

# SCURTĂ ISTORIE A TUBURILOR ELECTRONICE

**Constantin STĂNESCU<sup>1</sup>**

constantin.stanescu@hotmail.com

**ABSTRACT:** This short presentation is an overview of the main facts and historical moments that have marked the development of theoretical and practical knowledge on vacuum tubes, as well as those who contributed with ideas, theories and experiments in the development of these devices that have dominated for nearly a century the electronics and telecommunications. There are mentioned here the essential moments preceding the making of the first vacuum tube, those representing its actual invention and, further, those that led to their improvement. Also, are highlighted some moments on the development of some of the most important applications of these devices.

**KEYWORDS:** electronic vacuum tube, thermionic emission, diode, triode, grid

Tuburile electronice utilizate ca dispozitive electronice au trecut în istorie de ceva vreme, dar istoria dezvoltării și utilizării lor, timp de aproape un secol, continuă să ne fascineze, rămânând ca reper important în dezvoltarea electronicii și radiocomunicațiilor.

Tuburile electronice cu vid fac parte dintr-o categorie mai largă, pe care o putem numi *tuburi vidate*.

Acestea reprezintă o categorie de dispozitive ce au în comun faptul că sunt alcătuite dintr-o incintă închisă, confecționată de obicei din sticlă sau cuarț, din care aerul a fost practic eliminat sau înlocuit cu un alt gaz la presiune redusă și în interiorul căreia se află unul sau mai mulți electrozi.

În general, aceste tuburi vidate se împart în două categorii:

– din prima fac parte tuburile Geissler, lampa cu descărcare electrică

---

<sup>1</sup> Profesor universitar doctor la Universitatea din Pitești, Facultatea de Științe, Departamentul de Ingineria Mediului și Științe Inginerești Aplicate; membru al Filialei CRIFST – Argeș

în vapori de mercur, tuburile de raze X etc. toate acestea fiind utile datorită radiației electromagnetice pe care o produc;

– a doua categorie cuprinde dispozitivele utile prin acțiunea lor în circuitele electrice în care sunt conectate, astfel că acestea pot fi considerate elemente de circuit sau dispozitive utilizate ca părți componente ale circuitelor electrice.

Cele mai importante dispozitive ce fac parte din a doua categorie sunt cele numite *tuburi electronice cu vid*, sau, pur și simplu, *tuburi electronice*. Trecerea curentului electric între electrozii tubului electronic are loc prin deplasarea electronilor între electrozi, electronii fiind furnizați de o sursă aflată în interiorul tubului. Dacă în alte tipuri de tuburi vidate drept sursă de electroni se folosește o substanță radioactivă, un câmp electric intens, sau o radiație electromagnetică ultravioletă sau de raze X, la tuburile electronice sursa de electroni este reprezentată de un corp încălzit puternic. Acest corp, numit catod, este încălzit fie direct, când el însuși este un filament adus la incandescență prin trecerea unui curent electric prin el, fie indirect, când el este încălzit prin radiația termică produsă de un filament incandescent.

O.W. Richardson<sup>2</sup> a numit *termioni* electronii emiși de metalele încălzite, deși acești electroni nu sunt cu nimic diferiți de electronii proveniți din alte surse și, strict vorbind, nu sunt câtuși de puțin ioni, dar utilizarea termenului respectiv a devenit, la un moment dat generală, în ciuda inconsistenței termenului, astfel că și tuburile vidate care utilizează filamente încălzite pe post de surse de electroni au fost numite, în engleză, *thermionic vacuum tubes*.

Dar cum s-a ajuns la inventarea și mai apoi la dezvoltarea tuburilor electronice, care au revoluționat telecomunicațiile la vremea respectivă?

Unele dintre primele experimente ce au contribuit la fundamentarea și dezvoltarea cunoștințelor care au dus la construirea tuburilor electronice au fost cele realizate de F. Guthrie<sup>3</sup> [1]. Acesta a efectuat o serie de experimente cu corpuri metalice încălzite și a constatat că, dacă acestea

<sup>2</sup> Sir Owen Willans Richardson (26.04.1879 – 15.02.1959) a fost un fizician britanic, laureat al Premiului Nobel pentru fizică în 1928 pentru lucrările sale cu privire la emisia termoelectronică, ce au dus la formularea legii care îi poartă numele.

