



1 Einleitung

Seit bekannt ist, wie hochfrequente elektrische Signale nutzbringend einsetzbar sind, wird nach Methoden gesucht, sie möglichst günstig und platzsparend zu erzeugen. Abhängig vom Frequenzbereich, der gewünschten Leistung und dem Anwendungsgebiet sind zu diesem Zweck bis heute verschiedene Generatorkonzepte entstanden. Die vorliegende Arbeit wird diese Vielfalt weiter ergänzen. Aufbauend auf den Errungenschaften aktueller Halbleitertechnologie dokumentiert sie die Entwicklung einer neuen Generation hochkompakter Mikrowellengeneratoren. Im Fokus der Anwendung steht hierbei die Erzeugung mikrowellenangeregter Plasmen. Plasmen können zur zielgerichteten Steuerung chemischer Prozesse eingesetzt werden und sind aus modernen technologischen Prozessen nicht mehr wegzudenken. Sie kommen unter anderem in verschiedenen Verfahren der Halbleiter- und Elektroindustrie zum Einsatz, wo sie beispielsweise für die Nanostrukturierung von Oberflächen durch hochpräzise Ätzungen genutzt werden. Auch die Abscheidung extrem dünner, dielektrischer Schichten nach dem PECVD¹-Verfahren ist von der Existenz leistungsfähiger Plasmaquellen abhängig. Überall dort, wo außerordentlich exakte Schichtdicken von Bedeutung sind, wird das PEALD²-Verfahren angewendet. Es herrscht ein permanenter Innovationsdruck, der eine stete Weiterentwicklung der Prozesstechnik hin zu größeren Behandlungsflächen, kürzeren Zykluszeiten und kleineren Strukturgrößen erfordert.

Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, liegt im Einsatz räumlich verteilter Plasmaquellen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine solche Quelle während einer Projektzusammenarbeit mit einem Industriepartner realisiert werden.

1.1 Zieldefinition

Für den eigentlichen Plasmaprozess, also die Wirkung des Plasmas auf das behandelte Objekt, ist das Dissoziationsverhalten des Gases ausschlaggebend. Je mehr chemische Spezies der gewünschten Art dabei entstehen, desto günstiger ist normalerweise das Prozessergebnis. Die dabei stattfindenden physikalisch-chemischen Vorgänge sind jedoch äußerst komplex und noch nicht vollständig verstanden. In der Regel wird versucht, möglichst viel Leistung in das Plasma einzuspeisen. Empirische Beobachtungen legen aber nahe, dass die Dichte erwünschter Spezies nicht beliebig mit dieser Leistung skaliert. Vielmehr scheint eine gleichmäßige räumliche Verteilung des Plasmas interessanter. Zur Überprüfung dieser Annahme wird eine neuartige, verteilte Niederdruckplasmaquelle entwickelt, die ein großflächig uniformes Downstream-Plasma erzeugt. Das kleinste Element der Quelle bildet ein integriertes Plasmaquellenmodul, welches so kompakt ist, dass mehrere gleichartige Module in beliebiger Anzahl nebeneinander angeordnet werden können. Der praktische Nachweis über die Wirksamkeit der verteilten Quelle wird anhand eines PEALD-Prozesses geführt. Es wird überprüft, ob die Uniformität der Schichtdicke

¹ Engl. Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition

² Engl. Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition



erhalten bleibt, wenn die Behandlungsfläche von derzeit 100 mm auf 200 mm Durchmesser vergrößert wird.

Die Plasmaanregung mit Mikrowellen erscheint für die Umsetzung eines so ehrgeizigen Projekts sehr vorteilhaft. Hierbei spielt besonders die geringe Wellenlänge im Gigahertzbereich eine wichtige Rolle. Sie bestimmt besonders die Dimensionen der Resonatorstrukturen, die für die elektrische Anregung des Plasmas benötigt werden und Teil einer jeden HF-Plasmaquelle sind. Regt man ein Plasma mit hoher Generatorfrequenz an, erhöht dies außerdem die Homogenität des Plasmas und es ergeben sich bessere Prozessergebnisse.

