

INT 173/91

Juin 1991

**Plasma-Physikalische Eigenschaften von zur
Abscheidung von amorphem Silizium verwendeten**

Silan RF Plasman

Projektbericht CRPP, Erste Etappe 1989-1991

Ch. Hollenstein, A. Howling, J.-L. Dorier

Projektbericht CRPP
Erste Etappe 1989-1991

Plasma-physikalische Eigenschaften von zur
Abscheidung von amorphem Silizium
verwendeten Silan RF Plasmen

Ch. Hollenstein, A. Howling, J.-L. Dorier



ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Eidgenössische Technische Hochschule - Lausanne

Politecnico Federale - Losanna

Swiss Federal Institute of Technology - Lausanne

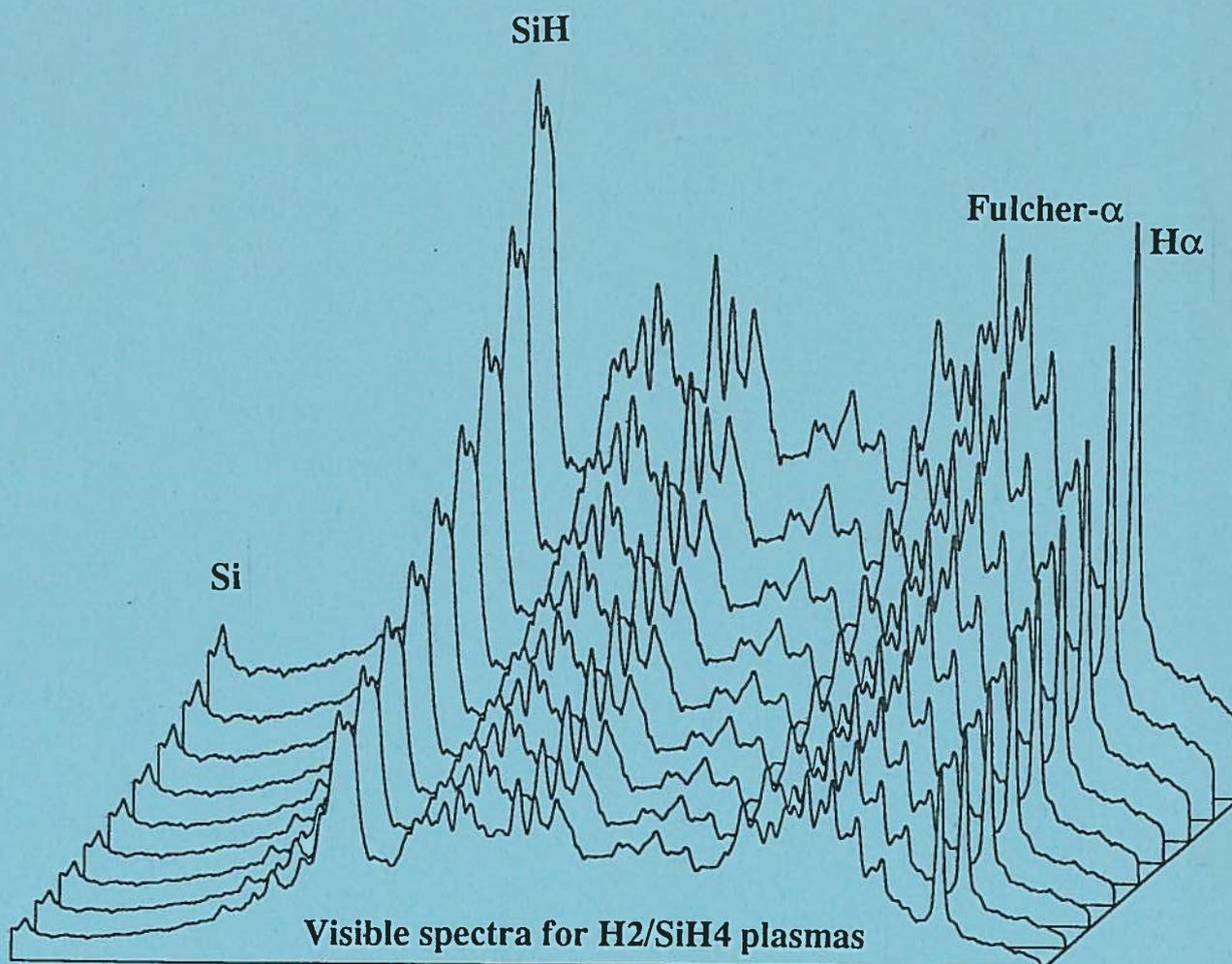
Centre de Recherches en
Physique des Plasmas
21, Av. des Bains
CH- 1007 LAUSANNE

Téléphone (021) 693.11.11
Télex 454 556 eppp ch
Téléfax (021) 693.51.76

Projektbericht CRPP, Erste Etappe 1989-1991

"Plasma-physikalische Eigenschaften von zur Abscheidung von
amorphem Silizium verwendeten Silan RF Plasmen"

finanziert durch das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)



Lausanne Juni 1991

Inhaltsverzeichnis

A)	Einleitung	3
B)	Beschreibung des Experimentes PADEX am CRPP	5
	1) Der Reaktor	5
	2) Diagnostik-Methoden	6
C)	Grundlagen der Abscheidung von amorphem Silizium mit Hilfe der VHF Methode	7
	1) Wasserstoff und Argon Plasmen	7
	2) Elektrische Charakterisierung der VHF Entladung	8
	3) Modellisierung der VHF Entladung	11
	4) Weitere Eigenschaften der VHF Entladung	14
D)	Abscheidung von mikrokristallinem Silizium ($\mu\text{c-Si:H}$)	16
E)	Puderbildung in Silan Plasmen	19
	1) Diagnostik der Puderbildung	19
	2) Puderbildung und Entladungsparameter	21
F)	Aufbau von neuen Diagnostik Methoden	24
	1) Lecher-Leitungs-Mikrowellen-Interferometer	24
	2) Emissions-Spektroskopie	25
	3) In-situ Messung der Abscheiderate	27
G)	Ausblick	29
H)	Veröffentlichungen (1989-1991)	30
I)	Liste der Mitarbeiter	33

A) Einleitung

Dieser Projektbericht umfasst die am CRPP im Rahmen des BEW Projektes EF-REN(89)17 geleisteten Arbeiten auf dem Gebiet der Abscheidung von amorphem und mikrokristallinem Silizium mit Hilfe der VHF Methode.

Erste fundamentale Arbeiten auf dem Gebiet der Abscheidung mit Anregungsfrequenz im VHF Bereich wurden am IMT in Neuchâtel unter der Leitung von Prof. A. Shah durchgeführt. Diese Arbeiten zeigen deutlich, dass diese Methode wesentliche Vorteile gegenüber der meistens benützten Standard-Frequenz von 13.56MHz besitzt. Der gewichtigste Vorteil besteht in der für die Herstellung von Solarzellen wichtigen Abscheiderate, die mit dieser Methode wesentlich erhöht werden konnte. Die Abscheiderate ist von Bedeutung um die Produktionszeit und die Produktionskosten der Solarzellen weiter zu verringern. Auf der anderen Seite treten oft neue Probleme bei hohen Abscheideraten auf, mit oftmals negativen Einfluss auf die erhaltene Filmqualität. Unter diesen Problemen ist vor allem die Bildung von Puder im Plasma zu erwähnen. Die Puderbildung in diesen Plasmen ist einer der Hauptgründe für die hohen Ausschüsse in der Fabrikation.

Ein weiteres wichtiges Problem in der Anwendung des amorphen Siliziums in Solarzellen ist die Langzeit-Stabilität der Schichten. Eine wichtige Frage in diesem Problemkreis ist inwieweit diese durch das Plasma beeinflusst werden kann. Verschiedenste Möglichkeiten bitten sich in dieser Richtung an, unter anderm die Beimischung von Helium oder Xenon um die Qualität der Schichten positiv zu beeinflussen.

Zum jetzigen Zeitpunkt arbeiten verschiedene Gruppen weltweit auf dem Gebiet der Plasmaabscheidung mit Anregefrequenzen im VHF Bereich. Weitere Vorteile und eventuelle Nachteile dieser Technik sind jedoch bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht aufgeklärt.

Um die Abscheidungs-Prozesse im VHF Bereich besser zu verstehen und eventuell weiter zu optimieren, wurde eine Zusammenarbeit zwischen dem IMT und dem CRPP begonnen und das daraus resultierende, hier präsentierte Projekt wurde vom BEW finanziert. Diese Zusammenarbeit hat einen ausgesprochenen interdisziplinären Charakter wurde doch vereinbart, dass die plasma-physikalischen Untersuchungen am CRPP, während die abgeschiedenen Filme am IMT untersucht werden sollten. Regelmässige Zusammenkünfte in Lausanne oder in Neuchâtel dienten zur Absprache des laufenden Projektprogrammes und zum Austausch von Resultaten und Erfahrungen. Dieser Zusammenschluss der Interesse ermöglichte, dass beide beteiligten Forschungsgruppen gegenseitig von den Ergebnissen und Erfahrungen profitieren konnten.

Die in diesem Bericht vorgelegten Resultate nach Abschluss der ersten zweijährigen Projektdauer sind deshalb stark geprägt von der guten Harmonie der Zusammenarbeit zwischen den beiden Gruppen am IMT und am CRPP.

Neben dem Aufbau des Experimentes und den dazugehörigen Diagnostik-Methoden wurden die folgenden Hauptresultate erhalten:

- Die, für Anregungsfrequenzen im VHF Bereich gefundenen tiefen Elektrodenspannungen resultieren in einem niederenergetischen Ionenbeschuss des Filmes. Diese Tatsache könnte die Erklärung sein, für die hervorragende Filmqualität, die mit dieser Methode erreicht werden kann.
- Die Puderbildung in Silan Plasmen in Funktion der Substrat-Temperatur, der Eingangsleistung und der Leistungsmodulation wurde mit einer neuen Diagnostikmethode untersucht. Wesentlich höhere Leistungen können in Plasmen mit Anregungsfrequenzen im VHF Bereich, verglichen zur Standardfrequenz von 13MHz eingekoppelt werden, bis sich hinderlicher Puder bildet.
- Die Messung der Abel-invertierten Emissions-Profile zeigt, dass Plasmen mit höheren Anregungsfrequenzen in diesem Bezug wesentlich homogener sind. Diese Tatsache könnte sich positiv auf die Film-Homogenität übertragen.
- Zu Vergleichszwecken wurden zum erstenmal mikrokristalline und amorphe Silizium Schichten bei 13MHz und im VHF Bereich im gleichen Reaktor abgeschieden.
- Die wichtige Frage der effektiven Plasmaleistung wurde in grossem Detail untersucht und bildet eine wichtige Basis für das Verständnis der Abscheidungen in Funktion der Frequenz.

Diese Resultate zeigen zum ersten Mal weitere wichtige Vorteile der VHF Technik, die in der weiteren Zukunft von Bedeutung sein werden und deshalb weiter untersucht werden sollten.

B) Beschreibung des Experimentes PADEX am CRPP

B.1 Der Reaktor

Mit dem Aufbau des Experimentes PADEX (Plasma Assisted Deposition Experiment) wurde Anfangs Juni 1989 begonnen. In einer ersten Phase wurde am CRPP die notwendige Infrastruktur aufgebaut. Dies umfasste die Konstruktion eines von den restlichen Labors getrennten Raumes und eines Unterstandes ausserhalb des Gebäudes zur Unterbringung der gefährlichen Gase. Wegen des geplanten Einsatzes von Silan, waren diese baulichen Massnahmen erforderlich, um die Sicherheit des Personals zu garantieren. In der Folge wurde die gegenwärtige Anlage vom Sicherheitsbeauftragten der EPFL und dem Arbeitsamt für den Betrieb mit toxischen Gasen zugelassen.

