Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 50 (1959)
Heft: 10

Artikel: Mikrowellen
Autor: Tank, F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057793

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Mikrowellen

Von *F. Tank*, Zürich

621.3.029.6

Es wird ein kurzer Überblick gegeben über einige Fragen des gegenwärtigen Standes von Forschung und Anwendung der kürzesten elektrischen Wellen. Der Übergang wird hervorgehoben von einer Technik der Wellen, die mittels Elektronenröhren erzeugt werden, zu einer Technik der Wellen atomaren Ursprungs, die physikalischen Quantengesetzen gehorchen.

L'auteur étudie brièvement quelques questions de l'état actuel de la recherche et des applications des ondes électriques les plus courtes. Mis en relief est le passage d'une technique des ondes produites par des tubes électroniques, à une technique des ondes d'origine atomique, lesquelles obéissent aux lois physiques des quanta.

Einleitung

Mit dem Eindringen der Atomphysik in die Sphäre der Technik zeichnet sich der Anfang eines neuen technischen Zeitalters ab. Die Energiegewinnung aus den Reaktionen der Atomkerne und das weite Feld der Elektronik sind dafür Beispiele. Auch die Technik der kürzesten elektrischen Wellen, der Mikrowellen, ist hier zu nennen. Man kann sie sowohl als eine optische Elektrotechnik, als auch als eine elektrotechnische Optik bezeichnen. Aufs eindrücklichste erweist sich dabei die tiefe Wahrheit von *Maxwells* vor nahezu hundert Jahren gewonnener Einsicht von der Wesensgleichheit des Lichtes und der elektromagnetischen Wellen. Die einst unerschlossene Spanne zwischen dem optischen Ultrarot und den Radiowellen ist heute überbrückt. Hier liegt das Reich der Mikrowellen; hier reichen sich der Ingenieur und der Physiker zu gemeinsamer Forschungsarbeit die Hand. Der grosse Aufschwung setzte nach dem 2. Weltkriege ein; die mit unerhörtem Aufwand geförderte Radartechnik erwies sich als ein äusserst fruchtbarer Boden späterer friedlicher Entwicklung. Die Mikrowellentechnik bildet ein Gebiet von besonderer Eigenart. Präzision, Zugänglichkeit für die theoretische Behandlung bei hohen Anforderungen an sie, ein Reichtum an neuen Möglichkeiten und interessante Ausblicke auf Künftiges zeichnen es aus. Im Rahmen eines kurzen Aufsatzes ist es nicht möglich, Einzelheiten zur Darstellung zu bringen; Umrisse müssen genügen.

Schaltungstechnik

Die Schaltungstechnik der Mikrowellen ist vor allem durch die Radar-Anwendungen bekannt geworden. Sie ist eine Schaltungstechnik der Wellen; Hohlleiter und Hohlraumresonatoren sind ihre Elemente. Hier gibt es Verzweigungen, Transformatoren, Phasenschieber, Dämpfungsglieder, Brückenschaltungen, Filter, Leistungsmesser und vieles andere mehr. Leistungen von geringen Bruchteilen von Milliardstel Watt bis hinauf zu Spitzenwerten von mehreren Millionen Watt werden umgesetzt und gemessen. Als Beispiel eines neuartigen Schaltelementes, das es in der ganzen übrigen Elektrotechnik nicht gibt, seien die Ferrit-Rotatoren oder Gyratoren genannt. Sie beruhen auf dem Prinzip der Faradayschen Drehung der Schwingungsebene einer elektromagnetischen Welle in einem magnetisierten, nicht leitenden Körper. Aus diesen Rotatoren lassen sich Ventile bilden, die eine Welle wohl in einer bestimmten Richtung hindurchlassen, aber nicht in entgegengesetztem Sinn. Man kann dadurch die unerwünschte Rückwirkung von Impedanzänderungen gewisser Teile eines Netzwerkes auf den Generator vermeiden.

