

Bert Schumann

**Multielement-Frequenzvervielfacher
zur Leistungserzeugung im
Submillimeterwellenbereich**



Cuvillier Verlag Göttingen

Multiement-Frequenzvervielfacher zur Leistungserzeugung im Submillimeterwellenbereich

Vom Promotionsausschuß der
Technischen Universität Hamburg–Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor–Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Bert Schumann

aus Rendsburg

2003

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2003

Zugl.: Hamburg-Harburg, Univ., Diss., 2003

ISBN 3-89873-775-6

Berichterstatter: 1. Prof. Dr.–Ing. K. Schünemann

2. Prof. Dr. rer. nat. E. Brinkmeyer

3. Prof. Dr. Eng. Dr. h. c. H. L. Hartnagel

Vorsitzender des Prüfungsausschusses : Prof. Dr.–Ing. W. Meyer

Tag der mündlichen Prüfung: 20.06.2003

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2003

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2003

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-89873-775-6

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Arbeitsbereich Hochfrequenztechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg.

Mein Dank gilt ganz besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Schünemann, dem Leiter des Arbeitsbereichs Hochfrequenztechnik für die Anregung und stete Förderung meiner Arbeit und für die Übernahme des Erstgutachtens.

Herrn Prof. Brinkmeyer und Herrn Prof. Hartnagel danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Meiner Frau Nadja möchte ich danken. Ohne sie wäre so vieles nicht möglich gewesen.

Abschließend möchte ich mich bei all meinen Kollegen bedanken, die durch eine stete Hilfsbereitschaft eine angenehme und fruchtbare Arbeitsatmosphäre schufen und so diese Arbeit ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Symbole und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zur Frequenzvervielfachung	7
2.1 Funktionsprinzip von Frequenzvervielfachern	8
2.2 Theoretische Grenzen von Frequenzvervielfachern	10
2.3 Schlussfolgerungen	11
3 Der Schottkyvaraktor	13
3.1 Grundlagen zum Schottkykontakt	14
3.1.1 Die Verarmungszone im Sperrfall	16
3.1.2 Strom/Spannungs-Kennlinie im Flussbereich	17
3.2 Elektrisches Ersatzschaltbild	18
3.2.1 Einfluss der Substratschicht	21
3.3 Nichtlineare Analyse	21
3.3.1 Harmonische Balance	22
3.3.2 Analyse des Varaktor-Betriebsfalls	24
3.3.3 Impedanz- und Leistungsbetrachtung	27
3.4 Synthese eines optimalen Varaktors	28
3.5 Analyse des vorliegenden Varaktors	35
3.5.1 Strom/Spannungs-Charakteristik	36
3.5.2 Parameter des Varaktors WV1211	39
3.6 Schlussfolgerungen	41
4 Der Heterobarrieren-Varaktor	45
4.1 Aufbau des Heterobarrieren-Varaktors	46
4.1.1 Kapazitäts/Spannungskennlinie	48
4.1.2 Barrierenleckstrom	49
4.1.3 Gesamtimpedanz des HBV	50

4.1.4	Begrenzende Effekte	51
4.2	Analyse der verwendeten Heterobarrieren-Varaktoren	52
5	Frequenzvervielfacherschaltungen	59
5.1	Frequenzverdoppler	60
5.1.1	Koaxialfilter	62
5.1.2	Anpassung der Diode	64
5.1.3	Radialleitungstransformation	66
5.1.4	Kurzschlusschieber	68
5.1.5	Whiskertechnik	71
5.1.6	Verbindungstechnik für die Diode	74
5.1.7	Messumgebung	75
5.1.8	Ergebnisse	77
5.1.9	Diskussion der Ergebnisse	77
5.2	Frequenzverdreifacher mit Heterobarrieren-Varaktor	79
5.2.1	Passive Beschaltung des Heterobarrieren-Varaktors	80
5.2.2	Messfassung	83
5.2.3	Messergebnisse	83
5.2.4	Diskussion der Ergebnisse	86
6	Quasi-optische Leistungsaddition und -teilung	89
6.1	Antennen	90
6.1.1	Rechteckhornantennen	91
6.1.2	Gaußstrahlhornantennen	92
6.2	Modellierung dielektrischer Phasengitter	94
6.3	Auskoppelschaltung	95
6.3.1	Doppelspiegelsystem	96
6.3.2	Fresnellinsensystem	98
6.4	Verhalten bei Quellenstörungen	101
6.4.1	Quellenausfall	101
6.4.2	Amplitudenstörungen	102
6.4.3	Phasenstörungen	103
6.5	Schlussfolgerungen	103
7	Multiement-Vervielfacher	105
7.1	Multiement-Verdoppler	106
7.1.1	Doppelspiegel-Aufbau	106
7.1.2	Fresnellinsen-Aufbau	107