Um die erhaltenen Resultat direkt mit denjenigen am IMT zu vergleichen wurde ein, in den meisten Aspekten identischer Reaktor aufgebaut. Die ausgezeichnete Zusammenarbeit mit dem IMT erlaubte eine rasche Verwirklichung des PADEX Experimentes. Der Reaktor und seine zugehörige Infrastruktur wurden in den diversen Abteilungen des CRPP hergestellt.

An dieser Stelle sollen kleinere Abweichungen unseres Experimentes von demjenigen in Neuchâtel aufgezeigt werden. Das Vakuumgefäss ist in den äusseren Dimensionen etwas grösser und erlaubt für Diagnostikzwecke besseren Zugriff zum Plasma. Als Pumpsystem wird eine in der Drehzahl regulierbare Turbopumpe, sowohl für die Erzeugung des Hochvakuums als auch für den Arbeitsdruck während der Abscheidung verwendet. Dieser an und für sich ideale Pumpstand gab verschiedentlich Anlass zu längeren Unterbrüchen im Experimentalbetrieb. Die Probleme dieses Systems liegen zur Zeit in der Antriebselektronik der Turbopumpe. Eine weitere Modifikation betrifft die Elektrodenheizung, in PADEX sind die beide Elektroden unabhängig von einander bis auf 250°C ausheizbar.

Die minimale Betriebsfrequenz des Reaktors wurde von 30MHz auf rund 10MHz heruntersgesetzt. Diese Änderung erlaubt nun, zum ersten Mal einen direkten Vergleich der Resultate im VHF Frequenzbereich von 30-100MHz, mit denjenigen im Bereich von 13MHz im selben Reaktor. Dieser direkte Vergleich ist von wichtiger Bedeutung für die laufenden Untersuchungen am IMT und am CRPP, wird doch in den allermeisten Fällen in der Industrie und in anderen Forschungsgruppen, bei der festen Standard-Frequenz von 13.56MHz gearbeitet.

B.2 Diagnostik-Methoden

Verschiedenste Diagnostik-Methoden wurden während der Projektdauer aufgebaut und getestet.

Elektrische Sonden wie Langmuir Sonden, Elektronen- und Ionen-Energie-Analysatoren wurden zur Messung verschiedenster Plasmaparameter wie Elektronendichte, Elektronentemperatur, Elektronenenergieverteilung konstruiert und teilweise getestet.

Die optische Emissions-Spektroskopie wurde nach Erhalt des optischen Multikanal-Analysators (OMA) in kürzester Zeit aufgebaut. Die Emissionsspektroskopie stellt jetzt eine Routine-Diagnostikmethode aller laufenden Untersuchungen dar.

Nach der Konstruktion der notwendigen Optik für die Laserstrahlführung und die, eine räumliche Auflösung erlaubende Kollektroptik, wurden erste Messungen am CRPP mit der Laser induzierten Fluoreszenz an Silan Plasmen durchgeführt.

Ein einfaches Massenspektrometer wurde an den Reaktor angebaut und lieferte erste Resultate der Neutralgaszusammensetzung im Reaktor.

Grösste Anstrengungen wurden zusammen mit dem IMT unternommen, um elektrische Grössen des Reaktors wie Elektrodenspannung, Selbstpolarisation der Elektroden und die effektive Hochfrequenzleistung im Plasma zu messen. Zu diesem Zwecke wurden eine Spannungssonde und eine Stromsonde möglichst nahe an die Hochfrequenz-Elektrode eingebaut.

Weitere entwickelte Diagnostik-Methoden wie Reflektrometrie zur in-situ Messung der Abscheideraten, ein Mikrowellen-Interferometer und die Anwendungen von Video-Kameras für das Studium der Puderbildung und die Emissionsspektroskopie werden später im Rahmen dieses Berichtes genauer erläutert.

C) Grundlagen der Abscheidung von amorphem Silizium mit Hilfe der VHF Methode

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Schichten abgeschieden, die am IMT auf ihre Qualität untersucht wurden. Es wurden sowohl amorphe sowie mikrokristalline Silizium-Schichten hergestellt. Erstmals konnten auch Schichten direkt miteinander verglichen werden, die im selben Reaktor bei 13MHz und bei Frequenzen im VHF Bereich hergestellt wurden. Die Abscheiderate unter VHF Bedingungen lagen im Bereich von 6-12 Å/s während bei gleicher Leistung für 13MHz 2-4 Å/s gemessen wurde. Alle diese Filme wurden am IMT auf ihre Filmqualität hin untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die VHF Abscheidungen mit der Qualität derjenigen in Neuchâtel vergleichbar sind.

C.1 Wasserstoff und Argon Plasmen

Reine Wasserstoff und Argon Plasmen wurden vor allem in der ersten Phase dieses Projektes untersucht. Die Untersuchung dieser Plasmen hatte drei verschiedene Zwecke:

- 1) Test der neu installierten Diagnostik-Methoden
- 2) Messung der Profile typischer Plasmaparameter
- 3) Studium von Elementarprozessen in monoatomaren (Argon), diatomaren (Wasserstoff) und polyatomaren (Silan) Plasmen.

Die Untersuchung von Wasserstoff-Plasmen ist aber auch im Hinblick auf die Herstellung von mikrokristallinem Silizium interessant, wird doch zu dessen Herstellung ein Wasserstoff-Plasma mit einer Zumischung von einigen Prozenten Silan benützt. Argon und Wasserstoff-Plasmen haben im weiteren gegenüber den Silan Plasmen den Vorteil, dass elektrische Sonden wie Langmuir Sonden ohne die Probleme der Sondenbeschichtung benützt werden können. Intensive Untersuchungen der Plasmaparameter in Abhängigkeit von der Frequenz (30-90 MHz), des Neutralgasdruckes (0.05-0.4 Torr), des Gasflusses (10-100 sccm) und des Elektrodenabstandes (5-40 mm) wurden unternommen. Die gemessenen Elektrondichte- und Elektronentemperatur-Profile erwiesen sich als sehr homogen im gesamten Parameterbereich und das Plasma ist vollständig im Elektrodenzwischenraum eingeschlossen. Die Elektronendichte steigt mit zunehmender Hochfrequenzleistung an und ein Dichtemaximum im Bereich von 60-70 MHz wurde gefunden. Eine Elektronentemperatur von 5-10 eV wurde typischerweise für ein Wasserstoff-Plasma gemessen.

Diese Untersuchungen machten erstmals auf die Tatsache aufmerksam, dass die an den Elektroden anliegende Hochfrequenz-Spannungen im VHF Bereich in der Grössenordnung von 20-30V liegen. Die Elektroden Spannungen für tiefere industrielle Frequenzen aber liegen um einen Faktor drei bis zehnmal höher bei gleicher Hochfrequenz-Leistung.

Eine weitere Möglichkeit die Elektronendichte und damit auch die Abscheiderate zu erhöhen, ist die Modulation der Hochfrequenzleistung. Erste, vorläufige Modulations-Experimente in Argon Plasmen zeigten bei einer Frequenz von 42 MHz und einer Modulationsfrequenz von 3 kHz, eine Erhöhung der mittleren Elektronendichte von 75%. Weitere Untersuchungen in Silan Plasmen zeigten zudem, dass die für die Filmherstellung oft extrem hinderliche Puderbildung bei diesen Modulationsfrequenzen wesentlich verringert wird.

Die Erfahrungen der letzten beiden Jahre haben gezeigt, dass gezielte Untersuchungen auch in nicht Silan Plasmen wesentlich zum Verständnis der Plasmaphysik in reaktiven Plasmen beitragen können. Ein weiterer wichtiger Punkt liegt in der Tatsache, dass verschiedenste Beimischungen dem Silan Plasma zugesetzt werden, um damit die Filmqualität positiv zu beeinflussen.

C.2 Elektrische Charakterisierung der VHF Entladung

Von zentraler Bedeutung hat sich während der Projektdauer die Frage nach der effektiven Leistung im Plasma erwiesen. Der gängigerweise angegebene Leistungswert, entspricht oft dem Wert am Senderausgang. Anpassungsglied, Leitungen und andere elektrische Verbindungen zu den Elektroden können aber im allgemeinen nicht als verlustlos angenommen werden. In enger Zusammenarbeit mit dem IMT wurde beschlossen, die für das Verständnis der höheren Abscheiderate im VHF Bereich sehr wichtige Frage der effektiven Hochfrequenzleistung im Plasma zu untersuchen und in Funktion der Frequenz zu messen.

In der gängigen Literatur wird auch heute noch vielfach die Ausgangsleistung des Generators angegeben. Die neusten Tendenzen zeigen jedoch, dass in neueren Arbeiten die effektive Plasma-Leistung angegeben werden muss, um überhaupt die verschiedensten Resultate und Experimente untereinander vergleichen zu können. Deshalb auch die grossen aktuellen Anstrengungen im internationalen Umfeld die effektive Plasma-Leistungen korrekt zu messen.

Zur Messung der effektiven Plasma gibt es verschiedene Techniken. Die einleuchtenste ist sicher die Messung der Elektroden Spannung und des Stromes und dessen Phasenlage. Zu diesem Zwecke müssen geeichte Spannungs- und Strom-Proben zu Verfügung stehen.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der präzisen Messung der Phase zwischen Spannung und Strom. Diese Messung ist schwierig durchzuführen bei diesen hohen Frequenzen, selbst mit zu Hilfenahme der Fourier- Transformations-Technik. Einige Messungen mit den vorliegenden Sonden wurden nach dieser Technik durchgeführt mit dem Ziel die nachfolgend besprochene einfachere Methode zu überprüfen. Diese, sowie die Methode der Kompensation des Reaktorstromes ohne Plasma ist im VHF Bereich nur mit grösstem Aufwand zu betreiben.

Der von uns begangene Weg zur Messung der effektiven Plasmaleistung, besteht in der Messung der Elektrodenspannung ohne Plasma und anschliessend mit Plasma. Aus diesen beiden Messungen kann die effektive Leistung im Plasma bestimmt werden. (Abbildung C.1) Zur Messung der Elektrodenspannungen wurde eine, direkt an der Elektrode befestigte Spannungssonde, verwendet.

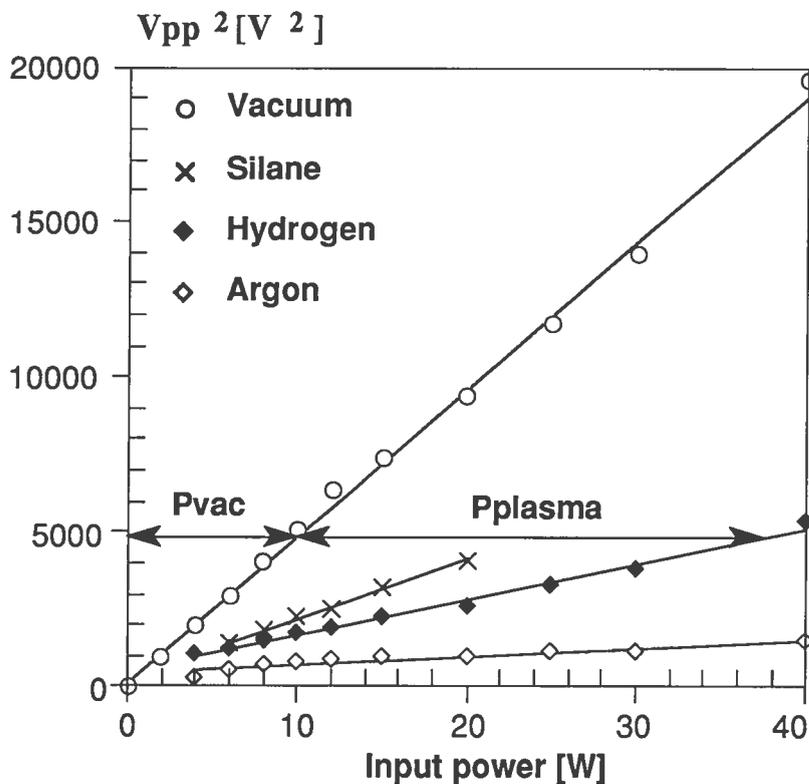


Abbildung C.1 Quadrat der Elektrodenspannung in Funktion der Einspeiseleistung (70MHz)

Grosse Anstrengungen wurden darauf verwendet zu prüfen ob die geforderten Bedingungen zur Anwendung dieser Methode auch wirklich gegeben sind.

