

BMBF – Schwerpunktförderung „SmartPlas“ im Rahmen des Fördergebietes „Plasmatechnik“

Schlussbericht für den Zeitraum 2007 bis 2010

Zuwendungsempfänger: IBF Electronic GmbH & Co. KG	Förderkennzeichen: 13N9378
Vorhabensbezeichnung: Verbundprojekt: „Grundlegende Untersuchungen zum Einsatz von Atmosphärendruck-Plasmaquellen zur inline-Beschichtung von Solarzellen“ (PLASMACELL) Teilprojekt: „Grundlegende Untersuchungen zur Pulsbarkeit verschiedener Magnetrons für Atmosphärenplasmaprozesse“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.11.2007 - 31.10.2010	
Berichtszeitraum: 01.11.2007 – 31.10.2010	
Projektleiter: Reinhard Fischer	

1. Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Vorhaben wird im Rahmen des Verbundprojektes mit den Partnern FHG-IWS, Centrotherm, Solarworld und IPLAS durchgeführt. IBF übernimmt dabei die Aufgabe grundlegende Untersuchungen zur Magnetron-Pulsung bei unterschiedlichen Frequenzen und Leistungsklassen für den Einsatz im atmosphären Plasmabereich durchzuführen. Ziel des Vorhabens ist es die notwendigen Parameter für den Einsatz der verschiedenen Hochleistungs-Magnetrons im Plasmabetrieb zu untersuchen.

Um die Vorhabensziele zu erreichen wird die Pulsbarkeit verschiedener Magnetrons für die Arbeitsfrequenzen 915 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz untersucht. Hierbei werden verschiedene Ansteuerungskonzepte für die Magnetrons untersucht. Da die Hersteller der Magnetrons keine Daten über die Pulsbarkeit liefern, können die technologischen Grenzen nur durch Versuche bis zur Zerstörung ermittelt werden. Hierfür ist es notwendig die entsprechenden Spannungs- und Strombereiche zu untersuchen.

Nach erfolgreichem Abschluss des Vorhabens stehen die Grundlagen für die Entwicklung neuer pulsbarer Hochleistungs-Mikrowellengeneratoren zur Verfügung. Diese werden von der Firma IBF gebaut und weltweit vermarktet.

1.2 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Bekanntmachung NanoPlas und BioPlas des Fördergebietes Plasmatechnik des PT VDI-TZ gestellt. Ziel der Arbeiten ist es, funktionale Schichten zur Passivierung sowie definierte Oberflächenstrukturen zu erzeugen. Damit soll eine kontinuierliche und kostengünstige Produktionstechnologie für kristalline Siliziumsolarzellen ermöglicht werden. Die grundlegenden anwendungsorientierten Forschungsarbeiten sind im vorwettbewerblichen Bereich

angesiedelt und besitzen ein hohes wissenschaftlich-technisches Risiko. Die im Verbundprojekt beteiligten Partner decken alle erforderlichen Bereiche der Wertschöpfungskette kompetent ab.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Um die Vorhabens- und Verbundziele zu erreichen ist es notwendig neuartige Mikrowellen-Generatoren für den Einsatz mit atmosphären Plasmaquellen zu untersuchen und aufzubauen. Hierfür sollen Untersuchungen an Magnetrons mit technisch gängigen Arbeitsfrequenzen untersucht werden. Die Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit dem Plasmaanlagenhersteller IPLAS und dem Prozessentwicklern IWS/Centrotherm durchgeführt. Wesentliches Ziel hierbei ist es, die in den Prozess eingetragene mittlere Leistung zu reduzieren um die thermische Belastung der Substrate zu reduzieren. Gleichzeitig soll mit hohen Spitzenleistungen eine effiziente Anregung der Plasmen sichergestellt werden. Zusammen mit den Partnern soll nach dem Meilenstein gemeinsam eine Demonstrationsanlage zur Untersuchung des Betriebs unter praxisrelevanten Bedingungen aufgebaut werden.

Des weiteren sollen mit dem Projektpartner IPLAS alternative Atmosphärenplasmaanlagenkonzepte bei verschiedenen Anregungsfrequenzen untersucht werden. Der Schwerpunkt der Arbeiten von IBF liegen dabei bei der Regelung und Erzeugung der Mikrowellen-Energie.

2. Stand der Wissenschaft und Technik; bisherige Arbeiten

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Weltweit sind 3 Arbeitsfrequenzen bei den industriellen Mikrowellengeneratoren üblich. Im Bereich 915 MHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 5 kW bis 100 kW, im Bereich 2,45 GHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 300 W bis 30 kW und im Bereich 5,8 GHz stehen Magnetrons mit einer CW-Leistung von 300 W bis 1 kW zur Verfügung.

Alle diese Magnetrons lassen sich mit verschiedenen Stromversorgungskonzepten betreiben.

Bei Generatoren mit kleineren Leistungen (bis 3 kW) sind die LC-stabilisierten Netzteile Standard. Diese Technik liefert eine konstante Ausgangsleistung unabhängig von Netz- und Lastschwankungen. Alle Haushaltsmikrowellengeräte arbeiten mit diesem System. Ist für den Prozess eine regelbare Ausgangsleistung notwendig, wurden in der Vergangenheit Thyristor geregelte Stromversorgungen (bis 6 kW) eingesetzt. Diese werden mehr und mehr durch Schaltnetzteile ersetzt. Die für den Betrieb notwendigen Spannungen liegen im Bereich bis 7 kV und die Ströme im Bereich bis 1 Ampere.