Mikrowellen-Elektronik

Die üblichen Elektronenröhren mit Intensitätssteuerung des Emissionsstromes durch ein einfaches Gitter versagen im Gebiete höchster Frequenzen. Nicht nur verkleinern sich zwangsläufig mit abnehmender Wellenlänge die Dimensionen der Röhren, wodurch sich hohe Anforderungen an die Präzision der Herstellung sowie unüberwindbare Schwierigkeiten in der Fortleitung der Verlustwärme ergeben, sondern es wird vor allem die Laufzeit der Elektronen von der Kathode zur Anode vergleichbar mit der Periodendauer der Schwingungen; dadurch ändert sich die Arbeitsweise der Röhre vollkommen.

Ein neues Verstärkerprinzip war zu suchen, das den folgenden Anforderungen zu genügen hatte: Ausnützung der Elektronenträgheit, Einbau der Schwingkreise in das Innere der Röhre und enge Kopplung zwischen Schwingkreisen und Elektronenströmung, günstige Dimensionen. Dieses Prinzip fand sich in den Plasmawellen des Kathodenstrahles. Der Kathodenstrahl erhält dadurch Eigenschaften eines Schaltelementes, ja einer Leitung, und Mikrowellen-Verstärker und -Generatoren, wie Klystron, Wanderfeldröhre (travelling wave tube), Magnetron usw., lassen sich aus dem Prinzip der Plasmawellen einheitlich herleiten.

Erteilt man den durch eine Gleichspannung auf hohe Geschwindigkeit gebrachten Elektronen eines Kathodenstrahles durch ein Steuersignal (Eingangssignal) geringe Geschwindigkeitsänderungen, so bilden sich auf dem Strahl Maxima und Minima der Elektronendichte aus. Raschere Elektronen holen langsamere Elektronen, die früher emittiert wurden, ein, oder — was dasselbe sagt — langsamere Elektronen fallen auf später emittierte, schnellere zurück. So entsteht eine Ordnung im Strahl, eine ziemlich komplizierte Strahlstruktur, die sich durch sog. Plasmawellen beschreiben lässt. Die Raumladungsverdichtungen erzeugen ihrerseits abstossende Coulomb-Kräfte, wodurch die Raumladungen ausgeglichen und den Elektronen wieder zusätzliche Geschwindigkeiten erteilt werden. In der Plasmawelle findet daher ein periodischer Wechsel von potenieller Energie der Raumladungsverdichtungen und kinetischer Energie der Elektronen statt. Diese hat ihr Maximum dort, wo die Raumladungsverdichtungen vorübergehend abgebaut sind (Fig. 1). Dieses sehr fruchtbare Konzept wurde 1939

erstmalig von *Hahn* und *Ramo* [1] [1]) aufgestellt und von den späteren Forschern ausgebaut und verfeinert.

Bezeichnet v ein von Ort und Zeit abhängiges Spannungsmass im Elektronenstrahl und i ein eben-

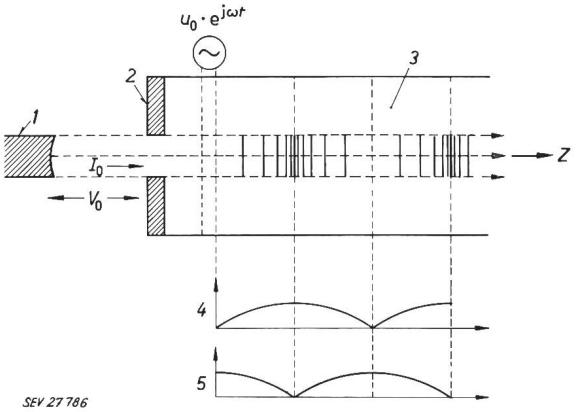

Fig. 1
Konzept der Plasmawellen
nach *Hahn* und *Ramo*
1 Kathode; *2* Anode; *3* Laufraum; *4* Amplitude der Raumladungsdichte; *5* Geschwindigkeitsamplitude; I_0 Elektronenstrom (Gleichstrom); V_0 Anoden-Gleichspannung; Z Richtung der Strahlachse

falls von Ort und Zeit abhängiges Strommass, so lassen sich bei kleinen Amplituden für die Plasmawellen folgende Ansätze machen:

$$v = \mathrm{V}(z)\, e^{j\omega t}$$

$$i = \mathrm{I}(z)\, e^{j\omega t}$$

In gewisser Verwandtschaft mit der Theorie der Leitungen gilt dann

$$\left(j\beta_e + \frac{\partial}{\partial z}\right) V = j\,\frac{V_0}{2\,|I_0|} \cdot \frac{\beta_p{}^2}{\beta_e} I$$

$$\left(j\beta_e + \frac{\partial}{\partial z}\right) V = j\,\frac{|I_0|}{2\,V_0}\,\beta_e\, V$$

dabei bedeuten:

V_0 Beschleunigungs-Gleichspannung der Elektronen
I_0 Elektronen-Gleichstrom
ω Kreisfrequenz des Eingangssignals
ω_p Plasma-Kreisfrequenz $\left[\omega_p = \sqrt{\frac{e}{m} \cdot \frac{\varrho_0}{\varepsilon_0}}\right]$
β_e Fortpflanzungskonstante der Elektronen $\left[\beta_e = \frac{\omega}{u_0}\right]$
β_p Fortpflanzungskonstante des Plasmas $\left[\beta_p = \frac{\omega_p}{u_0}\right]$
u_0 Elektronengeschwindigkeit nach Durchlaufen der Spannung V_0 $\left[u_0 = \sqrt{2\,\frac{e}{m}\,V_0}\right]$

Aus diesen Gleichungen folgt

$$\mathrm{V}(z) = (A_1 \cdot e^{j\beta_p z} + A_2 \cdot e^{-j\beta_p z})\, e^{-j\beta_e z}$$

$$\mathrm{I}(z) = Y_0\,(A_1 \cdot e^{j\beta_p z} - A_2 \cdot e^{-j\beta_p z})\, e^{-j\beta_e z}$$

mit der «charakteristischen Admittanz»

$$Y_0 = \frac{|I_0|}{2\,V_0} \cdot \frac{\omega}{\omega_p}$$

A_1 und A_2 sind Integrationskonstanten.

Das Resultat lässt sich dahin interpretieren, dass sich auf dem Strahl zwei Wellen ausbreiten mit den Phasengeschwindigkeiten

$$(v_{ph})_1 = u_0 \left(1 - \frac{\omega_p}{\omega}\right)$$

und

$$(v_{ph})_2 = u_0 \left(1 + \frac{\omega_p}{\omega}\right)$$

die durch Überlagerung Schwebungen bilden. Die eine Phasengeschwindigkeit ist kleiner als die Elektronengeschwindigkeit u_0, die andere ist um denselben Betrag grösser. In Wirklichkeit kommen noch einige Komplikationen hinzu; so, wenn es sich um grosse Amplituden handelt, oder wenn zum Zwecke der Strahlkonzentration ein achsenparalleles Magnetfeld angelegt wird. Im zweiten Fall erhält der Strahl mehr oder weniger ausgeprägte periodische Einschnürungen.

Das klassische Klystron ist in seinen Grundzügen nun verständlich (Fig. 2).

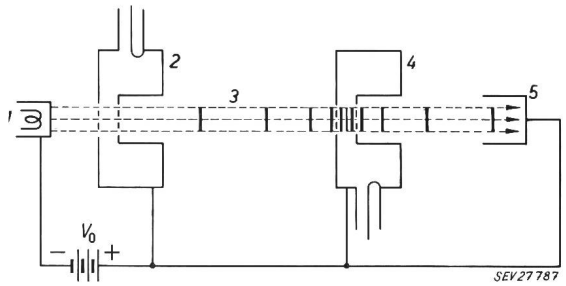

Fig. 2
Schema eines Klystrons
1 Kathode; *2* Eingangskreis; *3* Elektronenstrahl; *4* Ausgangskreis; *5* Elektronen-Kollektor; V_0 Anoden-Gleichspannung

Der Eingangskreis sowie der Ausgangskreis sind ringartige Hohlraumresonatoren, die in der Mitte je zwei parallele Gitter tragen; durch diese tritt der Elektronenstrahl hindurch. Die Eingangswechselspannung am ersten Gitter verursacht die Geschwindigkeitsmodulation im Strahl und dadurch die Plasmawellen. Durch diese wird der Ausgangskreis angeregt. Er empfängt Wechselstromleistung, die letztlich dem Vorrat an kinetischer Energie der Elektronen entnommen ist und daher die Eingangsleistung erheblich übersteigen kann: das Klystron ist dann ein Verstärker.

