

I dispositivi elettronici a vuoto: dall'origine dell'Elettronica alle attuali applicazioni nel campo delle alte frequenze

The vacuum electronic devices: from the origin of Electronics to current applications in the high frequencies field

Gennaro Gelao[□], Roberto Marani[◆], Anna Gina Perri[□]

□ Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione (DEI), Politecnico di Bari, Italia

◆ Istituto di Sistemi e Tecnologie Industriali Intelligenti per il Manifatturiero Avanzato (STIIMA), Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Bari, Italia

Sommario

I dispositivi elettronici a vuoto sono stati alla base delle prime scoperte fisiche dell'Ottocento, partendo dai tubi riempiti di gas a bassa pressione di H. Geissler nel 1857 fino ai primi tubi a vuoto di W. Crookes nel 1870.

L'Elettronica è partita dall'invenzione dei diodi a vuoto di J. A. Fleming nel 1904 fino a giungere all'invenzione dei pentodi da parte di B. D. H. Tellegen nel 1926.

Contemporaneamente i tubi a gas si sono affermati nell'Elettronica di Potenza con gli ignitron ed i thyatron, mentre i tubi a vuoto classici arrivarono alla loro ultima evoluzione con la serie nuvistor che ha coperto poco più degli anni Sessanta dello scorso secolo.

I klystron ed i gyrotron, gli eredi dei tubi a vuoto di potenza per le microonde, sono ancora oggi all'avanguardia della tecnologia. Con questi dispositivi è possibile generare in continuo potenze di qualche MW a frequenze superiori ai 100 GHz.

L'articolo si conclude con un breve cenno riguardante lo stato della ricerca per i nuovi dispositivi a vuoto su chip, che attualmente promettono interessanti applicazioni nel campo delle alte frequenze.

Abstract

Vacuum electronic devices were the basis of the first physical discoveries of the 19th century, starting from the low-pressure gas-filled tubes of H. Geissler in 1857 to the first vacuum tubes of W. Crookes in 1870. The Electronics started from the invention of vacuum diodes by J. A. Fleming in 1904 leading to the invention of pentodes by B. D. H. Tellegen in 1926.

At the same time, gas filled tubes have founded the Power Electronics with the invention of ignitrons and thyratrons, while the classic vacuum tubes reached their latest evolution with the nuvistor series, which covered just over the Sixties of the last century.

The klystrons and gyrotrons, the heirs of the microwave power vacuum tubes, are still today at the cutting edge of technology, and with these devices it is possible to reach in continuous operation powers of 1 MW at frequencies greater than 100 GHz.

The article concludes with a brief overview of the state of research for new on-chip vacuum devices, which currently promise interesting applications in the high-frequencies field.

Keyword

Vacuum electronic devices, vacuum tubes, gas-filled tubes, magnetron, klystron, gyrotron.

1 - Introduzione

I tubi a vuoto, che nella vita moderna di tutti i giorni sono una tecnologia pressoché dimenticata, oltre ad essere stati fondamentali per lo sviluppo dell'elettronica, sono ancora estremamente importanti in alcuni settori avanzati della tecnologia che sono fuori dalla conoscenza comune.

In questo articolo presentiamo una breve rassegna storica dei tubi a vuoto, per arrivare ai dispositivi klystron e gyrotron, gli eredi dei tubi a vuoto di potenza per RF, che attualmente promettono interessanti applicazioni nel campo delle alte frequenze.

2 – Lo sviluppo dei primi tubi a vuoto: brevi cenni storici

I predecessori dei tubi a vuoto sono stati i tubi a gas a bassa pressione sviluppati nel 1857 da Heinrich Geissler (1814-1879).

Geissler era un fisico che, dopo gli esordi iniziali come soffiatore di vetro, si rivelò poi abile costruttore di apparecchi scientifici e abilissimo sperimentatore: alla Rehinische Friedrich-Wilhems Università di Bonn studiò per primo la luce prodotta dal passaggio di correnti elettriche nei tubi con gas a bassa pressione. Questi studi furono alla base della fisica della spettroscopia dei gas. Il dispositivo sviluppato da Geissler consiste in un tubo munito di due elettrodi, un anodo ed un catodo, contenente gas a 100 Pa, nel quale la scarica elettrica produce intensi bagliori di diverso colore a seconda della qualità del gas: col neon si produce una luce di un bel colore giallo aranciato o bluastro se contiene vapori di mercurio. Tali tubi sono tuttora usati per le insegne luminose di negozi o per altri usi di pubblicità.