<sup>3</sup> Frederick Guthrie (15.10.1833 – 21.10.1886) a fost un om de știință britanic. A fost fondatorul, împreună cu William Fletcher Barrett, Societății de Fizică (Physical Society) din Londra (în prezent Institutul de Fizică), în 1874, al cărei președinte a fost din 1884 până în 1886.

erau încălzite până la roșu, aducând în apropierea lor un electroscop electrizat negativ, acesta se descărcă, în timp ce unul electrizat pozitiv rămânea încărcat. Încălzind corpul metalic la temperaturi mai mari, până la alb incandescent și aducând în apropiere un electroscop electrizat, acesta se descărcă, indiferent de semnul sarcinii electrice cu care era încărcat. La vremea respectivă, Guthrie nu avea posibilitatea de a da o explicație clară a acestor fenomene, dar în baza cunoștințelor actuale este simplu să găsim această explicație. Copul metalic încălzit la temperaturi mai mici emite ioni pozitivi ai unor gaze absorbite în materialul acestuia, ioni ce descarcă electroscopul electrizat negativ; la temperaturi mai mari, corpul metalic emite, pe lângă ionii pozitivi gazoși și electroni, care descarcă și un electroscop electrizat pozitiv.

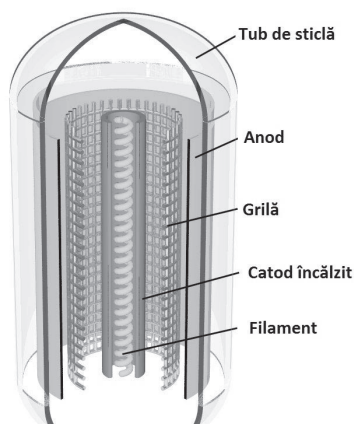


Fig. nr. 1 – Structura unei triode cu vid

Între 1882 și 1889, fizicienii germani Elster<sup>4</sup> și Geitel<sup>5</sup> au efectuat studii asupra conductivității gazelor în apropierea corpurilor încălzite [2]. Astfel, ei au construit un tub vidat, conținând doi electrozi: un filament de carbon, încălzit prin trecerea unui curent electric și o placă metalică. Deși au constatat conducția unilaterală a dispozitivului, nu au mers mai

<sup>4</sup> Julius Johann Philipp Ludwig Elster (24.12.1854 – 06.04.1920) a fost un profesor și fizician german. Împreună cu Geitel, a efectuat cercetări privind meteorologia și electricitatea atmosferică, radioactivitatea, efectul fotoelectric și a inventat, în 1893, celula fotoelectrică. În 1899, a enunțat legea dezintegrării radioactive.

<sup>5</sup> Hans Friedrich Geitel (16.07.1855 – 15.08.1923) a fost un fizician german. A lucrat și publicat împreună cu Elster.

departe, pentru a-i da o întrebuințare practică, fiind interesați doar de fenomenele în sine, nu și de aplicațiile posibile.

În mod independent, în 1883, Edison<sup>6</sup> a făcut o descoperire remarcabilă: folosind un bec electric cu incandescență, recent inventat de către el și plasând în interiorul acestuia o placă metalică, a constatat prezența unui curent electric între filament și placă, detectat cu ajutorul unui galvanometru. Curentul apărea însă numai când galvanometrul era legat între placă și capătul filamentului legat la borna pozitivă a sursei de curent ce alimenta filamentul [3]. Deși Edison nu a mers mai departe cu descoperirea sa, fenomenul a fost numit efect Edison și faptul în sine poate fi considerat punctul de plecare în realizarea tuburilor electronice.

Între 1884–2885, Preece<sup>7</sup> a reluat experimentele lui Edison (el a și dat numele de *efect Edison* fenomenului observat de acesta) și a arătat că efectul nu este influențat de natura metalului din care era confecționată placa, dar valoarea curentului era dependentă de distanța dintre filament și placă, de temperatura filamentului și de diferența de potențial dintre filament și placă [4].

Experimente privind curentul electric ce apare în dispozitive de tipul celui folosit de Preece au fost făcute și de Hittorf<sup>8</sup> [5] și Goldstein<sup>9</sup> [6].

