mitreinigen der Stellen am Showehead nicht ausreichend, während man mit der RPS – Reinigung sehr gut auch diese Stellen erreicht.

4.14 Zusammenfassung der Anlagentypen

Mit den oben beschriebenen Anlagen ist ein Großteil der 200mm Anlagen abgedeckt, welche in der PECVD eingesetzt werden und mit denen auch im Rahmen der Diplomarbeit gearbeitet wurde. Die vier Anlagentypen waren die Centura HDP, die P5000/48 und P5000/46 sowie die Producer 1 mit vier unterschiedlichen Kammertypen für den Prozess. Diese waren die HDP -, die DxZ - und CxZ – sowie die Dopplekammer, wobei sich DxZ - und CxZ – Kammern nur im Aufbau des Chucks unterschieden. Ferner kann die Waferhalterung lampenbeheizt oder widerstandsbeheizt sein.

SiON und SiN wurden nur auf der Centura CxZ abgeschieden, USG wurde auf allen Anlagen abgeschieden, da man damit drei unterschiedliche USG – Spezies herstellen und weiteruntersuchen konnte. Dabei handelt es sich um das:

- Silan USG auf der DxZ -, CxZ - und Doppelkammer
- HDP USG auf der HDP Kammer
- TEOS USG auf der DxZ und CxZ Kammer

4.15 Bedienung der Abscheideanlagen

Übersicht

In Kapitel 7.1 sieht man anhand des Fotos der Centura HDP rechts neben dem Mainframe das Interface mittels dem die Anlage gesteuert wird. Über das GUI (Graphical User Interface) werden sowohl Rezepte wie auch Sequenzen geschrieben als auch die Anlagen gewartet. Jede einzelne Kammer an einer Anlage kann damit angesteuert werden und dadurch auch unabhängig von den anderen Kammern programmiert/gewartet werden. Jede Anlage hat ihr eigenes Interface, das GUI ist aber auf jeder Anlage sehr ähnlich.

4.16 Beschreibung der Rezepte

Rezepte für eine Anlage sind Programme in denen unterschiedliche Parameter die anlagenspezifisch sind beschrieben werden und veränderbar sind. Jedes Rezept besteht aus mindestens einem Prozessschritt. In diesem Prozessschritt sind die wichtigsten Parameter:

- Die verwendete Kammer
- Die Zeitdauer des Prozessschrittes
- Der Druck in der Prozesskammer
- Die Temperatur am Chuck (Waferhalterung)
- Die Leistung des Plasmas
- Der Elektrodenabstand
- Die Gasspezies und ihr Fluss

Die einzelnen Prozessschritte werden in einem Rezept zu einem Ganzen zusammengefasst. Prinzipiell besteht jedes Rezept aus drei Abschnitten:

- Einfahren der Gase bis der Prozessdruck erreicht ist
- Der Abscheideschritt
- Auslaufen der Gase

Jeder dieser drei Abschnitte ist in Subschritte unterteilt. Rezepte bestehen normalerweise daher aus sechs bis über 20 Einzelschritten. Rezepte sind nicht nur für die Abscheidung wichtig sondern sind auch nötig um nach dem Abscheiden die Kammer zu reinigen oder die prozessierten Wafer zu kühlen bevor sie wieder ausgeschleust werden.

Unten ist ein Rezept zu sehen, welches bei einem der Testläufe zum Einsatz kam. In dem Fall besteht das Rezept aus 8 Einzelschritten. Schritt 1 und 2 dienen hier der Stabilisierung der Prozessgase, Schritt 4 und 5 sind Prozessschritte auf dem am Wafer abgeschieden wird und die Schritte 7 und 8 dienen dem Herunterfahren der Gase. Die Schritte 3 und 6 sind für dieses Rezept nicht von Bedeutung, könnten aber für alternative Prozesse eingesetzt werden.

Die wichtigsten Schritte und ihre Bedeutung:

- *Step Selection*: Hier wird die Prozesskammer definiert. Es kann keine Kammer bestimmt werden oder auch alle Kammern, die an das Mainframe angeschlossen sind
- *Maximum step time*: damit wird die Zeitdauer für den betreffenden Schritt definiert
- *Pressure*: Hier wird der Kammerdruck vordefiniert
- *RF power*: Die RF – Leistung die eingekoppelt werden soll
- *Heater Temperature*: Die Temperatur, die der Chuck haben soll

- *Heater spacing*: Der Abstand zwischen Wafer und Showerhead. 1000 Mils sind 2,54cm oder 1 Mils ist 25,4µm. 1000 Mils ist auch die maximale vertikale Ausdehnung des Plasmas
- *Gas names and flows*: Hier definiert man die Gasspezies und den Fluss. Scc bezeichnet square cubic centimeter

Tabelle 4.16 1 : Zu sehen sind die Definitionsmöglichkeiten um die Kammer einzustellen und der erste Schritt eines Rezeptes.

Step number,Name	1.Heat up
Step selection	B
Step end control	By time
Maximum step time	xx sec
Endpoint selection	No Endpoint
Pressure	Servo 3 Torr
Pressure ramp rate	0 Torr
RF power,RF2 power	0W / 0W
Heater Temperature	400°C
Temperature ramp	0.0 C/sec
Heater spacing	500 mils
Temp.preset	200 Watts
Liq Ing Bypass	To Chamber
Puls RF frequency	15258 Hz
Puls RF duty cycle	0%
DPA RF	Off
Gas names and flows	
	Si-H4-HI: xx scc
	N2O-HI: xx scc

4.17 Beschreibung der Sequenzen

Mittels Sequenzen bündelt man die Rezepte zu einem Ganzen und definiert damit den Ablauf, den der Wafer nehmen soll. Je nachdem in welcher Station der Ladekammer die zu prozessierenden Wafer liegen wird dort die Sequenz für jeden Wafer einzeln oder für die ganze Kassette auf einmal eingetragen. Das passiert über dasselbe Interface mittels dem selben GUI, welches zum Schreiben der Rezepte verwendet wird.

Eine typische Sequenz wie sie für die Experimente verwendet wurde war:

1. Die Prozesskammer A,B,C,D auswählen und danach das geschriebene Rezept eintragen
2. Rezept zum Reinigen der Kammer (der Wafer wird automatisch vor der Reinigung der Prozesskammer in die Pufferkammer ausgefahren)
3. Rezept zur Kühlung des Wafers
4. Wafer in die gleiche Kassette zurücküberführen

Diese Sequenz wird zum Beschichten eines Wafers verwendet, sie könnte aber um beliebig viele Schritte, d.h. Rezepte erweitert werden. Die Sequenz wird von der Maschine Punkt für Punkt abgearbeitet. Gewisse Technologien benötigen beispielsweise ein Zurückätzen einer Schicht, was oft am gleichen Mainframe passiert. Dann würde man nach Schritt 2 die Ätzkammer definieren und das jeweilige Rezept eintragen.

5 Experimenteller Teil der Masterarbeit

5.1 Ergebnisse der Arbeit

Übersicht

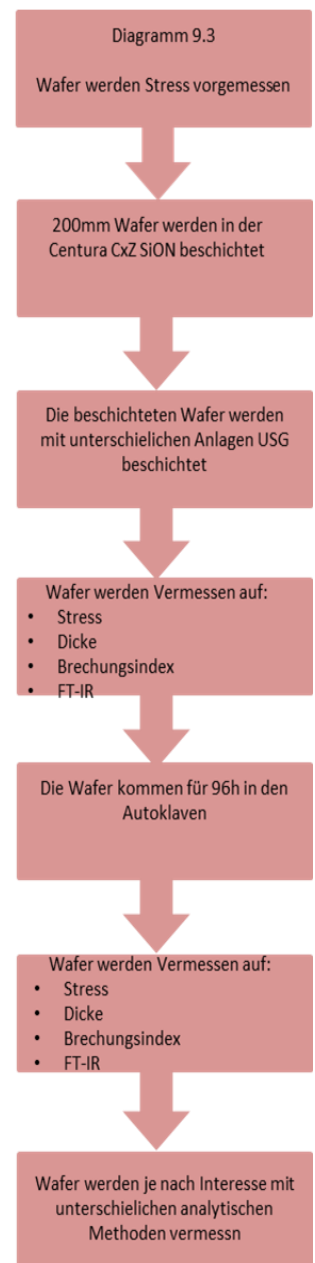
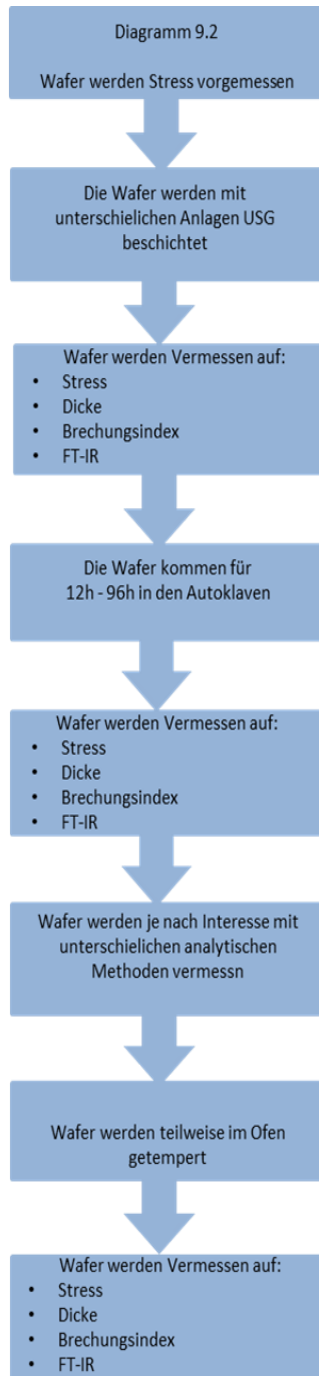
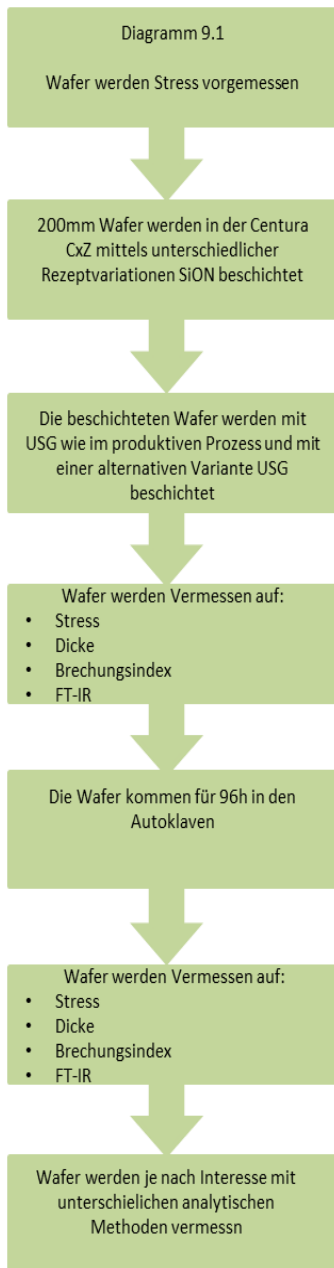
Die Experimente wurden in drei Abschnitte eingeteilt, wobei sich der erste Abschnitt mit Variationen des SiON-Rezeptes beschäftigte mittels dem versucht wurde einen Zusammenhang zwischen Rezeptqualität und Blisterbildung zu erhalten. Die wichtigsten Variationen an dem Rezept wurden während und nach dem Abscheideschritt getätigt, um am Interface unterschiedliche Zustände generieren zu können, welche die Haftung zwischen SiON und USG direkt beeinflussten.

Da Silan- und in etwas abgeschwächterer Form TEOS- und HDP-USG teils starke Unterschiede vor und nach dem Autoklaventest im FT-IR zeigten, lag der Schwerpunkt im zweiten und dritten Abschnitt der Untersuchungen bei den USG-Schichten. Da es das USG war, welches sich von der SiON-Schicht blisterförmig abhob wurden USG-Schichten auf unterschiedlichen Anlagentypen abgeschieden. Es wurde sowohl auf SiON als auch direkt am Wafer USG abgeschieden, da einerseits Blisterbildung nach dem Autoklaventest untersucht wurde, andererseits die reine USG – Schicht am FT – IR besser untersucht werden konnte. Die Flussdiagramme unten zeigen die Arbeitsschritte die in den drei Abschnitten getätigt wurden.

Das Diagramm 9.1 zeigt die Arbeitsschritte die während des ersten Abschnitts der Diplomarbeit vorgenommen wurden. Der Schwerpunkt wurde auf die Haftung zwischen den Schichten und damit dem Interface gelegt. Daher wurden hier nur die SiON Rezepte verändert und das USG-Rezept unverändert gelassen.

Diagramm 9.2 zeigt den Ablauf zur Analyse der unterschiedlichen USG – Spezies. Dabei wurde USG direkt am Wafer abgeschieden, um das Verhalten der Schichten bezüglich Feuchtigkeit gezielter beobachten zu können.

Das Diagramm 9.3 zeigt den dritten Abschnitt der Arbeit. Der Schwerpunkt lag hier auf der Beobachtung unterschiedlicher USG – Spezies auf SiON. Hier wurde versucht über Variationen bei der USG– Abscheidung und der Anwendung unterschiedlicher USG– Spezies und Rezeptvariationen Haftungsunterschiede zu generieren.



5.2 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und Silan - USG

Übersicht

In Kapitel 4 wurde beschrieben, wie die Anlagen mittels GUI programmiert werden und welche Aufgaben Rezepte und Sequenzen haben. In diesem Kapitel werden die Fragen, die zu den Experimenten geführt haben und die praktische Umsetzung der Experimente mittels der zugrundeliegenden Rezepte beschrieben.

5.3 Variationen an den Rezepten

Der Abscheideschritt (DEP oder Depositschritt) und die Schritte nach dem Abscheideschritt waren experimentell die wichtigsten Teile des Rezeptes, da DEP-Schritt die gesamte Schicht gebildet wird und sich damit die Charakteristika einer Schicht ausformen.

Bei manchen Rezepten wurde nach dem Depositschritt ein weiterer Schritt eingefügt, in dem noch weitere Parameter verändert wurden um die SiON - Oberfläche chemisch oder physikalisch zu adaptieren.

Vor dem USG- Abscheideschritt wurde in der Version, die im Nachfolgenden als Standardversion bezeichnet werden wird und in der das USG auf SiON auch nach dem Autoklaventest nicht delaminiert, ein N₂O – Plasma geschaltet und das USG in situ auf SiON abgeschieden. Erwiesenermaßen wurden durch diese Methode die Blister nach dem AC - Test vermieden.

Erstes Ziel war es, zuerst Alternativen zu dem Standardprozess zu finden und die Ursachen für die Blisterbildung im SiON - bzw. USG – Rezept, falls vorhanden, zu finden. Um die Fragen die gestellt werden besser verstehen zu können und mit dem Wissen aus Kapitel 3 und 4 kann der Standardprozess oder auch der produktive Prozess kurz beschreiben werden.

Der Standardprozess der blisterfreiheit garantiert sieht folgendermaßen aus:

1. Herstellung der SiON- Schicht auf der DxZ- Kammer der Centura HDP
2. N₂O- Plasma in der Lamp Heated Kammer der P5000/48
3. USG- Abscheidung in der Lamp Heated Kammer der P5000/48

Die Rezepte 2 und 3 erfolgen in einer Sequenz, d.h. beide Rezepte werden ohne ausfahren des Wafers aus der Abscheidekammer (in situ) getätigt.

Folgende Fragen wurden aufgeworfen:

1. Gibt es eine Alternative zum N₂O Plasma mit gleicher blisterunterdrückenden Wirkung?
2. Welche Wirkung hat das N₂O- Plasma, wenn es nach der SiON- Abscheidung und damit auf der Centura HDP realisiert wird?
3. Gibt es Verunreinigungen der SiON- Oberfläche beim Transport von einer zur anderen Anlage?
4. Ist ein fehlerhaftes SiON- oder USG- Rezept Schuld an der Delamination?
5. Kann die SiON-USG- Abscheidung in einem Rezept ohne Lachgasplasma passieren und lässt sich damit Blisterbildung vermeiden?
6. Ist bei 400C° Wafertemperatur eine Reaktion der Prozessgase auf der SiON- Oberfläche möglich?

Frage 1: Gibt es eine Alternative zum N₂O Plasma mit gleicher positiver Wirkung?

Da angenommen wurde, dass mittels Lachgasplasma vor der USG-Abscheidung die SiON-Oberfläche in irgendeiner Weise chemisch oder physikalisch funktionalisiert wurde, wurde untersucht, ob mittels N₂ Plasma eine ähnliche Wirkung erzielt werden konnte. Im Unterschied zum Lachgasplasma wurde das Stickstoffplasma aber direkt nach dem SiON-

Abscheideschritt geschaltet. Danach wurde USG auf der P5000 (Lamp Heated) abgeschieden und der Wafer für die Feuchtebelastung in den Autoklaven gegeben. Ursprünglich wird das Rezept nach 5.3 1 verwendet, das adaptierte Rezept 5.3 2 wurde für diesen Versuch geschrieben.

Tabelle 5.3 1 : Hier ist der Teil des Rezeptes zu sehen, der zum Zeitpunkt der Abscheidung beginnt und bis zum Ende des Rezeptes läuft.

Step number,Name	4.DEP	6.Purge	7.Pump
Step selection	B	B	B
Step end control	By Time	By Time	By Time
Maximum step time	95 sec	x sec	xx sec
Endpoint selection	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint
Pressure	Servo 3 Torr	Servo 3 Torr	Throttle fully open
Pressure ramp rate	0 Torr	0 Torr	0 Torr
RF power,RF2 power	185W / 0W	0W / 0W	0W / 0W
Heater Temperature	400°C	400°C	400°C
Gas names and flows			
	Si-H4_HI: xx scc	Si-H4_HI: xx FPmp	Si-H4_HI: xx FPmp
	N2O-LO: xx scc	N2O-LO: xx scc	N2O-LO: xx FPmp
	N2 : xx scc	N2 : xx scc	
	NH3 : xx scc	NH3 : xx FPmp	NH3 : xx FPmp

Tabelle 5.3 2 : Nach dem 4. Schritt wurde ein N₂ Plasmaclean eingeschoben der zeigen sollte, ob der eine ähnliche Wirkung wie ein N₂O Plasmaclean hat.

Step number,Name	4.DEP	5.N2 Plasma	6.Purge	7.Pump
Step selection	B	B	B	B
Step end control	By Time	By Time	By Time	By Time
Maximum step time	95 sec	100sec	5 sec	10 sec
Endpoint selection	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint
Pressure	Servo 3 Torr	Servo 3 Torr	Servo 3 Torr	Throttle fully open
Pressure ramp rate	0 Torr	1 Torr	0 Torr	0 Torr
RF power,RF2 power	185W / 0W	185W / 0W	0W / 0W	0W / 0W
Heater Temperature	400°C	400°C	400°C	400°C
Gas names and flows				
	Si-H4_HI: xx scc		Si-H4_HI: xx FPmp	Si-H4_HI: xxFPmp
	N2O-LO: xx scc		N2O-LO: xx scc	N2O-LO: xx FPmp
	N2 : xx scc	N2 : 3000 scc	N2 : 3000 scc	
	NH3 : xx scc		NH3 : xx FPmp	NH3 : xx FPmp

Das N₂ Plasma ist hier direkt hinter dem DEP - Abscheideschritt geschaltet. Damit wurden in dem Versuch zwei Dinge getestet:

1. Hilft ein alternatives Plasma gegen die Blisterentstehung
2. Hilft das Plasma, wenn man es gleich hinter dem SiON- Abscheideschritt schaltet

Weitere Fragen, die man aus den vorhergehenden Ergebnissen ableiten konnte waren:

- Kann man das N₂O Plasma auf der P5000/48 umgehen?
- Gibt es eine Wirkung durch den DEP Abscheideschritt, der Blisterbildung begünstigt?
- Ist die Wirkung des N₂ Plasmas trotz Luftkontaktes gegeben?
- Ist das N₂ eine (billige) Alternative zum Lachgas?

Das Rezept PR USG 600 wird später noch genauer beschrieben werden. Es genügt bis hierher zu wissen, dass damit 600nm USG auf 400nm SiON mittels der P5000/48 abgeschieden wurden.

Abscheiderate

Wie man am DEP – Schritt der Rezepte sieht wird für 95 Sekunden abgeschieden, damit man eine Zieldicke von 400nm erreicht. Wie in Kapitel 4 beschrieben ist, kann mittels Optiprobe die Dicke nachgemessen werden. Pro Sekunde werden für SiON

$$\text{Dep Rate} = \frac{400 \text{ nm}}{95 \text{ sec}} = \frac{4,21 \text{ nm}}{\text{sec}} = \frac{252,6 \text{ nm}}{\text{min}}$$

abgeschieden.

Belastung der Schichten

Nach 96 Stunden bei 121 Grad, 100% Luftfeuchtigkeit und 2 bar im Autoklaven wurden unter dem Lichtmikroskop und mittels REM Bilder der Oberfläche wie auch Schnitte durch den Wafer gemacht um einen Querschnitt der Schichten zu erhalten.

Der Autokalventest wie auch die Untersuchungen am REM wurden von eigens dafür ausgebildeten Personal durchgeführt.

Ergebnisse:

Nach dem Autokalventest konnten unter dem Lichtmikroskop keine Blister festgestellt werden. Daher kann man folgendes Schlussfolgern:

- Es entstehen keine Verunreinigungen durch die Reinraumluft auf der SiON - Schicht
- N₂ wirkt Blister entgegen
- Nach oder am Ende des DEP – Schrittes im SiON – Rezept wird die Oberfläche in irgend einer Weise verunreinigt
- Unterschiedliche Oberflächenzustände, wie sie mit N₂ - oder N₂O - Plasmen erzeugt werden, haben eine ähnliche Wirkung

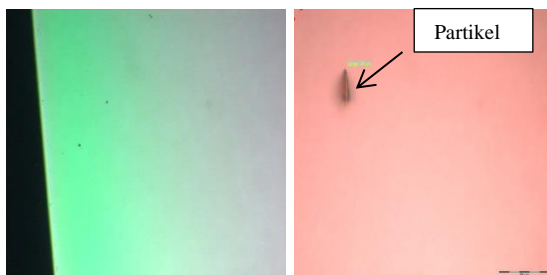


Abbildung 5.3 1 : Lichtmikroskopische Aufnahme der mit N₂ gereinigten SiON-Oberfläche (links) und der mit Lachgas gereinigten Oberfläche (rechts). Hier sind keine Blister zu sehen.

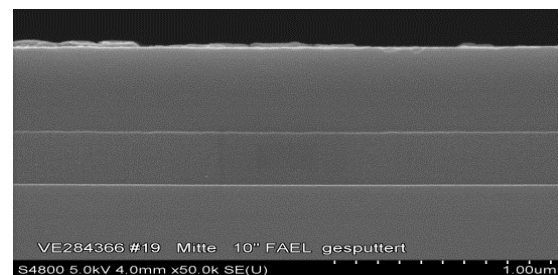


Abbildung 5.3 2 : Haften Schichten aufeinander, dann sieht man, wie zwischen SiON und USG, eine klar abgegrenzte Kante.