Mit Hilfe der so bestimmten Plasma-Leistung kann nun ein Wirkungsgrad berechnet werden. Die erhaltenen Wirkungsgrade der obigen Messungen sind in der Abbildung C.2 gezeigt.

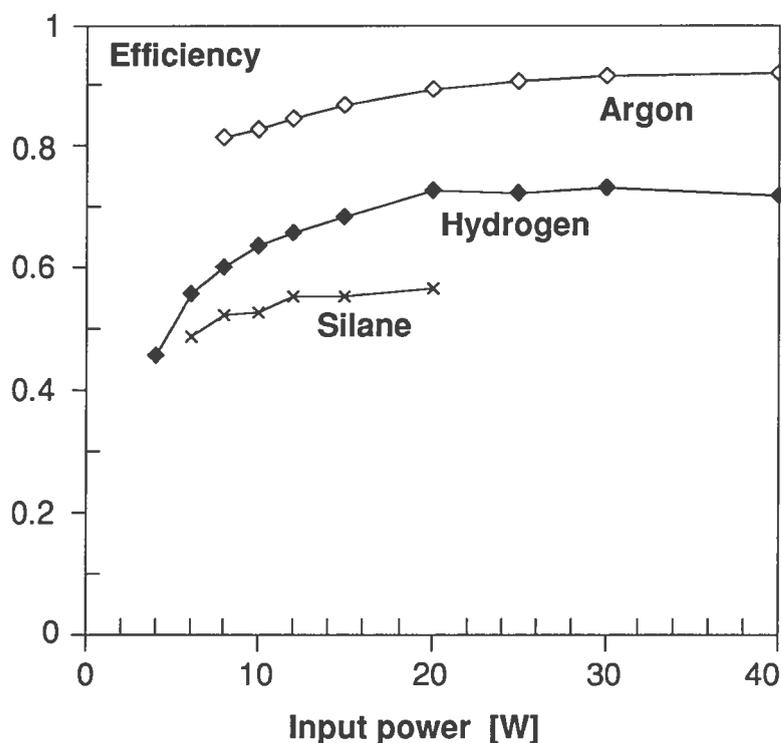


Abbildung C.2 Wirkungsgrad in Funktion der Einspeiseleistung (70MHz, 0.2 torr)

Diese Resultate zeigen deutlich die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Natur des verwendeten Gases, im speziellen von dessen Wirkungsquerschnitten im Energiebereich der in der Entladung vorhandenen Elektronen. Ein weiterer Punkt ist, dass der Wirkungsgrad bei kleinen Leistung sich stark verkleinert. Die Abbildung C.2 zeigt, dass der Wirkungsgrad für kleine Leistung schnell abfällt, da die Verluste des Reaktors allein einen Grossteil, der zur Verfügung stehenden Leistung beanspruchen. Dieser Effekt kann zu schlecht reproduzierbaren Schichten führen, da kleine Änderungen in der Leistung grosse Änderungen der effektiven Plasmaleistung nach sich ziehen.

Im Rahmen des Projektes von besonderem Interesse ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Anregefrequenz. Diese ist in der Abbildung C.3 dargestellt. Der Wirkungsgrad bei tiefen und höheren Frequenzen liegt rund 20% tiefer als bei einer optimalen Frequenz von 50-60MHz.

Ebenfalls eingezeichnet in Abbildung C.3 ist die Elektrodenspannung in Funktion von der Frequenz. Die Spannung an der RF Elektrode fällt steil mit der Frequenz ab. Dies bedeutet,

dass im gesamten VHF Bereich wesentlich tiefere Elektrodenspannungen anliegen als bei der Standard-Frequenz von 13.56MHz.

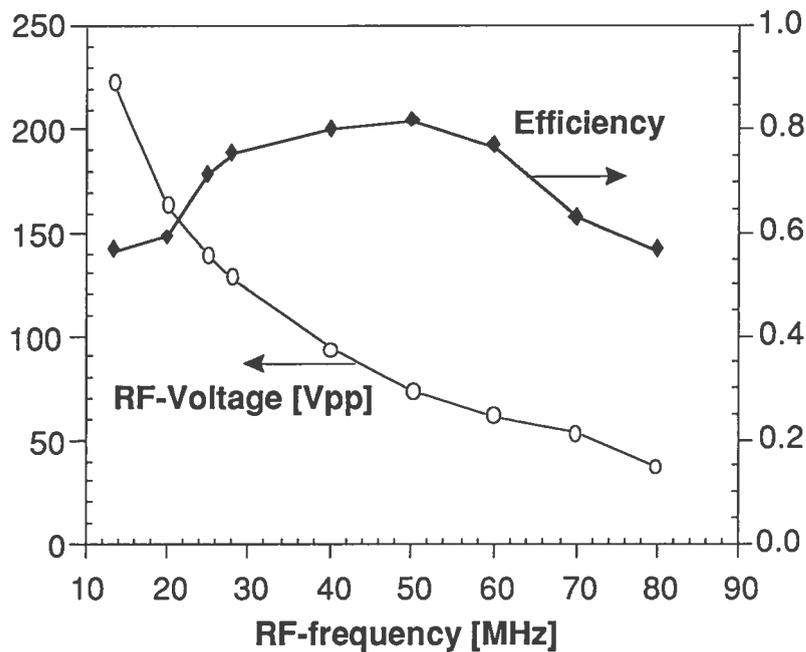


Abbildung C.3 Wirkungsgrad und RF Elektrodenspannung in Funktion der Frequenz in einem Silan Plasma (15W, 0.3 torr)

Damit ist auch die Energie der einfallenden Ionen auf das Substrat geringer. Aus verschiedensten Gründen, die im wesentlichen von der Abscheidetkinetik des Film abhängen, kann eine tiefere Ionenenergie zu einer Filmverbesserung führen. Die tiefe Elektrodenspannung der VHF Technik darf deshalb als ein bedeutender Vorteil gegenüber der Standard Frequenz bezeichnet werden.

Wie unsere Messungen der Selbstpolarisation der Elektroden zeigen, kann deren Messung viel zum Verständnis des Entladungseinschluss, der Entladungs-Symmetrie und der Puderbildung geben.

C.3 Modellisierung der VHF Entladung

Eine Modellisation der elektrischen Eigenschaften des Reaktors drängte sich auf, um die beschriebenen Abhängigkeiten der Elektroden-Scheitelspannung und der effektiven Plasma-Leistung respektive des Wirkungsgrades von der Frequenz zu verstehen. Die

elektrischen Eigenschaften des Reaktors können mittels einem equivalenten Schaltschema wie in Abbildung C.4 aufgeführt beschrieben werden.

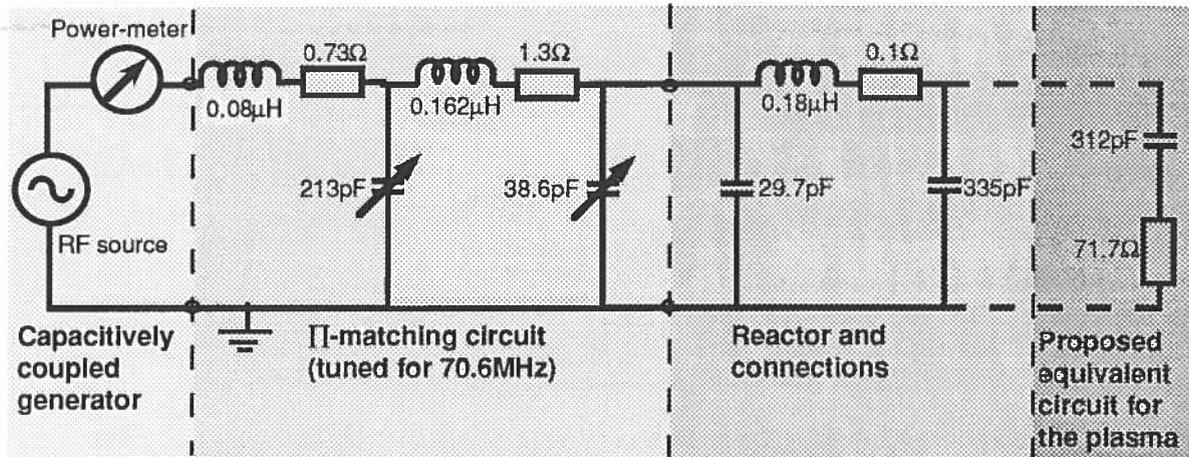


Abbildung C.4 Schaltschema zur Modellisation der VHF Entladung

Neben den bekannten Komponenten des Anpassungsgliedes bestand die Schwierigkeit die restlichen Reaktorkomponenten zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurden Impedanzmessungen an verschiedenen Teilen der Anlage durchführt. Mit Hilfe der Lage der auftretenden Resonanzen und der Phasenverschiebungen konnten so die einzelnen Komponenten bestimmt werden. Abbildung C.5 zeigt als Beispiel den gemessenen Widerstands und die Phase des Reaktors mit seiner Zuleitung ohne Plasma in Funktion der Frequenz. Ebenfalls eingezeichnet ist der beste Fit an die experimentellen Werte, wie er mit den in Abbildung C.4 eingezeichneten Komponenten erhalten wurde. Dieses Resultat zeigt deutlich, dass der Reaktor für tiefe und hohe Frequenzen sich wie eine Kapazität und für Frequenzen im untersuchten VHF Bereich sich wie eine Induktivität verhält.

Ein Vergleich der experimentellen Resultate mit denjenigen des Schaltkreis wie in Abbildung C.4 aufgeführt, ist in der folgenden Abbildung C.6 gezeigt. Die Anpassung des Reaktors konnte im gesamten Frequenzbereich modellisiert werden unter der Benützung der experimentelle bestimmten Kapazitätswerten des Anpassungsgliedes. Zwischen den experimentellen und berechneten Werten wurde eine gute Übereinkunft gefunden. Die verbleibenden Unterschiede zwischen theoretischen und experimentellen Werten dürfte in der Tatsache zu suchen sein, dass die verschiedenen elektrischen Komponenten in Wirklichkeit nicht diskrete Elemente sind.

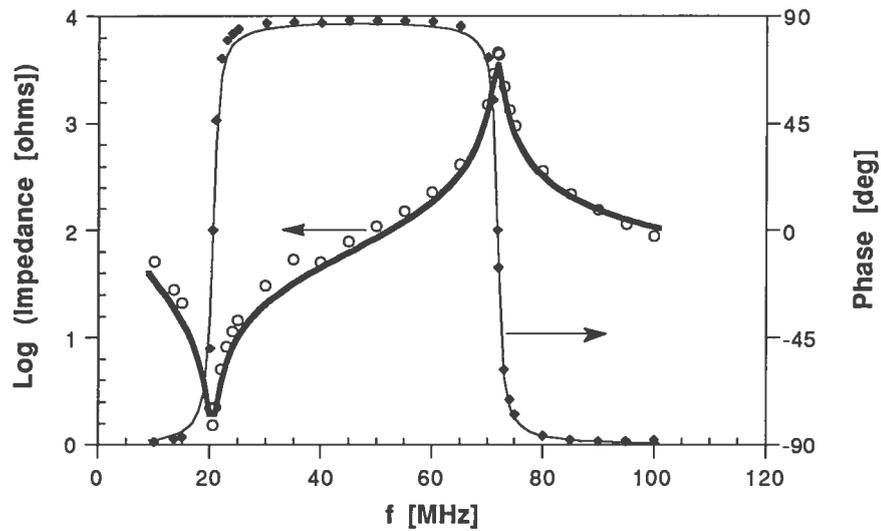


Abbildung C.5 Gemessene Impedanz und Phase des Reaktors mit seinen Zuleitungen ohne Plasma in Funktion der Frequenz. Eingezeichnet ist auch der beste Fit der experimentellen Kurve mit den in Abbildung C.4 eingezeichneten Komponenten.