7.2	Multiement-Verdreifacher	109
7.3	Ausfall einzelner Quellen	111
7.4	Verhalten bei Phasenstörungen	112
7.4.1	Beschreibung und Modifikation des Messsystems	113
7.4.2	Phasenmessungen bei 300 GHz	115
7.4.3	Diskrete Phasenschieber	116
7.4.4	Leistungsabhängigkeit der Ausgangsphase	117
7.5	Bandbreiteuntersuchungen	117
7.6	Diskussion	118
8	Zusammenfassung und Ausblick	121
	Anhänge:	123
A	Weitere Simulationsergebnisse zu den Varaktoren	124
B	Neuer Flanschstandard	128
C	Einrichtung zum Whiskerätzen	129
D	Arbeitsabfolgen	130
D.1	Arbeitsabfolge zur Whiskerherstellung	130
D.2	Arbeitsabfolge zum Auflöten von Schottkydioden	131
D.3	Arbeitsabfolge zum Aufbonden planarer HBV-Chips	132
E	Ergebnisse aus der Literatur zu Frequenzvervielfachern	134
	Literaturverzeichnis	135

Verwendete Symbole und Abkürzungen

Physikalische Konstanten

<i>Konstante</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
$\varepsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12}$	As/Vm	Permittivität im Vakuum
$\mu_0 = 1,25663 \cdot 10^{-6}$	H/m	Permeabilität im Vakuum
$c = 2,99792 \cdot 10^8$	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$q = 1,60218 \cdot 10^{-19}$	C	Elementarladung
$k = 1,38066 \cdot 10^{-23}$	J/K	Boltzmann Konstante
$m_0 = 0,91095 \cdot 10^{-30}$	kg	Elektronenmasse
$A^{**} = 8,2 \text{ bis } 8,6$	A/(Kcm) ²	modifizierte Richardson-Konstante für GaAs
$A^{**} = 96$	A/(Kcm) ²	modifizierte Richardson-Konstante für Si

Griechische Symbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
β		empirischer Anodenformfaktor
γ	1/s	komplexe Ausbreitungskonstante
ε_B		Dielektrizitätskonstante in der Barriere (HBV)
ε_s		Dielektrizitätskonstante im Halbleiter
ε_m		Dielektrizitätskonstante in der Modulationsschicht
Φ_B	V	Barrierenhöhe
$q\Phi_m$	eV	Vakuumaustrittsarbeit Metall
$q\Phi_s$	eV	Vakuumaustrittsarbeit Halbleiter
ω	1/s	Kreisfrequenz
ω_d	1/s	dielektrische Relaxationsfrequenz
ω_p	1/s	Plasmaresonanz
ω_s	1/s	Streu frequenz
$\omega_{s,eff}$	1/s	Effektive Streu frequenz
Ω	V/A	elektrischer Widerstand in Ohm
Ω		Matrixoperator für die Differenzierung
μ_{eo}	m ² /(Vs)	Beweglichkeit der Elektronen in der Epitaxieschicht
μ_{bo}	m ² /(Vs)	Beweglichkeit der Elektronen in der Substratschicht