Um den Vergleich zu haben wurde das Experiment genau wie oben anstatt mit N₂ mit Lachgas getestet und wie erwartet wurden auch hier keine Blister gefunden.

Mit dem Experiment aus Frage 1 konnte man gleichzeitig die Fragen zwei und drei beantworten, worauf gleich zu Frage 4 übergegangen werden konnte:

Frage 4: Ist ein fehlerhaftes SiON – oder USG – Rezept Schuld an der Delamination?

Welche Parameter bei der SiON-Abscheidung haben einen negativen Effekt auf die Haftung der USG– Schicht von SiON?

Die plausibelste Annahme war, dass noch in der SiON- Abscheidungskammer die SiON– Oberfläche verändert werden musste. Dies konnte man annehmen, da der Transport an Reinraumluft oder negative Effekte vor und während der USG – Abscheidung ausgeschlossen werden konnten.

Die einzigen Verbindungen, die sich in der SiON– Abscheidungskammer nach dem DEP-Schritt finden lassen, sind für sehr kurze Zeit die dissoziierten Spezies des Prozessgases und in geringem Ausmaß das Prozessgas selbst.

Wenn man sich den Purge– Schritt im Rezept aus Tabelle 5.3.2 ansieht, so fällt auf, dass erstens kein Plasma mehr brennt, was daran zu erkennen ist, dass die R.F. power auf 0W gestellt wurde und zweitens die Kammer für 5 Sekunden mit Lachgas und Stickstoff gespült wird, bevor alle Gase im Pump - Schritt abgestellt werden und die Kammer damit frei von allen Prozessgasen ist. Aus den beiden vorhergehenden Versuchen war aber erwiesen, dass es keine Blisterbildung bei Anwendung des N₂ – und N₂O - Plasmas gab, obwohl der gleiche Purge – und Pump - Schritt angewendet wurde.

Es wurde daher davon ausgegangen, dass bei dem von Plasma unbehandelter Oberflächen die Gaseffekte vom Purge – Schritt ausreichen um Blister zu verursachen, also Gasmoleküle an der Scheibenoberfläche adsorbieren konnten.

Daher wurde im nachfolgenden Experiment der Gasfluss nach dem DEP – Beschichtungsschritt für 100 Sekunden ohne Plasma fortgeführt, womit eine Verschlechterung der Haftung und damit mehr Blister erwartet werden konnten. Dieser Schritt wird als GAS DEP (gas deposit) bezeichnet.

Tabelle 5.3 3 : Mittels des fünften Schrittes wurde Prozessgas über SiON geleitet und danach USG darauf abgeschieden. Hier konnte man nach dem Autoklaventest viele Blister beobachten.

Step number,Name	4.DEP	5.GAS DEP	6.Purge	7.Pump
Step selection	B	B	B	B
Step end control	By Time	By Time	By Time	By Time
Maximum step time	95 sec	100sec	5 sec	10 sec
Endpoint selection	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint
Pressure	Servo 3 Torr	Servo 3 Torr	Servo 3 Torr	Throttle fully open
Pressure ramp rate	0 Torr	1 Torr	0 Torr	0 Torr
RF power.RF2 power	185W / 0W	0W / 0W	0W / 0W	0W / 0W
Heater Temperature	400°C	400°C	400°C	400°C
Gas names and flows				
	Si-H4_HI: xx scc	Si-H4_HI: xx scc	Si-H4_HI: xx FPmp	Si-H4_HI: xx FPmp
	N2O-LO: xxsec	N2O-LO: xxsec	N2O-LO: xx scc	N2O-LO: xx FPmp
	N2 : xx scc	N2 : xx scc	N2 : xx scc	
	NH3 : xxsec	NH3 : xx scc	NH3 : -xxFPmp	NH3 : xx FPmp

Im Rezept aus Tabelle 5.3.3 werden alle Gase über den beschichteten Wafer geleitet. Darüber hinaus wurden aber auch die Einzelgase Silan, Lachgas und Ammoniak über die SiON – Schicht geleitet um ein mögliches Gas auszumachen, das vielleicht hauptverantwortlich für die Delamination ist.

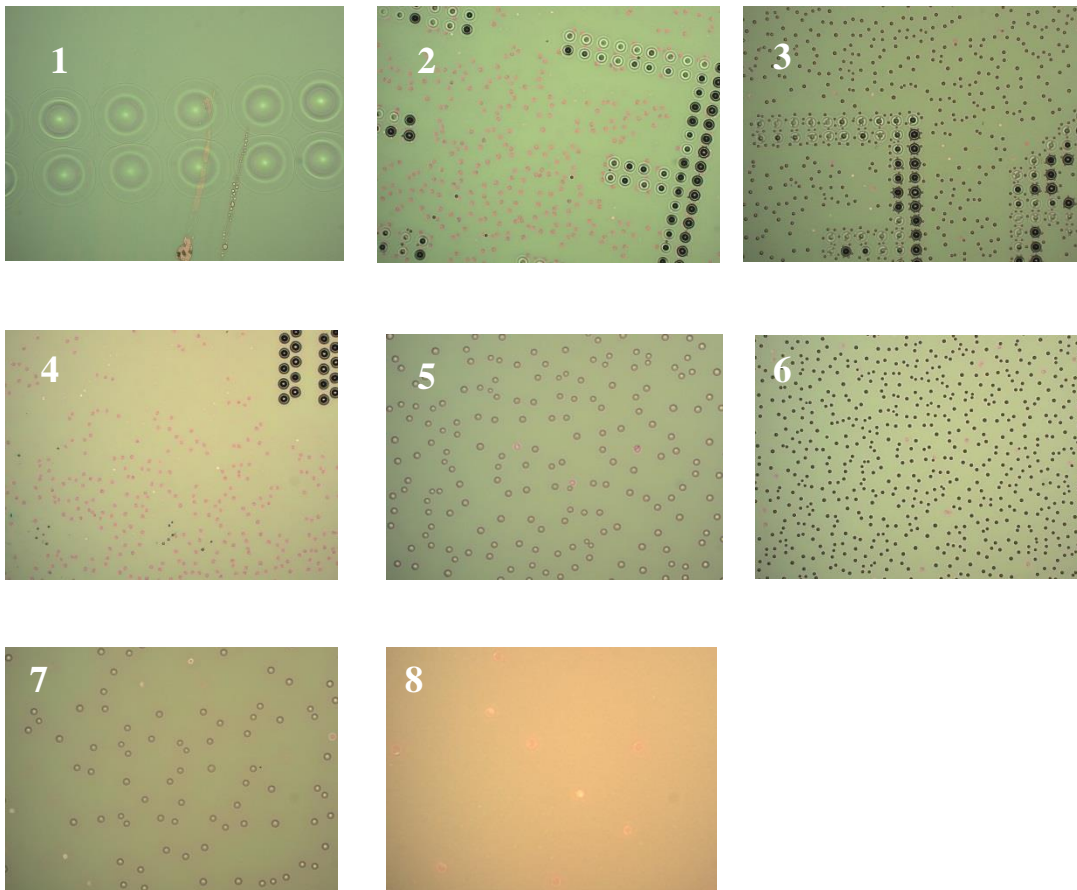
Außerdem wurden Kombinationen von Ammoniak/Silan, Lachgas/Stickstoff und Lachgas/Silan über die SiON – Oberfläche geströmt.

Tabelle 5.3 4 : Die Ergebnisse der Gasabscheidung auf der Oberfläche von SiON nach dem Kontaktwinkeltest mit Wasser zeigen in der Mehrzahl der Fälle Blisterbildung.

Nr.	Gas	Gasfluss [scc]	Blister
1	Silan	40	nein
2	Ammoniak	53	ja
3	Lachgas	83	ja
4	Ammoniak&Lachgas	53 & 83	ja
5	Lachgas&Stickstoff	83 & 3000	ja
6	Lachgas&Silan	83 & 40	ja
7	NH ₃ &N ₂ &N ₂ O&SiH ₄	53 & 3000 & 83 & 40	ja
8	kein Gasfluss	0	ja

Wie man anhand der Tabelle sieht, sind bis auf den Silangasfluss alle Proben, so wie auch der Standardprozess ohne N₂O Plasma mit Blistern übersät.

Hier sind einige Beispielfotos des SiON:USG Schichtstacks der einzelnen Gasflüsse abgebildet, wie sie in der Tabelle 5.3 4 beschrieben sind.



Um die Effektivität des N₂O Plasmas zu testen wurde dasselbe Experiment wie oben wiederholt und wie gewohnt vor der USG-Abscheidung auf der P5000/48 ein

Lachgasplasma geschaltet. Dabei war bei keinem einziger Wafer eine Delamination beobachtbar.

Aus den Experimenten konnte man also folgern, dass:

- Gase bis auf N₂ und in geringer Konzentration auch Silan auf der Oberfläche so stark adsorbieren, dass Blister im AC entstehen
- Lachgas - oder Stickstoffplasma nach der SiON – Abscheidung im gleichen Rezept einer Blisterbildung entgegenwirken
- An der Reinraumluft keine negativen Oberflächenreaktionen auf SiON passieren
- Lachgasplasma auch nach einer 100 Sekunden dauernden Behandlung der SiON – Oberfläche mit den Prozessgasen Blistern entgegenwirkt
- Nach dem DEP – Schritt im SiON – Rezept Adsorption von Gasen passieren muss
- SiH₄ in der Konzentration von 40scc keinen negativen Einfluss auf die Oberfläche von SiON hat.

Frage 5: Kann die SiON – USG – Abscheidung in einem Rezept umgesetzt werden?

Will man Prozessgas welches mit der SiON – Oberfläche reagieren kann ganz ausschließen, ist es möglich noch ein N₂ Plasma nachlaufen zu lassen oder, wie hier beschrieben werden wird, beide Schichten direkt hintereinander in einem Rezept aufzubringen. Dazu wurde direkt nach dem DEP–Schritt im SiON–Rezepte der DEP–Schritt des USG–Rezeptes angehängt.

In der Praxis sieht das wie folgt aus:

Tabelle 5.3 5 :Mittels diesem Rezeptes wurde USG gleich nach dem SiON-Abscheideschritt abgeschieden.

Step number,Name	4.DEP - SiON	5.DEP - USG	6.Purge	7.Pump
Step selection	B	ABCDEF	B	B
Step end control	By Time	By Time	By Time	By Time
Maximum step time	95 sec	23 sec	5 sec	10 sec
Endpoint selection	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint	No Endpoint
Pressure	Servo 3 Torr	Servo 2,7 Torr	Servo 3 Torr	Throttle fully open
Pressure ramp rate	0 Torr	0 Torr	0 Torr	0 Torr
RF power,RF2 power	185W / 0W	300W / 0W	0W / 0W	0W / 0W
Heater Temperature	400°C	400°C	400°C	400°C
Gas names and flows				
	Si-H4_HI: xx scc	N2O--HI: xx scc	Si-H4_HI: xx FPmp	Si-H4_HI: xx FPmp
	N2O-LO: xx scc	Si - H4: xx scc	N2O-LO: xx scc	N2O-LO: xx FPmp
	N2 : xx scc		N2 : xx scc	
	NH3 : xx scc		NH3 : xx FPmp	NH3 : xx FPmp

Dieses Experiment war auch deshalb interessant, da sich das Gasmisch der Abscheidegase beim Umschalten vom SiON auf den USG deposit – Schritt einstellen musste. Daher sollte sich hier ein Gradient am Schichtübergang bemerkbar machen. Sollte dieser groß genug sein, könnte man diesen anhand der TOF–ERDA Spektren erkennen.

Wie in Table 5.2.3 zu sehen war, hat das Prozessgas einen negativen Einfluss auf die Haftung bei Feuchtestress. Ob die Prozessgase ohne Plasma mit der 400 Grad heißen SiON– Oberfläche wirklich reagierten, wurde über Kontaktwinkelmessungen getestet.

Frage 6: Ist bei 400C° Wafertemperatur eine Reaktion der Prozessgase auf der SiON-Oberfläche möglich?

Falls die Prozessgase von SiON mit der SiON – Oberfläche in irgendeiner Weise reagieren sollten, wäre eine Änderung des Kontaktwinkels sehr wahrscheinlich. Deshalb wurde das Experiment von Tabelle 5.3.3 wiederholt in dem die Prozessgase einzeln und gemeinsam über die SiON – Oberfläche geströmt wurden. Danach wurde mit dem Kontaktwinkelmessgerät aus Kapitel 6 der Kontaktwinkel mit deionisiertem Wasser inline gemessen. Die Ergebnisse sind unten zusammengefasst.

Tabelle 5.3 6 : Die Kontaktwinkelmessungen zeigen keinen Unterschied des Kontaktwinkels nachdem Gase über die SiON-Oberfläche geströmt wurden.

Plasma	Gasfluss gesamt [sccm]	Kontaktwinkel in Grad	Zeit [Sekunden]
alle Gase	300	33	31
SiH ₄	300	34	31
NH ₃	300	33	31
N ₂ O	300	32	31
NH ₃ &SiH ₄	300	32	31
N ₂ O&N ₂	300	32	31
N ₂ O&SiH ₄	300	32	31
N ₂ O&NH ₃	300	33	31
EN SION STD	300	32	31
Kein Gas	300	31	31

Wie in Abbildung 5.3.7 zu sehen ist, ist der Kontaktwinkel von Wasser bei allen Proben in etwa gleich. Die Konzentration der Gase auf der SiON-Oberfläche scheint für eine Änderung des Kontaktwinkels nicht ausreichend zu sein.

Das Volumen des Tropfens war immer 10µl groß und es wurden immer drei Tropfen pro Wafer auf die Oberfläche aufgebracht.

Im Unterschied dazu hat das Lachgasplasma auf SiON einen bedeutenden Effekt auf den Kontaktwinkel wie in Abbildung 5.3.7 zu sehen ist:

Tabelle 5.3 7 : Nach der Behandlung der SiON-Oberfläche mittels Lachgasplasma konnte eine Änderung des Kontaktwinkels beobachtet werden.

Plasma	Gasfluss gesamt [sccm]	Kontaktwinkel in Grad	Zeit [Sekunden]
alle Gase & N ₂ O Plasma	300	2	31

Das Lachgasplasma macht die SiON Oberfläche sehr viel hydrophiler als das reine Gas, das keinen Effekt auf den Kontaktwinkel hat. Für Plasmen aus den restlichen Gasen liegen keine Werte bezüglich der SiON – Oberfläche vor, gegenüber der USG – Oberfläche zeigen die Stickstoff - und Ammoniakplasmen keinen Effekt im Kontaktwinkel.

5.4 Blisteranalyse mittels REM und Lichtmikroskop von SiON:Silan - USG

Übersicht

In Kapitel 5.3 wurde gezeigt, wie die Blisterentstehung durch Gasadsorption gefördert werden konnte und wie diese mittels N₂ - oder N₂O- Plasmen verhindert werden konnte. In diesem Kapitel wird genauer auf die Form der Blister eingegangen. Ferner werden Besonderheiten zwischen den unterschiedlich abgeschiedenen Schichten gezeigt werden.

REM – Aufnahmen

Vergleicht man REM – Aufnahmen zwischen blisterfreien Wafern und Wafern mit Blistern so erkennt man deutliche Unterschiede am Übergang SiON:USG. Durch das Ätzen mit FAEL – Lösung. Vor dem sputtern mit Gold:Palladium werden die Unterschiede am Übergang noch deutlicher hervorgehoben.

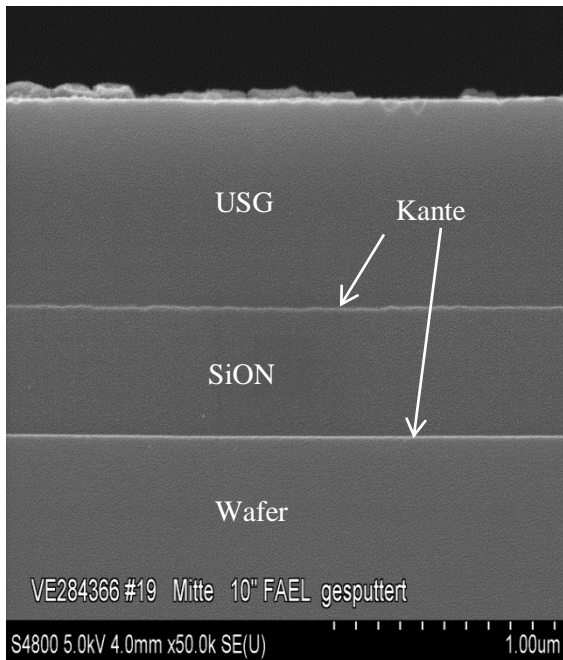


Abbildung 5.4 1: Bei guter Adhäsion von USG auf SiON ist nur eine Kante zwischen den Schichten beobachtbar.

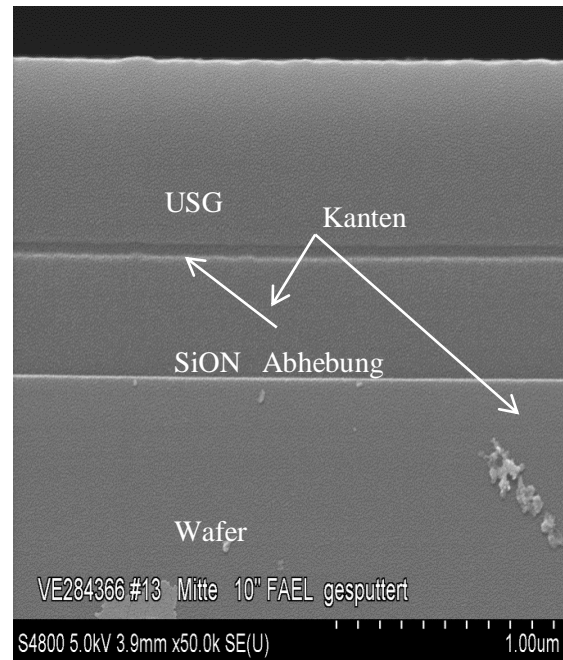


Abbildung 5.4 2: Haftet USG schlecht auf SiON ist dies anhand des schwarzen Streifens über der Kante von SiON sichtbar. Hier kann man sehen, dass sich USG vollständig von SiON abhebt.

In Abbildung 5.4.1 sind beide Schichttypen klar an der Kante getrennt und weisen keinerlei Abhebung auf. Hingegen ist bei Abbildung 5.4.2 über die ganze Länge ein Zwischenraum sichtbar, der etwa 40nm breit ist. Oberflächlich ist hier nichts zu sehen, auch wenn die Haftung schon deutlich reduziert ist.

Auf den beiden REM-Aufnahmen in Abbildung 5.4.3 und 5.4.4 ist zu sehen, dass dort wo die Spannungen am größten werden, und die Haftung am geringsten ist, Blister entstehen und die USG-Schicht von oben bis zur SiON:USG Schichtgrenze aufbricht. An den Stellen wo Blister entstehen wird die Delamination sichtbar.

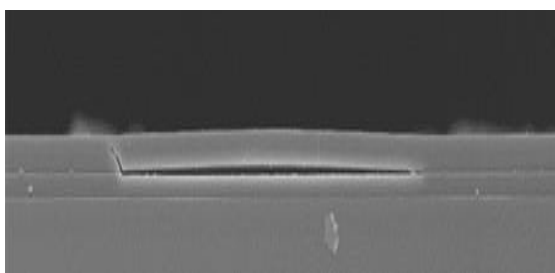


Abbildung 5.4 3 : Wo die Spannungen groß werden entstehen Blister.

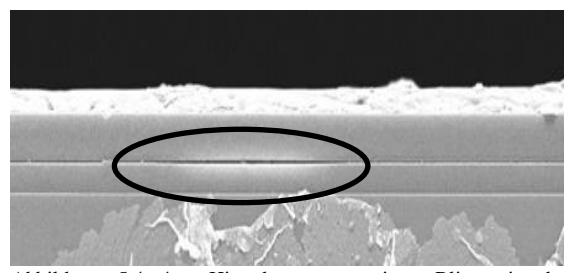


Abbildung 5.4 4 : Hier kann man einen Blister in der Entstehungsphase beobachten

Der Blisterdurchmesser schwankte bei den am Lichtmikroskop gemessenen Blistern zwischen 10 - und 20 μm . Die Blister sind gleichmäßig über die Oberfläche verteilt und bilden kein Muster aus dem man etwas ableiten könnte.

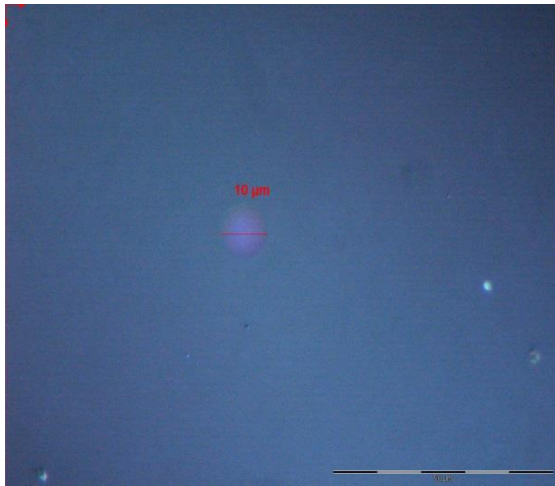


Abbildung 5.4 5 : Blister mit kleinerem Durchmesser nach dem AC-Test.

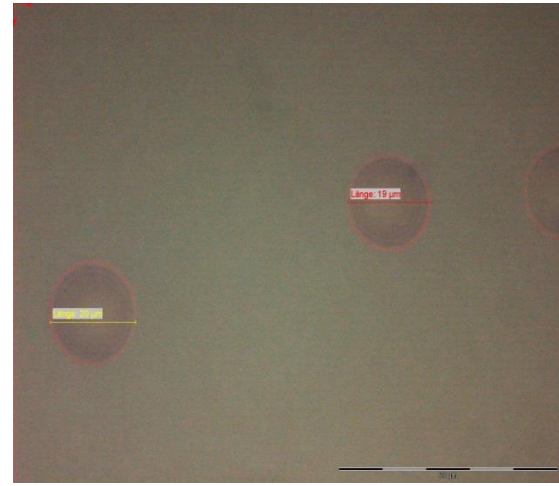


Abbildung 5.4 6: Blister mit größerem Durchmesser nach dem AC-Test.

5.5 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und TEOS – USG

In diesem Kapitel wurde die Haftung zwischen SiON und TEOS–USG untersucht. So wie bei Silan USG wurden auf 400nm SiON 600nm TEOS – USG abgeschieden. Danach wurden die Proben für 96 Stunden in den Autoklaven gegeben und am Lichtmikroskop auf Blister untersucht.

Einmal wurde SiON wie gewohnt auf der Centura HDP 1 B abgeschieden, das TEOS – USG auf der P5000/46 A und B. Auch hier zeigten sich nach dem 96 stündigen AC – Test Blister am Wafer, wobei die Blisterverteilung nicht regelmäßig über den gesamten Wafer erkennbar war, sondern wie in Abbildung 5.5.1 gezeigt ist, in unterschiedlichen Abschnitten am Wafer sichtbar wurde.

