

MICROONDE

Comitato di Redazione: Prof. Nello Carrara, *Presidente*
Ing. Sergio Bertini
Prof. Pietro P. Lombardini
Ing. Maurizio Piattelli

Direttore Responsabile: Ing. Sergio Bertini
Segreteria: Alda Affortunati

La rivista MICROONDE è pubblicata periodicamente dalla Società SMA - Villa S. Martino a Soffiano
Via del Ferrone - Firenze (Italia). Autorizzazione del Tribunale di Firenze n. 3271 del 14/9/1984.

Tutti i diritti sono riservati, compreso il diritto di riproduzione, diffusione e traduzione. Nessuna
parte della pubblicazione può essere riprodotta in una qualsiasi forma (fotocopie, microfilm o
altro procedimento) senza autorizzazione scritta della Soc. SMA.
Il contenuto degli articoli impegna soltanto gli Autori.

INDICE

- 3 Note editoriali**
S. Bertini
- 5 Prefazione**
N. Carrara
- 19 The Detection of Microwaves**
N. Carrara
- 32 Radar Frequency Usage**
M. I. Skolnik
- 42 Fattori meteorologici che influenzano la portata navale del radar**
P. P. Lombardini
- 64 L'applicazione delle microonde in medicina**
M. Piattelli
- 85 Elaborazione di immagini radiometriche a microonde
ottenute in ambienti differenti**
G. Calamai, G. Marsiglia, M. Bernabó, V. Sacco

NOTE EDITORIALI

Questa pubblicazione è dedicata prevalentemente alla divulgazione di lavori teorici e sperimentali svolti nell'ambito della nostra organizzazione ed in quella di Società partecipate e controllate dalla S.M.A. In particolare la Rivista presenterà contributi di Ricerca e Sviluppo nel campo del Radar e delle tecniche e tecnologie ad esso associate o derivate nonché articoli di « management » di Ingegneria e Logistica.

Nell'intento di dare a questa iniziativa anche la connotazione di veicolo culturale, la Direzione ospiterà in ogni numero il contributo di uno studioso esterno invitato a dibattere un argomento di interesse scientifico e industriale. La Rivista è periodica ma la frequenza di pubblicazione è legata alla disponibilità di una adeguata quantità e qualità di contributi.

Microonde è il titolo della Rivista. La scelta è stata suggerita sia dal nostro indirizzo tecnico attuale e futuro sia dalla storia della nostra Società. La S.M.A. opera dagli inizi della sua attività nel campo delle microonde, da 1 GHz a 12 GHz, e negli ultimi anni ha iniziato ad operare nella banda millimetrica spingendosi fino a 100 GHz. Inoltre le microonde hanno per la nostra Società un significato particolare in quanto alcuni fra i protagonisti, in Italia, dello studio e delle applicazioni di tecniche e tecnologie in tale campo di frequenze fanno parte della nostra organizzazione.

Primo fra tutti, il Prof. Nello Carrara, Presidente onorario della S.M.A. e Presidente della SELESMAR, che nella Sua Prefazione racconterà gli sviluppi del Centro Microonde, oggi IRQE, nonché la parte da Egli svolta nell'indirizzare la S.M.A. a progettare e costruire radar a microonde.

Il Prof. Pietro P. Lombardini, attualmente Consulente Scientifico della nostra Società, è stato Direttore Tecnico della S.M.A. nel periodo 1949-52 contribuendo a realizzare il primo Radar Italiano a microonde. Il Prof. Lombardini, dopo l'esperienza S.M.A., si trasferì negli Stati Uniti dove ha insegnato per venti anni alla « Moore School » in Pennsylvania ed è stato Consulente di molte Società Americane.

L'Ing. Maurizio Piattelli, attualmente Condirettore Generale della nostra Società, iniziò la sua attività nel campo del Radar fino dal 1949 quando raggiunse la S.M.A., provenendo dal Centro Microonde. In un quadro di difficile disponibilità di letteratura tecnica e di tecnologia, il Piattelli studiò e realizzò, nel corso de-

gli anni cinquanta, antenne, componenti attivi e passivi in guida d'onda e coassiali operando nella banda delle onde centimetriche. Nel 1956 iniziò con il Prof. Righini esperienze di Radioastronomia, fondando il Laboratorio Elettronico ad Arcetri. Il Piattelli è da considerarsi, senza dubbio, protagonista determinante degli sviluppi e dei progressi tecnico-scientifici della nostra Società.

Ospite di questo primo numero è il Dott. Merrill I. Skolnik, Sovrintendente della Divisione Radar del Naval Research Laboratory (USA), certamente uno dei più profondi studiosi del Radar nel mondo. Lo Skolnik, che ringraziamo per il Suo contributo, esamina nell'articolo le diverse applicazioni del Radar in relazione all'impiego delle frequenze dislocate nella gamma delle Microonde.

Il Prof. Carrara, nella Sua Prefazione, offre una sintesi storico-scientifica delle tappe fondamentali degli studi sull'Elettromagnetismo. In relazione al fatto che è stato riconosciuto al Prof. Carrara la paternità della parola « microonde » (apparsa, per la prima volta in un numero della rivista IRE del 1932) è stato ritenuto interessante ripubblicare quell'articolo con il gentile permesso della Direzione della Rivista IEEE.

Uno dei più interessanti sviluppi, negli ultimi anni, dei radar di scoperta di superficie installati a bordo nave, è stato quello di sfruttare il fenomeno propagativo della superfrazione che consente di avvistare bersagli di superficie e terrestri al di là dell'orizzonte radar. Questo fenomeno, chiamato altresì propagazione anomala o « ducting », è determinato da molti fattori ambientali ed è legato alla presenza di un « condotto » vicino alla superficie terrestre che intrappola l'energia radar. Il Prof. Lombardini, studioso di propagazione, esamina, nel Suo articolo, i fattori meteorologici che influenzano questo fenomeno.

La radiometria, tecnica che consente la scoperta di oggetti mediante la rivelazione passiva dell'energia elettromagnetica emessa in funzione della temperatura assoluta, è un campo nel quale la S.M.A. opera da molti anni con programmi di Ricerca e Sviluppo nelle bande centimetriche e millimetriche. L'Ing. Piattelli presenta nel Suo articolo, una visione generale dell'impiego delle microonde in medicina ed in particolare analizza le tendenze, nel futuro, degli sviluppi della radiometria e della ipertermia.

L'ultimo articolo tratta della elaborazione di mappe radiometriche a microonde riportando i risultati di analisi ed esperienze eseguite da un gruppo di studiosi del nostro Reparto Ricerche, coordinati dal Dott. Guido Calamai.

S. Bertini

PREFAZIONE

Centocvent'anni or sono, nel 1864, James Clark Maxwell (1831-1879), uno dei più grandi fisici di tutti i tempi, pubblicava in una memoria, divenuta celebre, dal titolo « A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field » [1], i risultati cui era pervenuto studiando le geniali esperienze di Faraday sui fenomeni elettrici e magnetici e il nuovo modo con cui Faraday cercava di interpretarle.

Nel secolo precedente, fra il 1760 e il 1860 le conoscenze nel campo della elettrologia si erano straordinariamente arricchite. Charles Augustin Coulomb (1736-1806), con la sua bilancia di torsione, aveva potuto provare che le forze meccaniche, che agiscono fra le cariche elettriche e fra i poli magnetici, obbediscono a leggi formalmente identiche alla legge di Newton della gravitazione universale.