Das Klystron ist sehr vielseitig verwendbar. In Rückkopplungsschaltung dient es als Oszillator. Eine besonders einfache Ausführung eines solchen ist das Reflexklystron, das noch für Wellen von weniger als einem Zentimeter Wellenlänge gebaut wird, wenn auch mit schwacher Leistung. Klystrons lassen sich in Kaskade schalten; es ergibt sich auf diese Weise das Mehrkreisklystron. Nach Überwindung ausserordentlicher, technologischer Schwierigkeiten gelang es,

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Klystrons für sehr grosse Ausgangsleistungen herzustellen. Sie sind weniger für Anwendungen in der Nachrichtentechnik (Radar, Scatter Propagation) als für die Zwecke der Atomforschung (Linearbeschleuniger für Elektronen) gedacht. Der Betrieb erfolgt dann nicht kontinuierlich, sondern in Impulsen von etwa einer Mikrosekunde Dauer mit Folgefrequenzen von einigen hundert bis wenigen tausend Impulsen pro Sekunde. Im Mikrowellenlaboratorium der Universität Stanford (California) wurden z. B. verschiedene Typen von Hochleistungsklystrons entwickelt [2]. Das 30-Megawatt-Klystron, bereits 1953 beschrieben, arbeitet bei etwa 10 cm Wellenlänge ($f = 2857$ MHz). Die Gleichstrom-Beschleunigungsspannung V_0 beträgt bei normalem Betrieb während der Impulsspitzen ungefähr 325 kV, der Strahlstrom I_0 185 A. Doch ist eine Leistungssteigerung möglich, und bei nahezu 400 kV Strahlspannung ergeben sich dann während eines Impulses, bei einem Wirkungsgrad von angenähert 43 %, rund 30 Millionen W höchstfrequente Ausgangsleistung.

Wenn man, ausgehend vom Mehrkreisklystron, die Zahl der Resonatoren vermehren und diese gleichzeitig zusammenrücken will, so entsteht ein Leitungsgebilde von der Struktur einer elektrischen Verzögerungsleitung, längs welcher sich das Signal als Welle mit verminderter Geschwindigkeit fortpflanzt. Die einzelnen Resonatoren sind nun miteinander gekoppelt und verlieren daher mehr oder weniger ihre ausgesprochenen Resonanzeigenschaften; die Verzögerungsleitung wird infolgedessen breitbandig. Deren Anregung erfolgt im wesentlichen kontinuierlich, und es kommt alles darauf an, dass sie phasenrichtig stattfindet. Zu diesem Zweck muss die Phasengeschwindigkeit der elektromagnetischen Signalwelle annähernd bis auf die Geschwindigkeit der Elektronen reduziert werden. Es tritt dann ein sehr merklicher Energieaustausch zwischen Elektronenstrahl und Signalwelle ein. Ist daran vor allem die langsamere Plasmawelle mit der Phasengeschwindigkeit $v_{ph} = v_e \left(1 - \frac{\omega_p}{\omega}\right)$ beteiligt, so findet eine Verstärkung der Signalwelle statt. Im andern Fall, bei vorwiegendem Energieaustausch mit der schnelleren Plasmawelle, $v_{ph} = v_e \left(1 + \frac{\omega_p}{\omega}\right)$, ergibt sich eine zusätzliche Dämpfung; es wird dann elektromagnetische Energie in kinetische Energie der Elektronen verwandelt.

Röhren der geschilderten Art werden als Wanderfeldröhren oder «Travelling wave tubes» bezeichnet; ihre Erfindung verdankt man *Kompfner*. Es sind vielerlei Formen von Verzögerungsleitungen vorgeschlagen worden; am bekanntesten ist die Spirale (Helix, Schraube), die als Spule mit verteilter Kapazität und Selbstinduktion wirkt, aber mit erheblicher Steighöhe ausgebildet wird. Die Wanderfeldröhren haben Bedeutung erlangt als Breitbandverstärker in Richtstrahlketten; es lassen sich mit ihnen Verstärkungen von 20...40 db erzielen. Bei Impulsbetrieb lässt sich die Ausgangsleistung ausserordentlich steigern. Die Wanderfeldröhre findet dann vor allem Anwendung als Elektronenbeschleuniger in physikalischen Forschungslaboratorien; die erreichbaren Spannungsspitzenwerte können eine halbe Milliarde Volt übersteigen.