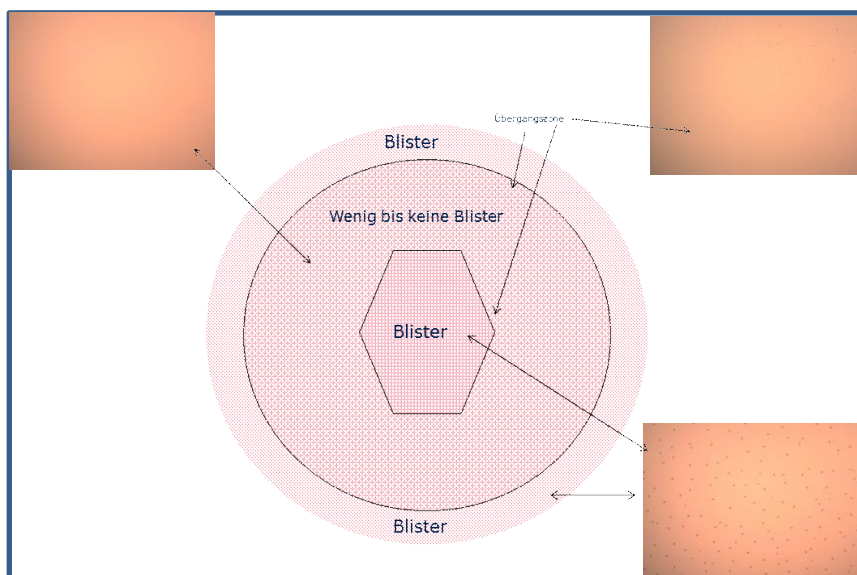


Abbildung 5.5 1 : TEOS-USG zeigt nach dem AC-Test eine sehr spezielle Blisterverteilung über den Wafer. Grund dafür dürfte eine inhomogene Plasmaverteilung während der Abscheidung sein.

Diese Art der Blisterverteilung konnte auch schon bei vorhergehenden Versuchen beobachtet werden und kann daher nicht als Artefakt betrachtet werden. In einem Bereich innerhalb des Wafers und in einem Ring am Rand des Wafers, etwa 1-2cm breit, waren Blister beobachtbar. Diese Auffälligkeit könnte mit der Verteilung des Plasmas innerhalb der Kammer zusammen hängen.

Wird zwischen der SiON und der TEOS – USG – Abscheidung wieder ein Lachgasplasma geschaltet, dann bleibt auch dieser Schichttyp blisterfrei.

5.6 Untersuchung der Haftung zwischen SiON und high density plasma – USG

Mit einem HDP–USG, welches auf der Centura HDP 1 A abgeschieden wurde, konnte das effektivste USG auf SiON abgeschieden werden. Mittels der hohen Energie die für HDP – Prozesse aufgewendet werden, kann man sehr dichte und homogene Schichten erzeugen. Zusätzlich zu den Prozessgasen Silan und Sauerstoff die für die USG - Schicht gebraucht wird, kommt noch Argon hinzu, welches einerseits einen Teil der Schicht wieder abspaltet, andererseits die Bindungslängen der Atome verkleinert. Erwartet wurde hier am Beginn des Beschichtungsvorganges ein Effekt auf das Interface, welcher durch das Argon-sputtern hervorgerufen worden sein sollte.

Nach dem Aufenthalt im Autoklaven für 96 Stunden konnten keine Blister festgestellt werden.

Das HDP – USG eignet sich für eine Beschichtung ohne vorherige Plasmabehandlung der SiON – Oberfläche am besten, TEOS – USG ist etwas weniger anfällig auf Blisterbildung und Silan – USG hat die größte Anfälligkeit auf Blisterbildung.

Als Trägergas wird bei TEOS-USG Helium und bei HDP – USG Argon verwendet. Wie später zu sehen ist, kann mit der Mischung von Edelgasen zu Silan – USG eine Verringerung der Blister erzielt werden, obwohl ein großer Unterschied zwischen den bei der Abscheidung verwendeten Kammerkonfigurationen zwischen DxZ/CxZ- und HDP-Kammer besteht.

5.7 Stressverhalten von SiON und Silan – USG, TEOS – USG und HDP – USG

Aus Kapitel 3 sind die Messungen vom Stress mittels MX 204 und die Theorie der Stressentstehung bekannt. Ist der Stressunterschied zwischen zwei Schichten sehr groß, kann die Haftung darunter leiden. Betrachtet man den Stressunterschied zwischen SiON und USG, so ist der Unterschied absolut gesehen eher klein. Jedoch ändert sich der Stress bei unterschiedlichen äußeren Einflüssen wie es bei Hitze der Fall ist, oder durch die Verhältnisse wie sie im Autoklaven vorherrschen. In wieweit sich der Stress ändert, wurde zwischen dem Schichtsystem Wafer:SiON:Silan-USG, Wafer:Silan-USG und Wafer:SiON untersucht.

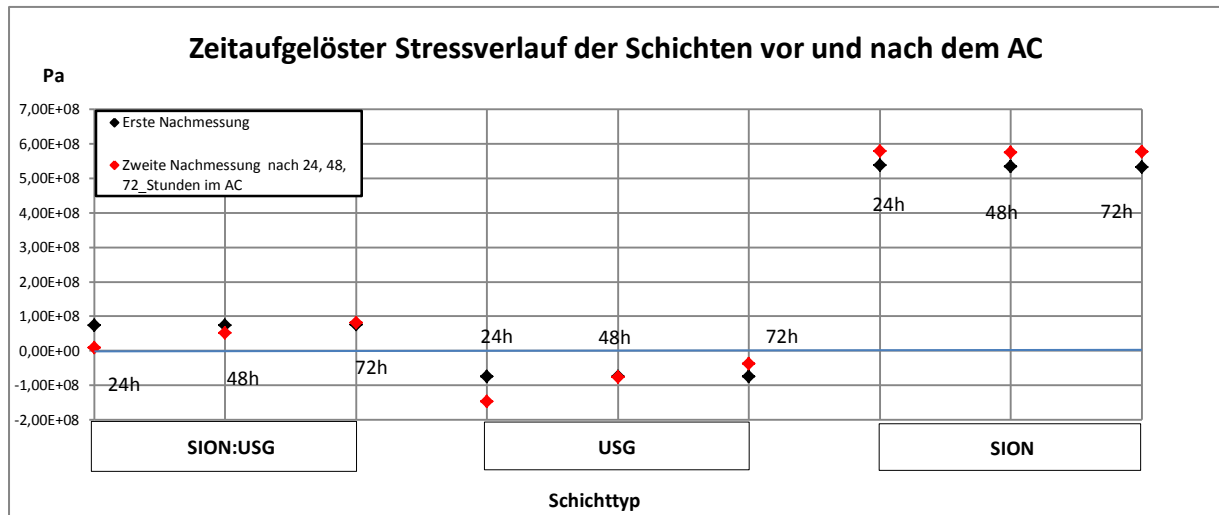


Abbildung 5.7.1 : Die Übersicht über den Schichtstack und die einzelnen Schichten zeigen das Stressverhalten der Schichten über die Zeit nach einem, zwei und drei Tagen im Autoklaven. Die erste Nachmessung wurde nach der Beschichtung und vor dem AC-Lauf gemacht (schwarze Punkte). Anhand der roten Punkte sieht man den Stressverlauf nach den AC-Läufen.

Anhand der Grafik 5.7.1 sind die Änderung des Stresses von USG, SiON und beiden Schichten gemeinsam gut nachzuverfolgen. Die schwarzen Punkte sind die Stressmessungen direkt nach der Abscheidung von SiON, USG und SiON:USG. Wie zu erwarten ist, sind die gleichen Schichten immer auf einer Linie, da hier immer die gleiche Schichtzusammensetzung herrscht. USG ist, wie man sieht, kompressiv, SiON tensil und beide Schichten zusammen wieder tensil.

Interessant wird es nach dem Aufenthalt im Autoklaven. SiON zeigt sich hier unspektakulär und ist nach 24, 48 und 72 Stunden etwas tensiler als nach der Abscheidung. USG hingegen ändert den Stress zeitabhängig. Die Schicht wird anfangs kompressiver um nach 72 Stunden tensiler zu werden. Später wird man sogar sehen, dass der Stress nach 96 Stunden tensiler wird.

Der Stress des Schichtsystems SiON:USG wird hier eher vom USG beeinflusst, da es in etwas verzögerter Form genau die gleichen Tendenzen zeigt wie SiON:USG. Anhand des Stresses kann man schnell abschätzen, dass Änderungen in der USG – Schicht, so wie in geringerer Form auch in der SiON – Schicht, durch die Verhältnisse im Autoklaven ausgelöst werden. Wie sich die Schicht im Detail verändert, kann man an dieser Stelle noch nicht sagen. Es könnte sich die molekulare Struktur ändern, die Schicht mit dem Wasser direkt reagieren oder es könnte von außen nach dem AC – Test ein weiterer Reaktand hinzukommen.

Die absoluten Stresswerte sind in der Tabelle 5.7.1 bezogen auf die Abbildung 5.7.1 dargestellt.

Tabelle 5.7 1 : Der Stressverlauf über die Zeit der unterschiedlichen Schichten zeigt deutlich an, dass sich SiON:USG und USG alleine stark ändert. Nur SiON bleibt konstant über die Zeit.

Stress [mPa]	SiON:USG 24h	SiON:USG 48h	SiON:USG 72h	SiON 24h	SiON 48h	SiON 72h	USG 24h	USG 48h	USG 72h
Pre_AC	74	72	74	-76	-75	-76	538	533	531
Post_AC	8	51	81	-148	-78	-39	578	574	577
Δ Stress	-66	-22	6	-73	-3	37	39	41	45

Der Bow zeigt die Biegerichtung des Wafers an und geht ebenfalls in die Stoney – Gleichung ein. Auch hier erkennt man die starke Änderung der USG - Schicht.

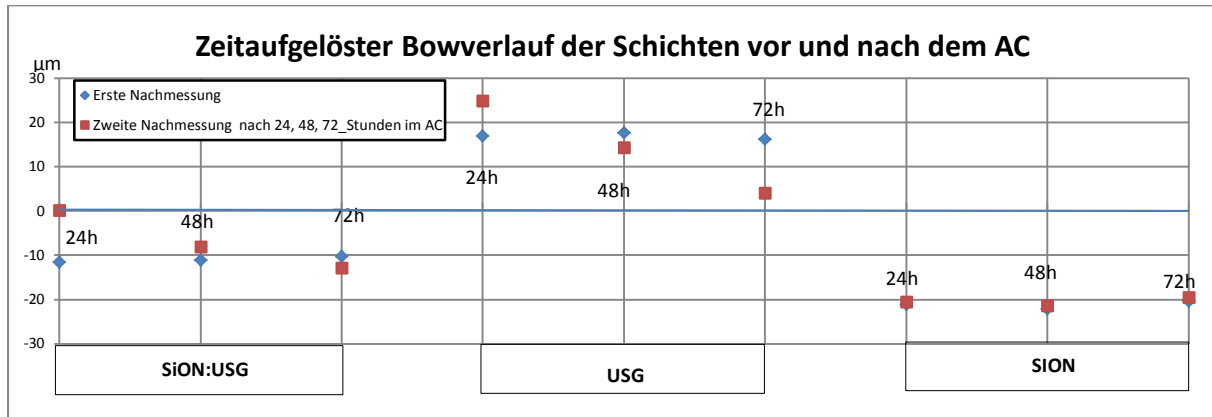


Abbildung 5.7 2 : Auch der Bowverlauf veranschaulicht die geringe Änderung des SiONs nach dem AC und die starke Änderung des USGs. Die erste Nachmessung wurde direkt nach dem Beschichtungsvorgang durchgeführt (blaue Punkte). Nach dem AC-Lauf, der 24, 48 und 72 Stunden dauerte wurden die zweiten Nachmessungen durchgeführt.

Auch hier erkennt man anhand der Abbildung 5.7.2, dass das SiON:USG Schichtsystem maßgeblich von der Biegerichtung des USGs beeinflusst wird. Nach 24 Stunden ist der Wafer auf dem SiON:USG abgeschieden wurde praktisch flach.

Für TEOS- und HDP-USG wurde keine Zeitstafel im Autoklaven umgesetzt, sie wurden aber gleich wie das Silan-USG für 96 Stunden in den Autoklaven gegeben. Es fällt auf, dass sich die Änderung der Stresswerte zur Änderung in den IR – Spektren komplementär verhalten. Während der Stress nach der Abscheidung bei Silan – USG am geringsten ist, ist er bei HDP – USG am größten. Die Stressänderung die durch den AC passiert ist bei HDP – USG am geringsten und bei Silan – USG am größten. Beim Silan – USG wird der Stress nach dem AC tensiler (Abbildung 5.7.3).

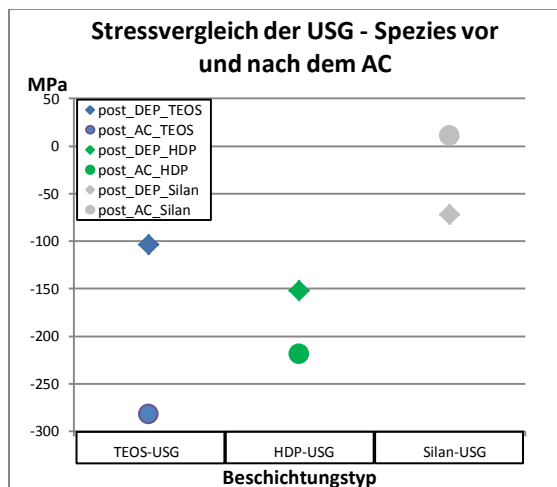


Abbildung 5.7 3 : Vergleicht man den Stress zwischen den USG-Spezies sieht man, dass nach dem Abscheiden das HDP-USG den größten kompressiven Stress hat. Auch der Schichtstack der unterschiedlichen USG-Spezies zeigt die stärkste Veränderung beim Silan-USG.

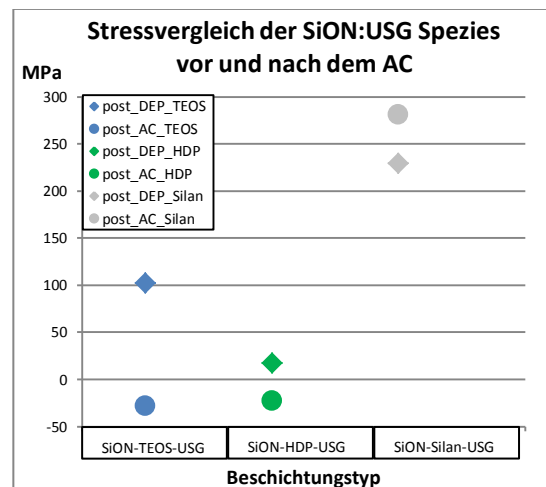


Abbildung 5.7 4 : Auch der Schichtstack der unterschiedlichen USG-Spezies zeigt die stärkste Veränderung beim Silan-USG.

Vor allem die Änderung des Stresses bei Silan – USG ist auffällig, da diese in den tensilen Bereich verschoben wird, wie man anhand der Abbildungen 5.7.3 und 5.7.4 sieht. Da die Stressänderungen durch den Autoklaventest hervorgerufen werden, kann man davon ausgehen, dass Wasser die amorphe Gitterstruktur des USGs stark verändert.

5.8 TOF – ERDA Analysen des SiON - USG Schichtsystems

Um vom Schichtsystem SiON:USG einen genaueren Eindruck, speziell am Interface zu erhalten, wurden bestimmte Proben mittels TOF – ERDA genauer untersucht. Diese Proben umfassten die Versuche, die in 5.1 gemacht wurden. Die Absicht war mit dieser Untersuchungsmethode mehr über die Stöchiometrie um das Interface und wenn möglich am Interface selbst zu detektieren. Zwar ist die Analysenmethode mit einer Tiefenauflösung von ca. 20nm zu grob, um genau das Interface zu charakterisieren. Sollten sich Unregelmäßigkeiten zwischen den unterschiedlichen Experimenten weiter in die Schicht fortsetzen, sollten diese jedoch detektierbar sein.

Alle Versuche wurden wieder entweder auf der Centura HDP oder auf der P5000/48 durchgeführt. Es wurden 400nm SiON und um die Detektion mittels TOF – ERDA zu verbessern, 100nm USG darauf abgeschieden. Es zeigten sich hier deutliche Unterschiede zwischen den Abscheideanlagen und zwischen der Art der Abscheidung.

Vergleicht man die Abscheidung von SiON und USG auf der Centura HDP, welche in einem Rezept vollzogen wurde wie in Abbildung 5.8.1 zu sehen ist, (Rezept siehe Tabelle 5.3 7) und einer Standardabscheidung, die auf der Centura HDP gemacht wurde, wie in Abbildung 5.8.2 zu sehen ist, dann fällt die unterschiedliche Steigung bei Sauerstoff und Stickstoff ab dem SiON-USG-Interface auf.

Die Standardabscheidung von Abbildung 5.8.2 umfasste die SiON – Abscheidung und ein Lachgasplasma gefolgt von der USG Abscheidung, wobei alle Schritte auf der HDP1 umgesetzt wurden. Hierfür wurden drei unterschiedliche Rezepte verwendet.

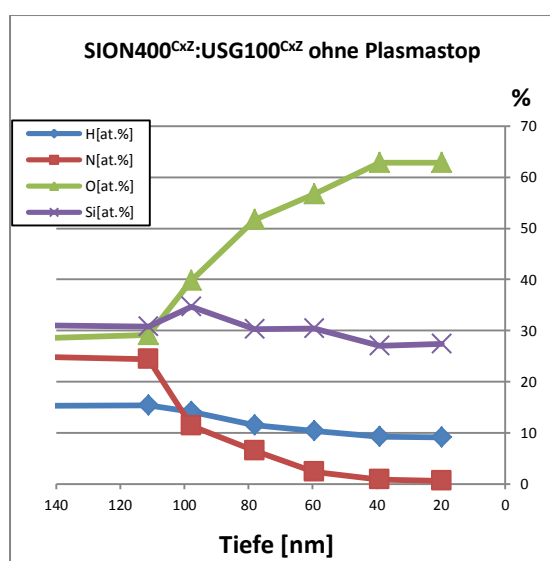


Abbildung 5.8 1 : Werden die SiON und die USG-Schicht auf der Centura in einem Rezept abgeschieden, dann stellen sich, wie man sieht, die einzelnen Elemente in der Schicht nur langsam um.

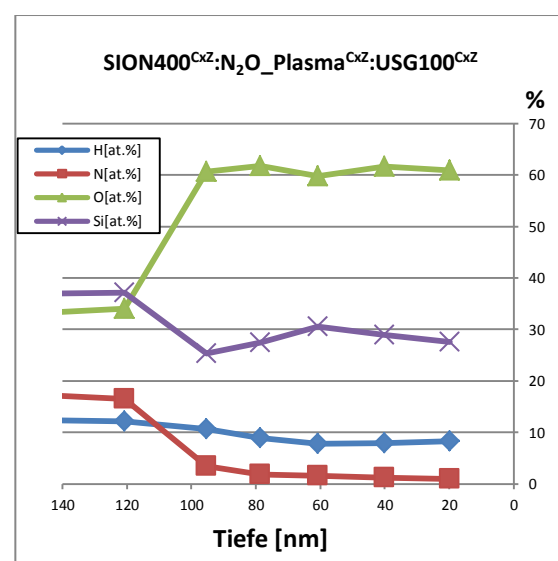


Abbildung 5.8 2 : Am schnellsten stellt sich das Elementverhältnis mit HDP/1/B-USG, abgeschieden auf der Centura, ein, wenn vorher noch ein Lachgasplasma-clean geschaltet wurde.

Durch die zwei unterschiedlichen Arten der Abscheidung stellen sich die Elementverhältnisse verschieden schnell ein. In Abbildung 5.8.1 sind die SiON und die USG Abscheidungen in einem Rezept mit fließendem Übergang gefahren worden, in Abbildung 5.8.2 ist für jeden Prozessschritt ein eigenes Rezept angewendet worden. Das Niveau von Si, O und N ist in Abbildung 5.8.2 bei 110nm fast gleich, in Abbildung 5.8.1 ist eine klare Trennung bei H ersichtlich.

Wird das Lachgasplasma und das USG auf der P5000/48 gefahren, wie in Abbildung 5.8.3 zu sehen ist, vergeht bis zur Einstellung eines stabilen Sauerstoffgehaltes mehr Zeit, als würde man gleiches auf der Centura CxZ abscheiden, wie in Abbildung 5.8.4 zu sehen ist.

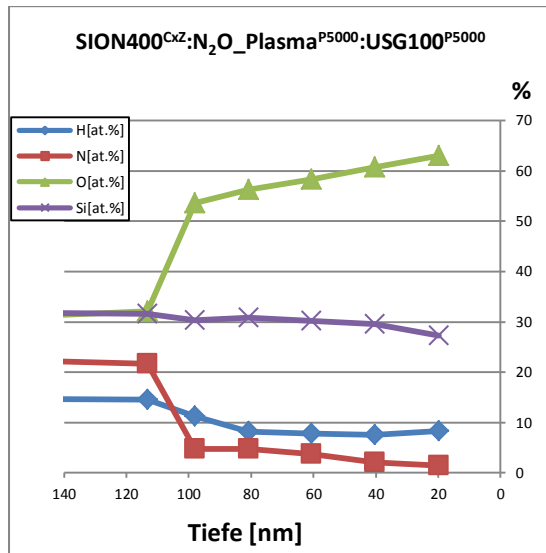


Abbildung 5.8 3 : Bei Anwendung des Lachgasplasmas vor der USG-Abscheidung stellt sich das Elementverhältnis aber langsamer ein wie wenn man dasselbe auf der Centura CxZ mit CxZ-USG machen würde.

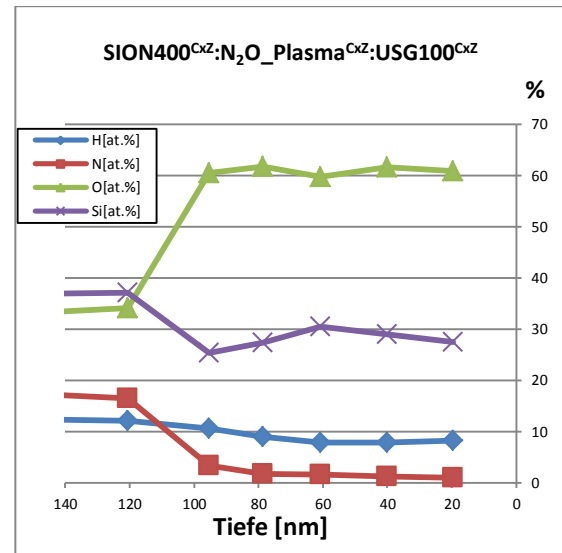


Abbildung 5.8 4 : Auf der Centura HDP/1/B stellt sich das Elementverhältnis innerhalb von 20 nm ein.

Eine Erklärung dafür wäre, dass der Sauerstoffgehalt auf der SiON – Schicht nach dem Lachgasplasma in der CxZ größer war als nach dem Lachgasplasma in der P5000/48, was auf eine stärkere Oxidation hinweisen würde. Möglicherweise ist aber auch der Grad der Abscheidung in der Centura CxZ stabiler als in der P5000/48.

