

Putkitekniikan perusteet

Sisällysluettelo

1. Historiasta nykypäivään.....	3
2. Putkitekniikan perusteet.....	4
3. Putken eri osat.....	8
4. Diodi.....	12
5. Triodi.....	18
6. Tetrodi.....	31
7. Pentodi.....	33
8. Lähdeluettelo.....	39

1. Historiasta nykypäivään

Vuonna 1883 Thomas Edison tutki kokeillaan tyhjiössä hehkutetun langan (filament) valosäteilyä ja havaitsi vahingossa, että sijoittaessaan ylimääräisen metallilevyn (plate) hehkutetun langan lähelle, muodostui sähkövirta näiden kahden johtimen välille. Tätä havaintoa hyödyntäen vuonna 1904 John Fleming kehitti putkiodin, jossa sähkövirta pystyi kulkemaan vain yhteen suuntaan ja jopa silloinkin kun lankaa hehkutettiin vaihtovirralla. Tästä seurasi sovelluksena tasasuuntaus, jota käytettiin radioaaltojen ilmaisemiseen.

Saman vuosikymmenen aikana, pääasiassa fyysikko Joseph John Thomsonin tutkimuksien ansiosta ymmärrettiin, että sähkövirta muodostui pienten sähkövarausten eli elektronien liikkeestä. Vuonna 1906 amerikkalainen keksijä Lee De Forest onnistui modifioimaan Flemingin putkea tavalla, joka mullisti elektroniikkaa vuosikaudiksi eteenpäin. Hän sijoitti ylimääräisen johtimen (grid eli hila) hehkulangan ja metallilevyn väliin, joka toimi ikäänkuin sähköisenä hanana: muutos hilan jännitteessä aiheutti muutoksen sähkövirtaan hehkulangan ja metallilevyn välillä. Koska pienellä hilajännitteellä voitiin ohjata suurta virtaa, laite soveltui sähköiseen vahvistamiseen. Nopean kehityksen tuloksena, tämä ns. triodi mahdollisti mm. kaukopuhelut ja avasi tietä radion ja television kehitykselle.

Tekniikan kehittyessä ja uusien sovelluksien syntyessä havaittiin, että triodin toiminta oli hyvin rajoittunut korkeilla taajuuksilla. Toimintaa parannettiin sijoittamalla putkeen lisää hilajohtimia ja syntyi tetrodit ja pentodit, joilla havaittiin olevan myös huomattavasti suurempi vahvistuskyky. Tästä eteenpäin on kehitetty yhä monimutkaisempia putkia erilaisiin käyttötarkoituksiin kuten esimerkiksi valoon reagoivia putkia jne.

Putkitekniikka on pikkuhiljaa väistynyt puolijohdetekniikan tieltä ja kaikkia putkia ei enää edes valmisteta. Kuitenkin putkilla on vielä sovelluskohteita, joita transistorit eivät voi korvata. Esimerkiksi kitaravahvistimissa putket ovat edelleenkin hyvin paljon käytettyjä komponentteja mm. niiden säröominaisuuksien takia. Myös radiolähettimissä käytetään putkia vielä niiden mahdollistamien suurien tehonkestojen takia.

2. Putkitekniikan perusteet

Elektronien käyttäytyminen selitetään nykytietämyksen valossa ns. hiukkasluonteella ja aaltoluonteella. Tämä tarkoittaa sitä, että kaikkia elektronien käyttäytymisilmiöitä ei voida selittää hiukkasluonteella vaan tarvitaan myös aaltoluonne. On siis selvää, että elektronien käyttäytymistä ei vielä täysin ymmärretä. On riittävää tämän erikoistyön yhteydessä, että tarkastelemme putkitekniikassa esiintyviä ilmiöitä vain elektronien hiukkasluonteella. Hiukkasluonteessa elektronilla on massa ($m_e = 9.10 \times 10^{-31} \text{ kg}$) ja varaus ($e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$).

Putkitekniikalla tarkoitetaan elektroniikassa yleisesti tekniikkaa, joka perustuu elektronien liikkeeseen tyhjiössä tai hyvin matalapaineisessa kaasussa. Tämä matalapaineinen tila on luotu yleensä lasiputken sisälle, jossa sijaitsee myös elektroneja emittoiva osa ja osat joihin elektronit sitten sähkö- ja magneettikenttien vaikutuksesta liikkuvat. Ennen kuin käsittelemme eri putkien toimintaa syvemmin on ensin hyvä kuitenkin käsitellä eri perusilmiöt joihin koko putken toiminta perustuu. Näihin kuuluu elektronien emissio aineesta, elektronien liike sähkö- ja magneettikentissä, väliaineen eli matalapaineisen kaasun vaikutus elektronien liikkeeseen sekä elektronien yhteisvaikutus toisiinsa. Elektronien yhteisvaikutusta toisiinsa ei käsitellä nyt tässä erikoistyössä.

Elektronien emissio aineesta

Elektronien emissio voi tapahtua useista eri materiaaleista jotka ovat johtimia. Johdinmateriaalit ovat sellaisia joissa on vapaita ns. johdinelektroneja, jotka voivat liikkua rakenteesta paikasta toiseen ja jopa rakenteesta pois. Huoneenlämmössä nämä johdinelektronit eivät kuitenkaan pysty karkaamaan rakenteen pinnasta pois, koska itse rakenne vetää niitä puoleensa. Jos elektronille voidaan antaa riittävä kineettinen energia, se voi kuitenkin päästä rakenteesta pois. Pienintä mahdollista energiamäärää, joka riittää irrottamaan elektronin aineesta, kutsutaan työfunktiksi tai irrotustyöksi (Φ) ja sen yksikkönä on voltti (elektronivoltti). Materiaali, jolla on pienempi irrotustyö, emittoi elektroneja siis helpommin kuin materiaali, jolla on korkeampi irrotustyö. Esimerkiksi platinalle irrotustyön arvo on 6.0V.

On olemassa useita keinoja, joilla johdinelektroneille voidaan antaa riittävä energia, jotta ne voivat paeta aineen pinnasta. Neljänä yleisimpänä menetelmänä ovat lämpöemissio, sekundäärinen emissio, valosähköinen emissio ja sähkökentän aiheuttama emissio. Valosähköisessä emissiossa aineeseen kohdistetaan säteilyä esim. valosäteilyä, joka absorboituu materiaaliin ja antaa näin elektroneille lisää energiaa. Elektroneille voidaan antaa myös riittävä energia hyvin suurella ulkoisella sähkökentällä (luokkaa 1MV/cm²). Seuraavassa on käsitelty tarkemmin lämpöemissio ja sekundäärinen emissio, koska ne liittyvät eniten yleisimpien putkien toimintaan.

Lämpöemissio

Lämpöemissio saadaan aikaan, kun materiaali kuumennetaan riittävän kuumaksi, jolloin elektroneilla on riittävä energia ylittämään materiaalin irrotustyö. Voidaan arvella, että irronneiden elektronien määrä pinta-alaa kohti (eli virtatiheys) on jollain tavalla verrannollinen niille annettuun energiaan eli materiaalin lämpötilaan sekä materiaalin irrotustyöhön. Tämä verrannollisuus on johdettu kokeellisesti yhtälöksi, jota kutsutaan nimellä Richardson-Dushman-yhtälö ja se kertoo meille materiaalin suurimman emissiovirtatiheyden:

$$J = AT^2 e^{-\frac{e\Phi}{kT}}$$

missä:

$A = 1.204 \times 10^6 \text{ A/m}^2/\text{K}^2$ (teoreettinen arvo, kokeellinen noin puolet tästä)

Φ = materiaalin irrotustyö

k = Boltzmanin vakio = $1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T = absoluuttinen lämpötila = $^{\circ}\text{C} + 273.16$

e = elektronin ominaisvaraus = $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Richardson-Dushman-yhtälö kertoo meille myös materiaalin emissiotehokkuuden. Koska katodimateriaali yleensä kuumennetaan erillisellä hehkulangalla, haluamme maksimoida emissiovirran suuruuden käytetyllä lämmitysteholla. Tästä aiheesta lisää kohdassa 3.1, jossa käsitellään katodin toimintaa.

Sekundäärinen emissio

Elektronien sekundäärinen emissio voi tapahtua jos materiaaliin törmää riittävän suurienergisia hiukkasia kuten elektroneja tai positiivisia ioneja (kuten esimerkiksi kaasumolekyylit, joka on menettänyt elektronin). Tällainen törmäys voi aiheuttaa useammankin kuin yhden elektronin vapautumisen rakenteesta jos törmäävän hiukkasen energia on riittävän suuri. Putkessa sekundääristä emissiota tapahtuu anodilla.

Elektronien liike sähkö- ja magneettikentissä

Liike sähkökentässä

Kun varaus q joutuu sähkökentän E vaikutukseen, kohdistuu siihen tällöin voima F , jonka suuruus on

$$F = qE$$

Kun varaus on positiivinen, voiman suunta on sama kuin sähkökentänkin suunta. Elektronille, jonka varaus on negatiivinen eli $q = -e = -1.60 \times 10^{-19}$, on siihen kohdistuvan voiman suunta vastakkainen sähkökentän suunnalle.