Damit ergeben sich einige Randbedingungen, die bestimmte Parameter des Generators und des Resonators diktieren:

- Die Erzeugung von Mikrowellenplasma ist eine typische ISM³-Anwendung. Als solche ist sie regulatorisch an bestimmte Frequenzbänder gebunden, außerhalb derer keine nennenswerte Hochfrequenzleistung emittiert werden darf [BNA03].
- Ein Plasma kann als elektrische Komponente aufgefasst und bezüglich seiner Impedanz charakterisiert werden [Kühn10]. Um maximale Leistung vom Generator ins Plasma einzukoppeln, bedarf es der Impedanzanpassung. Diese wird durch eine spezielle Anpasstruktur erreicht [Port12], [Port13]. Die geometrischen Abmessungen dieser Struktur, die auch als Resonator bezeichnet wird, sind dabei durch die Arbeitsfrequenz bestimmt.
- Die Bereitstellung von Generatorleistung erfordert Schaltungsfläche und muss mit dem Platzangebot auf dem Modul im Einklang stehen. Für eine sichere Plasmazündung darf eine Mindestleistung nicht unterschritten werden [Kühn07], sie hängt vom Resonator ab.
- Um möglichst viele Plasmaquellen in einem Areal unterzubringen, muss die Fläche des Einzelmoduls so gering wie möglich sein. Die Anordnung der Plasmazonen in einem homogenen Raster bietet die besten Voraussetzungen für eine hohe Uniformität.

Aus diesen Zusammenhängen heraus wurden folgende Festlegungen getroffen:

- Die Betriebsfrequenz liegt im 2,45 GHz ISM-Band.
- Der Generator liefert eine Mindestleistung von 50 W.
- Für die Schaltung steht eine Grundfläche von etwa 35 cm² zur Verfügung.

³ Engl. industrial, scientific, medical



1.2 Stand der Technik

Derzeit arbeiten die meisten kommerziellen Hochfrequenzplasmaquellen bei sehr niedrigen Frequenzen deutlich unterhalb von einem Gigahertz. Die existierenden Mikrowellenplasmaquellen werden häufig mit Magnetrongeneratoren hoher Leistung betrieben. Hier diktiert der Generator die Gesamtgröße der Plasmaquelle. Das Platzsparpotential, das die geringen Resonatorabmessungen bieten, wird nicht auf das Plasmaquellenmodul übertragen. Im Leistungsbereich unterhalb von 100 W besteht prinzipiell die Möglichkeit, Halbleitergeneratoren einzusetzen und diese zu integrieren. Hier existieren vorwiegend Systeme zur Erzeugung atmosphärischen Plasmas [Heu12]. Integrierte Lösungen sind jedoch rar und wurden bislang nur mit geringer Leistung demonstriert [Kühn12]. Nach Kenntnis des Autors gehen die einzigen bekannten Systeme integrierter Mikrowellenplasmaquellen für Anwendungen im Niederdruck auf Arbeiten des FBH in Zusammenarbeit mit der Firma Sentech Instruments zurück und sind als CCP-Quellen realisiert [Epil07], [Epil13]. Den aktuellen State of the Art auf diesem Gebiet definiert eine verteilte CCP⁴-Quelle aus dem Jahr 2012, deren vier Einzelquellen je etwa 15 W Mikrowellenleistung abgeben [Epil13].

Zur Erzeugung hoher elektrischer Leistungen im Frequenzbereich der Mikrowellen stehen derzeit im Wesentlichen drei Arten von Generatoren zur Verfügung. Neben ihren konzeptionellen Unterschieden differenzieren sie sich insbesondere durch die Parameter Ausgangsleistung und Schaltungsgröße. Aus Abbildung 1.1 geht hervor, dass die höchsten Leistungen - bis in den Kilowatt-Bereich hinein - mit Laufzeitröhren erzielbar sind. Stellvertretend für diese Gruppe soll hier das Magnetron gelten, das zwar ein sehr hohes Leistungspotential aufweist, sich aufgrund seiner voluminösen Bauform aber kaum integrieren lässt. Nur ein Minimum an Schaltungsfläche erfordern hingegen Leistungszustromotoren auf Halbleiterbasis, die für 2,45 GHz bereits bis in den Bereich von 300 W demonstriert wurden [Shi12]. Mit beiden Konzepten konnten bislang ausschließlich Signale mit fester Frequenz erzeugt werden. Kombiniert man einen herkömmlichen VCO⁵ mit einer Verstärkerkette, lässt sich die Frequenzeinschränkung überwinden, sodass hohe Ausgangsleistungen über einen breiten Frequenzbereich hinweg generiert werden können. Wie auch für die Leistungszustromotoren werden hierbei die maximalen Ausgangsleistungen durch die Transistoren beschränkt. Die Verstärkerkaskade benötigt weniger Platz als ein Magnetron, jedoch deutlich mehr als Leistungszustromotoren vergleichbarer Leistung.