Bei Generatoren im Leistungsbereich von 5 kW bis 100 kW sind E-Magnet geregelte Netzteile üblicher Standard. Bei diesen Netzteilen ist die Ausgangsspannung stabil und der Anodenstrom wird indirekt über den E-Magneten geregelt. Dieser verschiebt die Kennlinie des Magnetrons. Auch in diesem Leistungsbereich gibt es erste Versuche die induktiven Stromversorgungen durch Schaltnetzteile zu ersetzen. Das Problem ist hier die notwendige Hochspannung von bis zu 20 kV bei Strömen von bis zu 6 Ampere.

Alle bisher aufgeführten Systeme liefern eine kontinuierliche Ausgangsleistung (CW) mit unterschiedlich hohem Ripple. Für Plasmaanwendungen wird es aber immer interessanter die mittlere Leistung, bei gleichzeitiger Erhöhung der Spitzenleistung, zu reduzieren um die thermische Belastung des Substrats niedrig zu halten. Bei diesen Generatoren muss die Stromversorgung in der Lage sein, die Leistung im kHz-Bereich geregelt zu pulsen. Dies wird bei induktiven Stromversorgungen durch den Einsatz von zusätzlichen linearen Reglern möglich. Bei kleinen Leistungen können hierfür Halbleiter verwendet werden, bei größeren Leistungen ist der Einsatz einer Elektronenröhre notwendig. Mit diesen Konzepten sind Pulsbreiten von CW bis 10µs realisierbar. Leider ist hier der Einsatz von Schaltnetzteilen nur begrenzt möglich, da zur Zeit, durch die Art der Regelung, nur Pulse im Bereich von CW bis 1ms erzeugt werden können.

Dem Antragsteller sind keine anderweitigen Forschungen, Entwicklungen, Untersuchungen oder Patente / -Anmeldungen bekannt die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen.

2.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

IBF Electronic hat das Ziel die Entwicklung und den Einsatz der industriellen Mikrowelle (915 MHz, 2450 MHz und 5800 MHz) voranzutreiben. IBF liefert ein umfassendes Programm von Stromversorgungen, Generatoren, Hohlleiter-Komponenten und Messtechnik für die Bereiche der MW-Erwärmung und der Plasmaanwendung. IBF verfügt über mehr als 10 Jahre Erfahrung in der Entwicklung, im Bau und in der Integration von Mikrowellen-Komponenten, Geräten und Anlagen. Neben dem Standard-Programm von industriellen Mikrowellen-Anlagen und Generatoren von 150 W bis 100 kW ist IBF in der Lage, auf Wunsch zahlreiche Variationen dieser Baugruppen, z.B. als Kompaktgerät oder zum Einbau in Schaltschränke, anzubieten. Natürlich fertigt IBF auch Mikrowellen-Komponenten, wie z.B. Hohlleiterübergänge, Einkopplungen, Flansche, Tuner für Hand- und Motorbetrieb, Zirkulatoren, Isolatoren, Schlitzantennen, MW-Detektoren usw.

IBF fertigt Generatoren mit allen im industriellen Umfeld üblichen Stromversorgungskonzepten. Dies sind LC-Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 3 kW, Thyristor geregelte Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 6 kW, E-Magnet geregelte Netzteile mit Leistungen zwischen 5 kW und 100 kW, Schaltnetzteile zwischen 300 W und 6 kW und pulsbaaren Netzteile mit Leistungen zwischen 300 W und 15 kW Pulsleistung. Durch die enge Zusammenarbeit mit der Glasindustrie im Bereich PICVD hat IBF sehr viel Erfahrung im hohen Pulsleistungen aus kleinen CW-Magnetrons. Um die Ersatzteilkosten bei großen Stückzahlen niedrig zu halten, ist dies sehr interessant. IBF kann serienmäßig einen Generator liefern, der aus einem 1,2 kW Magnetron bis zu 15 kW Pulsleistung liefert. Dieser Generator ist inzwischen mit über 500 Stück im täglichen Einsatz. Dieses Wissen hat es IBF ermöglicht, Generatoren mit weiteren Kombinationen zwischen CW- und Puls-Leistung zu entwickeln. Dabei wurden aber nur Magnetrons mit einer CW-Leistung bis 6 kW verwendet. Größere Magnetrons und höhere Pulsleistungen sollen im Zuge dieses Projektes untersucht werden.

3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse (siehe Anlage)

A) Arbeitspaket 1: Untersuchung von Atmosphärendruck-Plasmaverfahren für die c-Si Photovoltaik

1.1 Planung, Aufbau und Test von ungepulsten industrietauglichen Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Leistung von 10 kW.

1.2 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 20 kW.

1.3 Grundlegende Untersuchungen der 2,45 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

1.4 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 5,8 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 4 kW.

1.5 Grundlegende Untersuchungen der 5,8 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

1.6 Erarbeitung von grundlegenden Konzepten und Parametern für die Pulsung von Großmagnetron mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz.

1.7 Erforschung und Aufbau eines geeigneten Mikrowellen-Generators mit CW und Pulsbetrieb mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz für den Aufbau der Demonstrator-Anlage.

B) Arbeitspaket 2: Aufbau und Erprobung einer Versuchsanlage zur Untersuchung industrierelevanter Parameter beim kontinuierlichen Prozessieren von Si-Solarwafern

2.1 Weiterführende Untersuchungen zur Leistungspulsung an verschiedenen Magnetrons und Arbeitsfrequenzen.

2.2 Weiterführende Untersuchung zum Betrieb des Mikrowellengenerators an der Demonstrator-Anlage und Dokumentation der Ergebnisse.

2.3 Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz bis zu einer Pulsleistung von ca. 75 kW.