Nel 1861, proprio usando la spettroscopia, William Crookes (1832-1919), un fisico e chimico del Royal College di Londra, scoprì il tallio e successivamente, usando la pompa a vuoto sviluppata dal chimico Hermann Sprengel (1834-1906), riuscì a ridurre la pressione dei gas contenuti nei tubi sino a 10^{-3} Pa. A tale livello di vuoto sui vetri del tubo si poteva osservare una fluorescenza che, nel 1876, il fisico tedesco Eugen Goldstein (1850-1930) spiegò essere causata da qualche tipo di emissione dei catodi e che chiamò **Kathodestrahlen** (raggi catodici). Nel 1879 Crookes dimostrò che si trattava di raggi caricati negativamente.

Diversi anni dopo, nel 1897, Joseph John Thomson (1856-1940), fisico all'Università di Cambridge, spiegò il fenomeno mostrando che si trattava di particelle cariche negativamente dotate di un rapporto carica/massa molto più alto di quello di un qualsiasi ione atomico, scoprendo così gli **elettroni**.

Nel frattempo, prima della scoperta degli elettroni, si era osservato che un catodo caldo generava correnti più intense, ovvero emetteva più elettroni, la cosiddetta **emissione termoionica**. Diversi ricercatori hanno studiato questa emissione, fra i quali il fisico francese Edmond Becquerel (1820-1891) e il fisico britannico Friederick Guthrie (1833-1886).

La prima legge che ha descritto il legame tra la corrente termoionica e la temperatura del catodo fu quella del fisico britannico Owen Willians Richardson (1879-1959). Tale legge fu poi migliorata dal fisico tedesco Walter Hans Schottky (1886-1976).

L'inventore statunitense Thomas Edison (1847-1931) nel 1883 presentò un brevetto per usare un tubo a vuoto come stabilizzatore di tensione, sfruttando la forte dipendenza della emissione termoionica dalla temperatura del catodo, ma con scarsa applicazione.

Fu il fisico britannico John Ambrose Fleming (1849-1945), mentre lavorava per Guglielmo Marconi (1874-1937), a brevettare nel 1904 un tubo a vuoto, chiamato allora **tubo di Fleming** (oggi **diodo a vuoto**), e lo applicò alla rivelazione delle onde radio. A tale scopo si sfruttava l'asimmetria nella caratteristica della corrente rispetto alla tensione catodo-anodo.

Rispetto al tubo di Crookes, questo diodo presenta un catodo con due terminali allo scopo di permetterne il riscaldamento per effetto Joule. Il progresso ottenuto era nella comprensione del fenomeno e nell'aver trovato un'applicazione fondamentale per le trasmissioni radio. Questa idea ha di fatto fondato l'Elettronica dei tubi a vuoto.

Va ricordato, ad onor del vero, che i diodi a semiconduttore erano già disponibili, il primo a usarli nei suoi esperimenti fu il fisico bengalese Jagadish Chandra Bose (1858-1937). Erano chiamati **diodi a baffo di gatto** poiché costituiti da un filamento di tungsteno (il baffo di gatto) in contatto meccanico superficiale con un cristallo di galena. Dato che questo tipo di contatto superficiale non era affatto stabile meccanicamente, il diodo risultava particolarmente sensibile agli urti e alle vibrazioni e gli utenti erano spesso costretti a perdere molto tempo per cercare di ristabilire il contatto tra il filamento ed il cristallo di galena.

Il tubo a vuoto eliminava queste difficoltà ma presentava il problema della fragilità del vetro, usato come involucro per garantire il vuoto, della limitata durata del catodo, che si consumava in seguito al riscaldamento, e della produzione di calore. Tutti questi problemi rimasero irrisolti per quasi tutta la storia dei tubi a vuoto sino alla introduzione dei tubi in metallo e dei moderni catodi freddi.