Man kann die Signalwelle auch am Ende des Elektronenstrahls einführen und entgegen der Elektronenströmung gegen dessen Anfang laufen lassen. Auch in diesem Fall ist Verstärkung möglich. Der «Backward wave amplifier» zeichnet sich durch eine Reihe bemerkenswerter Eigenschaften aus. In Rückkopplungsschaltung wird er zu einem Oszillator, dessen Frequenz sich einzig durch Regelung der Betriebspannung in sehr weiten Grenzen verändern lässt. Solche Oszillatoren sind hinunter bis zu 1,5 mm Wellenlänge gebaut worden [3].

Die bisher betrachteten Typen von Wanderfeldröhren werden als 0-Typen bezeichnet. Ihnen ist der gerade Elektronenstrahl mit Fokussierung durch ein achsenparalleles Magnetfeld gemeinsam. Kreuzt man das Magnetfeld zur Strahlrichtung, so entstehen die M-Typen. Sie kommen in der Regel in Ringform vor. Beispiele dafür sind der Magnetron-Verstärker, der Magnetron-Oszillator, das Carcinotron (Backward wave oscillator) und andere. Auch hier baut sich die theoretische Behandlung auf die Theorie der Plasmawellen auf. Die Anwendung erstreckt sich ebenfalls auf die drei Gebiete: Verstärkung, Beschleuniger, Oszillator. Bei Impulsbetrieb können ebenfalls Spitzenwerte der Ausgangsleistungen bis zu mehreren hundert Kilowatt erreicht werden.

Schliesslich muss eine Grenze der mit Hilfe der Elektronenstrahl-Technik herstellbaren, kürzesten elektrischen Wellen vorhanden sein. Sie ist durch die Tatsache gegeben, dass der Strahlstrom aus diskreten Trägern, den Elektronen, mit ihren endlichen Ladungen besteht. Den Anteilen, aus welchen sich eine resultierende Welle aufbaut, fehlt schliesslich die Kohärenz. Diese Grenze liegt bei technisch erzielbaren Raumladungsdichten bei etwa 0,1...1,0 mm. Kürzere Wellen können nur noch durch quantenmechanische Methoden erzeugt werden.

Mikrowellenspektroskopie

Es ist schon eingangs darauf hingewiesen worden, dass sich der Bereich der technisch erzeugten Mikrowellen teilweise überdeckt mit demjenigen von Lichtwellen atomaren Ursprungs, sei es in Absorption, sei es in Emission. Durchstrahlt man ein mit einem Gas gefülltes Rohr mit Mikrowellen, so zeigen sich bei geeigneten Bedingungen schwache Absorptionen bei sehr scharf definierten Frequenzen. Die erste derartige Beobachtung machten 1934 *Cleeton* und *Williams* an Ammoniak.

Seither hat sich ein grosses wissenschaftliches Gebiet entwickelt, die Mikrowellenspektroskopie, welche die klassische Spektroskopie in sehr wichtiger Weise ergänzt und ihr an Genauigkeit mindestens ebenbürig ist. Tausende von Spektrallinien im Bereiche von wenigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern Wellenlänge

sind bis heute gemessen worden. Aus den Spektren sind Schlüsse auf den Molekülbau und auf die Abstände der Atome innerhalb der Moleküle möglich. Besonders genau lässt sich auch der Einfluss elektrischer und magnetischer Felder auf die Frequenz der