*Queste leggi, che erano state trovate in precedenza, ma non divulgate, da Henry Cavendish (1731-1810), consentirono di utilizzare, per lo studio dei fenomeni elettrici e magnetici, la poderosa massa di lavoro sperimentale e teorico, compiuto nel campo della meccanica dai grandi Matematici che proseguirono l'opera di Newton: i molti Bernoulli, Leonhard Euler (1707-1783), Alexis Claude Clairaut (1713-1765), Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783), Joseph Louis Lagrange (1736-1813), autore della *Mécanique analytique*, Pierre Simon de Laplace (1749-1827) autore della *Mécanique celeste*; e questa già lunga lista potrebbe continuare. La meccanica Newtoniana raggiunse il suo massimo splendore quando U. J. J. Le Verrier, e indipendentemente J. C. Adams giunsero nel 1846 a prevedere l'esistenza del pianeta Nettuno, in base alle perturbazioni dell'orbita di Urano.*

[1] J. C. Maxwell: *Phil. Trans. Royal Soc.* p. 459-512 London (1864).

D'altro canto Alessandro Volta (1745-1827) dopo lunghi studi e la realizzazione di geniali dispositivi sperimentali, quali l'elettroforo, l'elettrometro condensatore, era arrivato alla invenzione della pila.

Invenzione che ebbe una importanza enorme, perché la pila poteva generare correnti di intensità di gran lunga superiore di quelle che potevano essere fornite dalle macchine elettrostatiche. Secondo François Arago (1786-1853) la pila è « il più meraviglioso strumento mai inventato dal genere umano ».

Le forti correnti fornite dalla pila consentirono subito nuove scoperte, fra cui la scomposizione dell'acqua (W. Nicholson, 1753-1815), l'isolamento di due nuovi metalli, il sodio e il potassio (Sir Humphry Davy, 1778-1829).

Particolarmente importante fu la scoperta di H. C. Oersted: la corrente elettrica che percorre un filo conduttore disposto parallelamente all'ago magnetico di una bussola, lo fa deviare, pur rimanendo nel piano orizzontale. Poco dopo A. M. Ampère (1775-1836) ne poteva formulare la teoria matematica, che egli, dopo alcuni anni, espone nella « Mémoire sur la théorie mathématique de phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience ».

Maxwell conobbe e apprezzò moltissimo il lavoro di Ampère, che chiamò « il Newton dell'elettricità », per aver saputo compendiare esperienze e teorie dell'elettrodinamica in una sola formula, la legge di Ampère:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (\text{div } \mathbf{J} = 0)$$

dove \mathbf{H} è il campo magnetico prodotto dalla corrente elettrica $\left(\frac{\text{ampère}}{m}\right)$ e \mathbf{J} è la densità della medesima corrente $\left(\frac{\text{ampère}}{m^2}\right)$.

E veniamo finalmente a Faraday. L'opera di Faraday (1791-1867), sia nel campo della chimica sia in quello della fisica, è estremamente vasta. Egli fu un grande e geniale sperimentatore. Per quello che qui interessa, metteremo in evidenza due soli punti del suo immenso lavoro. Primo punto. Convinto che, come una corrente elettrica produce un campo magnetico, anche un campo magnetico dovesse produrre una corrente elettrica, fece in proposito molti tentativi senza successo, finché nel 1831, osservò che una spira di filo conduttore chiusa su se stessa, immersa in un campo magnetico, era percorsa da corrente elettrica tutte le volte che il campo magnetico

concatenato con la spira variava. Secondo punto. Faraday, con la limatura di ferro, aveva messo in evidenza le linee di forza del campo magnetico, ed era convinto che dovessero esistere anche linee di forza elettriche. Le linee di forza elettriche e magnetiche richiamarono fortemente l'attenzione di Faraday sullo « spazio » interposto fra le cariche elettriche o fra i poli magnetici, spazio realmente vuoto oppure occupato da materia, e gli suggerirono una interpretazione dei fenomeni elettrici e magnetici, diversa da quella newtoniana (azione a distanza) allora imperante.

Il giovane Maxwell, che aveva cominciato a studiare l'elettricità verso il 1855, nel 1856 pubblicò un primo studio sulle nuove idee di Faraday intitolato « On Faraday's lines of force » [2]. Proseguendo i suoi geniali sforzi per esprimere in forma matematica le nuove conoscenze nel campo della elettrologia, dopo ben otto anni pervenne nel 1864 alla stesura della memoria citata in principio ed in fine al famoso « A Treatise on electricity and magnetism » [3].

Maxwell, con un prodigioso geniale lavoro, era infine pervenuto a compendiare tutte le conoscenze nel campo della elettrologia in quattro equazioni vettoriali differenziali, ora ben note agli elettronici. Egli osservò che non sempre si può ammettere $\text{div } \mathbf{J} = 0$. Più in generale è:

$$\text{div } \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

ove ρ è la densità di carica elettrica.

Laddove $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ è diversa da zero, la legge di Ampère non può più valere perché per qualunque vettore \mathbf{A} deve essere $\text{div rot } \mathbf{A} = 0$; fu così indotto a ipotizzare un nuovo tipo di corrente, che denominò corrente di spostamento, ammettendo che, così come una corrente costituita da cariche elettriche in moto si circonda con linee di forza magnetiche, altrettanto debba accadere per una corrente costituita da linee di campo elettrico in variazione, appunto la corrente di spostamento definita come $\frac{d\mathbf{D}}{dt}$. Il vettore $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$,

[2] J. C. Maxwell: *Trans. Cambridge Phil. Soc.* Vol. 10 p. 1-3 (1856).

[3] J. C. Maxwell: *Oxford University Press* (1873).

denominato spostamento (o induzione) elettrico è ottenuto moltiplicando il campo elettrico \mathbf{E} per un coefficiente ϵ , dipendente dal mezzo in cui si svolgono i processi in esame; coefficiente detto costante dielettrica del mezzo. ($\mathbf{E} \frac{\text{newton}}{\text{coulomb}}$, $\epsilon \frac{\text{farad}}{\text{m}}$; nel vuoto $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$).

Con l'introduzione della corrente di spostamento, tale che $\text{div} (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) = 0$, risulta:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

cui si aggiunge l'equazione:

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

dove $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$, essendo μ un coefficiente dipendente dal mezzo (nel vuoto $\mu = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{newton}}{\text{amp}^2}$); \mathbf{B} è il vettore induzione magnetica ($\frac{\text{newton}}{\text{amp. m}}$).

Valgono inoltre le equazioni:

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho, \text{div } \mathbf{B} = 0.$$

Le quattro precedenti equazioni costituiscono il fondamento di tutte le nostre conoscenze nel campo dell'elettrologia classica, e per quanto si riferisce al nostro discorso basterà ricordare che nel caso più semplice in cui possono essere applicate, nel caso dello spazio vuoto, esse ammettono una soluzione sorprendente. Ammettono la possibilità dell'esistenza di onde elettromagnetiche, propagantesi con velocità espressa da $1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$, esattamente eguale alla velocità della luce nel vuoto.

Ovviamente questo non poteva essere un risultato casuale. Fu subito pensato che le onde luminose dovessero essere senz'altro onde elettromagnetiche.

Strano a dirsi, la meravigliosa costruzione matematica di Maxwell fu accolta in Inghilterra con molta perplessità. Lo stesso W. Thomson, Lord Kelvin of Largs, che pure con i suoi lavori nel campo dell'elettrologia aveva certamente ispirato Maxwell, non la apprezzava adeguatamente. E Faraday, intimorito dal difficile formalismo matematico, domandava a Maxwell « Quando un matematico impegnato nella ricerca sulle azioni e sugli effetti fisici è giunto alle sue conclusioni, non è possibile che queste siano esposte nel linguaggio ordinario con la chiarezza e precisione che hanno nelle formule matematiche? ».