Il passo successivo al diodo a vuoto fu compiuto nel 1906, in contemporanea dal fisico statunitense Lee De Forest (1873-1961) e dall'austriaco autodidatta Robert von Lieben (1878-1913), con la introduzione della griglia tra catodo e anodo ottenendo così il **triodo**, il primo tubo a vuoto capace di amplificare. La griglia è un elemento metallico a spirale, sistemato tra catodo e anodo, con un contatto esterno al tubo a vuoto e polarizzato in modo da poter controllare il passaggio degli elettroni.

Le caratteristiche di questi primi tubi a vuoto migliorarono notevolmente grazie al perfezionamento delle tecniche utilizzate per ottenere un vuoto sempre più spinto ed in particolar modo all'invenzione, nel 1915, della pompa a diffusione applicata ai tubi a vuoto dal chimico-fisico statunitense Irving Langmuir (1881-1957).

Una ulteriore fonte di miglioramento fu l'ottimizzazione della geometria degli elettrodi (anodo, catodo e griglia), sviluppata a seguito della comprensione dei meccanismi di funzionamento del triodo, che nelle prime fasi era praticamente assente. Le valvole arrivarono presto ad avere una simmetria cilindrica.

Langmuir osservò che gli elettroni emessi dal catodo tendevano ad addensarsi intorno ad esso creando una carica spaziale che portava a limitare la emissione di altri elettroni. Nel 1913 quindi brevettò un tubo a vuoto, chiamato **tetrodo**, con una ulteriore griglia rispetto a quella del triodo, chiamata griglia per la carica spaziale, posta tra il catodo e la prima griglia, e polarizzata positivamente rispetto al catodo in modo da favorire l'estrazione degli elettroni dal catodo e ottenere maggiori correnti.

Il fisico tedesco Walter Schottky (1886-1976) nel 1917 brevettò un tubo a vuoto, ancora un tetrodo, con una ulteriore griglia rispetto a quella del triodo chiamata griglia schermo. Questa nuova griglia, sistemata tra la prima griglia e l'anodo, aveva lo scopo di isolare il circuito dell'anodo da quello del catodo e veniva collegata ad un circuito che alle alte frequenze presentava una bassa impedenza verso massa. In questo modo la capacità tra catodo e anodo veniva fortemente abbattuta e di conseguenza erano notevolmente ridotti i problemi di oscillazioni non desiderate degli amplificatori.

Poiché la transconduttanza aumentava in maniera considerevole, si riduceva altresì il numero di valvole necessarie per ottenere un determinato guadagno. Infine, l'impedenza di uscita era generalmente molto maggiore di quella del triodo.

Il tetrodo presentava però una funzione caratteristica di uscita, cioè corrente anodica in funzione della tensione anodo-catodo al variare della tensione di griglia, che era caratterizzata, per basse tensioni anodo-catodo, da un tratto a resistenza negativa. Questa impedenza negativa poteva essere usata per produrre oscillazioni, ma quasi sempre il problema principale era quello opposto, cioè evitare le oscillazioni negli amplificatori.

Per risolvere le questioni sopra citate furono sviluppate diverse varianti del tetrodo, come ad esempio il tetrodo a fascio, sino ad arrivare allo sviluppo del **pentodo** nel 1927 da parte dell'ingegnere elettrico olandese Bernard D. H. Tellegen (1900-1990). Nel pentodo compaiono sia la griglia di carica spaziale sia la griglia di schermo per l'isolamento dei circuiti di ingresso e di uscita. Le caratteristiche di uscita non presentavano zone a impedenza negativa, e l'impedenza di uscita e la transconduttanza avevano valori maggiori.

Da quel momento in poi furono introdotti tubi a vuoto con un numero maggiore di griglie per tenere conto delle esigenze dei progettisti di circuiti di poter avere più terminali, dai quali controllare la corrente di uscita con più segnali indipendenti, in modo che una singola valvola potesse svolgere più funzioni contemporaneamente. Così era possibile ridurre il numero dei tubi a vuoto necessari e quindi le dimensioni e il costo dei circuiti, in particolar modo delle radio. La valvola più complessa fu l'**ottodo** con 6 griglie, introdotta nel 1939.