Putkessa sähkökenttä muodostuu anodin ja katodin välille, joiden välillä on jännite-ero V_{ak} . Elektronin energia (merkitään myös E), kun se saavuttaa anodin, voidaan määrittää seuraavasta yhtälöstä:

$$E = eV_{ak} = \frac{1}{2} m_e v^2$$

missä:

E = energia

e = elektronin ominaisvaraus

V_{ak} = anodin ja katodin välinen jännite

m_e = elektronin lepomassa

v = nopeus anodilla

Elektronin iskeytyessä anodiin on sen nopeus siis:

$$v = \sqrt{2V_{ak} \frac{e}{m_e}}$$

Jos esimerkiksi anodin ja katodin välinen jännite on 300V, saadaan elektronin nopeudeksi ≈ 37000000 km/s kun se iskeytyy anodiin! Yhtälö ei ota huomioon suhteellisuusteorian mukaista massan muutosta lähestyttäessä valonnopeutta mutta antaa kuitenkin kuvan siitä miten suurista nopeuksista on kyse.

Liike magneettikentässä

On osoitettu, että johtimeen, jossa liikkuu virta I magneettikentässä B , kohdistuu voima F , jonka suuruus on:

$$F = IB \sin \theta$$

missä θ on magneettikentän ja virran välinen kulma. Voima F on kohtisuorassa johtimen suunnan ja magneettikentän suunnan muodostamaan tasoon nähden. Tiedetään myös, että $I = qv$. Nyt kun varauksena on elektroni, saadaan voimaksi:

$$F = -evB \sin \theta$$

Nähdään, että elektroniin ei kohdistu ollenkaan voimaa, jos elektroni liikkuu magneettikentän suuntaan. Jos elektroni liikkuu eri suuntaan, siihen kohdistuu voima ja elektroni joutuu ympyräliikkeeseen, koska tämä voima on aina kohtisuorassa elektronin liikesuuntaan nähden. Samasta syystä elektroni ei menetä myöskään liike-energiaansa magneettikentässä.

Matalapaineisen kaasun vaikutus elektronien liikkeeseen

Kaasujen käyttäytymistä selitetään ns. kaasujen kineettisellä teorialla. Teorian mukaan kaasun ajatellaan muodostuvan hyvin suuresta määrästä pieniä hiukkasia tai molekyyliä ja näiden lukumäärä saadaan Avogadron luvusta (2.7×10^{22} molekyyliä/litra normaaliolosuhteissa), joka on sama kaikille kaasuille. Molekyylit ovat kuitenkin niin pieniä, että vain yksi tuhannesosa tilavuudesta koostuu materiaasta ja loppu on tyhjää. Kaasumolekyylit eivät ole paikallaan vaan ne liikkuvat satunnaisesti nopeudella, joka vastaa suurinpiirtein äänen nopeutta kaasussa ja kasvaa lämpötilan kasvaessa. Kaasun paine muodostuu siitä kun molekyylit törmäilevät jatkuvasti toisiinsa ja niitä ympäröivän tilan seinämiin. Jotta elektronit voisivat liikkua mahdollisimman esteettömästi niitä emittoivasta osasta (katodista), niitä keräävään osaan (anodiin), on putken sisälle muodostettu hyvin matalapainen tila. Tällöin elektronin todennäköisyys törmätä kaasuhiukkaseen on mahdollisimman pieni. Normaalit putken muodostetut alipaineet ovat luokkaa 10^{-7} mmHg (normaali ilmanpaine on 760 mmHg). Vaikka tämä putken muodostettu alipaine on hyvin pieni, jää sinne kuitenkin kaasumolekyyliä ja osa elektronisuihkun elektroneista törmää niihin. Törmäyksen seurauksena voi tapahtua jokin kolmesta ilmiöstä: elastinen törmäys, ionisoiva törmäys ja virittävä törmäys.

Elastisessa törmäyksessä elektroni kimpoaa kaasumolekyylistä. Kaasumolekyylin ollessa noin 2000 kertaa raskaampi ei se juurikaan reagoi törmäävään elektroniin. Elektroni ei myöskään menetä juurikaan liike-energiaansa mutta sen suunta kuitenkin muuttuu täysin.

Jos elektronin liike-energia on riittävän suuri osuessaan kaasumolekyylin, se voi saada kaasumolekyylin menettämään yhden elektronin, jolloin kaasumolekyylistä tulee positiivinen ioni. Tuloksena on siis kolme varautunutta hiukkasta: kaksi elektronia ja positiivinen ioni.

Elektronin ja kaasumolekyylin törmäyksen seurauksena voi kaasumolekyylin uloimmalla kehällä oleva elektroni virittyä siten, että sen palatessa alempaan energiatasoon ylimääräinen energia emittoituu sähkömagneettisena säteilynä, joka voi osua esimerkiksi näkyvän valon aallonpituusalueelle. Esimerkiksi neon-valot hyödyntävät tämäntyypistä elektronin ja neonkaasun törmäystä.

3. Putkien eri osat

Katodi

Katodi on se osa putkea, josta elektronit emittoituvat riittävän kuumentamisen eli hehkutuksen seurauksena. Kun katodia kuumennetaan riittävään lämpötilaan, sen pinnan läheisyyteen emittoituu elektroneja ja muodostuu ns. elektronipilvi. Tietyssä vaiheessa tämän elektronipilven kokonaisvaraus on niin suuri, että katodi ei enää pysty emittoimaan enempää elektroneja ellei lämpötilaa kasvateta. Jos katodin läheisyyteen sijoitetaan toinen elektrodi, anodi, joka on positiivisessa jännitteessä suhteessa katodiin, muodostuu anodin ja katodin välille sähkökenttä jonka seurauksena anodi vetää elektroneja puoleensa elektronipilvestä ja näin saadaan aikaan anodivirta.

Hyvä katodimateriaali on sellainen, jolla on mahdollisimman pieni irrotustyö, eli elektronien emissioon vaadittava lämpöenergia on mahdollisimman pieni, sekä sillä on pitkä käyttöikä. Materiaalin sulamispisteen on myös oltava riittävän suuri, jotta sitä voidaan hehkuttaa oikeassa lämpötilassa. Materiaaleja, jotka täyttävät nämä vaatimukset on hyvin vähän ja yleisimmät ovat volframi, torioitu volframi sekä harvinaisten maametallien oksidit, joita nimitetään yksinkertaisemmin katodioksideiksi. Näiden kolmen eri materiaalin ominaisuuksia on koottuna taulukossa 3.1.

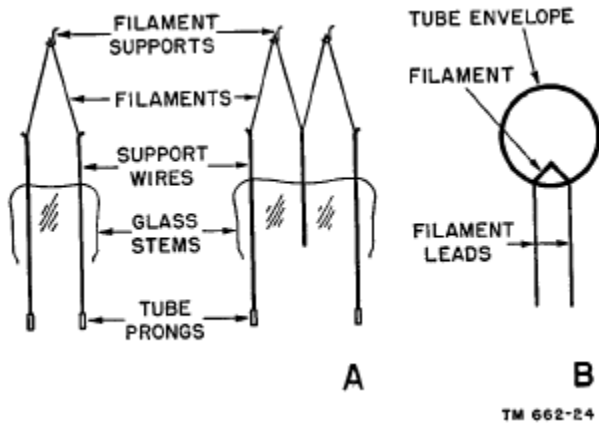
	Irrotustyö Φ (V)	Käyttölämpötila ($^{\circ}\text{C}$)	Emissiovirta (mA/cm^2)
Volframi	4.56	2200	300
Torioitu volframi	2.8	1400	3000
Katodioksidi	0.95	750	250

Taulukko 3.1 Eri katodimateriaalien ominaisuuksia

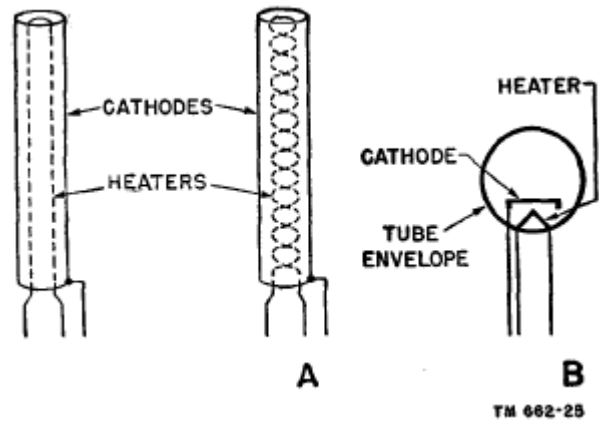
Volframi on yksi harvoista käyttökelpoisista puhtaista metalleista (tantaali on toinen). Useimmat puhtaat metallit sulavat ennen kuin hyvälle lämpöemissiolle vaadittu lämpötila saavutetaan. Volframia voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi hehkulankana ja se on hyvin kestävä. Volframin irrotustyö on kuitenkin melko suuri ($\Phi = 4.55\text{V}$), mikä tarkoittaa, että sen käyttölämpötila on myös hyvin suuri (yli 2200°C). Vaaditun lämmitystehon takia volframia käytetään lähinnä vain hyvin suuritehoisissa putkissa.

Toriumilla taasen on pieni työfunktio ja se olisikin hyvä katodimateriaali ellei se höyrystyisi niin nopeasti käyttölämpötilassa. Torium ja volframi muodostavat kuitenkin yhdisteen, joka höyrystyy hitaasti käyttölämpötilassa. Katodeja, jotka muodostuvat tästä yhdisteestä kutsutaan torioiduiksi volframi katodeiksi. Yhdisteen huono piirre on se, että se on hyvin haurasta ja kuluu käytössä. Torioitua volframin irrotustyö ja käyttölämpötila ovat pienemmät kuin pelkän volframin ja sitä käytetään keskisuuritehoisissa putkissa.