2.4 Grundlegende Untersuchung der 915 MHz Puls-Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

4. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der gültigen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Arbeitspaket	Ifd. Nr. aus Arbeitsplan	planmäßig begonnen						
		planabweichend begonnen				planmäßig abgeschlossen		
		planabweichend abgeschlossen						
		Beginn		Ende		Aufwand [MM] im Berichtszeitraum		
Planung, Aufbau und Test von ungepulsten industrietauglichen Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Leistung von 10 kW.	1.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	08/08	4
Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 20kW	1.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	02/09	6
Grundlegende Untersuchungen der 2,45 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	1.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	11/07	02/09	2
Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 5,8 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 4 kW.	1.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/08	12/08	4
Grundlegende Untersuchungen der 5,8 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	1.5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/07	02/09	2
Erarbeitung von grundlegenden Konzepten und Parametern für die Pulsung von Großmagnetron mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz.	1.6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/08	06/09	8
Erforschung und Aufbau eines geeigneten Mikrowellen-Generators mit CW und Pulsbetrieb mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz für den Aufbau der Demonstratoranlage.	1.7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/08	08/09	10

Weiterführende Untersuchungen zur Leistungspulsung an verschiedene Magnetrons und Arbeitsfrequenzen in enger Kooperation mit den Verbundpartnern.	2.1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	02/09	10/10	12
Weiterführende Untersuchungen zum Betrieb des Mikrowellengenerators an der Demonstratoranlage und Dokumentation der Ergebnisse.	2.2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	04/09	10/10	10
Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellen-Generatoren mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 75 kW.	2.3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	01/09	10/10	12
Grundlegende Untersuchungen der 915 MHz Puls- Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.	2.4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	09/09	10/10	6
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
Summe:								= 76

5. Haben sich die Aussichten für die Erreichung der Ziele des Vorhabens innerhalb des angegebenen Berichtszeitraums gegenüber dem ursprünglichen Antrag geändert (Begründung)?

Nein.

6. Sind inzwischen von dritter Seite FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind (auch Darstellung der aktuellen Informationsrecherche nach Nr. 6.1 NKBF 98)?

Nein.

7. Jährliche Fortschreibung des Verwertungsplans.

- **Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen** und erteilte Schutzrechte, die vom ZE oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden sowie deren standort-bezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) und erkennbare weitere Verwertungsmöglichkeiten.

Im Berichtszeitraum gab es keine Aktivitäten hinsichtlich Erfindungen und Patentanmeldungen.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten** nach Projektende (mit Zeithorizont) – z.B. auch funktionale/wirtschaftliche Vorteile gegenüber Konkurrenzlösungen, Nutzen für verschiedene Anwendergruppen/-industrien am Standort Deutschland, Umsetzungs- und Transferstrategien (Angaben, soweit die Art des Vorhabens dies zulässt).

Es werden inzwischen von IBF die Pulsgeneratoren im Frequenzbereich 915 MHz, 2,45 GHz und 5,8 GHz als eigenständiges Produkt für den Einsatz in Plasma- und Erwärmungs-Anlagen weltweit verkauft.

- **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten** nach Projektende (mit

Zeithorizont) – u.a. wie die geplanten Ergebnisse in anderer Weise (z.B. für öffentliche Aufgaben, Datenbanken, Netzwerke, Transferstellen etc.) genutzt werden können. Dabei ist auch eine etwaige Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen, Firmen, Netzwerken, Forschungsstellen u.a. einzubeziehen.

Es besteht Interesse an den Pulsgeneratoren für die verschiedenen Mikrowellen-Frequenzen aus verschiedenen Anwendungsbereichen. Es ist uns inzwischen gelungen, diese als eigenständige Produkte in den Bereichen Plasmaanwendung und Erwärmung zu vermarkten.

- **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit** für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der FE-Ergebnisse.

Es laufen im Moment weitere Forschungen und Entwicklungen für Hochleistungs-Pulsgeneratoren im Frequenzbereich von 915 MHz, dort werden bei einer CW-Leistung von 75 kW Pulsleistungen bis 200 kW angestrebt. Mit einem Abschluss dieser Arbeiten ist im Laufe des Jahres 2011 zu rechnen.

8. Literaturnachweis:

Industrial Microwave Heating	A.C.Metaxas + R.J.Meredith	1993
Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating	Roger Meredith	1998
Microwave Engineering (India)	M.L.Sisodia + V.L.Gupta	2005
Mikrowellen Einführung in Theorie und Anwendung	Günter Nimtz	1990
Valvo Datenbuch Dauerstrichmagnetrons	FirmenschriftValvo	1988
Burle High Power Magnetrons	Firmenschrift Burle	1986

Leider mussten wir während der Entwicklung feststellen, dass es keine aktuellen Bücher über das Thema industrielle Mikrowellen gibt. Dies gilt sowohl für den Bereich Erwärmung, als auch für die Plasmatechnologie. Die meisten Bücher über dieses Thema wurden in den 70er, 80er und 90er Jahren veröffentlicht.

3. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

1.1 Planung, Aufbau und Test von ungepulsten industrietauglichen Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2.45 GHz bis zu einer Leistung von 10 kW.