Între 1889 și 1896, J.A. Fleming<sup>10</sup>, deja familiarizat cu lucrările lui Edison și Preece, a efectuat o serie de experimente asupra efectului Edison

<sup>6</sup> Thomas Alva Edison (11.02.1847 – 18.10.1931) a fost un inventator și om de afaceri american. Cu peste 1000 de brevete de invenție la activ, el a dezvoltat mai multe dispozitive, inclusiv fonograful și becul electric cu incandescență. Edison a fost unul dintre primii inventatori care au aplicat principiile producției de masă și ale muncii în echipă pe scară largă în procesul de invenție, fiind creditat cu crearea primului laborator de cercetare industrială.

<sup>7</sup> Sir William Henry Preece (15.02.1834 – 06.11.1913) a fost un inginer electrician și inventator galez. A adus contribuții în domeniul telegrafiei, telefoniei și radioului. Membru al Royal Society.

<sup>8</sup> Johann Wilhelm Hittorf (27.03.1824 – 28.11.1914) a fost un fizician german, care a efectuat studii și cercetări privind conducția electrică, razele catodice și a introdus noțiunea de *număr de transport ionic*.

<sup>9</sup> Eugen Goldstein (05.09.1850 – 25.12.1930) a fost un fizician german. A întreprins cercetări privind descărcările electrice în gaze și a descoperit razele anodice (numite de *el raze canal*).

<sup>10</sup> Sir John Ambrose Fleming (29.11.1849 – 18.04.1945) a fost un inginer electrician și fizician britanic. El este cunoscut pentru inventarea primului tub electronic, dioda cu vid. El este, de asemenea, cunoscut pentru *regula mâinii stângi* (pentru motoare electrice). Membru al Royal Society.

și a fost primul care a sugerat utilizarea dispozitivului respectiv pentru detecția oscilațiilor de înaltă frecvență [7]. În 1904, în Marea Britanie și apoi în 1905 în Germania și Statele Unite, a obținut un patent pentru utilizarea diodei cu vid (*oscillation valve*, cum a numit-o el) ca detector în *telegrafia fără fir*.

Cât privește partea teoretică, explicativă, privind efectul Edison, meritul îi revine lui J.J. Thomson<sup>11</sup>, care, prin experimentele sale, din 1897, a măsurat masa electronului [8] și a arătat că indiferent din ce sursă provin, electronii sunt identici. În lumina cercetărilor lui J.J. Thomson, a devenit evident faptul că electronii, încărcăți cu sarcină electrică negativă, emiși de filamentul incandescent și atrași de placa aflată la un potențial pozitiv sunt particulele ce alcătuiesc curentul electric în cazul efectului Edison.

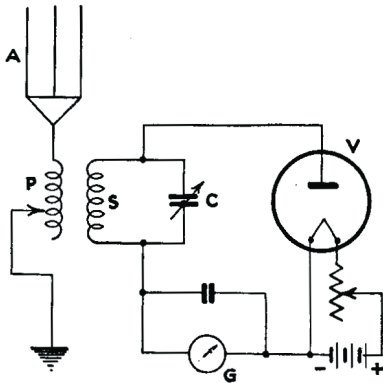


Fig. nr. 2 – Dioda cu vid (valva Fleming), utilizată ca detector de semnale radio [10]

Cu toate că, în mare, lucrurile păreau clarificate, exista totuși părerea generală că emisia electronilor din corpurile calde este rezultatul unui

<sup>11</sup> Sir Joseph John Thomson (18.12.1856 – 30.08.1940) a fost un fizician englez, membru al Societății Regale din Londra. În 1897, Thomson a arătat că razele catodice erau compuse din particule necunoscute anterior, încărcate negativ, pentru care el a determinat sarcina specifică și a dedus că trebuie să aibă o masă mult mai mică decât cea a celui mai mic atom. Astfel, el este creditat cu descoperirea și identificarea electronului. Thomson este, de asemenea, creditat cu găsirea primei dovezi a existenței izotopilor unui element stabil (neradioactiv) în 1913, ca parte a cercetărilor sale privind compoziția razelor canal (ioni pozitivi). Experimentele sale pentru a determina natura particulelor încărcate pozitiv, efectuate împreună cu Francis William Aston, au reprezentat prima utilizare a spectrometriei de masă și au condus la dezvoltarea spectrografului de masă. Thomson a primit Premiul Nobel pentru fizică în 1906, pentru activitatea sa privind conducția electrică în gaze.

fel de reacție chimică între reziduul gazului rămas în tub și materialul filamentului, părere susținută de faptul că, pe măsura reducerii presiunii gazului din tub, avea loc și o scădere a curentului dintre electrozii acestuia.