Eniten käytettyjä katodimateriaaleja ovat harvinaisten maametallien oksidit. Nämä katodioksidit muodostuvat eri maametallien oksidien sekoituksesta. Seos voi muodostua esimerkiksi barium-, strontium- ja kalsiumoksideista. Yhdisteen irrotustyö ja käyttölämpötila ovat torioitua volframiakin pienemmät. Huonona ominaisuutena on yhdisteen kemiallinen aktiivisuus sekä sen hauraus. Yhdiste voi ”myrkyttyä” esimerkiksi muiden putkien osien haihduttamien kaasujen kanssa. Yleensä yhdistettä käytetään siten, että sillä vuorataan ohut kalvo nikkelinauhalle ja kuumennetaan kuljettamalla virtaa sen läpi tai sitten vuoraamalla ohut kalvo nikkeli-putken pintaan ja kuumentamalla putkea putken sisältä erillisellä hehkulangalla. Näitä kahta tapaa kutsutaan suoraksi ja epäsuoraksi hehkutukseksi.



Kuva 3.1a Suoraan hehkutettu katodi eli filamentti (A) ja piirikaaviosymboli (B)



Kuva 3.1b Epäsuorasti hehkutettu katodi (A) ja sen piirikaaviosymboli (B)

Katodin suora hehkutus

Suorassa hehkutuksessa itse hehkulanka eli filamentti, toimii katodina ja emittoi elektroneja. Kuvassa 3.1a on esitetty filamentin fysikaalinen rakenne putken sisällä (A) sekä piirikaaviosymboli (B). Suoran hehkutuksen huonona puolena on se, että hehkulangan lämmittämiseen vaadittu vaihtovirta (tai jännite) aiheuttaa kuultavaa hurinaa kytkennässä. Hurinan syyt ovat suuruusjärjestyksessä termisiä, sähköstaattisia sekä sähkömagneettisia.

Jotta hehkulangan hehkuttamiseen vaadittu virta ei olisi liian suuri, täytyy hehkulangalla olla riittävän suuri resistanssi. Tämän takia hehkulangan täytyy olla hyvin ohut. Ohuen hehkulangan lämpötila kuitenkin pystyy reagoimaan nopeasti sen läpi kulkevaan virtaan ja tämän takia vaihtovirta moduloituu elektronien emissiovirtaan eli anodivirtaan. Koska elektronien emissiota moduloi lämmitysteho (RI^2), hurinataajuus on kaksinkertainen hehkuttavan vaihtovirran taajuuteen.

Sähköstaattinen hurinan kytkeytyminen johtuu samalla tavalla hehkulangan lämmittämiseen käytetystä vaihtosähköstä kuin termisessäkin kytkeytymisessä. Putkissa, joissa on hila, anodivirta on suhteessa hilan ja katodin väliseen jännitteeseen seuraavasti:

$$I_a \propto V_{gk}^2$$

Koska hehkulangalla on resistanssia, sen yli muodostuu jännite. Nyt, koska hilan ja katodin välinen jännite vaihtelee, anodivirtaan muodostuu taas hurinaa.

Hehkulanka muodostaa ympärilleen myös magneettikentän, joka vaikuttaa elektronien liikkeeseen kohdassa 2.3 esitetyllä tavalla. Tämä kenttä vaikuttaa elektronien liikkeeseen siten, että osa elektroneista ei osu anodiin. Nyt kun kentän suuruus vaihtelee hehkulangan läpi kulkevan vaihtovirran tahdissa, anodivirrassa näkyy taas hurinaa.

Paras ratkaisu näihin hurinaongelmiin on epäsuora hehkutus.

Katodin epäsuora hehkutus

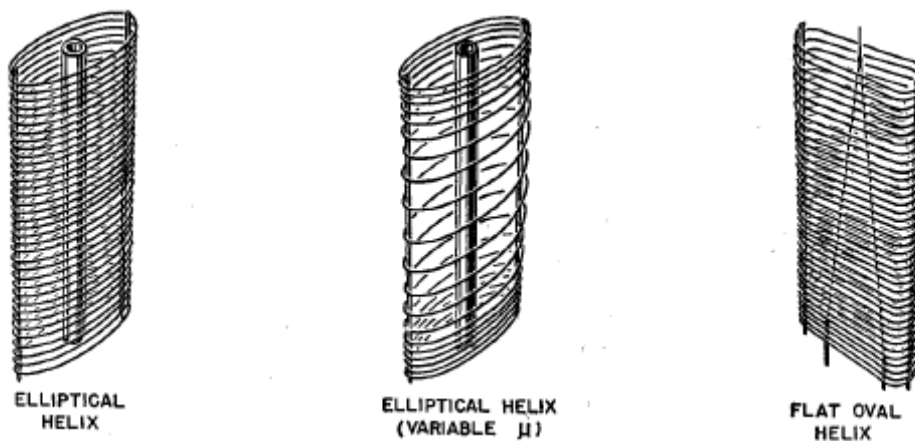
Epäsuorassa hehkutuksessa katodia kuumennetaan sen sisälle rakennetulla erillisellä hehkulangalla (engl. heater filament), jolloin hurinaongelmat minimoituvat. Kuvassa 3.1b on esitetty kuinka epäsuoran hehkutus on toteutettu putkessa (A), sekä piirikaaviosymboli (B). Katodi muodostuu emittoivalla materiaalilla vuoratusta metalliputkesta ja ideana on se, että näin saadaan katodille riittävän suuri terminen massa, jolloin se ei pysty seuraamaan nopeasti vaihtelevaa hehkulangan lämpötilaa ja hurinan terminen kytkeytyminen tällöin minimoituu. Hehkulanka on sijoitettu

katodiputken sisälle. Koska katodi voidaan pitää nyt samassa jännitteessä, sähköstaattinen kytkeytyminen minimoituu. Lisäksi jos katodimateriaali (jonka pinta on vuorattu katodioksidilla) on magneettista niin kuin esimerkiksi nikkeli, sähkömagneettinen hurinan kytkeytyminen myös minimoituu.

Koska katodia hehkutetaan nyt erillisellä hehkulangalla, täytyy hehkulanka eristää katodista mahdollisimman hyvin. Tämä volframihehkulanka on vuorattu alumiinioksidilla, joka toimii sähköisenä eristeenä. Valitettavasti alumiinioksidi eristää myös hyvin lämpöä, joten hehkulangan täytyy olla korkeammassa lämpötilassa (noin 550°C), jotta katodi saavuttaa oikean käyttölämpötilan. Epäsuora hehkutus vaatii siis enemmän lämmitystehoa kuin suora hehkutus. Mikään eriste ei ole kuitenkaan täydellinen, joten hehkulanka/katodi-eristyskin vuotaa ja hurinaongelmia ei aivan täysin voida välttää. Nyt epäsuoran hehkutuksen tapauksessa hehkulankaa voidaan kuitenkin hehkuttaa tasavirralla, jolloin hurinaongelmista päästään eroon.

Jotta putkella olisi mahdollisimman pitkä käyttöikä, pieni kohina ja stabiili anodivirtakäyttäytyminen, täytyy hehkulangan tehollähteen olla mahdollisimman stabiili, koska pienikin muutos katodin lämpötilassa vaikuttaa anodivirtaan. Putkien hehkulangoille voidaan syöttää tehoa kytkemällä hehkulangat rinnakkain ja käyttämällä jännitelähdettä (yleensä 6.3V) tai sitten kytkemällä hehkulangat sarjaan ja käyttämällä virtalähdettä (yleensä 300mA).

Ohjaushila ja muut hilat



Kuva 3.2. Erilaisia hilarakenteita

Sijoittamalla ylimääräinen hila katodin ja anodin väliin, mahdollistaa sen, että anodivirtaan voidaan vaikuttaa hilan jännitteellä. Mitä lähempänä tämä ohjaushila (engl. control grid) on katodia, sitä suurempi vaikutus sillä on elektroneihin, koska niiden nopeus ei ole vielä kovin suuri verrattuna siihen, mitä niillä on lähempänä anodia. Putkessa voi olla myös useita hiloja niin kuin tetrodilla ja pentodilla, mutta siitä huolimatta ohjaushila on silti aina lähimpänä katodia. Tetrodissa on ohjaushilan ja anodin väliin sijoitettu ns. suojahila, jonka tarkoitus on minimoida hajakapasitanseja. Pentodissa suojahilan ja anodin väliin on sijoitettu ns. jarruhila, joka estää sekundääriseen emission aiheuttamien elektronien kulun suojahilalle. Koska hila on niin lähellä katodia, sen lämpötilakin on hyvin suuri ja hila emittoi vähän elektroneja (engl. grid emission), mistä johtuu hyvin pieni negatiivinen hilavirta. Hilavirran suuruuteen vaikuttaa lämpötilan lisäksi myös materiaali, josta hila on tehty. Mitä suurempi irrotustyö materiaalilla on, sitä vähemmän se emittoi elektroneja. Hilamateriaali on yleensä volframia, mutta se voi olla myös muusta materiaalista kuten esimerkiksi kullan ja platinan sekoituksesta, jolloin irrotustyö on suurempi. Hilajännitteen ja hilavirran suhdetta kutsutaan putken sisäänmenoimpedanssiksi ja on luokkaa useita megaohmeja.

