

Universität Stuttgart
Institut für Nano- und Mikroelektronische
Systeme



Prozessentwicklung von PECVD-Siliziumnitrid-Schichten für photonische Anwendungen

Bachelorarbeit

Für den Studiengang

Technologiemanagement B.Sc.

am Institut für Nano- und Mikroelektronische Systeme

der Universität Stuttgart

in Kooperation mit dem Institut für Mikroelektronik Stuttgart

von

Liam Huber

27. September 2022

Bearbeitungszeitraum	27.04.2022 – 27.09.2022
Matrikelnummer	3390364
Prüfer	Prof. Dr.-Ing. Joachim Burghartz
Betreuer	Markus Greul, M.Sc. Dr. Shen Hue Sun

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Ausführungen, die fremden Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit war in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung. Das eingereichte elektronische Exemplar dieser Arbeit stimmt mit den gebundenen Exemplaren überein.

Stuttgart, den 27. September 2022

(Liam Huber)

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle dem IMS Chips Stuttgart, welches mir einen Vertrauensvorschuss gegeben hat, sodass ich mich in das neue, spannende Themengebiet der Photonik einarbeiten konnte und in Kooperation die Möglichkeit und insbesondere die Ressourcen hatte, meine Bachelorthesis anzufertigen. Daher möchte ich mich bei allen Mitarbeitern bedanken, die mich in diesem Prozess unterstützt haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Markus Greul, der mich in jeder Situation unterstützt hat und mir den Einstieg in das neue Thema leicht gemacht hat. In jeder Durchsprache wurden mir neue Denkanstöße gegeben und von Mal zu Mal habe ich ein tiefergehendes Verständnis zum Thema erhalten, sodass mein Interesse am Thema gestiegen ist.

Auch möchte ich mich bei den Maschinenverantwortlichen Herrn Matthias Moser und Herrn Karsten Knop bedanken. Beide konnten mir bei meinem Fragen rund um die Abscheidungen kompetent zur Seite stehen und haben mir wegweisenden Input geliefert.

Darüber hinaus danke ich meinen Kommilitonen, die mich auf meinem bisherigen Studienweg begleitet haben, für die gegenseitige Unterstützung und die gemeinsame Zeit. Ich kann mit Stolz sagen, dass einige von Ihnen mittlerweile auch zu guten Freunden wurden.

Für den emotionalen Rückhalt danke ich meiner Familie und meinen Freunden. Sie haben mich motiviert, mein Studium fortzuführen, nicht aufzugeben und an mich und meine Ziele zu glauben, egal wie groß die Hürde war.

Liam Huber

Stuttgart, 27.09.2022

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	10
Kurzfassung	11
Abstract	11
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	12
Formelverzeichnis	13
1 Motivation und Zielsetzung	14
2 Grundlagen der Siliziumnitrid-Photonik	15
2.1 Ausbreitung von Laserstrahlung in Wellenleiter	15
2.2 Herstellungsprozess von Siliziumnitrid-Schichten (CVD)	21
2.2.1 Niederdruck CVD (LPCVD).....	22
2.2.2 Plasma unterstütztes CVD (PECVD).....	23
3 Stand der Technik PECVD-SiN-Gasphasenabscheidung	25
4 Oxford NGP80 Abscheideanlage	31
4.1 Aufbau und Funktionsprinzip.....	32
4.2 Technische Spezifikationen.....	33
4.3 Bisher genutzte Abscheideprozesse	34
5 Optimierung der SiN-Abscheideprozesse	35
5.1 Versuchsplanung	35
5.2 Versuchsmaterialien und Messgeräte	36
5.2.1 Waferproben.....	36
5.2.2 Messgeräte.....	36
5.3 Versuchsdurchführung	39
5.4 Datenauswertung	40
5.5 Ergebnisse	57
6 Vergleich bisher genutzter und neuer Abscheideprozesse	59
7 Zusammenfassung und Ausblick	62
Literatur	63
Anhang	66
Anhang A - Lichtfarben	66

Tabelle A.1: Lichtfarben und deren Wellenlängenbereiche innerhalb des sichtbaren Spektrum in Anlehnung an [5]	66
Anhang B - Übersicht aller Versuche	67
Tabelle B.1: Übersicht aller gefahrenen PECVD-Abscheideversuche an der Oxford NGP80.....	67
Bild C.1: Brechungsindex in Abhängigkeit des N ₂ -Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH ₄ -Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	68
Anhang C - Ergänzende Versuchsdiagramme zum Brechungsindex	68
Bild C.2: Brechungsindex in Abhängigkeit des N ₂ -Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH ₄ -Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 150 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	69
Bild C.3: Brechungsindex in Abhängigkeit des N ₂ -Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH ₄ -Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 250 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	70
Bild D.1: Untersuchung einer SiH ₄ -Flussvariation mit festem N ₂ -Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.....	71
Anhang D - Ergänzende Versuchsdiagramme zur Abscheiderate	71
Bild D.2: Untersuchung einer SiH ₄ -Flussvariation mit festem N ₂ -Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.....	72
Bild D.3: Auswirkungen verschiedener N ₂ -Flüsse auf den Brechungsindex bei erhöhtem Druck von 150 mTorr bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C einem SiH ₄ -Fluss von 2 sccm. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	73
Anhang E - Ergänzende Diagramme zum Stress.....	74
Bild E.1: Stress in Abhängigkeit des Druckes bei einer Leistung von 20 W, einem SiH ₄ -Fluss von 2 sccm, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm und einer Temperatur von 350 °C. ..	74

Bild E.2: Stress in Abhängigkeit der Leistung bei einem SiH ₄ -Fluss von 2 sccm, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr	75
Bild E.3: Stress in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Leistung 20 W, SiH ₄ -Fluss von 2 sccm, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm und einem Druck von 130 mTorr.....	76
Bild E.4: Stress in Abhängigkeit des N ₂ -Fluss bei einer Leistung 20 W, SiH ₄ -Fluss von 2 sccm, und einem Druck von 130 mTorr.....	77

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich grundlegender Eigenschaften von Licht verschiedener Lichtquellen, entnommen aus [5].....	15
Abbildung 2: Das Snellius'sche Brechungsgesetz, entnommen aus [5].....	17
Abbildung 3: Darstellung des Reflexionsgesetzes: gerichtete Reflexion an einer ideal glatten (links), diffuse Reflexion an einer rauen spiegelnden Oberfläche (rechts), entnommen aus [5]	18
Abbildung 4: Mikroskop-Bild eines Siliziumnitrid-Wellenleiter mit Siliziumdioxid-Cladding (links) und rechts die schematische Darstellung eines Siliziumnitrid-Wellenleiters, entnommen aus [9].....	19
Abbildung 5: Drei wichtige Eigenschaften eines SiN-Wellenleiters (1) wegen abweichendem Brechungsindex ist Bedingung für Totalreflexion nicht erfüllt , (2) aufgrund einer rauen Oberfläche streut das Laserlicht und (3) Verunreinigungen absorbieren Laserstrahlen [9]	20
Abbildung 6: Übersicht und Vergleich verschiedener CVD Methoden in Anlehnung an [11]21	
Abbildung 7: LPCVD Reaktorschema für SiN-Herstellung aufgeteilt in vier funktionale Bereiche, entnommen aus [12].....	23
Abbildung 8: Schematischer Aufbau eines Plattenreaktors mit kapazitiver Hochfrequenz-Ankopplung, entnommen aus [14]	24
Abbildung 9: Brechungsindex verschiedener N-reicher SiN- und SiO-Rezepte in Abhängigkeit von der Plasmaleistung während der Abscheidung , entnommen aus [22].....	28
Abbildung 10: Schichtdickenvariation bei einer Druckverringerung , entnommen aus [19] ..	29
Abbildung 11: Oxford NGP80 Abscheideanlage, entnommen aus [25].....	31
Abbildung 12: Reaktorkammerschema einer Oxford NGP80 Anlage in Anlehnung an [1] ...	32
Abbildung 13: Funktionsschema eines Ellipsometers in Anlehnung an [26]	36
Abbildung 14: (a) ideales Substrat ohne Biegung, (b) Substratbiegung durch Druckspannung, (c) Substratbiegung durch Zugspannungen in Anlehnung an [29]	38
Abbildung 15: Brechungsindex in Abhängigkeit verschiedener Leistungen mit verschiedenem N ₂ -Fluss, bei einem SiH ₄ -Fluss von 20 sccm, einem N ₂ -Fluss von 500/1000/1500 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	40
Abbildung 16: Brechungsindex in Abhängigkeit des SiH ₄ -Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von	

130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	41
Abbildung 17: Abscheiderate in Abhängigkeit des SiH ₄ -Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	42
Abbildung 18: Stress in Abhängigkeit des SiH ₄ -Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N ₂ -Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr	43
Abbildung 19: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Druckvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	44
Abbildung 20: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Druckvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	45
Abbildung 21: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Leistungsvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	46
Abbildung 22: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Leistungsvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	47
Abbildung 23: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Temperaturvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	48
Abbildung 24: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Temperaturvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	49
Abbildung 25: Auswirkungen verschiedener SiH ₄ :N ₂ Verhältnisse auf den Brechungsindex bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr	51
Abbildung 26: Untersuchung einer SiH ₄ -Flussvariation mit festem N ₂ -Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.	52

- Abbildung 27: Druckvariation mit dem Ziel ein zweites stöchiometrisches Rezept bei einer Leistung von, einem SiH₄-Fluss von 2,5 sccm, einem N₂-Fluss von 1850 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr zu finden. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an..... 53
- Abbildung 28: Auswirkungen einer geringen N₂-Flussverringerng des Standardrezeptes auf den Brechungsindex. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an. 54
- Abbildung 29: Auswirkungen verschiedener N₂-Flüsse auf den Brechungsindex bei erhöhtem Druck von 150 mTorr bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C einem SiH₄-Fluss von 2 sccm. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an. 55
- Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer 13-Punkt-Wafermessung (links) und einer Schichtdickenverteilung mit Uniformity (rechts) 56
- Abbildung 31: Vergleich der Brechungsindizes der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an. 59
- Abbildung 32: Vergleich der Abscheiderate und der Abscheideratenvariation der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard..... 60
- Abbildung 33: Vergleich des Stresses der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard ... 61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der für die Optik relevanten Wellenlängenbereiche in Anlehnung an [5]	16
Tabelle 3: Vor- und Nachteile der PECVD in Anlehnung an [11]	25
Tabelle 4: Zusammenfassung wichtiger Trends für die PECVD-SiN-Abscheidung zur Beeinflussung der Schichteigenschaften	30
Tabelle 5: Minimal- und Maximalbereiche sowie die jeweilige Maschinentoleranz (falls bekannt).....	33
Tabelle 6: SiN-Rezepte am IMS	34
Tabelle 7: Replikationsversuch des NH ₃ -freien Rezeptes aus der IMS-SiN-Rezeptensammlung	41
Tabelle 8: Zusammenfassung wichtiger Trends für die PECVD-SiN-Abscheidung an der Oxford NGP80 zur Beeinflussung der Schichteigenschaften	50
Tabelle 9: Ergebnismatrix zur Zusammenfassung und zum Vergleich der wichtigsten Trends in der Literatur und der Oxford NGP80	57
Tabelle 10: Vergleichsmatrix für die Bewertung der beiden stöchiometrischen SiN-Rezepte	61

Kurzfassung

In den letzten Jahren hat sich Siliziumnitrid durch seine vielfältigen Anwendungsgebiete und die positiven Materialeigenschaften rapide zu einem der größten Hoffnungsträger in der Chipindustrie entwickelt. Es sind Kombinationen von Eigenschaften möglich, die bei anderen Materialien nicht gemeinsam realisierbar sind. Forschungsarbeiten zeigten bereits, dass sich insbesondere das PECVD-Siliziumnitrid als vorteilhaft erweist. Dies äußert sich vor allem in der niedrigen Abscheidetemperatur von unter 400 °C. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Charakterisierung und die Optimierung von NH₃-freien PECVD-Siliziumnitrid-Abschneidprozessen an einer Oxford NGP80 für die Photonik-Fertigung. Ausgehend von den physikalischen Grundlagen wird die Ausbreitung von Licht in einem Wellenleiter erläutert, sowie kritische Produkteigenschaften für die Fertigung von Siliziumnitrid-Wellenleitern definiert. Die hier dargelegten Erkenntnisse werden durch eine umfassende Literaturrecherche gestützt, deren Erkenntnisse gleichzeitig die Basis für die nachfolgenden Siliziumnitrid-Abschneidversuche bilden. Anhand der darin untersuchten Veröffentlichungen wird dargelegt, inwiefern welche Abschneidparameter das Prozessergebnis beeinflussen. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird eine Versuchsmatrix zur Charakterisierung der Abschneidprozesse an der Oxford NGP80 entwickelt. Die Versuche werden bei einer niedrigen Temperatur von 350 °C durchgeführt. Durch verschiedene Variationen der zuvor identifizierten Parameter wird untersucht, mit welchen Rezeptvarianten sich ein stöchiometrisches Ergebnis erzielen lässt.

Abstract

In recent years, silicon nitride has rapidly developed into one of the greatest hopes in the chip industry due to its diverse areas of application and favourable material properties. Combinations of properties are possible which cannot be realized with other materials. Research work has already proven that PECVD silicon nitride is advantageous. This is particularly evident in the low deposition temperature less than 400 °C. In this thesis, NH₃-free PECVD silicon nitride deposition processes are characterized and optimized on an Oxford NGP80 for photonics manufacturing. Starting from the physical fundamentals, the propagation of light in a waveguide is explained and critical product properties for the fabrication of silicon nitride waveguides are defined. The findings presented here are supported by a comprehensive literature review, the results of which also form the basis for the subsequent silicon nitride deposition experiments. On the basis of the publications examined therein, it is shown to what extent which deposition parameters influence the process result. Based on these results, an experimental matrix is developed to characterize the deposition processes on the Oxford NGP80. The experiments will be carried out at a low temperature of 350 °C. By means of different variations of the previously identified parameters, it will be investigated with which recipe variants a stoichiometric result can be achieved.

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

CVD	chemische Gasphasenabscheidung
H-Bindungen	Wasserstoffbindungen
H-Gehalt	Wasserstoffgehalt
IR	Infrarot
Leistung	Plasma-Leistung
LPCVD	Niederdruck aktivierte chemische Gasphasenabscheidung
N	Stickstoff
N ₂ -Fluss	Stickstoff-Fluss
n-Differenz	Brechungsindexdifferenz über den Wafer
NH ₃	Ammoniak
PECVD	Plasma unterstützte Gasphasenabscheidung
PIC	Komplex integrierte Schaltungen in der Photonik
Si	Silizium
SiH ₄	Silan
SiH ₄ -Fluss	Silan-Fluss
SiN-Photonik	Siliziumnitrid-Photonik
SiN-Schichten	Siliziumnitrid-Schichten
SiN-Wellenleiter	Siliziumnitrid-Wellenleiter
SiO ₂	Siliziumdioxid
TACVD	thermisch aktivierte chemische Gasphasenabscheidung
Uniformity	Schichtdickenvariation über den Wafer
UV	Ultraviolett
VIS	sichtbar
Waferbow	Durchbiegung des Wafers
δ	Auslenkung
ε	Einfallswinkel
ε'	Brechungswinkel
n	Brechungsindex
c_o	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$c_{Wellenleiter}$	Lichtgeschwindigkeit im Wellenleiter
ε_g	Grenzwinkel der Totalreflexion
λ	Wellenlänge
E	Elastizitätsmodul
d_s	Dicke des Substrats
ν	Poissonzahl
t	Schichtdicke
R_0	Durchbiegungsradius vor der Abscheidung
R	Durchbiegungsradius nach der Abscheidung
s	Messstrecke
h_v	Ausbiegung des Substrates über eine Messstrecke vor der Abscheidung
h_n	Ausbiegung des Substrates über eine Messstrecke nach der Abscheidung

Formelverzeichnis

<i>Brechungsindex</i>	(2.1).....	16
<i>Snellius'sche Brechungsgesetz</i>	(2.2).....	16
<i>Ablenkung</i>	(2.3)	17
<i>Grenzwinkel der Totalreflexion</i>	(2.4).....	18
<i>Cauchy – Gleichung</i>	(5.1).....	37
<i>Stoney – Gleichung</i>	(5.2).....	38
<i>Durchbiegungsradius vor Abscheidung</i>	(5.3)	38
<i>Durchbiegungsradius nach Abscheidung</i>	(5.4).....	38

1 Motivation und Zielsetzung

Komplex integrierte Schaltungen in der Photonik (PICs) erfordern meist die Abscheidung eines CMOS-kompatiblen Wellenleitermaterials bei niedrigen Temperaturen, damit auf dem Wafer bereits vorhandene Metalleiterbahnen sowie Dioden nicht in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt oder sogar beschädigt werden. Dadurch können keine Gasphasenabscheidungsprozesse (CVD) verwendet werden, die bei hohen Temperaturen ablaufen, sondern es muss auf plasmaunterstützte Gasphasenabscheidung (PECVD) zurückgegriffen werden, um die Abscheidetemperatur möglichst gering zu halten. Ein CMOS-kompatibles und im Bereich einer Wellenlänge von 405 nm bis 2500 nm transparentes Material ist Siliziumnitrid[2]. Es wird bereits in Anwendungen wie der Kommunikation, der Quantentechnologie, der Biophotonik und im Gas-Sensing verwendet [3]. Siliziumnitrid-Schichten (SiN-Schichten), die mit PECVD-Verfahren abgeschieden werden, verfügen meist über deutlich mehr Wasserstoff-Bindungen (H-Bindungen) als Schichten, die mit Hochtemperaturverfahren, wie der Niederdruckgasphasenabscheidung (LPCVD) abgeschieden werden. Diese H-Bindungen absorbieren das "Licht" im Wellenleiter in bestimmten Wellenlängenbereichen, wodurch PECVD-SiN-Schichten für bestimmte Anwendungen nicht eingesetzt werden können. Das Maß an Absorption im Wellenleiter korreliert dabei mit der Anzahl der H-Bindungen. Um möglichst absorptions- und verlustfreie SiN-Schichten in dieser Arbeit herzustellen, wird daher geprüft, ob und wie die Abscheidung von möglichst H-freien Schichten an einer PECVD-Anlage am Institut für Mikroelektronik Stuttgart erfolgen kann.

Ziel der Arbeit ist es eine Methode zu identifizieren, mit der möglichst wasserstofffreie und stöchiometrische SiN-Schichten abgeschieden werden können. Daher werden im Folgenden Eigenschaften für eine Anwendung der SiN-Schicht erläutert. Darauf folgend soll herausgearbeitet werden, welche Parameter Einfluss auf die spezifischen Eigenschaften der SiN-Schichten haben, um im nächsten Schritt eine Matrix zu entwickeln, welche die Einflüsse einzelner Versuchsvariablen auf Parameter der SiN-Schicht darstellt. Dazu soll erarbeitet werden welche quantitativen Bewertungsmöglichkeiten, Messverfahren bzw. Messmethoden es gibt und inwiefern sich diese für eine Analyse der PECVD-SiN-Schicht eignen.

2 Grundlagen der Siliziumnitrid-Photonik

Für das Verständnis von Wellenleitern ist es wichtig einige physikalische Grundlagen zu diskutieren. Es ist deshalb wichtig, da es zu verstehen gilt, wie ein Wellenleiter beeinflussbar ist und wo seine physikalischen Grenzen liegen. Im Weiteren soll ebenfalls auf die chemische Gasphasenabscheidung im Allgemeinen eingegangen werden und herausgearbeitet werden, weshalb PECVD-Siliziumnitrid, gegenüber anderen chemischen Gasphasenabscheidungen, hervorsteicht.

2.1 Ausbreitung von Laserstrahlung in Wellenleiter

Als Laserstrahlung bezeichnet man in der technischen Optik elektromagnetische Wellen, die monochromatisch sind und über eine hohe zeitliche sowie örtliche Kohärenz verfügen. Im Gegensatz zu anderen optischen Strahlquellen emittiert ein Laser somit nur eine bestimmte Wellenlänge von elektromagnetischen Wellen, die nahezu keinen Phasen- und Gangunterschied aufweisen [4]. Dieser Unterschied zu anderen optischen Strahlquellen wird in der folgenden Grafik illustriert.

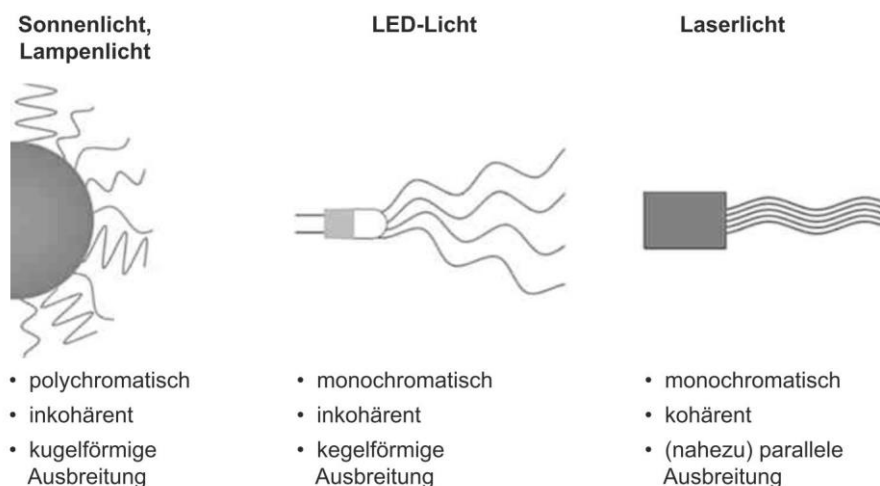


Abbildung 1: Vergleich grundlegender Eigenschaften von Licht verschiedener Lichtquellen, entnommen aus [5]

In der technischen Optik wird elektromagnetische Strahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge in unterschiedliche Bereiche unterteilt. Der für den Menschen sichtbare Bereich wird dabei als Licht bezeichnet. Je nach Verwendung des Begriffes Licht wird neben dem sichtbaren Spektrum (VIS) häufig auch der ultraviolette sowie der infrarote Wellenlängenbereich miteingeschlossen. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Lichtwellenlängen und deren Bezeichnung gibt die folgende Tabelle:

Tabelle 1: Übersicht der für die Optik relevanten Wellenlängenbereiche in Anlehnung an [5]

	Bereich	Teilbereich	Wellenlänge
Ultraviolett (UV)	extremes Ultraviolett	EUV	10-120 nm
	Vakuum-Ultraviolett	UV-C, VUV	100-200 nm
	fernes Ultraviolett	UV-C, FUV	200-280 nm
	mittleres Ultraviolett	UV-B	280-315 nm
	nahes Ultraviolett	UV-A	315-380 nm
sichtbar (VIS)	sichtbar	VIS	380-780 nm
Infrarot (IR)	nahes Infrarot	NIR	780 nm-3 μm
	mittleres Infrarot	MIR	3-50 μm
	fernes Infrarot	FIR	50 μm -1mm

Im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen transversal mit Lichtgeschwindigkeit aus [6]. Änderungen der Geschwindigkeit von Laserstrahlen werden, wenn sie auf einen Lichtwellenleiter treffen, folgendermaßen über den Brechungsindex n definiert:

„Tritt Licht aus dem Vakuum kommend in ein anderes optisches Medium ein, so ändert es aufgrund des optischen Dichteunterschieds seine Geschwindigkeit.“ [5]

Folglich ist $n_{\text{Wellenleiter}}$ der Quotient aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c_o) und des Lichtwellenleiters ($c_{\text{Wellenleiter}}$):

$$n_{\text{Wellenleiter}} = \frac{c_o}{c_{\text{Wellenleiter}}}. \quad (2.1)$$

Der Brechungsindex hängt außerdem von der Wellenlänge ab, was allgemein als Dispersion bezeichnet wird. Das heißt $n_{\text{Wellenleiter}}$ ändert sich mit der Wellenlänge des Laserlichtes. Wie ein Laserstrahl beim Eintritt in ein optisches Medium mit einem anderen Brechungsindex, z.B. einem Lichtwellenleiter, bricht, sagt das Snellius'sche Brechungsgesetz aus. Das Snellius'sche Brechungsgesetz ist wie folgt definiert:

$$n_1 \cdot \sin \varepsilon = n_2 \cdot \sin \varepsilon'. \quad (2.2)$$

Propagiert Laserstrahlung, wie in Abbildung 2 dargestellt, in einem Medium mit Brechungsindex n_1 und trifft mit Brechungsindex n_2 auf ein zweites Medium, so wird der Laserstrahl in Abhängigkeit des Einfallswinkels ε zur Lotebene der Übergangsfläche mit dem Brechungswinkel ε' gebrochen.

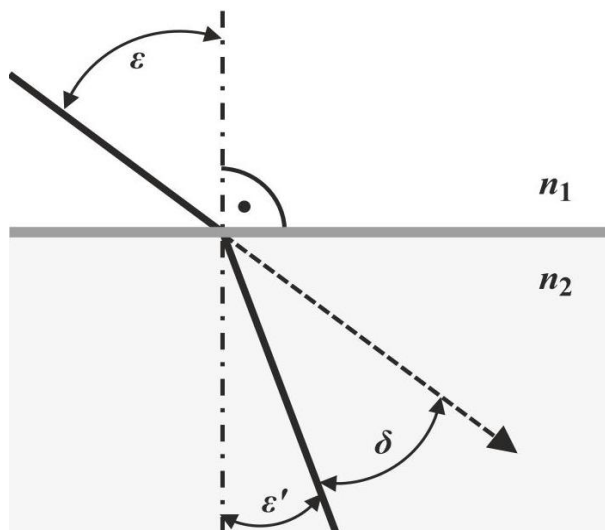


Abbildung 2: Das Snellius'sche Brechungsgesetz, entnommen aus [5]

Die Ablenkung δ des Laserstrahls von seiner Ausgangsrichtung ist folglich:

$$\delta = \varepsilon - \varepsilon'. \quad (2.3)$$

Ist $n_1 < n_2$ wird der Laserstrahl zum Einfallslot hin gebrochen. Ist $n_1 > n_2$ wird der Lichtstrahl vom Einfallslot weg gebrochen. In Abbildung 2 tritt der Fall mit Brechung „zum Einfallslot hin“ ein.