Die Magnetron Typen für eine Leistung > 6kW sind nur von wenigen Herstellern lieferbar und auch die Qualität streut sehr stark. Wir haben bei den ersten Versuchen verschiedene Typen getestet und die Ergebnisse waren leider teilweise sehr schlecht. Viele Magnetrons erreichen nicht die spezifizierte Leistung bzw. haben nur eine kurze Lebensdauer. Zur Zeit haben wir nur die Möglichkeit zwei Typen zu benutzen, eine chinesische Version bei Leistungen ≤ 10 kW und eine amerikanische Version mit 20 und 30 kW. Ein weiteres Problem ist die extrem lange Lieferzeit dieser Typen, dies verlängert die Dauer der Versuche erheblich. Der Aufwand für diese Generatoren mit Leistungen ≥ 10 kW ist sehr groß, da oberhalb von 6 kW nur Magnetrons in offener Bauform lieferbar sind. Dies hat einen deutlich höheren Aufwand für die Abschirmung der Hochfrequenz auf der Stromversorgungsseite zur Folge, d. h. der komplette Magnetronkopf muß in ein HF-dichtes Gehäuse eingebaut werden. Da diese Magnetrons außerdem keinen eingebauten Ferrit-Magnet (wie alle Typen bis 6kW) haben, ist für den Betrieb ein massiver Elektromagnet notwendig.



Geöffneter 30 kW Magnetronkopf für 2,45 GHz mit Sicht auf Magnetron und Elektromagnet



Magnetronkopf für Leistungen zwischen 10 kW und 30 kW (hoher Schirmungsaufwand)

1.2 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 2,45 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 20 kW.

Zu Beginn wurden für alle derzeit verfügbaren 2,45 GHz Magnetrons die Daten beschafft. Leider ist in diesen Unterlagen nur der CW-Betrieb dokumentiert. Für den Pulsbetrieb sind von den Herstellern der Magnetrons keinerlei Aussagen zu bekommen. Um die Eignung für den Pulsbetrieb beurteilen zu können, sind umfangreiche Tests, teilweise bis zur Zerstörung, mit verschiedenen Magnetrons notwendig. Dabei hat sich gezeigt, dass kleinere Magnetrons erheblich besser pulsbar sind als Typen mit hoher CW-Leistung. Die Leistungsgruppe bis 1,5 kW lässt sich ohne größere Probleme bis zur 10 fachen CW-Leistung pulsen, die Magnetrons im Bereich bis 6 kW haben ihre Grenze bei der 3 bis 4 fachen CW-Leistung und die Großmagnetrons von 10 bis 30 kW sind auf das doppelte der CW-Leistung begrenzt. Einzelne Magnetrons streuen sowohl stark nach oben als auch nach unten. Es wurden zum Beispiel 1,2 kW Magnetrons gefunden, die mit 24 kW Pulsleistung betrieben werden konnten. Dabei ist noch zu berücksichtigen, dass die mittlere Leistung bei jeder eingestellten Pulsleistung den vom Hersteller spezifizierten CW-Wert nicht überschreitet. Außerdem ist die längste Pulsdauer bei hohen Pulsleistungen aus thermischen Gründen auf 10 ms beschränkt. Als kürzeste Pulsdauer konnten mit MosFets in der Pulsendstufe der Stromversorgung 50 μ s, mit Elektronenröhren-Endstufe 10 μ s und mit Schaltnetzteil 1 ms realisiert werden.

Bisher realisiert wurden folgende Kombinationen:

1,5 kW CW mit 15 kW Puls, 3 kW CW mit 10 kW Puls, 6 kW CW mit 10 kW Puls und einige Kombinationen mehr. 15 kW CW mit 50 kW Puls, diese letzte Kombination konnte bisher nur mit

einem Magnetron erreicht werden.



Pulsendstufe mit 5 kW Elektronenröhre



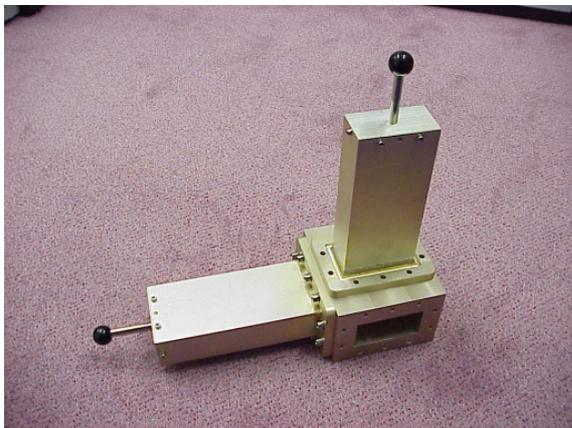
Magnetron 2,45 GHz normale Bauform für den Leistungsbereich 10 kW bis 30 kW

Speziell im Bereich der Magnetrons ≥ 10 kW ist ein stabiler Betrieb nur mit einzelnen Magnetrons zu erreichen. Die gelieferten Magnetrons streuen sehr stark, daher sind die erreichbaren maximalen Pulsleistungen bei gleichen Typen sehr unterschiedlich. Von den Herstellern ist dabei keine Hilfe zu erwarten, da alle Magnetrons nur für CW-Leistung spezifiziert werden.

1.3 Grundlegende Untersuchungen der 2,45 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

Der Einsatz von 2,45 GHz Generatoren mit verschiedenen Plasmaquellen ist möglich. Die Problematik liegt dabei nicht auf der Generatorseite sondern im Bereich der Quellen. Realisiert wurde bisher hauptsächlich der Einsatz bei Plasmen unter Vakuum oder Hochvakuum. Es sind Anlagen für den Bereich Reinigung, Ätzen, Aktivieren und Beschichten industriell im Einsatz. Im Bereich der Atmosphären-Plasmen wurden bisher nur Laboranlagen mit Mikrowellen-Versorgung gebaut. Bekannt sind außerdem einige Anwendungen im Bereich Abgasreinigung.