⁴ Engl. capacitively coupled plasma

⁵ Oszillatoren mit spannungsveränderlicher Schwingfrequenz (Engl. voltage controlled oscillator) sind bislang nur mit sehr geringer Ausgangsleistung verfügbar.

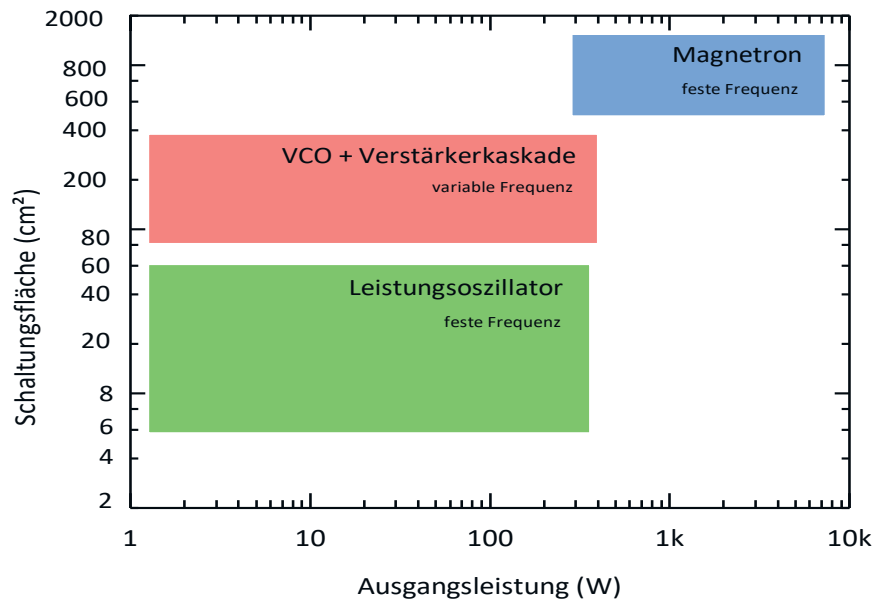


Abbildung 1.1 Mikrowellengeneratorkonzepte im Vergleich hinsichtlich Leistung und Schaltungsgröße

Großvolumiger Hochleistungsgenerator mit Magnetron:

Mit Magnetrons können Mikrowellenleistungen bis zu mehreren Kilowatt bei Wirkungsgraden um 80 % erzeugt werden. Bedingt durch das Funktionsprinzip existiert dabei eine untere Leistungsgrenze von etwa 300 W. Kleinere CW-Leistungen lassen sich kaum generieren. Sie sind sehr robust gegenüber Fehlanpassung und Temperatur, wobei sie kurzzeitig starke Überlasten tolerieren. Die Signalfrequenz dieses Generators ist unveränderlich. Ursache für die Baugröße sind hauptsächlich die frequenzbestimmenden Resonanzkammern. Zum Vergleich mit weiteren, eher planar aufgebauten Generatorkonzepten, zeigt Abbildung 1.1 eine Übersicht zum jeweiligen Flächenbedarf. Gerade das Magnetron besitzt ein sehr großes Volumen, auf das hier besonders hingewiesen sei. Durch den verbreiteten Einsatz in Mikrowellenherden sind Magnetrons für 2,45 GHz günstig erhältlich und in sehr großer Anzahl verfügbar. Umfangreiche Details zum Funktionsprinzip können [ZiBr93, S. 366ff.] entnommen werden.