Die in den Abbildungen 5.8.1 – 5.8.4 gezeigten Versuche sind in den Punkten 1 - 3 zusammengefasst.

1. SiON und USG auf der Centura CxZ in einem Rezept
2. SiON, Lachgasplasma und das Silan-USG auf der Centura CxZ mit jeweils einem eigenen Rezept
3. SiON auf der Centura CxZ, das Lachgasplasma und das USG auf der P5000/48; je ein eigenes Rezept

5.9 XPS Analyse des Lachgasplasmas auf SiON und Heliumplasmas auf USG

In Kapitel 5.4 wurde gezeigt, dass der Kontaktwinkel von SiON nach einer Lachgasplasmabehandlung von den für die Schicht typischen 33° auf 2° sinkt. Während ein Argon oder Helium Plasma mit der SiON – oder USG – Oberfläche chemisch nicht reagiert, sollte das für ein Lachgasplasma nicht unbedingt gelten. Um das nachzuweisen wurde eine XPS - Analyse von einer mit Helium behandelten USG - Schicht und einer mit Lachgas behandelten SiON – Schicht bei Fresenius in Auftrag gegeben. Hier tritt deutlich zutage, dass die SiON – Oberfläche stark oxidiert wird.

Tabelle 5.9 1 : Mittels XPS sieht man das Elementverhältnis vor der Behandlung der SiON-Oberfläche mit dem Lachgasplasma. Das Fluor ist ein Artefakt der Kammerreinigung mittels NF₃.

C	N	O	F	Si
5,5	22,0	40,0	0,8	31,7

Tabelle 5.9 2 : Das Elementverhältnis an der Oberfläche von SiON wird oxidiert, wobei die Oxidation v.a. spezifisch den Stickstoff angreift.

C	N	O	F	Si
11,8	0,8	61,1	0	26,3

Der Kohlenstoff ist entweder durch das Hantieren mit den Wafern auf die Oberfläche gekommen, durch die Kunststoffverpackung oder durch Adsorption von CO₂. Das Fluor kommt durch die Kammerreinigung mit NF₃ in die Schicht. Es fällt auf, dass N und Si nicht gleichmäßig oxidiert werden, bzw. die Oberfläche nicht gleichmäßig oxidiert ist, da Stickstoff fast ganz verschwindet, während Silizium nur wenig abnimmt und Fluor ebenfalls verschwindet.

Nimmt man die mit Heliumplasma behandelte USG – Oberfläche als Vergleich, so fällt hier eine Verunreinigung der Schicht mit Stickstoff auf, die auf einer reinen USG – Schicht nicht zu finden sein sollte. Da sich aber auch nach der Behandlung von USG mit Heliumplasma der Kontaktwinkel von Wasser zur USG – Oberfläche von 2 Grad in Richtung 17 Grad ändert, kann man eine Reaktion mit Luftstickstoff nach dem Ausfahren des Wafers nicht ausschließen. Alternative Stickstoffquellen sind in der Umgebung nicht möglich, da der Wafer beim Ausfahren aus der Prozesskammer unter Vakuumatmosphäre steht und ab der Pufferkammer nur mit dem Heliumplasma in Kontakt kommt. Beim USG handelt es sich diesmal um ein mit einem high density plasma hergestellten USG, welches schon in Kapitel 4 beschrieben wurde und in den nachfolgenden Kapiteln noch genauer beschrieben werden wird.

Tabelle 5.9 3 : Anhand von CxZ -USG vor dem Heliumplasma sieht man den hohen Kohlenstoffanteil an der Oberfläche der in der Tiefe mit TOF-ERDA nicht festgestellt wird.

C	N	O	Si
17,1	0	57,2	25,7

Tabelle 5.9 4 : Obwohl ein Heliumplasma zur Oberflächenaktivierung genommen wurde erhöhte sich der Stickstoffanteil um 8%, was auf eine Reaktion der Oberfläche mit Luftstickstoff hinweisen könnte.

C	N	O	Si
14,6	7,9	49,0	28,5

Abgesehen vom Kohlenstoff, der wie oben durch die beschriebenen Quellen die Oberfläche verunreinigen könnte, ist der Stickstoffgehalt um 8% erhöht, was die Änderung des Kontaktwinkels erklärt. Die Änderung der Konzentration geht kaum auf Kosten vom Silizium, betroffen ist hier vor allem der Sauerstoff.

Für die Haftung von USG auf einer mit Lachgas vorpräparierten SiON - Oberfläche scheint das Elementverhältnis ebenfalls eine entscheidende Rolle zu spielen. Beim Einsatz eines Stickstoffplasmas wäre eine Reaktion mit Sauerstoff- oder Stickstoffatomen auf der SiON – Oberfläche vorstellbar. Die Elementzusammensetzung von USG ist der mit Lachgasplasma präparierten SiON - Oberfläche sehr ähnlich, was ebenfalls für eine gute Methode zur Haftverbesserung spricht.

5.10 Verhalten von α -SiO₂ unterschiedlicher Precursor gegenüber Feuchtestress

Wie in Kapitel 5.3 – 5.7 gezeigt wurde verhalten sich die unterschiedlichen USG – Spezies auf SiON bezüglich der Haftung sehr unterschiedlich. Anhand des Stresses konnte man einen Einfluss der Feuchtelastung auf das USG nachweisen. Vor allem das Silan-USG zeigte im Stressverhalten große Auffälligkeiten, da es nicht nur in Richtung tensil oder kompressiv hin wandert, sondern zuerst in Richtung kompressiv und später erst in Richtung tensil (Abbildung 5.7.10).

Die chemische Zusammensetzung der Schicht wurde mittels FT – IR analysiert. Anfangs wurden die Wafer wie gewohnt mit 400nm SiON beschichtet, dann wurden die unterschiedlichen USG – Spezies darauf abgeschieden.

Wie schon über den Stress festgestellt wurde, hat Feuchtigkeit wenig Einfluss auf die SiON – Schicht, einen großen Einfluss hingegen auf Silan USG.

Im FT – IR wurden für SiON, Silan-USG und SiON:Silan-USG folgende Spektren direkt nach der Abscheidung und nach dem AC-Test aufgenommen, sowie die Evolution von Silan-USG über des Spektrums nach 24, 48 und 72 Stunden im Autoklaven untersucht. Da es nicht möglich war den Wafer nach 24 Stunden im Autoklaven zu messen und dann wieder in den Autoklaven zu geben, wurden je drei Wafer gleich beschichtet und unterschiedlich lange in den Autoklaven gegeben.

300nm SiON zeigt folgende Änderungen:

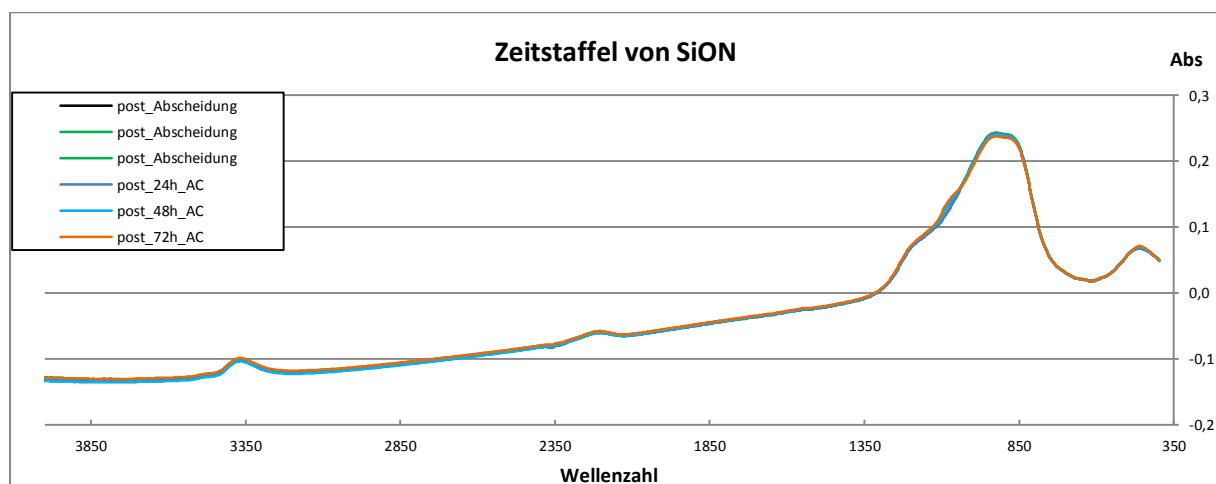


Abbildung 5.10 1 : Nicht nur der Stress über die Zeit ändert sich bei SiON nur sehr wenig, auch im IR erkennt man nur sehr geringe Änderungen, was ein weiterer Hinweis auf eine hohe Resistenz gegenüber Wasser hinweist.

Wie man sieht sind alle SiON Spektren fast unverändert geblieben. Sowohl nach der Abscheidung als auch nach den unterschiedlich langen Aufenthaltszeiten im Autoklaven ist die Anzahl der Peaks als auch die Dimension der Peaks gleich geblieben. Dieses Verhalten weist darauf hin, dass sich in der Schicht chemisch und physikalisch nichts ändert. Da bei

der SiON – Schicht keine Wasserpeaks beobachtbar sind, kann man die Schicht als praktisch wasserdicht ansehen.

Tabelle 5.10 1 : Anhand der Tabelle sieht man die unterschiedlichen Schwingungsmoden von SiON .

Wellenzahl	435	900	2200	3360
Schwingung	SiO – Schaukelschwingung	SiN – asymmetrische Schwingung	Si-H	N-H

Silan – USG zeigte im Stress ein auffälliges Verhalten und dieses Verhalten wird im IR - Spektrum auch bestätigt. Die Aufnahmen nach 24, 48 und 72 Stunden im AC zeigen folgendes Bild für 900nm USG (Abbildung 5.10.2):

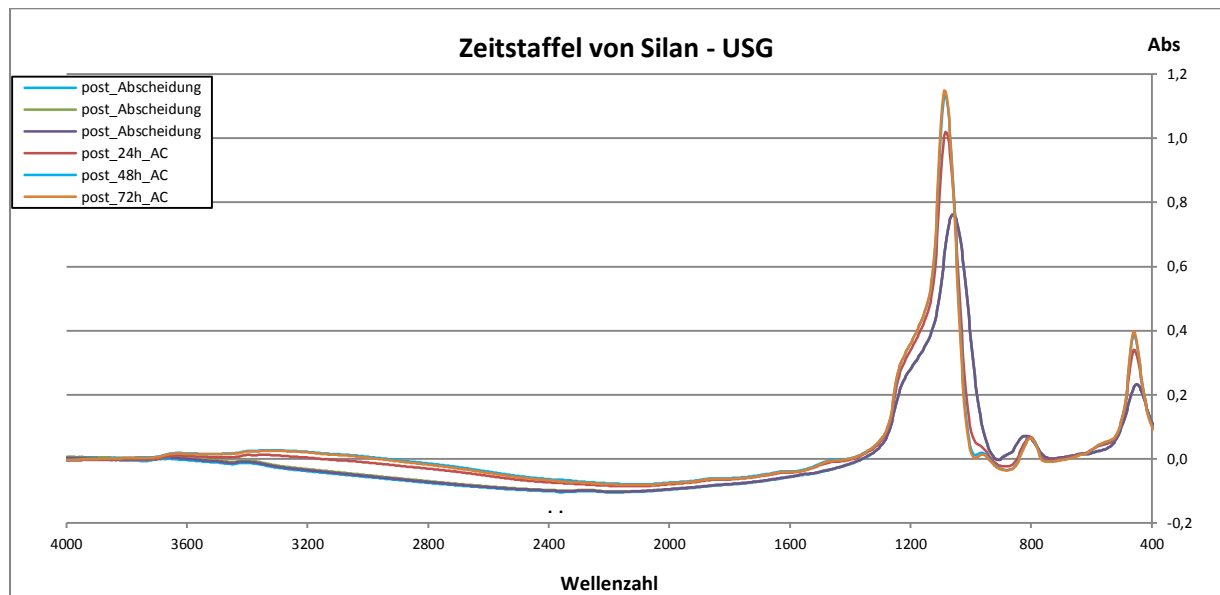


Abbildung 5.10 2 : Das Spektrum von Silan – USG zeigt eine deutliche Änderung der Schicht über die Zeit. Schon nach 24 Stunden ist eine deutliche Verschiebung des Si-O – Streckschwingungspeaks hin zu höheren Wellenzahlen ersichtlich. Gleichzeitig gibt es eine Peakerrhöhung zwischen 2300 und 3300cm⁻¹ was auf ein am Wasserstoff des SiOH koordiniertes Wassermolekül hinweist.

Tabelle 5.10 2 : Die Schwingungsmoden von Silan-USG zeigen, dass nach dem Autoklaven k die beiden Peaks bei 950cm⁻¹ und 2300-3300cm⁻¹ zum Spektrum nach der Abscheidung hinzukommen.

Wellenzahl	450 cm ⁻¹	790 cm ⁻¹	950 cm ⁻¹	1050 - 1080 cm ⁻¹
Schwingung	SiO Schaukelschwingung	SiO Bendelschwingung	Si-OH...HOH	SiO - Streckschwingung
Wellenzahl	2230 cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	2300-3300 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-H	SiN-H	SiO-H...HOH	SiO-H

Das Silan–USG Spektrum aus Abbildung 5.10.2 zeigt hier im Vergleich zum SiON–Spektrum deutliche Unterschiede. Hier ändert sich die Anzahl der Peaks, die Position mancher Peaks und die Form der Peaks.

Die ersten drei Spektren nach der Abscheidung sind alle gleich und relativ unauffällig. Sie zeigen die drei Si-O – Schwingungen bei 450 -, 790- , und 1050 cm⁻¹ sowie einen kleinen Si-H Peak, den SiN-H - und SiO-H – Peak. Der Stickstoff kommt aus der Reaktion mit dem Lachgas und die Siliziumhydroxidverbindung aus einer Nebenreaktion zwischen den Ausgangsstoffen.

Nach dem Autoklaven tritt eine Veränderung sowohl der Peakposition, als auch der Peakhöhe der Si-O – Schwingungen, auf. Ferner ist der breite Peak zwischen 2300 - und 3300cm⁻¹ auffällig, der als ein am Siliziumhydroxid koordiniertes Wassermolekül identifiziert werden kann. Auch bei 950cm⁻¹ ist ein kleiner Peak erkennbar. Hier ist das Wassermolekül ebenfalls mit dem Siliziumhydroxidmolekül koordiniert, schwingt aber in einer anderen Mode.

Der breite Peak zwischen $2300\text{-}3300\text{cm}^{-1}$ erreicht schon nach 24 Stunden fast seine volle Höhe, was auf ein schnelles Eindringen von Wasser in die USG – Schicht hinweist. Die Peakverschiebung kommt durch eine Änderung im Si-O-Si – Winkel⁽¹²⁾ zustande. Wird der Winkel zwischen den zwei Sauerstoffatomen vergrößert, so verschiebt sich damit auch der Peak hin zu höheren Wellenzahlen. Eine markante Verschiebung ist vor allem beim Si-O – Streckschwingungspeak beobachtbar (Abbildung 5.10.3). Nach der Abscheidung ist das Peakmaximum bei 1050cm^{-1} , nach dem Autoklaventest beträgt das Maximum 1080cm^{-1} . Bei den beiden anderen Si-O-Peaks ist ebenso eine Verschiebung hin zu höheren Wellenzahlen beobachtbar, die aber entsprechend der Peakhöhe nicht so markant ausfällt. Auffällig ist die Änderung der Peakhöhe und auch der Fläche vor allem des Si-O – Streckschwingungspeaks. Normalerweise ändert sich die Peakhöhe bzw. die Peakfläche nur im Zusammenhang mit der Schichtdicke, wobei eine größere Schichtdicke eine größere Peakfläche verursacht. Bei der Epitaxie wird die Schichtdicke auch mittels FT – IR bestimmt. Eine alternative Möglichkeit für die Schichtdickenzunahme ist ein besserer Wirkungsquerschnitt bei der Messung. An dieser Stelle wird auf die Schichtdickenmessung die in Kapitel 5.12 behandelt wird verwiesen.

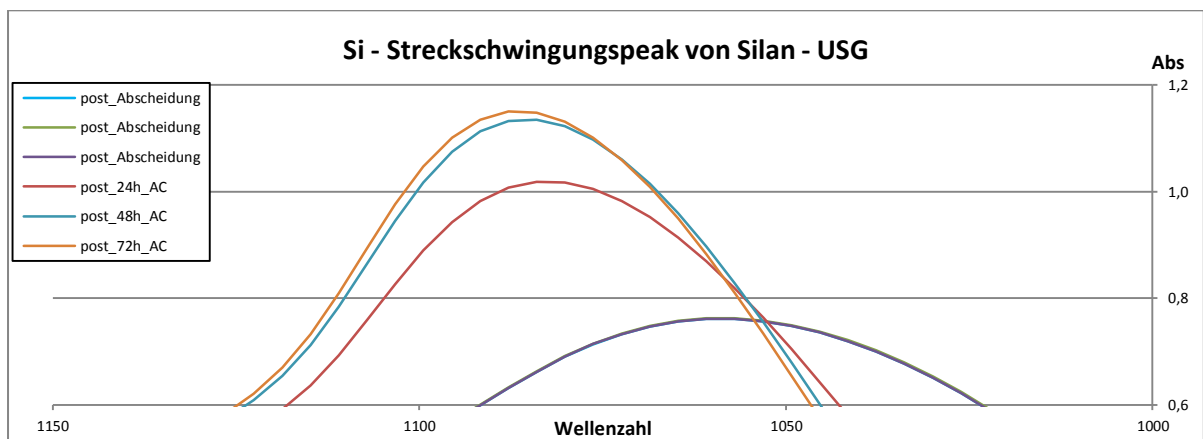


Abbildung 5.10 3 : Nach der Abscheidung liegen die Si-O – Streckschwingungspeaks noch übereinander. Nach dem Autoklaven sieht man die Aufspaltung der Peaks nach drei Zeitstufen. Zwischen dem 2. Und 3. Tag passiert bei einer 300nm Schicht nur mehr wenig.

Die Si-O – Pendel - und Schaukelschwingungspeaks zeigen ein ähnliches Bild wie der Si-O – Streckschwingungspeak.

In Abbildung 5.10.4 ist die Entstehung des Peaks über 72 Stunden dokumentiert. Nach 48 Stunden ist praktisch kein Unterschied in der Peakhöhe zum Peak nach 72 Stunden erkennbar. Wie man sieht ist die Basislinie des zweiten Wafers (grün) nach der Abscheidung etwas höher als jene des dritten Wafers (violett). Dieser Unterschied ist auch nach dem Autoklaven erkennbar.

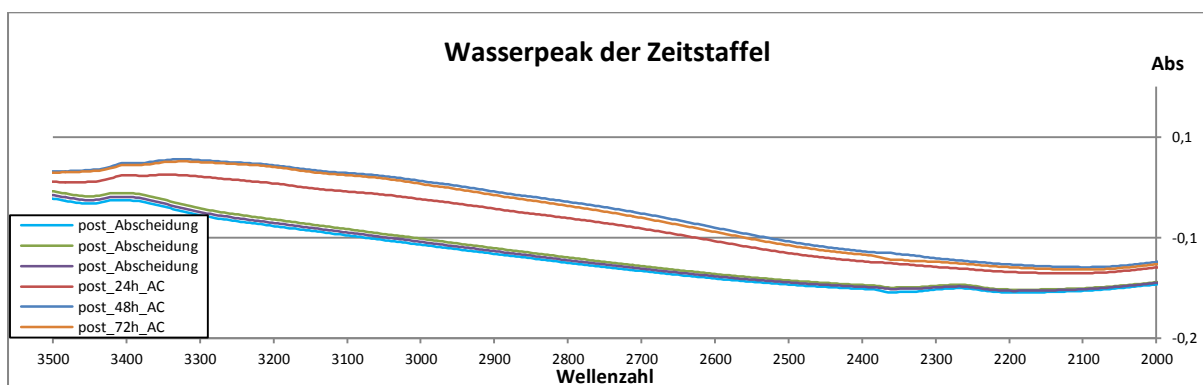


Abbildung 5.10 4 : Verglichen mit dem Si-O – Streckschwingungspeak passiert beim Wasserpeak zwischen dem 2. Und 3. Tag ebenfalls relativ wenig. Die Schicht scheint zu dem Zeitpunkt mit Wasser gesättigt zu sein.

Am Spektrum des SiON:USG Schichtsystems aus Abbildung 5.10.5 erkennt man die Dominanz des USG – Spektrums gegenüber dem SiON - Spektrum. Um das Bild zu komplettieren wird das SiON:USG – Spektrum nach 72 Stunden gezeigt. Die Schichtdicke von SiON war 260nm, jene von USG 900nm.

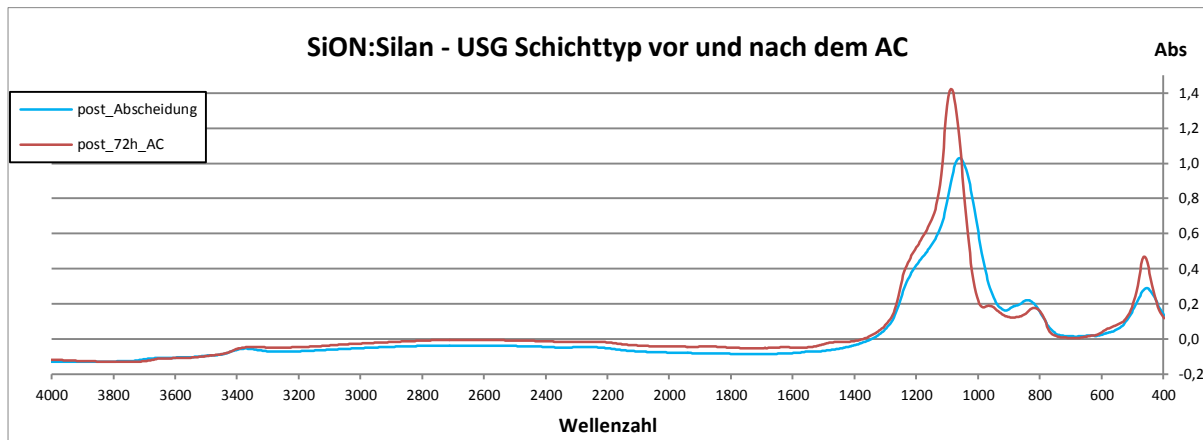


Abbildung 5.10 5 : Im Schichtstack SiON:USG ist der Peak zwischen 2300- und 3300cm⁻¹ nach 72 Stunden weniger stark ausgeprägt, auch deshalb, weil die USG-Schicht mit 900nm relativ dick ist. Hingegen zeigt der Si-O – Streckschwingungspeak eine starke Änderung.

Vergleicht man das IR – Spektrum des TEOS – USG mit dem Silan – USG, so erwartet man weniger Siliziumhydrid und kein Siliziumnitrid in der Schicht, was durch die Precursoren bedingt ist (Abbildung 5.10.6). Die Schichtdicke ist hier 600nm.