Lui O.W. Richardson îi revine meritul de a fi arătat, prin lucrările sale teoretice și experimentale, că emisia termoelectronică la temperaturi înalte este o proprietate a tuturor conductorilor și nicidecum dependentă de prezența gazului din tub. El a dedus legea care guvernează acest fenomen, lege care îi poartă numele (*legea Richardson-Dushman*<sup>12</sup>).

Între 1903–1904, A. Wehnelt<sup>13</sup>, experimentând asupra emisie termoelectronice, a descoperit că filamentele metalice acoperite cu anumiți oxizi metalici, în special ai pământurilor rare (stronțiu, bariu, calciu) prezintă o emisie foarte puternică de electroni [9]. El a pus astfel la punct *catodul Wehnelt*, care a reprezentat un pas înainte în construcția tuburilor electronice.

Un moment important în dezvoltarea tuburilor electronice l-au reprezentat cercetările lui I. Langmuir<sup>14</sup>, legate de emisia termoelectronică a filamentelor din wolfram (tungsten).

Pe de altă parte, dioda cu vid a început să fie folosită nu numai pentru detecția semnalelor radio, dar și pentru redresarea curentului alternativ. Dacă la diodele de detecție prezența gazului în interiorul tubului nu era un fapt neapărat negativ, ba chiar, creșterea sensibilității detectorului era realizată prin introducerea unei mici cantități de gaz, în cazul diodelor folosite la redresare, prezența gazului în tub era dezastruoasă. Acest fapt (alături, evident și de altele) a impulsionat cercetările privind tehnica vidului,

<sup>12</sup> Saul Dushman (12.07.1883 – 07.07.1954) a fost un fizician ruso-american. Principalele sale interese de cercetare au fost mecanica cuantică, structura atomică, emisia de electroni și vidul înaintat; este autorul mai multor manuale de știință de referință. Cercetările sale privind emisia de electroni s-au concretizat sub forma legii Richardson-Dushman.

<sup>13</sup> Arthur Rudolph Berthold Wehnelt (04.04.1871 – 15.02.1944) a fost un fizician german, remarcat pentru contribuții importante în domeniul fizicii razelor X, descărcărilor electrice în gaze și emisia electronilor.

<sup>14</sup> Irving Langmuir (31.01.1881 – 16.08.1957) a fost un chimist și fizician american. În perioada cât a lucrat la General Electric (1909–1950), Langmuir a abordat mai multe domenii de bază ale fizicii și chimiei, a inventat lampa cu incandescență umplută cu gaz, sudura cu hidrogen și a primit Premiul Nobel pentru chimie în 1932 pentru activitatea sa în domeniul chimiei suprafețelor. În perioada interbelică, Langmuir a contribuit la teoria atomică și înțelegerea structurii atomice prin definirea conceptelor moderne de strat de valență și izotop.

astfel că au fost puse la punct dispozitive de vid înaintat, precum pompa moleculară și pompa de difuzie. Folosind astfel de dispozitive, Langmuir și colaboratorii au pus la punct dioda cu vid redresoare de putere, numită de ei *kenotron*.

Anul 1907 a reprezentat un punct de răscruce în dezvoltarea tuburilor electronice, cel care avea să joace rolul principal în aceste evenimente fiind americanul Lee de Forest<sup>15</sup>.

Preocupat de perfecționarea și aplicațiile invenției lui Fleming, Lee de Forest a obținut în 1906 mai multe patente referitoare la ceea ce el a numit *dispozitiv receptor de oscilații* (*oscillation responsive device*). Acesta era în fapt o valvă Fleming, vidată parțial, pe care a numit-o *audion*. În ianuarie 1907, de Forest a obținut un nou patent<sup>16</sup> pentru un audion căruia îi adăugase un al treilea electrod, pentru controlul curentului ce străbătea tubul. Inițial, acest electrod era plasat în exteriorul tubului, sub forma unui cilindru metalic, sau o un fir metalic înfășurat pe tub, dar de Forest a ajuns repede la concluzia că o funcționare mai sigură și mai eficientă se obținea dacă electrodul era plasat în interiorul tubului, între filament și placa anodică, astfel că a brevetat rapid perfecționarea adusă audionului, obținând un nou patent, în 1908<sup>17</sup>.