In Europa la teoria di Maxwell fu per lungo tempo ignorata. La corrente di spostamento appariva piuttosto che una realtà fisica, un artificio matematico per soddisfare la condizione $\text{div rot } \mathbf{H} = 0$.

La verifica sperimentale della teoria di Maxwell si fece lungamente attendere. La prova sicura della sua validità fu raggiunta soltanto nel 1888, ventiquattro anni dopo il lavoro fondamentale di Maxwell e dopo la morte prematura del suo autore.

Come è ben noto la prova definitiva si deve al grande fisico tedesco H. Hertz (1857-1894).

Già nell'ottobre del 1886 Hertz aveva ottenuto oscillazioni a frequenze molto elevate con un dipolo alimentato a scintilla, e aveva rivelato la presenza delle onde elettromagnetiche irradiate a distanza dal dipolo con un risonatore, realizzato con una spira aperta di filo conduttore. Alle estremità della spira scoccava una scintilla, quando era investita dalle onde in arrivo. Con straordinaria abilità tecnica e con grande acume Hertz perfezionò queste prime esperienze, rielaborò formalmente la teoria di Maxwell, e poté riprodurre con onde elettromagnetiche di lunghezza compresa fra 66 cm e 1,5 m le ben note fondamentali esperienze dell'ottica.

In precedenza aveva ottenuto nello spazio libero onde stazionarie di lunghezza 4 e 9,6 m. I risultati di queste ricerche furono pubblicati da Hertz appunto nel 1888 [4].

Gli esperimenti di Hertz ebbero grande risonanza nel mondo scientifico e furono ovunque ripetuti con tecniche sempre più perfezionate. Da noi Augusto Righi, professore a Bologna, riuscì a realizzare oscillatori a scintilla che generavano con particolare efficienza onde centimetriche [5].

[4] H. Hertz: *Wiedemann Ann.* Vol. 34, p. 610-623 (1888).

[5] A. Righi: *Acc. dei Lincei*, Vol. 2°, p. 505-565 (1893).

Contemporaneamente Guglielmo Marconi, di appena 21 anni, con geniale intuizione pensò di utilizzare le onde elettromagnetiche per comunicare a distanza. Le sue prime esperienze ebbero successo ed ebbe così inizio la travolgente storia della «Telegrafia senza filo».

Gli oscillatori a scintilla di Hertz, di Rigbi, dei contemporanei, generavano treni di onde smorzate. Onde persistenti furono ottenute e largamente utilizzate per comunicazioni a grande distanza da V. Poulsen nel 1902 utilizzando le proprietà dell'arco elettrico, e da E. F. W. Alexanderson nel 1909, con speciali alternatori ad alta frequenza; ma si trattava in ogni caso di onde lunghe molte centinaia di metri.

Finalmente, nell'arco di tempo compreso fra il 1905 e il 1920, dopo la scoperta delle proprietà rettificatrici del diodo (J. A. Fleming [6]) e dopo la utilizzazione del triodo sia per la rivelazione sia per la generazione di onde persistenti (Lee de Forest [7], A. Meissner [8]), le telecomunicazioni con onde elettromagnetiche ebbero un prodigioso sviluppo.

Tuttavia anche i tubi elettronici presentavano dei limiti. I tempi di transito degli elettroni fra gli elettrodi e le capacità inter-elettrodiche non consentivano la generazione di onde di lunghezza inferiore a qualche decimetro.

L'intera immensa gamma delle onde elettromagnetiche dalle più corte, corrispondenti ai raggi γ , ai raggi X, alla luce visibile, fino alle onde chilometriche delle cosiddette stazioni ultrapotenti, come quella di Coltano in Italia, era disponibile, ad eccezione di un relativamente brevissimo intervallo, fra i raggi infrarossi e le onde decimetriche.

Ma nel 1920 Barkhausen e Kurz [9] scoprirono fortuitamente che particolari tubi elettronici, alimentati con griglia positiva generavano, sia pure con piccola potenza onde centimetriche. Quasi contemporaneamente fu trovato un altro dispositivo elettronico, atto a generare onde centimetriche, il magnetron (A. W. Hull [10], E. Ha-

[6] J. A. Fleming: *Proc. Royal Soc.* Vol. 74, p. 476-487 (1905).

[7] Lee de Forest: *Trans. AIEE*, Vol. 25, p. 725-763 (1906).

[8] A. Meissner: *Electrician*, Vol. 73, p. 702 (1914).

[9] H. Barkhausen e K. Kurz: *Phys. Zeits.*, Vol. 21, p. 1-6 (1920).

[10] A. W. Hull: *Phys. Rev.*, Vol. 18, p. 31-61 (1921).

bann [11], K. Okabe [12], K. Posthumus [13], N. Carrara [14]). Così con questi nuovi strumenti fu possibile accedere anche alla stretta banda ancora inesplorata. Anche le onde centimetriche furono in breve tempo utilizzate per le telecomunicazioni; già nel 1931 A. G. Clavier [15] aveva realizzato un collegamento attraverso il Canale della Manica, fra Dover e Calais, e contemporaneamente io stesso avevo effettuato un collegamento fra Livorno e La Spezia con onde di 30 cm [16].

In quella occasione avevo utilizzato anche per la ricezione un tubo a griglia positiva. Lo studio che avevo compiuto in proposito fu pubblicato sui *Proceeding of IRE* [17] dove denominai Microonde (Microwaves), le onde centimetriche. Questa denominazione, di cui mi è stata riconosciuta la paternità, nel « *Symposium on Modern Advances in Microwave Techniques* » [18], ha avuto fortuna ed è oggi universalmente adottata.

Le tecniche per la produzione e la ricezione delle microonde differivano notevolmente dalle tecniche classiche; cavità risonanti in luogo di circuiti oscillatori a costanti concentrate, guide d'onda e microstrip, in luogo di linee bifilari, trombe e illuminatori in luogo delle ordinarie antenne, tubi di Barkhausen e Kurz, magnetron e klystron in luogo di triodi e così via.

La guerra, coll'avvento del radar, promosse grandemente il progresso di queste tecniche. Questo progresso fu ottenuto negli Stati Uniti col concorso di gran numero di tecnici e scienziati, molte centinaia, fra cui alcuni premi Nobel, e costò ancor di più della bomba atomica.

Anche da noi, durante la guerra, fu tentata e infine, anche se troppo tardi, raggiunta, la realizzazione del radar, che, ancor prima dell'inizio delle ostilità, era stato inventato e proposto alle autorità

[11] E. Habann: *Zeits. Hochfrequenz Techn.*, Vol. 24, p. 115-120 (1924).

[12] K. Okabe: *Proc. IRE*, Vol. 17, p. 652-659 (1929); Vol. 18, p. 1748-49 (1930).

[13] K. Posthumus: *Wireless. Eng.*, Vol. 12, p. 126-132 (1935).

[14] N. Carrara: *Alta Frequenza*, Vol. 4, n. 1, 1935.

[15] A. G. Clavier: *El. Communications*, Vol. 10, p. 20-21 (1931); *l'Onde Electrique*, Vol. 13, p. 101-125 (1934).

[16] N. Carrara: *III Congresso Naz. degli Ingegneri*, Trieste, Maggio-Giugno 1935.

[17] N. Carrara: *Proc. IRE*, Vol. 20, p. 1615-1625 (1932).