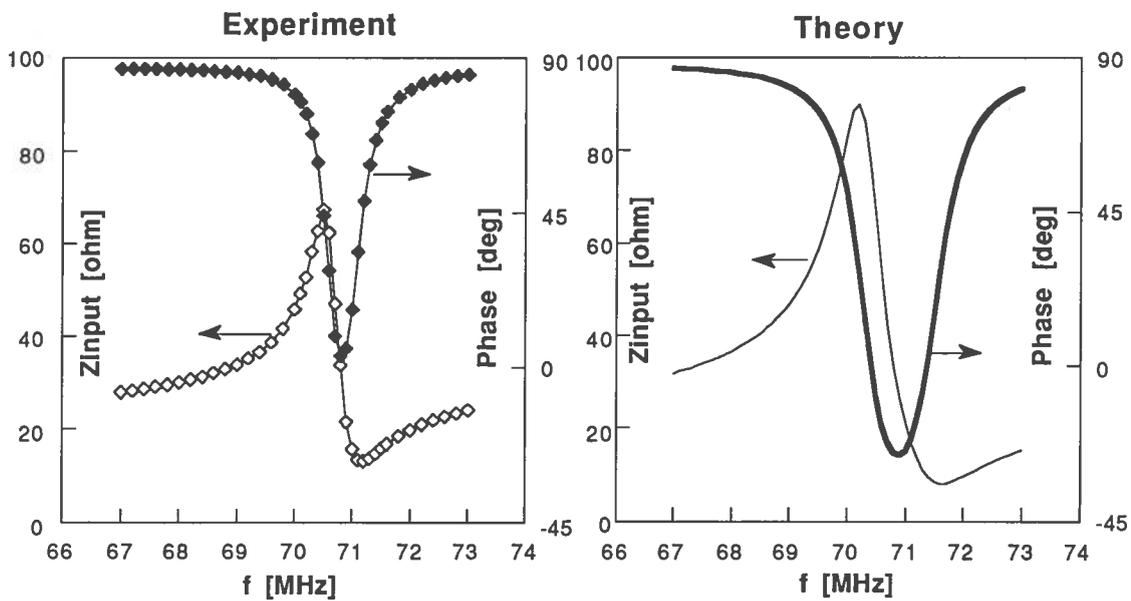


Abbildung C.6 Vergleich zwischen experimentellen Werten und theoretischen Berechnung der Eingangsimpedanz und der Phase am Anpassungsglied.

Die erfolgreiche Modellisation der elektrischen Eigenschaften des Reaktor kann nun als Basis für weitere Optimierungen dienen. Solche beziehen sich unter anderem auch auf bauliche Änderungen des Reaktors um die elektrischen Eigenschaft so zu beeinflussen, dass gewünschte Bedingungen (z.Bsp. höhere Frequenzen) erhalten werden können. Auch in Hinsicht auf spätere industrielle Anwendungen der VHF Methode, könnten diese Modellisierung wesentliche Hinweise zur optimalen Konstruktion von grösseren Reaktoren liefern.

C.4 Weitere Eigenschaften der VHF Entladung

In den meist Untersuchungen wurde als zusätzliche Diagnostik-Methode die Emissionsspektroskopie angewandt. Die Uebersichtsspektren im Bereich von 250-700 nm erlaubten das gleichzeitig Messen verschiedener wichtiger Spektrallinien und Molekül-Banden in der Silan Entladung. Die in diesem Zusammenhang untersuchten Linien und Banden waren: die Si Linie bei 288 nm, die Molekül-Banden von SiH im Bereich von 414 nm, die H_{α} und H_{β} Linien des atomaren Wasserstoffes und die sogenannten Fulcher-Banden des molekularen Wasserstoffes im Bereich von 601-631nm.

Abbildung C.7 zeigt, die Linienintensitäten von SiH und H_{α} . Diese folgen qualitativ dem Verlauf des Wirkungsgrades, respektive der effektiven Plasmaleistung. Diese Resultate zeigen deutlich die wichtige Rolle, die die Emissionsspektroskopie in der Prozessüberwachung von PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition) Plasmen spielt.

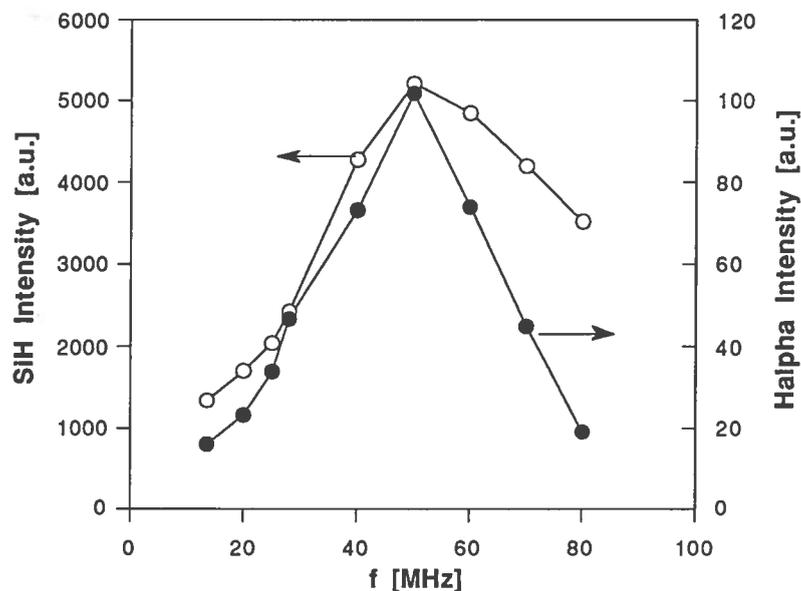


Abbildung C.7 SiH und H_{α} Linienintensitäten in Funktion der Frequenz in Silan ($P_{in}=15W$)

Der Einfluss verschiedenster anderer Reaktor-Parameter wurde ebenfalls untersucht. Als wichtigster Parameter um optimale Abscheidungsbedingungen bei einer gegebenen Frequenz zu erhalten, erwiesen sich der Gasdruck und in besonderer Weise auch der Elektrodenabstand. Weiterreichende Untersuchungen dieser Art bilden die Hauptpunkte der zweiten Projektphase

Nach der Konstruktion der Optiken für die Laser induzierte Fluoreszenz, wurden erste Messungen durchgeführt. Diese Messungen wurden am SiH-Radikal durchgeführt, welches im Bereich von 411 nm, mehrere Emissionsbanden der A^2D-X^2P Uebergänge besitzt. Die stärkste Emissionslinie liegt im 0-0 Band bei einer Wellenlänge von 411.94 nm. Die Pumpwellenlänge im beschriebenen Experiment betrug 413.53 nm und als Dye wurde Stilbene 1 benutzt. Zur Detektion des Fluoreszenz Lichtes wurde ein Photovervielfacher mit einem schmalbandigen Interferenz-Filter verwendet. Diese ersten Messungen zeigten die Verwendbarkeit unseres Laser- und Detektorsystems für die Diagnostik der Silan Plasmen. Weitere Experimente wurden leider durch eine Panne des Argon-Pumplasers und die notwendige Auswechslung der Laserröhre aber auch wegen der neu hinzu gekommenen neuen Problemsstellung der effektiven Leistung im Plasma stark verzögert.

D) Abscheidung von mikrokristallinem Silizium ($\mu\text{c-Si:H}$)

In Zusammenarbeit mit dem IMT wurde auch die Abscheidung von mikrokristallinem Silizium untersucht. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn J. L. Dorier in der Periode Oktober - Dezember 1990 durchgeführt.

Wie für das amorphe Silizium, wurden auch hier, vorabgehende Testbeschichtungen bei 70MHz und erstmals auch bei 13MHz unternommen, die vergleichbare Resultate (70MHz) mit dem IMT ergaben. Hierbei ist zu erwähnen, dass die abgeschiedenen Schichten bei 13MHz in Bezug auf die Homogenität nicht mit denjenigen bei 70MHz zu vergleichen waren, sondern eine Ringstruktur aufwiesen.

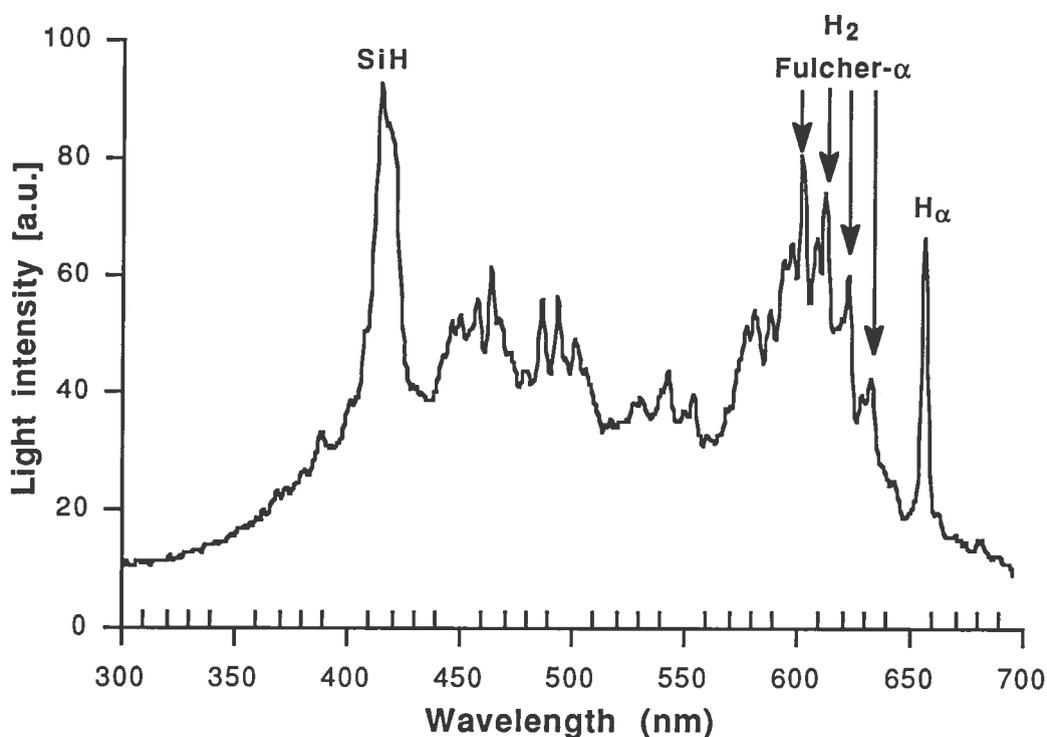


Abbildung D.1 Emissions-Spektrum des Wasserstoff-Silan Plasmas (2% Silan, 70MHz, 0.3 torr und 20W)

Die Abscheidung von mikrokristallinem Silizium unterscheidet sich von der Abscheidung von amorphem Silizium in plasmaphysikalischer und plasmachemischer Hinsicht. Dies ist dadurch bedingt, dass für die Deposition von mikrokristallinem Silizium nicht mehr mit

einem reinen Silan Plasma gearbeitet wird, sondern mit einem Wasserstoff-Silan Plasma. Die Verdünnung von Wasserstoff mit Silan in diesen Plasma ist ein für die Qualität des Filmes mitbestimmender Faktor.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass eine kleine Zumischung von Silan in ein Wasserstoff-Plasma einen grossen Einfluss auf die Plasma-Parameter hat. Dies ist wahrscheinlich dem grosse Wirkungsquerschnitt des Silans für inelastische Stösse bei kleinen Energien zuzuschreiben. Dies führt zu Aenderungen der Elektronenenergie-Verteilung und zu einer Verkürzung der freien Weglänge Anzeichen dieser Effekte konnten mit Hilfe einer spektroskopischen Technik nachgewiesen werden. Diese Technik vergleicht die Emission der Wasserstoff-Linie $H\alpha$ mit einer Linie aus dem Fulcher System des molekularen Wasserstoff. Ein typische Emissions-Spektrum ist in Abbildung D.1 gezeigt. Aus dem Verhältnis der Intensität der beiden Linien und den Anregungsquerschnitten kann die Elektronen-Temperatur bestimmt werden (Abbildung D.2).