Acest al treilea electrod a fost numit de către de Forest, *grilă* (*grid*, în limba engleză) și el îndeplinea un rol esențial, acela de comandă și control al curentului anodic, conferind tubului cu vid noi proprietăți, destinate să deschidă noi și imense câmpuri de aplicații comerciale. Una din acestea a fost utilizarea audionului (numit, mai târziu, triodă) în amplificarea semnalelor variabile din domeniul frecvențelor audio și radio.

Una dintre primele aplicații ale acestei invenții a fost realizarea legăturilor telefonice directe între New York și San Francisco, începând cu 1914, prin folosirea unor rețetoare cu triode, de-a lungul liniei telefonice.

<sup>15</sup> Lee de Forest (26.08.1873 – 30.06.1961) a fost un inventator american, inventatorul triodei cu vid și un pionier în dezvoltarea înregistrării sunetului pentru cinematografie. A avut peste 180 de brevete de invenție și o carieră tumultuoasă; a făcut de patru ori avere, pe care a pierdut-o tot de atâtea ori și a fost implicat în mai multe procese majore privind brevete de invenție, unul din acestea fiind disputa cu E.H. Armstrong, cu privire la descoperirea principiului *regenerării*, adică folosirea reacției pozitive în receptoarele radio.

<sup>16</sup> U.S. Patent 841,387, „Device for Amplifying Feeble Electrical Currents”, January 1907;

<sup>17</sup> U.S. Patent 879,532 „Space Telegraphy” February 18, 1908

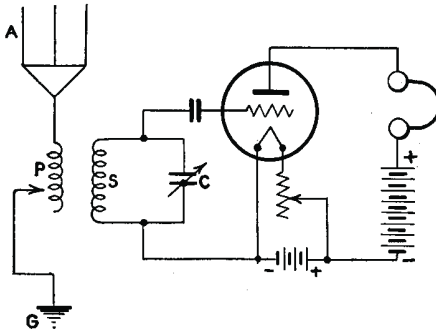


Fig. nr. 3 - Trioda utilizată ca detector-amplificator radio [10]

Printre alte aplicații ale triodei, a fost și cea legată de procesul de *regenerare* sau *reacție pozitivă*, utilizat în creșterea sensibilității receptoarelor radio, proces pus la punct de către E.H. Armstrong<sup>18</sup> [11], deși controverse privind paternitatea efectului au dus la un proces între el și Lee de Forest. Acesta din urmă a și obținut recunoașterea oficială a paternității ideii, dar numai pentru frecvențe joase. Armstrong a fost totuși primul care a obținut efectul regenerativ la frecvențe radio.

Acest efect se produce până într-un punct în care circuitul generează oscilații autoîntreținute, fapt ce a condus la un nou domeniu de aplicații ale tuburilor electronice, generarea oscilațiilor de joasă și înaltă frecvență. Primul care a obținut efectul și care a și patentat această invenție (patentul german 291 604/10.04.1913) a fost austriacul A. Meissner<sup>19</sup>. Contribuții în acest domeniu au avut și Armstrong și de Forest.

Pe lângă funcțiile de detecție, amplificare și generare de oscilații, s-a dovedit că tuburile electronice erau singurele dispozitive capabile să

<sup>18</sup> Edwin Howard Armstrong (18.12.1890 – 31.12.1954) a fost un inginer electrician și inventator american, cel mai bine cunoscut pentru dezvoltarea modulației de frecvență. El a obținut 42 de brevete și a primit numeroase premii, printre care prima medalie de onoare acordată de Institute of Radio Engineers (în prezent, IEEE) și Legiunea de Onoare franceză. Printre realizările sale se numără și principiul receptorului radio cu reacție, cel al superheterodinei și cel al superreacției.