Se, miten ja millainen hilalanka on kierretty katodin ympärille suhteessa anodiin, määrää putken transkonduktanssin (g_m) ja vahvistuskertoimen (μ). μ ja g_m määräytyy suurinpiirtein siten, että mitä enemmän hilalangan kierroksia on, sitä suurempi μ ja mitä lähempänä hila taas on katodia, sitä suurempi g_m . Hilalangan kierroksien tarkkuuteen ja tiukkuuteen vaikuttaa taas langan paksuus ja lankaa tukevat pidikkeet. Hilalankaa tukevat pidikkeet voivat myös muodostaa kehyksen, jolloin hilalanka voidaan kääriä tiukemmin jolloin saavutetaan suurempia g_m :n ja μ :n arvoja. Esimerkiksi E88CC-kehyslilaputkella transkonduktanssi on helposti luokkaa 10mA/V kun taas perinteisemmällä ECC82-putkella se on luokkaa 2mA/V.

Koska hilarakennelma on niin ohuesta langasta ja se on niin lähellä katodia, pienikin putken tärinä voi näkyä anodivirrassa. Tästä ilmiöstä käytetään nimeä putken mikrofonisuus (engl. valve microphony).

Yleensä hila pidetään negatiivisessa jännitteessä suhteessa katodiin, jolloin elektronit pyrkivät väistämään hilalankoja ja kulkemaan anodille. Hila voidaan kuitenkin asettaa myös positiiviseksi suhteessa katodiin, jolloin se vetää elektroneja puoleensa. Tästä seuraa suurempi anodivirta, mutta osa elektroneista osuu myös hilaan aiheuttaen positiivisen hilavirran. Tämä taas aiheuttaa putken sisäänmenoimpedanssin laskun ja kuormittaa edeltävää kytkentää ja pahimmassa tapauksessa synnyttää ns. blokkauksäröä.

Anodi

Katodilta irtoavat elektronit suuntaavat korkeamman potentiaalin suuntaan ja yleensä anodi on se, jonne elektronit päätyvät. Tetrodeissa ja pentodeissa suojahila toimii ikäänkuin anodina siinä mielessä, että se kiihdyttää elektronit itseään kohti. Koska suojahila muodostuu kohtuu harvakseltaan olevasta metallilangasta ei sen tarkoitus ole kuitenkaan kerätä elektroneja. Anodi kerää näissäkin tapauksissa elektronit (riippuu tietenkin tilanteesta). Vaikka elektronien massa on hyvin pieni, ne omaavat kuitenkin hyvin suuren liike-energian iskeytyessään anodiin. Tämä liike-energia muuttuu pääasiassa lämmöksi anodilla ja anodin täytyy pystyä kestäämään tämä lämpö. Tämän vuoksi anodin kyky kestää lämpöhukka (anode dissipation) on hyvin tärkeä. Jos anodin lämpötila kasvaa liian suureksi, tästä seuraa ns. kaasun purkautuminen (outgassing) ja putken tyhjiö pilaantuu.

Liian kuuma anodi voi kuumentaa myös muita lähellä olevia putken osia ja aiheuttaa sekundääristä emissiota esimerkiksi ohjaushilalla. Liian suurella nopeudella anodiin törmäävät elektronit voivat aiheuttaa myös anodilla sekundääristä emissiota. Erityisesti tetrodit kärsivät tästä ilmiöstä. Eri materiaaleille on määritelty ns. SER eli Secondary Emission Ratio, joka kuvaa materiaalin suhteellista sekundäärisen emission tasoa. Esimerkiksi nikkeliille tämä on melko pieni (SER \approx 1.3) ja onkin syynä siihen, että nikkeliä käytetään monesti anodimateriaalina [6].

Anodin lämpöhukkaa voidaan maskimoida kasvattamalla anodin lämpöä säteilevä pinta-ala. Esimerkiksi 300B putken anodi on täynnä pieniä reikiä, jotka kasvattavat tätä pinta-alaa. Toinen tapa kasvattaa lämpöhukkaa on värjätä anodimateriaali, joka yleensä on nikkeliä, mustalla grafiitilla. Joidenkin putkien anodi itseasiassa koostuu pelkästä grafiitista mutta grafiitti on itsessään hyvin haurasta materiaalia ja sitä ei sen vuoksi voi käyttää hyvin ohuina levyinä.

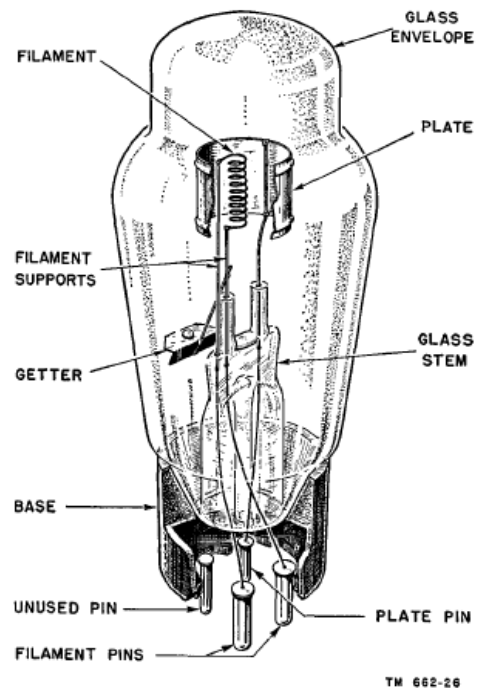
4. Diodi

Diodi on kaikista putkista yksinkertaisin. Kuvassa 4.1 on esitetty yksinkertaisen putkiodiodin rakenne. Se muodostuu yksinkertaisimmillaan kahdesta elektrodista, joista toinen on elektroneja emittoiva ja toinen elektroneja keräävä osa.

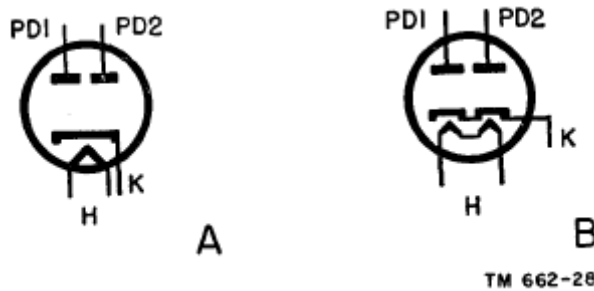
Elektroneja emittoivaa osaa kutsutaan epäsuoran hehkutuksen tapauksessa katodiksi ja suorassa hehkutuksessa useasti filamentiksi mutta yleensä myös suoran hehkutuksen tapauksessa käytetään termiä katodi. Elektroneja keräävää osaa taas kutsutaan anodiksi ja myös englanninkielistä termiä plate käytetään. Kummatkin elektrodit sijaitsevat lasi- tai metalliputken sisällä, johon on yleensä pyritty muodostamaan mahdollisimman hyvä tyhjiö mutta myös sellaisia putkiodiodeja on, joiden toiminta perustuu putken sisällä olevaan kaasuun. Jälkimmäistä putkiadiodityyppiä emme käsittele ollenkaan tämän erikoistyön yhteydessä.

Putkiodiodeille annetaan yleensä myös niiden käyttökohdetta vastaava nimi. Esimerkiksi tasasuuntauksen yhteydessä käytetään monesti nimeä puolialto- tai kokoaaltoasuuntausputki.

Saman lasiputken sisälle voidaan myös laittaa kaksi diodia, jolloin saadaan duo-diodi. Kummallakin diodilla voi olla oma katodi ja epäsuora hehkutus tai sitten esimerkiksi yhteinen katodi. Kuvassa 4.2 on esimerkkinä duo-diodista, jossa kummallakin diodilla on yhteinen katodi ja epäsuora hehkutus.



Kuva 4.1. Suoraan hehkutetun putkiodiodin rakenne



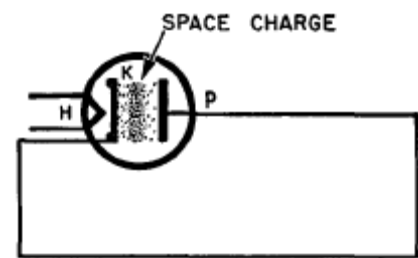
Kuva 4.2. Epäsuoraan hehkutetun duo-diodin piirikaaviosymboli

Toiminta

Diodin toiminta perustuu pääasiallisesti kolmeen tekijään: elektronien emissioon katodista, elektronipilven muodostumiseen katodin ja anodin välille sekä katodin ja anodin välille muodostuviin sähkökenttiin, joista seuraa elektronien liike eli virta katodin ja anodin välille. Diodille on johdettu sen toimintaa kuvaavia matemaattisia yhtälöitä mutta emme puutu niihin tämän erikoistyön yhteydessä, koska pärjäämme ilmeisesti niistä.

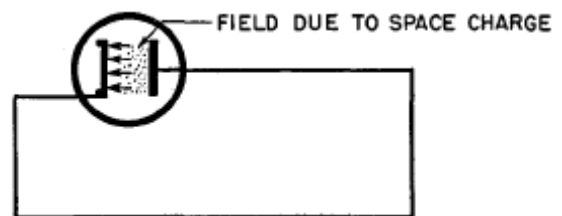
Elektronien emissio saadaan aikaan kuumentamalla katodia riittävän kuumaksi. Mitä kuumempi katodi on, sitä enemmän elektroneja emittoituu katodilta pinta-alaa kohden. Tämän virtatiheyden suuruuden saimme Richardson-Dushman-yhtälöstä (kohta 2.1).