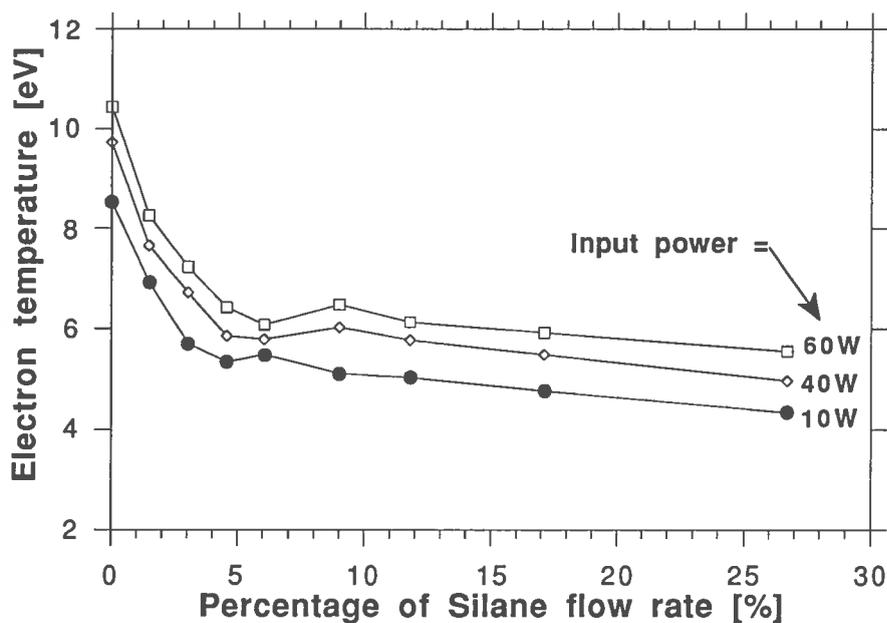


Abbildung D.2 Spektroskopisch gemessene Elektronentemperaturen in Funktion der Silan Beimischung (13.56MHz und 0.3 torr).

Wie für die Plasmen zur Herstellung von amorphem Silizium, wurde ein Hauptgewicht auf die Messung der effektiven Leistung im Plasma gelegt.

Eines der Hauptergebnisse der elektrischen Untersuchungen der Wasserstoff-Silan Plasma ist das unterschiedliche Verhalten der Selbstpolarisation der Elektroden in Funktion der Silan Beimischung. Abbildung D.3 zeigt die Eigenpolarisation der beiden Elektroden für 13 und 70 MHz. Diese lässt deutlich auf eine Asymmetrie der beiden Plasmaschichten für den Fall von 13 MHz schliessen, während für Frequenzen im VHF-Bereich (70MHz) diese im gesamten untersuchten Bereich der Verdünnung konstant und symmetrisch bleiben. Dies dürfte unter anderem ein Grund sein, dass auch mit der VHF Methode ausgezeichnete mikrokristalline Schichten abgeschieden werden können.

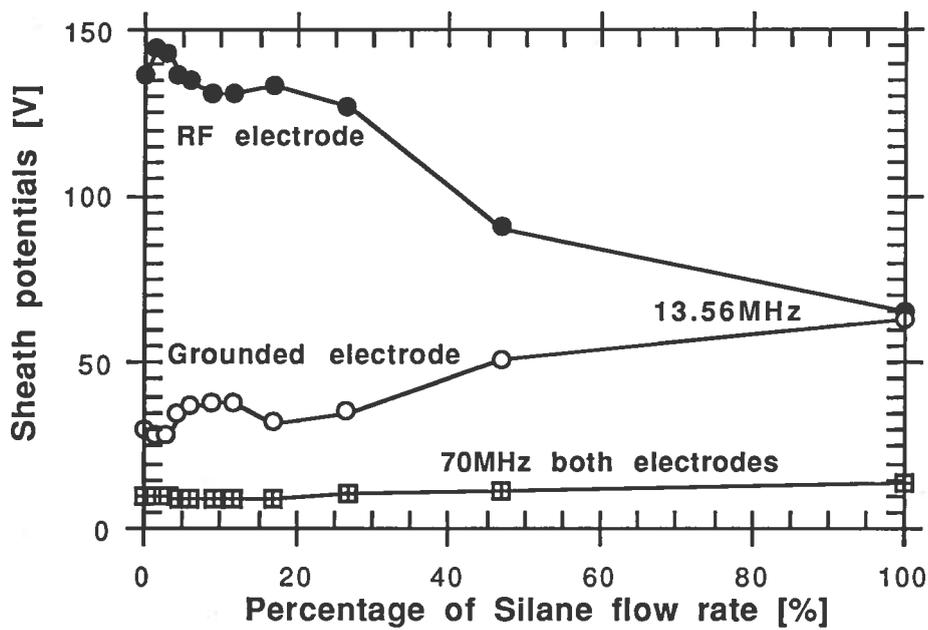


Abbildung D.3 Selbstpolarisation im einem Wasserstoff-Silan Plasma in Funktion des Silan Flusses (15W)

E) Puderbildung in Silan Plasmen

Das Interesse an der Puderbildung in PECVD Plasmen ist in der letzten Zeit sehr stark angestiegen. Die Puderbildung in diesen Plasmen ist einer der Hauptgründe für die hohen Ausschüsse von bis zu 50% in der Fabrikation von Elektronik-Komponenten und von Solarzellen.

E.1 Diagnostik der Puderbildung

Ueber die Kinetik und die Dynamik der Partikel-Bildung und deren Einschluss in Niederdruck-Plasmen ist bis jetzt sehr wenig bekannt. Zur in-situ Charakterisation der Puder wird von einigen Gruppen die Mie oder Rayleigh Laserstreuung angewandt. Diese Methoden erlauben Aufschlüsse über die Verteilung der Partikel und deren Grösse zu erhalten, eignen sich aber wenig um die Puderbildung im gesamten Reaktionsvolumen zu beobachten. Die von uns entwickelte Diagnostik, unterscheidet sich wesentlich von diesen Methoden der Pulverdiagnostik. Die extrem einfache Konstruktion unserer Diagnostik erlaubt das Studium der Pulverbildung im gesamten Reaktionsraum, mit Hilfe einer handelsüblichen Videokamera (Abbildung E.1), dessen Bilder nachträglich digitalisiert und analysiert werden (Abbildung E.2).



Abbildung E.1 Videoaufnahme die die Puderverteilung in einem Silan-Plasma zeigt (5W)

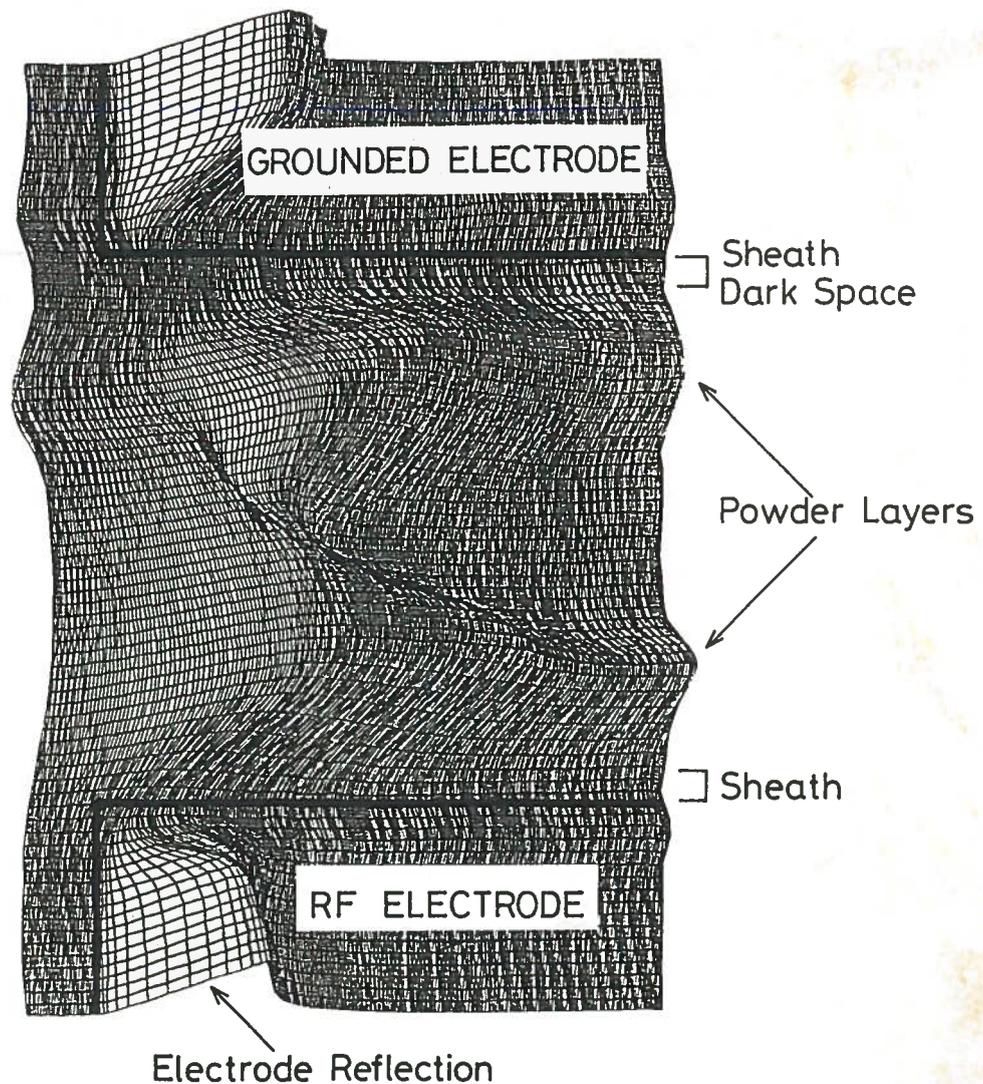


Abbildung E.2 Digitalisierte Videoaufnahme zur Untersuchung der Puderverteilung in der Silan Entladung

Erste Resultate dieser Diagnostik wurden in einem am CRPP erhältlichen Videofilm zusammengestellt.