Ein größeres Problem ist die Impedanz-Anpassung zwischen Plasmaquelle und Generator. Da diese Impedanz abhängig von Druck, Gas und Beladung des Applikators schwankt, ist bei der Abstimmung nur ein Kompromiss erzielbar oder es muss auf ein automatisches Abstimmssystem zurückgegriffen werden. Zur Anpassung stehen sowohl der 3-Stub-Tuner als auch der E/H-Tuner zur Verfügung.



Manueller E/H-Tuner für 2,45 GHz

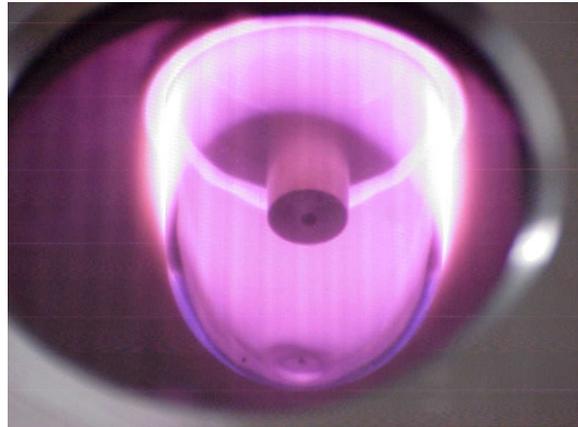


Manueller 3-Stub-Tuner für 2,45 GHz

Die ersten Versuche mit den Pulsgeneratoren wurden an Plasmasystemen im Vakuumbereich durchgeführt. Hier zeigen die Pulssysteme speziell bei Beschichtungsanlagen (PICVD) und Präzisions-Reinigungsanlagen große Vorteile.



Versuchsaufbau einer linearen Plasmaquelle mit 2 synchronisierten 4 kW Pulsgeneratoren



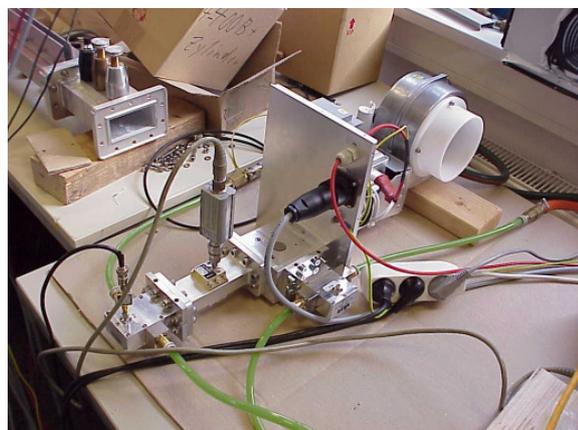
Plasmaquelle zur Präzisionsreinigung von optischen Bauteilen (10 Pulsgeneratoren mit programmierbarer phasenversetzter Ansteuerung)

1.4 Planung, Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 5,8 GHz bis zu einer Puls-Leistung von ca. 4 kW.

Es wurden die derzeit auf dem Markt verfügbaren 5,8 GHz Magnetrons mit 400 W und 800 W beschafft und zuerst im CW-Betrieb untersucht. Im Vergleich, mit den am häufigsten verwendeten Magnetrons mit 2,45 GHz, ist bei dieser Frequenz der Wirkungsgrad noch einmal deutlich niedriger und erreicht maximal 45 bis 50%. Danach wurde das 800 W CW-Magnetron auf seine Eignung für den Pulsbetrieb getestet.



5,8 GHz Pulsgenerator mit externem Magnetronkopf

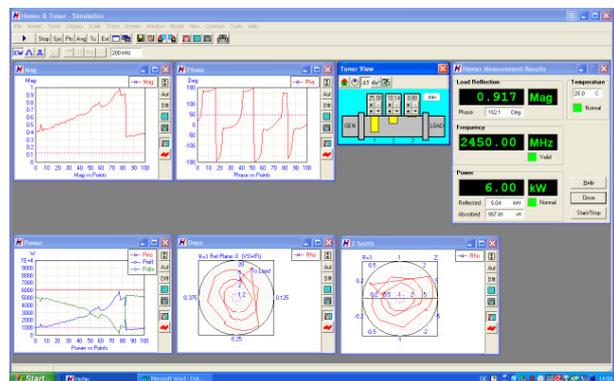


Testaufbau mit R58 Hohlleiterteilen

Die von den vielen Magnetrons erreichbare Obergrenze der Pulsleistung liegt bei ca. 2,4 kW. Dabei darf die mittlere Leistung die 800 W nicht überschreiten, sonst wird das Magnetron thermisch zerstört. Da die Magnetrons in der Serie stark streuen, ist die sinnvoll nutzbare Pulsleistung für ein Serienprodukt deutlich geringer. Die ursprünglich geplante Pulsleistung von 4 kW ist mit den derzeit verfügbaren Magnetrons in der Serie nicht erreichbar. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde ein kompletter Pulsgenerator mit separatem Magnetronkopf (mit 800 W CW- und 1,6 kW Puls- Leistung) bis zur Serienreife aufgebaut. Mit der in der Stromversorgung eingebauten MosFet-Endstufe sind CW-Betrieb und Puls- und Pausenzeiten von 100 µs bis 10 ms bei 1,6 kW Pulsleistung möglich.

1.5 Grundlegende Untersuchungen der 5,8 GHz Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle.

Um den 5,8 GHz Pulsgenerator an einer Plasmaquelle betreiben zu können, mussten noch die dafür notwendigen Komponenten für Energieeinkopplung, die Anpassung und die Messtechnik aufgebaut werden. Auf dem Markt werden derzeit für diese Frequenz noch sehr wenige Teile angeboten. Die erste Installation erfolgte für eine PICVD Plasmaanlage zur Beschichtung von Glasprodukten. Dafür wurde eine vorhandene 2,45 GHz Anlage mit mechanisch austauschbaren Komponenten auf 5,8 GHz umgerüstet. Die ersten Ergebnisse sind sehr positiv. Die Abscheiderate ist deutlich höher und es sind mit dieser Frequenz andere Schichteigenschaften erreichbar.