[18] E. Weber: *Symposium on Modern Advances in Microwave Techniques*, Nov. 8-10, 1954, p. 11.

militari dal compianto Prof. Ugo Tiberio [19]. Troppo tardi, sia per la scarsità dei mezzi e degli uomini disponibili, sia per una certa mancanza di fiducia nel raggiungimento del risultato; ma soprattutto per le difficoltà tecniche che allora presentava il problema e per le pesantissime condizioni in cui si poteva svolgere il lavoro, sotto continui bombardamenti, e parlo per esperienza personale perché ho partecipato attivamente a questo lavoro [20].

Per contro in America scienziati e tecnici poterono operare in piena tranquillità nei loro laboratori e nelle loro officine.

Alla fine della guerra la gran massa dei risultati delle loro ricerche fu pubblicata nei ventotto volumi del M.I.T. [21].

Le microonde appartengono alla cosiddetta seconda finestra o finestra radio (la prima è la finestra ottica) attraverso la quale onde elettromagnetiche di lunghezza compresa fra qualche millimetro e qualche metro possono oltrepassare, con limitata attenuazione, l'atmosfera terrestre.

La possibilità di ricevere radioonde provenienti dallo spazio ha ampliato in modo veramente impressionante le nostre conoscenze sull'universo che ci circonda [22] e a lato della classica Astronomia Ottica ha fatto nascere una nuova e già vastissima scienza, la Radioastronomia [23].

Vale la pena di ricordare, anche se molto succintamente, la nascita della radioastronomia.

Nel 1929 Karl Jansky, un giovane radioingegnere del Bell Telephone Laboratories, a Holmdel nel New Jersey, USA, aveva installato una speciale antenna e una speciale apparecchiatura per lo studio dei parassiti atmosferici. L'antenna, da lui detta Giostra, poteva ruotare per esplorare tutto lo spazio circostante. Dopo attente, lunghe, intelligenti osservazioni di questi parassiti, Jansky poté stabilire che un particolare segnale, una specie di sibilo, non

[19] U. Tiberio: *Ricordo del primo Radar Navale Italiano; l'Elettrotecnica*, Vol. 46, n. 3, 1979.

[20] N. Carrara: *Accademia Navale; Secondo Anniversario della morte del Prof. U. Tiberio*

[21] L. N. Ridenour: *Radar System Engineering*, McGraw Hill, Inc. 1947.

[22] P. Maffei: *I mostri del Cielo*, Biblioteca della EST. Mondadori.

[23] M. Hack: *L'universo violento della Radioastronomia*, Biblioteca della EST. Mondadori.

*poteva essere un disturbo proveniente dalla Terra, ma proveniva sicuramente da una zona celeste situata nella Costellazione del Sagittario, sulla lunghezza d'onda di 14,6 m. Jansky pubblicò i suoi risultati in alcune note che comparvero nei *Proceeding of IRE* nel 1932, nel 1933, e nel 1935 e finalmente li espose in un congresso di radioingegneri a Washington nell'aprile del 1937.*

La scoperta di Jansky, che nel seguito fu giudicata da Sir Edward Appleton una delle più brillanti della fisica, cadde praticamente nel vuoto. Praticamente non interessò i radiotecnici, la cui attenzione non era rivolta verso l'astronomia, né interessò gli astronomi, la cui attenzione non era rivolta alla radiotecnica.

Ma non cadde del tutto nel vuoto, perché fu raccolta da un altro giovane radioingegnere, Grote Reber, olandese, che con perseveranza incredibile, superando difficoltà di ogni genere, costruì a sue spese il primo vero radiotelescopio. Con questo radiotelescopio, comprendente una antenna parabolica di ben 9,20 m di diametro, egli poté confermare ed estendere i risultati di Jansky. Dopo Reber, esplose la radioastronomia.

Gli astronomi non poterono più ignorare la enorme massa di nuove informazioni che, trasportate dalle onde elettromagnetiche, attraversavano la seconda finestra, la finestra radio.

Tra le tante informazioni qui ci limiteremo solo a due di straordinaria importanza, che coinvolgono appunto le microonde. La prima riguarda la radiazione a 21 cm di lunghezza d'onda, prevista teoricamente dall'astronomo olandese H. C. Van de Hulst. Questa radiazione viene emessa da atomi di idrogeno, in cui protone ed elettrone hanno spin paralleli, quando lo spin dell'elettrone si capovolge e si dispone antiparallelo. Se per qualche ragione un atomo di idrogeno si trova nel primo stato può rimanervi anche per tempi estremamente lunghi, milioni di anni, se non interagisce con altre particelle. L'osservazione della radiazione a 21 cm ha permesso di riconoscere la presenza dell'idrogeno nello spazio interstellare, la sua distribuzione e i suoi movimenti.

La seconda informazione riguarda la radiazione di fondo, detta anche radiazione fossile a 3°K (tre gradi assoluti, —270° centigradi). La scoperta di questa radiazione si deve a ricerche sulle cause del rumore che disturba le trasmissioni della televisione, affidate a due radioingegneri della Bell Telephone Company R. Wilson e A. Penzias, proprio nella gamma delle microonde. Essi esplorando con una gigantesca antenna in forma di corno le varie direzioni dello spa-

zio, notarono un rumore di fondo costante indipendente dalla direzione di provenienza.

Si dette il caso che nell'Università di Princeton, molto prossima al luogo dove lavoravano Wilson e Penzias, Robert Dicke e James E. Peebles, studiassero il modo di rilevare nello spazio una radiazione di fondo, una radiazione di corpo nero a 3°K, residuo « fossile » della radiazione che doveva avere invaso l'universo all'incirca 15 miliardi di anni or sono. Ebbene il rumore individuato da Wilson e Penzias fu proprio riconosciuto da Dicke e Peebles come la radiazione fossile di corpo nero da loro preveduta, in base alle misure delle lunghezze d'onda coinvolte; da 30 cm in giù.

Queste brevissime notizie potranno dare una sia pur pallida idea dello sviluppo raggiunto attualmente dalla radioastronomia, che continua con ritmo crescente.

Oltre alla radioastronomia, le microonde hanno interessato e interessano molti altri settori. A titolo di esempio ricorderemo che le imprese spaziali non sarebbero state possibili senza il collegamento fra la terra e i veicoli spaziali effettuato con le microonde; che le telecomunicazioni via satellite con microonde hanno avuto un grandissimo e sempre crescente sviluppo; ricorderemo naturalmente il radar nelle sue applicazioni militari e civili, ricorderemo la radiometria, il remote sensing, e non dimenticheremo l'impiego delle microonde in medicina. Di questi argomenti altri parlerà con qualche diffusione in questa rivista.

Vogliamo aggiungere a questo limitato elenco di alcune fra le innumerevoli utilizzazioni delle microonde, alcuni accenni a due interessantissimi progetti presentati rispettivamente nei bollettini 21 e 36 della ESA.

Il primo progetto, quasi fantascientifico, propone un gigantesco sistema spaziale a microonde per la utilizzazione della energia solare. Il secondo si riferisce alla esplorazione della testa della cometa di Halley, una splendida grandiosa cometa il cui passaggio, nel 1910 rimase indelebilmente impresso nella mia mente di bambino.