Le ultime evoluzioni delle valvole per apparecchi riceventi sono stati i **nuvistor**, valvole miniaturizzate di dimensioni di circa 2 cm per 1 cm, introdotti nel 1959 come ultimo tentativo di sopravvivere all'arrivo dei transistori. I nuvistor furono impiegati per miniaturizzare gli apparati radio e televisivi a valvole prodotti per tutti gli anni Sessanta (oltre tale periodo non andarono). Erano realizzate con un involucro di acciaio al posto del vetro, eliminando così il problema della fragilità delle valvole, e usavano una base in ceramica come isolante per i piedini.

Le dimensioni ridotte permettevano migliori prestazioni nel campo delle alte frequenze, dal VHF al UHF, di particolare interesse per le trasmissioni televisive. A parte qualche semplificazione meccanica interna, non presentavano innovazioni nel sistema delle griglie.

3 – Valvole a gas a bassa pressione per applicazioni di potenza

Al tempo della invenzione del diodo a vuoto, venivano studiati ancora i tubi a bassa pressione per applicazioni a bassa frequenza per alte tensioni o per alte correnti.

Peter Cooper Hewitt (1861-1921), ingegnere elettrico statunitense, partendo dal tubo di Geissler, sviluppò la lampada a vapori di mercurio e da questa esperienza nel 1902 ottenne la valvola rettificatrice a scarica in vapori di mercurio, **l'ignitron**.

Al posto del catodo metallico dei diodi a vuoto, questa valvola usava un pozzetto di mercurio liquido. Anche in questo caso il catodo era la sorgente degli elettroni mentre l'anodo era di carbonio in modo da avere una bassa emissione termoionica; da queste scelte conseguiva quindi un effetto di raddrizzamento. La principale differenza con le valvole è che l'accensione richiede l'innesco di un arco per una breve durata in modo da ionizzare i vapori di mercurio: gli ioni bombardano il pozzetto di mercurio, lo tengono caldo e favoriscono l'emissione termoionica del mercurio. Questa valvola fu impiegata per molti anni nelle applicazioni industriali di grande potenza per raddrizzare le correnti alternate usate.

Con riferimento al triodo di Robert von Lieben, già descritto al paragrafo 2, dobbiamo aggiungere che il suo non era un tubo ad alto vuoto, ma conteneva vapori di mercurio la cui presenza influiva sulle caratteristiche del dispositivo. Per questo motivo si può vedere la valvola di von Lieben come antenata del **thyatron**, una valvola a gas usata come interruttore per applicazioni di potenza, studiata dal 1914 da Irving Langmuir e poi commercializzata alla fine degli anni '20.

In queste valvole il passaggio della corrente nel gas crea un plasma, cioè un gas ionizzato, la cui elevata conducibilità elettrica è fondamentale per ottenere basse cadute di tensione durante la fase di conduzione. Questo plasma costituisce una carica spaziale che è esattamente quello che si evita che si formi in un tubo a vuoto.

Come conseguenza, il thyatron non ha un comportamento lineare ma ha una conduzione tipo interruttore aperto/chiuso e risulta capace di gestire correnti superiori a quelle di un tubo a vuoto di dimensioni paragonabili con minori cadute di tensione grazie alla conduzione del plasma. Possedendo però catodi ed anodi metallici solidi, i thyatron non riescono a gestire correnti elevate come quelle delle valvole a scarica di mercurio dove il catodo è un metallo liquido, che ovviamente non rischia di fondere.

La riduzione della caduta di tensione e il comportamento tipo interruttore aperto/chiuso sono stati la base dello sviluppo dell'Elettronica di Potenza, che successivamente ha trovato grande evoluzione con i dispositivi elettronici allo stato solido.