Die Puderbildung in Silan Plasmen hängt von verschiedenen Entladungs-Parametern wie Elektrode-Material, Elektrodentemperatur, Hochfrequenzleistung und Modulationsfrequenz ab. Starke Puderbildung wird vorallem bei tieferen Elektrodentemperaturen beobachtet und sie verringert sich mit abnehmender Hochfrequenzleistung. Messungen in Funktion der Modulationsfrequenz ergaben eine minimale Puderbildung bei einer Modulationsfrequenz von 1 kHz. Diese vielversprechende Methode soll deshalb anlässlich der zweiten Projektphase intensiv auf Puderbildung aber auch auf Depositionsrate und Filmqualität untersucht werden. Die sich, im Zeitraum bis zu einigen Minuten nach Entladungsbeginn aufbauende Partikeln, schweben in der Nähe, der als dunkles Band

sichtbaren Plasmarandschicht. Die sehr stark negativ geladenen Partikel sind verantwortlich für Änderungen der Plasmaparametern und führen deshalb zu einer Impedanzänderung des Reaktors. Modifikationen an der Reaktorgeometrie, wie das Einfügen des Glas-Substrates und dessen Halterung bewirken sichtbare Änderungen in der Partikelverteilung oberhalb der Gegen-Elektrode.

Typischer Puder, wie er in unserem Reaktor abgeschieden wurde am Laboratoire des poudres an der EPFL untersucht. Die Grösse der einzelnen Puderkörner liegt in der Größenordnung von $0.3\mu\text{m}$ mit einer relativ schmalbandigen Verteilung. Ebenfalls durchgeführte Elektronenmikroskopie bestätigten diese Messungen.

E.2 Puderbildung und Entladungsparameter

Erste Anzeichen von sich bildendem Puder in der Silan-Entladung zeigen sich in einer Änderung der elektrischen Anpassung des Reaktors an den Hochfrequenzgenerator. Deshalb wurde der Einfluss des Puders auf die elektrischen Größen untersucht. Abbildung E.2 zeigt, dass mit Überschreiten der kritischen Leistung zur Puderbildung, sich die gemessene RF-Scheitelspannung ändert. Dies deutet auf ein vermehrtes resistives Verhalten des Plasma/Reaktorwiderstandes hin. Das Auftreten von Puder in der Entladung äussert sich deshalb auch in einer Erhöhung des Wirkungsgrades. Die erhaltenen Werte in Anwesenheit von Puder sind mit Werten der reinen Argon Entladung vergleichbar und die Eigenpolarisation der Elektrode steigt zudem mit Eintreten der Puderbildung leicht an.

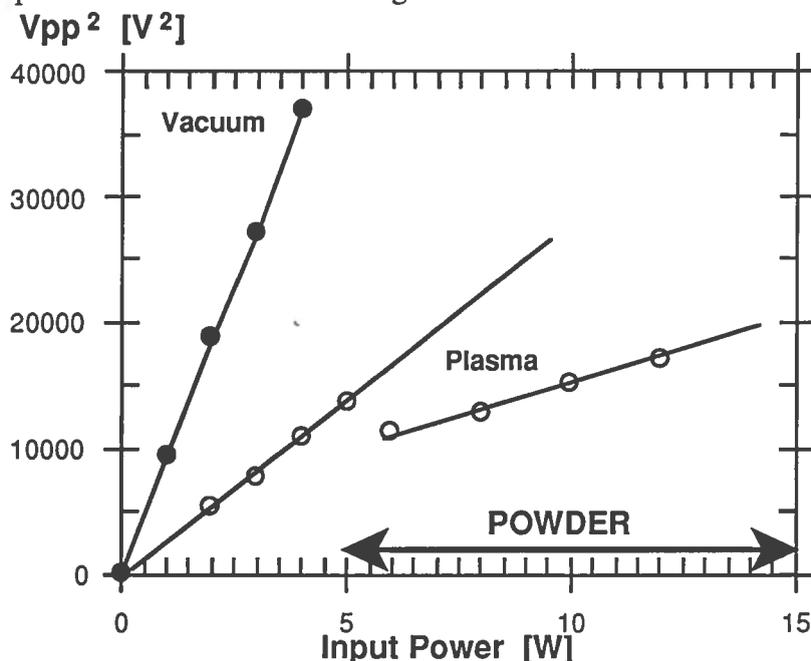


Abbildung E.3 RF Scheitelspannung in Funktion der Hochfrequenzleistung

Bei der Herstellung von Solarzellen und elektronischer Komponenten ist es von grösster Bedeutung mit Depositionsplasmen zu arbeiten die partikelfrei sind. Es wurden deshalb verschiedene Entladungs-Parameter geändert um den für die Praxis wichtigen Uebergang von puderfreier zu puderhaltiger Entladung zu bestimmen.

Das erhaltene Operations-Diagramm im Frequenz-Leistungs Raum ist in der Abbildung E.3 dargestellt. Dieses Resultat zeigt deutlich einen weiteren neuen Vorteil der VHF Abscheidetechnik. Der Vorteil besteht darin, dass bei hohen Frequenzen höhere Leistung ins Plasma eingekoppelt werden kann, als z.Bsp. bei der Standard-Frequenz von 13.56 MHz, ohne dass nachteiliger Puder gebildet wird. Dieser Vorteil ist um so interessanter als dass bei höheren Leistungen und damit auch bei höheren Abscheideraten gearbeitet werden kann, ohne nachteilige Folgen der Puderbildung im Plasma. Ein weiterer dominierender Parameter in der Herstellung von amorphem und mikrokristallinem Silizium ist die Substrat-Temperatur. Die Puderbildung in Abhängigkeit von der Substrat-Temperatur wurde im Detail ausgemessen. Zu diesem Zweck wurde nur die geerdete Elektrode aufgeheizt, während die RF Elektrode wassergekühlt wurde. Die erhaltenen Resultate sind in der Abbildung E.4 dargestellt. Aus diesem Diagramm ist wiederum die höhere Leistungslimite der Puderbildung bei höheren Frequenzen zu beobachten.

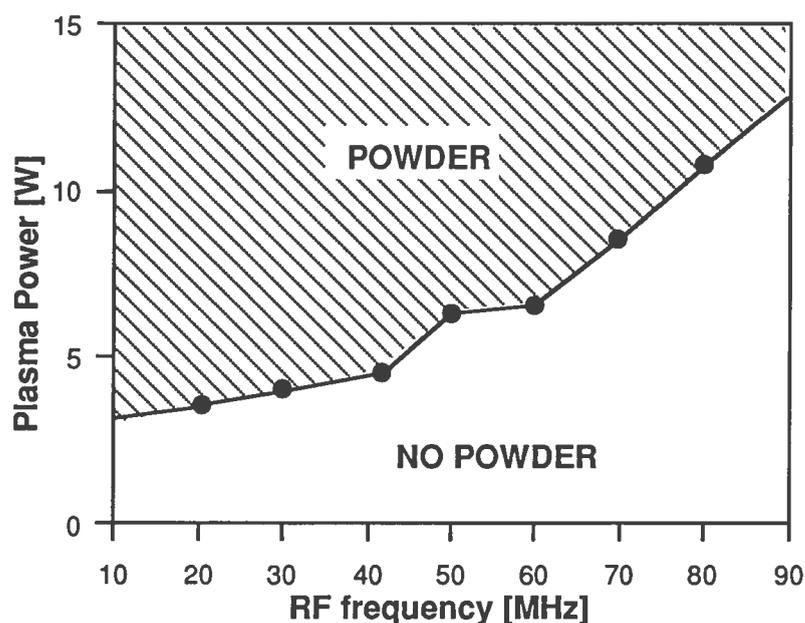


Abbildung E.4 Operationsdiagramm in Funktion der Hochfrequenzleistung

Dies dürfte eine Erklärung sein, für die am IMT gemachte Erfahrung, dass ausgezeichnete Filmqualität mit der VHF Methode auch bei tieferen Substrat-Temperaturen erreicht

werden. In Laufe dieser Experimente wurde zudem beobachtet, dass der Puder vornehmlich an der unteren gekühlten Elektrode auftritt. Untersuchungen mit Beheizung der beiden Elektroden werden gegenwärtig durchgeführt.

Weitertragende Untersuchungen betreffend die Puderbildung und Puderdynamik in Niederdruck-Plasmen sollen in der zweiten Projektphase und vorallem im Rahmen des BRITE-EURAM Projektes am CRPP geführt werden.

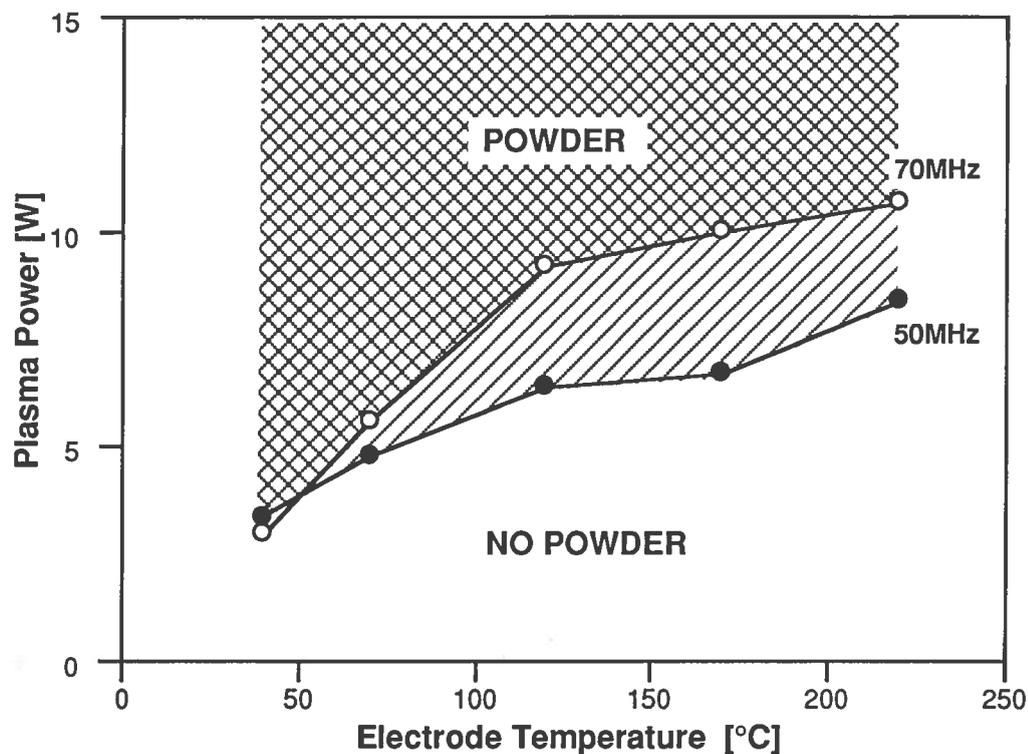


Abbildung E.5 Operationsdiagramm in Funktion der Elektroden-Temperatur

F) Aufbau von neuen Diagnostik Methoden

F.1 Lecher Leitungs Mikrowellen Interferometer

Die Elektronendichte-Messung in reaktiven Plasmen ist von grosser Bedeutung, hängen doch Beschichtungsparameter wie die Depositionsrate davon ab. Die vielverbreiteste Elektronendichte-Messung, ist diejenige, mit Langmuir Sonden, die aber in Hochfrequenz-Plasmen nicht problemlos ist.

Die Anwendung der Interferometrie in der experimentellen Plasmaphysik ist durch die Abhängigkeit des Brechungsindex des Plasmas von der Elektronendichte gegeben. Die Messung des Brechungsindex erlaubt deshalb die Bestimmung der Elektronendichte.

Die räumliche Auflösung der Mikrowellen-Interferometer, wie sie vornehmlich verwendet werden, ist aber im allgemeinen sehr schlecht. Dies wird oft noch erschwert durch das Auftreten von Streuung der Mikrowellen an den Reaktorwänden und Elektroden. Das von uns entwickelte Mikrowellen-Interferometer besitzt eine gute räumliche Auflösung und auch das Problem von Streuung konnte ganz vermieden werden. Um dies zu erreichen, propagiert der Strahl nicht mehr frei durch das Plasma, sondern durchquert das Plasma mittels einer Lecher Leitung (Abb. F.1). Das an unserem Reaktor konstruierte und getestet Mikrowellen Interferometer zeigt deutlich, dass diese Art von Interferometer viele Vorteile für die Messung der Elektronendichte in PECVD Plasma aufweist.