Für Lichtwellenleiter ist die Transmissionsfähigkeit wichtig. Transmission ist das Maß der Laserlichtdurchlässigkeit des Wellenleiters, welche von der Absorption im Wellenleitersmaterial abhängt. Absorption ist die Abschwächung des Laserlichts in der Wellenleiterschicht durch optische Störstellen, wie Fremdkörper oder Lunker. Zu Fremdkörpern gehören in der Siliziumnitrid-Photonik (SiN-Photonik) neben Verschmutzungen im Nanometerbereich vor allem die H-Bindungen, die beim Abscheideprozess durch wasserstoffbasierte Reaktionsgase in der SiN-Schicht entstehen [7]. Diese Si-H oder N-H Bindungen haben wellenlängenabhängige Absorptionsmaxima, die teilweise im Bereich des gewünschten Anwendungsspektrums liegen und damit die Bauteileigenschaften von photonischen Schaltungen nachhaltig verschlechtern und die Funktion stören.

Die Absorptions- und Transmissionsbereiche von unterschiedlichen Materialien sind wellenlängenabhängig. So sind die in der Wellenleiterfertigung verwendeten Materialien Silizium, Siliziumoxid und Siliziumnitrid unterschiedlich durchlässig für Laserlicht. Siliziumnitrid ist für den Wellenlängenbereich von 405 nm bis 2500 nm durchlässig [2]. Es ist somit für sichtbares und nahes Infrarotlicht durchlässig. Andere Wellenlängen werden absorbiert.

Ein Lichtwellenleiter basiert auf dem Prinzip der Reflexion. Für die photonische Anwendung ist es wichtig, ob ein Laserstrahl auf eine reflektierende glatte und eine reflektierende raue Oberfläche trifft. Genauer gesagt wird zwischen zwei Arten der Reflexion, der gerichteten und der diffusen Reflexion, unterschieden. Trifft ein Laserstrahl auf eine ideal reflektierende Oberfläche, so wird die Energie dieses Laserstrahls vollständig zurückgeleitet, also reflektiert. Je nachdem wie glatt die Oberfläche ist, ändert sich der Ausfallswinkel ε_{aus} gegenüber dem Einfallswinkel ε_{ein} (siehe Abbildung 3). Im Falle einer gerichteten Reflexion gilt, dass ε_{ein} gegenüber dem Lot den gleichen Betrag wie ε_{aus} besitzt. Bei der diffusen Reflexion ist der Betrag ε_{ein} ungleich ε_{aus} . Das bedeutet die Laserstrahlung wird in viele verschiedene Richtungen gestreut und nur ein Teil der Energie wird, wie gewünscht, reflektiert.

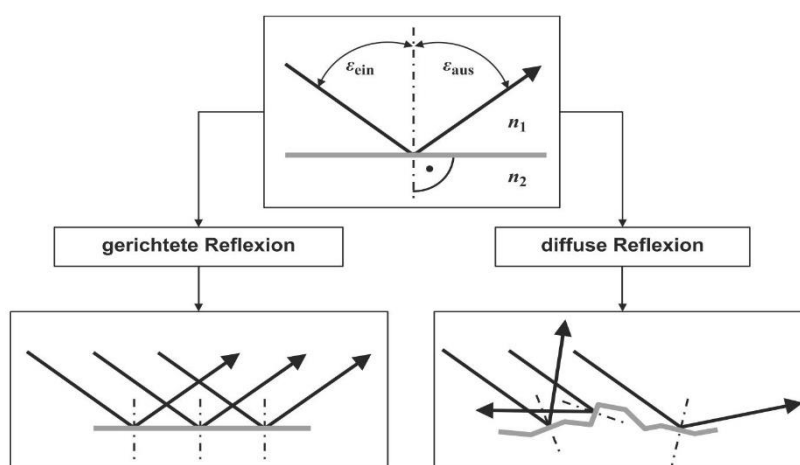


Abbildung 3: Darstellung des Reflexionsgesetzes: gerichtete Reflexion an einer ideal glatten (links), diffuse Reflexion an einer rauhen spiegelnden Oberfläche (rechts), entnommen aus [5]

Wellenleiter, meist Stufenindexfasern, funktionieren nach dem Prinzip der Totalreflexion. [5] Die Anforderung an einen Wellenleiter ist, dass er den Laserstrahl vollständig vom Anfang bis zum Ende leitet. Das bedeutet, dass der Laserstrahl an den Grenzflächen möglichst vollständig im Wellenleiter reflektiert werden muss. Werden Laserstrahlen nicht in den Wellenleiter zurückreflektiert, so werden sie aus dem Wellenleiter gestreut und stehen für die Anwendung nicht mehr zur Verfügung. Das heißt, dass ein Signal oder eine Information nicht vollständig durch den Wellenleiter transportiert und damit nicht übertragen werden kann.

Wie eingeführt, gilt für die Brechung von Licht das Snellius'sche Brechungsgesetz. Beim Übergang vom Wellenleiter, welcher den Brechungsindex n_2 hat, zu einem Außenmedium mit dem Brechungsindex n_1 kann für den Fall $n_1 < n_2$ bis zu einem bestimmten kritischen Einfallswinkel das gesamte Licht durch Reflexion im Wellenleiter verbleiben. Dieser Winkel wird Grenzwinkel der Totalreflexion genannt:

$$\varepsilon_g = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2}\right). \quad (2.4)$$

Er beschreibt den Winkel ab dem Laserstrahlung wieder in den Wellenleiter zurückreflektiert wird. Für größere Einfallswinkel als den Grenzwinkel ist es mathematisch möglich, dass der Brechungswinkel größer 90° wird. Daher ist ein Übergang in das Außenmedium nicht möglich. Der Laserstrahl bleibt im Wellenleiter. Dieser Zustand ist für die SiN-Photonik ein essentieller Bestandteil. Durch die Totalreflexion vom Wellenleiter lässt sich über sehr lange Strecken Licht ohne große Verluste leiten und übertragen. [5]

Lichtwellenleiter finden neben den bekannten Glasfaser-Internetleitungen Anwendung in der integrierten Optik für optische Schaltungen [8]. In Abbildung 4 ist links das Mikroskop-Bild eines Siliziumnitrid-Wellenleiter (SiN-Wellenleiter) zu sehen. Rechts ist der schematische Aufbau des Schichtstapels sowie eine Darstellung der Totalreflexion im Wellenleiter bei einem Einfallswinkel ϵ zu sehen. Für die Totalreflexion wird, wie oben ausgeführt, ein Brechungsindexunterschied benötigt. Um diesen zu erzielen, ist das als „Cladding“ bezeichnete Siliziumdioxid (SiO_2) da. SiO_2 hat einen geringeren Brechungsindex als das Wellenleitermaterial, was bei der Einhaltung eines bestimmten Grenzwinkels die Totalreflexion des Lichts im Wellenleiter ermöglicht.

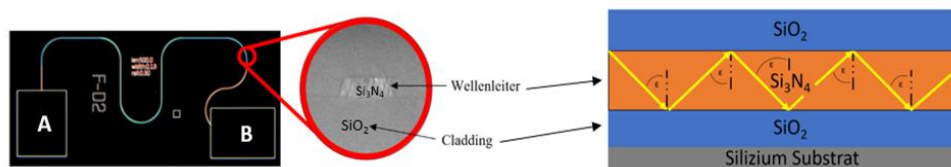


Abbildung 4: Mikroskop-Bild eines Siliziumnitrid-Wellenleiter mit Siliziumdioxid-Cladding (links) und rechts die schematische Darstellung eines Siliziumnitrid-Wellenleiters, entnommen aus [9]

In Abbildung 5 sind drei wichtige Eigenschaften für einen SiN-Wellenleiter aufgeführt. Fall (1) zeigt das Problem der Totalreflexion. Für die Totalreflexion wird bei SiN-Wellenleitern ein bestimmter Brechungsindex benötigt, der von der optischen Auslegung der späteren Bauteile abhängt. Weicht der, bei der Auslegung der optischen Bauelemente, verwendete Brechungsindex von dem tatsächlichen Brechungsindex des Materials ab. So wird die Voraussetzung für Totalreflexion nicht mehr erfüllt und ein Teil der Laserstrahlung verlässt den Wellenleiter (graue Pfeile). Im Fall (2) ist die Oberfläche nicht glatt genug. Die Laserstrahlen werden dadurch nicht an den Grenzflächen gerichtet, sondern diffus gestreut. Die Laserstrahlen erreichen nicht das Ende des Wellenleiters, sondern werden willkürlich gestreut. Im Fall (3) sind beispielhaft schwarze Körner eingezeichnet. Diese stehen für absorbierende, ungewollte Verunreinigungen, wie z.B. Wasserstoffeinschlüsse, Materialeinschlüsse, Lunker und Fehlstellen. Verunreinigungen sollten so gering wie möglich gehalten werden, denn der Laserstrahl wird durch die Interaktion dieser unerwünschten Materialeinschlüsse absorbiert.

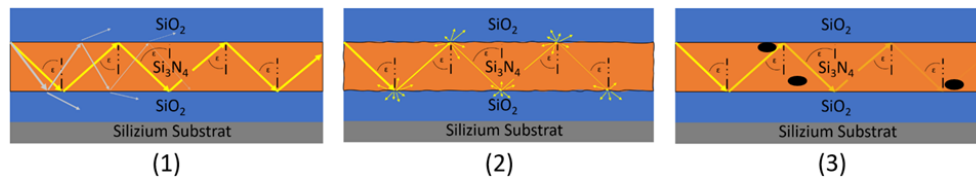


Abbildung 5: Drei wichtige Eigenschaften eines SiN-Wellenleiters (1) wegen abweichendem Brechungsindex ist Bedingung für Totalreflexion nicht erfüllt , (2) aufgrund einer rauen Oberfläche streut das Laserlicht und (3) Verunreinigungen absorbieren Laserstrahlen [9]

Daraus resultiert, dass die Grenzflächen der Wellenleiter für die SiN-Photonik weitestgehend glatt sind. Das Außenmedium sollte so gewählt werden, dass die Totalreflexion möglich ist und der später verwendete Laser sollte Laserstrahlen in der für das Material passenden Wellenlänge emittieren. Weiter sollte der Wellenleiter keine Verunreinigungen enthalten, sodass durch Materialabsorption keine Lichtenergie verloren geht. Das heißt es sollte möglichst rein gearbeitet werden, damit etwaige Verschmutzungen ausgeschlossen sind und es sollte bei der Herstellung ein Rezept gewählt werden, welches möglichst wenige H-Bindungen produziert. Dies geschieht mit dem Ziel, absorbierende chemische Verbindungen zu vermeiden. Die aufgeführten Kriterien stellen die Basis für die Qualitätsbewertung eines SiN-Wellenleiters und somit auch für die in dieser Arbeit herzustellende SiN-Schicht, die als Basis zur Wellenleiterfertigung dienen soll. Wie aus der entsprechenden SiN-Schicht ein Wellenleiter hergestellt wird und welche weiteren Parameter das spätere Produkt beeinflussen, wird von Bogaerts und Chrostowski in [10] beschrieben.

2.2 Herstellungsprozess von Siliziumnitrid-Schichten (CVD)

Die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) ist die Hauptfertigungsmethode für dünne Schichten und Beschichtungen verschiedenster Anwendungen [11]. Dazu gehören Halbleiter für die Mikroelektronik, Optoelektronik, Energiewandler, Dielektrika für die Mikroelektronik, feuerfeste Keramikzellen für Hartbeschichtungen, Korrosionsschutz, Oxidationsschutz, Diffusionsbarrieren und Schutzschichten. Zur Herstellung der unterschiedlich dünnen Schichten werden verschiedene Verfahren eingesetzt, die sich bei den eingesetzten Prozessgasen beziehungsweise Reaktanden und in ihrer Art der Energiezufuhr des Reaktionsprozesses unterscheiden. Eine Übersicht zu den möglichen CVD-Prozessen und -Verfahren zeigt Abbildung 6.

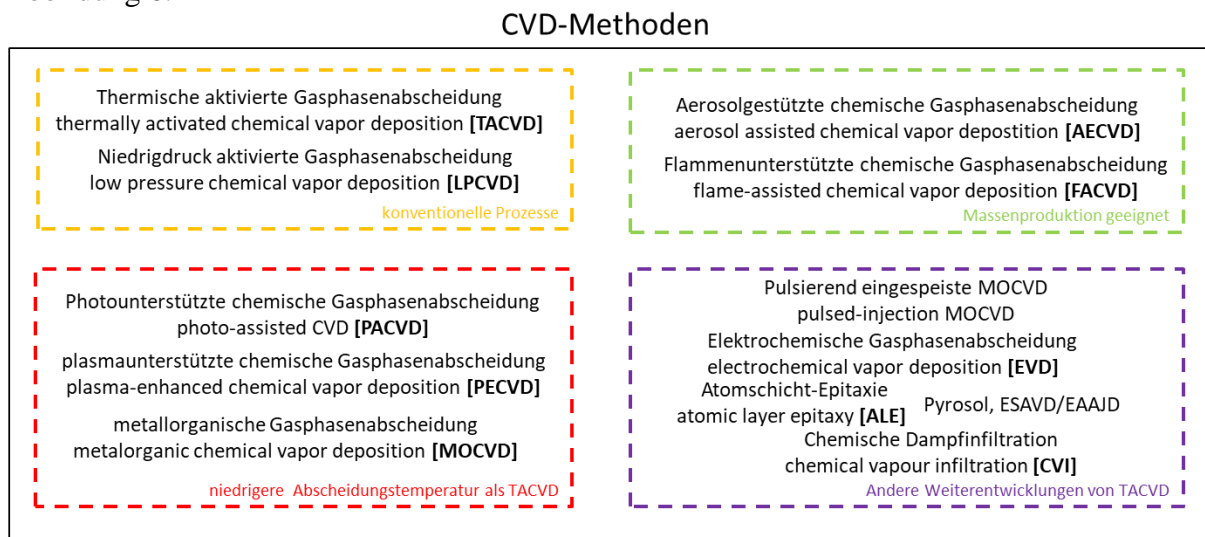


Abbildung 6: Übersicht und Vergleich verschiedener CVD Methoden in Anlehnung an [11]

Laut Choy in [11] werden die konventionell verwendeten CVD-Verfahren thermisch aktiviert. Die hier verwendeten Verfahren nutzen als Reaktanden anorganische Quellen und der Abscheidprozess wird durch die Zufuhr von thermischer Energie ausgelöst. Dadurch ist die Abscheidetemperatur im Vergleich zu anderen CVD-Prozessen vergleichsweise hoch. Je nach gewünschtem Reaktionsprodukt und den dadurch verwendeten Reaktanden liegt die Abscheidetemperatur zwischen 500 °C und 1400 °C. Ein wesentlicher Unterschied zwischen den thermisch aktivierten CVD-Verfahren (TACVD) ist die Höhe des verwendeten Abscheidedrucks in der Prozesskammer. Das Niederdruck aktivierte CVD-Verfahren (LPCVD) benötigt für Abscheidungen einen vergleichsweise geringen Druck von 550 - 950 mTorr [12].

Die in der Abbildung 6 genannten weiteren CVD-Verfahren sind alle Weiterentwicklungen von TACVD-Verfahren. Zwei der genannten Verfahren, AACVD und FACVD, besitzen insbesondere aufgrund ihrer hohen Skalierbarkeit und der Massenproduktion Vorteile. Sie sind vergleichsweise günstig sowie vakuum-basiert. Das PECVD-Verfahren erfordert einen niedrigen Druck, da das Plasma sonst nicht gebildet werden kann. [11]

Choy gibt in [11] vier wesentliche Kriterien für die Auswahl des richtigen CVD-Verfahrens für die jeweilige prozesstechnische Anwendung an.

1. Durch die Abscheidungen dürfen die Eigenschaften des Grundmaterials nicht beeinträchtigt werden.
2. Das CVD-Verfahren muss in der Lage sein, die erforderliche Schicht und Schichtdicke aufzubringen.
3. Es sollte möglichst gleichmäßig beschichtet werden.
4. Die Methode sollte möglichst kosteneffizient sein. Unnötige Kosten in Bezug auf das Substrat, das Beschichtungsmaterial und der Beschichtungstechnik sollten vermieden werden. Die Anlage sollte möglichst robust gegen Ausfälle sein und durch das Beschichten sollte die Qualität des beschichteten Endprodukts verbessert werden.

Für die SiN-Photonik ist es essentiell, dass die abgeschiedenen SiN-Schichten die in Kapitel 2.1 ausgearbeiteten "Qualitätseigenschaften" haben. Des Weiteren dürfen die Abscheidungsprozesse zur Gewährleistung der CMOS-Prozesskompatibilität keine zu hohen Abscheidetemperaturen aufweisen. Eine SiN-Abscheidung für die kombinierte Anwendung mit gängigen Halbleitern darf nicht über 400°C durchgeführt werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass durch das Aufschmelzen bereits vorhandener elektrischer Leiterbahnen aus Metall diese verfließen und nicht mehr korrekt funktionieren. Für die Abscheidung dünner SiN-Schichten wurden daher unterschiedliche Verfahren entwickelt, von denen die zwei gängigsten im Folgenden erläutert werden.

2.2.1 Niederdruck CVD (LPCVD)

Das LPCVD ist ein TACVD Verfahren, welches bei verringertem Druck arbeitet. Das LPCVD-Verfahren ist laut Roenigk und Jensen das bevorzugte Abscheidungsverfahren in der mikroelektronischen Fertigung, wenn es um Polysilizium und Schichten aus Dielektrika geht [12]. Im folgenden Absatz wird anhand der Studie von Roenigk und Jensen die Abscheidung via LPCVD am Beispiel einer SiN-Abscheidung vorgestellt.

Die für die Reaktion benötigten Gase werden wie in Abbildung 7 zu sehen an einer Seite in die Reaktoröhre aus Quarz eingespeist. In diesem Beispiel können pro Abscheidung bis zu 110 Wafer gleichzeitig beschichtet werden. Die Wafer werden senkrecht zur Gasflussrichtung und zentral in der Mitte des Reaktors aufgestellt. Abbildung 7 zeigt, dass die Reaktionsöhre in vier funktionale Teile unterteilt ist. In der Premix-Zone vermischen sich die einzeln eingespeisten Gase. Das Gasgemisch erreicht eine Temperatur von 350 °C. Die Premix-Zone ist durch einen Isolierring von der Preheat-Zone abgegrenzt. In der Preheat-Zone wird das Gasgemisch erhitzt und auf die für die Abscheidung benötigte Temperatur gebracht. In der Wafer-Zone findet die Abscheidung auf die Wafer statt. Die Temperatur beträgt hier 700-900 °C. Das Gas reagiert durch die hohe Temperatur und Siliziumnitrid wird auf die Wafer abgeschieden. Die Preheat-Zone und die der Wafer-Zone nachgelagerte Downstream-Zone sollen in der Regel gleich lang

sein wie die Waferlänge. Die Downstream-Zone ist dazu da, das Gas zur Vakuumpumpe zu transportieren. Der Gasfluss sollte dabei ständig aufrechterhalten werden, sodass ein kontinuierlicher Gasfluss ermöglicht wird. Beim Abscheidungsprozess strömt das Reaktionsgas laminar durch den Reaktor.

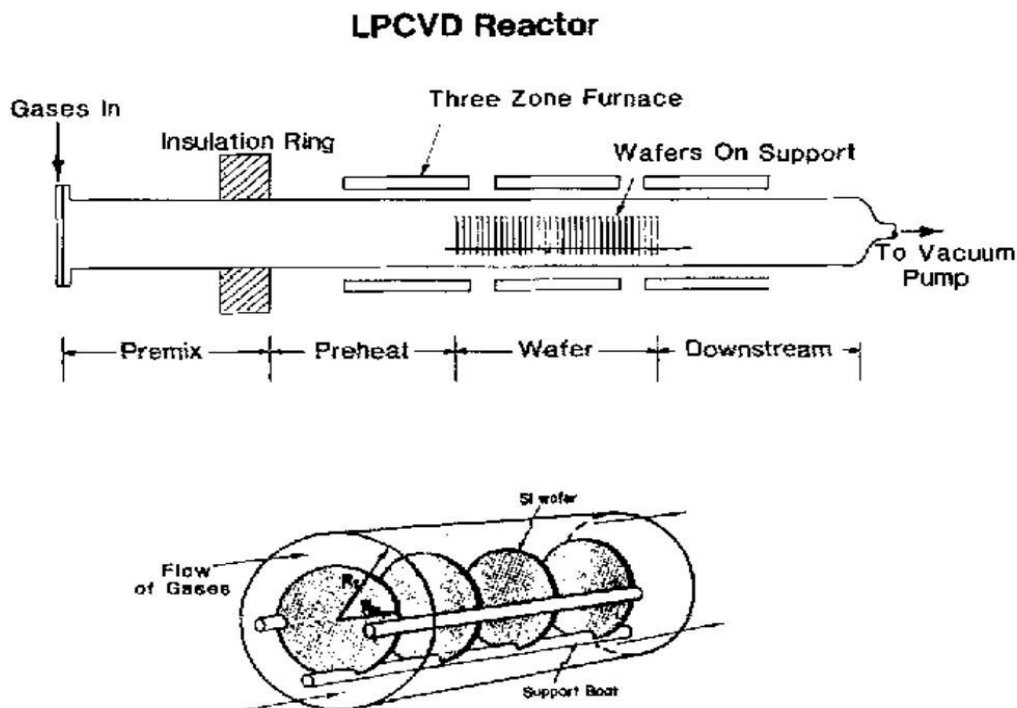
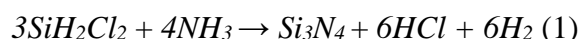


Abbildung 7: LPCVD Reaktorschema für SiN-Herstellung aufgeteilt in vier funktionale Bereiche, entnommen aus [12]

Die Reaktionsgleichung für die Abscheidung einer stöchiometrischen SiN-Schicht mit Dichlorsilan und Ammoniak bei einem LPCVD-Prozess lautet folgendermaßen:



Dabei variieren die Reaktionsprodukte in Abhängigkeit vom Verhältnis der Reaktionsedukte. So kann neben stöchiometrischem SiN auch Si-reiches oder N-reiches SiN hergestellt werden [13].

2.2.2 Plasma unterstütztes CVD (PECVD)

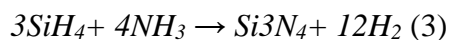
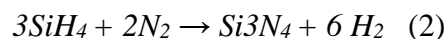
Eine weitere Methode um Siliziumnitrid abzuscheiden, ist das PECVD-Verfahren. Wie Choy in [11] schreibt, könne PECVD entweder direkt oder indirekt betrieben werden. Direkte Reaktoren wie RF Dioden, Mikrowellenreaktoren und induktiv gekoppelte Plasmareaktoren nutzen gasförmige Ausgangsstoffe, Inertgassträger oder Substrate. Die Reaktanten werden dabei direkt in die Zone der Plasmaquellen geführt. Die Plasmaerzeugung liegt somit in der Abscheidungszone. Das Gas wird in den Reaktor eingeführt und die Reaktion durch ein Plasma aktiviert. Auf der Waferoberfläche bildet sich dadurch ein Film aus den festen Reaktionsprodukten der Gase. Indirekte Reaktoren erzeugen das Plasma außerhalb der Abscheidungszone. Dadurch kann eine zusätzliche Beschädigung der Schichten vermieden

werden. Es gibt drei Arten von PECVD-Reaktoren, die Parallelplatten-PECVD, die Röhre mit kapazitiver Kopplung und die Röhre mit induktiver Kopplung. [11] Für die vorliegende Arbeit ist die Parallelplatten-PECVD relevant.

PECVD basiert auf dem Prinzip der Stoßionisation [14]. Ionen werden dabei in einem Hochfrequenzfeld angeregt und auf ein Gasgemisch gestoßen. Dadurch entsteht ein Plasma, das die chemische Gasphasenabscheidung letztlich auslöst. Man spricht auch von einer Plasmaentladung. Die entstehende chemische Schicht ist meist glasartig und wird auf ein sogenanntes Substrat abgeschieden.

Im Parallelplatten-Reaktor wird, wie in Abbildung 8 zu sehen, dass zu beschichtende Substrat auf eine dauerhaft konstant erhitzte Heizplatte gelegt. Die Reaktionsgase können zentrisch oder radial in den Reaktor zugeführt werden. Die Heizplatte wird entweder elektrisch oder mit Strahlung aufgeheizt. Das Hochfrequenzfeld (13,56 MHz) kann direkt (kapazitiv) oder indirekt (induktiv) erzeugt werden. Für diese Arbeit ist die kapazitative Variante relevant. Bei der kapazitiven Variante lädt sich die substrathaltende Platte gegenüber der geerdeten Platte stark negativ auf. Es kommt zu einer massiven Anziehung positiver Ionen, die die Plasmareaktion anstoßen und auf dem Substrat die gewünschte Schicht wachsen lassen.

Laut [14] gibt es für SiN-Abscheidungen folgende Reaktionen für eine PECVD-Maschine:



In beiden Reaktionen entsteht festes Siliziumnitrid auf dem Wafer mit flüchtigen Produkten, die in die Umgebung abgegeben werden und abgepumpt werden müssen.

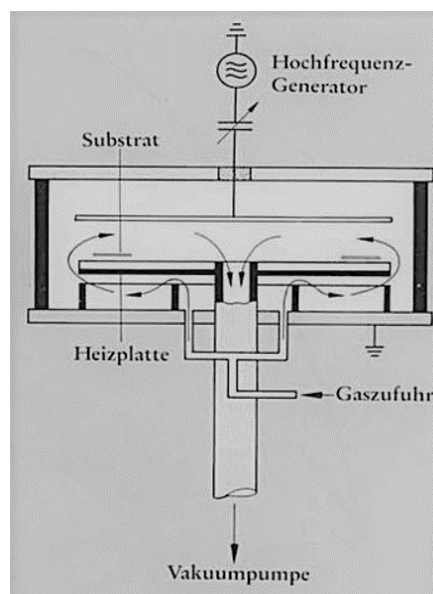


Abbildung 8: Schematischer Aufbau eines Plattenreaktors mit kapazitiver Hochfrequenz-Ankopplung, entnommen aus [14]

In Tabelle 2 sind in Anlehnung an Choy (2003) die Vor- und Nachteile von PECVD dargestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile der PECVD in Anlehnung an [11]

PECVD Vorteile	PECVD Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Abscheidung bei niedrigen Temperaturen • Schichtstruktur & Abscheidung getrennt voneinander einstellbar • Geeignet für temperaturempfindliche Substrate • Die Menge an reaktionsfähigen Ionen kann, entkoppelt von der Abscheidetemperatur, eingestellt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Benötigt Vakuum für das Plasma • Benötigt anspruchsvollen Reaktor für das Plasma • Teurer als konventionelle CVD • hoher Wasserstoffanteil in der Schicht • Plasma mit hoher Ionenenergie (>20 eV) kann Substrat beschädigen

Der große Vorteil der PECVD ist, dass diese bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt werden kann als beispielsweise die LPCVD. Dadurch werden auf dem Wafer vorhandene temperaturempfindliche Bauteile und Komponenten, wie beispielsweise Metallisierungen, nicht beschädigt oder zerstört. Mao et al. haben bei einer Temperatur von 350 °C erfolgreich mit dem PECVD-Verfahren Siliziumnitrid abgeschieden. Laut den Autoren sei die PECVD-Methode vor allem dann wichtig, wenn das Siliziumnitrid auf einen bereits bestehenden photonischen Chip in einer höheren Chipebene aufgetragen werden soll. Dann darf die Abscheidetemperatur den restlichen Chip nicht zerstören. Außerdem ist die Verbiegung des Wafers durch Spannungen (Stress) in den abgeschiedenen SiN-Schichten beim LPCVD-Verfahren deutlich höher und deshalb sei das PECVD-Verfahren besser geeignet [7]. Hoffman et al. sind hier der gleichen Meinung. PECVD sei CMOS kompatibel und somit für sogenannte PIC's geeignet [15] (vgl. auch [16]).