4 – Lo sviluppo dei tubi per microonde

Nello sviluppo delle radiotrasmissioni si iniziò dalle trasmissioni sulle onde lunghe per poi arrivare alle trasmissioni con frequenze sempre più elevate. Questo spinse alla ricerca di nuove valvole, attualmente ancora in uso, meglio indicate come tubi a vuoto, capaci di amplificare a frequenze sempre più elevate sino ad arrivare al GHz ed incominciare ad avvicinarsi al THz. Questi nuovi dispositivi mantengono alcune delle caratteristiche delle vecchie valvole, quali il vuoto, l'emissione catodica e il campo elettrico per accelerare gli elettroni, ma aggiungono altri elementi come le cavità risonanti.

Il passaggio dalle valvole classiche a questi tubi per microonde corrisponde al passaggio da circuiti a parametri concentrati a circuito a parametri distribuiti con cavità risonanti. La gran parte di questi tubi a vuoto, che permette di arrivare a potenze dell'ordine dei MW grazie alla loro alta efficienza energetica (sino al 50%) [1-2], ancora oggi risultano essere fondamentali in alcune specifiche applicazioni nonché ancora in fase di studio e sviluppo. Fra questi esaminiamo, in questo articolo, il **magnetron**, il **klystron** e il **gyrotron**.

4.1 – Magnetron

Ricordando che già Thomson aveva fatto uso del campo magnetico su di un fascio di elettroni per determinare il rapporto carica massa degli stessi, nel 1921 il fisico ed ingegnere statunitense Albert Hull (1880-1966) brevettò un tubo a vuoto, il **magnetron**, costituito da un diodo inserito in un campo magnetico, con l'idea di utilizzare il campo magnetico al posto del campo elettrico della griglia per il controllo della corrente tra catodo e anodo. Solo negli anni successivi però, usando anodi multipli, diversi ricercatori capirono che era possibile produrre oscillazioni a lunghezze d'onda di 10 cm (3 GHz).

Come è noto, gli elettroni, in presenza di un campo magnetico, sono soggetti alla forza di Lorentz e compiono traiettorie circolari in un piano ortogonale al campo magnetico. La frequenza delle oscillazioni è determinata solo dall'intensità del campo magnetico e dal rapporto carica/massa dell'elettrone ed è denominata **frequenza del ciclotrone**. Gli elettroni, ruotando, emettono una radiazione alla frequenza del ciclotrone, che è prelevata dall'uscita del magnetron.

Il problema era ottimizzare il trasferimento di energia del campo elettrico verso gli elettroni e da questi l'estrazione dell'energia a RF. Quindi negli anni '30, in diverse parti del mondo [3-4], in particolare in Germania, Olanda, USA e Giappone, vennero sviluppati magnetron a cavità risonanti multiple. Per questo vanno ricordati tra i tanti: Hans Erich Hollmann (1899-1960), Klass Posthumus (1902-1990), Samuel Arthur (1901-1990) e Yoji Ito (1901-1955).

Infine, nel 1940 i fisici britannici John Turon Randall (1905-1984) e Henry Boot (1917-1983) riuscirono a produrre microonde con lunghezza d'onda di 10 cm (3 GHz), inizialmente con potenze di qualche centinaio di Watt ed in breve con potenze di picco di 10 kW, di picco con lo scopo di applicarle ai radar. Alla fine della Seconda Guerra Mondiale i magnetron erano arrivati a produrre oscillazioni a microonde di 10 cm con potenze di picco 2 MW.

Sebbene la più popolare applicazione del magnetron sia nel forno a microonde, ancora oggi si sviluppano magnetron, in particolare quelli con elettroni relativistici (con alte tensioni di alimentazione), capaci di potenze di picco di 3 GW per impulsi di 10 ns.

4.2 – Klystron

Il **klystron** è un amplificatore per microonde, che non usa campi magnetici, ed è capace di produrre elevate potenze usando un fascio di elettroni che emessi da un catodo sono accelerati verso un anodo attraverso un tubo di deriva. Lungo il tubo sono presenti due cavità risonanti nella prima delle quali è iniettato il segnale a microonde che deve essere amplificato. Il segnale immesso nella prima cavità crea una modulazione longitudinale della densità degli elettroni, che si sviluppa pienamente lungo lo spazio di deriva tra le due cavità. Dalla seconda cavità può essere quindi estratto il segnale a microonde amplificato.