Lateinische Symbole und Abkürzungen

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
Al		Aluminium
Au		Gold
AuNi		Gold-Nickel
b	m	Substratdicke (Schottkydiode)
c_B	F	Kapazität der Barriere
CPW		Koplanarer Wellenleiter (Coplanar Waveguide)
d	m	Anodendurchmesser
DFG		Deutsche Forschungsgemeinschaft
E	eV	Energie
E_C	eV	Leitungsbandkante
E_F	eV	Ferminiveau
E_V	eV	Valenzbandkante
ESB		Ersatzschaltbild (elektr.)
FE		Finite Elemente
GaAs		Galliumarsenid
GHz	10^9 [1/s]	Gigahertz
HBV		Heterobarrieren-Varaktor
HFSS		High Frequency Structure Simulator
IMPATT		IMPact Avalanche Transit Time, Lawinenlaufzeitdiode
KSS		Kurzschlusschieber
m_{eff}	kg	effektive Elektronenmasse
MHz	10^6 [1/s]	Megahertz
N		Anzahl der Barrieren
n		Idealitätsfaktor
N_{De}	$1/m^3$	Donatordotierung
N_C		effektive Zustandsdichte des Leitungsbandes
N_V		effektive Zustandsdichte des Valenzbandes
Ni		Nickel
Pt		Platin
R_s	Ω	Serienwiderstand
REM		Rasterelektronenmikroskop
S	m^2	aktive Fläche der Diode
Si		Silizium
SiON		Siliziumoxinitrit
SNA		Skalarer Netzwerkanalysator

t_b	m	Dicke der Barriere (HBV)
t_e	m	Länge der Modulationsschicht (Epitaxieschicht)
TEM		Transversal Elektromagnetisch
THz	10^{12} [1/s]	Terahertz
U	m	Umfang der Anode
UG 387/U-M		Standard-Rundflansch mit zölligen Stiften
V_{br}	V	Durchbruchspannung
v_{dmax}	m/s	Sättigungsdriftgeschwindigkeit
V_T	V	kT/q , Temperaturspannung
W		Wolfram
w	m	Breite der Hornapertur
w	m	Länge der Verarmungszone
w	m	Leiterbreite
WR03		J-Band Hohlleiter (222-325 GHz): 0,8636 x 0,4318 mm
WR06		D-Band Hohlleiter (110-170 GHz): 1,651 x 0,8255 mm
WR2.2		Hohlleiter für den Bereich 400-500 GHz: 0,5588 x 0,2794 mm

Kapitel 1

Einleitung

In den Anwendungen der Hochfrequenztechnik spielt von Beginn an die Signalerzeugung eine wichtige Rolle. Die Frequenzmultiplikation an einer Nichtlinearität wurde schon früh als eine Möglichkeit erkannt, die Harmonischen einer Fundamentalfrequenz zu nutzen.

Für die Dimensionierung eines Hochfrequenzsenders (Signalerzeugers) sind je nach Anwendung neben Abstimmbarkeit, Signal-zu-Rauschabstand und Preis folgende Kriterien von Interesse: Das benötigte Volumen/Gewicht und die erzielbare Ausgangsleistung. Die benötigte Signalleistung ist naturgemäß abhängig von der zu erzielenden Reichweite und von der Frequenz. Die Funkwellendämpfung steigt nach Bild 1.1 mit der Frequenz und ist zudem stark abhängig von den Absorptionsmaxima des Gasgemisches der Luft. Insbesondere dort, wo die Atmosphäre Dämpfungsminima (-Fenster) aufweist, besteht ein Interesse an leistungsstarken Sendern.

Die Leistungserzeugung ist in jedem interessierenden Frequenzbereich nahezu vollständig über die Röhrentechnik abdeckbar (siehe Bild 1.1). Leistungsröhren im Millimeterwellenbereich nutzen die Wechselwirkung zwischen einem Elektronenstrahl und elektromagnetischen Feldern, dabei wird die kinetische Energie des Elektronenstrahls in elektromagnetische Energie umgesetzt. Als Beispiele aus der Röhrentechnik sind das Gyrotron und der Rückwärtswellenoszillator zu nennen. Nachteilig bei dieser Technologie ist die beschränkte Lebensdauer, die aufwendige Hochspannungsversorgung und die schlechte Abstimmbarkeit. Für mobile Anwendungen ist diese Art der Signalerzeugung aus diesen Gründen häufig nicht einsetzbar.