Suurin osa johdinelektronin kineettisestä energiasta, jonka se on saanut katodimateriaalin kuumentamisen seurauksena, kuluu materiaalin irrotustyöhön kun se irtoaa materiaalista. Tämän vuoksi irronneilla elektroneilla ei juurikaan ole liike-energiaa ja ne eivät etene katodimateriaalin pinnan läheisyydestä ilman niihin vaikuttavaa sähkö- tai magneettikenttää vaan muodostavat ns. elektronipilven (engl. space charge) katodin läheisyyteen. Häviävän pienellä osalla elektroneista on riittävästi liike-energiaa edetä anodille asti, mutta voidaan sanoa, että ilman anodin ja katodin välistä sähkökenttää on anodivirta nolla. Kuvassa 4.3 on esitetty yksinkertaisesti tilanne. Tässä tapauksessa katodia hehkutetaan epäsuorasti ja katodin ja anodin välillä ei ole jännitettä, jolloin katodin ja anodin välillä ei ole sähkökenttääkään.



Kuva 4.3. Elektronipilven muodostuminen katodin läheisyyteen

Mitä enemmän elektroneja emittoituu katodilta, eli mitä kuumempi katodi on, sitä tiheämpi ja suurempi elektronipilvi muodostuu katodin lähelle. Jokainen katodilta poistuva elektroni jättää jälkeensä positiivisen varauksen. Koska elektronipilven varaus on negatiivinen suhteessa katodiin, muodostuu sähkökenttä elektronipilven ja katodin välille (Kuva 4.4). Normaalisti käytännöstä poiketen kentän suuntana käytetään nyt elektronin liikesuuntaa, koska se on havainnollisempi. Tiettyssä vaiheessa sähkökentän suuruus on niin suuri, että jokaista katodilta pilveen liittyvää elektronia kohti palaa yhtä monta elektronia takaisin pilvestä katodille ja pilven tiheys ei enää kasva. On saavutettu tasapaino. Jos katodin lämpötilaa kasvatetaan, emittoituvien elektronien määrä saadaan kasvamaan, mutta samalla tavalla tasapaino saavutetaan lopulta. Tätä tasapainoa kutsutaan nimellä emissiosaturaatio (engl. emission saturation).

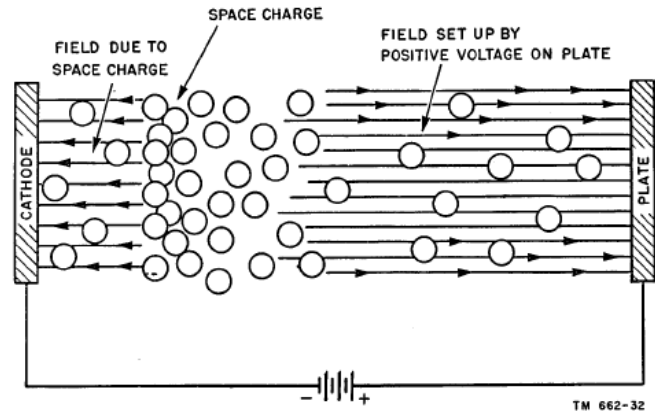


Kuva 4.4. Elektronipilven muodostama sähkökenttä

Nyt jos katodin ja anodin välille muodostetaan jännite siten, että anodi on korkeammassa potentiaalissa suhteessa katodiin, eikö tämä elektronipilvi kokonaisuudessaan suuntaisi positiiviselle anodille, koska anodin ja katodin välille on muodostunut sähkökenttä? Näin ei kuitenkaan käy, vaan katodin ja anodin välille muodostuu kaksi sähkökenttää. Yksi elektronipilvestä katodille, ja yksi elektronipilvestä anodille (kuva 4.5). Vaikka käytännössä jännite onkin luotu anodin ja katodin välille, elektronipilvi näiden välissä vaikuttaa tilanteeseen seuraavasti:

Kun tietty määrä elektroneja poistuu elektronipilvestä anodille, elektronipilven nettovaraus pienenee samalla pienentäen sähkökenttää elektronipilven ja katodin välillä. Sähkökentän pienentymisen takia sama määrä elektroneja palaa elektronipilveen takaisin mitä siitä poistui

palauttaen tasapainon. Esimerkiksi jos elektronipilvestä anodille poistuvien elektronien määrä on 1mA/s, sama määrä elektroneja liittyy elektronipilveen takaisin katodilta. Eli voidaan ajatella, että elektronien liike on katodilta elektronipilveen, ja elektronipilvestä anodille elektronipilven tiheyden pysyessä samana. Tätä elektronien liikettä kutsutaan yksinkertaisesti anodivirraksi (tai engl. plate current). Virran suuruutta voidaan kasvattaa kasvattamalla anodin ja katodin välistä jännitettä tai kasvattamalla katodin lämpötilaa. Koska katodi on elektroneja emittoiva osa, ei negatiivisella anodijännitteellä saada aikaan anodivirtaa.

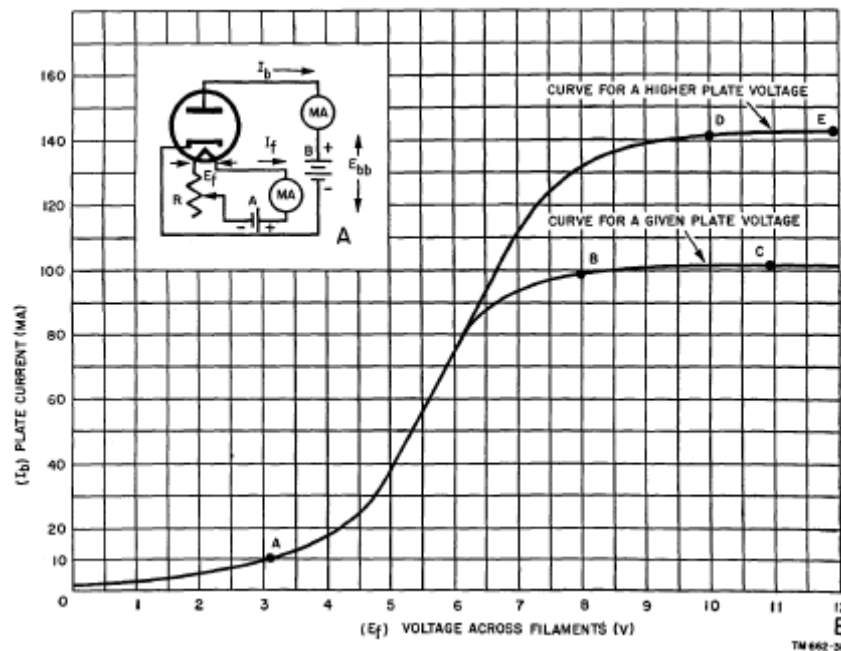


Kuva 4.5. Sähkökenttien muodostuminen katodin ja anodin välille elektronipilven vaikutuksesta

Katodilämpötilan vaikutus anodivirtaan

Aiemmin esitetyillä tiedoilla voidaan hyvin päätellä millainen kuvaaja saataisiin anodivirralla katodilämpötilan funktiona anodijännitteen pysyessä vakiona. Anodivirta alkaisi 0:sta katodin ollessa kylmä ja kasvaisi katodin lämpötilan kasvaessa. Lopulta kasvu saavuttaisi emissiosaturaation, jolloin katodilämpötilan nostamisella ei juurikaan olisi vaikutusta anodivirtaan.

Kuvassa 4.6 on esitetty tämä käytännössä. Tietyn pisteen jälkeen katodilämpötilan kasvattamisella ei ole enää juurikaan vaikutusta anodivirtaan, koska anodi ei pysty vetämään puoleensa enempää elektroneja. Anodijännitettä kasvattamalla (ylempi käyrä) voidaan saavuttaa suurempi anodivirta.

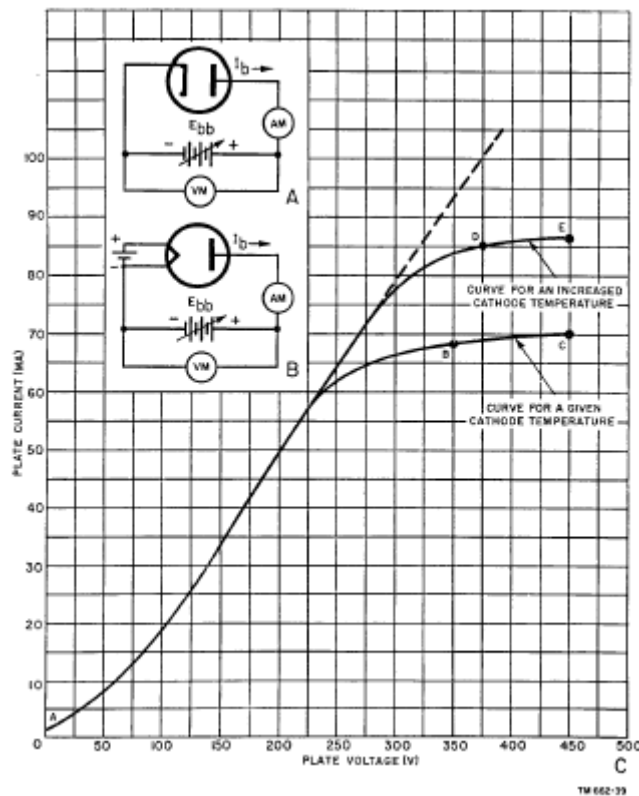


Kuva 4.6. Anodivirta-katodilämpötila toimintakuvaaja

Anodijännitteen vaikutus anodivirtaan

Jos katodin lämpötila pidetään vakiona ja tarkastellaan anodijännitteen vaikutusta anodivirtaan, saadaan kuvassa 4.7 esitetty kuvaaja. Tämä on yleisin tilanne kuinka putkidiodia käytetään. Kuvasta nähdään myös kytkentä, jolla tällainen kuvaaja voidaan saada aikaan. Ylemmässä kytkennässä diodi on esitetty ilman hehkutusta ja tämä onkin yleisin tapa esittää epäsuoraan hehkutetut putket piirikaavioissa. Alemmassa kytkennässä on esitystapa suoraanhehkutetulle diodille.