Il primo progetto [24] parte anzitutto da un esame del pro-

[24] H. Stoewer, D. Kassing: *The Solar Satellite Power System* etc. ESA Bulletin n. 21.

gressivo fabbisogno di energia dell'Europa, da cui risulterebbe che « con 40 satelliti, ciascuno in grado di inviare a terra 5 GW, si potrebbe supplire alla richiesta europea di energia per completare quella disponibile da altre fonti, non rinnovabili, almeno fino agli anni 2000. Un secondo esame compiuto sulla irradiazione solare dimostra che anche nelle migliori condizioni la densità media della potenza che arriva sulla superficie terrestre nell'Europa centrale è meno del 10% della densità di potenza irradiata dal sole. Valutando la densità di potenza totale irradiata dal sole 1350 Watt/m^2 , la potenza media in arrivo sulla terra si riduce solo a 120 Watt/m^2 .

Il gigantesco progetto SPS (Solar Power System), prevede in conseguenza la installazione in orbita geostazionaria di celle che convertano l'energia solare in energia elettrica; assumendo un rendimento di conversione del 15% è possibile ottenere dalle celle solari 200 W/m^2 continui, ad eccezione del breve periodo, meno dell'1%, durante il quale la cella passerebbe nell'ombra della terra. L'energia elettrica catturata dalle celle solari verrebbe poi convertita in energia a microonde e inviata a terra, dove verrebbe raccolta e nuovamente convertita in energia elettrica. Questo progetto richiede ovviamente mezzi giganteschi e la risoluzione di gravissimi problemi tecnici; per questo può apparire fantascientifico.

Riportiamo alcuni dati del progetto.

SPS generation capability	5 million kW
Overall Dimension (km)	5.3×10.4
Power Conversion	Silicon — GaA/As
Satellite Mass (kg)	51×10^6
Construction location	Geostationary earth orbit (GEO)
Transportation	Earth-to-low earth orbit (LEO)
Microwave power transmission	
— Antenna Diameter (km)	1
— DC - RF converter	Klystron
— Frequency (GHz)	2.45
— Rectenna dimension (km)	10×13
— Rectenna power density (mW/cm ²) centre	23
edge	1

Il secondo progetto [25], che prevede l'esplorazione della testa della cometa di Halley, è stato denominato progetto (o missione) Giotto, in quanto in una formella dipinta da Giotto nella Cappella degli Scrovegni a Padova è rappresentata in cielo una grossa cometa, che è sicuramente la cometa di Halley, visibile ai tempi di Giotto. Certamente il progetto è stato denominato Giotto per iniziativa del compianto Professore Giuseppe Colombo, famoso scienziato spaziale, che ha curato il progetto. Come ho già detto vidi da piccolo la grandiosa cometa, e spero di rivederla, sebbene si presenti questa volta in condizioni così sfavorevoli che non sarà facile scorgerla ad occhio nudo. È con grande commozione e tristezza che ricordo quanto Colombo mi scrisse nella sua ultima lettera: « ... spero proprio di vedere quella Cometa che tu vedesti da bambino e che ti auguro di rivedere ancora... ».

A metà del luglio 1985 il lanciatore Ariane immetterà due veicoli dalla stazione di Kourou (Guiana Francese) in una orbita geostazionaria. Uno di questi, appunto quello destinato ad esplorare la testa della cometa, verrà sospinto da un proprio motore in una orbita eliocentrica di trasferimento, giacente nel piano dell'eclittica. Il piano dell'orbita della Cometa è a 162° rispetto al piano dell'eclittica che la Cometa attraverserà in due punti, il 9 novembre 1985 e l'11 marzo 1986. L'incontro del veicolo con la Cometa avverrà in prossimità del nucleo (diametro 6 km) il 13 marzo. Molti esperimenti sono previsti, con gli strumenti di cui il veicolo sarà dotato: Spettrometri di massa (massa neutrale, massa ionica, massa delle polveri) - Analisi del Plasma, Particelle energetiche, Magnetometro e così via. Le informazioni ottenute verranno trasmesse a terra da una antenna principale a disco, ad alto guadagno, del diametro m 1,47 operante in banda S (2.1 GHz uplink, 2.3 GHz downlink) o in banda X (8.4 GHz downlink).

Il veicolo è fornito anche di due antenne a basso guadagno in banda S per le comunicazioni con la Terra e per le operazioni durante l'orbita geostazionaria di riferimento.

[25] G. Colombo: Space Mission to Halley's Comet and Related Activities. ESA Bulletin n. 29.

Mi sia permesso di concludere con alcune note personali.

Come ho già detto negli anni 1930 studiavo e sperimentavo le possibilità della generazione e della ricezione delle onde centimetriche e della loro utilizzazione per le telecomunicazioni presso l'Istituto Elettrotecnico della Marina Militare a Livorno. In un mio lavoro pubblicato nel 1932 sulla più prestigiosa rivista americana i Proceedings of IRE coniai il termine « Microwaves », oggi universalmente adottato. Prima e durante la seconda guerra mondiale collaborai attivamente alla realizzazione del radar inventato e progettato dal compianto Prof. Tiberio.

Terminata la guerra, per l'iniziativa e l'interessamento del Prof. Lombardini, allora segretario del Prof. Colonnetti, presidente del Consiglio Nazionale delle Ricerche, ottenni l'autorizzazione e i mezzi, sia pur modestissimi, per costituire un Centro dove potessero essere ripresi gli studi nel campo delle microonde. Il Centro, denominato Centro Microonde, sorse a Firenze, dove poi mi trasferii avendo ottenuto la cattedra di Onde Elettromagnetiche nell'Università di quella città. L'attività del Centro fino dall'inizio fu molto intensa, ed anche con contributi delle Forze Aeree americane, furono eseguite ricerche in varie direzioni; Spettroscopia molecolare, Risonanze paramagnetiche, Riflessione delle microonde sulle tracce dei meteoriti nell'alta atmosfera, Lenti di configurazione e così via. Tenni la direzione del Centro fino al 1970, quando per limiti d'età dovetti passare le consegne al Prof. Giuliano Toraldo di Francia.

Frattanto il Centro, divenuto uno dei più grandi Istituti del Consiglio Nazionale delle Ricerche, prese la denominazione di Istituto di Ricerca delle Onde Elettromagnetiche, IROE, ed è oggi diretto dal Prof. Vito Cappellini [26].

Nel 1947 ebbi occasione di incontrare un mio vecchio amico e compagno di studi, il Prof. Lorenzo Fernandes. Egli aveva da poco costituito una Società per la costruzione di ottiche per fari, fanali, che, in seguito alle distruzioni provocate dalla guerra, erano molto richieste. La Società era denominata SMA, Segnalamento Marittimo Aereo.

In quella occasione proposi al Fernandes di estendere l'attività

[26] V. Cappellini: IROE, Istituto di Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche del Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze, 1982.

V. Cappellini: IROE-CNR. Convegno: Ricerca sulle Onde Elettromagnetiche. Sviluppo e Prospettive; Firenze, 20 gennaio 1982.

della SMA alla costruzione di radar. Prevedevo, ed era facile previsione, che il radar sarebbe diventato uno strumento indispensabile per la navigazione, e che il radar e i suoi derivati avrebbero interessato sempre più le Forze Armate.

Era una proposta molto coraggiosa, direi di più, temeraria, date le difficoltà che avremmo dovuto superare. Ma non mancavano uomini valorosi che avrebbero potuto affrontarle, e non mancò l'interessamento delle Forze Armate, soprattutto della Marina Militare. Così la SMA diventò una importante Società elettronica che per la preparazione e l'impegno di quanti vi dedicarono e vi dedicano la loro opera è oggi all'avanguardia per l'eccellenza della propria produzione.