Die Leistungserzeugung mit Halbleiterbauelementen bietet dagegen den Vorteil, dass sie durch kompakte, handelsübliche Netzteile mit Gleichstrom versorgt werden können. Die Herstellung – im Rahmen einer Massenfertigung – ist deutlich günstiger. Für den Einsatz in mobilen Systemen spricht die geringe Größe. Als gravierender Nachteil ist die im Vergleich zur Röhrentechnik geringe Ausgangsleistung zu nennen. Die erzielbare Leistung sinkt im Zentimeterwellenbereich umgekehrt proportional zur Frequenz. Im Millimeterwellenbereich sinkt sie abhängig von dem verwendeten Bauelement umgekehrt proportional zur zweiten Potenz der

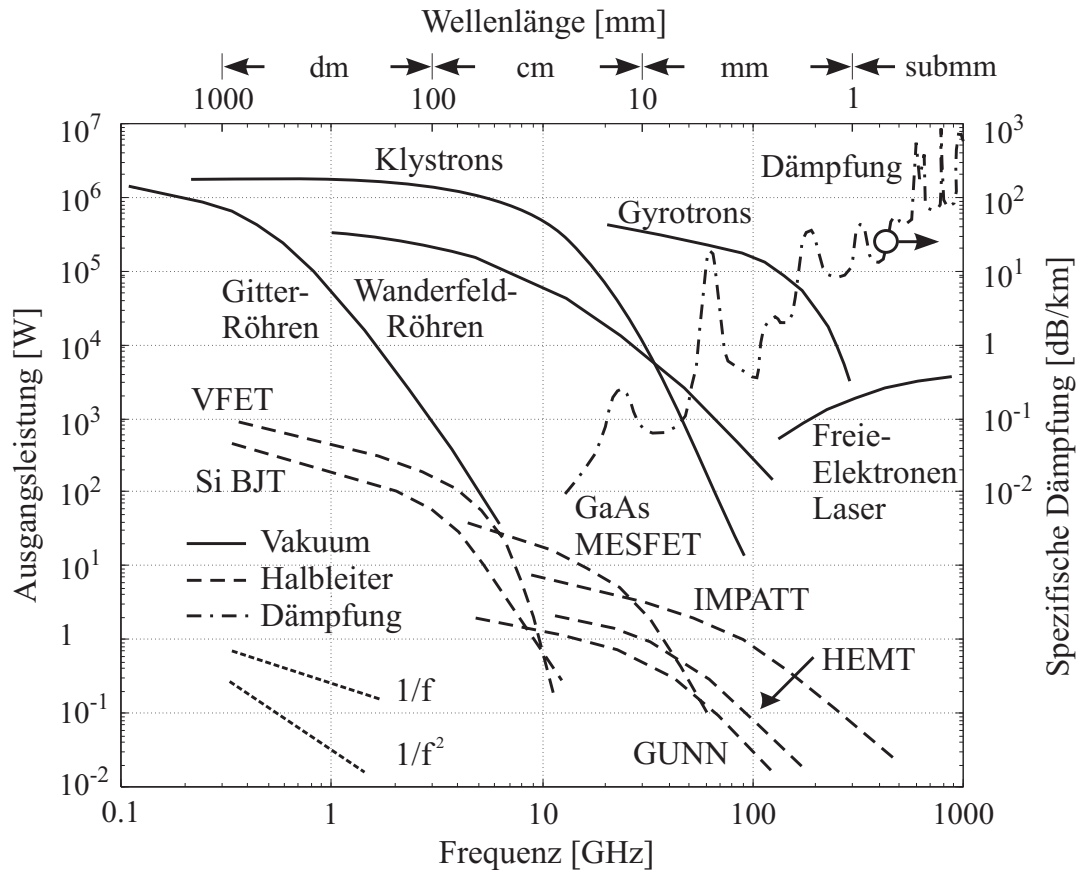


Bild 1.1: Ausgangsleistung einiger Quellen der Hochfrequenztechnik (nach [Yor97]). Spezifische Dämpfung der Atmosphäre in Meereshöhe: Dämpfungsfenster befinden sich unter anderem bei 35, 94, 140 und 220 GHz, Absorptionsspitzen bei 21, 60, 119 und 183 GHz (nach [Kla00]).

Frequenz [Sze90]. Ab gewissen Grenzfrequenzen wird bei fast allen Generatoren sogar von einem Leistungsrückgang proportional zu f^{-3} ausgegangen [Shi89, Eis98]. Begründet wird dieses mit den technischen Problemen der Herstellung zusätzlich zu den schon limitierenden elektronischen Eigenschaften.