Kuvaajasta nähdään, että anodivirta kasvaa melko nopeasti anodijännitteen kasvaessa saavuttaen maksimin. Anodivirran maksimi johtuu siitä, että katodin emissiovirtatiheys ei riitä enää vastaamaan anodijännitteen kasvua. Tällöin kaikki katodilta emittoituvat elektronit muodostavat anodivirran. Jos anodivirtaa halutaan suuremmaksi, täytyy katodin lämpötilaa nostaa. Tämä tilanne näkyy ylemmässä käyrässä. Kuvaajasta nähdään myös se, että anodijännitteen arvolla 0V, pieni anodivirta kulkee putkessa. Tämä johtuu siitä, että pienellä osalla katodilta emittoituvia elektroneja on riittävä kineettinen energia kulkemaan anodille asti.



Kuva 4.7. Anodivirta-anodijännite toimintakuvaaja

On osoitettu, että diodin virta noudattaa yhtälöä:

$$I_a = GU_a^{\frac{3}{2}}$$

missä G on putken geometriasta ja katodimateriaalista riippuva vakio ns. perveance. Edellä esitetyistä syistä anodivirta saavuttaa maksiminsa tietyllä katodilämpötilalla, jolloin yhtälö ei enää päde.

Staattiset ja dynaamiset ominaisuudet

Staattisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan putken ominaisuuksia tilanteessa, jossa anodijännite ja anodivirta ovat muuttumattomia eli staattisia. Anodijännitteen ja anodivirran suhteesta voidaan määrittää dc-anodiresistanssi, jota voidaan käyttää analyysin apuna. Staattisen tilanteen tapauksessa diodi korvattaisiin analyysissä tällä resistanssilla.

Dynaamisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan putken ominaisuuksia tilanteessa, jossa anodijännite ja virta eivät ole enää vakioita. Edellisessä kohdassa määritimme dc-anodiresistanssin kolmessa pisteessä. Nämä resistanssit kuvaavat putken tasavirtaa vastustavaa kykyä. Tilanne on kuitenkin toinen jos käytössä on vaihtovirta. Tämä on todellinen tilanne putkea käytettäessä. Esimerkiksi tasasuuntauksen yhteydessä diodi on osana piiriä, jossa anodijännite vaihtelee polariteetiltään ja suuruudeltaan. Vastaavat resistanssit voidaan laskea myös kaikille muille putkityypeille.

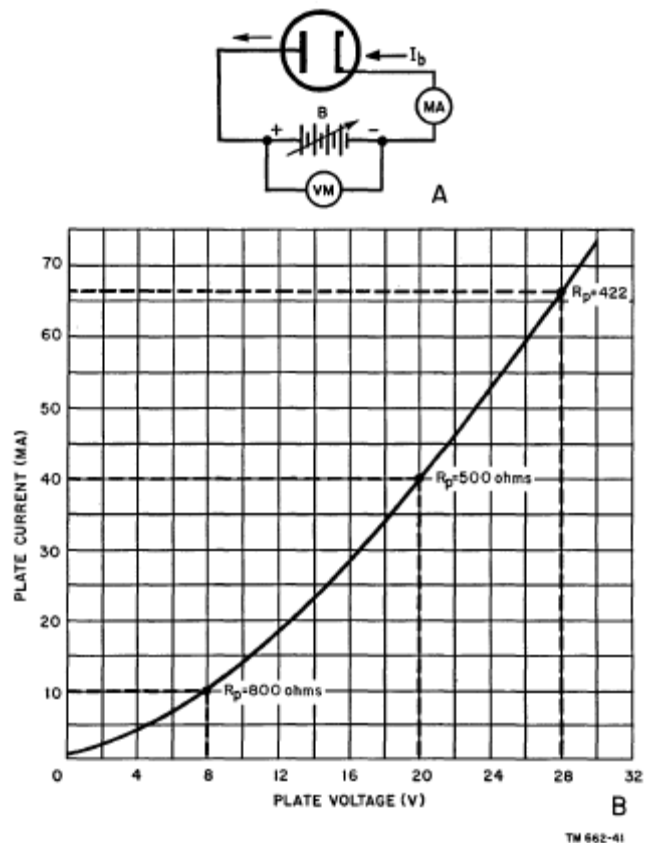
DC-anodiresistanssi

Kuvassa 4.8 on osa putken anodivirta-anodijännite kuvaajaa. Koska positiivista anodijännitettä vastaa tietty anodivirran suuruus, voidaan näiden kahden suhteesta laskea anodiresistanssi eri pisteissä. Tarkemmin ottaen dc-anodiresistanssi ja ac-anodiresistanssi. DC-resistanssi saadaan katsomalla kuvaajasta anodijännite ja sitä vastaava anodivirta ja näiden suhteesta. Eli:

$$R_a = \frac{U_a}{I_a}$$

Kuvaajaan on merkitty esimerkkinä kolme kohtaa, joille on laskettu dc-resistanssi dc-jännitteellä ja sitä vastaavalla dc-virralla. Resistanssien arvoiksi on saatu 800Ω, 500Ω ja 422 Ω. Koska diodin anodivirta-anodijännitekuvaaja ei ole lineaarinen, resistanssien arvot poikkeavat toisistaan. Anodijännitteen pienentyessä putken dc-resistanssi kasvaa ja anodijännitteen kasvaessa dc-resistanssi pienenee.

Duo-diodilla voidaan saavuttaa puolta pienemmät resistanssit jos diodit kytketään rinnakkain eli siten, että kummankin katodit yhdistetään ja anodit yhdistetään. Tällöin saavutetaan kaksi kertaa suurempi anodivirta samalla anodijännitteellä, joka vastaa puolet pienempää resistanssia.



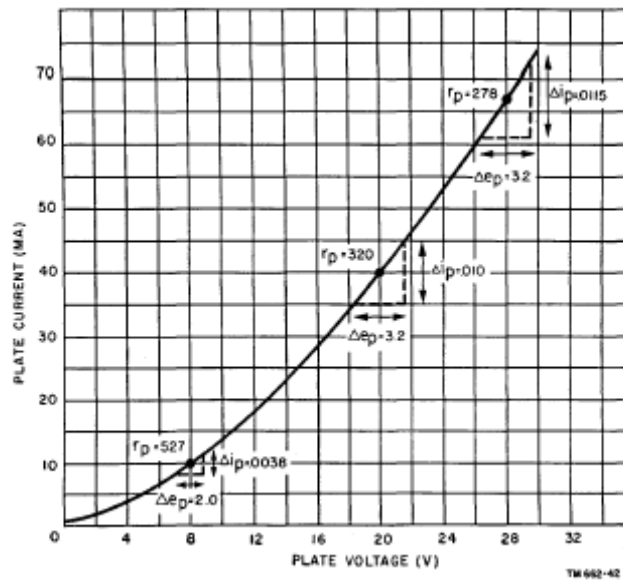
Kuva 4.8. Anodivirta-anodijännitekuvaaja dc-resistanssien laskemiseksi

AC-anodiresistanssi

AC-anodiresistanssi kuvaa putken vaihtovirtaa vastustavaa kykyä ja se voidaan määrittää eri pisteissä laskemalla pienen anodijänniteheilauksen suhde pieneen vastaavaan anodivirtasuhteeseen:

$$r_a = \frac{dU_a}{dI_a} \approx \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$$

Kuvassa 4.9 olevaan kuvaajaan on merkitty samat kolme kohtaa ja laskettu vastaavien ac-anodiresistanssien suuruudet. Resistanssien suuruuksiksi saadaan 527Ω , 320Ω ja 278Ω . Niin kuin nähdään, nämä resistanssit ovat lähes puolta pienemmät kuin vastaavat dc-tilanteen resistanssit. Näin on yleensä kaikilla putkityypeillä. Havaitaan, että ac-anodiresistanssi kasvaa anodijännitteen pienentyessä ja pienenee anodijännitteen kasvaessa.



Kuva 4.9. Anodivirta-anodijännitekuvaaja ac-resistanssien laskemiseksi

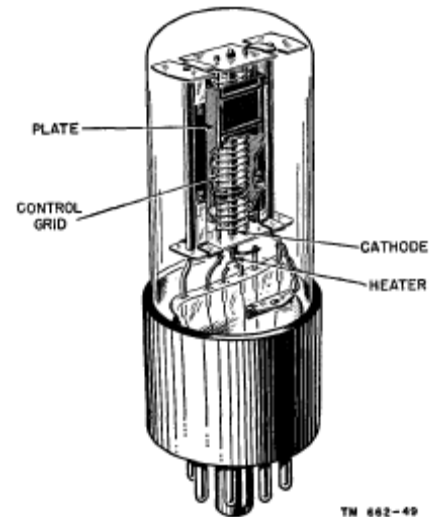
5. Triodi

Kun katodin ja anodin välille lisätään yksi elektrodi, ohjaushila (control grid), saadaan triodi. Triodi mullisti aikoinaan maailmaa mahdollistamalla signaalin vahvistamisen ja näin mahdollisti radiotekniikan synnyn.