3 Stand der Technik PECVD-SiN-Gasphasenabscheidung

Bevor die Versuche an der Oxford NGP80 stattgefunden haben, erfolgte eine umfassende Literaturrecherche zur Abscheidung von PECVD-Siliziumnitrid-Schichten für die Wellenleiterfertigung. Im Rahmen der Recherche wurden die Ergebnisse einzelner Studien miteinander verglichen, um generelle Trends herauszuarbeiten und diese nach Möglichkeit als Basis für die vorliegende Arbeit zu nutzen. Im Folgenden werden demnach erst Quellen vorgestellt, die auf die Fertigung verlustarmer PECVD-SiN-Wellenleiter eingehen.

Der Wasserstoffgehalt (H-Gehalt) in einer Schicht ist, wie in Kapitel 2 erwähnt, relevant für die Qualität einer SiN-Schicht. Ein hohes Maß an Verunreinigungen, und dazu zählen Wasserstoffverbindungen, wirkt sich negativ auf die Stöchiometrie einer Schicht aus [11]. Die Wasserstoffverbindungen im Material absorbieren Laserstrahlung und der Lichtwellenleiter kann nicht optimal leiten. Das kann dazu führen, dass keine Übertragung von Informationen durch den Wellenleiter stattfinden kann. Mao et al. stellten 2008 im Rahmen ihrer

Untersuchung von PECVD-SiN-Schichten hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften in [3] fest, dass die Anzahl der Wasserstoffverbindungen in der SiN-Schicht mit den Absorptionsverlusten im Wellenleiter korreliert. Der Ansatz zur Reduktion der optischen Verluste im Wellenleiter sei daher die Substitution von wasserstoffreichem Ammoniak (NH_3) durch wasserstoffloses N_2 . Dadurch verringerte sich in Summe die Anzahl der Si-H und N-H Bindungen in der SiN-Schicht, was die Absorptionsverluste im Siliziumnitrid reduzierte [7]. Auch Savall et al. (1995) führten in [17] eine Abscheidung mit Silan (SiH_4) und N_2 durch. Herkömmliche PECVD-SiN-Abscheidungen haben einen H-Gehalt von bis zu 40 % [17]. Dieser konnte von den Autoren durch die Reduktion von Wasserstoff als Reaktant bei einer Abscheidetemperatur von 350 °C auf ca. 11 % reduziert werden. Reynes & Bruyères haben in [18] ebenfalls mit SiH_4 und N_2 Siliziumnitrid abgeschieden. Bei Siliziumnitrid mit einem Brechungsindex von 2,01 (nahe Stöchiometrie) wurde ein H-Gehalt von 8 % gemessen [18]. Eine Substitution von NH_3 mit N_2 hat sich in [19] ebenfalls positiv auf den H-Gehalt ausgewirkt. Beim stöchiometrischen Siliziumnitrid wurde der geringste Anteil an H-Bindungen festgestellt. Die niedrigste H-Konzentration, die mithilfe eines Fourier-Transform-Infrarotspektrometers (FTIR) gemessen wurde, lag bei 14,8 %. Dies seien 10 % weniger als in einem mit NH_3 verwendeten Rezept [19]. Vergleichsweise ähnliche Ergebnisse stellten Grigaitis et al. in [15] fest. Bei einem Brechungsindex von 2,0 wurden mit einem FTIR $1,48 \cdot (10^{22}/\text{cm}^3)$ Si-H Bindungen und $0,33 \cdot (10^{22}/\text{cm}^3)$ N-H Bindungen gemessen. Der H-Gehalt hat sich gegenüber herkömmlichen PECVD-SiN-Abscheidungen deutlich reduziert. Auch [7] misst bei einem nahezu stöchiometrischen Brechungsindex von 2,03 einen niedrigen Anteil an Si-H Bindungen $3,94 \cdot (10^{21}/\text{cm}^3)$ und einen niedrigen Anteil an N-H Bindungen $5,11 \cdot (10^{21}/\text{cm}^3)$. Da die Quellen sich nicht widersprechen und in allen Fällen eine deutliche Reduktion des H-Gehalts erreicht wurde, wird für die spätere Studie ein Rezept zum Abscheiden von Siliziumnitrid ohne NH_3 , sprich mit N_2 , empfohlen.

Bonneville et al. führten in [16] eine Studie speziell für die SiN-Photonik durch. Die Autoren arbeiteten an einer ECR-PECVD-Maschine. Es wurden die folgenden Trends festgestellt. Eine Erhöhung der N_2 -Durchflussrate führt zu einer höheren Abscheiderate, da mehr N_2 für die Reaktion zur Verfügung steht und höhere Drücke während des Schichtwachstums entstehen. Weiter nahm mit erhöhtem Stickstoff-Fluss (N_2 -Fluss) der Brechungsindex ab. Murakami et al. haben bei einem PECVD Abscheidungsversuch [20] mit NH_3 und SiH_4 herausgefunden, dass mit steigendem $\text{NH}_3:\text{SiH}_4$ der Brechungsindex abnimmt. Weiter konnte man der Ergebnismatrix entnehmen, dass die Schichtdicke mit steigendem $\text{NH}_3:\text{SiH}_4$ Verhältnis zugenommen hat. Festzuhalten ist, dass der Brechungsindex mit sinkendem SiH_4 -Anteil abnimmt und das ein steigendes $\text{NH}_3:\text{SiH}_4$ Verhältnis zu einer höheren Abscheiderate führt.

Ein weiterer Parameter, der sich bei einer PECVD-SiN-Abscheidung variieren lässt, ist die Plasma-Leistung (Leistung). Mao et al. identifizierten einen sinkenden Trend der Si-H Bindungen und einen steigenden Trend der N-H Bindungen bei einer Reduktion der Leistung

[7]. Außerdem wurde von Reynes und Bruyère in [12] folgender Trend festgestellt: Mit steigender Leistung erhöht sich die Abscheiderate. Dabei bleibt der H-Gehalt gleich [18]. Den gleichen Trend konnten Bucio et al. in [13] feststellen: Die Abscheiderate steigt mit zunehmender Leistung. Für die Schichtdickenschwankung des Siliziumnitrids auf dem Wafer (Uniformity) gilt, dass diese schlechter wird mit steigender Leistung und besser wird mit steigendem Druck. Karumaki et al. (1988) konnten in [14] zeigen, dass mit steigender Leistungsdichte (W/cm^3) der Brechungsindex abnimmt. Im Gegensatz zu [7] wurde NH_3 für die Abscheidung verwendet. Eine Betrachtung mit einem IR-Spektrometer hat ergeben, dass bei niedriger Leistungsdichte die Si-H Bindungen gegenüber den N-H-Bindungen deutlich dominieren und sich mit steigender Leistungsdichte sukzessive mehr N-H Bindungen bilden [20]. In [17] nutzten Savall et al. ebenfalls wie in [7] N_2 und SiH_4 , um Siliziumnitrid abzuscheiden. Laut den mit einem Infrarot-Spektroskop durchgeführten optischen Messungen stieg bei einer Erhöhung der Leistungsdichte der Stickstoffgehalt in der Schicht sowie die Abscheiderate des Siliziumnitrids. Das Senken des SiH_4 -Anteils im Reaktionsgas verringerte in [7] die Abscheiderate und den Brechungsindex. Mit steigendem N_2 -Anteil sinkt der Brechungsindex [18] (vgl. auch [21]). Es lässt sich abschließend feststellen, dass mit steigendem N_2 -Anteil der Brechungsindex abnimmt.

Bucio et al. haben in [19] ebenfalls für photonische Anwendungen die NH_3 freie SiN-Abscheidung verwendet. Dabei haben sie verschiedene Parameter variiert und daraufhin kombiniert. Als Erstes wurde die Abscheiderate untersucht. Bei einer Silan-Flussvariation stieg die Abscheiderate mit Erhöhung des Parameters und die N_2 -Flussvariation hatte mit Erhöhung des Parameters eine Verringerung der Abscheiderate zur Folge. Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Verhältnis von Stickstoff (N) zu Silizium (Si), angegeben als N:Si Verhältnis. Das N:Si Verhältnis gibt an wie viel N- und Si-Atome nach der Abscheidung in der SiN-Schicht vorhanden sind. Darüber werde hauptsächlich gesteuert, ob nach der Abscheidung entweder eine N-reiche, stöchiometrische oder Si-reiche Schicht entsteht. Der Brechungsindex hilft dabei, eine SiN-Schicht als N-reich, stöchiometrisch oder Si-reich charakterisieren zu können. Moser et al. (2022) zeigen mit Abbildung 9, dass Siliziumnitrid mit einem Brechungsindex größer dem stöchiometrischen Brechungsindex 2,023 Si-reich ist und Siliziumnitrid mit einem Brechungsindex kleiner 2,023 N-reich ist.

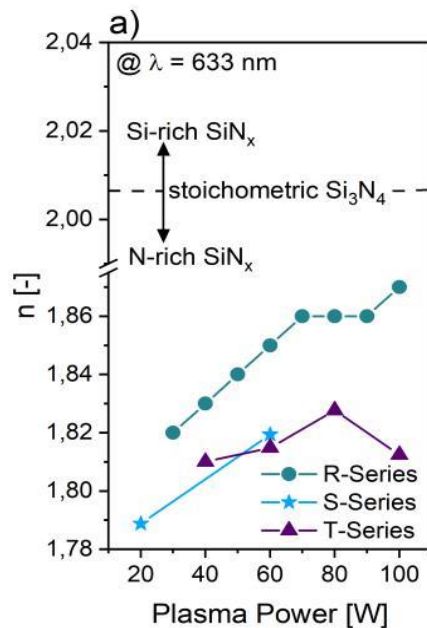


Abbildung 9: Brechungsindex verschiedener N-reicher SiN- und SiO-Rezepte in Abhängigkeit von der Plasmaleistung während der Abscheidung, entnommen aus [22]

Laut [19] lässt sich das N:Si-Verhältnis beeinflussen, indem man den Silan-Fluss (SiH_4 -Fluss), den N_2 -Fluss, die Leistung oder den Druck in der Prozesskammer variiert. Das N:Si-Verhältnis sinkt sowohl bei Erhöhung des SiH_4 -Flusses als auch bei Erhöhung des Kammerdrucks. Beim N_2 -Fluss und bei der RF-Leistung verhält es sich genau andersrum. Bei einer Erhöhung der Parameter steigt ebenfalls das N:Si-Verhältnis. Die Autoren heben hervor, dass der Brechungsindex ein wichtiger Parameter für die photonischen Anwendungen ist. Er beeinflusst, wie das Licht ins Material eintritt und sich fortpflanzt. Maßgeblich wird der Brechungsindex mit dem N:Si-Verhältnis eingestellt. Für ein Verhältnis N:Si $> 1,33$ wurde eine N-reiche Schicht mit niedrigem Brechungsindex erzeugt. Während bei einem Verhältnis N:Si $< 1,33$ die Schicht Si-reicher wird und der Brechungsindex zunimmt. Für ein Verhältnis gleich 1,33 wurde ein knapp stöchiometrisches Verhältnis ($n=2$) erreicht. Weiterhin wird ausgeführt, dass die Bindungskonfigurationen nicht wirklich von den Abscheidungsparametern im Einzelnen abhängen, sondern primär vom N:Si-Verhältnis. Si-Si-Bindungen verringern sich mit steigendem N:Si-Verhältnis. Das bedeutet, dass diese Si-reichen Schichten dominant seien und in N-reichen Schichten quasi nicht existieren. Die Konzentration der Si-N-Bindungen steigt mit dem N:Si-Verhältnis bis $n \sim 1,33$ und fällt, wenn das Verhältnis erhöht wird. Die Studie zeigt außerdem, dass Si-reiche Schichten mehr Si-H-Bindungen aufweisen und N-reiche Schichten mehr N-H-Bindungen. Dies seien 10 % weniger als in einem mit NH_3 verwendeten Rezept. Mäkel und Lüdemann stellten fest, dass die Bindungsdichte von Si-Si bei steigendem N:Si-Verhältnis stetig ansteigt [23]. Im Gegensatz dazu sinkt die Bindungsdichte von Si-Si mit steigendem N:Si-Verhältnis deutlich. Dennoch fällt die Si-Si-Bindungsdichte schneller als die Si-N-Bindungsdichte steigt. Dies führt folglich zu mehr defekten Stellen in der Schicht.

Mackenzie et al. untersuchten den Stress von PECVD-SiN-Schichten, die mit NH_3 erzeugt wurden [24]. Wie die Arbeit zeigt, ist durch eine Erhöhung des NH_3 -Anteils im Reaktionsgas eine Erhöhung des Stresses erreicht worden.

Der Druck ist ein weiterer Parameter, der sich variieren lässt. Laut Bucio et al. in [13] hat der Druck vor allem Auswirkungen auf die Uniformity. Diese verbessert sich mit steigendem Druck. In Abbildung 10 ist die Uniformity über den Wafer hinweg dargestellt. Die Uniformity verbessert sich von 10 % Unterschied zu $<2\%$ bei einer Druckerhöhung in der Reaktorkammer von knapp 28 %. Allerdings erhält man dann Si-reiches Siliziumnitrid und kein stöchiometrisches Siliziumnitrid. Die Oberflächenrauigkeit tendiert dazu schlechter zu sein als bei einem Vergleichsversuch mit NH_3 .

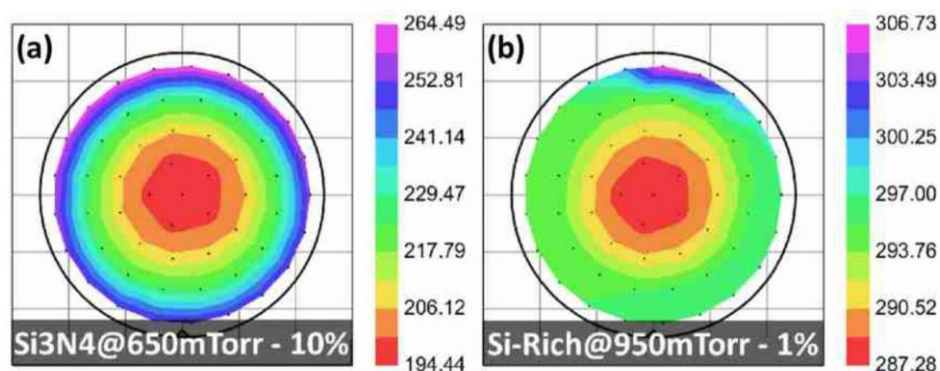


Abbildung 10: Schichtdickenvariation bei einer Druckverringerung , entnommen aus [19]

Für die photonische Anwendung werden Materialien mit einem niedrigen Lichtausbreitungsverlust benötigt. Die Ausbreitungsverluste würden laut [13] hauptsächlich vom N:Si Verhältnis beeinflusst, weniger von den Abscheidungsparametern im Einzelnen. Daraus schließen die Autoren, dass die Ausbreitungsverluste Folge der strukturellen Eigenschaften der Schichten seien. Si-reiche Schichten haben einen hohen Ausbreitungsverlust bei 1310 nm und bei 1550 nm. N-reiche Schichten haben nur bei 1550 nm einen hohen Stöchiometrisches Siliziumnitrid hat bei 1310 nm und 1550 nm einen geringeren Ausbreitungsverlust als die Si-/N-reichen Schichten. Für den Vergleich von Verlustwerten von Licht in einer SiN-Wellenleiterschicht wird in [13] ein Richtwert von $<3 \text{ dB cm}^{-1}$ verwendet. In [7] wurde bei einer wasserstoffarmen SiN-Abscheidung ein Ausbreitungsverlust von $2.1 \pm 0.2 \text{ (dB/cm)}$ gemessen. In vorangegangener Diskussion ist bei gleicher Schicht ein geringer H-Gehalt nachgewiesen worden. Somit ist schlusszufolgern, dass stöchiometrisches Siliziumnitrid, das durch eine wasserstoffarme Abscheidung (mit N_2 statt NH_3) erzeugt wurde, niedrige Ausbreitungsverluste hat.

Grigaitis et al. haben in einer PECVD-SiN-Abscheidung mit N_2 und SiH_4 festgestellt, dass eine niedrigere Abscheidungsrate von Siliziumnitrid positiv auf die Oberfläche der Schicht auswirke. Sie werde weniger rau. [21]

Die folgende Ausführung zeigt die Vorteile einer Reaktion in einer edelgasreichen Umgebung. In [18] wurden die Reaktanten mit Helium verdünnt. Ziel davon sei es, die Abscheidung stabil zu halten. Tatsächlich konnte der Prozess stabil gehalten werden und zudem noch der H-Gehalt in der Schicht verringert werden. Die Stöchiometrie hat dafür abgenommen. Weiter gab es keine Änderungen bei den Si-Si Bindungen, welche die optische Absorption erhöhen [18]. N₂ und SiH₄ wurden dabei mit Argon vermischt, um die Abscheidung zu erleichtern (vgl. auch [7]). Besitzt eine PECVD-Maschine die Möglichkeit die Reaktionsgase mit Edelgasen zu vermischen, ist das folglich zu empfehlen. Die Abscheidung läuft kontrollierter und die Reaktionswahrscheinlichkeit von Silizium und Stickstoff wird erhöht.

Tabelle 3: Zusammenfassung wichtiger Trends für die PECVD-SiN-Abscheidung zur Beeinflussung der Schichteigenschaften

Parameter		Brechungsindex	Abscheiderate	N-Anteil	Si-Anteil	Uniformity
N ₂ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	+	-	-	+	x
	Mittel	o	o	o	o	x
	Hoch	-	+	+	-	x
SiH ₄ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	-	-	+	-	x
	Mittel	o	o	o	o	x
	Hoch	+	+	-	+	x
Leistung	Niedrig	+	-	+	-	-
	Mittel	o	o	o	o	o
	Hoch	-	+	-	+	+
Druck	Niedrig	x	x	+	-	+
	Mittel	x	x	o	o	o
	Hoch	x	x	-	+	-
Legende: "+" = Zunahme; "o" = mittleres Niveau; "-" = Abnahme						

Die Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der vorangegangenen Literaturrecherche übersichtlich zusammen. Die Tabelle soll als Vergleich für die in Kapitel 5 vorgestellten Ergebnisse dienen und ein Anhaltspunkt dafür sein, welche Variationen die Schichteigenschaften wesentlich verändern können, um zielgerichtet die Abscheidung des stöchiometrischen Siliziumnitrids zu erreichen. Durch die Literaturrecherche geht hervor, dass viele Forschungsarbeiten keine Temperaturvariation durchführen. Die meisten Quellen haben bei fester Temperatur (300 °C oder 350 °C) abgeschieden.

4 Oxford NGP80 Abscheideanlage

Alle PECVD-Abscheidungen im Rahmen dieser Arbeit erfolgten an einer Oxford Instruments PlasmaPro NGP80 PECVD Anlage. Die verwendete Anlage ist ein Prototyp und war einmalig am Markt verfügbar. Deshalb ist es wichtig ein für die Maschine speziell entwickeltes Rezept für Siliziumnitrid zu entwickeln, da sie nicht 1:1 mit anderen Maschinen verglichen werden kann. Generell gilt, dass die Maschinen vom gleichen Typ und Hersteller sich untereinander ebenfalls unterscheiden können.



Abbildung 11: Oxford NGP80 Abscheideanlage, entnommen aus [25]

4.1 Aufbau und Funktionsprinzip

Die Oxford NGP80 ist eine parallelplatten PECVD-Anlage, die bei einer Radiofrequenz (engl. radio frequency – RF) von 13,56 MHz betrieben wird. Diese Wechselspannung an der oberen Elektrode, siehe Abbildung 12, generiert das Plasma oberhalb des geerdeten Substrattellers auf dem später das zu beschichtende Substrat liegt. Das Reaktionsgas für den Abscheidungsprozess wird seitlich in die Reaktorkammer eingelassen und unterhalb des Substrattellers abgesaugt und die gewünschten Schichten werden auf dem Substrat abgeschieden. Die Nebenprodukte werden unterhalb des Substrattellers aus der Reaktorkammer abgeführt. Weitere Bauteile dienen dazu den Gasfluss zu regulieren und um in der Reaktorkammer das zur Plasmaerzeugung nötige Vakuum zu erzeugen. Die flüchtigen Produkte des Abscheidungsprozesses werden unterhalb des Substrattellers aus der Reaktorkammer abgeführt. Weitere Bauteile dienen dazu den Gasfluss zu regulieren und in der Reaktorkammer das zur Plasmaerzeugung nötige Vakuum zu bereitzustellen.

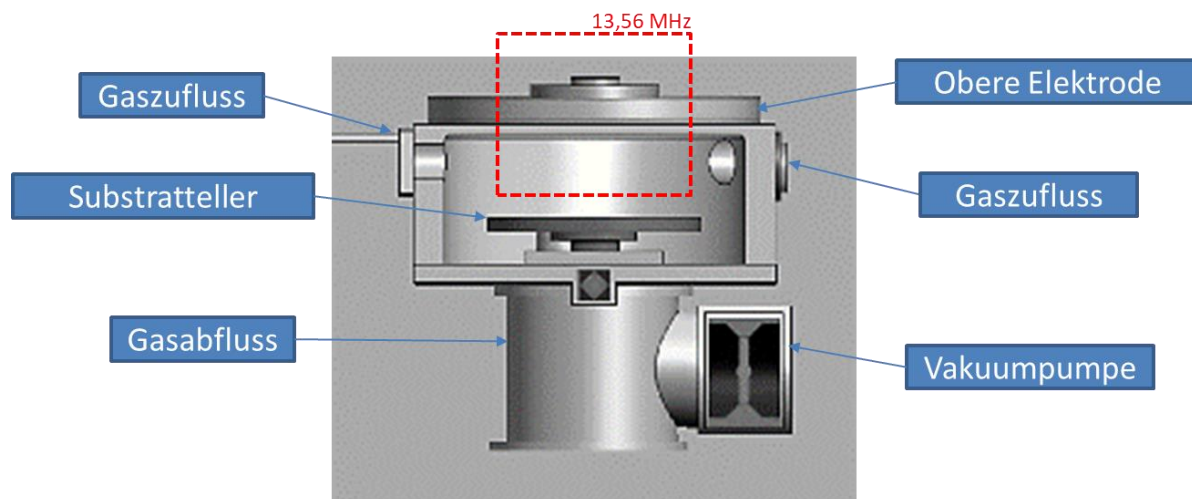


Abbildung 12: Reaktorkammerschema einer Oxford NGP80 Anlage in Anlehnung an [1]

4.2 Technische Spezifikationen

Zur Erzeugung und Prozessoptimierung von NH₃ freien Siliziumnitrid Schichten kann an der Oxford NGP80 am IMS die Substrattemperatur, die Plasma-Leistung, der SiH₄-Fluss, der N₂-Fluss und der Druck in der Prozesskammer eingestellt werden. Die Bereiche und die Genauigkeit in der die jeweiligen Parameter eingestellt werden können, sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet:

Tabelle 4: Minimal- und Maximalbereiche sowie die jeweilige Maschinentoleranz (falls bekannt)

Parameter	Min	Max	Maschinentoleranz
Temperatur /°C	200	400*	± 5
Leistung /W	1	300	
SiH ₄ -Fluss /sccm	0	50	± 0,05
N ₂ -Fluss /sccm	0	2000	± 0,05
Druck /mTorr	1	400 **	
*für photonische PECVD Anwendungen nur bis 400 °C; für andere Anwendungen bis zu 850 °C möglich			
**400 mTorr = 2000 mTorr; Regler der 1:5 rechnet eingebaut!			

4.3 Bisher genutzte Abscheideprozesse

Bisher werden am IMS die folgenden Abscheideprozesse auf der Oxford NGP80 gefahren:

Tabelle 5: SiN-Rezepte am IMS

Wafer Recipe	SiH ₄ -flow [sccm]	NH ₃ -flow [sccm]	N ₂ -flow [sccm]	Plasma Power 13.56 MHz [Watt]	Pressure [mTorr]	Temperature [°C]	Stress [MPa]	Refractive Index []	Tunnel Electric Field (E-) [MV/cm]	Tunnel Electric Field (E+) [MV/cm]	Hydrogen content (N-H) [a.u.]	Deposition rate [nm/s]
T40 ¹	5	50	1975	40	1350	350	487	1.81	5.65	3.36	27.46057	0.42103448
R30 ¹	1	20	980	30	650	350	170	1.82			25.24716	0.10626354
R40 ¹	1	20	980	40	650	350	14	1.83	4.177	5.306	21.47062	0.113213
R50 ¹	1	20	980	50	650	350	-152	1.84	3.995	5.649	20.13262	0.11658845
R60 ¹	1	20	980	60	650	350	-515	1.85	4.387	5.732	19.84331	0.12279783
R70 ¹	1	20	980	70	650	350	-644	1.86	4.12	5.75	20.2634	0.12075812
R80 ¹	1	20	980	80	1000	350	-881	1.86	4.346	5.881	21.48879	0.12231047
R90 ¹	1	20	980	90	1000	350	-854	1.86			20.71031	0.14043321
R100 ¹	1	20	980	100	1200	350	-1016	1.87	5.195	6.406	21.85495	0.13685921
R _{OX,NH3} ¹	20	20	980	20	650	350	350	2.01	2.432	2.239		
R _{OX,N2} ¹	2	0	1250	20	650	350	111	2.01	0.236	0.122		
WCn ²	30	120	4000	915	4700	400		1.82	4.395	3.88	21.85495	
LPCVD ³ golden process							1350	2.01	4.936 at 150 nm	5.309 at 150 nm	0.53329	
WCs ²	300	120	4000	915	4700	400	30	2.01			2.11372 + 4.24511 (Si-H)	
RPH ¹ pinhole recipe	1	5	980	10	650	350	480	1.81	2.858	2.803	-	

¹Recipe for the Oxford 80

²Recipe for the Wolfram Centura

³Recipe for Applied LPCVD

Aus der Literaturrecherche geht eindeutig hervor, dass durch die Reduktion der H-Quellen in den Reaktionsgasen respektive der Substitution von NH₃ durch N₂, die SiN-Schichten deutlich weniger H-Bindungen beinhalten. In Tabelle 5 finden sich zwei Rezepte mit denen sich nahezu stöchiometrisches Siliziumnitrid, an der Oxford NGP80, herstellen lassen, eines mit NH₃-Fluss und N₂-Fluss (R_{OX,NH3}) und eines ohne NH₃-Fluss, sprich nur mit N₂-Fluss (R_{OX,N2}). Diese Arbeit folgt der Literaturempfehlung, dass NH₃ nicht als Reaktionsgas zu verwenden und somit bleibt nur das R_{OX,N2}-Rezept als Ausgangspunkt für weitere Versuche.