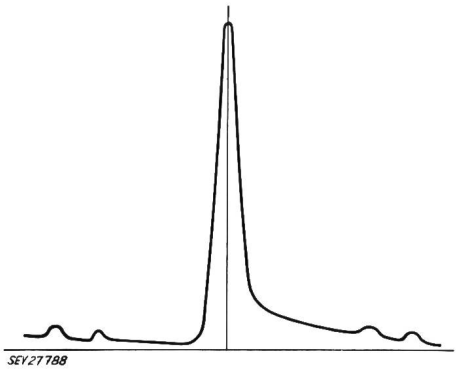

Fig. 3
(3,3)-Absorptionslinie im Inversionsspektrum des NH_3
f = 23 870,13 ± 0,02 MHz; Abstand der Satelliten von der Hauptlinie ± 1,7 und ± 2,3 MHz

Spektrallinien (Starkeffekt, Zeemaneffekt, Aufspaltung der Spektrallinien) untersuchen, ferner der Einfluss der Kernmassen (Isotopeneffekte), des Kernaufbaues (Hyperfeinstruktur, Fig. 3) und anderes mehr.

«Maser»

Mikrowellen molekularer Herkunft in Emission zu erzeugen, ist ein hohes Ziel der Forschung. Es wurde 1955 erstmalig erreicht durch *Gordon, Zeiger* und *Townes* an der Columbia-Universität. Nach der Quantenlehre findet Emission einer elektromagnetischen Welle durch ein Atom oder Molekül statt, wenn das Gebilde von einem Zustand höheren Energieinhaltes in einen Zustand niedrigeren Energieinhaltes übergeht. Für die Frequenz ν der Strahlung gilt

$$\nu = \frac{W_2 - W_1}{h},$$

wo $W_2 - W_1$ den Energieunterschied und h die Plancksche Konstante bedeuten ($h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Ws²). Bei Absorption wird durch die eingestrahlte Welle der Frequenz ν der Energieinhalt des Atoms oder Moleküls um den Betrag $h\,\nu$ von W_1 auf W_2 gehoben.

Die verschiedenen diskreten Energiezustände unterliegen nun einer statistischen Verteilung gemäss dem Boltzmannschen Gesetz. Im thermodynamischen Gleichgewicht sind energiereichere Zustände weniger häufig als energiearme Zustände. Besitzen N_1 Teilchen den Energiebetrag W_1 und N_2 den Energiebetrag W_2, so gilt

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{W_2 - W_1}{kT}}$$

k ist dabei die Boltzmannsche Konstante (k = $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/Grad) und T die absolute Temperatur.

Um eine Emission zu erzwingen, muss man erstens eine Anreicherung von Teilchen des höheren Energieniveaus bewerkstelligen und zweitens diese Teilchen veranlassen, die Strahlung gleichphasig abzugeben. Das zweite geschieht dadurch, dass man sie durch eine Welle der Emissionsfrequez anregt («stimuliert»). Es liegt dann eine Verstärkeranordnung vor. *Townes* und seine Mitarbeiter haben dafür den Ausdruck MASER geprägt (Microwave amplification by stimulated emission of radiation). Eine schwache Strahlung löst Strahlung erheblich grösserer Leistung von gleicher Frequenz aus. Wenn es auch noch nicht gelungen ist, mit solchen Verstärkern bedeutende Endleistungen zu erzielen, so besitzen sie doch einen sehr wichtigen Vorteil in dem geringen Eigenrauschen: sie erlauben die Verstärkung besonders schwacher Signale.

Wie bei jedem Verstärker können auch hier auf dem Rückkopplungsweg Schwingungen erzeugt werden, aber diese sind nun atomaren Ursprungs und zeichnen sich durch ungewöhnliche Konstanz aus. Mit Hilfe des Maser-Prinzipes lassen sich Uhren höchster Genauigkeit verwirklichen. Es braucht über hundert Jahre, bis der Unterschied in den Zeitangaben solcher Uhren nur eine Sekunde beträgt. Bemerkenswerte Forschungsbeiträge leistete in dieser Hinsicht das «Laboratoire suisse de recherches horlogères» in Neuchâtel. Die Ammoniak- und Caesium-Maser sind berühmt geworden durch ihre Anwendungen in den Atomuhren. Es handelt sich dabei um Strahlen von Ammoniak- oder Caesiumdampf, bei denen durch ein inhomogenes elektrisches Feld die energiereicheren und weniger energiereichen Teilchen getrennt werden. Die ersten werden einem abgestimmten Hohlraumresonator zugeführt und durch eine schwache, einfallende, elektromagnetische Welle zu synchroner Strahlung veranlasst.