Prof. Nello Carrara

Firenze, Settembre 1984

The Detection of Microwaves *

Nello Carrara **

L'articolo riporta i risultati delle ricerche eseguite per stabilire le migliori condizioni nelle quali i triodi possono essere utilizzati per la rivelazione delle microonde (frequenze di circa 10^9 cicli per secondo). Sembra che i triodi rivelatori, che devono avere le loro griglie ad un potenziale largamente positivo e l'anodo ad un potenziale appena inferiore del terminale positivo delle griglie, agiscano semplicemente come diodi rettificatori con elettrodi molto vicini tra loro.

The results of research made to recognize the best conditions in which triodes can be used for the detection of microwaves, (frequencies of about 10^9 per sec) are reported here. It seems that the detecting triodes, which must have their grids at a very high positive potential and the anode at a potential just lower than that of the positive end of the wire, act simply like rectifying diodes with electrodes very near to one another.

I.

A triode with cylindrical electrodes, with a low anode potential and a highly positive grid potential, [1] is capable of generating electromagnetic waves of a very high frequency (microwaves), due to the pendular movement of electrons through the meshes of the grid, between the filament, wire and the anode. Although the theoretical development of the phenomenon is not yet clear in all its phases, the essentials have been discovered by many experimenters. [2] It is easy to design a transmitter of radio signals of

* Decimal classification: R134. Original manuscript received by the Institute, April 2, 1932.

** Regio Istituto Elettrotecnico e delle Comunicazioni della Marina, Leghorn, Italy.

Copyright 1932 IRE (now IEEE). Reprinted, with permission, from Proceedings of the IRE, Vol. 2^o, No. 1^o, pp. 1615-1625, October, 1932.

this type, modulating the microwaves with the methods already known and used in broadcasting at the usual frequencies. These radio signals can be received on a crystal; but, in that case, notwithstanding the use of parabolic reflectors, (which prove to be very efficient because of the very high frequencies of microwaves), it is only possible to cover a very short distance (a few meters) because the receiver has a very low sensitivity and the transmitter gives only a limited power. Thus special valve receivers have been studied. Triodes of the same type as those used for transmission, and fed in a similar way (that is, with very high grid potential and low anode potential) have proved to be very efficient. That various authors, [3] who have given accounts of their experiments of radio communications, explain in some way the reasons why the apparatus they have effected may receive. The practical arrangements generally adopted (superregeneration, circuits oscillating on relatively low frequencies, etc.) seem to be based on the general opinion as follows: [4] the triode must be in a condition just under that necessary for the formation of electronic oscillations, so that it may be set into oscillation every time it is reached by microwaves coming from the transmitter.

After comparative studies of the various systems, an arrangement has been realized, as reproduced in Fig. 1 (*a*, *b*, are two small impedances, made of a few turns of wire) which has allowed us to make experiments, using special triodes, upon waves of down to about 14 cm in length.

We may resume the results of our experiments as follows:

(a) The optimum values of V_i and V_p must be found with a certain accuracy, not letting them have critical values, by means of the input rheostat R and of the potentiometer P . For each value of the tension it is necessary to find the optimum value of anode tension. However the value of V_p for which the reception is found to be stronger, is lower than V_i and increases as V_i increases.

Besides, V_i must not exceed a certain limit, which starts electronic oscillations in the valve. In fact, as soon as these oscillations start (as indicated by an abnormally high value of the anode current, or when upon putting a conductor plate or simply a hand near the valve, the value of the current undergoes strong variation) the reception ends abruptly.

(b) The value of V_a may vary between wide limits, for instance from 100 to 300 volts, without a great variation of the intensity and

quality of the reception. As V_g varies, it is also necessary to vary V_p somewhat.

(c) When the best conditions of V_p , V_g , and V_f , for the reception of waves of a determined frequency have been found, these should prove to be the best for the reception of waves of any other frequency, even an ordinary one. Thus we have also been able to receive waves of 100 and more meters as well.

(d) Accessory circuits, as those meant to obtain superregeneration etc., have proved to have a very limited efficiency and are often harmful.

(e) The low-frequency amplifier or simply the telephones may be inserted either in the anode circuit or in the grid circuit. It has been possible, with the indicated disposition and the help of parabolic mirrors, to cover distances of about 10 kilometers.

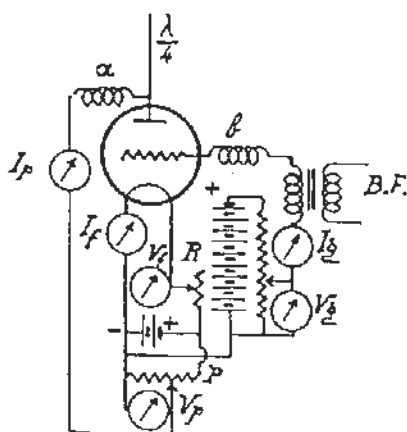


Fig. 1

All this makes us think, contrary to the aforesaid opinion, that reception takes place due to a rectification of the potentials (periodically variable at the frequency of the arriving waves, that is, of the oscillations which the wave collector applies to the anode) rather than through any kind of electronic oscillations inside the receiving triode.

It seems that the triode, in the indicated supply conditions does

not behave differently than a simple rectifying valve; especially considering the fact that, under similar conditions, the reception of waves of any frequency is possible, and that these conditions, (the grid being always at a high potential), are, in fact, a bit different from those necessary for the formation of electronic oscillations. In fact, for a special type of triode, the conditions for the production of waves of 18 cm arc, for instance, $V_p = -30$; $V_g = 220$; $V_f = 4$. And for the reception: $V_p = 1.6$ to 1.8 ; $V_g = 100$ to 300 ; $V_f = 2$ to 2.8 .

II.

In order to judge of the validity of this theory, we have measured the anode current I_p , as a function of the anode potential, under various conditions. The arrangement used for these measurements is that of Fig. 1, having taken off the antenna and the low frequency, B.F. The measurements have been made upon a number of valves, with quite uniform results.

Some of the results obtained with one of these valves are reported in the graphs of Fig. 2 and Fig. 3, where we have used logarithmic scales. In the same graphs the values of V_g and V_f are indicated at which measurements have been made. We notice that as V_p increases, I_p increases very rapidly and in the space from $V_p = +0.5$ to $V_p = +1.6$ the preceding is nearly rectilinear with logarithmic scales.

Within these limits we may write:

$$I_p = CV_p^n \quad (1)$$

in which C and n are constants. The constant n is measured by the slope of the rectilinear parts (since these are quite parallel to each other, we infer that it does not depend upon V_g nor upon V_f) and has a value very near to $5/2$, as we may observe from the slope of the straight line a which is just $5/2$.