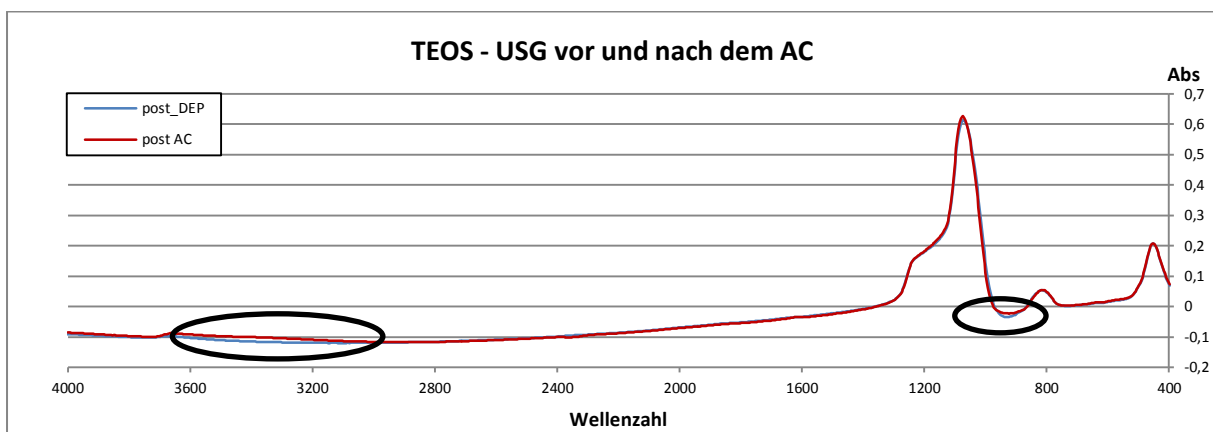


Abbildung 5.10 6 : TEOS-USG ist weitgehend unverändert. Auffällig ist hier der Peak zwischen 2300- und 3300cm⁻¹, der sich auch hier einstellt. Peakverschiebung ist aber hier bei keinem Peak beobachtbar. Eine leichte Veränderung der Basislinie bei 950cm⁻¹ deutet darauf hin, dass möglicherweise Si-OH...HOH – Spezies entstehen.

Das nach der Abscheidung aufgenommene Spektrum zeigt wieder deutlich die drei Si-O – Peaks. Der Siliziumhydridpeak ist kaum messbar, nur der Si-OH – Peak bei 3650cm⁻¹ ist erkennbar. Nach dem Autoklaven erkennt man den langgezogenen Wasserpeak bei 3300 cm⁻¹ als einzige Änderung im Spektrum.

Im Unterschied zu Silan – USG dringt hier in die Schicht ebenfalls Wasser ein, es hat aber keinen vergleichbaren Effekt auf die Si-O – Schwingungspeaks. Hier ändert sich weder der Wirkungsquerschnitt der Messung, noch der O-Si-O – Winkel, was auf eine stabilere Form des USG hinweist.

HDP – USG wird mit sehr viel mehr Energie abgeschieden als TEOS – und Silan USG, ferner wird hier nur der Precursor Silan und Sauerstoff sowie Argon verwendet. Dieses Spektrum zeigt praktisch keine Änderungen nach 96 Stunden im AC, was auf eine noch stabilere USG – Struktur hinweist (Abbildung 5.10.7).

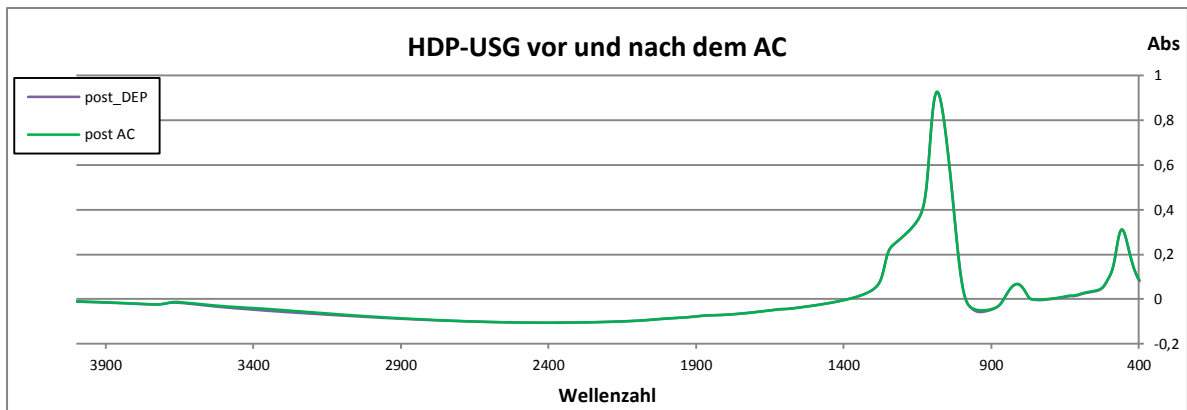


Abbildung 5.10 7 : HDP – USG ist gegenüber Feuchtigkeit sehr stabil und zeigt im Testzeitraum von 96h im Autoklaven nur sehr geringe Änderungen.

Wie auch schon bei TEOS – USG zu sehen ist, gibt es neben den drei Si–O – Schwingungspeaks nur den Si–OH– Peak bei 3650cm^{-1} . Bei diesem USG kann man wie schon in Kapitel 5.9 angekündigt wurde annehmen, dass die Struktur dichter und stabiler ist als bei Silan und TEOS – USG.

Subtrahiert man die einzelnen USG – Spezies aus den Abbildungen 5.10.2, 5.10.6 und 5.10.7 vor und nach dem AC – Test voneinander, so sieht man deutlich die Änderungen im Spektrum (Abbildung 5.10.8). Bei allen drei Spektren gibt es eine Verschiebung des Si–O– Streckschwingungspeak zu höheren Wellenlängen einerseits, aber auch eine Verschmälerung des Hauptpeaks und eine Verbreiterung des Buckels am Si–O – Peak.

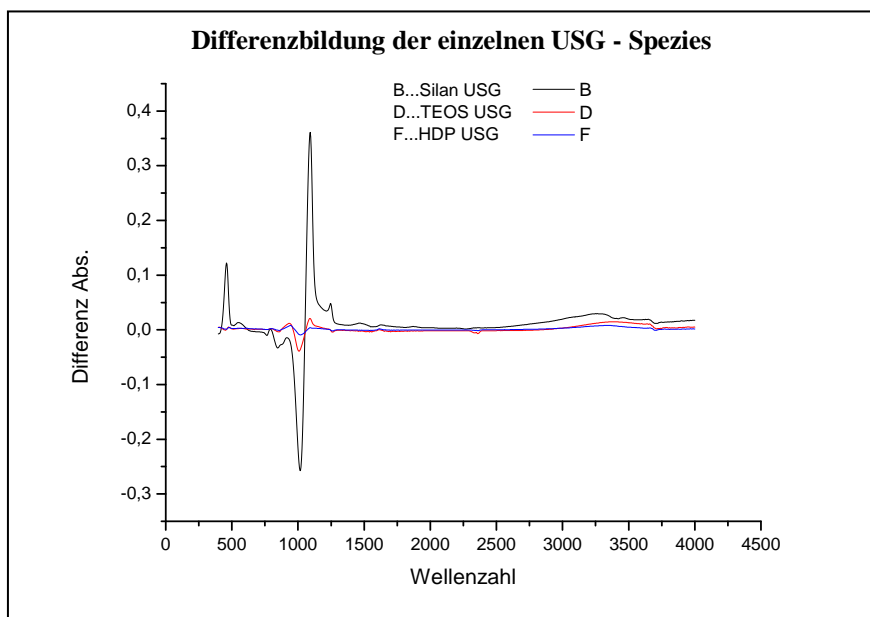


Abbildung 5.10 8 : Über die Subtraktion der Spektren vor und nach dem Autoklaven ist ein genauere Vergleich zwischen den USG – Spezies machbar. Silan – USG zeigt hier die markantesten Änderungen gegenüber den beiden anderen USG - Spezies.

Anhand der Wasserpeaks sieht man das unterschiedliche Ansprechverhalten der Schichten auf Wasser, welches sich in der Schicht selbst einlagert.

Hier wird der Peak bei 950cm^{-1} interessant, da sich dieser nur bei Silan – USG einstellt und direkt an das Hydroxid des Silanols koordiniert. Es kann davon ausgegangen werden, dass Si–OH....HOH nur bei ausreichenden Raum ausgeformt werden kann.

5.11 FT – IR Untersuchung der USG – Spezies nach dem N₂ Tempern

Speziell bei Silan – USG war es wichtig zu wissen, inwieweit Wasser wieder aus der Schicht entfernbar war. Für diesen Versuch wurde auf Öfen zurückgegriffen, die unter Stickstoffatmosphäre tempern konnten. Die Ergebnisse zeigen die IR – Spektren 5.11 1 – 5.11 3.

Aus Silan-USG kann man mittels tempern bei 900 Grad unter Stickstoffatmosphäre das Wasser entfernen. Sichtbar wird das über die Reduzierung der beiden Wasserpeaks bei 3300cm⁻¹ und 950cm⁻¹ sowie durch die Strukturierung des Buckels am Si-O-Streckschwingungspeak. Schuld daran ist eine Reduzierung der ungesättigten Silanoxidbindungen und wahrscheinlich auch eine Terminierung bestimmter Silanoxidtypen.

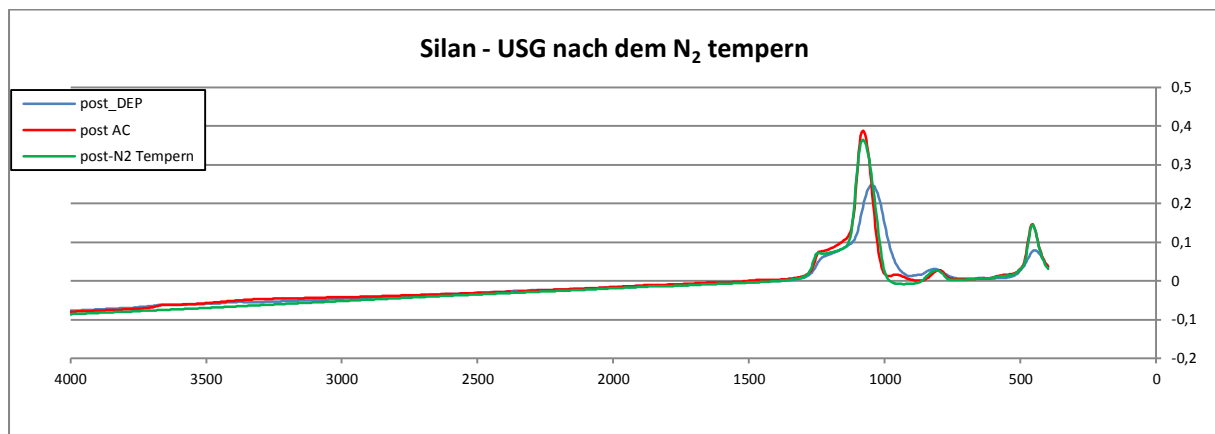


Abbildung 5.11 1 : Anhand des Spektrums sieht man deutlich die Abnahme der beiden Peaks zwischen 2300- und 3300cm⁻¹ und 950 cm⁻¹ sowie eine Strukturierung des Buckels am Si-O – Streckschwingungspeak.

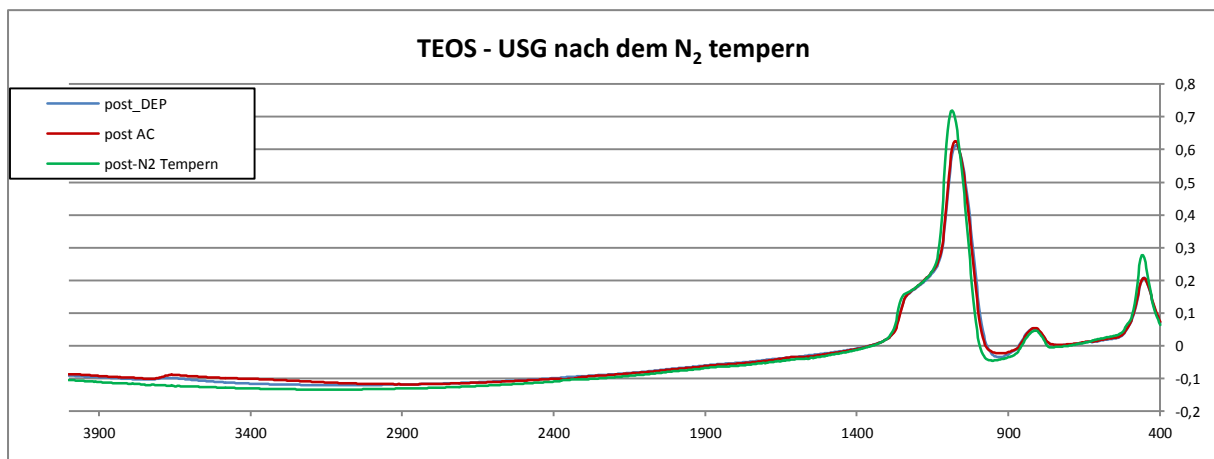


Abbildung 5.11 2 : Auch bei TEOS – USG verschwindet der Peaks durch das Tempern, jedoch ist hier auch eine deutliche Änderung der Si-O – Streckschwingungspeaks erkennbar. Auch hier wird der Buckel des Si-O – Streckschwingungspeaks strukturiert.

Auch TEOS-USG verliert wie auch Silan-USG den Wasserpeak bei 3300cm⁻¹ und einer leichten Strukturierung des Buckels am Si-O- Streckschwingungspeak. Als Grund für die Vergrößerung des Si-O- Streckschwingungspeaks könnte eine Vermehrung der Silanoxidbindungen verantwortlich sein, oder aber auch eine Verbesserung des Wirkungsquerschnittes der Messung selbst.

Da bei HDP-USG kaum Wassereinlagerungen feststellbar waren, konnte hier auch nur sehr wenig Wasser aus der Schicht entfernt werden. Das IR Spektrum zeigte aber die Absenz des Si-OH Peaks nach dem N₂ Temperschritt sowie eine leichte Änderung des Si-O Streck- und Pendelschwingungspeaks, wie das auch bei TEOS-USG der Fall war. Der Si-O-

Streckschwingungspeak verschiebt sich hier nicht mehr zu höheren Wellenzahlen, da er schon nach der Abscheidung bei 1100cm^{-1} liegt (Abbildung 5.11.3).

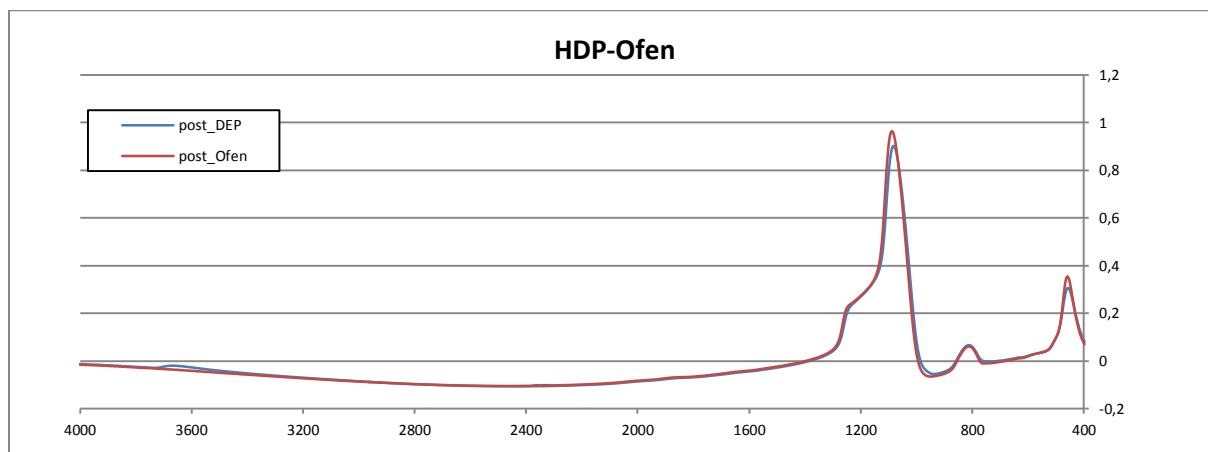


Abbildung 5.11 3: Auch das HDP – USG zeigt eine leichte Änderung der Si-O – Peaks. Auffallend ist hier auch das Verschwinden des Si-OH – Peaks bei 3650cm^{-1} .

Durch die Temperung konnte nicht nur das Wasser entfernt werden, sondern auch die Si-OH, die Si-H und Si-NH – Bindungen stark reduziert, oder ganz entfernt werden.

Bei TEOS – USG fällt der größere Si-O Streckschwingungs- und Schaukelschwingungspeak auf. Außerdem wandert auch dieser Peak etwas zu höheren Wellenzahlen hin. Bei Silan – USG ändern sich die Si-O Peaks nach dem Tempersschritt hingegen nicht so stark.

Tabelle 5.11 1 : Hier sieht man das Rezept mit dem die Scheiben im Ofen getempert wurden.

Ablauf	Ramprate [°C/min]	TOL. [max/min] [min]	Zeit [min]	Temp. [°C]	N2 [ccm/min]	O2 [ccm/min]	H2 [ccm/min]	HCl [ccm/min]	LOW N-Flow	HIGH N-Flow	N2-car [slm/min]
Stand By			0,0	700	10.000	0	0	0			100.000
WAIT TEMP			50,0	600	10.000	0	0	0			100.000
EINFAHREN	400mm/min	400	9,0	600	15.000	0	0	0			100.000
T-STAB			10,0	600	15.000	0	0	0			25.000
RAMPEN	~10		29,0	900	15.000	0	0	0			25.000
AUSHEILEN			30,0	900	15.000	0	0	0			25.000
CoolDown1	-4,5		58,0	600	15.000	0	0	0			25.000
CoolDown2	-4,5		10,0	600	15.000	0	0	0			100.000
AUSFAHREN	30mm/min		37	600	15.000	0	0	0			100.000
Stand By			0,0	700	10.000	0	0	0			100.000
Gesamtzeit:			233,0								

5.12 Veränderung des Volumens von USG durch Feuchteinfluss

Sowohl bei der Betrachtung des Stresses als auch anhand der IR – Spektren konnte man eine starke Änderung des Verhaltens speziell von Silan–, aber auch von TEOS – USG beobachten. Da bekannt ist, dass die Si–O Fläche bei größerer Schichtdicke unter Feuchteinwirkung ebenfalls größer wird, wurde eine mögliche Zunahme des Volumens bei den USG-Spezies untersucht.

Tatsächlich konnte bei Silan – USG eine Volumsänderung festgestellt werden, die mittels einer Zeitstafel im Autoklaven genauer untersucht wurde.

Dafür wurde 300nm USG am Wafer abgeschieden und diese dann, gemäß Tabelle 5.12 1, unterschiedlich lange in den Autoklaven gestellt. Nach der Abscheidung und nach dem AC-Test wurde die Schicht sowohl Dicken- als auch Stress vermessen.

Tabelle 5.12 1 : Bei einer Schichtdicke von 300nm Silan-USG stellt sich nach 12 Stunden schon eine relativ große Dickenzunahme ein.

Wafer	Dicke nach der Abscheidung [nm]	Dicke nach AC [nm]	prozentuelle Zunahme [%]	Stunden [h]
1	300	315	5,00	12
2	300	322	7,33	18
3	298	321	7,72	24
4	298	321	7,72	36

Tabelle 5.12 2 : Mit der Dickenzunahme ändert sich auch der Stress. Anhand des Stresses lässt sich aber eine weitere Veränderung der Schichteigenschaften erkennen.

Wafer	1	2	3	4
Stress [mPa]	-74	53	76	104

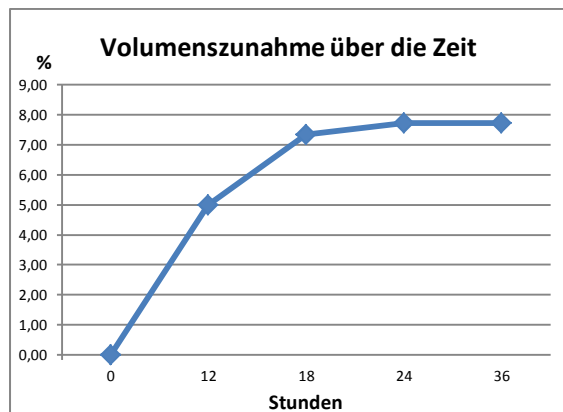


Abbildung 5.12 1: Volumenzunahme über die Zeit und der zugehörige Stress.

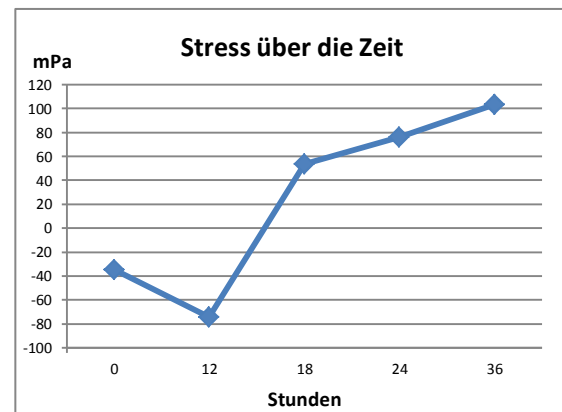


Abbildung 5.12 2: Stressverlauf über die Zeit. Hier sieht man, dass sich der Stress trotz einer Stagnation der Volumenausdehnung ändert.

Durch die relativ dünne USG – Schicht ist der Sättigungspunkt der Volumszunahme bei 7,22 Prozent relativ schnell erreicht. Der Stress steigt hier über den Sättigungspunkt noch weiter an. Zahlreiche Messungen der Schichtdicke von Silan – USG zeigten ein ähnliches Bild. Das Maximum der Volumszunahme liegt bei etwa 9 % für einige der vermessenen Proben. Offensichtlich hat bei diesem Beispiel nicht nur die Volumsänderung Auswirkungen auf den Stress, sondern auch Prozesse die darüber hinaus gehen, wie beispielsweise Reaktionen in der Schicht zwischen dem absorbiertem Wasser und Silanoxid, Aminosilan sowie Silanhydrid.

Vergleicht man Silan–USG mit TEOS– und HDP– USG, so bestätigen diese den Trend der sich anhand der Si–O– Peaks und des Stresses abzeichnet anhand der Tabelle 5.12.3. Anhand des IR Spektrums ist bei TEOS– und HDP–USG nur eine kleine Änderung zu sehen, anhand des Stresses wie in Kapitel 5.6 zu sehen war, ist die Änderung der Schichtstruktur besser zu beobachten.

Aus Kapitel 5.9 weiß man, dass sich nach dem Tempern die Si–O – Peaks vergrößern. Wie sich dazu die Schichtdicke nach dem AC-Test und nach dem Tempern ändert, sieht man anhand der Tabelle 5.12 3.

Tabelle 5.12 3 : Vergleicht man die USG – Spezies miteinander, so erkennt man auch hier den Zusammenhang zwischen Stabilität der Schicht und Änderung der Schichtdicke.