5 Optimierung der SiN-Abscheideprozesse

Die folgenden Abschnitte beschreiben zunächst den Aufbau der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuche. Anschließend soll kurz auf die Versuchsmaterialien und Messgeräte eingegangen werden. Darauf folgen die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse.

5.1 Versuchsplanung

Mao et al. [7] benutzen ein $\text{SiH}_4:\text{N}_2$ Verhältnis von 0,02. Gleiches Verhältnis soll für die Oxford NGP80 angewendet werden. Mao et al. verwenden eine sehr hohe Leistung. Deshalb soll ebenfalls die Auswirkung einer Leistungserhöhung auf das 0,02 Verhältnis angewendet werden. Eine weitere Variante ist auf Basis des Standardrezept Versuche zu fahren, um zu erfassen wie die PECVD Maschine auf die Variation einzelner Parameter reagiert. Es werden zunächst unterschiedliche einstellbare Parameter nacheinander variiert. Das Ziel der Variationen ist es, Aussagen über das Maschinenverhalten treffen zu können und dieses anschließend als Basis zur Prozessoptimierung zu nehmen. Durch die Parametervariationen kann der Brechungsindex, die Abscheiderate, die Uniformity und der Stress beeinflusst werden. Der Brechungsindex wird mithilfe eines Ellipsometers gemessen. Für die Berechnung der Abscheiderate und der Berechnung des Stresses wird die Schichtdicke benötigt. Diese wird ebenfalls mit dem Ellipsometer gemessen. Für die photonische Anwendung ist die Uniformity von Bedeutung. Diese wird über die Schichtdickendifferenzen mithilfe eines IMS-eigenen Matlab-Skriptes berechnet. Für den Stress ist neben der Schichtdicke die Durchbiegung des Wafers (Waferbow) relevant. Der Waferbow wird mit einem Tastprofilometer gemessen. Anschließend wird mit einem IMS-eigenen Exceltool der Stress berechnet. In der abgeschiedenen Schicht ist prozessbedingt nicht ausschließlich stöchiometrisches Si_3N_4 . Die Verhältnisse der verschiedenen chemischen Verbindungen einer SiN-Schicht kann mit einem FTIR-Spektrometer quantifiziert werden. Hierfür wurde ein anderes Institut angefragt. Leider hat das Institut, dass ein solches Gerät besitzt, sich nicht kooperativ gezeigt und bei den folgenden Versuchen muss auf FTIR-Messungen verzichtet werden.

Die Ergebnisse der Parametervariationen werden in einer Versuchsmatrix zusammengefasst und mit der Ergebnismatrix der Literaturrecherche verglichen. Ausgehend von diesen Informationen werden die wichtigsten Parameter feiner variiert. Anschließend wird zwischen den Datenpunkten interpoliert, um die Prozessparameter für den gewünschten Brechungsindex von 2,023 abzuleiten. Die im Anschluss erhaltenen Ergebnisse werden in Diagrammen aufbereitet. Der Brechungsindexfehler ist die Differenz zwischen dem größten gemessenen Brechungsindex und dem niedrigsten gemessenen Brechungsindex und wird als Fehlerbalken in die Brechungsindex-Diagramme eingezeichnet. Der Abscheideratefehler wird mithilfe der Schichtdickenschwankung bestimmt. Hierfür wird die absolute Schichtdickenschwankung pro Zeiteinheit berechnet und als Fehlerbalken in die Abscheiderate-Diagramme eingetragen.

5.2 Versuchsmaterialien und Messgeräte

Im Folgenden sollen kurz die Waferproben und die, in der Arbeit verwendeten, Messgeräte vorgestellt werden. Neben der Vorstellung der Funktionsweise soll ebenfalls kurz auf die zugrundeliegenden mathematischen Modelle eingegangen werden.

5.2.1 Waferproben

Die SiN-Schichten werden auf Frontend-Monitore abgeschieden. Das sind Si-Wafer mit einer Kristallorientierung 100 und einer Dicke von 675 μm . Die Wafer haben einen Kreisdurchmesser von 150 mm.

5.2.2 Messgeräte

Ellipsometer Sentech Senduro

Am Senduro Ellipsometer aus dem Hause der SENTECH Instruments GmbH werden die Brechungsindex- und Schichtdickenmessungen durchgeführt. Zur Messung der Schichtdicke und dem Brechungsindexverlauf über den Wafer wird ein 13-Punkte Messprogramm erstellt, welches gegenüber einer 1-Punkt Messung den Vorteil bietet, dass die Schicht auf dem gesamten Wafer vermessen wird. Ellipsometer messen mithilfe von Reflexion und dem daraus folgenden Polarisationswechsel optische Eigenschaften (z.B. Brechungsindex) und strukturelle Eigenschaften (z.B. Schichtdicke) [26].

Schematisch funktioniert das Senduro Ellipsometer folgendermaßen:

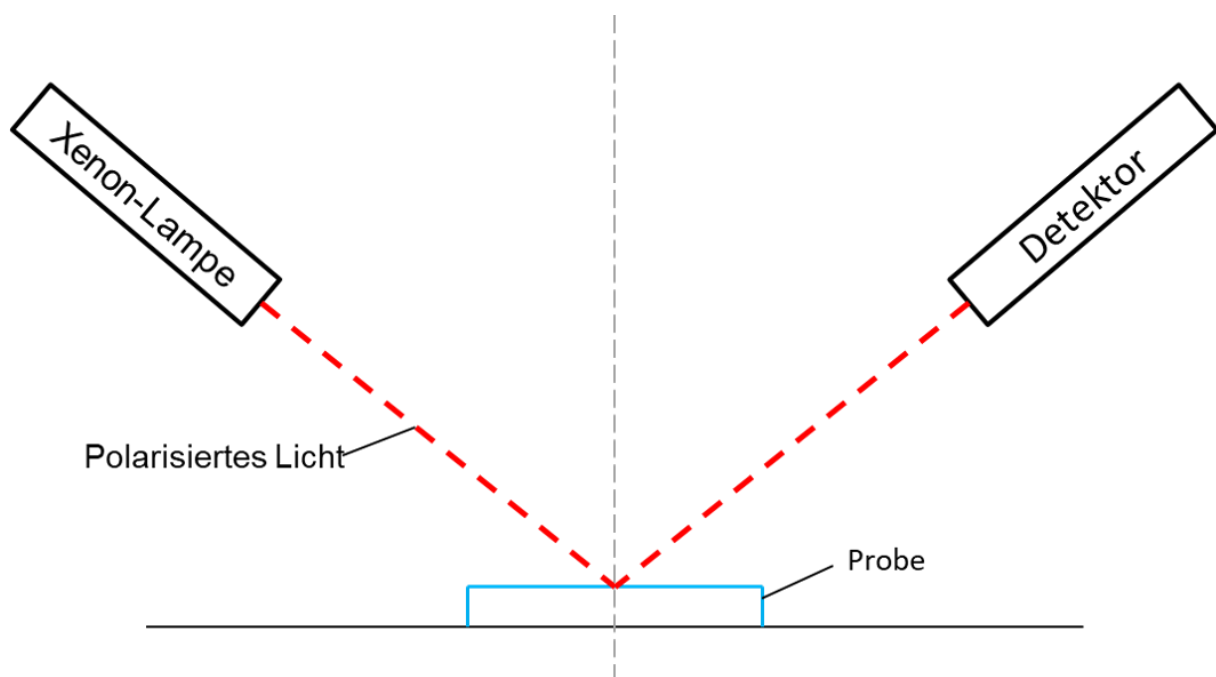


Abbildung 13: Funktionsschema eines Ellipsometers in Anlehnung an [26]

Die Lichtquelle (Xenon-Lampe) strahlt polarisiertes Licht auf die Probe. Das Licht dringt in die Probe ein und wird anschließend reflektiert. Das polarisierte Licht wechselt während der

Reflexion seine Polarisation und wird gemäß dem Reflexionsgesetz in Richtung des Detektors reflektiert. Der Detektor detektiert das reflektierte Signal, welches anschließend mit mathematischen Modellen im Gerät analysiert wird. Die dabei verwendete Auswertemethode kann in [27] nachgelesen werden. Die SiN-Schichten werden in einem Wellenlängenbereich von 500 nm bis 850 nm gemessen. Zu niedrige Wellenlängen unter 405 nm werden vom Material absorbiert. 500 nm bis 850 nm hat sich in vergangenen Messungen am IMS etabliert. Dabei wird die Wellenlänge während der Ellipsometermessung im genannten Bereich sukzessive erhöht und anschließend gefittet. Zur Modellierung des wellenlängenabhängigen Brechungsindex von Siliziumnitrid bei der Ellipsometermessung wird das Cauchy-Modell verwendet [28].

Dieses beschreibt den wellenlängenabhängigen Brechungsindex eines Materials mit den Variablen A , B und C :

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (5.1)$$

Dabei wird die Wellenlänge λ sukzessive variiert. Das Cauchy-Modell vernachlässigt Absorptionen. Der gemessene Funktionsfit wird mit dem optimalen Fit verglichen. Für die Abweichung des gemessenen Fits vom berechneten Fit wird der „Mean Square Error“ angegeben. Aus vergangenen Messungen an der Senduro ging hervor, dass bei einer Schichtdicke von 200 nm bis 300 nm die genauesten Messergebnisse gemessen werden. Für die vorliegende Arbeit soll ebenfalls eine Schichtdicke von 200 nm bis 300 nm abgeschrieben werden.

Tastprofilometer Dektak

Mit dem Dektak 8 aus dem Hause Bruker Corporation werden die Durchbiegungsmessungen an den Wafern durchgeführt. Das hier eingesetzte Verfahren basiert auf der Tastprofilometrie. Bei diesem Verfahren wird mit einer Tastnadel in einer Linie über die Waferoberfläche gefahren, um das Profil des Substrates abzutasten und aufzunehmen. Dabei kann, unter anderem, auch die Form beziehungsweise Durchbiegung des Wafers (Waferbow) detektiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Durchbiegung jedes Wafers in zwei Richtungen gemessen. Einmal parallel zur Flat und senkrecht dazu. Das Vermessen des Wafers, vor und nach der SiN-Abscheidung, dient der Elimination von bereits vorhandener Wafer-Verbiegung. Dadurch ist kein systematischer Messfehler durch nicht perfekt plane Substrate vorhanden, denn Siliziumwafer haben evtl. schon eine Grundverbiegung.

Der Waferbow äußert sich in drei Formen [29]:

- (a) Die Durchbiegung ist ideal, sprich nicht vorhanden.
- (b) Die Durchbiegung äußert sich in Druckspannungen.
- (c) Die Durchbiegung äußert sich in Zugspannungen.

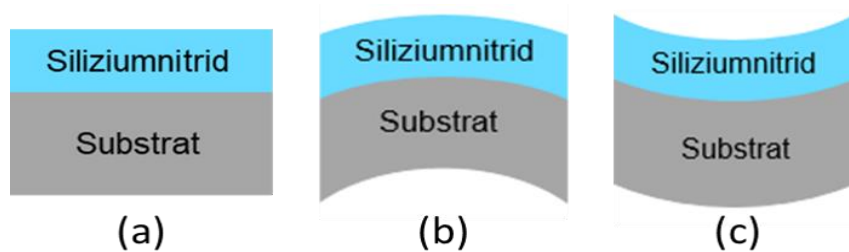


Abbildung 14: (a) ideales Substrat ohne Biegung, (b) Substratbiegung durch Druckspannung, (c) Substratbiegung durch Zugspannungen in Anlehnung an [29]

Sind die Verbiegung des Substrates durch die abgeschiedene Schicht und deren Dicke bekannt, dann lässt sich mit der Stoney-Gleichung [30] der Schichtstress in der abgeschiedenen Schicht berechnen:

$$\sigma = \frac{E d_s^2}{6(1-\nu)t} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) \quad (5.2)$$

mit

$$R_0 = \frac{s^2}{8h_v} + \frac{h_v}{2} \quad \text{und} \quad (5.3)$$

$$R = \frac{s^2}{8h_n} + \frac{h_n}{2}. \quad (5.4)$$

Dabei ist E das Elastizitätsmodul des Substrates, d_s die Dicke des Substrates, ν die Poissonzahl, t die Schichtdicke des Siliziumnitrids, R_0 der Durchbiegungsradius vor der Abscheidung, R der Durchbiegungsradius nach der Abscheidung, s die Messstrecke, h_v die Ausbiegung des Substrates über eine Messstrecke vor der Abscheidung und h_n die Ausbiegung des Substrates über eine Messstrecke nach der Abscheidung.

5.3 Versuchsdurchführung

Im ersten Schritt werden die unbeschrifteten Wafer mit einem Laserbeschrifter markiert, um diese später eindeutig identifizieren zu können. Danach erfolgt die erste Bow-Messung am Dektak. Die Ergebnisse wurden mit der beschrifteten Wafernummer abgespeichert, um die Ergebnisse später eindeutig dem Wafer und der Schicht zuordnen zu können. Anschließend folgt eine RCA-Standard-Reinigung, um mögliche Verunreinigungen und Partikel auf der Waferoberfläche vom Messen und Beschriften zu entfernen. Nach der Reinigung werden die Substrate mit Siliziumnitrid beschichtet. Im Anschluss an die Abscheidung der SiN-Schicht erfolgt die zweite Bow-Messung. Danach werden mit der Senduro die restlichen benötigten Werte bestimmt.

5.4 Datenauswertung

Die im ersten Versuch durchgeführte Parametervariation über einen sehr großen Parameterraum zeigt, dass bei Leistungen über 50 W der Brechungsindex abgeschiedener Schichten Werte größer 2,5 annimmt (siehe Abbildung 15). Dieser vergleichsweise hohe Brechungsindex, der deutlich über dem von stöchiometrischem Siliziumnitrid liegt ($n=2,023$), sowie die Tatsache, dass die gefitteten Kurven mit bisher verwendeten stöchiometrischen SiN-Schichten aus LPCVD-Prozessen nicht gut zu dem abgeschiedenen Material passten, lassen darauf schließen, dass Schichten abgeschieden wurden, die nicht für photonische Anwendungen geeignet sind.

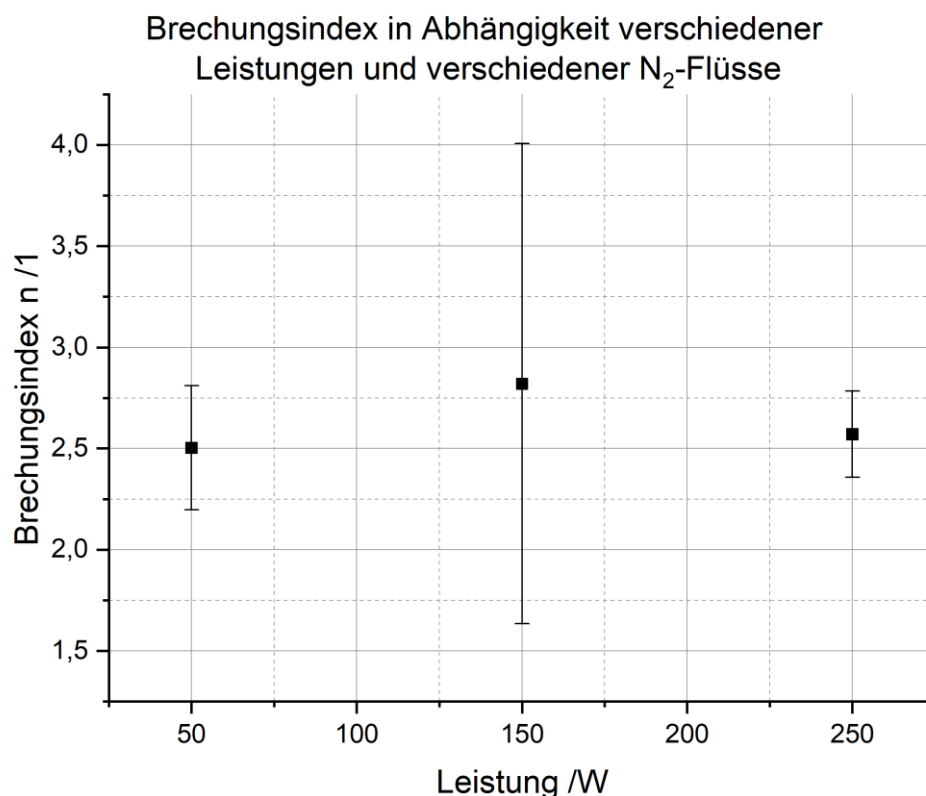


Abbildung 15: Brechungsindex in Abhängigkeit verschiedener Leistungen mit verschiedenem N₂-Fluss, bei einem SiH₄-Fluss von 20 sccm, einem N₂-Fluss von 500/1000/1500 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird als Basis für weitere Parametervariationen daher das bereits bestehende R_{OX,N₂}-Rezept für NH₃-freie Schichten verwendet. Dieses hat mit 20 W eine deutlich geringere Plasmaleistung und ermöglicht die Abscheidung leicht stickstoffhaltiger SiN-Schichten. Die Erarbeitung des Rezeptes vom IMS ist schon ein paar Jahre her. Deshalb wurde der R_{OX,N₂}-Versuch nochmal gefahren. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse eines Replikationsversuchs zur Sicherstellung der Aktualität des Rezeptes. Das aktualisierte Rezept wird im weiteren Verlauf als „Standard“ verwendet.

Tabelle 6: Replikationsversuch des NH₃-freien Rezeptes aus der IMS-SiN-Rezeptensammlung

	Plasmaleistung /W	SiH ₄ -Fluss /sccm	N ₂ Fluss /sccm	Temperatur /°C	Druck /mTorr	Stress /MPa	n /1
R _{ox,N2}	20	2	1250	350	130	111	2,010
Standard	20	2	1250	350	130	44	2,017

Ausgehend von diesem neuen Arbeitspunkt wird eine neue Versuchsmatrix erstellt, um den Einfluss der unterschiedlichen Abscheideparameter auf das Prozessergebnis zu charakterisieren.

In einem ersten Versuch wird untersucht, welche Auswirkungen eine SiH₄-Fluss-Erhöhung bei den zugeführten den Reaktionsgasen auf die SiN-Schicht hat. Dazu wird ein N₂-Fluss von 1450 sccm verwendet. Die restlichen Parametereinstellungen entsprechen dem Standardrezept.

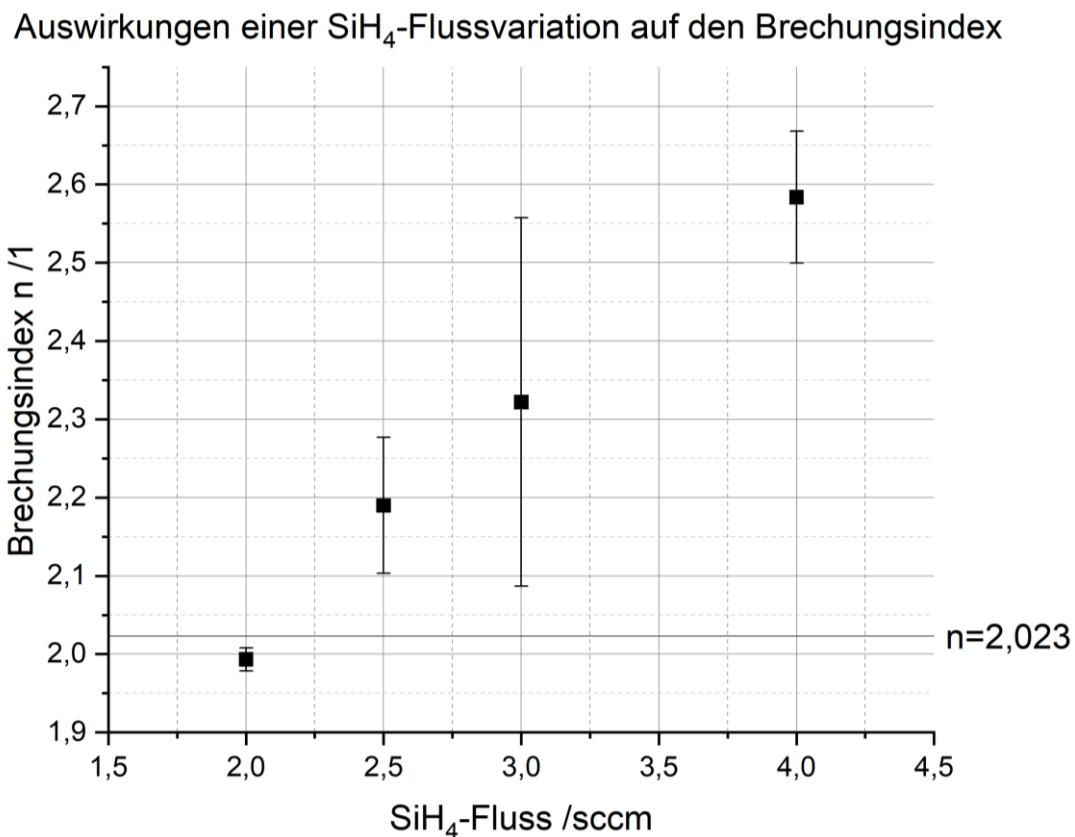


Abbildung 16: Brechungsindex in Abhängigkeit des SiH₄-Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N₂-Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

In Abbildung 16 ist zu sehen, dass der Brechungsindex mit steigendem SiH₄-Fluss zunimmt. Abbildung 17 zeigt, dass die Abscheiderate mit zunehmendem SiH₄-Fluss zunimmt. Ursache dafür ist, dass mit einem höheren SiH₄-Fluss eine größere Menge an Silizium für den Abscheideprozess zur Verfügung steht. Dadurch können mehr Si Moleküle mit N₂ Molekülen reagieren, was ein erhöhtes Schichtwachstum zur Folge hat. Gleichzeitig wächst aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass mit steigendem Si-Anteil zu viel Si zu Verfügung steht und sich

vermehrt Si-Si und Si-H Bindungen ausbilden. Dadurch steigt der Brechungsindex, was wie in der Literatur auf ein erhöhtes Si:N Verhältnis zurückzuführen ist.

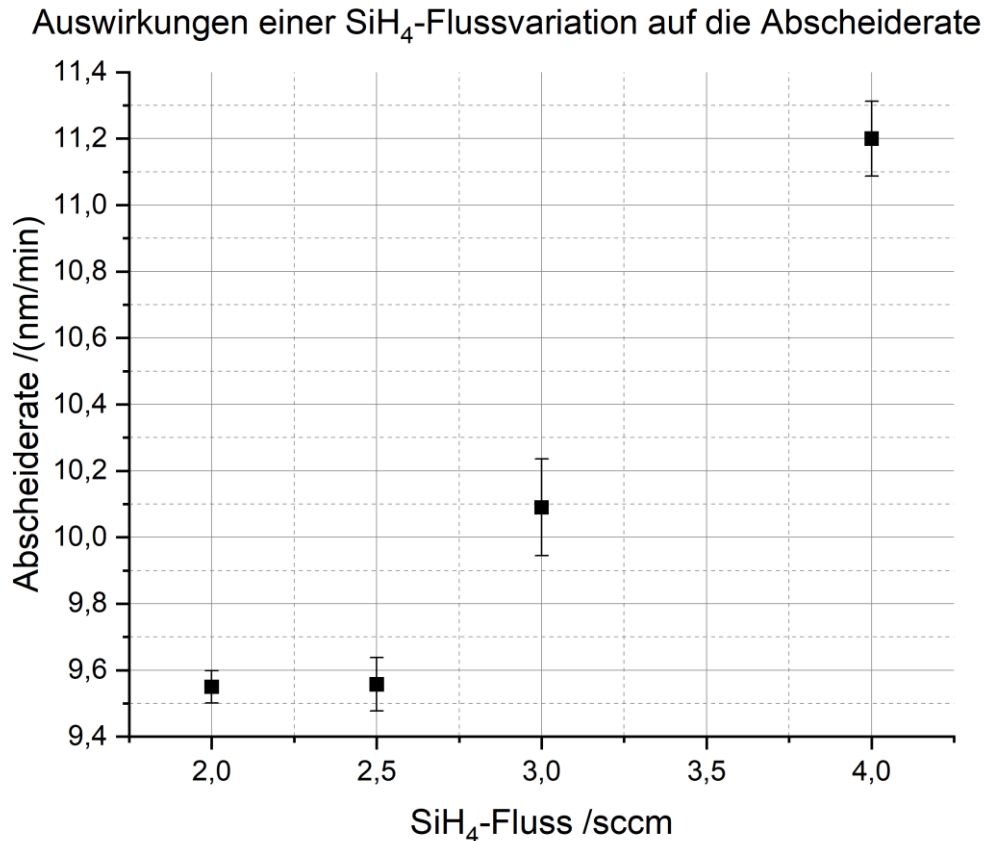


Abbildung 17: Abscheiderate in Abhängigkeit des SiH₄-Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N₂-Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen der Literaturrecherche und können als gesamter Trend betrachtet werden. Die Abscheideratenvariation über die gesamte Waferfläche beim jeweiligen Abscheideprozess ist im Abscheide-Diagramm als Fehlerbalken eingezeichnet. Die reelle Abscheiderate variiert folglich im Fehlerbalkenbereich. Die Abscheideratenvariation hat gegenüber dem Standard-Prozess zugenommen. Der Fehler wurde größer, folglich kann man sagen, dass ein SiH₄-Fluss einen negativen Einfluss auf die Uniformity hat. Ein ähnlicher Trend ist beim Brechungsindex zu beobachten.

Bei einer Erhöhung des SiH₄-Flusses steigt zunächst der Stress in der SiN-Schicht und fällt anschließend wieder ab. Ein eindeutiger Trend für den Stress in Abhängigkeit des SiH₄-Flusses kann somit nicht identifiziert werden. Auch die Literatur bietet hier hinsichtlich dem Schichtstress wenig Informationen und Anhaltspunkte.