C depends, instead, upon V_g and V_f . The graphs show that, all other conditions being equal, I_p decreases as V_g increases, and increases as V_f increases. For values of V_f , higher than 3 volts, electronic oscillations start. The results then obtained are, naturally altogether

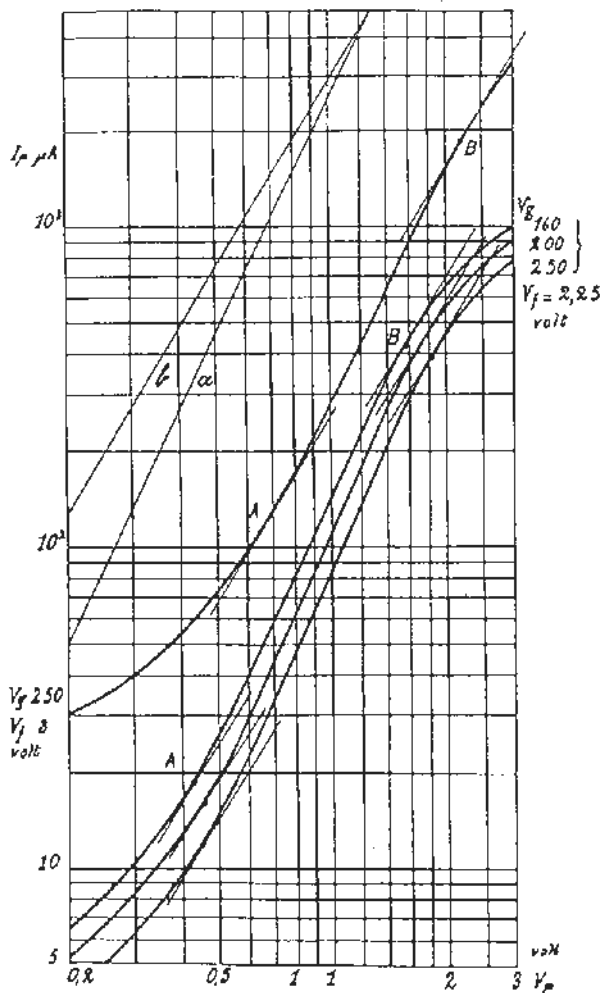


Fig. 2

different. From (1) we infer that the conductivity for each value of V_p is:

$$\frac{dI_p}{dV_p} = CnV_p^{n-1}$$

Consequently we may have the rectification of an alternative potential applied to a plate, in addition to a continuous component, be-

cause in our case n is not unity. Now, rectifications is more efficient the more rapid the variation of the conductivity. The efficiency of the rectification may be thus measured by:

$$\frac{d^2 I_p}{dV_p^2} = n(n-1)CV_p^{n-2}.$$

For $n = 2$ the efficiency is independent of the plate potential, but for $n > 2$ (or lower) the efficiency increases (or decreases) with V_p . In our case, having drawn the straight line b (Fig. 2) having a slope 2, these points, A , B , for which the tangent to the curves has the slope 2 may be easily found on the graphs. Between A and B

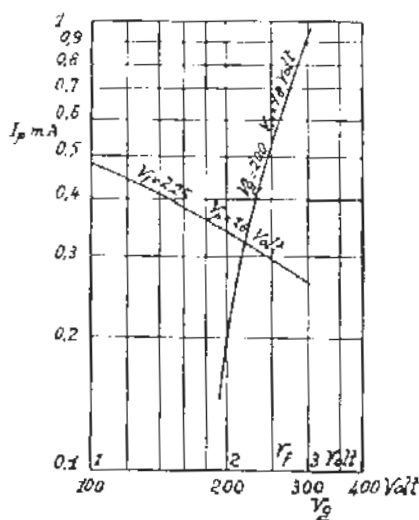


Fig. 3

the slope is more than 2 (in fact it is about $5/2$), so the efficiency increases with V_p . From B on the efficiency decreases, and it decreases also while V_p increases from zero to the value corresponding to A .

The best value for the rectification is thus the value of V_p at points such as B . We see that this value is not much lower than the value at the positive end of the filament, and that it increases as V_f and V_g increase.

All these deductions correspond perfectly to the results of the experimental researches made on the effective reception of microwaves, with the same triodes.

Not only the intensity of reception decreases beginning from $V_p = 0$ and then increases up to a value of V_p just somewhat less than that of V_f , but, the best value of V_p increases with V_f and V_u and, in any case, it coincides with the value that corresponds to points like *B* in Fig. 2.

Considering finally that the filament-plate resistance is always much less than the filament-grid resistance, it is easily understood that it is more convenient to insert the primary winding of the low-frequency transformer *B.F.*, which has a resistance generally very high, in the grid circuit rather than in the plate circuit, although the reception is possible in both cases.

All that has been said before strengthens the hypothesis, expressed at the beginning, that the function of the triode that permits reception of microwaves, is reduced to a simple rectification. Then, considering that the exponent n , in (1) is nearly exactly $5/2$ we can compare the triode to a diode. In fact, we have for a diode, not considering the initial speed of the electrons, and being $0 < V_p \leq V_f$:

$$I_p = \frac{kl}{r_p \beta^2 V_f} V_p^{5/2} \quad (2)$$

where k is a constant, r_p the radius of the plate, β^2 a known function [5] of the ratio r_p/r_c , r_c the radius of the cathode, l the length of the axis of the cathode.

That is, other conditions remaining the same

$$I_p = CV_p^{5/2}$$

which is perfectly in agreement with (1).

Substituting in (2) the values of I_p , as a function of V_p , obtained from the measurements made on the triodes, for certain values of V_g , V_f , etc., it is possible to deduce r_c . Making the calculations, r_c results in our case nearly equal to r_p . So if the radius of the plate of the diode were equal to the radius of the plate of the triode, the radius of the cathode of the diode would have to be greater than the grid radius of the triode.

From this the idea comes that the grid, at a high positive potential, determines the formation in the triode of a virtual cathode near the plate, similarly to what happens in valves with two grids, between the internal grid and the external one.

III.

In this cathode were not formed, that is, if we could do without considering the space charges, due to those electronic densities, which, under normal working conditions, establish themselves between the filament and the grid on one side, and between the grid and the plate on the other, the proceeding of I_p , in function of V_p , could not be that given by experiments.

In fact, let us consider a triode, with its grid at a high positive potential V_g , its equipotential cathode at zero potential, and the plate at a potential of V_p . We shall suppose that:

(a) The initial velocity of the electrons, at the time of their issue from the filament, is nil.

(b) The trajectories of the electrons, between filament and plate, may be considered rectilinear, in the direction of the normal axis common to the electrodes, (for instance, the trajectories are supposed to be so in the theories of electronic oscillations by Barkhausen and Kurz, already mentioned, and in the theories of the valves with two grids).

(c) Space charges between grid and plate are negligible.

It is easily possible to recognize immediately that the portion ηn of the n electrons, emitted by each unit length of filament, in a unit of time, which passes through the grid and penetrates the space between grid and plate, will arrive or not on the plate, (depending whether $V_p \geq 0$ or $V_p < 0$). Hence calling I_s the current emitted by a filament of unit length, the plate current would have the values 0 or $\eta I_s l$ ($l =$ length of the filament) depending whether $V_p < 0$ or $V_p \geq 0$. It must be noticed that, under the assumed conditions η is independent of the potentials and equal to the ratio between the area of the cylinder of the grid and the area which remains free between the meshes of the grid. (We have often found in literature

mention of the constancy of η .) [6] Then reckoning the fall of potential along the filament from V_f to 0, in the case of $0 \leq V_p \leq V_f$, we obtain: $I_p = CV_p$.