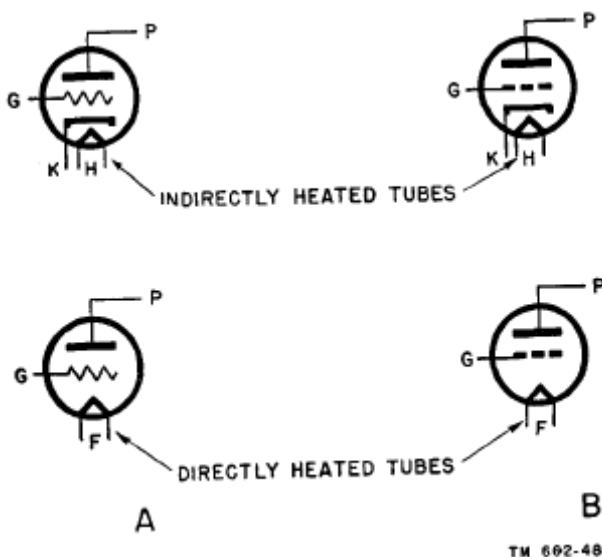
Kuvassa 5.1 on esitetty triodin rakenne yksinkertaisesti. Triodissa on samat pääelementit kuin diodissakin eli elektroneja emittoiva osa (katodi) ja elektroneja keräävä osa (anodi). Katodi voi olla epäsuoraan tai suoraan hehkutettu. Yleensä katodi on epäsuoraan hehkutettu, jolloin sen sisällä on hehkulanka. Lisäksi katodin ja anodin välissä, lähempänä katodia, on yksi ylimääräinen elektrodi, ohjaushila.

Ohjaushila on rakennettu katodin ympärille ohuesta metallilangasta kohdassa 3.2 esitetyllä tavalla. Anodi taas sijaitsee näiden kaikkien ympärillä, joten yleensä triodia tarkasteltaessa ei ohjaushilaa ja katodia välttämättä näe.

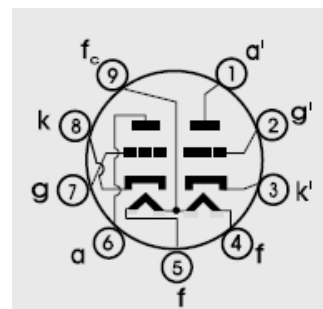
Kuvassa 5.2 on esitetty triodin yleisimmät piirikaaviosymbolit. Yleensä hehkulanka jätetään piirtämättä piirikaavioon. Saman lasiputken sisälle voidaan sijoittaa myös useampi triodi. Yleisin näistä on duo-triodi, jossa kummallakin triodilla on oma anodi ja katodi sekä hehkulanka. Tällainen on esitetty kuvassa 5.3. Hehkulangassa on yleensä myös ns. väliulosotto (centre tap).



Kuva 5.1. Triodin rakenne



Kuva 5.2. Triodin yleisimmät piirikaaviosymbolit



Kuva 5.3. Duo-triodi

Lyhenteet:

a = anodi
k = katodi
g = ohjaushila
f = hehkulanka
f_c = hehkulangan väliulosotto

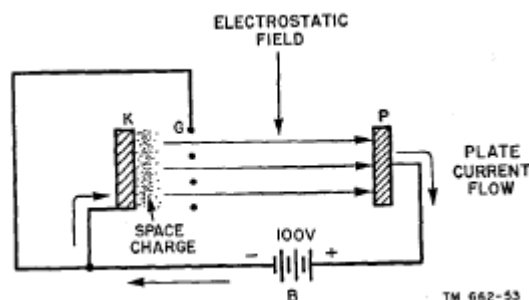
Toiminta

Triodin toiminta perustuu samoihin periaatteisiin kuin diodinkin, lukuunottamatta ylimääräistä ohjaushilaa. Elektronipilvi muodostuu samalla periaatteella katodin läheisyyteen ja anodivirta saadaan kulkemaan putkessa muodostamalla positiivinen jännite anodin ja katodin välille.

Ohjaushila vaikuttaa toimintaan siten, että sillä voidaan ohjata anodivirran suuruutta ilman, että anodijännitettä tarvitsee muuttaa. Diodissahan anodivirtaa voitiin ohjata ainoastaan anodijännitteellä (myös katodin lämpötilalla mutta yleensä katodi pidetään samassa lämpötilassa). Koska ohjaushila sijaitsee huomattavasti lähempänä katodia kuin anodia, on sen vaikutus myös monta kertaa suurempi kuin anodijännitteen. Tämän suhteen suuruus riippuu putkesta ja voi olla mitä tahansa väliltä 10-60 (ei tarkkoja rajoja). Eli pienellä ohjaushilan jännitemuutoksella saadaan aikaan suuri muutos anodivirtaan. Jos sama muutos haluttaisiin tehdä anodijännitteellä pitäisi jännitemuutoksen olla huomattavasti suurempi.

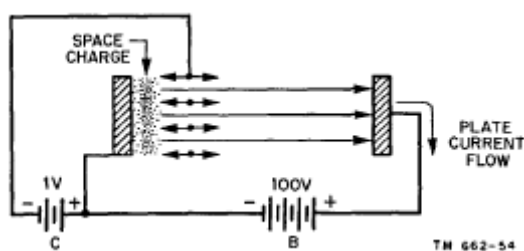
Ohjaushilan vaikutus

Tarkastellaan ensin tilannetta, jossa hila on samassa jännitteessä katodin kanssa. Kuvassa 5.4 on esitetty tällainen tilanne. Koska hila on samassa potentiaalissa katodin kanssa, ei se tässä tilanteessa vaikuta juurikaan putken toimintaan ja triodi toimii kuin diodi. Vaikka häviävän pieni osa elektroineista voikin osua hilarakenteeseen, on hilavirta häviävän pieni. Elektronit kulkevat siis katodilta elektronipilveen ja siitä anodille ja anodilta takaisin katodille. Havainnollistamisen vuoksi anodivirran suunta on sama kuin elektronienkin.



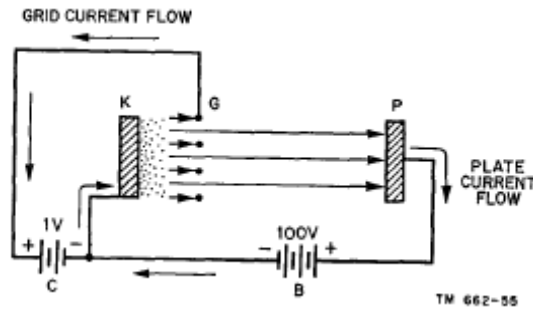
Kuva 5.4. Ohjaushilan ja katodin välinen jännite nolla

Kuvassa 5.5 on esitetty tilanne, jossa hilalle on muodostettu pieni negatiivinen jännite. Elektronipilven ja anodin välille muodostuu tällöin kolme sähkökenttää. Anodi muodostaa kentän, joka vetää elektroneja elektronipilvestä puoleensa. Hila taas muodostaa kentän, joka vastustaa elektronipilvestä anodille meneviä elektroneja mutta toisaalta edesauttaa hilan ja anodin välillä olevia elektroneja etenemään anodille. Lopputulos on se, että negatiivinen jännite hilalla pienentää anodivirran suuruutta. Mitä negatiivisempi jännite hilalla on, sitä pienempi anodivirta on.



Kuva 5.5. Ohjaushila negatiivisessa jännitteessä suhteessa katodiin

Viimeinen tilanne, eli hilan ja katodin välillä on positiivinen jännite, on esitetty kuvassa 5.6. Hila muodostaa nyt elektroneja puoleensa vetävän sähkökentän. Tämä sähkökenttä edesauttaa elektronien liikettä kohti anodia, ja koska anodikin vetää elektroneja puoleensa, suurin osa elektroneista päätyy positiiviselle anodille. Osa elektroneista kuitenkin osuu hilalankoihin aiheuttaen hilavirran, joka on huomattavasti suurempi kuin aiemmissa tilanteissa. Positiivinen jännite hilan ja katodin välillä kasvattaa siis anodivirtaa sekä aiheuttaa hilavirran.

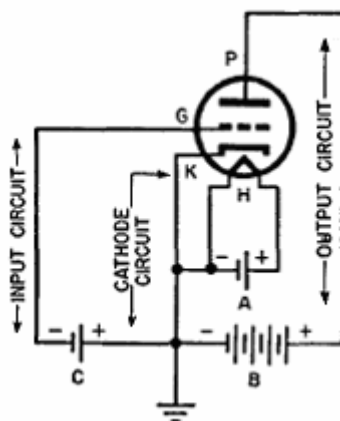


Kuva 5.6. Ohjaushila positiivisessa jännitteessä suhteessa katodiin

Nämä kolme tilannetta ovat vain havainnollistavia ja yksinkertaistettuja. Yksityiskohtaisempi toiminta selventyy tarkasteltaessa toimintakuvaajia.