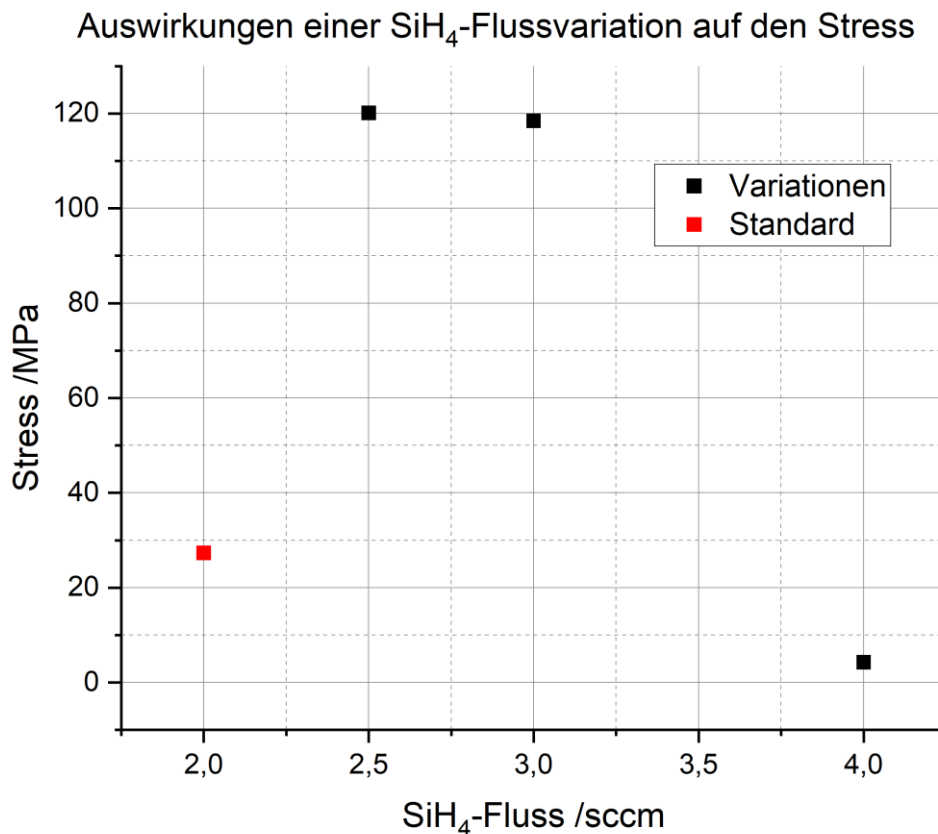


Abbildung 18: Stress in Abhängigkeit des SiH₄-Flusses bei einer Leistung von 20 W, einem N₂-Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr

Vergleicht man den maximal gemessenen Stress aus dieser Parametervariation mit dem Schichtstress des LPCVD-Standardprozesses am IMS von Krüger in [9], so fällt auf, dass die maximal gemessenen Spannungen in den PECVD-Schichten deutlich kleiner sind. Nach einer LPCVD-SiN-Abscheidung wurde hier z.B. eine Waferverbiegung von 20,91 μm berechnet. Die kritische Wafer-Verbiegung für die Produktionslinie am IMS ist 50 μm . Um sicherzustellen dass nachfolgende Prozesse durchgeführt werden können, sollten die 50 μm nicht überschritten werden. Nimmt man also die 191,15 nm PECVD-SiN-Schicht mit einer gemessenen Spannung von 120,14 MPa führt dies mit Gleichung (4.2) zu einer Wafer-Verbiegung 3,84 μm . Da dieser Wert deutlich kleiner als die 50 μm ist, kann der Stress als unkritisch betrachtet werden. Der Stress beeinflusst die Versuchsergebnisse also nicht maßgeblich.

Der nächste Parameter, der betrachtet werden soll, ist der Druck. Dazu wird das Standardrezept mit einer Druckvariation gefahren. Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse der Druckvariation. Der Brechungsindex steigt mit steigendem Druck. Ebenso hat, bis auf den Versuch mit 100 mTorr, die Brechungsindexdifferenz über den Wafer (n-Differenz) zugenommen. Das bedeutet mit steigendem Druck steigt zwar der Brechungsindex, aber auch die Ungenauigkeit der Abscheidung.

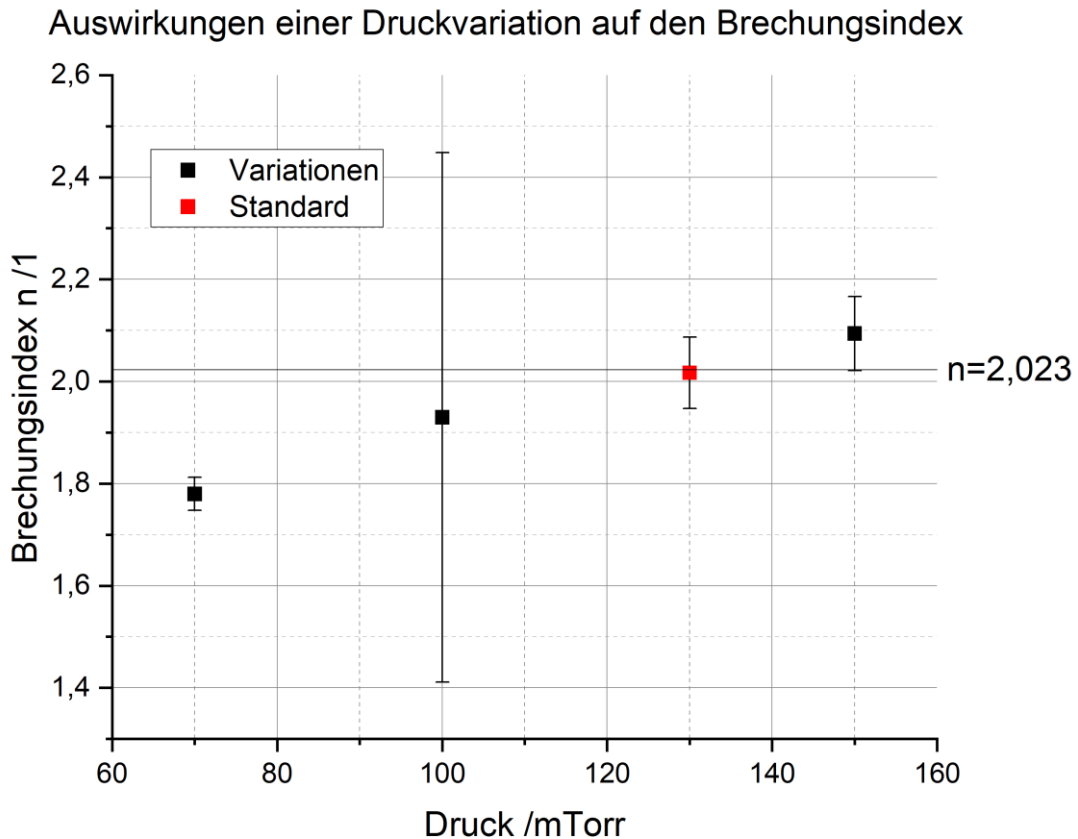


Abbildung 19: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Druckvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Die hohe n-Differenz bei 100 mTorr kann mit Verschmutzungen auf dem Wafer zusammenhängen. Mögliche Fehlerursachen können eine unzureichende Reinigung der Maschine oder Rückstände von Fremdgasen in der Abscheidekammer sein. Ein anderer Grund könnte die Druckpumpe sein. Eine Druckänderung von 1 mTorr in der Software ist in der Pumpe, wie schon erwähnt, mit einer Druckänderung von 5 mTorr gleichzusetzen. Das heißt der variierte Bereich ist sehr groß. Es kann also durchaus sein, dass der Prozess an diesem Punkt nicht so stabil ist, wie bei den anderen Parametersätzen. Um das herauszufinden, hätte man eine zusätzliche Reproduktionsgenauigkeitsanalyse durchführen müssen, die den Rahmen dieser Untersuchung überschritten hätte.

Die Abscheiderate der Druckvariation sinkt erst bis 130 mTorr und steigt wieder mit 150 mTorr leicht an. Folgender Trend lässt sich dabei aus Abbildung 20 herauslesen. Die Abscheiderate sinkt bis zu einer Drucksteigerung von 130 mTorr. Bei 150 mTorr wurde eine höhere Abscheiderate festgestellt. In der Literatur wurde kein Trend zur Auswirkung der Druckvariation auf die Abscheiderate gefunden. Da der 130 mTorr Versuch und der 150 mTorr Versuch beide eine geringere Abscheiderate zeigen als der 100 mTorr Versuch, wird in der Versuchsmatrix ein sinkender Trend angenommen.

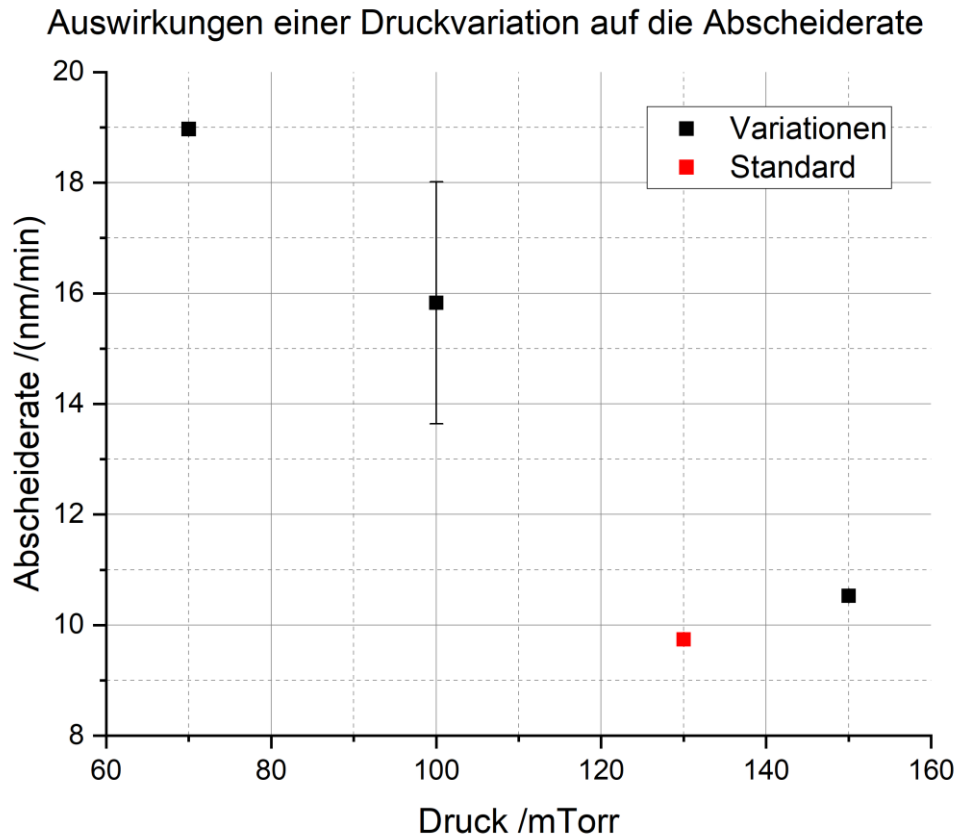


Abbildung 20: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Druckvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Die Abscheideratenvariation ist beim 70 mTorr Versuch sehr gering. Dann steigt sie schlagartig an und fällt an den nächsten Messpunkten wieder rapide ab. Dennoch wird sie nicht so gut wie am ersten Messpunkt. Die Schwankung im weiteren Verlauf zu, folglich wird die Uniformity hier schlechter. Die Begründung für die große Abweichung beim 100 mTorr Versuch wurde bei der Brechungsindexbetrachtung schon erläutert. Betrachtet man diesen Messpunkt nicht und vergleicht man den Trend der Abscheideratenvariation über den Druck mit der Literaturrecherche, zeigt sich ein übereinstimmendes Ergebnis. Die Abscheideratenvariation nimmt mit steigendem Druck zu respektive wird die Uniformity schlechter.

Zu Beginn des Kapitels wurde die Auswirkung einer zu großen Leistungsvariation schon gezeigt. Nun soll eine Leistungsvariation mit kleineren Abständen erfolgen steigender Leistung und die n-Differenz sinkt ebenfalls mit steigender Leistung. In Abbildung 21 ist der Brechungsindex in Abhängigkeit der Leistung dargestellt. Der Brechungsindex sinkt mit steigender Leistung und die n-Differenz sinkt ebenfalls mit steigender Leistung. Die Abscheiderate wiederum steigt mit steigender Leistung (siehe Abbildung 22).

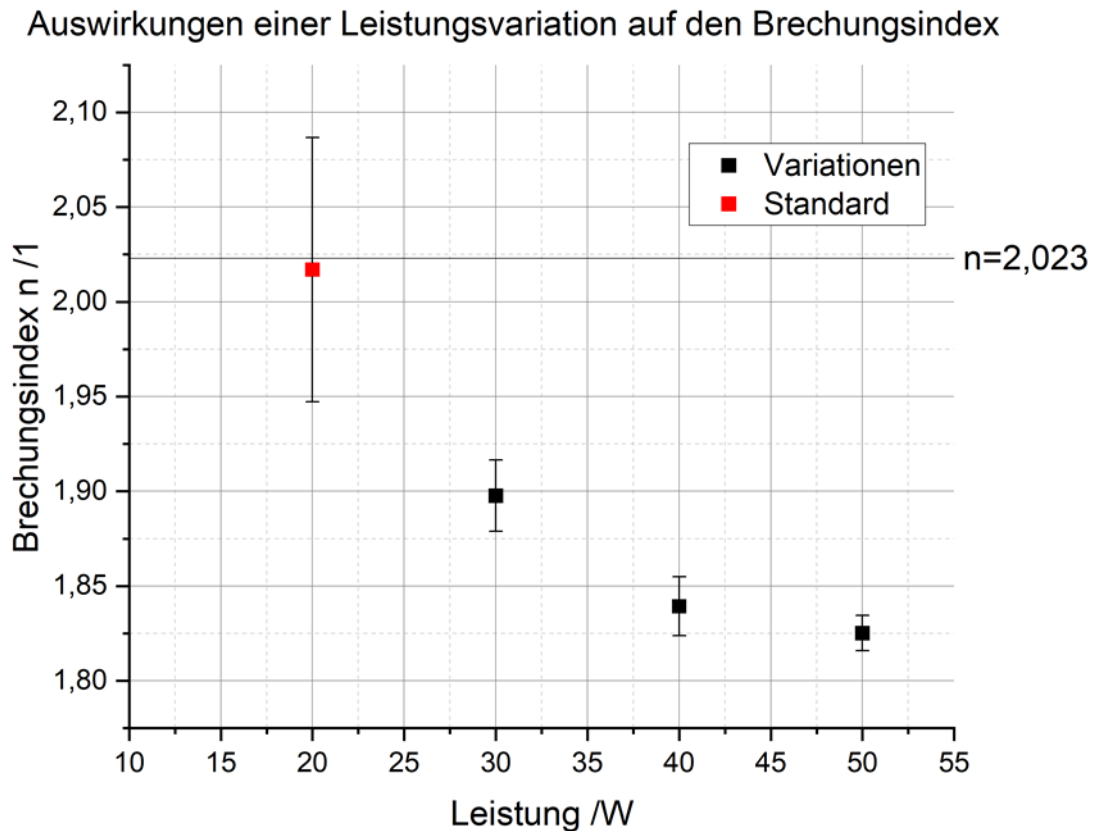


Abbildung 21: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Leistungsvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Die n-Differenz steigt bei der ersten Erhöhung der Leistungserhöhung erst, danach zeigt sie sukzessive einen Abwärtstrend. Die n-Differenz wird mit steigender Leistung folglich größer.

Auswirkungen einer Leistungsvariation auf die Abscheiderate

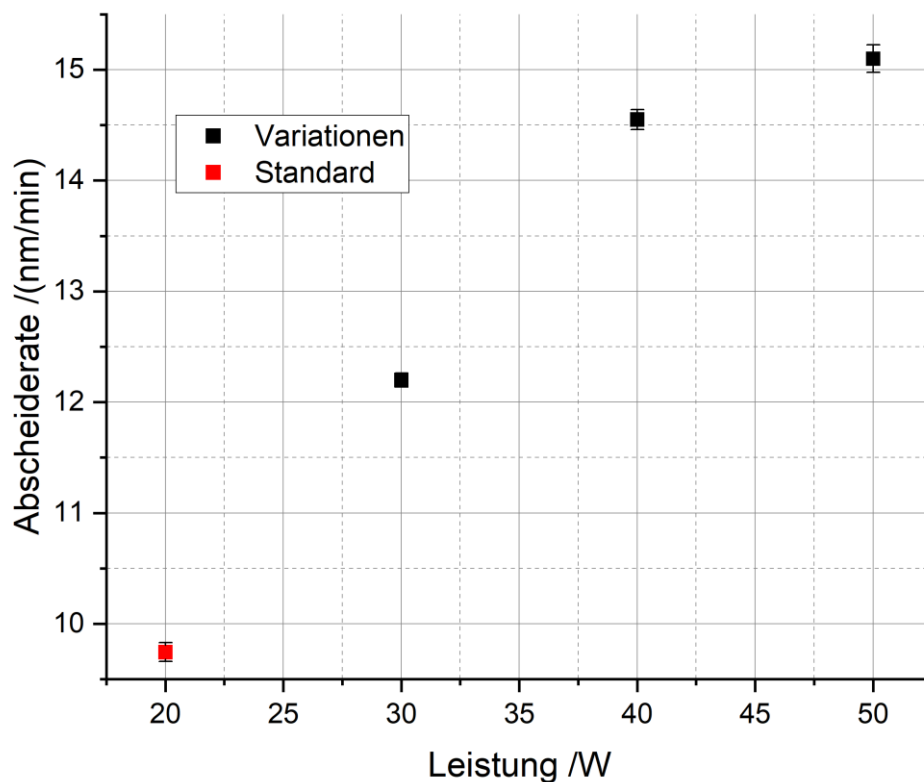


Abbildung 22: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Leistungsvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Vergleicht man die Trends aus der Leistungsvariation mit den Ergebnissen der Literaturrecherche, so kommt die vorliegende Versuchsreihe zu einem übereinstimmenden Ergebnis. In der Literatur sinkt der Brechungsindex ebenfalls mit steigender Leistung und es sinkt auch die Abscheideratenvariation mit steigender Leistung. Ebenfalls übereinstimmend ist der Trend in der Abscheiderate, diese wird mit steigender Leistung größer. Die Abscheideratenvariation sinkt bei 30 W erst etwas ab und mit weiterer Erhöhung der Leistung wird sie größer.

Als letztes wird die Temperatur des Substrathalters variiert. Auffallend im Rahmen der Literaturrecherche war, dass dieser Parameter hier wenig bis gar nicht variiert wurde.

Auswirkungen einer Temperaturvariation auf den Brechungsindex

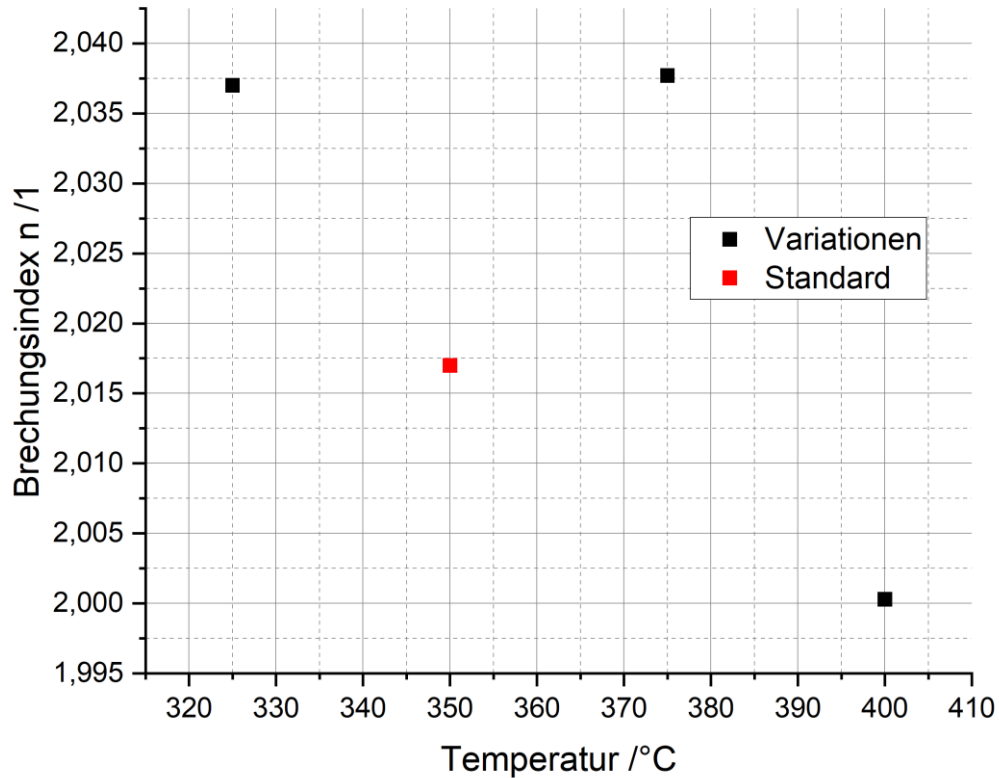


Abbildung 23: Brechungsindex in Abhängigkeit einer Temperaturvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Die Betrachtung in Abhängigkeit des Brechungsindex sowie in Abhängigkeit der Abscheiderate zeigt die Auswertung keine stabilen Trends. Folglich wird keine weitere Temperaturveränderung im Standardrezept empfohlen.

Auswirkungen einer Temperaturvariation auf die Abscheiderate

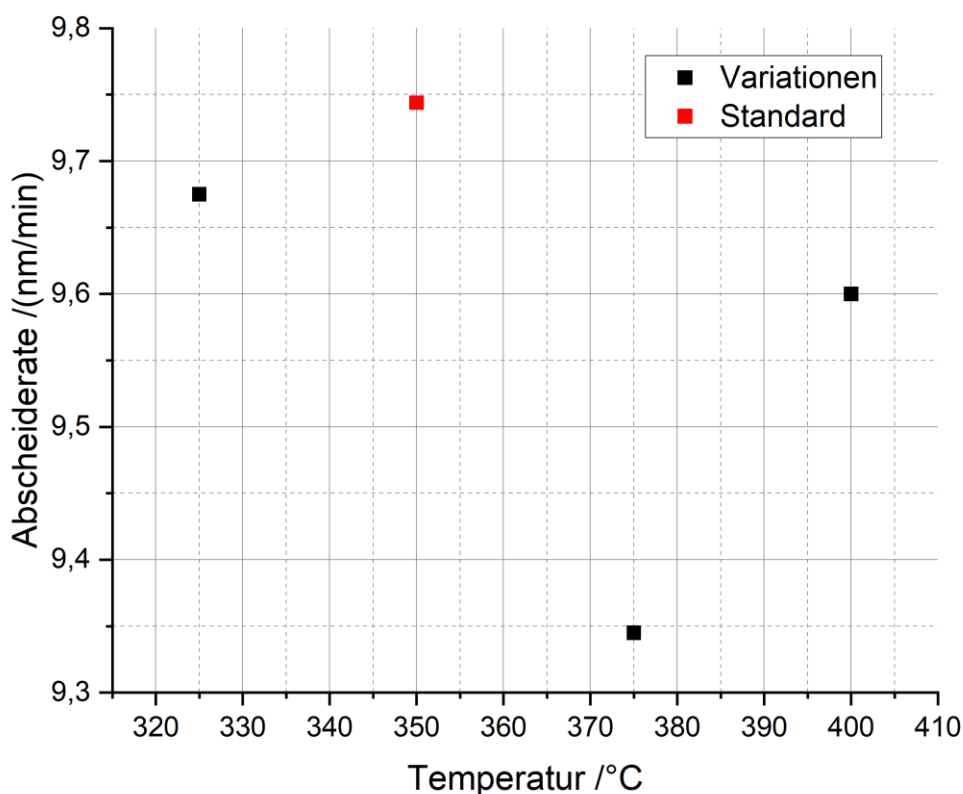


Abbildung 24: Abscheiderate in Abhängigkeit einer Temperaturvariation des Standardrezeptes. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Nachdem der Einfluss jedes Parameters auf das Prozessverhalten bei NH_3 freien Abscheidungen von SiN-Schichten an der NGP80 bekannt und charakterisiert ist, können die vorliegenden Ergebnisse verwendet werden, um das bisherige Standardrezept weiter zu optimieren und andere potentiell interessante Abscheiderezepte für die Photonik-Fertigung zu erstellen. Der Übersicht halber werden die in den vorangegangenen Versuchen identifizierten Trends in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 7: Zusammenfassung wichtiger Trends für die PECVD-SiN-Abscheidung an der Oxford NGP80 zur Beeinflussung der Schichteigenschaften

Parameter		Brechungsindex	Abscheidungsrate	Uniformity
N ₂ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	+	+	+
	Mittel	o	o	o
	Hoch	-	-	-
SiH ₄ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	-	-	-
	Mittel	o	o	+
	Hoch	+	+	o
Leistung	Niedrig	+	-	o
	Mittel	o	o	-
	Hoch	-	+	+
Druck	Niedrig	+	+	-
	Mittel	o	-	+
	Hoch	-	o	-
Legende: "+" = Zunahme; "o" = mittleres Niveau; "-" = Abnahme				

Aus den bisher durchgeführten Versuchen geht hervor, dass die Parameter SiH₄- und N₂-Fluss den Brechungsindex am stärksten beeinflussen. Aus den beiden Parametern wurde daher eine feiner abgestufte Versuchsmatrix erstellt und gefahren, mit der die Auswirkungen auf den Brechungsindex nochmal genauer untersucht werden sollen. Um eine möglichst stöchiometrische Schicht zu erhalten wurde anschließend zwischen den einzelnen Datenpunkten interpoliert und der Parametersatz gefahren, der eine stöchiometrische Schicht erzeugen sollte. Eine Übersicht über alle hier gefahrenen Versuche mit den dazugehörigen Brechungsindizes zeigt Abbildung 25.

Für ein zweites Rezept für stöchiometrische Siliziumnitrid soll in weiteren Versuchen untersucht werden, ob eine SiH_4 -Fluss-Erhöhung mit einer gleichzeitigen N_2 -Flusserhöhung ein positives Ergebnis bringt. Dazu wird erst die Auswirkung einer N_2 -Flussvariation auf das Standardrezept untersucht.