Schichtdicke [nm]	Post_DEP[nm]	Post_AC_96h [nm]	Post_tempern [nm]	$\Delta\%$ _post_AC	$\Delta\%$ _post_tempern 900C°
Silan – USG	298	321	303	7,72	2
TEOS – USG	597	600	590	0,50	-1,2
HDP - USG	1096	1100	-	0,37	-

Darüber hinaus wurden Wafer nach der USG – Abscheidung direkt getempert um einen Vergleich ohne Autoklaventest zu erhalten. Da hier kein Wasser in die Schicht eingebaut wurde, fällt die Dickenänderung unterschiedlich zu den Proben in Tabelle 5.12 3 aus.

Tabelle 5.12 4: Hier sieht man die Änderung des Volumens der unterschiedlichen USG-Spezies

Schichtdicke [nm]	Post_DEP	Post_tempern	$\Delta\%$ _post_tempern
Silan – USG	576	563	-2,26
TEOS – USG	1154	1133	-1,75
HDP - USG	802	794	-1

5.13 Ätztests zur Analyse von Veränderungen im Silan - USG

Wie man in den vergangenen Kapiteln sehen konnte, reagierten die drei USG – Spezies sehr unterschiedlich auf Feuchteinfluss. IR-Spektren, Volumensveränderungen und Stressverhalten zeigten nach dem AC-Test das Ansprechverhalten der Schichten auf Feuchtebelastung.

Doch nicht nur zwischen den USG-Spezies herrschen Unterschiede, sondern auch innerhalb einer Spezies. Vergleicht man unterschiedliche Schichtdicken der Silan-USG Spezies nach dem Autoklaven und dem Tempern miteinander, so erkennt man deutliche Unterschiede zwischen den Schichtdicken.

Ätzttest innerhalb der Silan - USG – Spezies

Nach der Herstellung einer Probenstaffel von vier unterschiedlichen Schichtdicken wurden diese für 96 Stunden in den Autoklaven gegeben und danach im Ofen zwei Mal getempert. Dabei fiel auf, dass sich der Stress und der Brechungsindex der einzelnen Proben, je nach Schichtdicke, speziell nach dem Tempern unterschiedlich stark entwickelte. Die Schichtdicken und der zugehörige Stress hingen dabei linear zusammen (Grafik 5.13.1). Der Brechungsindex drückt einerseits das Verhältnis von Silizium- zu Oxid aus, andererseits ändert sich der Brechungsindex wenn sich die Dichte ändert. Ist der Siliziumanteil hoch, so wird der Brechungsindex größer, ist das Material weniger dicht, so wird der Brechungsindex kleiner. Ist der Siliziumanteil in der Schicht höher, dann wird die Ättrate geringer, ist die Schicht weniger dicht und/oder hat mehr Sauerstoffgruppen, dann wird die Ättrate größer.

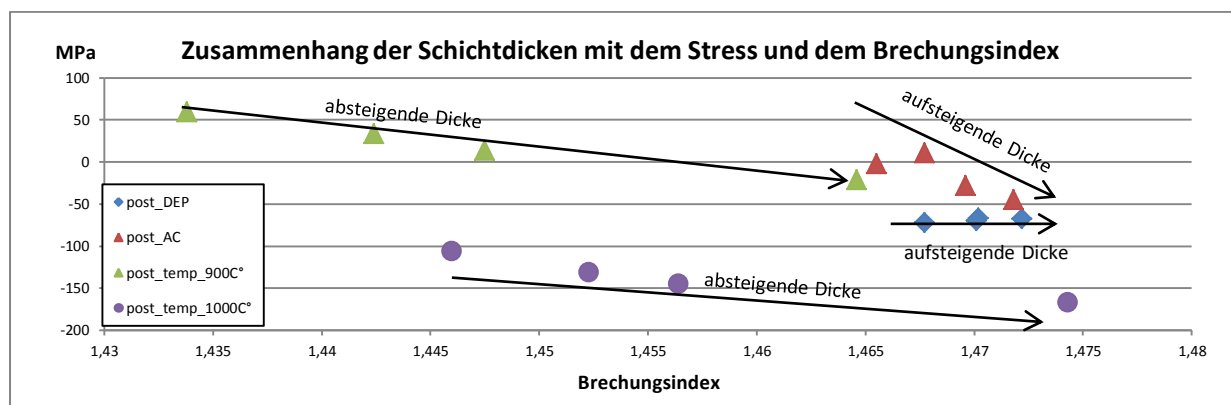


Abbildung 5.13 1 : Anhand der Abbildung wird die Abhängigkeit der Schichtdicke (Tabelle 5.13.1) gegenüber der Stress- und Brechungsindexentwicklung sichtbar. Anscheinend haben unterschiedliche Sättigungsgrade von Wasser in der Schicht, bedingt durch die Schichtdicke unterschiedlich starke Reaktionen im Autoklaven zur Folge.

Tabelle 5.13 1: Mit dem Bearbeitungsgrad der Proben ändert sich auch die Schichtdicke. Die dickeren Schichten brauchen länger, um nach dem unter die Ausgangsdicke zu gelangen als die dünnen Schichten.

Probe	1	%	2	%	3	%	4	%
Schichtdicken [nm]_post_DEP	504	100	765	100	1019	100	1275	100
Schichtdicken [nm]_post_AC	540	107	824	107	1095	107	1368	107
Schichtdicken [nm]_post_temp_900C°	506	~100	771	~100	1027	101	1289	101
Schichtdicken [nm]_post_temp_1000C°	493	98	760	99	1016	~100	1271	~100

Man sieht, dass nach der Abscheidung alle Stresswerte auf einer Linie liegen und die Brechungsindices der einzelnen Proben von 1,46 nur leicht voneinander abweichen. Nach dem Autoklaven liegen die Brechungsindices noch sehr nahe zusammen, der Unterschied in den Stresswerten ist hier schon etwas vergrößert. Nach dem ersten Mal tempern bei 900C° mit N₂ ändert sich die Situation aber stark. Die Werte für den Brechungsindex liegen weiter auseinander und die Reihung der Schichtdicken dreht sich um, sodass nur mehr die Schicht von 500nm einen Brechungsindex von 1,46 hat. Durch die Temperung wird das Wasser aus

der USG – Schicht verdampft wodurch sie gleichzeitig an Volumen verliert. Während des Temperprozesses ist es vorstellbar, dass die Materialien unterschiedlich stark porös werden, und/oder durch die Anwesenheit von mehr Silanolgruppen in der dünneren Schicht mehr Silanoxidverbindungen/nm bilden. Wie man anhand der Dicken sieht, werden die Schichten während des Temperprozesses verdichtet. Dabei wird die dünne Schicht effektiver verdichtet als die dicke Schicht. Das erklärt den höheren Brechungsindex. Da das Volumen beim zweiten Tempersschritt noch weiter abnimmt und damit verdichtet wird, steigt hier der Brechungsindex weiter an.

Wenn dem so ist, dann müssten die Ätzraten von dünnen zu dicken Schichten ansteigen, da bei höherer Sauerstoffkonzentration oder geringerer Dichte in der USG - Schicht die Ätzrate ansteigt.

Tabelle 5.13 2: Die Ätzrate steigt von dünnen zu dicken Schichten sichtbar an. Gründe für höhere Ätzraten können ein höherer Anteil an Silanoxidgruppen, ein höherer Grad an Porösität oder weniger dichte Schichten durch eine geringere Wirkung durch das Tempern bei dicken Schichten sein. Da ein Ätzzyklus in etwa 300 - 350nm von der Schichtdicke wegnahm waren hier nur 1 – 3 Ätzzyklen möglich.

Schichtdicke [nm]	Ätzrate [nm/sec] 1.Mal ätzen	Ätzrate nm/sec 2.Mal ätzen	Ätzrate nm/sec 3.Mal ätzen
495	1,21	-	-
761	1,30	1,36	-
1017	1,35	1,39	1,30
1282	1,43	1,57	1,42

Es wurde jeweils für vier Minuten geätzt, wobei die Versuche drei Mal wiederholt werden konnten bis kein Vergleich mehr zwischen mindestens zwei Schichten gezogen werden konnte, da die Schichten weggeätzt waren.

Mit diesen Werten wurden lineare Regressionen erzeugt, die ebenfalls einen linearen Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Schichtdicken zeigten. Die Ordinate in den Grafiken zeigt an, wie viel Prozent des maximalen Ätzvolumens die einzelnen Schichten geschwunden sind. Dabei wurde der größte Wert der Ätzrate aus Tabelle 5.13.2 der jeweiligen Ätzfolge mit 100% normiert und die restlichen Werte der jeweiligen Ätzfolge dazu berechnet.

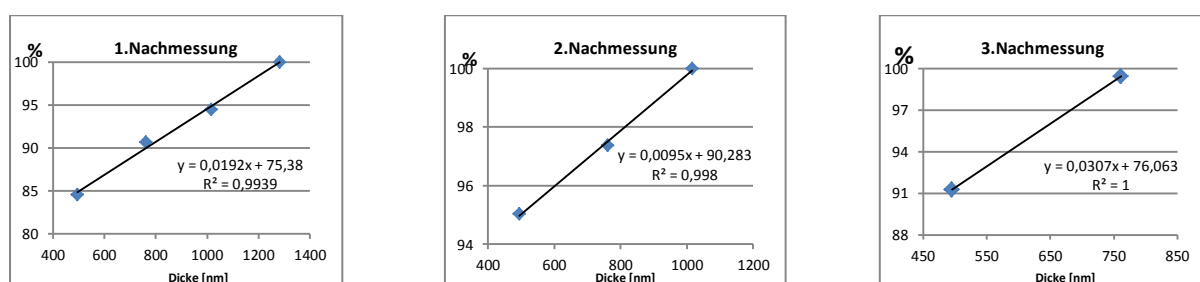


Abbildung 5.13 2: Die linearen Regressionen zeigen den Zusammenhang zwischen den Schichtdicken und den Ätzraten an. Je größer die Schichtdicken werden, je größer ist die Ätzrate pro Sekunde.

Vergleich der Ätzzraten zwischen den USG – Spezies nach der Abscheidung

Um den Versuch zu vervollständigen, wurden die Ätzzraten der USG-Spezies nach der Abscheidung gemessen und damit der Temperungsschritt, im Unterschied zu dem Versuch aus Tabell 5.13.2, ausgelassen. Dafür wurden für TEOS – und Silan – USG zwei unterschiedliche Dicken abgeschieden um die Unabhängigkeit der Ätzzrate des abgeschiedenen Volumens von der Schichtdicke nachzuweisen.

Tabelle 5.13 3: Die Ätzzraten direkt nach der Abscheidung zeigen einen Zusammenhang mit der Stabilität der Schichten gegenüber Feuchtigkeit.

Post_DEP[nm]	Silan_USG_Ätzzrate/sec [nm]	Post_DEP[nm]	TEOS_USG_Ätzzrate/sec [nm]	Post_DEP[nm]	HDP_USG_Ätzzrate/sec [nm]
597	2,32	603	1,72	802	1,30
1283	2,38	1290	1,74	803	1,36

Die Ätzzraten bestätigen den Grad der unterschiedlichen Sensibilität der Schichten gegenüber Feuchtigkeit. HDP – USG ist das dichteste und das chemisch gesehen reinste USG der drei Spezies. Die Ätzzrate ist deshalb dementsprechend niedriger verglichen mit TEOS – und Silan – USG. Vergleicht man die Werte der getemperten Proben der Probenstaffel aus Tabelle 5.13 2 mit den Werten aus Tabelle 5.13 3, dann kann man einen gravierenden Unterschied zwischen den Ätzzraten erkennen.

5.14 Vergleich von Silan-, TEOS- und HDP - USG mittels IR-Spektrum

Wie schon in den Kapiteln 5.10 und 5.11 beschrieben wurde, zeigen die IR – Spektren zwischen den einzelnen Versuchsschritten unterschiedliche Merkmale. Die größten Änderungen zeigt das Silan–USG gefolgt vom TEOS–und dem HDP–USG. Vor allem die Änderung der Si–O – Peaks und hier vor allem der prägnanteste von allen, der Si–O–Streckschwingungspeak ändern augenscheinlich seine Größe. Ob sich die Flächen pro Einheit ebenso ändern wird hier genauer erörtert, da das ein weiterer Hinweis auf die Si–O–Konzentration sein sollte.

Es wurden die Peaks der unterschiedlichen USG – Spezies nach der Abscheidung, nach dem Autoklaven und nach dem tempertieren gemessen und verglichen.

Integration der Peaks der Silan – USG Probenstaffel

Wie schon in Kapitel 9.4 zu sehen war, hat das Silan–USG das breiteste Spektrum an Peaks zu bieten. Anhand der Probenstaffel aus dem vorhergehenden Kapitel wurden die Peaks vermessen und verglichen. Zuerst wurden die Peaks nach der Abscheidung gemessen, dann jene nach dem Autoklaven und schlussendlich diejenigen nach dem Tempersschritt bei 1000C°.

Genauere Betrachtung des Si-O - Streckschwingungspeaks

Am Si-O – Streckschwingungspeak ist der Buckel zwischen 1100cm⁻¹ und 1300cm⁻¹ unübersehbar. Der Hauptpeak und der Buckel am Peak entsteht durch unterschiedliche Modifikationen der Si-O Gruppen (13). Darüber hinaus ist es vorstellbar, dass freie Elektronenpaare am Silizium entstehen. Aus diesem Grund wurde der Peak mit zwei Kurven nach Gauss mittels Origin gefittet und dann die Flächen ausgewertet.

Tabelle 5.14 1: Die Peakflächen pro Nanometer nach der Abscheidung zeigen, dass auch zwischen den unterschiedlich dicken Schichten Abweichungen vorkommen.

post_DEP Silan	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl/nm	790 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1050 cm ⁻¹	1080 cm ⁻¹	2231cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
504 nm	0,005952	0	0,088	0,038	0	0,000873	0,00131
765 nm	0,009524	0	0,088	0,047	0,000159	0,001329	0,000337
1019 nm	0,013095	0	0,093	0,052	0,000437	0,001964	0,001964
1275 nm	0,016071	0	0,097	0,054	0,000556	0,002044	0,002119

Tabelle 5.14 2 : Nach dem Autoklaven sieht man eine Erhöhung des gefitteten Peaks der substituierten Siliziumoxid – Bindungen und eine Verkleinerung des Siliziumoxidpeaks.

post_AC Silan	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/ nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/ nm
Wellenzahl/nm	802 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1080 cm ⁻¹	1100cm ⁻¹	2231cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
540 nm	0,004519	0,001185185	0,079	0,055	0	0,000141	0,001259
824 nm	0,00466	0,001092233	0,073	0,073	0	0,000473	0,001117
1095 nm	0,005005	0,00090411	0,069	0,085	0	0,000201	0,000785
1368 nm	0,005095	0,000771199	0,063	0,097	0	0,000212	0,00095

Tabelle 5.14 3 : Nach dem Tempern ist die Umkehrung des vorhergehenden Effektes erkennbar, also eine Vergrößerung des Siliziumoxid Anteiles erkennbar. Silanol reagiert wieder zu Siliziumoxid weiter.

post_temp_1000C°	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl/nm	810 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1083 cm ⁻¹		2231 cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO-strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
493 nm	0,007485	0	0,105	0,053	0	0	0
760 nm	0,006789	0	0,100	0,070	0	0	0
1016 nm	0,006624	0	0,100	0,079	0	0	0
1271 nm	0,007238	0	0,102	0,082	0	0	0

Es fällt auf, dass die Si-O-strech_2 Peaks pro Nanometer nach dem Autoklaven kleiner werden und die Si-O- strech_1 Peaks größer werden, da Silanoxid mit Wasser zu Silanolen weiterreagiert. Daher kann man erst nach dem tempern von einer wirklichen Steigerung der Si-O- strech_1 – Schwingungen sprechen, was für eine höhere Konzentration der Si-O- strech_1 – Bindungen spricht.

Nach dem N₂ – tempern ist keinerlei Siliziumhydrid, Siliziumnitrid oder Siliziumhydroxid mittels IR feststellbar. Der Wasserpeak kann auch nicht mehr bei 950cm⁻¹ nachgewiesen werden. Da nur Wasser, Wasserstoff, Stickstoff und Moleküle aus der Schicht abgehen, sind mehr freie Siliziumbindungen vorhanden. Es ist vorstellbar, dass diese mit einem Oxid der Siliziumhydroxid-Bindung und/oder Wasser reagieren und dann eine weitere Si–O – Bindung bilden.

Um zu kontrollieren, ob dieses Phänomen nur dann auftritt, wenn die Proben im Autoklaven waren, wurde das gleiche Experiment ohne den Autoklaven wiederholt. Dabei konnte ebenfalls eine Vergrößerung der Si-O- strech_1 – Peaks festgestellt werden.

Tabelle 5.14 4 : Peaks pro Nanometer direkt nach der Abscheidung von Silan – USG, Dicke 576nm.

post_DEP	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	818 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1050 cm ⁻¹	1180 cm ⁻¹	2231 cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO-strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
Wellenzahl/nm	0,004988	0	0,0920	0,0486	0	0,000349	0,00101

Tabelle 5.14 5 : Nach dem Tempern erkennt man eine Vergrößerung des Silanoxidpeaks und eine Abnahme der Silanol- und ungesättigten Silanoxidpeaks, Dicke 563nm.

post_temp_900C°	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	810 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1100 cm ⁻¹	1200 cm ⁻¹	2231 cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
Wellenzahl/nm	0,004676	0	0,0990	0,0469	0	0	0

Wie man sieht werden die Siliziumtetraoxid Bindungen nach dem Tempern mehr (+ 7,5%), Amine und Hydroxide verschwinden wieder aus dem Spektrum und die Si-O- strech_2 Spezies wird geringer (- 3,6%).

Das ist ein weiterer Hinweis auf die Ausbildung von Siliziumtetraoxid Bindungen auf Kosten der gemischten Silanoxid Spezies durch das Tempern. Verglichen mit den Proben, welche im Autoklaven waren und dann getempert wurden (+ 16%) ist diese Steigerung aber geringer. Die Effektivität in der Siliziumtetraoxid ausgebildet wird, wird durch den Aufenthalt im Autoklaven gefördert, da die Gitterstruktur des USGs geweitet wird und mehr Silanole generiert werden können, welche bei hoher Temperatur wieder zu Silanoxiden reagieren können und durch die größere Anzahl der Reaktionspartner effektiver zu Silanoxid reagieren können.

Mit TEOS – und HDP – USG wurden vergleichbare Versuche gemacht, jedoch ohne Autoklaven zwischen der USG – Abscheidung und dem Ofen.

Tabelle 5.14 6 : TEOS-USG zeigt nach der Abscheidung folgende Peaks.

post_DEP	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	819cm ⁻¹	948cm ⁻¹	1060cm ⁻¹	1180cm ⁻¹	2231cm ⁻¹	3390cm ⁻¹	3650cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
584 nm	0,009247	0	0,0993	0,0565	0	0	0,000445
1292 nm	0,009288	0	0,1045	0,0735	0	0	0,000333

Tabelle 5.14 7: Nach dem Ofen verändern sich die Peaks von TEOS-USG nur wenig.

post_Tempn	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	819cm ⁻¹	948cm ⁻¹	1070cm ⁻¹	1190cm ⁻¹	2231cm ⁻¹	3390cm ⁻¹	3650cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
583	0,007719	0	0,1063	0,0583	0	0	0
1292	0,007949	0	0,1076	0,0774	0	0	0

Tabelle 5.14 8 : HDP-USG - Peaks nach der Abscheidung

post_DEP	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	818cm ⁻¹	948cm ⁻¹	1119cm ⁻¹	1200 cm ⁻¹	2231cm ⁻¹	3390cm ⁻¹	3650cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
802	0,007768	0	0,0973	0,0661	0	0	0,003379

Tabelle 5.14 9 : Nach dem Ofen sind die Peaks des HDP-USGs nur sehr wenig verändert

post_temp_900C°	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm	Peakfläche/nm
Wellenzahl	810 cm ⁻¹	948 cm ⁻¹	1124 cm ⁻¹		2231 cm ⁻¹	3390 cm ⁻¹	3650 cm ⁻¹
Schwingung	Si-O-pendel	Si-OH...HOH	SiO- strech_1	SiO- strech_2	Si-H	SiN-H	Si-OH
801	0,00702	0	0,1036	0,0662	0	0	0

Bei TEOS- und HDP-USG sind bei vergleichbarer Schichtdicke schon nach der Abscheidung mehr SiO-strech_1 –Stretschwingungen vorhanden als bei Silan – USG. Gleichzeitig gibt es aber auch mehr mit Sauerstoff ungesättigte Silanoxidgruppen (SiO-strech_2) als bei Silan-USG. Anhand der IR – Spektren findet man zwischen TEOS– und HDP– USG nach der Abscheidung keine großen Unterschiede zwischen den SiO-strech_1 und SiO-strech_2 - Gruppen. Da nach dem Tempern mittels IR kein Silanhydrat oder Silanol festgestellt werden kann, dürften ein Großteil der Bindungen die nicht mit einem Oxid gebunden sind Si-Si-Bindungen sein.

Wie man beim Ätzversuch sah, muss es aber Unterschiede in der Dichte der Schichten und in den Bindungsverhältnissen geben.

Über den Vergleich der Brechungsindices zwischen den Schichten kann ebenfalls kein Unterschied festgestellt werden. Jedoch ist nach dem Tempern eine Verschiebung der Brechungsindices nach unten nachweisbar, was auf die nachgewiesene Verdichtung des Materials über die Dickenmessung sowie auf die Erhöhung der Si–O – Schwingungen hinweist.

Keine beweisbare Erklärung findet man für die Veränderung der Schwingungen pro Nanometer zwischen dünneren und dickeren Schichten egal welchen Typs USG.

5.15 Verdünnung der Silan – USG Prozessgase mit Argon und Helium

Die Wirkung von Argon in der HDP – Kammer wurde früher erörtert. Noch nicht bekannt war die Wirkung im Zusammenhang mit dem Autoklaventest, wenn man die beiden Edelgase Helium und Argon zu den Prozessgasen von Silan–USG in der CxZ-Kammer hinzu mischt. Durch die geringeren Energien kann man davon ausgehen, dass die Edelgase im Plasma nicht so stark beschleunigt werden wie in der HDP–Kammer. Von der Kontaktwinkelanalyse her ist aber bekannt, dass Heliumplasma auf die USG-Oberfläche eine Wirkung hat. Ob die Wirkung in der Mischung der Prozessgase positiv oder negativ auf die Blisterbildung wirkt wird hier gezeigt werden.

Tabelle 5.15 1 : Die Liste zeigt die einzelnen Ströme und die Verdünnung mit Helium und Argon, welche zur Abscheidung verwendet wurde.

Rezeptnamen	N ₂ O [scc]	SiH ₄ [scc]	He [scc]	Ar [scc]
EN HE-USG 1000	3900	260	500	0
EN HE-USG 4000	1300	87	4000	0
EN AR-USG 1000	3900	260	0	500
EN AR-USG 4000	1300	87	0	3000

Jeweils ein Wafer wurden pro Rezept mit 400nm SION und 600nm USG – He oder Ar beschichtet, zwei andere nur mit USG. Ein Standardwafer diente dem Vergleich mit den neuen Rezepten. Danach wurde eine Probengruppe in den Autoklaven gegeben, die andere Probengruppe wurde mit N₂ bei 900C° getempert. Nach dem Autoklaventest ergab sich bei allen Proben eine deutlich geringere Blisterbildung, keine Blister waren aber nur bei dem Rezept EN HE-USG 1000 und EN AR-USG 4000 feststellbar.