Data la presenza delle cavità risonanti, il klystron è intrinsecamente un amplificatore a banda stretta.

Il principio teorico alla base del klystron fu inventato nel 1935 dal fisico tedesco O. Heil (1908-1994) e dalla fisica russa A. Arsenjewa-Heil (1901-1991). In [5] essi descrivono come modulare la velocità degli elettroni di un fascio di elettroni per produrre delle microonde in una cavità risonante.

Dato che il klystron è capace di conseguire guadagni di amplificazione di 60 dB, questo dispositivo era il complemento ideale al magnetron nella realizzazione di un radar: mentre il magnetron era infatti usato in trasmissione come sorgente di impulsi di grande potenza, il klystron era utilizzato in ricezione come amplificatore di elevato guadagno.

In seguito, il klystron è stato ottimizzato per produrre elevate potenze e quindi ha avuto notevoli applicazioni nelle radio trasmissioni; ancora oggi questi dispositivi sono usati sui satelliti per le trasmissioni verso terra. Oltre a ciò, sono stati e sono ancora utilizzati nella fisica degli acceleratori come fonte di energia a RF per eccitare le cavità risonanti.

I klystron rimangono quindi senza rivali nel dominio delle alte potenze ad alte frequenze, superati solo dai gyrotron per frequenze sopra i 10 GHz, mentre quando ci si sposta a frequenze e a potenze minori i dispositivi allo stato solido hanno preso il sopravvento.

4.3 – Gyrotron

Il **gyrotron** [1-2] è un amplificatore e generatore di microonde tra i 10 GHz e i 500 GHz, che usa un fascio di elettroni in un campo magnetico [6-7]. Anche nel gyrotron si ha un fascio di elettroni emesso da un catodo che è accelerato verso un anodo attraverso un canale sottovuoto [8]. Coassialmente al canale, viene prodotto un campo magnetico da un magnete superconduttore in modo che gli elettroni, mentre derivano, descrivano delle spirali sul piano ortogonale al campo magnetico. Come per il magnetron, gli elettroni emettono radiazione di sincrotrone mentre girano in spirali, ma a differenza del magnetron non ci sono le cavità risonanti a radiofrequenza che, a causa delle loro dimensioni, limiterebbero la potenza del dispositivo per le perdite sulle pareti. A differenza del klystron, dove le microonde creano una modulazione longitudinale della densità, nei gyrotron la modulazione è nel modo di rotazione trasversale. Per massimizzare la potenza, riducendo le instabilità del fascio, nei gyrotron si usano dei fasci a sezione anulare, vuoti internamente, prodotti da catodi anulari.

Attualmente il gyrotron è il dispositivo capace di operare nella zona più alta di potenze e di frequenze delle microonde [2].

Grazie alla capacità di generare in continuo potenze di qualche MW a frequenze sopra i 100 GHz con efficienze anche sopra il 50%, il gyrotron è attualmente usato per riscaldare il plasma in quei laboratori che studiano i plasmi in particolare per la fusione nucleare. Oltre a ciò, il gyrotron è un dispositivo interessante anche nell'utilizzo a potenze più basse perché è una delle poche sorgenti disponibili nell'ambito delle onde millimetriche in grado di fornire potenze di 25 W sino a 526 GHz e per questo motivo viene usato anche negli studi di Spettroscopia NMR (Nuclear Magnetic Resonance).

4.4 – Dispositivi a vuoto integrati

Da diversi anni si studia la possibilità di usare la emissione catodica anche all'interno di circuiti integrati [9].

Ai noti vantaggi dei circuiti integrati, quali la riduzione dei costi e delle capacità parassite, si possono aggiungere i vantaggi del vuoto come mezzo per la propagazione degli elettroni, in particolare gli elettroni nel vuoto possono raggiungere velocità maggiori di quelle raggiungibili all'interno di un cristallo e le tensioni gestibili sono maggiori a parità di dimensioni dei dispositivi [10].

Uno dei problemi che attualmente ne limita però lo sviluppo, è la capacità di mantenere condizioni di alto vuoto nel dispositivo, problema questo probabilmente superabile lavorando o in basso vuoto o migliorando le tecniche di incapsulamento dei dispositivi [11-12].