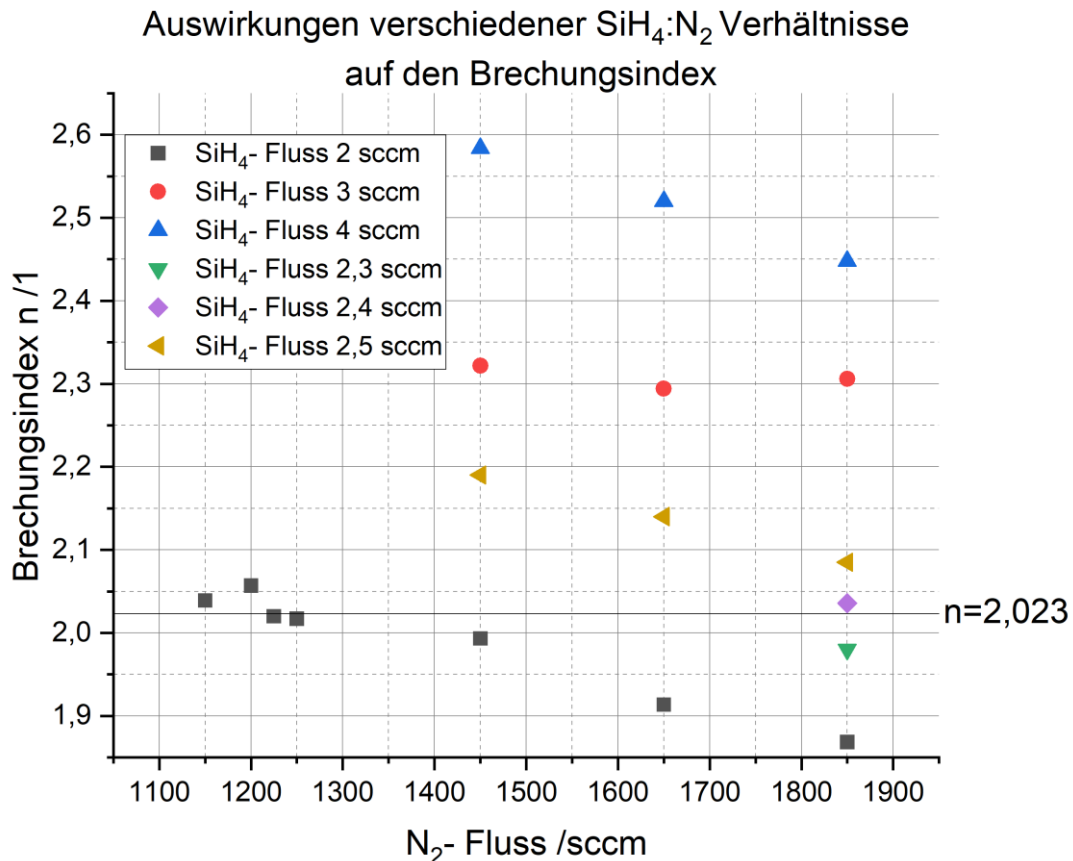


Abbildung 25: Auswirkungen verschiedener SiH_4 : N_2 Verhältnisse auf den Brechungsindex bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr

Es erfolgte eine sukzessive Anhebung des N_2 -Flusses auf 1850 sccm und eine SiH_4 -Flusserhöhung um 2 sccm auf 4 sccm. Mehr SiH_4 -Fluss soll laut der Literaturrecherche zu einer höheren Abscheiderate führen. Allerdings steigt ebenfalls der Brechungsindex durch eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass sich Si-H und Si-Si Bindungen bilden. Dabei zeigt Abbildung 25 ein übereinstimmendes Ergebnis. Außerdem zeigt sich ein Trend der ebenfalls in der Literaturrecherche erarbeitet wurde. Der Brechungsindex sinkt mit steigendem N_2 -Fluss. Nach mehreren Kombinationen des SiH_4 : N_2 Verhältnisses, stellt sich heraus, dass das Verhältnis 2,5 sccm:1850 sccm N_2 vielversprechend für ein zweites stöchiometrisches Rezept ist. Da der Brechungsindex mit zunehmenden SiH_4 -Fluss steigt, wird eine stufenweise Variation um 0,1 sccm untersucht. Der N_2 -Fluss wird nicht variiert und ist fest bei 1850 sccm. Ziel des Versuchs ist bei einem möglichst maximalen N_2 -Fluss ein stöchiometrisches Rezept zu erreichen. Die Schichteigenschaften könnten deutlich variieren, denn es steht mehr N_2 zu Reaktion zur Verfügung. Dies muss aber anderer Stelle noch untersucht werden.

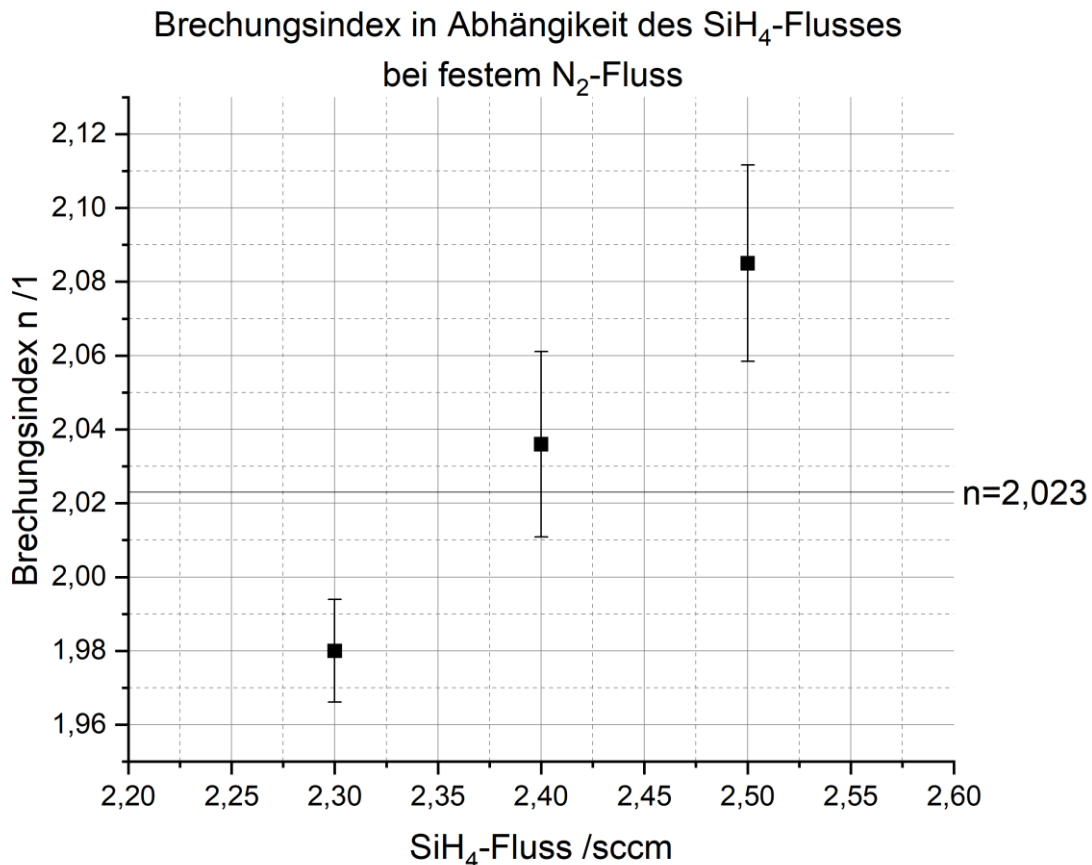


Abbildung 26: Untersuchung einer SiH₄-Flussvariation mit festem N₂-Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an

Die SiH₄-Flusssteigerung in Abbildung 26 zeigt wie erwartet, mit einem höheren SiH₄-Fluss ein stellt sich ein größerer Brechungsindex ein. Dennoch wird ein Brechungsindex von 2,023 nicht erreicht. Eine genauere Flussvariation auf die zweite Nachkommastelle ist mit der IMS Oxford NGP80 nicht möglich. Der dem stöchiometrischen naheliegender Wert ist 2,036. Deshalb wird über die Variation eines weiteren Parameters -dem Druck- versucht ein stöchiometrisches Siliziumnitrid herzustellen.

Für die Druckvariation (Abbildung 27) wird ein fester SiH₄-Fluss von 2,5 sccm gewählt und ein fester N₂-Fluss von 1850 sccm. Wie in Kapitel 4 ist eine Druckänderung von 1 mTorr gleichzusetzen mit einer Druckänderung von 5 mTorr. Der Druck wird im ersten Schritt um maschinelle 15 mTorr, also um reale 75 mTorr variiert. Der Brechungsindex sinkt auf 1,98. Durch lineare Interpolation soll folglich ein Druck von eingegebenen 121 mTorr zu einem stöchiometrischen Ergebnis führen. Es stellt sich bei 121 mTorr tatsächlich ein Brechungsindex von 2,023 ein.

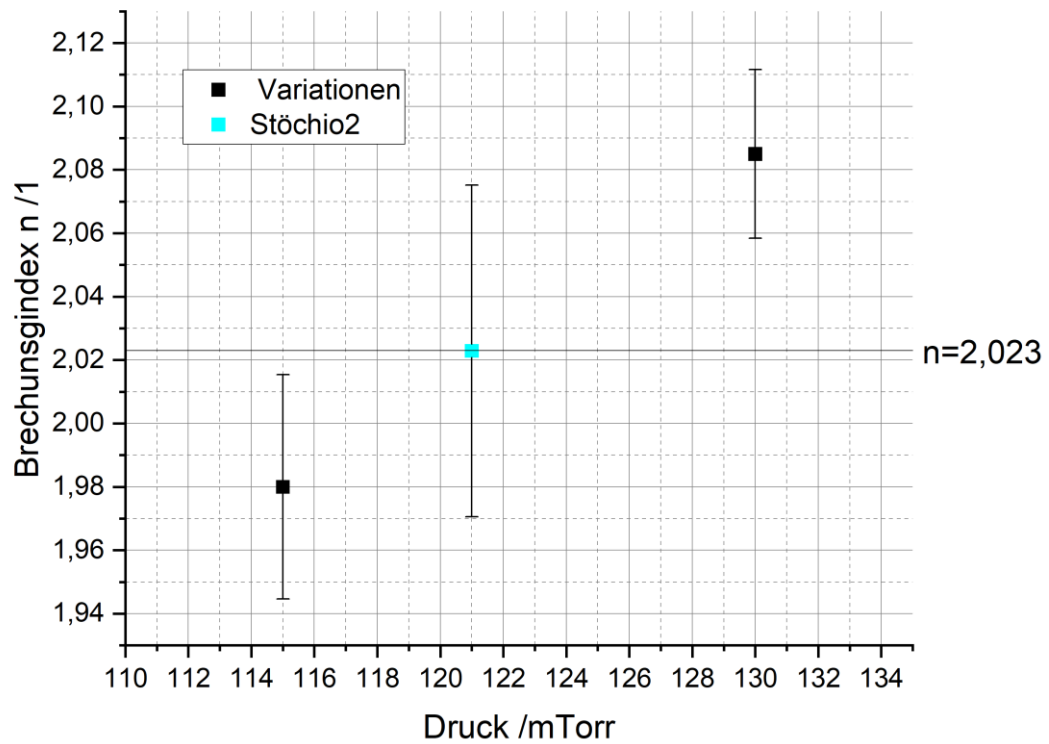
Auswirkungen einer Druckvariation auf ein festes $\text{SiH}_4:\text{N}_2$ Verhältnis

Abbildung 27: Druckvariation mit dem Ziel ein zweites stöchiometrisches Rezept bei einer Leistung von, einem SiH_4 -Fluss von 2,5 sccm, einem N_2 -Fluss von 1850 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr zu finden. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

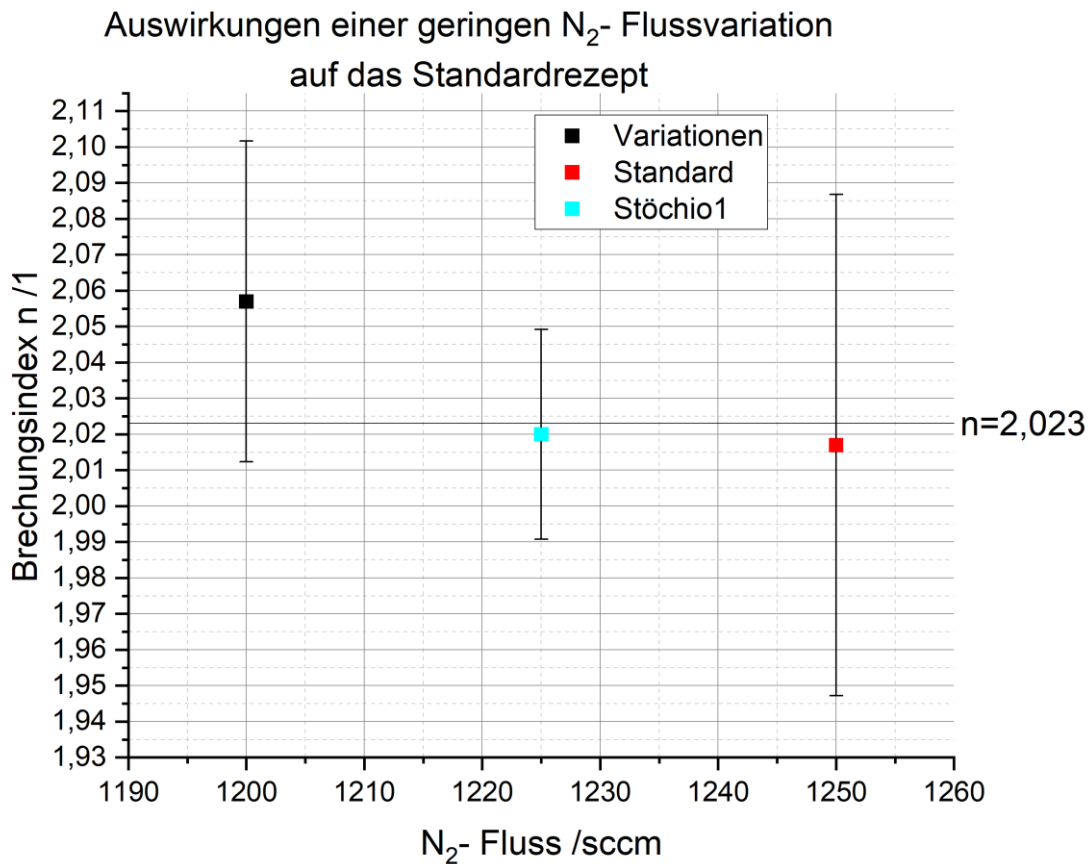


Abbildung 28: Auswirkungen einer geringen N₂-Flussverringerng des Standardrezeptes auf den Brechungsindex. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Gegenüber dem Standard werden zwei weitere Rezepte mit verringertem N₂-Fluss gefahren. Zuerst wurde die Variation mit 1200 sccm N₂ abgeschieden. Dies ergab einen Brechungsindex von 2,057. Mithilfe der linearen Interpolation wurde berechnet, dass bei 1225 sccm der Brechungsindex 2,023 theoretisch erreichbar ist. Praktisch ist ein Brechungsindex von 2,02 gemessen worden. Eine 13 Punktmessung am Ellipsometer hat ergeben, dass der Großteil der Messpunkte bei 2,023 lag. Deshalb wird dieser Versuch ebenfalls als stöchiometrisches Rezept akzeptiert. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass der Wafer nicht an allen Punkten geeignet ist für die photonische Anwendung. Dies wird in am Ende des Kapitels in Abbildung 30 weiter thematisiert.

Über einen weiteren Ansatz soll im Folgenden ein drittes stöchiometrisches Rezept gefunden werden. Dabei soll eine N_2 -Variation des Standardrezeptes gefahren werden. Da der Brechungsindex mit erhöhtem N_2 -Fluss abnimmt, soll mit erhöhtem Druck von 130 mTorr auf 150 mTorr, sprich von 650 mTorr auf 750 mTorr, dies ausgeglichen werden. Als erstes sollte durch lineares Interpolieren wieder der theoretische N_2 -Fluss bestimmt werden. Dafür wurden die Punkte bei 1250 sccm (vgl. Abbildung 19) und 1650 sccm (neue Abscheidung) verwendet, um eine grobe Spanne zu erhalten. Nach mehrmaligem Abscheiden mit jeweils einer vorangestellten linearen Interpolation, konnte kein stöchiometrisches Rezept gefunden werden. Ebenfalls ist kein linearer Trend zu sehen, was in Rücksprache mit dem Maschinenverantwortlichen zu dem Schluss führt, dass der Prozess bei 150 mTorr nicht stabil genug ist um genaue Abscheidungen zu erhalten. Der Messpunkt wird nicht weiterverfolgt.

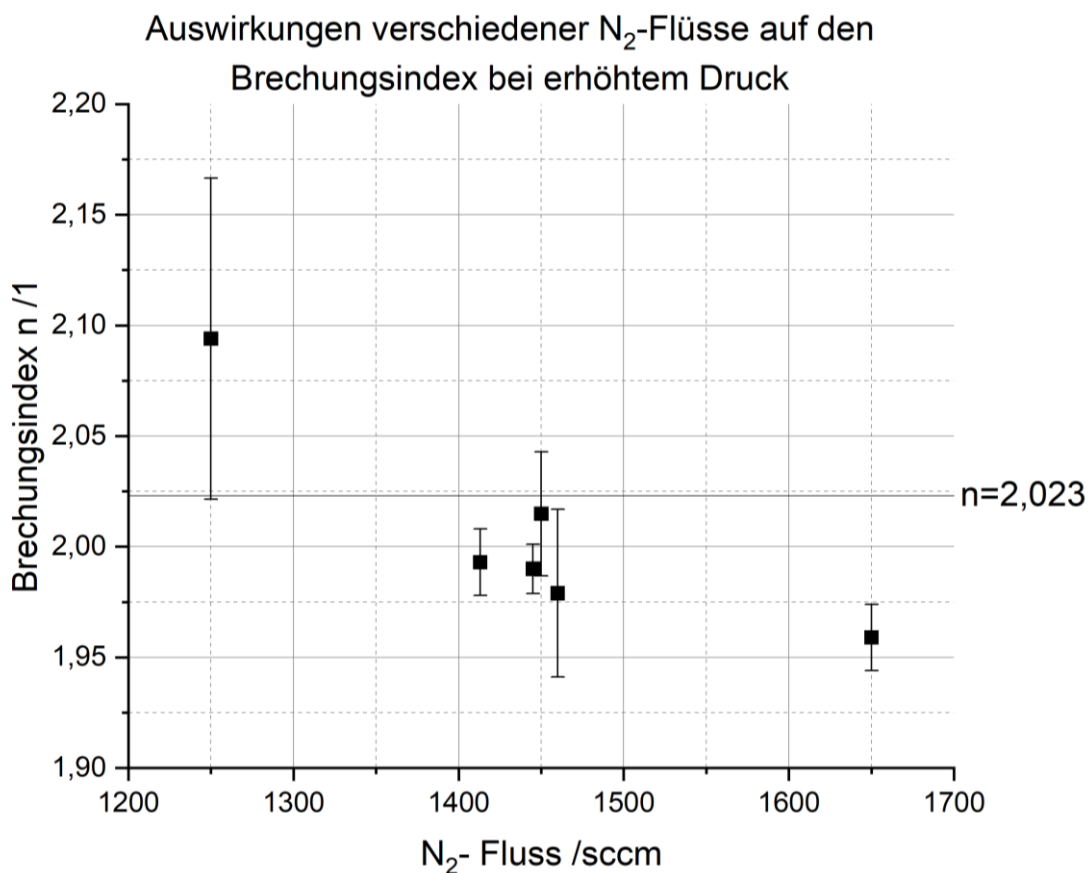


Abbildung 29: Auswirkungen verschiedener N_2 -Flüsse auf den Brechungsindex bei erhöhtem Druck von 150 mTorr bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C einem SiH_4 -Fluss von 2 sccm. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Eine Betrachtung des Wafers (Abbildung 30) nach der Ellipsometer-Messung zeigt deutlich, dass der mittlere Punkt gegenüber den anderen Messpunkten eine signifikant höhere Schichtdicke hat. Weiter wurde an dem mittleren Messpunkt über mehrere Messungen hinweg immer mind. 0.02 Brechungsindexunterschied. Durch die relativ große Abweichung in der Mitte des Wafers wird dieser Bereich nicht für die photonische Anwendung empfohlen.

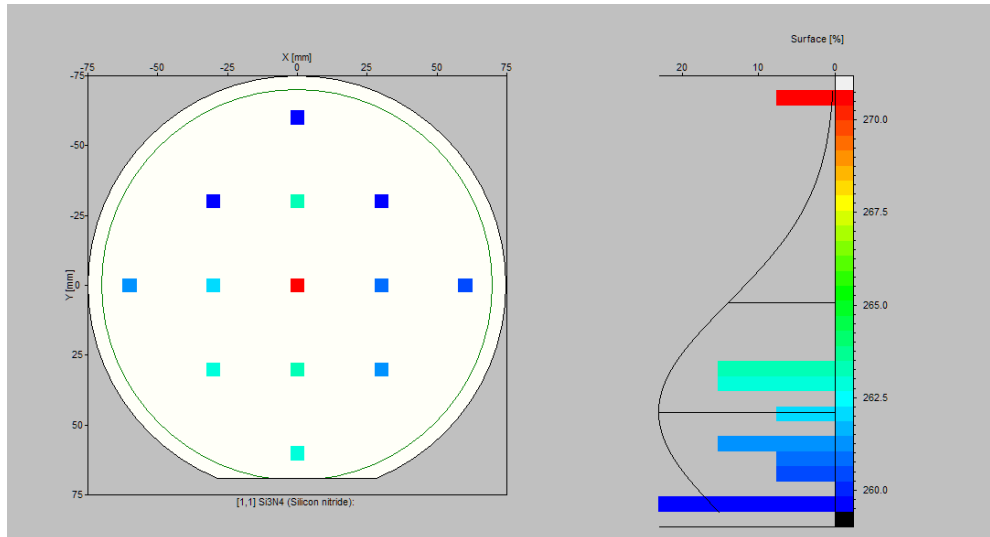


Abbildung 30: Beispielhafte Darstellung einer 13-Punkt-Wafermessung (links) und einer Schichtdickenverteilung mit Uniformity (rechts)

5.5 Ergebnisse

Die Untersuchung der unterschiedlichen Prozessparameter an der Oxford NGP80 zur Abscheidung von NH_3 -freien Schichten zeigen, dass größtenteils die Literaturtrends mit den Ergebnissen der Oxford NGP80 übereinstimmen. Lediglich der N_2 -Anteil im Reaktionsgas und die Uniformitywerte zeigen einen abweichenden Trend. Ein erhöhter N_2 -Anteil im Reaktionsgas lässt die Abscheiderate sinken. In der Literatur wurde hier ein steigender Trend gefunden (vgl. [16]). Die Uniformity zeigt mit steigender Leistung und steigendem Druck keine wirklichen Trends. Bei steigender Leistung konnte festgestellt werden, dass die Uniformity erst besser wird respektive abnimmt und mit weiter zunehmender Leistung sich wieder verschlechtert. Letzteres ist der gleiche Trend wie er auch in der Literatur zu finden ist. (vgl. [13]). Ein gegenläufiger Trend zeigt sich bei der Erhöhung des Druckes. Bei den Ergebnissen der Oxford NGP80 ist die Uniformity bei niedrigem Druck sehr gut. Bei Erhöhung des Druckes steigt die Uniformity rapide an und bei weiterer Erhöhung sinkt sie wieder und wird folglich besser. Die Literatur zeigt hier einen deutlicheren Trend und zwar nimmt die Uniformity mit steigendem Druck ab. Alle weiteren Trends sind zwischen der Oxford NGP80 und den Ergebnissen aus der Literatur gleich und in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Ergebnismatrix zur Zusammenfassung und zum Vergleich der wichtigsten Trends in der Literatur und der Oxford NGP80

Parameter		Brechungsindex		Abscheiderate		Uniformity	
		Literatur	NGP80	Literatur	NGP80	Literatur	NGP80
N ₂ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	+	+	-	+	x	+
	Mittel	o	o	o	o	x	o
	Hoch	-	-	+	-	x	-
SiH ₄ -Anteil im Reaktionsgas	Niedrig	-	-	-	-	x	-
	Mittel	o	o	o	o	x	+
	Hoch	+	+	+	+	x	o
Leistung	Niedrig	+	+	-	-	-	o
	Mittel	o	o	o	o	o	-
	Hoch	-	-	+	+	+	+
Druck	Niedrig	x	+	x	+	+	-
	Mittel	x	o	x	-	o	+
	Hoch	x	-	x	o	-	-
Legende: "+" = Zunahme; "o" = mittleres Niveau; "-" = Abnahme							

Über verschiedene $\text{SiH}_4:\text{N}_2$ Verhältnisse sollten Trends der Maschine gezeigt werden. Der Brechungsindex steigt mit steigendem SiH_4 -Fluss und sinkt mit steigendem N_2 -Fluss. Nachdem ein geeigneter N_2 -Fluss gefunden wurde, sollte über eine kleinere SiH_4 -Flussvariation ein stöchiometrisches Rezept gefunden werden. Mit dieser Variante lässt sich allerdings kein stöchiometrisches Siliziumnitrid herstellen. Ein weiterer Parameter, der Druck, wurde variiert

und die Druckvariation hat erfolgreich zu einem stöchiometrischen Rezept für Siliziumnitrid geführt. Eine Verringerung des N₂-Flusses im Standardrezept soll der Literatur zufolge zu einer Erhöhung des Brechungsindex führen. Die Ergebnisse zeigen, dies ist passiert und es konnte ein weiteres stöchiometrisches Rezept an diesem Arbeitspunkt gefunden werden.

6 Vergleich bisher genutzter und neuer Abscheideprozesse

Im Folgenden werden die beiden neuen Rezepte für stöchiometrisches Siliziumnitrid mit dem bisherigen Standardrezept für NH_3 -freie Schichten verglichen. Neben den wichtigen Produkteigenschaften des Brechungsindex, der Uniformity und der Abscheiderate wird auch auf den Stress in den einzelnen Schichten eingegangen. In der folgenden Grafik ist zunächst der Brechungsindex und dessen Variation über den Wafer für die einzelnen Prozesse dargestellt. Es ist zu sehen, dass das Standardrezept den niedrigsten Brechungsindex hat. Vergleicht man das Stöchio1-Rezept und das Stöchio2-Rezept miteinander, so sieht man, dass der Brechungsindex vom Stöchio1-Rezept nicht ganz stöchiometrisch ist. Nur das Stöchio2-Rezept erreicht den erforderlichen Brechungsindex mit größter Genauigkeit. Die gemessene Abweichung von 0,003 liegt innerhalb der gewünschten Toleranzen.