Frequenzvariable Oszillator-Verstärkerkaskade:

Der übliche Weg leistungsstarke Mikrowellensignale ohne wesentliche Einschränkungen der Signalfrequenz und Signalform im Bereich von 1 W bis 300 W zu erzeugen, besteht in der sukzessiven Verstärkung eines kleinen Ausgangssignals. Zur Erzeugung dieses Signals stehen heute, neben VCOs, auch IQ-Mischer und DDS-Baugruppen zur Verfügung, mit denen nahezu beliebige komplexe Signalformen generiert werden können. Besondere Linearitätsanforderungen an die Verstärker bestehen im Allgemeinen dann, wenn Signale gezielt moduliert werden sollen, wie beispielsweise beim Einsatz von OFDM. Linearität spielt bei vielen praktischen Anwendungen eine entscheidende Rolle, in der vorliegenden Arbeit ist

sie jedoch nicht von Bedeutung. Die Schaltungsfläche der gesamten Baugruppe richtet sich nach der Anzahl der notwendigen Verstärkerstufen und wächst mit steigender Maximalausgangsleistung an. In Ergänzung zu Abbildung 1.1 zeigt Abbildung 1.2 diesen Zusammenhang anhand verschiedener Kaskaden, aus kommerziell verfügbaren Einzelmodulen. Die zugrunde liegenden Daten entstammen den Produktdatenblättern repräsentativer Anbieter und sind A. 1 zu entnehmen.

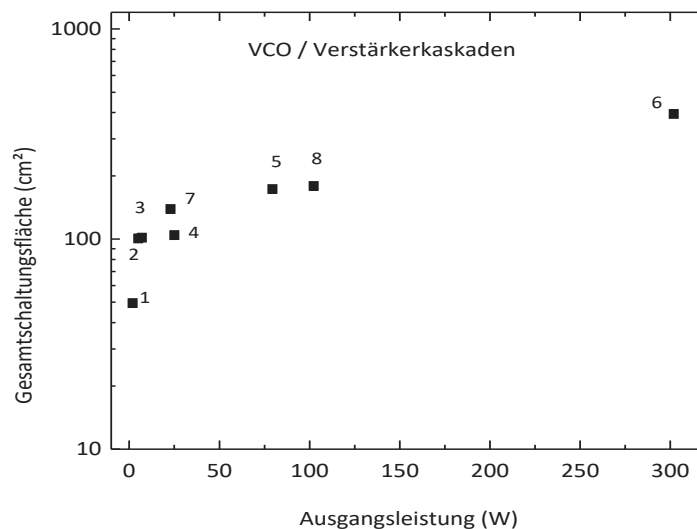


Abbildung 1.2 Zunahme der gesamten Schaltungsfläche von VCO / Verstärkerkaskaden mit steigender Maximalausgangsleistung

Platzsparender Festfrequenzgenerator mit Leistungsozillatoren:

Eine Oszillatorschaltung, die ohne weitere Verstärkerstufen zur Abgabe besonders hoher Leistung fähig ist, wird als Leistungsozillator bezeichnet. Im Unterschied zu Kaskaden mit vergleichbarer Ausgangsleistung, die eine Reihe von Vorverstärkerstufen erfordern, kommen im Leistungsozillator nur die Transistoren der vergleichbaren Verstärkerendstufe zum Einsatz. Letzteres gilt sowohl für den Typ als auch für die Transistoranzahl. Der Verzicht auf die mitunter zahlreichen Vorverstärkerstufen resultiert nicht nur in geringeren Materialkosten sondern ebenso in einer deutlichen Platzersparnis, weshalb sich derartige Generatoren sehr gut in andere Systeme einfügen lassen. Abbildung 1.3 zeigt eine Übersicht bislang veröffentlichter Arbeiten zu Modulen im Frequenzbereich um 2,45 GHz. Bei den Ziffern 1 [Lee12] und 2 [Kim11] kamen GaN-HEMTs zum Einsatz, während bei 3 [Shi12] und 4 [Hwang08] LDMOS-Transistoren verwendet wurden. Anders als bei den Verstärkerkaskaden zeichnet sich bei den Leistungsozillatoren noch keine klare Größenentwicklung ab. Dies erklärt sich damit, dass Leistungsozillatoren im Mikrowellenbereich bislang nicht als Alternative zu etablierten Generatorkonzepten betrachtet werden. Die Anzahl veröffentlichter Konzepte ist insgesamt sehr gering. Ansätze, welche auf die Minimierung der Schaltungsfläche abzielen, fehlen gänzlich. Es ist daher wahrscheinlich, dass die bisher erzielten Leistungen pro Schaltungsfläche noch gesteigert