<sup>19</sup> Alexander Meissner (14.09.1883 – 03.01.1958) a fost un inginer și fizician austriac, al cărui domeniu de interes a cuprins proiectarea antenelor, amplificarea și detecția pentru dezvoltarea radiotelegrafiei. În martie 1913 a descoperit principiul reacției pozitive, independent de Edwin Armstrong, și aplicându-l la amplificatoare, a inventat oscilatorul electronic. Circuitul oscilator cu cuplaj inductiv, inventat de el este astăzi cunoscut sub numele de oscilator Meissner.



asigure procesul de modulație la puteri suficient de mari. Astfel, în 1915, AT&T și Western Electric Company au reușit să transmită de la Stația Navală Arlington semnale radio modulate cu semnale audio de voce la distanțe mari (Paris, respectiv Honolulu), folosind un emițător cu 300 de tuburi de 25 W fiecare (oscilatoare, modulate, amplificatoare de putere).

După Primul Război Mondial, a venit perioada radioului comercial, care a impulsinat și mai mult dezvoltarea sistemelor radio și, implicit, a tuburilor electronice. În 1919, Armstrong a pus la punct un nou sistem pentru recepția semnalelor radio, numit *superheterodină* [12], iar în 1922 a definit un alt sistem de recepție, pe baza procesului de *superreacție* [13].

Pe măsură ce aplicațiile audionului se lărgeau și se perfecționau, deveneau mai clare și limitele acestuia. O problemă practică era cea a capacității parazite ce apărea între grilă și anod, urmare a faptului că cei doi electrozi erau foarte apropiați. Apărea astfel foarte clară o limitare în frecvență la funcționarea acestor tuburi, ca urmare a așa-numitului *efect Miller*<sup>20</sup>. Soluția a venit de la W. Schottky<sup>21</sup>, primul care a sugerat, în 1919 [14], folosirea unei a doua grile cu rol de ecran electrostatic între grila de comandă și anod. Acest lucru a făcut posibilă construirea unor amplificatoare de radiofrecvență fără utilizarea unor circuite de neutralizare, tetrodele fiind capabile de o amplificare în tensiune mai mare și putând lucra la frecvențe mai mari decât triodele.

Noul tub, cu două grile a impus și necesitatea revizuirii terminologiei utilizate, astfel că au devenit generali termenii de *triodă*, pentru tubul electronic cu trei electrozi și *tetrodă*, pentru cel cu patru electrozi.

Totuși, tetroda aducea cu sine o nouă problemă: electronii secundari, emiși ca urmare a ciocnirii electronilor primari cu anodul, la o viteză foarte mare, impusă de tensiunile de accelerare (anodice) mari. Soluția a fost adăugarea unei noi grile, între grila ecran și anod, numită grilă *supresoare*, ca urmare a faptului că are rolul de a suprima fluxul electronilor secundari

<sup>20</sup> John Milton Miller (22.06.1882 – 17.05.1962) a fost un inginer electrician american, cel mai bine cunoscut pentru descoperirea efectului Miller și inventarea circuitelor fundamentale pentru oscilatoare cu cristale de cuarț (oscilatoare Miller).

<sup>21</sup> Walter Hermann Schottky (23.07.1886 – 04.03.1976) a fost un fizician german care a jucat un rol major în dezvoltarea teoriei fenomenelor de emisie a ionilor și electronilor, a inventat tubul cu vid cu grilă ecran (tetroda) și, împreună cu Erwin Gerlach, microfonul cu bandă și difuzorul cu bandă. Mai târziu a adus mai multe contribuții semnificative în domeniul dispozitivelor semiconductoare, fizica tehnică și tehnologie.

spre grila ecran. A apărut astfel tubul electronic cu cinci electrozi, *pentoda*. Invenția acesteia, în 1926, îi aparține lui Bernard Tellegen<sup>22</sup>.

Între timp, au fost puse la punct tuburi cu tensiuni anodice mai mari, care puteau fi folosite în receptoare radio alimentate din rețeaua electrică, astfel că, spre sfârșitul anilor '20, doar aproximativ 10% din receptoarele radio mai erau de tipul cu alimentare la baterii.

În plus, au fost puse la punct tuburi de putere mare, de până la 500 kW, utilizate în emițătoarele de putere.