Im Frequenzbereich der Zentimeterwellen (3 bis 30 GHz) können durch Transistor-Oszillatoren (Dreipol-Elemente) Ausgangsleistungen bis zu einigen 10 Watt gewonnen werden. Das Leistungspotenzial dieser Elemente nimmt mit steigender Frequenz ab, sodass im Millimeterwellenbereich (30 bis 300 GHz) fast ausschließlich Zweipol-Elemente wie Gunnelemente oder IMPATT¹-Dioden zum Einsatz kommen².

Ab einer Frequenz von 100 GHz finden für die Signalerzeugung Frequenzvervielfacher Verwendung, da die Ausgangsleistung der Zweipol-Elemente stark abnimmt. Ausgehend von ei-

¹Die Abkürzung IMPATT leitet sich im Englischen aus **IMP**act **A**valanche **T**ransit **T**ime ab.

²Es ist Gegenstand aktueller Forschung, die Grenzfrequenzen von Transistoren deutlich zu erhöhen.

nem leistungsstarken Grundwellenoszillator wird eine stark nichtlineare Impedanz angesteuert und durch eine geeignete Schaltung eine Oberwelle ausgekoppelt. Eine Hintereinanderschaltung von mehreren Vervielfachern ermöglicht es, Frequenzen von über 1 THz und somit bis weit in den Submillimeterwellenbereich zu erzeugen [Sim99]. Die äußerst geringe erzielbare Leistung in diesem Bereich von weniger als $100 \mu\text{W}$ ermöglicht aber lediglich, Lokaloszillatoren für Heterodynempfänger und somit passive Messsysteme bereitzustellen. Für Sender, also für den Aufbau eines aktiven Systems, ist die Leistung deutlich zu gering.

Trotz der oben genannten Probleme sind die kurzen Wellenlängen sehr attraktiv, beispielsweise wegen der sehr kompakten Antennen und der erzielbaren Bandbreiten. Tieferer Frequenzbereiche sind häufig für Anwendungen bereits vergeben. Manche Anwendung gibt den hohen Frequenzbereich selbst vor; beispielsweise für die Detektion von Schadstoffen in der Luft durch die Auswertung von Absorptionslinien. Für die interstellare Spektroskopie bieten sich die atmosphärischen Dämpfungsfenster an (beispielsweise 660 und 850 GHz in [Lew93]). Strahlung von interstellaren Gebilden wie Staubnebel, Galaxien und die kosmische Hintergrundstrahlung erreicht hauptsächlich im Submillimeterwellenbereich die Erde [Phi94]. Satellitengestützte Observatorien erlauben eine Beobachtung des gesamten Spektrums, unter Ausschluss der dämpfenden Eigenschaften der Atmosphäre. Dies muss unter der Verwendung kleiner, leichter und verlässlicher Quellen erfolgen, welche mit einer einfachen Niederspannungsversorgung ausreichend Leistung generieren. Andere Anwendungen im Terahertzbereich bestehen in der Plasmadiagnostik.

Frequenzvervielfacher mit Dioden lassen sich allgemein in zwei Kategorien aufteilen: durch die Verwendung von Varistor oder Varaktor als nichtlineares Element. Im ersten Fall wird ein nichtlinearer Widerstand genutzt, resultierend in einem geringeren Wirkungsgrad, aber einer großen möglichen Bandbreite. Im zweiten Fall wird eine nichtlineare Reaktanz eingesetzt, meist eine nichtlineare Kapazität. Varaktor-Frequenzvervielfacher können theoretisch einen Wirkungsgrad von 100 % erreichen (siehe Kapitel 2). Nachteilig im Vergleich zum Varistor-Vervielfacher ist jedoch die geringere Bandbreite und ein deutlich empfindlicheres Verhalten der Schaltung. In der Praxis vermischen sich diese beiden Fälle fast immer, sodass die Klassifizierung nach dem vorwiegend auftretenden Effekt vorgenommen wird.