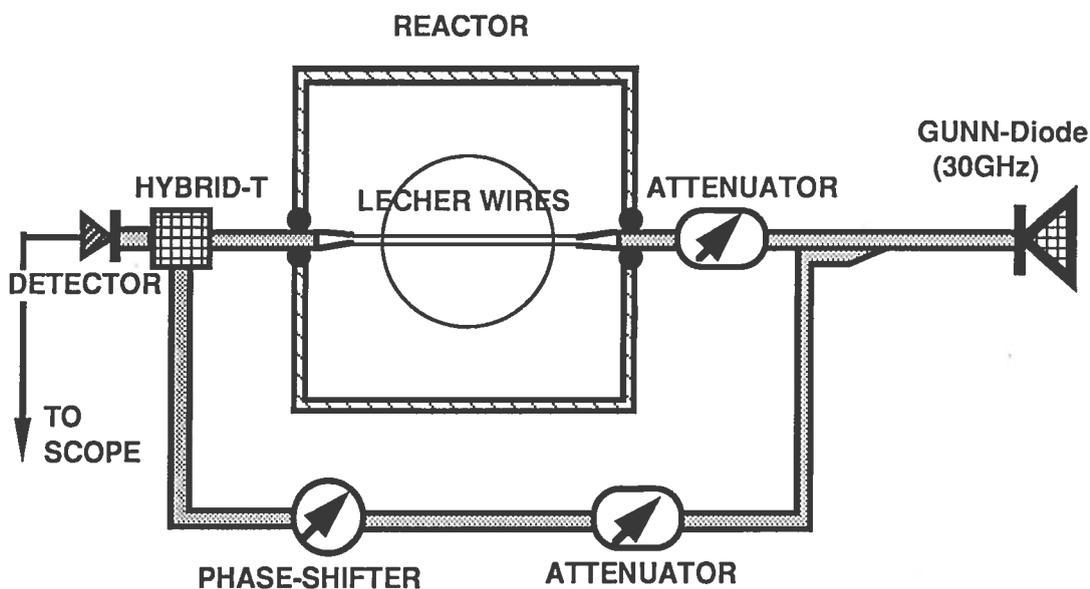


Abbildung F.1 Schematische Darstellung des Lecher-Leitungs-Mikrowellen-Interferometer

F.2 Emissions-Spektroskopie

Die Emissions-Spektroskopie ist eine der wichtigsten Diagnostik Methoden für die Untersuchung von Prozessplasmen in Forschung und Industrie. Am CRPP wurde in diesen beiden Jahre am Aufbau einer wirkungsvollen Emissionsspektroskopie gearbeitet. Gegenwärtig stehen zwei verschiedene Methoden zu Plasmauntersuchungen zur Verfügung.

Die erste Methode besteht, wie vielfach in der Literatur beschreiben, aus einem Monochromator, ausgerüstet mit einem OMA (Optical Multichannel Analyser). Zur Lichteinkoppelung wird eine die Anwendung stark vereinfachende Faseroptik verwendet. Dieser Aufbau wird zum jetzigen Zeitpunkt auch routinemässig am CRPP angewendet. Typische Messungen, die mit Hilfe dieser Anordnung erhalten wurden sind in Abbildung D.1 gezeigt.

Die Vorteile dieser Methode sind hohe spektrale Auflösung, hohe Empfindlichkeit, hohe zeitliche Auflösung, während eine gute räumliche Auflösung nur mit beträchtlichem Aufwand zu erreichen ist.

Die zweite Methode, die in den letzten Monaten am CRPP entwickelt wurde, besteht aus einer kommerziellen CCD Kamera, der um die nötige spektrale Auflösung zu erzielen, ein schmalbandiges Interferenz-Filter vorgeschaltet wird. Dieser Aufbau erlaubt eine sehr gute räumliche Auflösung des gesamten Entladungsraumes mit einfachen Mitteln. Die erhaltenen Bilder werden in einem PC abgespeichert und weiter verarbeitet. Das gemessene Emissions-Profil eines Argon Plasmas ist in F.2. gezeigt. Das Profil dieser Argon-Entladung ist homogen im gesamten Entladungsraum.

Mit Hilfe der sogenannten Abel-Inversion kann nun die radiale lokale Emission im gesamten Plasmaraum berechnet werden. Das so erhalten invertierte Profil der lokalen radialen Emission der erwähnten Argon-Entladung ist in Abbildung F.3 gezeigt.

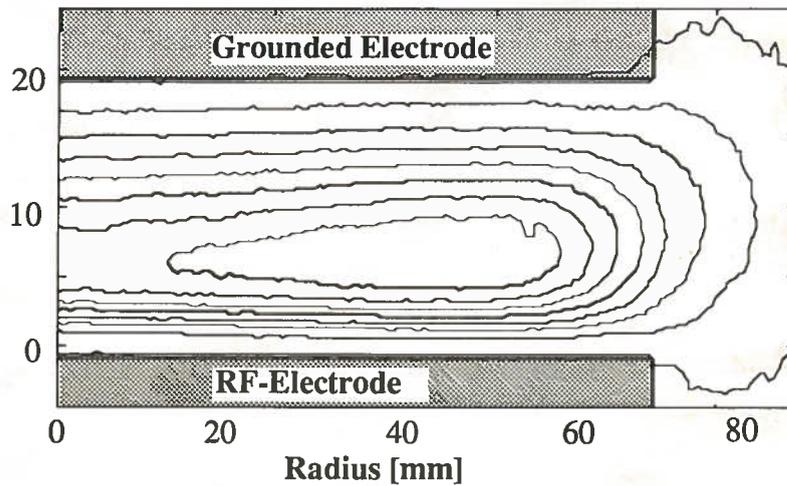


Abbildung F.2 Emissionsprofil eines Argon Plasmas (30W, 0.3 torr, 30MHz)

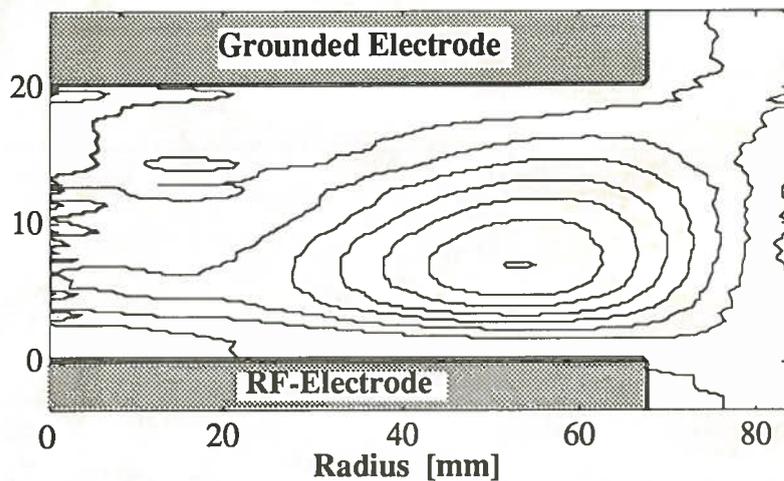


Abbildung F.3 Invertiertes Emissionsprofil eines Argon Plasmas (30W, 0.3 torr, 30MHz)

Diese ersten Resultate zeigen deutlich, dass in der meistens angestrebte homogene Entladung in der Tat die Emission die Form eines Hohlprofiles aufweist. Im weiteren hat es sich gezeigt, dass bei Entladungen mit höherer Frequenz die Hohlprofile sich auffüllen wie in Abbildung F.4 gezeigt wird. Diese Tatsache könnte wiederum ein weiterer Vorteil der VHF Abscheidung darstellen. In wieweit die gefundenen Emissionsprofile mit der Homogenität der erhaltenen Filme zusammenhängt muss noch weiter überprüft werden.

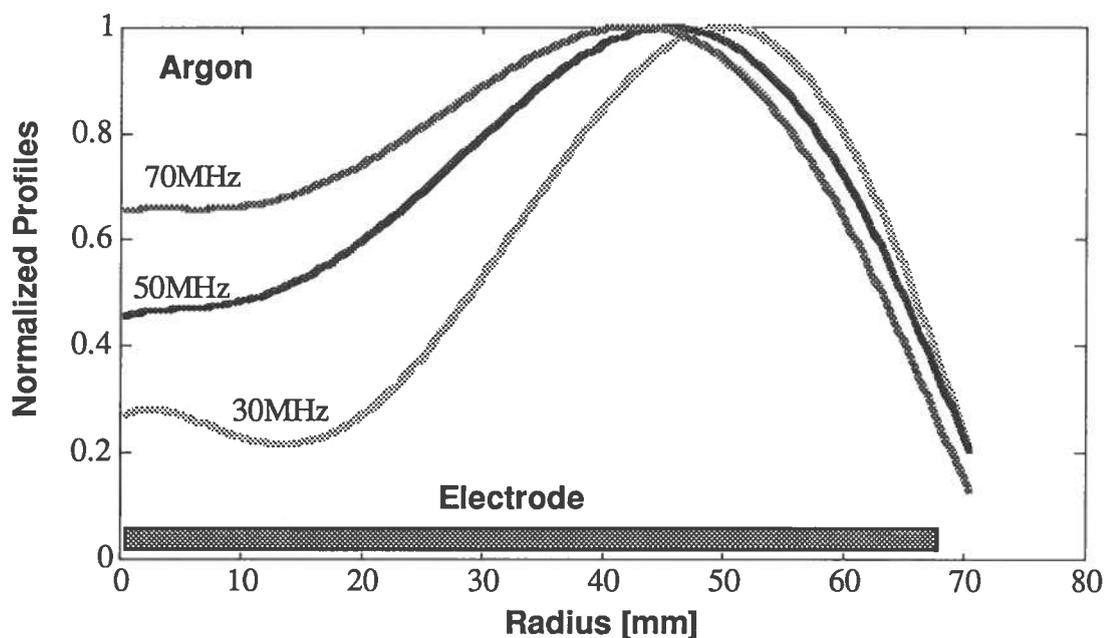


Abbildung F.4 Normalisierte Emissionsprofile für ein Argon Plasma

Erste Vorversuche in Silan Plasma bestätigten diese Resultate, obwohl die Interpretation der Profile in Silan Plasmen durch die Puderbildung stark erschwert wird.

Diese Diagnostik soll im Rahmen des neuen Projektes weiter entwickelt werden, im speziellen soll ein Augenmerk auf ihre Nützlichkeit zur Untersuchungen der Elektronenverteilung im Plasma und auf die Homogenität der abgeschiedenen Schichten gelegt werden.

F.3 In-situ Messung der Abscheiderate

Die in-situ Messung der Abscheiderate oder aber auch der Aetzrate ist eine der wichtigsten Messung für die Prozessüberwachung. Verschiedenste Methoden werden zu diesem Zweck in der Literatur beschrieben. Die Anwendung der Quarzresonator-Probe hat sich in Gleichspannungs-Entladungen bewährt, doch in RF Entladungen treten wesentliche Schwierigkeiten auf. Dies sind vorallem durch den störenden Einfluss der Hochfrequenz gegeben. Eine weitere Methode besteht in der Anwendung eines Interferometers. Zu diesem Zweck werden häufig He-Ne Laser eingesetzt. Die auftretenden Schwierigkeiten sind oft der kleinen Abscheiderate zu zuschreiben.

Am CRPP wurden erste Vorversuch unternommen um die Filmdeposition mit einer neuen Methode in-situ zu messen. Zu diesem Zwecke wird weisse Licht mittels einer Faseroptik auf den wachsenden Film projiziert. Das in der Schicht reflektierte Licht interferiert mit

dem Eingangsstrahl und wird mit einer zweiten Fiberoptik zur Wellenlänge-Analyse in den Monochromator geleitet, wie in Abbildung F.5 zeigt.