Sebbene ci siano interessanti possibilità di sviluppo e negli ultimi anni siano stati compiuti notevoli progressi, al momento si è ancora ben lontani dalla produzione commerciale.

Sono però già in uso tecniche derivate da quelle della produzione di circuiti integrati per produrre dei nuovi tipi di catodi con caratteristiche avanzate da usare nei tubi a vuoto.

5 – Conclusioni

La storia dei tubi a vuoto è molto complessa e in questo articolo abbiamo presentato solo una breve rassegna.

Sono rimasti fuori diversi argomenti, come i tubi per l'acquisizione e la riproduzione delle immagini, che hanno segnato la nascita della televisione, la produzione di tubi a lunga durata usati nei primi calcolatori, e diverse varianti dei tubi per microonde.

In alcuni passaggi della storia abbiamo dovuto semplificare, tralasciando diversi passaggi intermedi e i vari ricorsi ai tribunali per i contenziosi sui brevetti.

Molte delle innovazioni della storia dei tubi a vuoto si sono intrecciate con le avventure personali degli inventori, come nel caso dei coniugi O. Heil e A. Arsenjewa-Heil.

È chiaro che i tubi a vuoto hanno subito la forte concorrenza dei dispositivi a stato solido e dei dispositivi integrati e sono scomparsi dagli occhi del grande pubblico tranne che per i forni a microonde. Sono riusciti però a resistere nella nicchia delle alte potenze e delle alte frequenze, come illustriamo in Figura 1.

A frequenze più basse, non mostrate in Figura 1, i dispositivi a stato solido prendono il sopravvento anche per le grandi potenze, come quelle delle centrali elettriche.

Ma sopra i 100 MHz i tubi a vuoto non hanno rivali per le grandi potenze, grazie alla facilità con la quale nel vuoto si possono gestire alte correnti e alte tensioni, grazie alle alte efficienze e ai materiali (metallici e ceramici) resistenti alle alte temperature per gli elettrodi e gli involucri.