Software-Oberfläche für Automatisches HF-Mess- und Tuningsystem für 915 MHz , 2,45 GHz u. 5,8 GHz

Automatisches HF-Mess- und Tuningsystem für 5,8 GHz

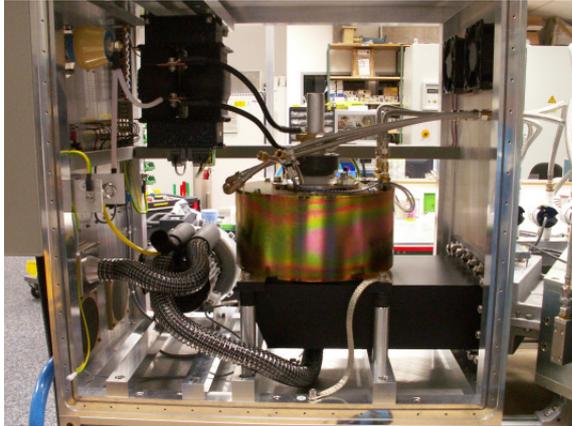
Beim Projektpartner IPLAS wurde der Pulsgenerator an einer 5,8 GHz Cyrannus Plasmaquelle erfolgreich getestet.

1.6 Erarbeitung von grundlegenden Konzepten und Parametern für die Pulsung von Großmagnetrons mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz.

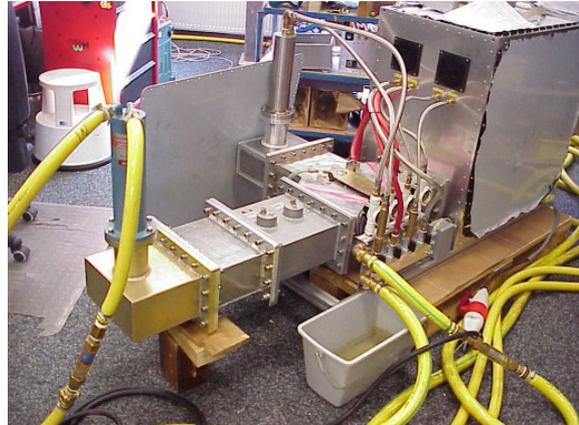
Zu Beginn wurden für alle derzeit verfügbaren 915 MHz Magnetrons die Daten beschafft. Es sind zur Zeit 915 MHz Magnetrons bis zu einer CW-Leistung von 100 kW verfügbar. Leider gilt hier das Gleiche wie bei den 2,45 GHz Magnetrons, in den Unterlagen ist nur der CW-Betrieb dokumentiert. Für den Pulsbetrieb sind von den Herstellern der Magnetrons keinerlei Aussagen zu bekommen. Um die Eignung für den Pulsbetrieb beurteilen zu können, sind umfangreiche Tests mit verschiedenen Magnetrons notwendig. Da hier mit Spannungen von bis zu 22 kV und Strömen bis zu 10 A gearbeitet wird, sind diese Tests sehr aufwendig und häufig mit der Zerstörung des Testobjekts verbunden. Leider sind auch hier die Lieferzeiten teilweise extrem lang. Alle 915 MHz Magnetrons sind nur in offener Bauform lieferbar, daher muss der komplette Magnetronkopf in ein HF-dichtes Gehäuse eingebaut werden. Durch den, für den Betrieb notwendigen, sehr großen Elektromagnet werden die Aufbauten auch sehr groß und schwer. Wir haben daher zuerst mit dem kleinsten verfügbaren 915 MHz Magnetron mit 5 kW begonnen einen Versuchsgenerator aufzubauen. Nach den vorhandenen Daten sollten mit diesem Magnetron eine CW-Leistung von 6 KW und eine Pulsleistung von 15 bis 20

kW erreichbar sein. Dies konnte leider während der Versuche nicht bestätigt werden.

Die Grenze liegt für dieses Magnetron bei einer Pulsleistung von 10 bis 12 kW.



915 MHz Magnetron montiert im Elektromagnet mit allen Strom und Kühlwasseranschlüssen



Testaufbau 915 MHz Magnetronkopf mit Zirkulator mit Wasserlast und Leistungmeßsystem

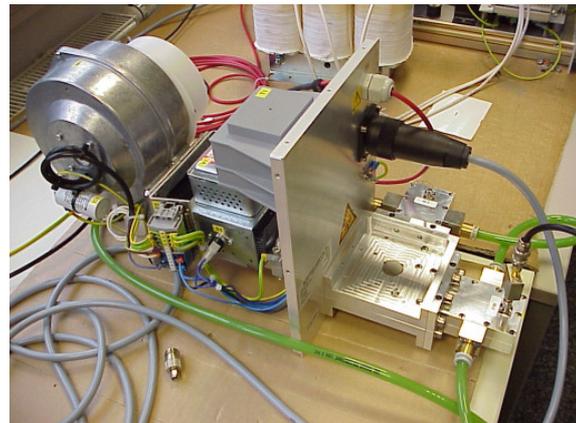
Erst nach erfolgreichem Abschluß dieser Tests wurden die Versuche mit größeren Leistungen begonnen.