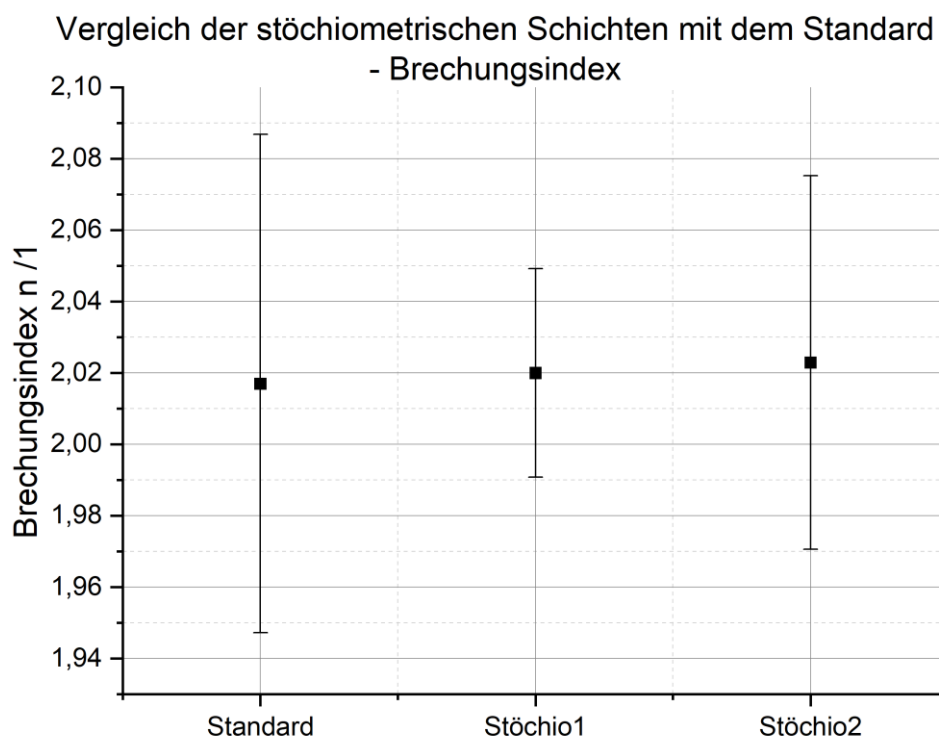


Abbildung 31: Vergleich der Brechungsindizes der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Der Standardversuch hat eine n-Differenz von 0,070. Die neuen stöchiometrischen Rezepte weisen beide eine geringere Differenz über den Wafer hinweg auf. Wobei das Stöchio1-Rezept mit dem niedrigeren N_2 -Fluss von 1225 sccm die geringste n-Differenz vorweist.

Hinsichtlich der Abscheiderate und Uniformity unterscheiden sich die Schichten wie folgt. Die Abscheiderate hat bei beiden neuen Rezepten abgenommen, wobei das Stöchio1-Rezept eine höhere Abscheiderate zeigt.

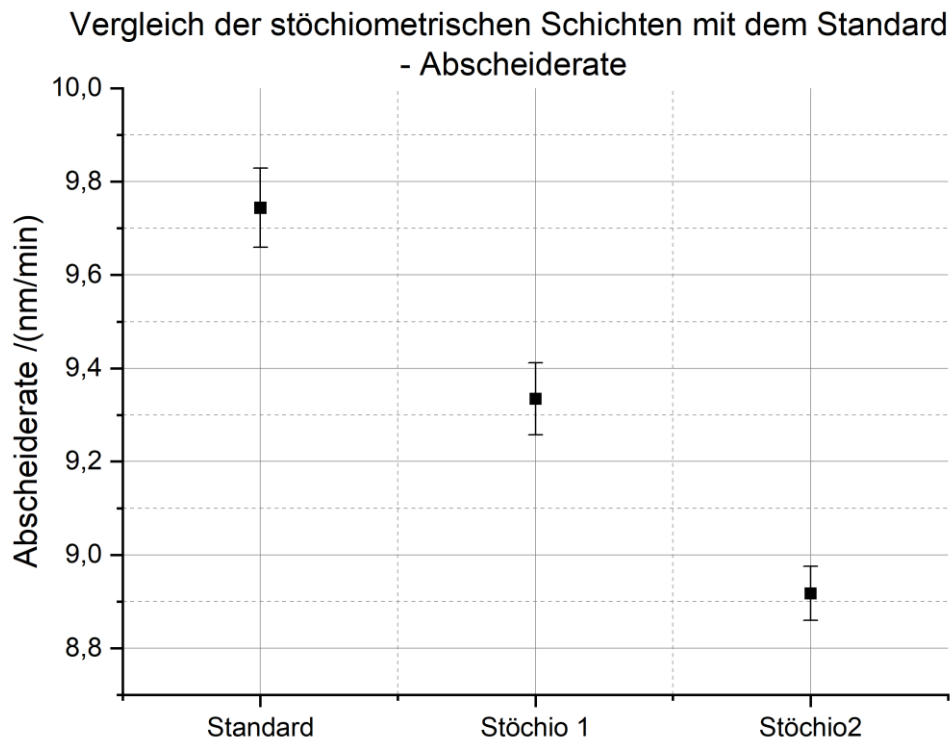


Abbildung 32: Vergleich der Abscheiderate und der Abscheideratenvariation der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard

Die Abscheideratenvariation ist bei beiden neuen Rezepten besser als beim Standard. Das Stöchio1-Rezept hat eine größere Abscheideratenvariation als das Stöchio2-Rezept.

Bei einem Vergleich des Schichtstresses fällt auf, dass bei beiden neuen stöchiometrischen Rezepten der Stress größer ist als beim Standard. Betrachtet man die beiden neuen Versuche ohne den Standard so zeigt sich, dass das Stöchio2-Rezept deutlich mehr Stress als das Stöchio1-Rezept produziert. Allerdings sind die Stresswerte im Vergleich zu den LPCVD-Werten immer noch gering.

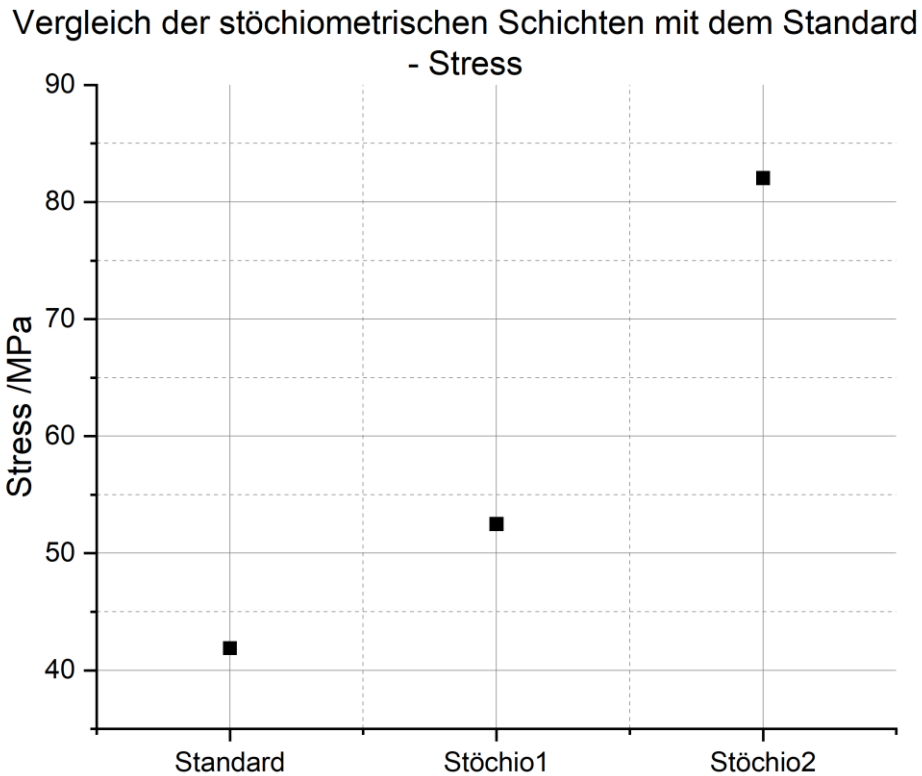


Abbildung 33: Vergleich des Stresses der stöchiometrischen Schichten mit dem Standard

Tabelle 9: Vergleichsmatrix für die Bewertung der beiden stöchiometrischen SiN-Rezepte

	Brechungsindex	n-Differenz	Abscheiderate	Uniformity	Stress	Ergebnis
Stöchio1	0	1	1	0	1	3
Stöchio2	1	0	0	1	0	2

Tabelle 9 zeigt die Bewertung der beiden stöchiometrischen SiN-Rezepte. Das jeweils bessere Ergebnis in Bezug auf die einzelnen Parameter bekommt die Bewertung 1 und das schlechtere die Bewertung 0. In der Spalte „Ergebnis“ wird die Summe der Einzelbewertungen eingetragen. Das Stöchio1-Rezept hat eine geringere n-Differenz und eine höhere Abscheiderate. Lediglich die Uniformity ist schlechter als beim Stöchio2-Rezept. Da sich die Werte geringfügig unterscheiden und die Messung lediglich auf einer 13-Punkt-Durchschnittsmessung beruht, wird an dieser Stelle darauf verwiesen, dass eine Eignung als stöchiometrisches Rezept für photonische Anwendungen abschließend nur mit weiteren strukturellen und optischen Untersuchungen klären lässt. So könnten beispielweise SiN-Wellenleiter aus den Stöchio-Rezepten hergestellt werden und der Ausbreitungsverlust gemessen und verglichen werden. Alternativ könnten mit einem FTIR-Spektroskop die chemischen Verbindungen in der Schicht bestimmt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es den Abscheideprozess für stöchiometrisches PECVD-Siliziumnitrid an der Oxford NGP80 zu optimieren. Zu Beginn wurden dafür wichtige Eigenschaften eines SiN-Wellenleiters beleuchtet. Des Weiteren wurde der aktuelle Stand der Technik von Forschungsarbeiten zur PECVD-SiN-Abscheidung, insbesondere für photonischen Anwendungen, mithilfe einer Literaturrecherche aufgezeigt. Zum besseren Überblick wurden die wichtigsten Informationen in einer Versuchsmatrix dargestellt. Daraus abgeleitete Trends sollten als Vergleichstrends dienen, um das Maschinenverhalten vorauszusagen und qualitative Aussagen über PECVD-SiN-Schichten zu treffen. Durch das Verstehen der Oxford NGP80 und das Identifizieren der einzelnen Maschinenparameter konnten im Anschluss Versuche zur Optimierung des PECVD-Prozesses gestartet werden. Dabei wurde anhand von Einzelvariationen des bisherigen Standardrezeptes für wasserstoffarme PECVD-SiN-Schichten sukzessive das Maschinenverhalten getestet und in einer Ergebnismatrix zusammengefasst, um diese Trends schließlich miteinander kombinieren zu können. Es wurde unter anderem eine SiH₄-Flussvariation mit einer N₂-Flussvariation kombiniert. Dies hat einen neuen Arbeitspunkt bei einem N₂-Fluss von 1850 sccm offengelegt. Durch die Variation des Druckes konnte ein stöchiometrisches Rezept gefunden werden. Das Standardrezept selbst weist einen deutlich niedrigeren N₂-Fluss von 1250 sccm auf. Der Brechungsindex betrug 2,017. Interessant ist hier vor allem der größere N₂-Fluss. Eine etwaige Veränderung der strukturellen Schichtzusammensetzung gegenüber dem Standardrezept müsste in zukünftigen Forschungsarbeiten jedoch mit einem FTIR untersucht werden. Ein weiteres stöchiometrisches Rezept ließ sich auch durch eine geringe Absenkung des N₂-Flusses finden. Um die strukturellen Eigenschaften untersuchen zu können wird auch an dieser Stelle eine FTIR-Messung empfohlen. Des Weiteren gilt es zukünftig zu untersuchen, ob hier durch die große N₂-Flussdifferenz der beiden stöchiometrischen SiN-Schichten ein Unterschied bei den Ausbreitungsverlusten festzustellen ist. Diese Forschung könnte am IMS durchgeführt werden. Die Erkenntnisse aus Versuchen zum Ausbreitungsverlust sind für die photonische Anwendung wichtig. Deshalb wird empfohlen, dies als nächsten Arbeitsschritt durchzuführen. An dieser Stelle wird auf Kapitel 3 verwiesen: Hier wurden im Rahmen der Literaturrecherche wichtige Aussagen zu den strukturellen Eigenschaften und zu den Ausbreitungsverlusten zusammengestellt. Diese könnten bei der weiteren Forschungsarbeit als Grundlage dienen oder zu Vergleichszwecken herangezogen werden.

Literatur

- [1] M. Work, „OIPT_NGP80_IFU_02.book“. 2010 Oxford Instruments Plasma Technology.
- [2] Silicon nitride applications. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.imec-int.com/en/what-we-offer/development/silicon-nitride-based-photonics/silicon-nitride-applications> (Zugriff am: 18.09.2022)
- [3] Silicon nitride-based photonics. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.imec-int.com/en/what-we-offer/development/system-development-technologies/Integrated-photonics/silicon-nitride-based-photonics> (Zugriff am 19.09.22)
- [4] H. Hügel und T. Graf, Materialbearbeitung mit Laser: Grundlagen und Verfahren, 4. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [5] C. Gerhard, Tutorium Optik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [6] D. Meschede, Gerthsen Physik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [7] S. C. Mao et al., „Low propagation loss SiN optical waveguide prepared by optimal low-hydrogen module“ (eng), Optics express, Jg. 16, Nr. 25, S. 20809–20816, 2008, doi: 10.1364/oe.16.020809.
- [8] Lichtwellenleiter. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/lichtwellenleiter/9032> (Zugriff am: 3. September 2022).
- [9] R. Krüger, „Prozessentwicklung von Siliziumnitrid-Schichten für mikro- und nanotechnologische Anwendungen“, 2021.
- [10] W. Bogaerts und L. Chrostowski, „Silicon Photonics Circuit Design: Methods, Tools and Challenges“, Laser & Photonics Reviews, Jg. 12, Nr. 4, S. 1700237, 2018, doi: 10.1002/lpor.201700237.
- [11] K.L. Choy „Chemical vapour deposition of coatings“ Elsevier Science Ltd. 2003
- [12] Karl F. Roenigk and Klavs F. Jensen “ “1987 J. Electrochem. Soc. 134 1777
- [13] C. Yang und J. Pham, „Characteristic Study of Silicon Nitride Films Deposited by LPCVD and PECVD“, Silicon, Jg. 10, Nr. 6, S. 2561–2567, 2018, doi: 10.1007/s12633-018-9791-6.
- [14] Eugen Unger „Die Erzeugung dünner Schichten. Das PECVD-Verfahren: Gasphasenabscheidung in einem Plasma“. VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1991
- [15] L. Hoffman et al., „Low Loss CMOS-Compatible PECVD Silicon Nitride Waveguides and Grating Couplers for Blue Light Optogenetic Applications“, IEEE Photonics J., Jg. 8, Nr. 5, S. 1–11, 2016, doi: 10.1109/JPHOT.2016.2601782.
- [16] D. B. Bonneville, J. W. Miller, C. Smyth, P. Mascher und J. D. B. Bradley, „Low-Temperature and Low-Pressure Silicon Nitride Deposition by ECR-PECVD for

- Optical Waveguides“, Applied Sciences, Jg. 11, Nr. 5, S. 2110, 2021, doi: 10.3390/app11052110.
- [17] C. Savall, J. C. Bruyère und J. P. Stoquert, „Chemical bonds and microstructure in nearly stoichiometric PECVD aSixNyHz“, Thin Solid Films, Jg. 260, Nr. 2, S. 174–180, 1995, doi: 10.1016/0040-6090(94)06476-8.
- [18] B. Reynes und J. C. Bruyère, „PECVD silicon nitrides with low hydrogen content“, Sensors and Actuators A: Physical, Jg. 33, 1-2, S. 25–28, 1992, doi: 10.1016/0924-4247(92)80219-S.
- [19] T. Domínguez Bucio et al., „Material and optical properties of low-temperature NH₃-free PECVD SiN_x layers for photonic applications“, J. Phys. D: Appl. Phys., Jg. 50, Nr. 2, S. 25106, 2017, doi: 10.1088/1361-6463/50/2/025106.
- [20] K. Murakami, T. Takeuchi, K. Ishikawa und T. Yamamoto, „Characterization of silicon nitride films formed in an RF glow discharge“, Applied Surface Science, 33-34, S. 742–749, 1988, doi: 10.1016/0169-4332(88)90375-3.
- [21] T. Grigaitis, A. Naujokaitis, S. Tumėnas, G. Juška und K. Arlauskas, „Characterization of silicon nitride layers deposited in three-electrode plasma-enhanced CVD chamber“, Lith. J. Phys., Jg. 55, Nr. 1, 2015, doi: 10.3952/physics.v55i1.3056.
- [22] Matthias Moser et al. “PECVD SiN_x passivation with more than 8 MV/cm breakdown strength for GaN-on-Si wafer stress management” GaN Marathon 2022; RF and Power GaN 1, Venedig, 20-22 Juni 2022
- [23] H. Mäckel und R. Lüdemann, „Detailed study of the composition of hydrogenated SiN_x layers for high-quality silicon surface passivation“, Journal of Applied Physics, Jg. 92, Nr. 5, S. 2602–2609, 2002, doi: 10.1063/1.1495529.
- [24] K. Mackenzie, D. Johnson, M. DeVre, R. Westerman und B. Reelfs, „Stress Control of Si-based PECVD Dielectrics“, Meet. Abstr., MA2005-01, Nr. 9, S. 406, 2006, doi: 10.1149/MA2005-01/9/406.
- [25] Oxford Instruments „Plasma NGP80 Pro Brochure; RIE, ICP & PECVD
- [26] U. Greifswald, Ellipsometrie - Universität Greifswald. [Online]. Verfügbar unter: <https://physik.uni-greifswald.de/ag-helm/methoden/ellipsometrie/> (Zugriff am: 23. September 2022).
- [27] J.A. Woollam, Ellipsometry Tutorial - J.A. Woollam. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial> (Zugriff am: 27. September 2022).
- [28] J.A. Woollam, Optical Constants - J.A. Woollam. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/optical-constants> (Zugriff am: 23. September 2022).
- [29] Christian Kirsch, „Entwicklung, Herstellung und Charakterisierung eines bistabilen Mikroaktors in Siliziumtechnik“.

- [30] Royal Society ©2017, „The tension of metallic films deposited by electrolysis“, Proc. R. Soc. Lond. A, Jg. 82, Nr. 553, S. 172–175, 1909, doi: 10.1098/rspa.1909.0021.

Anhang

Anhang A - Lichtfarben

Tabelle A.1: Lichtfarben und deren Wellenlängenbereiche innerhalb des sichtbaren Spektrum in Anlehnung an [5]

Lichtfarbe	Wellenlänge (nm)
Violett	380-430
Blau	430-490
Grün	490-570
Gelb	570-600
Orange	600-640
Rot	640-780

Anhang B - Übersicht aller Versuche

Tabelle B.1: Übersicht aller gefahrenen PECVD-Abscheideversuche an der Oxford NGP80

	Leistung /W	SiH ₄ -Fluss /sccm	N ₂ -Fluss /sccm	Temperatur /°C	Abscheidezeit /s	Druck /mTorr	Stress /MPa	Schichtdicke /nm	Abscheiderate /(nm/min)	Uniformity (nm)	Uniformity /%	MSE	n	n-Differenz
E10539 1	50	20	500	300	120	130	x	195.15	97.58	x	x	136.75	2.496	0.3889
E10539 2	50	20	1000	300	120	130	x	208.94	104.47	x	x	121.59	2.504	0.3067
E10539 3	50	20	1500	300	120	130	x	148.28	74.14	x	x	191.82	2.675	0.3934
E10539 4	150	20	500	300	150	130	x	120.35	48.14	x	x	292.61	2.861	0.6568
E10539 5	150	20	1000	300	150	130	x	120.66	48.26	x	x	187.35	2.820	1.1862
E10539 6	150	20	1500	300	150	130	x	133.88	53.55	x	x	120.34	2.550	0.6844
E10539 7	250	20	500	300	90	130	x	146.14	97.43	x	x	96.84	2.491	0.2589
E10539 8	250	20	1000	300	90	130	x	151.37	100.91	x	x	106.28	2.571	0.2132
E10539 9	250	20	1500	300	90	130	x	150.83	100.55	x	x	86.3	2.349	0.3094
E10573 1	20	2	1450	350	1200	130	27.33	191.00	9.55	1.94	1.02	13.55	1.993	0.0147
E10573 2	20	2	1650	350	1200	130	28.10	188.00	9.40	3.87	2.02	11.78	2.584	0.0842
E10573 3	20	2	1850	350	1200	130	-121.96	187.00	9.35	5.20	2.78	16.5	1.868	0.0675
E10573 4	30	2	1250	350	1200	130	22.17	244.00	12.20	2.56	1.05	18.89	1.898	0.0188
E10573 5	40	2	1250	350	1200	130	-36.66	291.00	14.55	3.58	1.23	16.23	1.839	0.0156
E10573 6	50	2	1250	350	1200	130	5.28	302.00	15.10	4.98	1.65	13.49	1.825	0.0093
E10573 7	20	4	1450	350	1200	130	4.28	224.00	11.20	4.52	2.02	114.78	2.584	0.0842
E10573 8	20	4	1650	350	1200	130	24.46	214.00	10.70	2.48	1.16	66.25	2.520	0.0217
E10573 9	20	4	1850	350	1200	130	47.58	209.00	10.45	2.47	1.18	53.26	2.448	0.0218
Standard	20	2	1250	350	1200	150	41.89	210.60	10.53	3.70	1.76	37.23	2.094	0.0725
E10608 2	20	2	1250	350	1200	100	23.85	316.60	15.83	87.48	27.63	105.07	1.930	0.5185
E10608 3	20	2	1250	350	1200	70	9.19	379.40	18.97	1.24	0.33	129.64	1.780	0.0327
E10608 4	20	2	1250	325	1200	130	43.83	193.50	9.68	2.19	1.13	20.42	2.037	0.0237
E10608 5	20	2	1250	375	1200	130	0.00	186.90	9.35	2.23	1.19	17.49	2.038	0.019
E10608 6	20	2	1250	400	1200	130	58.41	192.00	9.60	1.87	0.98	13.56	2.000	0.0192
E10608 7	20	3	1450	350	1200	130	118.46	201.80	10.09	5.82	2.88	56.93	2.322	0.2354
E10608 8	20	3	1650	350	1200	130	144.17	196.50	9.83	3.49	1.78	50.91	2.294	0.0581
E10608 9	20	3	1850	350	1200	130	154.28	188.25	9.41	5.13	2.72	49.98	2.306	0.1595
E10608 910	30	3	1250	350	1200	130	131.14	257.30	12.87	3.72	1.45	60	2.280	0.0728
E10608 911	40	3	1250	350	1200	130	112.21	183.90	9.20	75.26	40.92	266	2.198	0.6918
E10608 912	50	3	1250	350	1200	130	68.38	247.40	12.37	41.51	16.78	502	1.620	0.698
E10627 1	20	2	1250	350	1500	130	44.15	243.60	9.74	4.24	1.74	40.66	2.017	0.0698
E10627 2	20	2	1150	350	1200	130	20.93	199.03	9.95	2.29	1.15	20.39	2.039	0.04
E10627 3	20	2.5	1450	350	1200	130	120.14	191.15	9.56	3.20	1.68	32.49	2.190	0.0869
E10627 4	20	2.5	1650	350	1200	130	65.91	189.02	9.45	2.73	1.45	24.68	2.140	0.0326
E10627 5	20	2.5	1850	350	1200	130	65.87	187.42	9.37	2.46	1.32	20.5	2.085	0.0266
E10627 6	20	2	1200	350	1500	130	90.79	205.13	8.21	2.93	1.43	22.88	2.057	0.0447
E10627 7	20	2.5	1850	350	1500	115	-228.31	226.39	9.06	3.07	1.36	28.35	1.980	0.0354
E10627 8	20	2.3	1850	350	1500	130	40.70	231.67	9.27	2.38	1.03	24.46	1.980	0.0139
Stochio2	20	2.5	1850	350	1500	121	82.04	222.94	8.92	2.88	1.29	28.17	2.023	0.0523
E10627 923	20	2.4	1850	350	1500	130	x	224.95	9.00	2.76	1.23	29.12	2.036	0.0251
E10627 924	20	2.3	1850	350	1500	130	x	235.95	9.44	9.44	1.20	28.05	1.989	0.0249
E10627 925	20	2.5	1850	350	1500	115	x	225.84	9.03	2.39	1.06	20.56	1.986	0.036
Stochio1	20	2.225	1225	350	1500	130	52.50	233.37	9.33	3.86	1.65	30.55	2.020	0.0292
E10659 2	20	2	1250	350	1500	131	49.50	242.87	9.71	3.61	1.49	30.28	2.005	0.029
E10659 3	20	2.4	1250	350	1500	128	171.50	231.72	9.27	3.79	1.64	52.04	2.180	0.1077
E10659 620	20	2	1460	350	1500	150	x	261.77	10.47	10.47	1.42	34.79	1.979	0.0378
E10659 621	20	2	1445	350	1500	150	x	264.40	10.58	10.58	1.19	30.57	1.990	0.0111
E10659 623	20	2	1413	350	1500	150	x	264.32	10.57	2.98	1.13	25.23	1.993	0.0153
E10659 624	20	2	1450	350	1500	150	x	250.46	10.02	3.71	1.48	35.11	2.015	0.0284
E10659 625	20	2	1650	350	1500	150	x	262.11	10.48	2.94	1.12	27.97	1.959	0.0148
W12	40	2	1250	350	1200	130	x	160.90	8.05	x	x	x	2.380	x
W13	40	2	1250	350	1200	130	x	389.90	19.50	x	x	x	1.720	x
W14	40	5	1250	350	1200	130	x	198.60	9.93	x	x	2.52	x	x