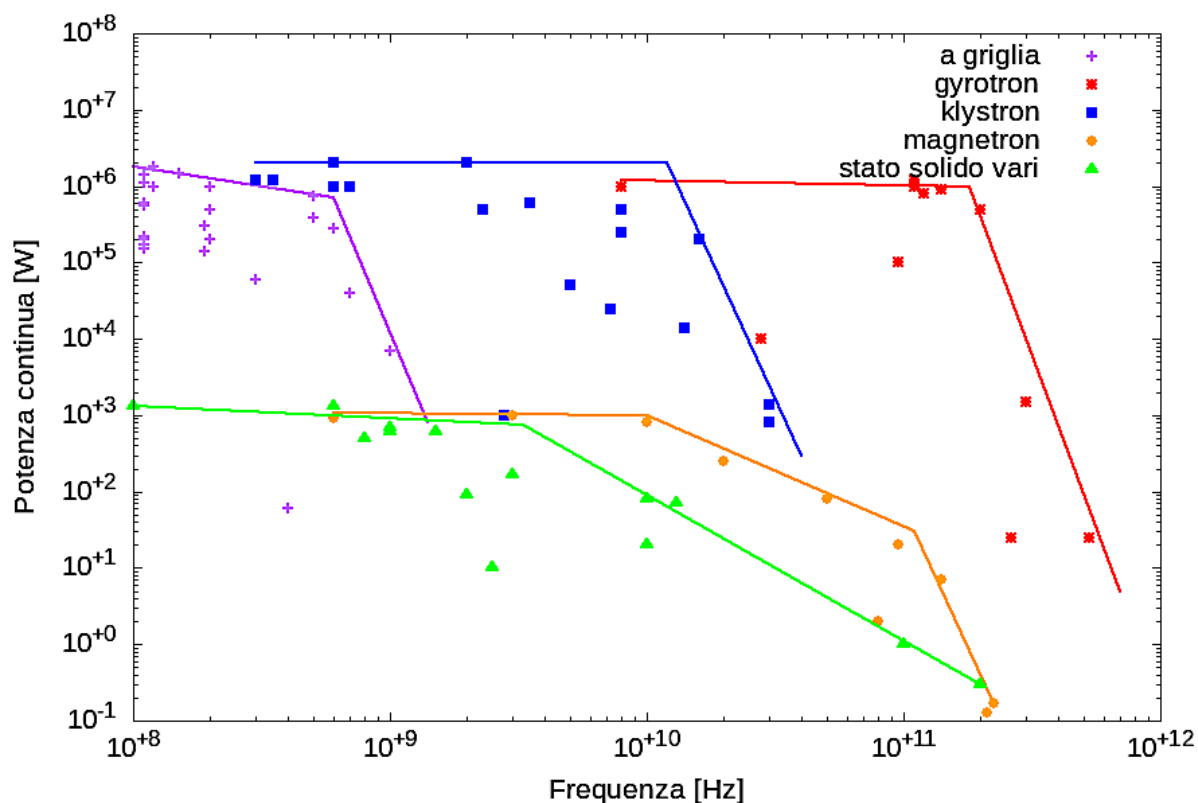


Figura 1 – Potenza in continuo (o la potenza media) in funzione della frequenza di lavoro. I punti sono i singoli dispositivi in commercio o sperimentali, le linee indicano gli involucri per le varie tecnologie.

L'accoppiamento dei fasci di elettroni alle onde elettromagnetiche permette a questi dispositivi di lavorare sino alle onde millimetriche.

6 - Bibliografia

- [1] Thumm, M., "State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices and Free Electron Masers", *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 41, No. 1, pp 1-140, 2020.
- [2] Thumm, M., "State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices, Update of experimental results 2021", <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/51438>, KIT Scientific Reports, 183, pp. 1-160, 2021.
- [3] Blanchard, Y., Galati, G., van Genderen, P., "The Cavity Magnetron: Not Just a British Invention [Historical Corner]", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, No. 5, pp. 244-254, 2013.
- [4] Leconte, M., "A statistical study of magnetron patents in the early years of electronics between 1920 and 1945; heuristic focusing around the discovery of the cavity magnetron," *2010 International Conference on the Origins and Evolution of the Cavity Magnetron*, Bournemouth, UK, pp. 11-16, 2010.
- [5] Arsenjewa-Heil, A., Heil, O., "A new method for the generation of short, undamped electromagnetic waves of high intensity", *Zeitschrift für Physik*, vol. 95, pp. 752-762, 1935.
- [6] Granatstein, V., Herndon, M., Parker, R., Sprangle, P., "Coherent synchrotron radiation from an intense relativistic electron beam", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 10, No. 9, pp. 651-654, 1974.
- [7] Andronov, A.A. *et al.*, "The gyrotron: High-power source of millimetre and submillimetre waves", *Infrared Physics*, vol. 18, No. 5-6, pp. 385-393, 1978.
- [8] Kupiszewski, A., "The Gyrotron: A High Frequency Microwave Amplifier", *Space Network Progress Report*, vol. 42, pp. 8-12, 1979.
- [9] Brodie, I. Schwoebel, P.R., "Vacuum microelectronic devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 82, No. 7, pp. 1006-1034, 1994.
- [10] Akinwande, A.I. *et al.*, "Vertical Si Nano Vacuum Channel Transistors: Building Blocks for Empty State Electronics," *2021 34th International Vacuum Nanoelectronics Conference (IVNC)*, Lyon, France, pp. 1-2, 2021.

I dispositivi elettronici a vuoto, dall'origine dell'elettronica alle attuali applicazioni nel campo delle alte frequenze
The vacuum electronic devices, from the origin of electronics to current applications in the high frequency field
G. Gelao, R. Marani, A. G. Perri

[11] Rughoobur, G. *et al.*, "Enabling Atmospheric Operation of Nanoscale Vacuum Channel Transistors," *2020 Device Research Conference (DRC)*, Columbus, OH, USA, pp. 1-2, 2020.

[12] Wang, G.T. *et al.*, "Ultra-low Voltage GaN Vacuum Nanoelectronics," *2022 Compound Semiconductor Week (CSW)*, Ann Arbor, MI, USA, pp. 1-2, 2022.