2.1 Weiterführende Untersuchungen zur Leistungspulsung an verschiedenen Magnetrons und Arbeitsfrequenzen.

Die Entwicklung der 5,8 GHz Mikrowellen-Generatoren wurde inzwischen abgeschlossen und in ein produktionsreifes Produkt überführt. Die Firma IBF kann diese Generatoren sowohl für CW-Betrieb als auch für Pulsbetrieb liefern. Die maximalen Hochfrequenzleistungen sind 800 W im CW-Betrieb und 1,6 kW im Pulsbetrieb. Die möglichen Pulsfrequenzen sind 100 μ s bis 10 ms bei einer Pausendauer von 100 μ s bis DC. Inzwischen wurden zusätzlich alle für den Aufbau einer Anlage notwendigen Hohlleiterteile, Abstimmtechnik und Messtechnik entwickelt. IBF kann daher alle notwendigen Teile komplett aus einer Hand liefern. Durch die immer noch geringe Stückzahl werden die Magnetrons manuell gefertigt. Dadurch ist der Preis für die 5,8 GHz Magnetrons noch sehr hoch. Da die höhere Frequenz bei verschiedenen Anwendungen im Plasma, aber auch im Erwärmungsbereich, diverse Vorteile hat, konnten trotz des hohen Preises inzwischen einige Anlagen weltweit verkauft werden. (Weitere Informationen siehe beiliegendes Handbuch)



Stromversorgung für Pulsgenerator 5,8 GHz 800 W CW- und 1,6 kW Pulsleistung mit MosFet-Endstufe



Magnetronkopf 5,8 GHz mit Isolator und Wasserlast mit luftgekühltem Magnetron (offen beim Test)

Bei der Entwicklung der 2,45 GHz Pulsgeneratoren hat sich gezeigt, daß bei den verfügbaren

Magnetrons sehr starke Unterschiede bei der Pulsbarkeit bestehen. Die Magnetrons in der Leistungsklasse bis 6kW können teilweise bis zur mehrfachen CW-Leistung gepulst werden. Bei Magnetrons im unteren Leistungsbereich (bis 1,5kW) konnte das 10fache der CW-Leistung als Pulsleistung stabil erreicht werden. Bei den Magnetrons ≥ 10 kW bis 30kW ist die Pulsbarkeit nur sehr eingeschränkt möglich. Die Exemplar-Streuung und die Qualität dieser Magnetrons schwankt sehr stark, außerdem sind die Preise zur Zeit unverhältnismäßig hoch. Kommerziell sinnvoll lassen sich daher nur Pulsgeneratoren mit Magnetrons bis zu einer CW-Leistung von 6kW und einer Pulsleistung bis 18kW aufbauen. Bei höheren mittleren Leistungen ist daher nur der CW-Betrieb sinnvoll. Die Firma IBF vermarktet inzwischen verschiedene Pulsgeneratoren als Seriengeräte für Anlagen im Plasmabereich. Zum Beispiel werden 1,2 kW CW / 6 kW Pulsgeneratoren mit MosFet-Endstufe und 1,5 kW CW / 15 kW Puls-Generatoren bei der PICVD-Beschichtung und 3 kW CW / 10 kW Puls-Generatoren mit Röhrenendstufe bei der PET-Beschichtung eingesetzt. (Weitere Informationen siehe beiliegendes Handbuch)



Stromversorgung für 2,45 GHz Magnetron 2 kW CW / 4kW Pulsleistung mit Röhrenendstufe



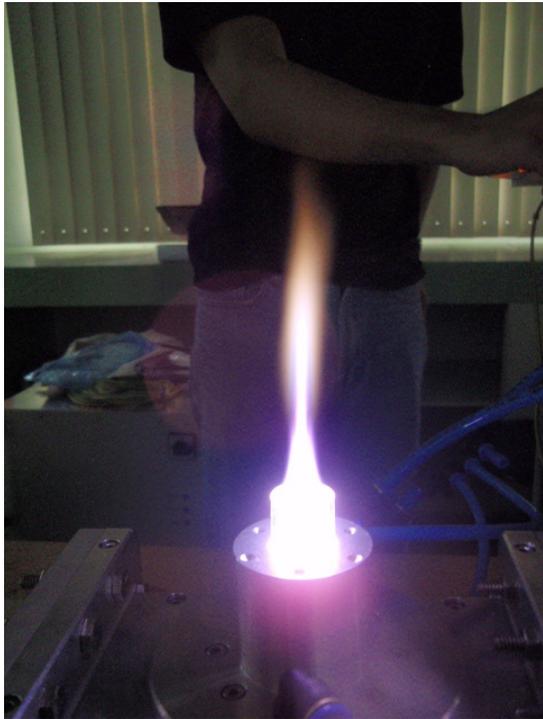
Stromversorgung für 4 Stück 2,45 GHz Magnetrons
4x 1,5 kW CW / 15 kW Pulsleistung für PICVD-Plasmaanlage

2.2 Weiterführende Untersuchung zum Betrieb des Mikrowellengenerators an der Demonstrator-Anlage und Dokumentation der Ergebnisse.

IBF hat für die Versuche der Projektpartner mit der IPLAS Plasmaquelle einen 2,45 GHz Puls-generator mit 12 kW gebaut. Beim Einsatz hat sich gezeigt, dass es sehr schwierig ist, die hohe Energie in die Quelle einzukoppeln. Bei ungenügender Anpassung und daraus resultierender reflektierter Leistung werden die Feldstärken im Hohlleiter so hoch, dass es zur ARC Bildung kommt. Der Hohlleiter-Querschnitt und die Hohlleiterführung haben hier einen starken Einfluss auf die Betriebssicherheit. Hier sind noch weitere Versuche bzw. Anpassungen an der Plasmaquelle notwendig.