Let us consider a section of a triode, obtained with two planes perpendicular to the electrodes and intersecting the points P , R , of abscissas x and $x+dx$ (Fig. 4), wherein the negative end of the filament is considered the origin of the abscissas. The section may be considered as the section of a triode, with an equipotential cathode, at the potential $v_f = V_f/l x$, v_f being the potential across the portion dx of filament. The electrons that the filaments emits, find themselves in the accelerating field of $V_g - v_f$ and, notwithstanding the space charge, they all arrive with a speed V , because of the high value of V_p , (which is higher than that necessary to extract from the

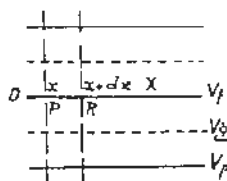


Fig. 4

filament the saturation current) in the place occupied by the grid. A portion will be absorbed by the grid; the remainder will pass through the grid and come in the retarding field $V_g - V_p$ that exists between the grid and the plate. It is understood that, neglecting the space charges, the speed of the electrons passing through the grid, enable them to reach the plate only if $v_f \leq V_p$. With these conditions all the electrons are issued by the portion of filament included between 0 and X (the abscissa of the point that has a potential equal to V_p). Hence the plate current will be:

$$I_p = \int_0^X \eta I_s dx = \eta \frac{I_f}{V_f} V_p. \quad (3)$$

Consequently the plate current ought to increase linearly with V_p until $0 \leq V_p \leq V_f$ and, for $V_p > V_f$, it ought to remain equal to ηI_f , which is in any case the highest value it can assume. The

characteristics of I_p , as a function of V_p , (furnished by experiments, as we have seen) is instead altogether different; consequently it forces us to admit that, a space charge is formed between grid and plate, the effect of which cannot be that of limiting the plate current. Because of this spacial charge, not all the electrons issued by the portion of filament between 0 and X and which have gone through the grid, can reach the plate. A portion must necessarily return towards the grid and this cannot take place unless there exists between grid and plate a geometrical position of points, having values between 0 and X , in which the velocity of the electrons becomes nil, that is, where the potential is equal to that of the points of the filament that have the same abscissa. This geometrical place constitutes a virtual cathode, from which we may assume the plate gets the electrons forming I_p . As the electrodes of the triode are cylindrical, for reasons of symmetry the points of the virtual cathode, that have the same abscissa, will have also the same distance r_c from the filament.

Since n is the number of electrons issued by the filament in one unit of time, for each unit of length in the section dx of the triode already considered, ndx electrons will set forth towards the grid. Of these, ηndx will reach the virtual cathode. Here they will be divided into two portions; one $\alpha \eta ndx$, will reach the plate, the other $(1-\alpha) \eta ndx$ will return. Some, and exactly $(1-\alpha)\eta^3 ndx$, will come back again to the virtual cathode after having passed the grid twice, in the direction of plate to filament and filament to plate; of these $\alpha(1-\alpha)\eta^3 ndx$ will reach the plate while $(1-\alpha)^2 \eta^3 ndx$ will return, and so on.

Hence of the ndx electrons emitted by the section dx of filament in a unit of time, ηndx , $(1-\alpha)\eta^3 ndx$, $(1-\alpha)^2 \eta^5 ndx \dots$ electrons go successively from the grid towards the virtual cathode.

Thus under normal working conditions of

$$n\eta(1 + (1-\alpha)\eta^2 + \dots + (1-\alpha)^m \eta^{2m} + \dots) dx = \frac{n\eta}{1 - (1-\alpha)\eta^2} dx \quad (4)$$

electrons pass through the grid at a time.

Of these

$$\alpha n\eta \frac{1}{1 - (1-\alpha)\eta^2} dx$$

will reach the plate while

$$n(1 - \alpha)\eta \frac{1}{1 - (1 - \alpha)\eta^2} dx$$

will return to the grid.

Calling I_s the saturation current, corresponding to the n electrons, we will have:

$$dI_p = I_s \alpha \eta \frac{1}{1 - (1 - \alpha)\eta^2} dx = \frac{k(V_p - V_f)^{5/2}}{r_p \beta^2} dx \quad (5)$$

$$dI_g = I_s (2 - \alpha)\eta \frac{1}{1 - (1 - \alpha)\eta^2} dx = \frac{k(V_g - V_f)^{3/2}}{r_g \beta'^2} dx. \quad (6)$$

In the calculation of the grid current it has been assumed that the space charge is due to those electrons that return from the virtual cathode to the grid, and to those that go from the grid to the virtual cathode, [7] and where β^2 depends on the ratio r_p/r_c and β'^2 depends on the ratio r_g/r_p . Thus radius r_c of the virtual cathode evidently depends upon potentials $V_g - V_f$ and $V_g - V_p$. As, in our case, V_g is much higher than V_p and V_f , we will admit that r_c has the same value for any value of V_f and of V_p .

From the first of the preceding equations we will then have:

$$I_p = \frac{2}{5} \frac{kI}{r_p \beta^2} \frac{V_p^{5/2}}{V_f}, \quad (7)$$

which is in very good agreement with the experimental results, at least in the portion comprehended between the points *A* and *B* (Fig. 2). The effect of the initial speeds justifies the fact that the experimental characteristics, in the initial portion, are far from rectilinear curves having a slope of 5/2; while, for the portion after *B*, we consider the fact that the plate potential gets near the value of the positive end of the filament, so there must intervene particular conditions in the accelerating and retarding spaces $V_g - V_f$ and $V_g - V_p$.

The formula that we have found does not let us recognize the dependence of I_p from V_g and from V_f . This, in fact, requires the determination of the radius r_c of the virtual cathode as a function of those potentials. This determination could be made by means of the two precedings equations, if serious mathematical difficulties did not interfere.

Having admitted the existence of the virtual cathode, it is possible to determine, as already been told, the order of magnitude of its radius r_c by means of (2).

It is then possible to calculate the time it takes the electrons to cover the distance $r_p - r_c$. Executing the calculations for the valves we have studied, we have obtained, for the said time, values less than the period of microwaves. This is necessary in order to render possible their rectification.

The triode, with its grid at a high positive potential, can thus reveal microwaves, because it behaves as a diode very small internal capacities and in which the inertia of the electrons, because of the extreme nearness of the virtual cathode to the anode, is negligible, even when the plate potential varies periodically at a very high frequency. Conditions such as these would not be possible to realize with an ordinary diode.

CONCLUSIONS

From the experiments and considerations referred to above, it appears clearly a triode detector of microwaves, under the usual conditions, behaves like a simple rectifying diode with its electrodes very near to each other.

ACKNOWLEDGMENT

The author is very grateful to Mr. H. E. Vallauri, and thanks him for his advice and help, and to Mr. M. Isidor of the I.E.C. of the Royal Navy, who has contributed in all the researches.

References

- [1] Barkhausen and Kurz, *Phys. Zeit.*, vol. 1, p. 1, (1920).
- [2] Many works have subsequently appeared. Among those published in Italy, we remember: A. Rostagni, *Atti della R. Acc. delle scienze di Torino*, vol. 66, p. 123, (1931); vol. 10, p. 17; N. Carrara, *L'Elettrotecnica*, p. 874, December 5, (1931).
One may consult also the bibliography of: Hollmann, *Jahr der Draht. Telegraf.*, vol. 33, no. 1, p. 27, (1929); Pierret, *Onde Electrique*, vol. 8, no. 93 (1929). (It would be impractical to report here the complete list, which contains more than 150 items.)
- [3] Shintaro Uda, *Zeit. für Hoch.*, vol. 35, p. 129, (1930).
W. Pistor, *Zeit. für Hoch.*, vol. 35, p. 135, (1930).
Beauvais, *Compt. Rend.*, vol. 187, p. 1288, (1928).
Beauvais, *Onde Electrique*, vol. 9, no. 106, (1929).
Pierret, *Compt. Rend.*, vol. 189, p. 741, (1929).
- [4] Okabe, *Proc. I.R.E.*, vol. 18, no. 6, p. 1028; June, (1930).
- [5] van der Bijl, « The Thermionic Vacuum Tube », p. 66.
- [6] Rostagni, *loc. cit.*
Hyatt, *Phys. Rev.*, vol. 33, p. 1100, (1929).
Lange, *Zeit. für Hochfrequenz.*, p. 105, (1925).
- [7] In order to have the total grid current it is also necessary to consider those electrons that stop on the grid, moving from the filament towards the grid in the space between filament and grid.