Anhang C - Ergänzende Versuchsdiagramme zum Brechungsindex

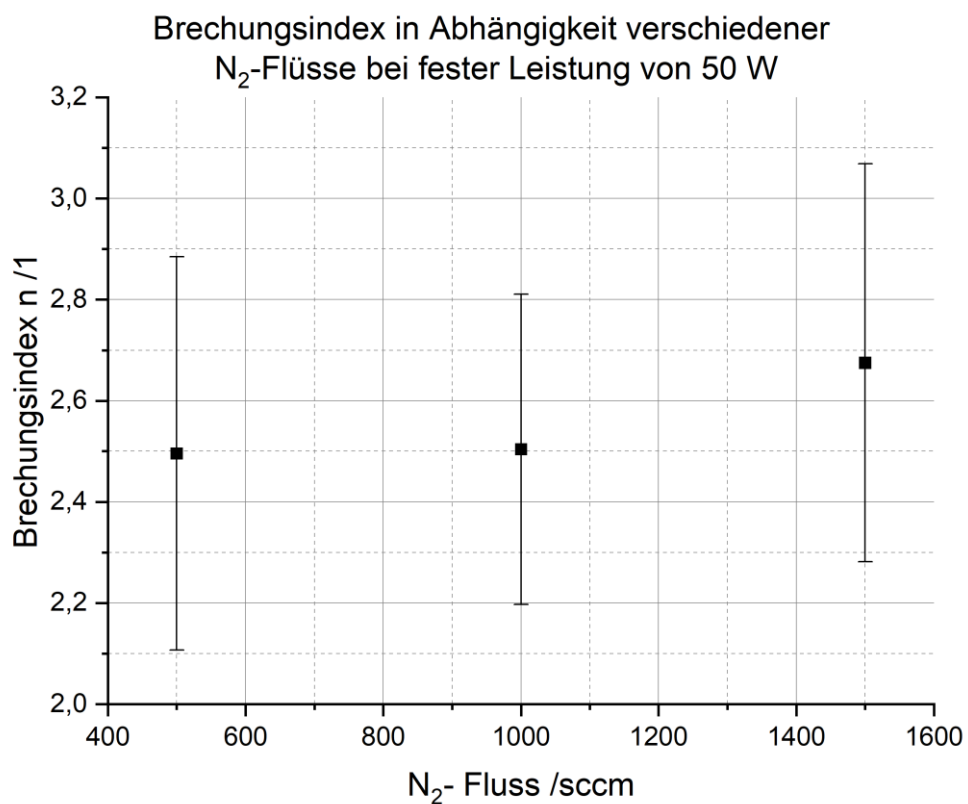


Bild C.1: Brechungsindex in Abhängigkeit des N₂-Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH₄-Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

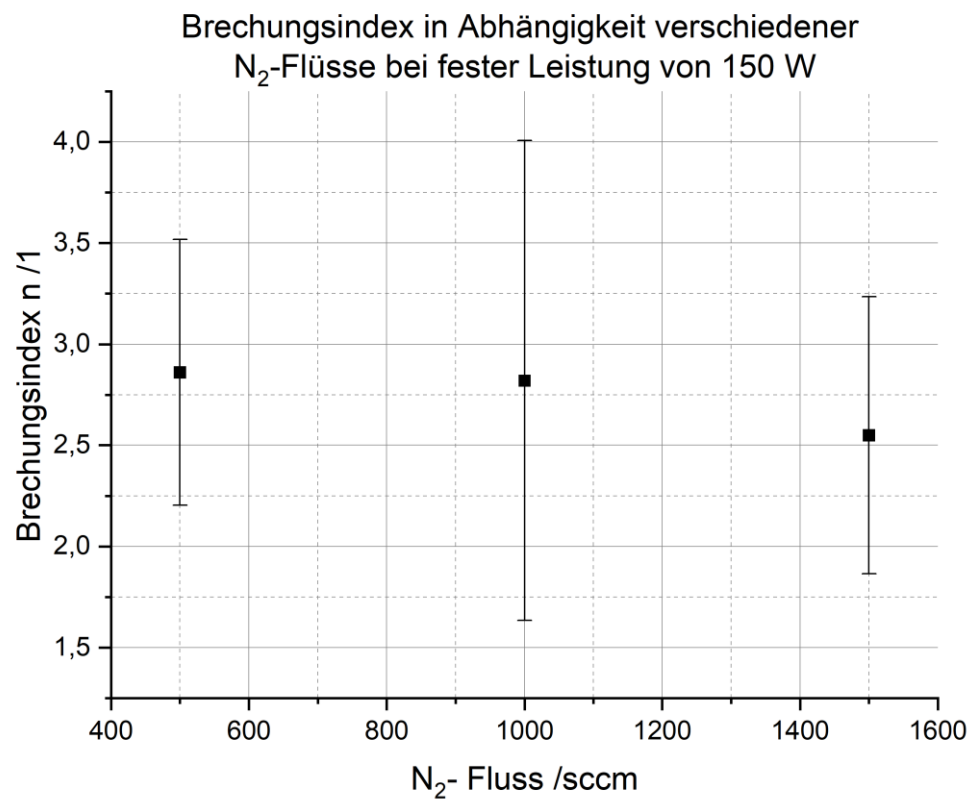


Bild C.2: Brechungsindex in Abhängigkeit des N₂-Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH₄-Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 150 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

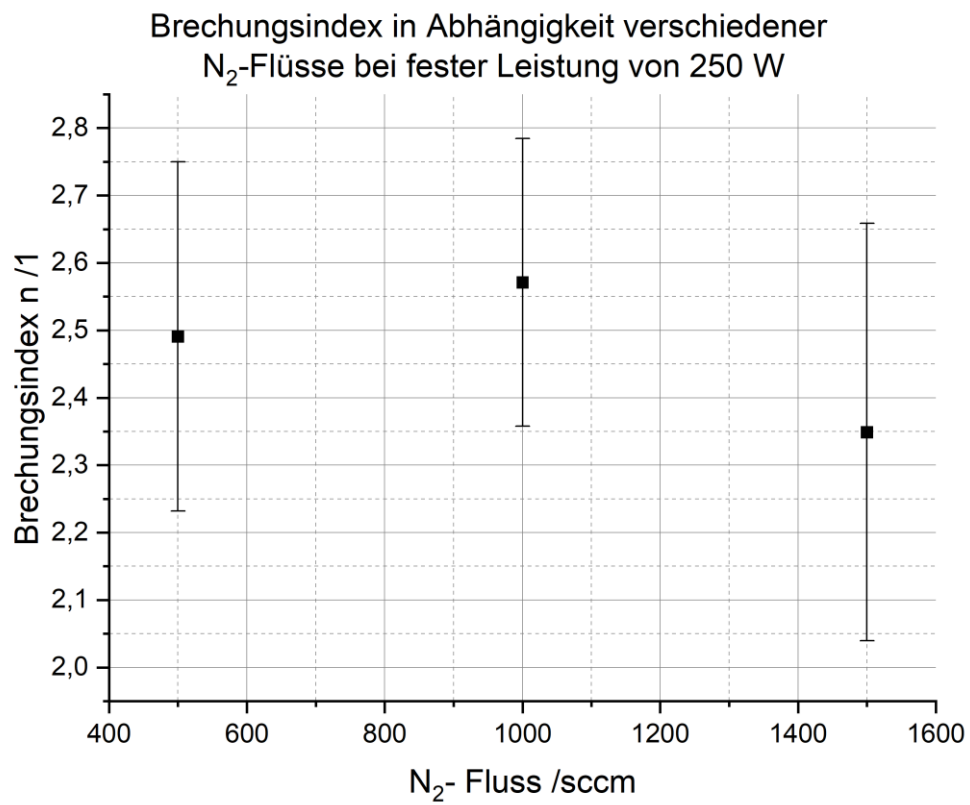


Bild C.3: Brechungsindex in Abhängigkeit des N₂-Flusses bei einer Leistung von 50 W, einem SiH₄-Fluss von 20 sccm, einer Temperatur von 300 °C und einem Druck von 250 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Brechungsindexvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

Anhang D - Ergänzende Versuchsdiagramme zur Abscheiderate

Abscheiderate in Abhängigkeit des SiH_4 -Flusses mit erhöhtem N_2 -Fluss

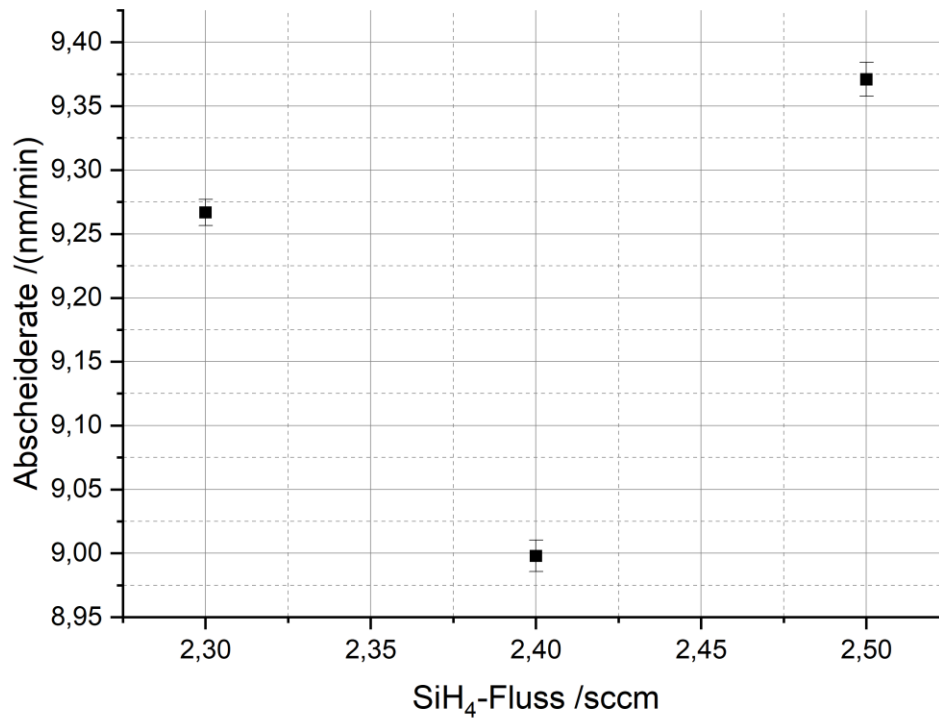


Bild D.1: Untersuchung einer SiH_4 -Flussvariation mit festem N_2 -Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

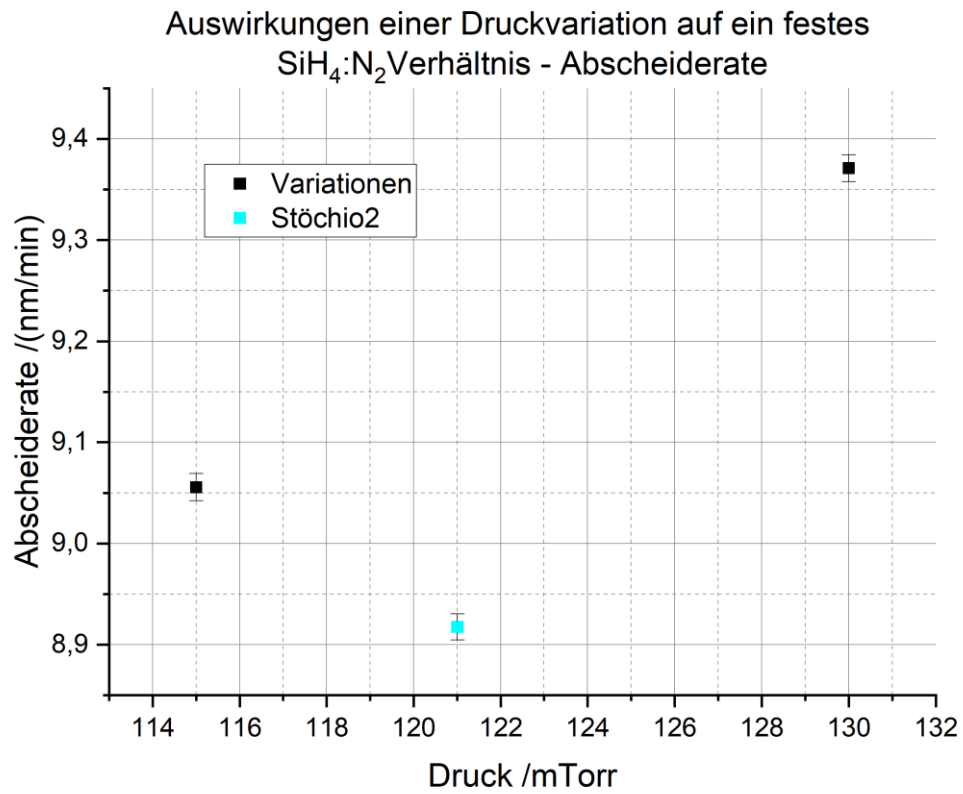


Bild D.2: Untersuchung einer SiH_4 -Flussvariation mit festem N_2 -Fluss 1850 sccm bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen Prozess an.

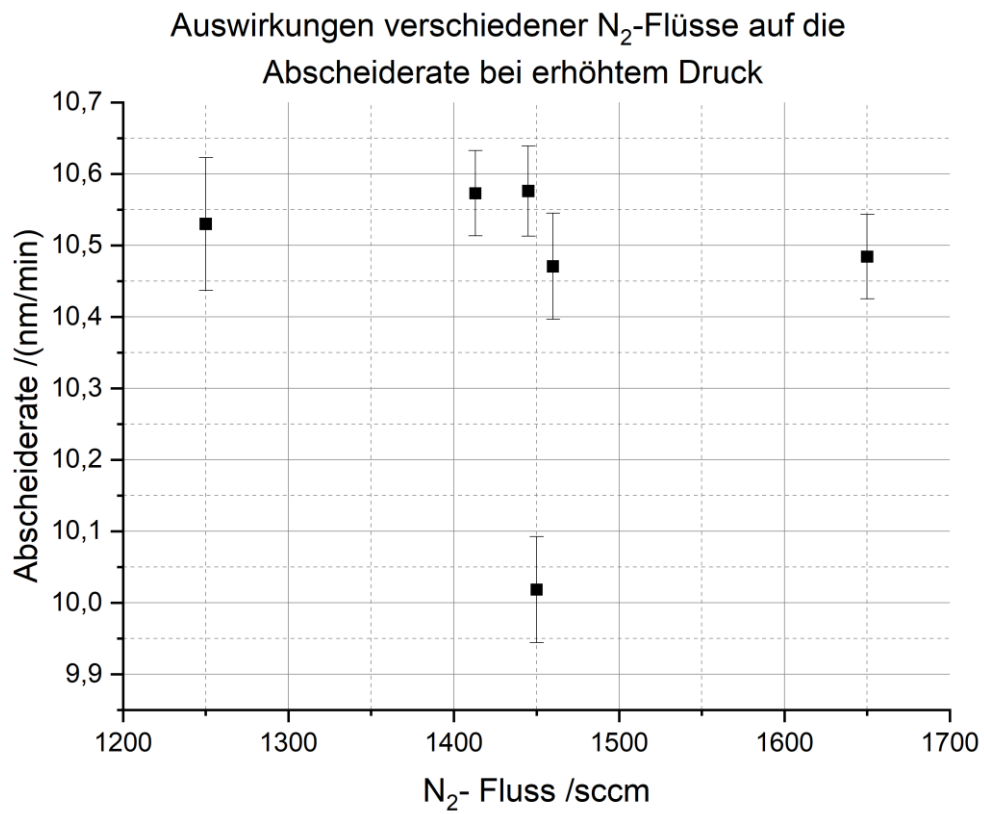


Bild D.3: Auswirkungen verschiedener N₂-Flüsse auf den Brechungsindex bei erhöhtem Druck von 150 mTorr bei einer Leistung von 20 W, einer Temperatur von 350 °C einem SiH₄-Fluss von 2 sccm. Die Fehlerbalken geben die Abscheideratenvariation über den Wafer bei dem jeweiligen

Anhang E - Ergänzende Diagramme zum Stress

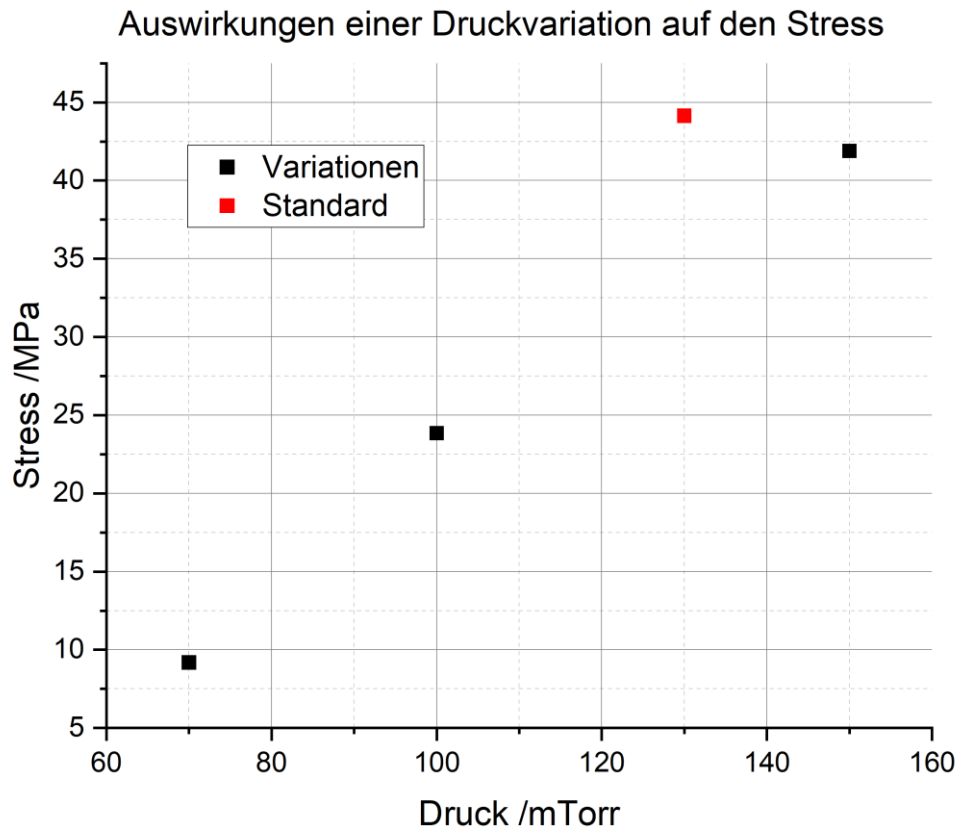


Bild E.1: Stress in Abhängigkeit des Druckes bei einer Leistung von 20 W, einem SiH₄-Fluss von 2 sccm, einem N₂-Fluss von 1450 sccm und einer Temperatur von 350 °C.

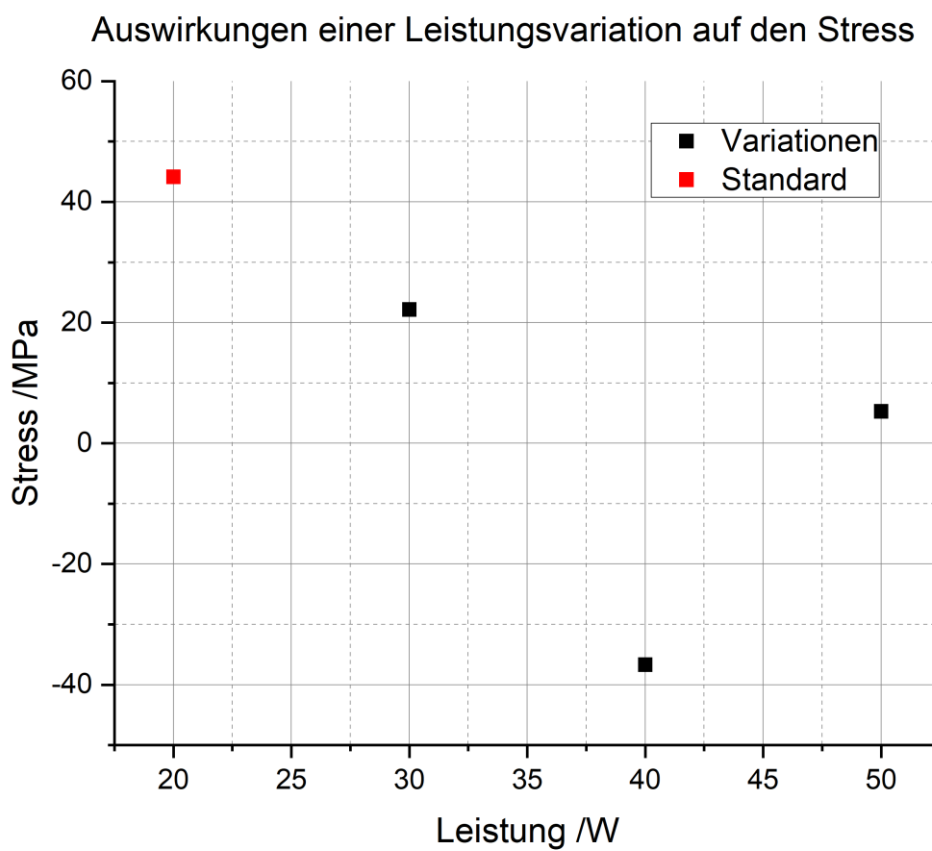


Bild E.2: Stress in Abhängigkeit der Leistung bei einem SiH₄-Fluss von 2 sccm, einem N₂-Fluss von 1450 sccm, einer Temperatur von 350 °C und einem Druck von 130 mTorr

Auswirkungen einer Temperaturvariation auf den Stress

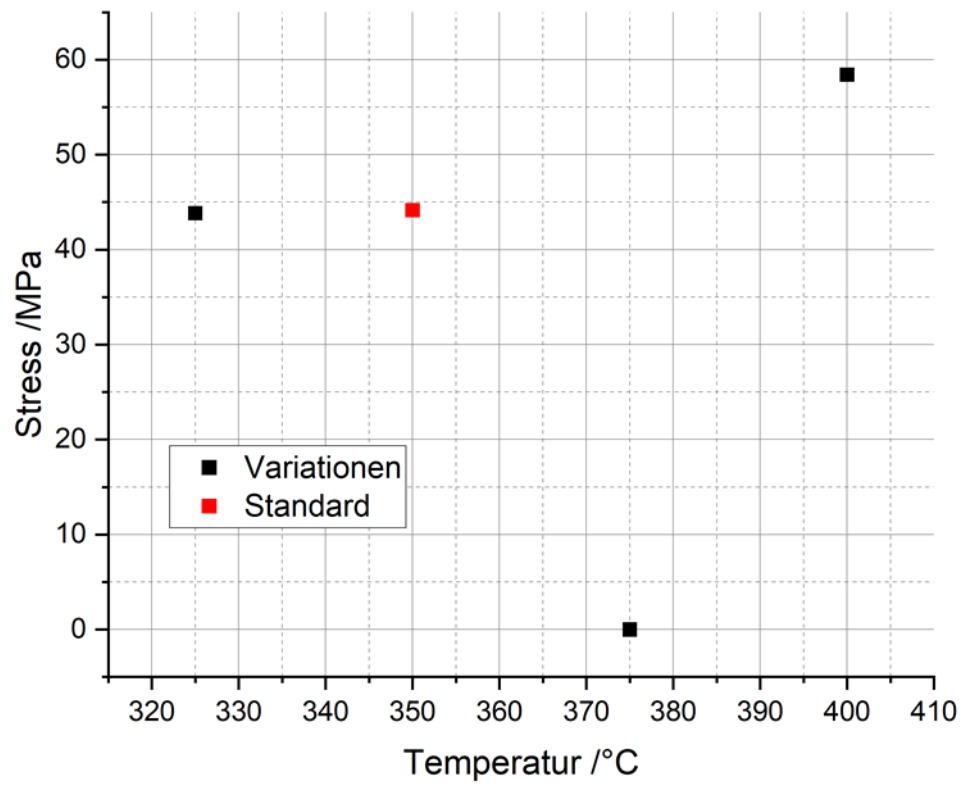


Bild E.3: Stress in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Leistung 20 W, SiH₄-Fluss von 2 sccm, einem N₂-Fluss von 1450 sccm und einem Druck von 130 mTorr

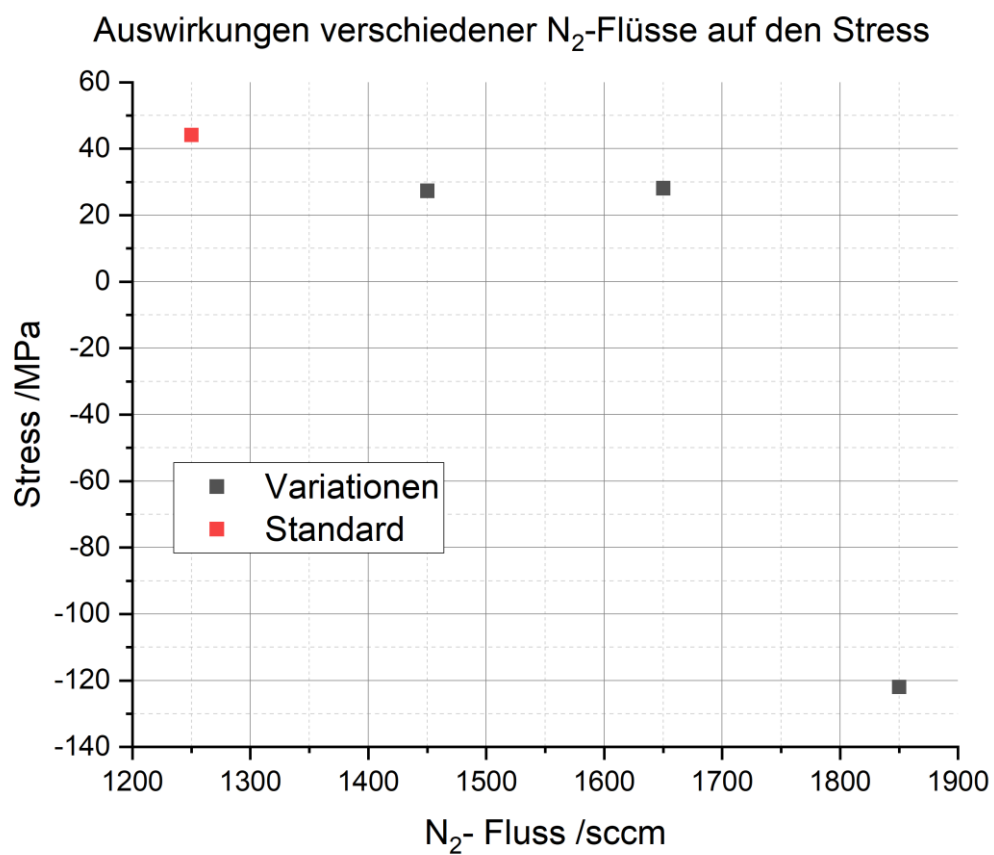


Bild E.4: Stress in Abhängigkeit des N₂-Flusses bei einer Leistung 20 W, SiH₄-Fluss von 2 sccm, und einem Druck von 130 mTorr