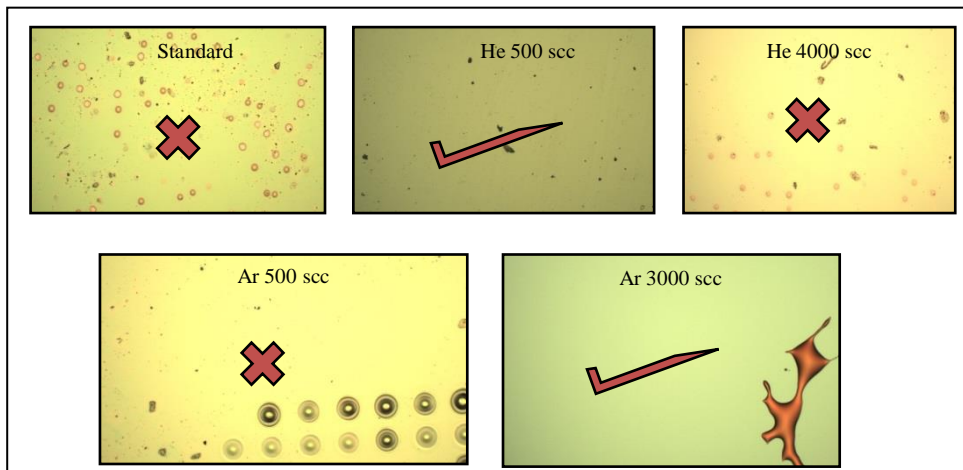


Abbildung 5.15 1 : Anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen ist die Blisterfreiheit der Schicht gut sichtbar.

Sieht man sich die IR – Spektren nach der Abscheidung an, so stechen hier sehr unterschiedliche Si–O – Peaks hervor, da die Schichtdicke in der Mitte des Wafers bei den großen Verdünnungen sehr unterschiedlich war. Ein Teil davon geht auf das Konto der schlechten Uniformität der hochverdünnten Proben. Berechnet man aber die Fläche pro Nanometer mit dem Dickenwert des USGs, der in der Mitte des Wafers gemessen wurde, dann bleiben die Unterschiede weitgehend vorhanden. Wie man anhand des Diagrammes (Abbildung 5.12.2) erkennt, haben die höheren Konzentrationen an He und Ar auch stärkere Verschiebungen im Si–O – Streckschwingungspeak zur Folge. Viel Argon vergrößert die Si–O – Konzentration, eine hohe Heliumkonzentration hingegen senkt den Si–O – Peak.

Ferner erkennt man anhand des IR–Spektrums bei hoher Heliumkonzentration eine deutliche Verringerung bei den Si–OH Schwingungen. Dafür zeigt eine hohe Argonkonzentration eine deutliche Verringerung bei den Si – NH Schwingungen.

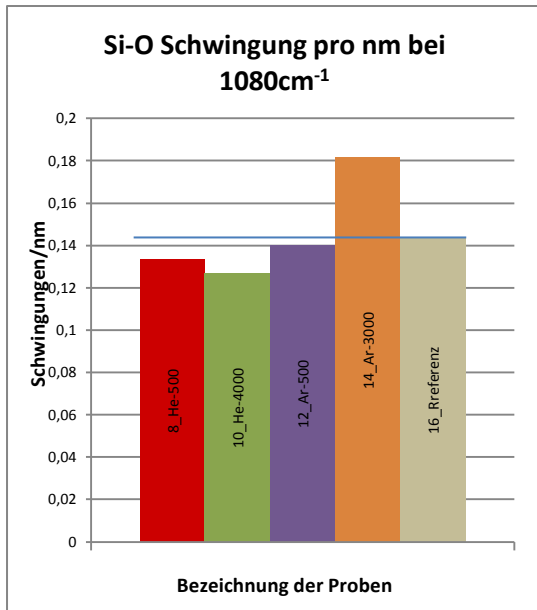


Abbildung 5.15 2 : Durch die schlechte Uniformität bei den großen Verdünnungen sind vor allem die 500scc Verdünnungen mit dem Standard vergleichbar. Bei beiden sind weniger Silanoxidbindungen erkennbar.

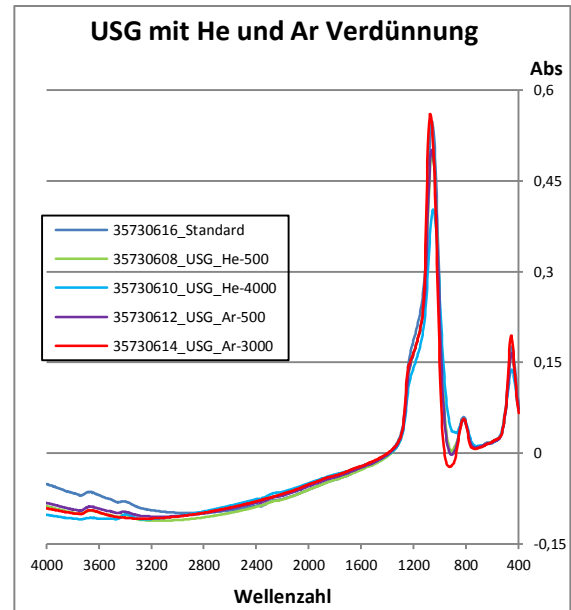


Abbildung 5.15 3 : Hier fällt vor allem der fehlende Peak bei 3650nm⁻¹ der mit 4000scc He verdünnten Probe auf, was den Silanolpeak entspricht. Weiters ist der Übergang zwischen dem Si-O – Streckschwingungs- und Si-O – Pendelschwingungspeak nur schwach erkennbar.

Argon bewirkt im Spektrum das ähnliche Verhalten nach dem Autoklaven wie auch das HDP – USG, da hier ebenfalls kein Peak zwischen 2300 und 3300cm⁻¹ erkennbar ist. Im Unterschied zu HDP – USG verändert sich hier aber sehr wohl der Si–O Schwingungspeak, was auf einen Einfluss von Feuchte auf die USG–Schicht hindeutet.

Obwohl bei den mit 500 scc Helium verdünnten Prozessgasen ein Wasserpeak vorhanden ist, findet man hier keinerlei Blister. Diese Schicht zeigt zwar in der Hinsicht die Charaktereigenschaften vom produktiven Silan – USG, jedoch hält sie wie Silan – USG mit einem vorgeschalteten Lachgasplasma gut gegenüber Blisterbildung stand.

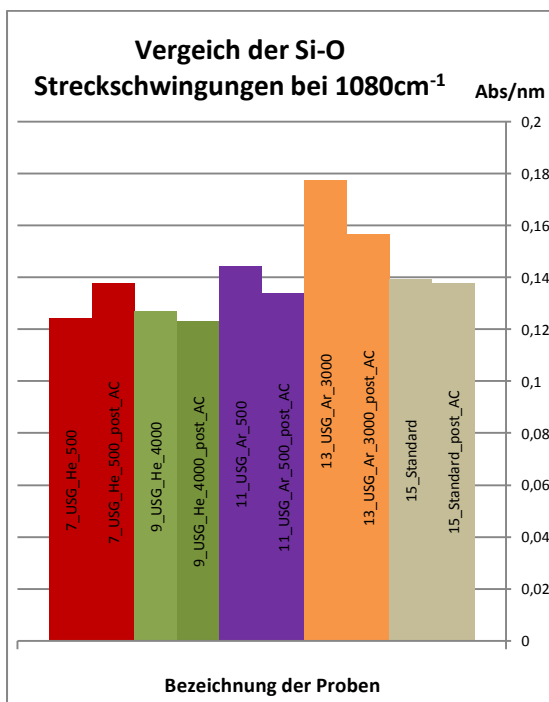


Abbildung 5.15 4 : Wie zu erwarten war nehmen die Si-O – Streckschwingungsmoden nach dem AC etwas ab.

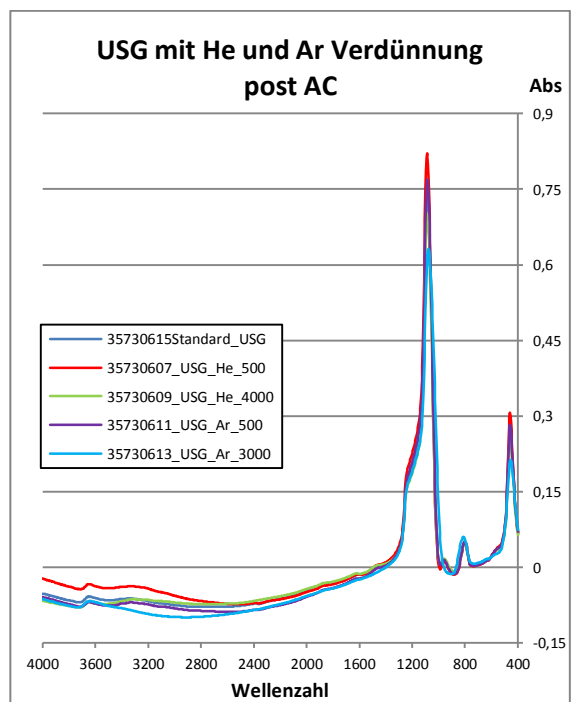


Abbildung 5.15 5 : Der Wasserpeak ist hier unterschiedlich stark ausgeprägt. Vor allem die starke Argonverdünnung verhindert hier das Anwachsen des Wasserpeaks.

Bis auf die Mischung mit 500scc Helium werden die Si–O– Streckschwingungen pro Nanometer weniger. Nicht erkennbar ist auch die gleichmäßige Verschiebung der Si–O– Peaks zu höheren Wellenzahlen. Nach der Abscheidung liegen alle Peaks zwischen 1030cm^{-1} und 1060cm^{-1} , nach dem Autoklaventest liegen alle zwischen 1060cm^{-1} und 1085cm^{-1} . Im Unterschied zu HDP – USG gibt es hier Bewegungen hin zu höheren Wellenzahlen, was auf eine Änderung der Schichtdicke bei allen Versuchstypen hindeuten würde, sowie auf Reaktionen der Schicht mit Wasser.

Die Nachmessung nach dem Autoklaventest bestätigt diese Annahme. Am geringsten ist die Dickenänderung bei einer hohen Argonkonzentration, am höchsten bei einer hohen Heliumkonzentration. Da anfangs gezeigt wurde, dass Silan–USG nur auf einem „sauberen“ SiON – Interface gut haftet, kann man vermuten, dass Helium die Prozessgase in einer Weise aktiviert, die die Haftung zu SiON verbessert.

Tabelle 5.15 2 : Beim Vergleich der Dicken zwischen den unterschiedlichen Verdünnungsarten fällt der Zuwachs der Dicke vor allem bei dem mit Helium verdünnten USG auf.

Dickenänderungen				
He-500_post_AC [%]	He-4000_post_AC [%]	Ar-500_post_AC [%]	Ar-3000_post_AC [%]	Standard_post_AC [%]
9	13	8	2	5

Werden die Proben mit N_2 getempert, zeigen sie im Allgemeinen ein ähnliches Verhalten wie die vorhergehenden Proben gezeigt haben, also ein verschwinden der Peaks im Bereich zwischen 3000- und 3700cm^{-1} .

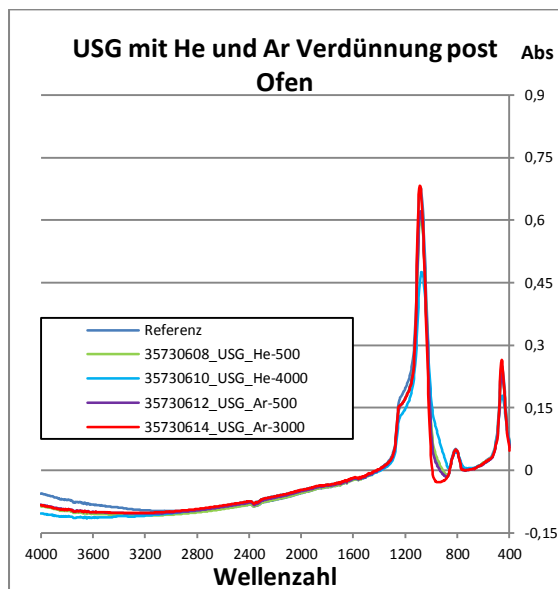


Abbildung 5.15 6: Nach dem Temperschnitt sind die Peaks bei höherer Wellenzahl nicht mehr erkennbar.

Sieht man sich das Schwinden der Dicke an, so erkennt man, dass vor allem die mit 3000scc Argon verdünnte Probe nicht weniger an Volumen zeigt, sondern mehr. Auffallend ist dabei die Anwesenheit des Si–OH – Peaks aber das Fehlen des Si–NH – Peaks nach der Abscheidung. Auch hier reagieren die Endgruppen zu neuen Bindungen oder sie werden als Ammoniak oder Wasser abgespalten.

Tabelle 5.15 3 : Anhand der Tabelle erkennt man die Unempfindlichkeit der mit Argon verdünnten USG – Probe nach dem Autoklavenlauf.

Dickenänderungen				
He-500_post_AC [%]	He-4000_post_AC [%]	Ar-500_post_AC [%]	Ar-3000_post_AC [%]	Standard_post_AC [%]
-3	-4	-3	1	-3

5.16 Untersuchung von Silan-, TEOS- und HDP-USG mittels TOF-ERDA

Übersicht

Bisher war bei der Analyse mittels TOF-ERDA der Schwerpunkt am und um das Interface von SiON:USG gelegen. Mittels der in diesem Kapitel vorgestellten ERDA Ergebnissen rücken die verschiedenen USG-Spezies in den Mittelpunkt. Silan-USG wurde nicht nur nach der Abscheidung, sondern auch nach dem AC und nach dem Ofen mittels ERDA untersucht. Darüber hinaus wurden auch mit Helium und Argon verdünnte Proben der Silan-USG Proben aus dem letzten Kapitel analysiert. Die USG-Schichten wurden bis zu einer Tiefe von 300nm analysiert.

Vergleich der USG-Spezies nach der Abscheidung

Das Hauptaugenmerk wurde hier auf das Verhältnis von Silizium und Sauerstoff, sowie der Wasserstoff- und Stickstoffanteile gelegt. Dabei wurde bei allen drei USG-Spezies ein Silizium- zu Sauerstoffverhältnis knapp am stöchiometrischen Gleichgewicht detektiert. Vor allem der Wasserstoff- und Stickstoffanteil zwischen den USG-Spezies schwankte hier aber beträchtlich (Abbildung 5.16.1). Ein möglicher Zusammenhang zwischen der Stabilität der Schichten gegenüber Feuchteinfluss und den Anteilen von Wasserstoff in den Schichten könnte hier gezogen werden, da HDP-USG den geringsten Wasserstoffanteil aufweist.

Tabelle 5.16 1 : Anhand der Tabelle sieht man vor allem die großen Unterschiede bei den Anteilen von unwillkommenen Fremdelementen wie Wasserstoff und Stickstoff

Post-Deposition USG	O:Si - Verhältnis	N:Si - Verhältnis	H:Si - Verhältnis
Silan	2,000	0,0495	0,166
TEOS	1,899	0,0150	0,098
HDP	1,946	0,0165	0,0536

Bei HDP-USG kann ein Argon- zu Siliziumverhältnis von 0,0113 festgestellt werden. Es wird hier also ein Teil des Argons der zum gleichzeitigen Sputtern der Schicht verwendet wird, in die Schicht eingebaut. Hingegen konnte bei den mit Helium und Argon verdünnten USG-Proben keines der Edelgase detektiert werden, was auf die hohe Energie der Ar-Ionen in der HDP Kammer zurückzuführen ist.

Vergleich der USG-Spezies nach dem AC-Test

Ausgehend von den IR-Spektren war zu erwarten, dass sich das Verhältnis von Sauerstoff zu Silizium bei Silan-USG am stärksten ändern sollte, da der Wasserpeak hier am größten war. Für TEOS-USG wurde nach dem Autoklaventest kein ERDA aufgenommen.

Tabelle 5.16 2 : Die Sauerstoffkonzentration wird bei beiden USG-Spezies durch den Wasseranteil erhöht. Auch HDP-USG lagert hier erkennbar Wasser in die Schicht ein.

Post-Deposition AC 96h	O:Si - Verhältnis	N:Si - Verhältnis	H:Si - Verhältnis
Silan	2,112	0,062	0,257
HDP	2,016	0,0153	0,0818

Die Sauerstoffkonzentration steigt bei Silan-USG um 5,6% an, bei HDP-USG um 3,6%. Es muss aber beachtet werden, dass zwischen den abgeschiedenen Schichten die Atomkonzentrationen leicht schwanken können, wie auch die ERDA-Analyse einen Fehler von ca.7% mitnimmt. Betrachtet man die Zunahme vom Wasserstoff zum Silizium, so nimmt von Silan-USG das Verhältnis um 55% zu, bei HDP-USG um 52%. Der Trend ist für die 300nm Tiefenmessung bei beiden Schichttypen gleich.

Vergleich der USG-Spezies nach dem Tempern

Ein weiterer Hinweis für die Schichtstabilität unter Feuchteinfluss ist die Analyse nach 900 Grad Temperung unter Stickstoffatmosphäre (Abbildung 5.16.3). Wie schon bei den IR-Spektren zu sehen war, werden die Silanol- und Aminogruppen weniger. Über die Abnahme von Sauerstoff sollte feststellbar sein, wieviel Sauerstoffgruppen in Form von Wasser aus der Schicht ausgetrieben werden.

Tabelle 5.16 3 : Nach dem Tempern sieht man die Abnahme von N und H deutlich

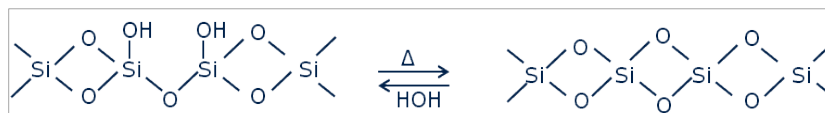
Post-Deposition AC 96h	O:Si - Verhältnis	N:Si - Verhältnis	H:Si - Verhältnis
Silan	1,9946	0,0163	0,0189
TEOS	1,980	0,0159	0,0193

Das Silan-USG, welches als einzige Schicht über den AC- und Temperzyklus lief, zeigt nach dem Tempern ein geringeres Sauerstoff- zu Siliziumverhältnis als vorher. Im Vergleich zum Zeitpunkt nach der Abscheidung hat das O:Si Verhältnis im Silan-USG nach dem Tempern um nur 0,27% abgenommen, was mit einer leichten Abnahme von Sauerstoff verbunden ist. War die Schicht vor dem tempern noch im Autoklaven, wurde das O:Si Verhältnis um 5,87% geringer, was einer Abnahme von ca. 3 Atomprozent Sauerstoff entspricht. Das Verhältnis von Wasserstoff zu Silizium wurde nach dem tempern nicht geringer, verglichen mit der USG-Schicht direkt nach der Abscheidung.

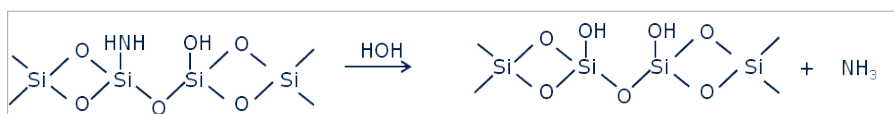
Betrachtet man die O:Si-Werte von Silan-USG, so kann man davon ausgehen, dass bei einer Zunahme der Fläche des Si-O – Streckschwingungspeaks von ca.19% aber nur eine relativ geringe Zunahme von Sauerstoff nach dem Tempersschritt von ca. 3%, Reaktionen in dieser Größenordnung von gespannten Silanoxidbindungen mit Wasser passieren. Vorhandene Silanolgruppen in der Schicht sollten hier einen größeren Anteil an der tetraedrischen Strukturbildung von Silanoxid haben.

5.17 Reaktionen in der USG-Schicht durch Feuchteinfluss und Temperung

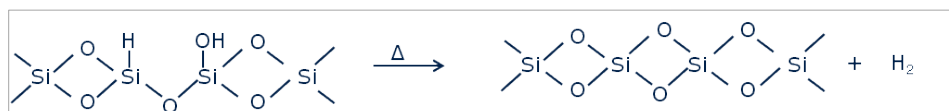
Betrachtet man die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel, so bestätigen sich teilweise die hier (14) erzielten Ergebnisse, welche aber nur durch Feuchteinfluss in der Atmosphäre erhalten wurden. Jedoch ist die reversible Reaktion von Silanoxid mit Wasser vorstellbar, vor allem bei den Bedingungen welche im Autoklaven herrschen.



Darüber hinaus ist die Reaktion zwischen Aminosilan und Wasser ebenfalls vorstellbar, wobei sich das dabei entstehende Ammoniak gut in Wasser löst.



Ebenfalls ableitbar ist eine Migration von einem Proton zu einer Silanolgruppe und die Reaktion zu Wasserstoff während des Temperschlittes.



Die Änderungen von Silan-USG sind an leichtes Eindringen von Wasser in die Schicht, gekoppelt mit einer schwachen USG-Netzstruktur erklärbar. Die durch das schnelle aber energiearme (300W) entstandene Schicht hat mehr gespannte Silanoxidgruppen als TEOS- und HDP-USG, sodass auch hier die Reaktivität bei Silan-USG gesteigert ist und damit die Silanoxid-Netzstruktur weiter geschwächt wird. Aminosilangruppen zusätzlich zu

Silanolgruppen ergeben gleichzeitig auch mehr Endgruppen als dies bei TEOS- und HDP-USG der Fall sein kann.

Nach dem Temperschnitt bei 900C° nähern sich die unterschiedlichen USG-Spezies einander an, indem sie der idealen tetraedrischen Silanoxidstruktur näher kommen und gleichzeitig die Endgruppen abreagieren.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Mittels der vorliegenden Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Blisterentstehung durch zwei Effekte zustande kam. Der erste Effekt ist direkt am Interface zu finden. Gelangt Feuchtigkeit durch die USG-Schicht an die Grenzfläche SiON:USG so gibt es hier chemische Reaktionen, die die Bindungen zwischen den beiden Schichten Schwächen. Das Ablösen der Schicht war auch an den REM – Aufnahmen erkennbar noch bevor ein Blister erkennbar war. Durch die Behandlung der SiON – Oberfläche mit Lachgasplasma war es möglich die Qualität der Bindung zwischen den beiden Schichten zu verbessern, obwohl Feuchtigkeit in gleichem Maße durch die Silan-USG Schicht diffundierte. Die XPS-Analyse zeigte hier die Oxidation der SiON-Oberfläche speziell am Stickstoff, wodurch sehr wahrscheinlich vermehrt Bindungsmöglichkeiten zwischen Silan und Oxid entstehen konnten und mögliche organische Komponenten wegoxidiert wurden.