Vielversprechende Erfolge erzielte man mit dem Festkörper-Maser. Die Ergebnisse sind die Frucht einer engen Zusammenarbeit zwischen Festkörperphysik und Mikrowellentechnik. Paramagnetische Ionen werden in geringer Konzentration in einen nichtleitenden, diamagnetischen Kristall eingebaut. In einem angelegten, konstanten Magnetfeld führen die Ionen bzw. deren für den Paramagnetismus verantwortliche, mit einem magnetischen Moment und einem Drehimpuls (Spin) begabte Elektronen, eine Präzessionsbewegung aus, erhalten also die Eigenschaften von Oszillatoren; gleichzeitig nehmen sie verschiedene diskrete, durch die Quantengesetze vorgeschriebene Lagen ein. Von diesen Lagen ist jede durch einen bestimmten Energiegehalt ausgezeichnet, und Übergänge zwischen ihnen sind — entsprechend der Energiedifferenz — mit Emission oder Absorption von Strahlung verbunden. Die Zahl der Teilchen N_1, N_2, N_3 . . ., denen feste Energieniveaux W_1, W_2, W_3 . . . zukommen, ist wiederum durch das Verteilungsgesetz von *Boltzmann* gegeben. Dies zeigt für ein Drei-Niveau-Schema Fig. 4a.

Es ist nun das folgende Kunststück möglich: Durch eine kräftige elektromagnetische Welle der Frequenz $\nu_{13} = (W_3 - W_1) / h$, mit welcher der Kristall bestrahlt wird, erfolgt eine Zufuhr an Energie, und die Zahl der Energiezustände im Niveau 3 wird auf

Kosten derjenigen im Niveau 1 vermehrt, und zwar so lange, bis beide Beträge gleich, nämlich $(N_1+N_3)/2$ sind. Durch diesen «Pump-Effekt» ist das thermodynamische Gleichgewicht gestört; im Energieniveau 2 befinden sich mehr Teilchen als im Niveau 1 (Fig. 4a). Durch «Stimulierung» mit einer von aussen zugeführten schwachen Strahlung der Frequenz $\nu_{12} = (W_2 - W_1)/h$ kann wieder ein Übergang zum Niveau 1 erzwungen werden unter Abgabe von gleichphasiger Strahlung aller beteiligten Teilchen. Bei genügender Energieakkumulierung durch den Pumpeffekt liegt dann eine Verstärkerwirkung vor. Die Wahl des äusseren Magnetfeldes beeinflusst den Betrag der Energieniveaux, so dass ein solcher Festkörper-Maser auf die Frequenz der zu verstärkenden Welle einregulierbar ist. Das Rauschen dieser Verstärker ist äusserst gering, worauf insbesondere *Bloembergen* [4] aufmerksam gemacht hat. Die Energiespeicherung muss allerdings bei einer Frequenz erfolgen, die höher ist als diejenige der Abstrahlung.

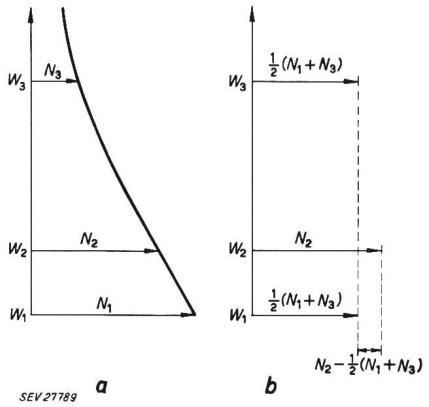

Fig. 4
Energieniveaux und Besetzungsdichte eines dreistufigen Festkörper-Masers
a vor der Energiespeicherung (thermodynamisches Gleichgewicht)
b nach der Energiespeicherung (Pumpeffekt)