Zwei der gebräuchlichsten Elemente zur Erzeugung von Leistung durch Vervielfachung im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich werden in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellt. Der Schottkyvaraktor findet überwiegend für die Frequenzverdopplung und -verdreifachung, der HBV nur für die Frequenzverdreifachung Verwendung. Auf der Basis der physikalischen Eigenschaften werden Ersatzschaltbilder (ESB) hergeleitet, mit denen die Bauelemente hochfrequenztechnisch analysierbar sind und mit festen schaltungstechnischen Randbedingungen eine Bauelement-Synthese betrieben werden kann. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wird das üblicherweise verwendete Modell erweitert. Es wird dabei die Möglichkeit

geschaffen, messtechnisch ermittelte Parameter des Varaktors in die Hochfrequenz-Simulation mit einzubeziehen. Die untersuchten Dioden werden in Kapitel 5 in eine Schaltung eingebracht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse Vervielfacher untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Frequenzverdopplern mit Schottkyvaraktoren und auf Frequenzverdreifachern mit Heterobarrieren-Varaktoren liegt. Zwei Entwicklungen werden genauer vorgestellt und messtechnisch charakterisiert. Grundsätzlich wird bei der Schaltungsentwicklung die Verwendbarkeit der Vervielfacher in Multielement-Anordnungen in den Vordergrund gestellt.

Das oben angesprochene Problem der geringen Leistung im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich lässt sich prinzipiell durch die Addition vieler einzelner Quellen (Vervielfacher) lösen. Die Ansteuerung ist auf verschiedene Weise realisierbar. In diesem Frequenzbereich bietet sich die quasi-optische Leistungsteilung und -addition an, da diese für mehr als vier Elemente verlustärmer als z. B. die Leistungsaddition in einem Hohlleitersystem ist. Der in der Literatur propagierte Grid-Vervielfacher [Yor97] besteht aus den folgenden Komponenten: Der Eingangsstrahl bei der Fundamentalfrequenz wird durch ein Paar dielektrischer Scheiben angepasst an die Impedanz der nachfolgenden Schaltungsteile. Hinter einem Filter trifft der Strahl auf den eigentlichen Vervielfacher. Das Diodengrid ist eine periodisch mit Dioden besetzte Struktur, mit welcher die gewünschte Harmonische erzeugt werden kann. Die Oberwelle wird meist in einer anderen Polarisierung abgestrahlt, sodass die Frequenztrennung verhältnismäßig einfach ist. Nach einer erneuten Impedanztransformation – wie am Eingang – wird die Harmonische dem Ausgang zugeführt. Durch eine Integration sehr vieler Elemente kann die Ausgangsleistung gesteigert werden. Die Leistungsaddition findet im Freiraum statt. Damit werden die Verluste reduziert, die üblicherweise in Netzwerken zur Leistungsaddition als begrenzender Faktor vorherrschen. Für eine Abstrahlung ohne Nebenkeulen muss das Grid eine Periodizität von weniger als einer Wellenlänge der höchsten Harmonischen aufweisen. Dies kann insbesondere bei einer hohen Verlustleistung zu einem Wärmestau führen.

Durch eine geeignete Strahlformung mit Hilfe eines Phasengitters kann die Ausbreitung der Nebenkeulen verhindert und so die Begrenzung des Interelementabstandes vermieden werden. Diese Phasengitter wurden in dieser Art erstmalig in [Sha98] vorgestellt, die Analyse und Synthese für den Millimeter- und Submillimeterwellenbereich in [Hoe02] fortgeführt. Im Kapitel 7 wird auf solche Multielement-Frequenzvervielfacher eingegangen. Die für die Multielementvervielfacher benötigten quasi-optischen Schaltungskomponenten werden in Kapitel 6 beschrieben. Im letzten Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich gegeben.

Die vorliegende Arbeit an Frequenzvervielfachern wurde im Rahmen einer DFG³-Forschergruppe durchgeführt. Ein Projektziel dieser Gruppe ist es, exemplarisch bei $n \times 150$ GHz Leistung zu erzeugen. Beginnend mit einer quasi-optischen Leistungsaddition

³Deutsche Forschungsgemeinschaft

mehrerer Halbleiteroszillatoren bei 150 GHz sollen die Harmonischen durch Frequenzvervielfacher entstehen. Aus diesem Grund liegt die Eingangsfrequenz untersuchter Vervielfacher immer bei 150 GHz. Nach Verdopplung bzw. Verdreifachung betragen die Ausgangsfrequenzen 300 bzw. 450 GHz.