Beim Projektpartner IPLAS wurde der Pulsgenerator an einer 5,8 GHz Cyrannus Plasmaquelle getestet. Nach anfänglichen Problemen mit der Anpassung über einen 3-Stub-Tuner konnte die Quelle mit einem E/H-Tuner erfolgreich in Betrieb genommen werden. Beim 3-Stub-Tuner kam es durch hohe Feldstärken an den Spitzen der Tunerstifte zur ARC-Bildung und anschließender

Zerstörung des Tuners, des Isolators und des Magnetrons. Konstruktionsbedingt treten diese Probleme bei E/H-Tuner nicht auf. Problematisch ist bei dieser Frequenz aber das geringe Plasmavolumen. Sinnvoller erscheint daher für das Projektziel der Einsatz einer niedrigeren Mikrowellenfrequenz.



Atmosphären-Plasmaquelle im Betrieb mit Argon und 1,5 kW Mikrowellenleistung



Atmosphären-Plasmaquelle im Betrieb Beimischung von Kupfer-Pulver zur Beschichtung

Grundsätzlich konnte durch Anwendung der gepulsten Mikrowelle die thermische Belastung der Plasmaquellen durch die niedrigere mittlere Leistung stark reduziert werden.

2.3 Aufbau und Test von gepulsten Mikrowellengeneratoren mit einer Arbeitsfrequenz von 915 MHz bis zu einer Pulsleistung von ca. 75 kW.

Die Entwicklung der 915 MHz Pulsgeneratoren haben erste Versuche haben gezeigt, dass die Pulsbarkeit der auf dem Markt verfügbaren 915 MHz Magnetrons sehr unterschiedlich ist. Als erster Schritt wurde ein Pulsgenerator mit 5kW CW- und 10kW Puls-Leistung aufgebaut und getestet.



Pulse mit 1 ms und 10 kW Spitzenleistung



Puls-Endstufe mit luftgekühlter 5 kW-Tetrode

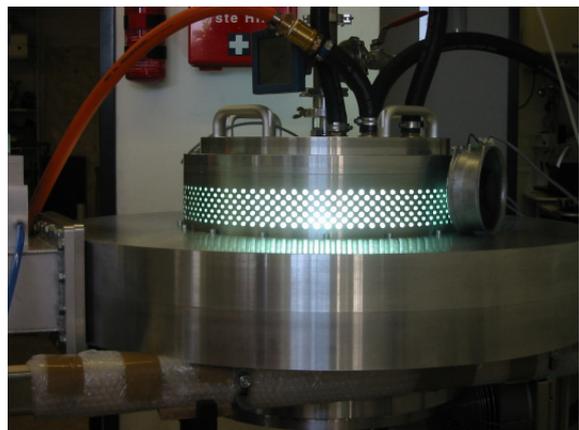
Danach starteten erste Versuche mit größeren Magnetrons. Die auf dem Markt verfügbaren Leistungsstufen sind 30, 50, 60, 75 und 100 kW. Da es keinerlei Daten der Hersteller über die Pulsbarkeit gibt, mussten alle Parameter selbst ermittelt werden. Dies führte häufig zur Zerstörung der Magnetrons durch thermische Überlastung bzw. durch innere Hochspannungsüberschläge. Die bisher maximal erreichte Pulsleistung lag bei 50 kW bei Pulslängen im Millisekunden-Bereich. Der Aufwand für solch eine Anlage ist beträchtlich, da Spannungen bis zu 10 A und 30 kV geschaltet bzw. geregelt werden müssen. Dies ist nur durch den Einsatz einer Elektronenröhre möglich. IBF hat dafür Versuche mit Trioden und Tetroden durchgeführt. Die Tetroden sind zwar komplizierter in der Ansteuerung, aber benötigen deutlich weniger Steuerleistung. Nach Abschluss der Projektarbeiten wurde mit einem Kunden ein neues Projekt begonnen, bei dem das Ziel die Erreichung von 200 kW Pulsleistung ist. Diese Arbeiten sind zur Zeit im Gange und werden vermutlich Ende 2011 abgeschlossen sein.

2.4 Grundlegende Untersuchung der 915 MHz Puls-Generatoren zum Betrieb an einer Plasmaquelle

Mit 915 MHz Generator mit wurden erste Tests mit der 915 MHz Cyrannus Plasmaquelle des Projektpartners IPLAS durchgeführt. Wie sich gezeigt hat, sind die 10kW für einen Betrieb der Plasmaquelle bei Atmosphärendruck nicht ausreichend. Mit einer modifizierten Ausführung, die bis 20 kW Leistung liefern konnte, war ein stabiler Betrieb bei Atmosphärendruck möglich.



Versuchsaufbau einer 915 MHz Cyrannus Plasmaquelle mit 3-Stub-Tuner zur Abstimmung



915 MHz Cyrannus Plasmaquelle im Betrieb

(Generatorbeschreibung siehe beiliegendes Handbuch) Das Plasma erreicht mit dieser Quelle problemlos die erforderliche Größe und Ausdehnung. Geplant sind weitere Versuche mit Großmagnetrons mit Leistungen bis 100 kW. Die Idee ist der Betrieb von mehreren Plasmaquellen an einem Generator über Leistungssplitter zur Kosteneinsparung.

Parallel zu der Entwicklung der Endstufen wurde auch die Kontroll- und Steuerungselektronik weiter entwickelt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Verwendung von handelsüblichen Komponenten und SPS-Systemen. Nur der Controller für die gepulste Leistungsregelung wurde durch eine eigene Schaltung realisiert. Dies war aus Gründen der hohen Regelgeschwindigkeit notwendig. Keine der käuflichen Schaltungen konnte die Anforderungen erfüllen.