Anwendungen

Jeder Bereich der ausserordentlich umfangreichen Skala technischer Wechselstromfrequenzen hat seine besonderen Anwendungen und Anwendungsmöglichkeiten. Mikrowellen sind für die Nachrichtentechnik unentbehrlich; sie verdanken hier ihre Nützlichkeit vor allem der Möglichkeit der Richtstrahlbildung (Bündelung) durch Hohlspiegel und Trichter (Hörner), ferner der Möglichkeit von sehr breitbandigen Übertragungen mit grossem Informationsgehalt, wie sie bei der Mehrkanaltelephonie und dem Fernsehen vorkommen. Auf dem Richtstrahlwege lassen sich mehr als tausend Telephongespräche gleichzeitig führen. Wo es sich nicht um letzte Genauigkeit handelt, wird der klassischen Vermessung durch die Radiotelemetrie mit der Zeit ein fühlbarer Konkurrent entstehen. Die Bedeutung für die physikalische Forschung (Elektronenbeschleuniger, Festkörperphysik, Molekular-Spektroskopie) ist bereits erwähnt worden. Voraussichtlich wird die Mikrowellentechnik in der Plasmaphysik, d. h. in der Physik hochionisierter Gase noch eine wichtige Rolle zu spielen haben. Schliesslich ist die Astronomie an der Mikrowellentechnik und ihren Fortschritten sehr interessiert. Mit ihren Radioteleskopen, die mit riesigen Hohlspiegeln ausgerüstet sind, empfängt sie schwächste Signale aus dem Weltraum (dunkle Sterne, Wasserstoff-Wolken). Die Verwendung von Maser-Verstärkern wird dabei höchste Empfindlichkeit zulassen. Dann darf man sogar daran denken, Messungen auszuführen, die bei der Beantwortung schwierigster kosmologischer Fragen, wie z. B. der kontinuierlichen Erzeugung von Wasserstoff im Weltraum, Entscheidendes auszusagen haben.

Literatur

[1] *Hahn, W. C.:* Small Signal Theory of Velocity-modulated Electron. Beams. Gen Electr. Rev. Bd. 42 (1939), Nr. 6, S. 258...270.
Ramo, S.: Space Charge and Field Waves in an Electron. Beam. Phys. Rev. Bd. 56 (1939), 1. August, S. 276...283.

[2] *Chodorow, M., E. L. Ginzton, J. Jasberg, J. V. Lebacqz* und *H. J. Shaw:* Development of High-Power Pulsed Klystrons for Practical Applications. Proc. IRE Bd. 47 (1959), Nr. 1, S. 20...29.

[3] *Karp, A.:* Backward-Wave Oscillator Experiments at 100 to 200 Kilomegacycles. Proc. IRE Bd. 45(1957), Nr. 4, S. 496...503.

[4] *Bloembergen, N.:* Proposal for a New Type Solid State Maser. Phys. Rev. Bd. 104 (1956), Nr. 2, S. 324...327.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *F. Tank*, Vorstand des Institutes für Hochfrequenztechnik an der ETH, Sternwartstrasse 7, Zürich 7/6.

Mehrphasenwattmeter beruhend auf der magnetischen Widerstandsänderung von Halbleitern[1)]

Von *M. J. O. Strutt* und *S. F. Sun*, Zürich

621.317.784.025.4: 621.315.592

Einleitung

In früheren Veröffentlichungen sind Mehrphasenwattmeter beschrieben worden, welche auf dem Halleffekt von Halbleitern beruhen [1; 2; 3][2)]. Hiebei wurden die halbleitenden Verbindungen Indiumantimonid und Indiumarsenid verwendet. Die Elektrizitätsträger weisen in diesen Verbindungen eine viel grössere Beweglichkeit auf als in Germanium oder Silizium. Infolgedessen ist der Halleffekt ebenfalls viel grösser. Eine Folge des Halleffektes ist die magnetische Widerstandsänderung, welche meistens nach *C. F. Gauss* benannt wird. Sie besteht darin, dass der Widerstand eines Plättchens zunimmt, wenn ein transversales magnetisches Feld angelegt wird [4]. Diese magnetische Widerstandsänderung hängt stark von der Gestalt des verwendeten Halbleiterplättchens ab (Fig. 1). Sie ist

[1)] Diese Arbeit wurde im Institut für höhere Elektrotechnik der ETH durchgeführt. Sie wurde zum Teil durch einen Kredit des Aluminiumfonds Neuhausen finanziert.

[2)] Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.