Der zweite Effekt ist der Schichteffekt. Gelangt nur wenig Feuchtigkeit in die USG-Schicht, dann fällt die Blisterbildung weniger stark aus. Vor allem HDP-USG hat gezeigt, dass durch den weitgehenden Ausschluss von Feuchtigkeit aus der Schicht Blisterbildung ganz vermieden werden kann. Speziell bei HDP-USG kommt ein weiterer Effekt hinzu. Durch die Beimischung von Argon zu Silan und Sauerstoff wird schon von Beginn an nicht nur eine USG-Schicht aufgewachsen sondern auch mit Argon gesputtert. Das SiON-Interface wird dadurch zu Beginn mittels Argon Ionen beschossen und dadurch aktiviert.

TEOS-USG war weder so gut wie das HDP-USG noch so anfällig auf Feuchtigkeit wie das Silan-USG. Auch hier konnte man Blisterbildung erkennen, jedoch reproduzierbar nicht auf der gesamten Scheibe. Ein Peak zwischen 2300- und 3300cm⁻¹ ist aber auch hier erkennbar und daher die Annahme, dass hier die Feuchtigkeit ebenfalls bis an das Interface gelangt.

Vielversprechend waren die Beimischungen von Argon und Helium zu den Silan-USG Prozessgasen. Auch hier konnte eine weitgehende Verminderung bis hin zur Verhinderung von Blistern nachgewiesen werden.

Eine Lösung des Blisterproblems ist durch die Anwendung des Lachgasplasmas gelungen, indem hier vermehrt Bindungen zwischen den beiden Schichten SiON:USG aufgebaut werden, die durch die Oxidation, speziell von Stickstoff, erzielt werden. Ein weiterer Lösungsweg wäre das Abkapseln der Silan-USG Schicht nach außen hin durch eine dichte Schicht wie Siliziumnitrid oder die Verwendung einer dichteren Schicht wie HDP-USG.

Insgesamt ist es erstrebenswert als oberstes eine Schicht zu verwenden, die gegenüber dem Lösungsmittel Wasser resistent ist, da jedes Eindringen von Wasser nicht nur die Schutzschichten selbst zerstören kann, sondern auch Leckströme oder Überspannungen verursachen kann.

Insgesamt ist der Einsatz unterschiedlicher Analysen nötig um die Ursache von unerwünschten Effekten wie der Blisterbildung zu untersuchen. In diesem Fall war die Kombination aus Elementaranalysen und Molekularanalysen sehr nützlich. Auch die Anwendung unspezifischer Analysen wie Stress war für eine Abschätzung über mögliche Reaktionen in der Schicht sehr praktisch. Die Stressanalyse ist deshalb nützlich, da sich hier schon kleine Änderungen in der Schicht messen lassen, noch bevor mittels IR Änderungen in der Schicht nachweisbar werden.

Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die USG– Spezies hinsichtlich ihres Verhaltens bei Feuchtebelastung deutlich unterscheiden und darüber hinaus die Haftung auf SiON sehr unterschiedlich war.

7 Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

Kapitel 2

Abbildung 2. 1: Blisterbild nach dem Aufenthalt des Wafers für 96h im Autoklaven. 8

Abbildung 2. 2: Blisterfreier Wafer nach 96h im Autoklaven.....**Error! Bookmark not defined.**

Kapitel 3

Abbildung 3.3 1: Die Watkins Johnson Anlage ist ein Beispiel für APCVD – Anlagen die gebräuchlich sind. Durch die erwähnten Nachteile versucht man die WJ durch Alternativmethoden zu substituieren (3)..... 14

Abbildung 3.5 1: Anhand der Stress-Spannungskurve können die markanten Punkte abgelesen werden 16

Abbildung 3.5 2: Wird ein Wafer beschichtet übt die Schicht einen Druck auf den Wafer aus, der ihn in eine Richtung verbiegt. 17

Abbildung 3.5 3: Bei tensilen Stress kann die Schicht reißen, bei kompressiven Stress können mäanderförmige oder blasenförmige Muster entstehen. 18

Abbildung 3.5 4: Arbeitet man mittels high density plasma wird durch den Beschuss mit Neutralteilchen wie Argon die Schicht zunehmend kompressiv da die Schicht kompakter wird 19

Kapitel 4

Abbildung 4.2 1: Der schematische Aufbau des FT-IR zeigt den Lichtweg, der mittels mobilen Spiegel verlängert und verkürzt werden kann. Dabei interferieren gewisse Wellenlängen. Das dabei entstehende Interferogramm wird mittels Fouriertransformation ausgewertet. 22

Abbildung 4.2 2: Interferenzmuster der mittels BPR erhaltenen Profile..... 23

Abbildung 4.2 3 :Das an der Probe und an den Schichten reflektierte Licht wird bis zu einem Winkel von 64 Grad detektiert 23

Abbildung 4.2 4: Links sieht man das Signal des p-polarisierten Lichtes, rechts das des s-polarisierten Lichtes..... 24

Abbildung 4.2 5: der Vierzellendetektor misst Winkelabhängig die Intensitäten des einfallenden Lichtes 26

Abbildung 4.4 1: Schematische Ansicht des Deckels und des Bodens ober- und unterhalb des Wafers 27

Abbildung 4.4 2: Aussenansicht des MX 204 mit einem Wafer am Wafereinzug..... 27

Abbildung 4.4 3 : Das Ansprechverhalten der Kondensatoren widerspiegelt das Bowverhalten des jeweiligen Wafers. 28

Abbildung 4.5 1 : Anhand des schematischen Aufbaues eines TOF-ERDAs sind die Hauptkomponenten und die Flugrichtung des Projektil- und des Targetions. 29

Abbildung 4.5 2 : Spektrum des TOF-ERDAs 29

Abbildung 4.8 1: Das Kontaktwinkelmessgerät ist hier schematisch aufgezeichnet. Der Tropfen wird mit einer Mikropipette auf den Wafer aufgebracht 32

Abbildung 4.8 2: Der Kontaktwinkel wird wie in der Abbildung gezeigt, gemessen..... 32

Abbildung 4.10 1: Anhand des schematischen Aufbaues der Centura HDP ist der Grundriss zu erkennen 34

Abbildung 4.10 2: Die Vorderansicht der Centura HDP zeigt eine geöffnete und eine geschlossene Ladekammer sowie den Bildschirm der Prozesssteuerung..... 34

Abbildung 4.10 3 : Die Gaseinleitung wird mit dem Gaseinlassring realisiert. Über zwei separate Leitungen wird Silan und Sauerstoff eingeleitet. 36

Abbildung 4.10 4 : Der elektrostatische Chuck ist aus mehreren Elementen zusammengebaut. 36

Abbildung 4.10 5: Vorteil des bipolaren Chucks ist die Unabhängigkeit der Haftung am Chuck vom Plasma. 37

Abbildung 4.11 1: Ansicht der Front einer P5000. In der Mitte sieht man die Ladekammer 38

Abbildung 4.11 2 : Um eine Kassette in die Ladekammer einladen zu können, kann der Schlitten links bzw. rechts fahren 38

Abbildung 4.11 3: Innenansicht einer lampenbeheizten Abscheidkammer. 39

Abbildung 4.11 4 : Gesamtaufbau der P5000 mit den wichtigsten Peripherieeinheiten neben der Abscheidkammer 39

Abbildung 4.11 5 : Der Showerhead ist aus Edelstahl, in den eine große Anzahl Löcher gebohrt ist, die am unteren Ende konisch auslaufen. 40

Abbildung 4.11 6: Ansicht einer geöffneten Abscheidungskammer mit den Unterschiedlichen beschriebenen Anlagenteilen	40
Abbildung 4.13 1: Das Doppelkammersystem der Producer erlaubt schnellere Durchsatzraten. Auf diesem Typ wurde in Helium verdünntes USG abgeschieden.....	42
Abbildung 4.13 2 : Frontansicht der Producer. Zu sehen ist die Ladekammer mit den beiden Plätzen für je eine Kassette und den schwarzen Klappen der Loadlock Chambers.	42
Abbildung 4.13 3 : Prinzipiell ist die Prozesskammer der Producer ähnlich aufgebaut wie jene der P5000. Auch die Gaszuführung ist für beide Kammern in einem gelöst.	43

Kapitel 5

Abbildung 5.2 1 : Lichtmikroskopische Aufnahme der mit N ₂ gereinigten SiON-Oberfläche (links) und der mit Lachgas gereinigten Oberfläche (rechts). Hier sind keine Blister zu sehen.	51
Abbildung 5.2 2 : Haften Schichten aufeinander, dann sieht man, wie zwischen SiON und USG, eine klar abgegrenzte Kante.	51
Abbildung 5.4 1: Bei guter Adhäsion von USG auf SiON ist nur eine Kante zwischen den Schichten beobachtbar.	56
Abbildung 5.4 2 : Haftet USG schlecht auf SiON ist dies anhand des schwarzen Streifens über der Kante von SiON sichtbar. Hier kann man sehen, dass sich USG vollständig von SiON abhebt.	56
Abbildung 5.4 3 : Wo die Spannungen groß werden entstehen Blister.....	56
Abbildung 5.4 4 : Hier kann man einen Blister in der Entstehungsphase beobachten.....	56
Abbildung 5.4 5 : Blister mit kleinerem Durchmesser nach dem AC-Trest.....	57
Abbildung 5.4 6: Blister mit größerem Durchmesser nach dem AC-Test.....	57
Abbildung 5.5 1 : TEOS-USG zeigt nach dem AC-Test eine sehr spezielle Blisterverteilung über den Wafer. Grund dafür dürfte eine unterschiedliche Plasmaverteilung während der Abscheidung sein.	57
Abbildung 5.7 1 : Die Übersicht über den Schichtstack und die einzelnen Schichten zeigen das Stressverhalten der Schichten über die Zeit nach einem, zwei und drei Tagen.	59
Abbildung 5.7 2 : Auch der Bowverlauf veranschaulicht die geringe Änderung des SiONs nach dem AC und die starke Änderung des USGs.	60
Abbildung 5.7 3 : Vergleicht man den Stress zwischen den USG-Spezies sieht man, das nach dem Abscheiden das HDP-USG den größten tensilen Stress hat, die Stressänderung durch den AC aber viel kleiner ist als bei TEOS und Silan-USG.....	60
Abbildung 5.7 4 : Auch der Schichtstack der unterschiedlichen USG-Spezies zeigt die stärkste Veränderung beim Silan-USG.....	60
Abbildung 5.8 1 : Werden die SiON und die USG-Schicht in einem Rzept abgeschieden, dann stellen sich wie man sieht die einzelnen Elemente in der Schicht nur langsam um.	61
Abbildung 5.8 2 : Am schnellsten stellt sich das Elementverhältnis mit HDP-USG ein wenn vorher noch ein Lachgasplasma-clean geschaltet wurde.	61
Abbildung 5.8 3 : Bei Anwendung des Lachgasplasmas vor der USG-Abscheidung stellt sich das Elementverhältnis aber langsamer ein wie wenn man dasselbe auf der HDP mit HDP-USG machen würde.	62
Abbildung 5.8 4 : Auf der HDP stellt sich das Elementverhältnis innerhalb von 20 nm ein.	62
Abbildung 5.10 1 : Nicht nur der Stress über die Zeit ändert sich bei SiON nur sehr wenig, auch im IR erkennt man nur sehr geringe Änderungen, was ein weiterer Hinweis auf eine geringe Wechselwirkung mit Wasser hinweist.....	64
Abbildung 5.10 2 : Das Spektrum von Silan – USG zeigt eine deutliche Änderung der Schicht über die Zeit. Schon nach 24 Stunden ist eine deutliche Verschiebung des Si-O – Streckschwingungspeaks hin zu höheren Wellenzahlen ersichtlich.	65
Abbildung 5.10 3 : Nach der Abscheidung liegen die Si-O – Streckschwingungspeaks noch übereinander. Nach dem Autoklaven sieht man die Aufspaltung der Peaks nach drei Zeitstufen. Zwischen dem 2. Und 3. Tag passiert bei einer 300nm Schicht nur mehr wenig.	66
Abbildung 5.10 4 : Verglichen mit dem Si-O – Streckschwingungspeak passiert beim Wasserpeak zwischen dem 2. Und 3. Tag ebenfalls relativ wenig. Die Schicht scheint zu dem Zeitpunkt mit Wasser gesättigt zu sein.	66
Abbildung 5.10 5 : Im Schichtstack SiON:USG ist der Wasserpeak nach 72 Stunden weniger stark ausgeprägt, auch deshalb, weil die USG-Schicht mit 900nm relativ dick ist. Hingegen zeigt der Si-O – Streckschwingungspeak eine starke Änderung.	67

Abbildung 5.10 6 : TEOS-USG ist weitgehend unverändert. Auffallend ist hier der Wasserpeak, der sich auch hier einstellt. Peakverschiebung ist aber bei keinem Peak beobachtbar. Eine leichte Veränderung der Basislinie bei 950cm^{-1} deutet darauf hin, dass möglicherweise Si-OH...HOH – Spezies entstehen.	67
Abbildung 5.10 7 : HDP – USG ist gegenüber Feuchtigkeit sehr stabil und zeigt im Testzeitraum von 96h im Autoklaven nur sehr geringe Änderungen. Bei genauer Analyse ist ein kleiner Wasserpeak erkennbar. Ansonsten ändert sich auch bei diesem Spektrum nichts.	68
Abbildung 5.10 8 : Über die Subtraktion der Spektren vor und nach dem Autoklaven ist ein genauerer Vergleich zwischen den USG – Spezies machbar. Silan – USG zeigt hier die markantesten Änderungen gegenüber den beiden anderen USG - Spezies.	68
Abbildung 5.11 1 : anhand des Spektrums sieht man deutlich die Abnahme der beiden Wasserpeaks und eine Strukturierung des Buckels am Si-O – Streckschwingungspeak.	69
Abbildung 5.11 2 : Auch bei TEOS – USG verschwindet der Wasserpeak durch das Tempern, jedoch ist hier auch eine deutliche Änderung der Si-O – Streckschwingungspeaks erkennbar. Auch hier wird der Buckel des Si-O – Streckschwingungspeaks strukturierter.	69
Abbildung 5.11 3: Auch das HDP – USG zeigt eine leichte Änderung der Si-O – Peaks. Auffallend ist hier auch das Verschwinden des Si-OH – Peaks bei 3650cm^{-1}	70
Abbildung 5.12 1: Volumenzunahme über die Zeit und der zugehörige Stress.....	71
Abbildung 5.13 1 : Anhand der Abbildung wird die Abhängigkeit der Schichtdicke gegenüber der Stess- und Berchungsindexentwicklung sichtbar. Anscheinend haben unterschiedliche Sättigungsgrade von Wasser in der Schicht, bedingt durch die Schichtdicke unterschiedlich starke Reaktionen im Autoklaven zur Folge.	73
Abbildung 5.13 2: Die linearen Regeressionen zeigen deutlich den Zusammenhang zwischen der Schichtdicke und den Ätzraten an.	74
Abbildung 5.15 1 : Anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen ist die Blisterfreiheit der Schicht gut sichtbar.	79
Abbildung 5.15 2 : Durch die schlechte Uniformität bei den großen Verdünnungen sind vor allem die 500scc Verdünnungen mit dem Standard vergleichbar. Bei beiden sind weniger Silanoxidbindungen erkennbar.	80
Abbildung 5.15 3 : Hier fällt vor allem der fehlende Peak bei 3650nm^{-1} der mit 4000scc He verdünnten Probe auf, was den Silanolpeak entspricht. Weiters ist der Übergang zwischen dem Si-O – Streckschwingungs- und Si-O – Pendelschwingungspeak unterschiedlich stark ausgeprägt.	80
Abbildung 5.15 4 : Wie zu erwarten war nehmen die Si-O – Streckschwingungsmoden nach dem AC etwas ab.	80
Abbildung 5.15 5 : Der Wasserpeak ist hier unterschiedlich stark ausgeprägt. Vor allem die starke Argonverdünnung verhindert hier das Anwachsen des Wasserpeaks.	80
Abbildung 5.15 6: Nach dem Tempersschritt sind die Peaks bei höherer Wellenzahl nicht mehr erkennbar.	81

7.2 Tabellenverzeichnis

Kapitel 3

Tabelle 3.2 1: Ein Auzug der Filme die mittels PECVD hergestellt werden können (1) 12

Kapitel 4

Tabelle 4.9 1 : Mittels XPS sieht man das Elementverhältnis vor der Behandlung der SiON-Oberfläche mit dem Lachgasplasma. Das Fluor ist ein Artefakt der Kammerreinigung mittels NF_3 63

Tabelle 4.9 2 : Das Elementverhältnis an der Oberfläche von SiON wird oxidiert, wobei die Oxidation v.a. spezifisch den Stickstoff angreift. 63

Tabelle 4.9 3 : Anhand von HDP-USG vor dem Heliumplasma sieht man den hohen Kohlenstoffanteil an der Oberfläche der in der Tiefe mit TOF-ERDA nicht fortgesetzt wird. 63

Tabelle 4.9 4 : Obwohl ein Heliumplasma zur Oberflächenaktivierung genommen wurde erhöhte sich der Stickstoffanteil um 8%, was auf eine Reaktion der Oberfläche mit Luftstickstoff hinweist. 63

Tabelle 4.16 1 : Zu sehen sind die Definitionsmöglichkeiten um die Kammer einzustellen und der erste Schritt eines Rezeptes. 45

Kapitel 5

Tabelle 5.10 1 : Anhand der Tabelle sieht man die unterschiedlichen Schwingungsmoden von SiON 65

Tabelle 5.10 2 : Die Schwingungsmoden von Silan-USG. Nach dem Autoklaven kommen die beiden Wasserpeaks bei 950cm^{-1} und $2300\text{--}3300\text{cm}^{-1}$ zum Spektrum nach der Abscheidung hinzu. 65

Tabelle 5.11 1 : Hier sieht man das Rezept mit dem die Scheiben im Ofen getempert wurden. 70

Tabelle 5.12 1 : Bei einer Schichtdicke von 300nm Silan-USG stellt sich nach 12 Stunden schon eine relativ große Dickenzunahme ein. Auch hier sieht man die Durchlässigkeit der Schicht. 71

Tabelle 5.12 2 : Mit der Dickenzunahme ändert sich auch der Stress. Anhand des Stresses lässt sich aber eine weitere Veränderung der Schichteigenschaften erahnen, da der Stress zunimmt obwohl sich das Volumen nicht mehr ändert. 71

Tabelle 5.12 3 : Vergleicht man die USG – Spezies miteinander, erkennt man auch hier den Zusammenhang zwischen Stabilität der Schicht und Änderung der Schichtdicke. 72

Tabelle 5.12 4: Die Ätzrate steigt von dünnen zu dicken Schichten sichtbar an. Gründe für höhere Ätzraten können ein höherer Anteil an Silanoxidgruppen, ein höherer Grad an Porosität oder weniger dichte Schichten durch eine geringere Wirkung durch das Tempern bei dicken Schichten sein. 74

Tabelle 5.14 1 : Mit dem Bearbeitungsgrad der Proben ändert sich auch die Schichtdicke. Die dickeren Schichten brauchen länger um nach dem tempern unter die Ausgangsdicke zu gelangen als die dünnen Schichten. 73

Tabelle 5.14 2 : Die Ätzraten direkt nach der Abscheidung zeigen einen Zusammenhang mit der Stabilität der Schichten gegenüber Feuchtigkeit. 75

Tabelle 5.14 3 : Die Peakflächen pro Nanometer nach der Abscheidung zeigen, dass auch zwischen den unterschiedlich dicken Schichten Abweichungen vorkommen. 76

Tabelle 5.14 4 : Nach dem Autoklaven sieht man eine Erhöhung des gefitteten Peaks der substituierten Siliziumoxid – Bindungen und eine Verkleinerung des Siliziumoxidpeaks. 76

Tabelle 5.14 5 : Nach dem Tempern ist die Umkehrung des vorhergehenden Effektes erkennbar, also eine Vergrößerung des Siliziumoxid Anteiles erkennbar. Silanol reagiert wieder zu Siliziumoxid weiter. 76

Tabelle 5.14 6 : Peaks pro Nanometer direkt nach der Abscheidung von Silan - USG..... 77

Tabelle 5.14 7 : Nach dem Tempern erkennt man eine Vergrößerung des Silanoxidpeaks und eine Abnahme der Silanol- und ungesättigten Silanoxidpeaks 77

Tabelle 5.14 8 : TEOS-USG zeigt nach der Abscheidung folgende Peaks. 77

Tabelle 5.14 9: Nach dem Ofen verändern sich die Peaks nur wenig. 77

Tabelle 5.14 10 : HDP-USG - Peaks nach der Abscheidung 78

Tabelle 5.14 11 : Nach dem Ofen sind die Peaks nur sehr wenig verändert. 78

Tabelle 5.15 1 : Die Liste zeigt die einzelnen Ströme und die Verdünnung mit Helium und Argon, welche zur Abscheidung verwendet wurde.	78
Tabelle 5.15 2 : Beim Vergleich der Dicken zwischen den unterschiedlichen Verdünnungsarten fällt der Zuwachs der Dicke vor allem beim mit Helium verdünnten USG auf.	81
Tabelle 5.15 3 : Anhand der Tabelle erkennt man die Unempfindlichkeit der mit Argon verdünnten USG – Probe.	81
Tabelle 5.16 1 : Anhand der Tabelle sieht man vor allem die großen Unterschiede bei den Anteilen von unwillkommenen Fremdelementen wie Wasserstoff und Stickstoff.	82
Tabelle 5.16 2 : Die Sauerstoffkonzentration wird bei beiden USG-Spezies durch den Wasseranteil erhöht. Auch HDP-USG lagert Wasser in die Schicht ein.	82
Tabelle 5.16 3 : Hier wird die Abnahme aller Elemente zu Silizium sichtbar.	83

7.3 Literaturverzeichnis

1. **Konuma, Mitsuharu.** Film Deposition by Plasma Techniques.
2. **Hilgeman, Ulrich.** Silizium-Halbleitertechnologie. s.l. : Teubner.
3. *Operatorschulung 2012.*
4. **L.Smith, Donald.** *Thin Film deposition, Principles and Practice.*
5. **W.S.Lau.** *Infrared Characterization for Microelectronics.* s.l. : World Scientific.
6. *Optiprobe 2690.* s.l. : Therma Wafe.
7. *Handbuch MX-204.* s.l. : E&H Metrologiy.
8. **Kottler, Christian.** *Dünnschichtanalyse mittels Vorwärtsstreuung bei tiefer Energie.* 2005.
9. **John F.Watts, John Wolstenhome.** *An Introduction to Surface Analysis by XPS and AES.* s.l. : Wiley.
10. **Leary, Skoog.** *Instrumentelle Analytik; Grundlagen, Geräte, Anwendungen.*
11. *Handbuch Centura Ultima HDP.*
12. *Analysis by FT-IR spectroscopy of SiO₂-polycrystalline structures used in micromechanics Stress measurements.* **J.Samitier, S.Marco, O.Ruiz, R.Morante.** s.l. : Sensors and Actuators, Bd. 32. 347-353.
13. **Kahler, Uwe.** Darstellung, Charakterisierung und Oberflächenmodifizierung von Siliziumnanopartikeln in SiO₂. *Dissertation.* Halle-Wittenberg : Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2001.
14. *Correlation of stress behavlor with hydrogen-related impurities in plasma-enhanced chemical vapor deposited silicon dioxide films.* **M.S.Haque, H.A. Naseem, W.D. Brown.** s.l. : Journal of Applied Physics, Bd. 82. 2922.