Dezvoltarea domeniului a continuat cu apariția așa-numitelor *tuburi multigrilă* (*hexoda*, *heptoda* și *octoda*) și a tuburilor conținând mai multe dispozitive (dubla triodă, trioda-heptodă, pentoda-dubla-diodă etc.), dar marile descoperiri fuseseră deja făcute. A urmat o perioadă de perfecționare a tuburilor electronice, chiar de miniaturizare a lor, dar implacabilul urma să se întâmple: invenția tranzistorului, în 1947–1948 și deschiderea noii epoci a semiconductorilor avea să însemne și apusul celei a tuburilor electronice [18]-[25].

Încetul cu încetul, acestea au fost înlocuite în marea majoritate a aplicațiilor de mai suplele dispozitive semiconductoare, mai avantajoase pe aproape toate planurile: gabarit, fiabilitate, consum redus de energie.

Cu toate acestea, tuburile electronice trăiesc în prezent o a doua tinerete [15,16,17], împreună cu discul de vinil, scoase „de la naftalină” de entuziaștii amatori de performanțe audio, care au redescoperit calitățile deosebite ale înregistrărilor pe disc și ale amplificatoarelor cu tuburi electronice.

### Referințe bibliografice:

- [1] Guthrie, F., „On a Relation between Heat and Static Electricity”, *Phil. Mag.*, 4th ser., **46**, 257 (1873)
- [2] Elster, Geitel, *Ann. Der Physik*, **16**, 193, (1882), **19**, 588, (1883), **26**, 1, (1885), **31**, 109, (1887), **37**, 319, (1889)
- [3] Edison, T.A., *Engineering*, dec. 12, p. 553, 1884
- [4] Preece, W.H., *Proc. Roy. Soc. (London)*, **38**, 219, (1885)
- [5] Hittorf, J.W., *Ann. der Physik*, **21**, 119, (1884)

<sup>22</sup> Bernard D.H. Tellegen (24.06.1900 – 30.08.1990) a fost un inginer electrician olandez, inventatorul pentodei. El este, de asemenea, cunoscut pentru o teoremă în teoria circuitelor, care îi poartă numele.

- [6] Goldstein, E., *Ann. der Physik*, **24**, 79, (1885)
- [7] Fleming, J.A., *Proc. Roy. Soc. (London)*, **47**, 118, (1890), **14**, 187, (1896); *Phil. Mag.*, **42**, 52, (1896)
- [8] Thomson, J.J., *Phil. Mag.*, **44**, 293, (1897)
- [9] Wehnelt, A., *Ann. der Physik*, **14**, 425, (1904)
- [10] Chafee, L.E., *Theory of Thermionic Vacuum Tubes*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1933
- [11] Armstrong, E.H., *Proc. I.R.E.*, **3**, 215, (1915)
- [12] Armstrong, E.H., *Proc. I.R.E.*, **9**, 3, (1921)
- [13] Armstrong, E.H., *Proc. I.R.E.*, **10**, 244, (1922)
- [14] Schottky, W., *Arch. Electrot.*, **8**, 299 (1919)
- [15] Symons, R.S., „Tubes still vital after all these years”, *IEEE Spectrum*, Volume 35 Issue 4, April 1998 p. 52–63
- [16] Barbour E., „The Cool Sound of Tubes”, *IEEE Spectrum*, online, Jan. 4, 1999
- [17] Cartwright, J., „Return of the Vacuum Tube”, *Science*, online, May. 23, 2012
- [18] Scott-Taggart, J., *Thermionic tubes in radio telegraphy and telephony*, The Wireless Press Ltd., London, New York, 1922
- [19] van der Bijl, H.J., *The thermionic Vacuum Tube and Its Applications*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1920
- [20] Fleming, J.A., *The Thermionic Valve and Its Developments in Radiotelegraphy and Telephony*, The Wireless Press Ltd., London, 1919
- [21] Flügge, S., (ed.), *Encyclopedia of Physics, vol. XXI – Electron-emission Gas Discharges I*, Springer Verlag, Berlin, Gottingen, Heidelberg, 1956
- [22] Yavetz, I., *From Obscurity to Enigma*, Birkhauser Verlag, 1995
- [23] Thomson, J. J., *Conduction of electricity through gases*, Cambridge University Press, 1906
- [24] Thomson, J. J., *The corpuscular theory of matter*, New York, Scribner's Sons, 1907
- [25] Richardson, O.W., *The Emission Of Electricity From Hot Bodies*, Longmans Green And Co., 1916