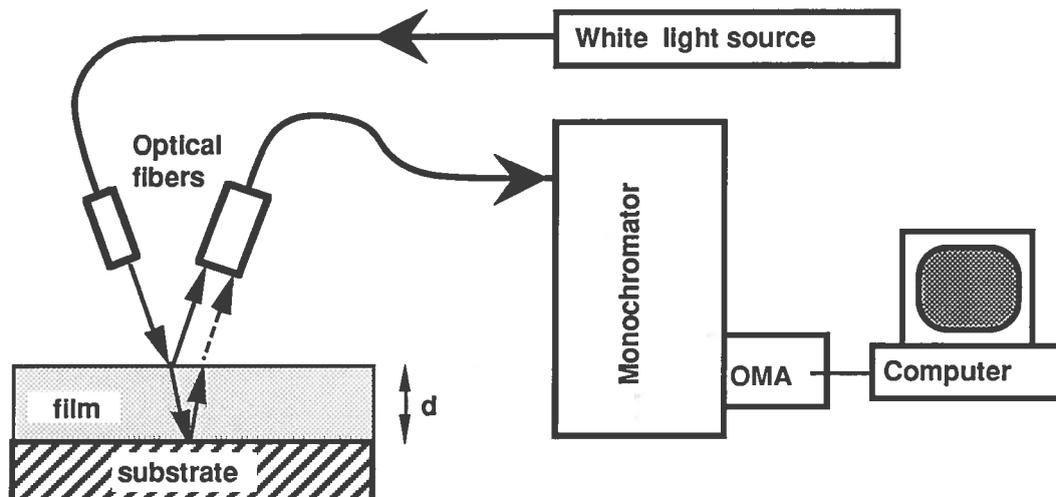


Abbildung F.5 Schematische Darstellung der in-situ Abscheiderate

Das mit dem OMA ausgemessene optische Spektrum weist typische Interferenz-Maximums und -Minimus auf, aus deren Lage auf die Schichtdicke geschlossen werden kann. Damit kann die Schichtdicke, im Gegensatz zur monochromatischen Lasermethode jederzeit präzise bestimmt werden. Diese Art der Depositionsmessung würde in der Forschung zur Optimierung der Abscheiderate von grosser Nützlichkeit sein, aber auch vorallem in der industriellen Herstellung von Schichten. Erste Vorversuch erwiesen sich als sehr ermutigend und ein Einbau in den Reaktor ist in der zweiten Projektphase vorgesehen.

G) Ausblick

Die Abscheidung von amorphem Silizium aus der Plasmaphase für die Herstellung von Solarzellen ist ein multidisziplinäres Forschungsgebiet. Die sehr gute Zusammenarbeit zwischen dem CRPP und dem IMT unter der Leitung von Prof. Shah hat im Verlaufe der letzten zwei Jahre wesentliche Beiträge zum Verständnis der VHF Abscheidungen beigetragen. Als ein sehr wichtiger Punkt soll auch die im Rahmen dieses Projektes geknüpften Kontakte mit internationalen Forschungs-Programmen erwähnt werden. Die beiden beteiligten Institute haben gute Kontakte zur Arbeitsgemeinschaft ARC, eines Zusammenschlusses von französischen Universitäten und Institutionen, die auf dem Gebiet der Abscheidung von Silizium arbeiten. In dieser Arbeitsgemeinschaft sind auch wichtige europäische Industrien eingeschlossen. Das am CRPP in der Periode 1992-1993 laufende Brite Euram Projekt betreffend die Puderbildung in Niedertemperatur-Plasma kann ebenfalls, wie die oben erwähnten internationalen Kontakte, als eine Bereicherung der laufenden Forschungsarbeiten betrachtet werden. Dieser rege Austausch von Erfahrungen und Informationen sind für die Zukunft für Arbeiten in der Schweiz im benannten Gebiet von grösster Bedeutung, die auch in der Zukunft weitergepflegt und unterhalten werden sollten.

Weitertragende Arbeiten sind von Bedeutung, um in der sich raschen entwickelnden Technik der Abscheidungen mit Hilfe von Plasmen weiterhin in führender Position zu bleiben.

Die im Rahmen dieses Projektes begonnen Arbeiten werden in einer zweiten Projektphase in den Jahren 1991-1993 unter dem Titel "Einfluss von plasma-physikalischen und plasma-chemischen Eigenschaften von VHF Silan Plasmen auf die Abscheidung von amorphem und mikrokristallinem Silizium" weitergeführt werden, dies dank der weiteren finanziellen Unterstützung durch das BEW. In dieser zweite Projektphase soll nun nach Abschluss der basisbildenden Arbeiten vornehmlich der Einfluss der Anregungsfrequenz auf das Plasma und deren Einfluss auf die Abscheideparameter und Filmqualität untersucht werden. Diese Arbeiten sollen aber auch neue Methoden wie z.Bsp. die Abscheidung mit Helium oder Xenon verdünnten Silan Plasmen einschliessen, um zu überprüfen ob mit Hilfe dieser Technik die Langzeit-Stabilität der Schichten positiv beeinflusst werden kann. Im weiteren soll die im Bezug auf minimale Puderbildung und hohe Abscheiderate vielversprechende Leistungs-Modulation auf ihre Eignung auch im VHF Bereich genauer untersucht werden. Die Schwerpunkte der bis Ende 1993 laufenden nächsten Projektphase sollen auch weiterhin im Detail mit denjenigen am IMT in Neuchâtel abgestimmt werden.

H) Veröffentlichungen (1989-1991)

Interne Veröffentlichungen:

- 1 A. A. Howling, INT 164/89 "Introductory Overview to Deposition of Amorphous Silicon by Very High Frequency Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition".
- 2 Ch. Hollenstein, A. A. Howling, P.-J. Paris, Nov. 90 INT 171/90 "Rapport annuel 1990 PADEX".
- 3 J.-L. Dorier, Diplomarbeit, Jan. 1991, "Etude Paramétrique de la Production de Silicium Microcristallin par Déposition Assistée par Plasma".
- 4 A. A. Howling, Ch. Hollenstein und P.-J. Paris, LRP 427/91, "Direct Visual Observation of Powder Dynamics in Rf Plasma-Assisted Deposition".
- 5 A. A. Howling, Ch. Hollenstein und P.-J. Paris, Video Film "Direct Visual Observation of Powder in Rf Plasma-Assisted Deposition".

Konferenzen:

- 1 A. A. Howling, Ch. Hollenstein, J.-L. Dorier, P.-J. Paris, M. Favre, "Diagnostics of Very High Frequency Silane Plasmas", 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Lisbon April 91.
- 2 K. Prasad, U. Kroll, F. Finger, A. Shah, J.-L. Dorier, A. A. Howling, J. Baumann, M. Schubert, "Highly Conductive Microcrystalline Silicon Layers for Tunnel Junctions in Stacked Amorphous Silicon Based Solar Cells", Materials Research Society, California, April 91.
- 3 A. A. Howling, Ch. Hollenstein, P.-J. Paris, F. Finger, U. Kroll, "Power Transfer Measurements in VHF Plasmas", XXth Int. Conf. on Phenomena in Ionised Gases, Pisa July 91.

- 4 J.-L. Dorier, A. A. Howling, Ch. Hollenstein, "Powder Dynamics in VHF Silane Plasmas", 38th Annual American Vacuum Society, Seattle USA, Nov 1991.
- 5 Ch. Hollenstein, J.-L. Dorier, A. A. Howling, "Frequency Effects in Silane Plasmas for PECVD", 38th Annual American Vacuum Society, Seattle USA, Nov 1991.

Veröffentlichungen:

- 1 A. A. Howling, Ch. Hollenstein und P.-J. Paris, "Direct Visual Observation of Powder Dynamics in Rf Plasma-Assisted Deposition", angenommen zu Publikation in Applied Physics Letters.
- 2 F. Finger, U. Kroll, V. Viret, A. Shah, W. Beyer, X.-M. Tang, J. Weber, A. A. Howling und Ch. Hollenstein, "Influences of a High Excitation Frequency (70MHz) in the Glow Discharge Technique on the Process Plasma and the Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon", unterbreitet an J. Appl. Phys. März 91.

Seminarien:

- 1 A. A. Howling, "PADEX: Plasma-Assisted Deposition Experiment", 1. Mai 1991 am CRPP Lausanne.
- 2 A. A. Howling, "Diagnostic Programme and Preliminary Results for VHF Plasmas at CRPP Lausanne", 4. Juli 1991 am IMT Neuchâtel.
- 3 A. A. Howling, "Effective Power and Deposition Rate in Silane Plasmas", 16 Nov 1991, am IMT Neuchâtel.
- 4 A. A. Howling, "Plasma-Assisted Deposition of Amorphous Silicon for Solar Cells", 12 Dez 1991, Association Vaudoise de Chercheurs en Physique, Lausanne.
- 5 J.-L. Dorier, "Etude Paramétrique de la Production de Silicium Microcristallin par Déposition Assistée par Plasma", Jan 1991 am IMT Neuchâtel.

- 6 A. A. Howling, "Diagnostics of Powder Formation and Dynamics in VHF Silane Discharges", 15. Febr. 1991, an der Ecole Polytechnique Palaiseau, France.
- 7 A. A. Howling, "Godyak Method for Rf Plasma Power Measurement", J.-L. Dorier, "Powder-Free Operational Space for Silane Plasmas", Ch. Hollenstein, "2-D Emission Profiles in VHF Plasmas", 24 Mai 1991, am IMT Neuchâtel.

Teilnahme an Konferenzen:

- 1 A. A. Howling, NATO Advanced Research Institute on Non-equilibrium Processes in Partially-Ionized Gases, Acquafredda di Maratea, 4.-17. Juni 1989.
- 2 Ch.Hollenstein und A. A.Howling, Lectures on Electron Kinetics in Gas Discharges, by Prof. C. M. Ferreira, Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica, Lisbon, Portugal, am IMT in Neuchâtel.
- 3 Ch.Hollenstein und A. A.Howling, ESCAMPIG 90, 10th European Sectional Conference on the Atomic and Molecular Physics of Ionised Gases, Orleans 28.-31. August 1990.
- 4 Ch.Hollenstein und A. A.Howling, Réunion annuelle de l'ARC (Action Recherches Coordonnées), Ecole Polytechnique-Palaiseau France, 14./15.Feb 1991.
- 5 Ch.Hollenstein und A. A.Howling, 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Lisbon, Portugal 8.-12. April 1991.
- 6 J. L. Dorier, Ch.Hollenstein und A. A. Howling, "Traitement de matériaux par plasma", Vorlesungsserie von Dr. J. Perrin, Chargé de recherche au CNRS, Palaiseau, France in Neuchâtel 3./17./24./31. May 1991.

I) Liste der Mitarbeiter

Dr. Christoph Hollenstein
Centre de Recherches en Physique des Plasmas
21, Av. des Bains
CH - 1007 Lausanne
Telephon (021) 693.34.71/82

Dr. Alan Howling
Centre de Recherches en Physique des Plasmas
21, Av. des Bains
CH - 1007 Lausanne
Telephon (021) 693.34.96

Jean-Luc Dorier
Centre de Recherches en Physique des Plasmas
21, Av. des Bains
CH - 1007 Lausanne
Telephon (021) 693.34.61

Pierre Paris
Centre de Recherches en Physique des Plasmas
21, Av. des Bains
CH - 1007 Lausanne
Telephon (021) 693.34.96/82

Bis August 1990:
Dr. Timothy Good
Dept. Physics
Gettysburg College
Gettysburg PA 17325
USA