Staattiset ominaisuudet

Kuvassa 5.7 on esitetty kytkentä, jolla triodin staattisia ominaisuuksia voidaan tarkastella. Jännitelähde A on hehkulankaa varten ja on yleensä luokkaa 6.3V. Jännitelähteillä B ja C voidaan ohjata anodivirtaa. Kytkentään on merkitty myös sisäänmeno-, katodi- ja ulostulopiiri. Nyt näissä piireissä ei ole mitään, koska tarkastelemme triodin toimintaa eri hila ja anodijännitteillä eli tarkastelemme triodin staattisia ominaisuuksia. Jännitelähde B vastaa siis anodijännitettä ja jännitelähde C hilajännitettä. Saadaan ns. toimintakuvaajat.

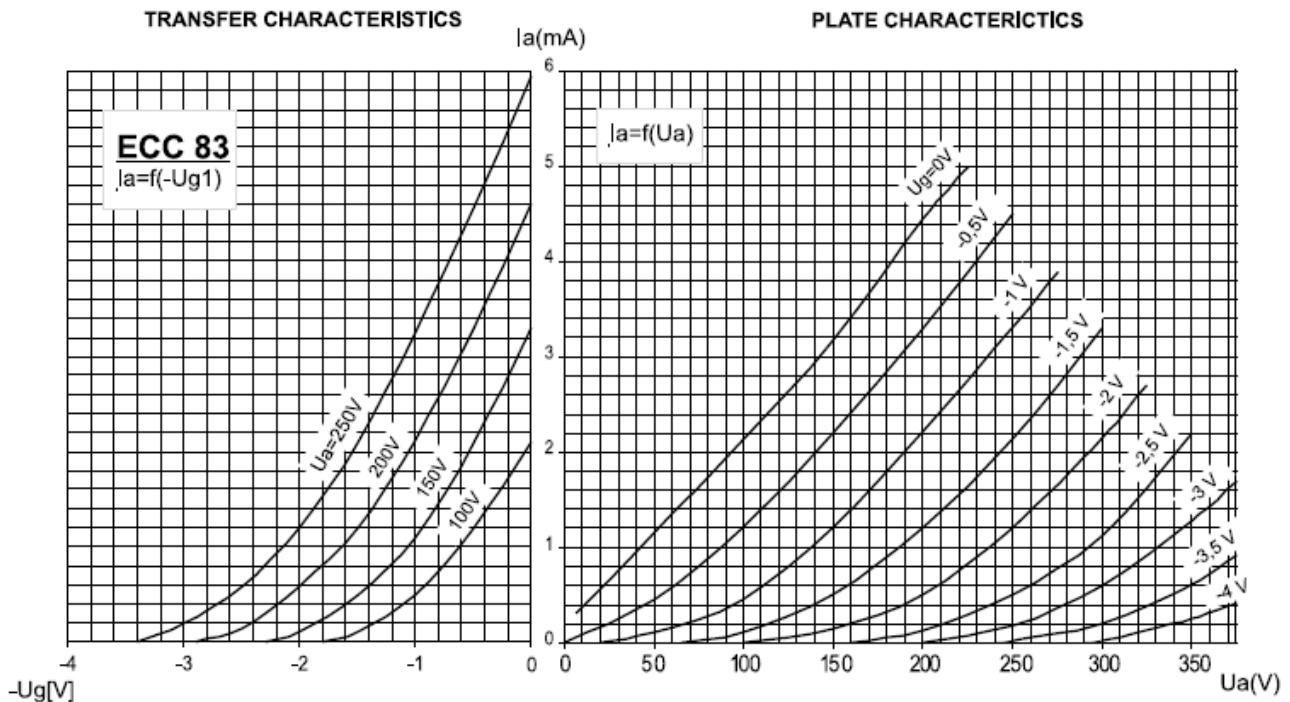


Kuva 5.7. Triodin sisäänmeno-, katodi ja ulostulopiirit sekä dc-käyttöjännitteet.

Toimintakuvaajat

Kuvassa 5.8 on esitetty tarkemmin kuinka anodivirta käyttäytyy triodissa. Vasemman puoleisessa kuvaajassa on ns. hilan toimintakuvaaja, jossa anodivirta on esitetty hilajännitteen funktiona neljällä eri anodijännitteellä. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa taas on ns. anodin toimintakuvaaja, jossa

anodivirta on esitetty anodijännitteen funktiona yhdeksällä eri hilajännitteen arvolla. Niin kuin nähdään, anodivirta käyttäytyy epälineaarisesti tietyissä osissa kuvaajia ja tietyissä osissa lähes lineaarisesti.



Kuva 5.8. Hilan ja anodin toimintakuvaajat

Vastaavalla tavalla kuin diodille, on triodille johdettu sen virtaa kuvaava yhtälö [6]:

$$I_k = I_g + I_a = G \left(U_g + \frac{U_a}{\mu} \right)^m$$

missä I_k on katodivirta (space current)

I_g on hilavirta

I_a on anodivirta

G on putken geometriasta ja katodimateriaalista riippuva vakio ns. perveance.

U_g on hilajännite (yleensä negatiivinen)

U_a on anodijännite

μ on ns. vahvistuskerroin

m vaihtelee välillä 1.1 – 2.5 negatiivisilla hilajännitteen arvoilla

EkspONENTTI m vaihtelee huomattavasti mutta jos hilajännite tai anodijännite pidetään vakiona se vaihtelee niin vähän, että sen voidaan sanoa olevan vakio [4]. Joissain analyyseissä arvona pidetään $m=1.5$ kun hilajännite on nolla. Jos hila pidetään negatiivisena, ei se kerää juurikaan elektroneja ja voidaan olettaa, että hilavirta I_g on nolla.

Kuvan 5.8 toimintakuvaajista voidaan määrittää triodin toimintaa tarkemmin kuvaavia parametreja. Diodille määritimme dc- ja ac-resistanssin. Triodille voidaan määrittää myös dc-tilannetta vastaavia ominaisuuksia mutta koska triodia käytetään kuitenkin tilanteissa, joissa hilajännitteen pienillä muutoksilla ohjataan anodivirtaa, on järkevämpää määrittää tällaisiin tilanteisiin liittyviä vakioita. Tärkeimmät näistä ovat transkonduktanssi g_m , anodiresistanssi r_a ja vahvistuskerroin μ .

Transkonduktanssi eli g_m

Edellisessä kohdassa määritimme suhteen anodijännitteen muutokselle ja sitä vastaavalle anodivirran muutokselle. Hilajännitteellä voidaan ohjata myös anodivirtaa. On siis järkevää määrittää myös näiden suhde toisiinsa. Transkonduktanssi (joskus käytetään myös nimeä yhteiskonduktanssi) on anodivirran muutoksen suhde sitä vastaavaan hilajännitteen muutokseen anodijännitteen pysyessä vakiona. Sen yksikkö on S (siemens) tai mho (ohm takaperin).

$$g_m = \frac{\partial I_a}{\partial U_g} \approx \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \right)_{U_a = \text{vakio}}$$

Kuvassa 5.11 on valittu kaksi toimintapistettä. Määritetään kummassakin pisteessä transkonduktanssi:

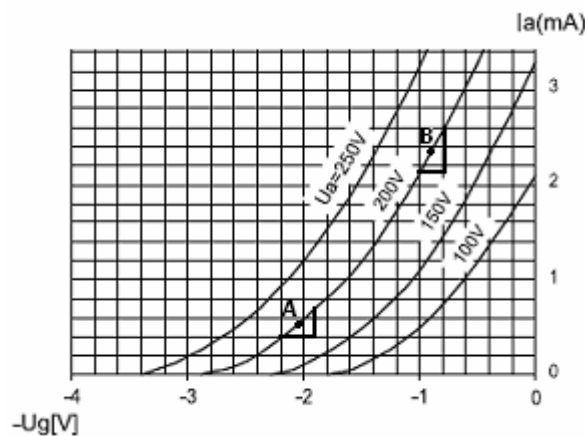
Piste A:

$$g_m = \frac{0.7\text{mA} - 0.4\text{mA}}{2.2\text{V} - 1.92\text{V}} \approx 1.1\text{mS}$$

Piste B:

$$g_m = \frac{2.6\text{mA} - 2.14\text{mA}}{1.0\text{V} - 0.8\text{V}} \approx 2.3\text{mS}$$

Transkonduktanssikin vaihtelee hyvin paljon riippuen toimintapisteestä. Koska käyrien kulmakertoimet kasvavat anodivirran kasvaessa, transkonduktanssi kasvaa anodivirran kasvaessa.



Kuva 5.9. Transkonduktanssin määrittäminen hilan toimintakuvaajasta

AC-anodiresistanssi eli r_a

Koska tiettyä anodijännitteen muutosta vastaa tietty anodivirran muutos, voidaan määrittää ac-anodiresistanssi. Anodiresistanssi määritellään seuraavasti:

$$r_a = \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \approx \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_g = \text{vakio}}$$

Kuvassa 5.10 on esimerkkinä valittu neljä eri toimintapistettä. Tietyssä osassa kuvaajaa suorat ovat hyvin yhdensuuntaiset jolloin anodiresistanssitkin ovat lähes samoja. Esimerkiksi jos vertaa pisteiden A ja B aluetta pisteen D alueeseen, on ero selvä.

Määritetään esimerkkinä toimintapisteille A ja D anodiresistanssit.

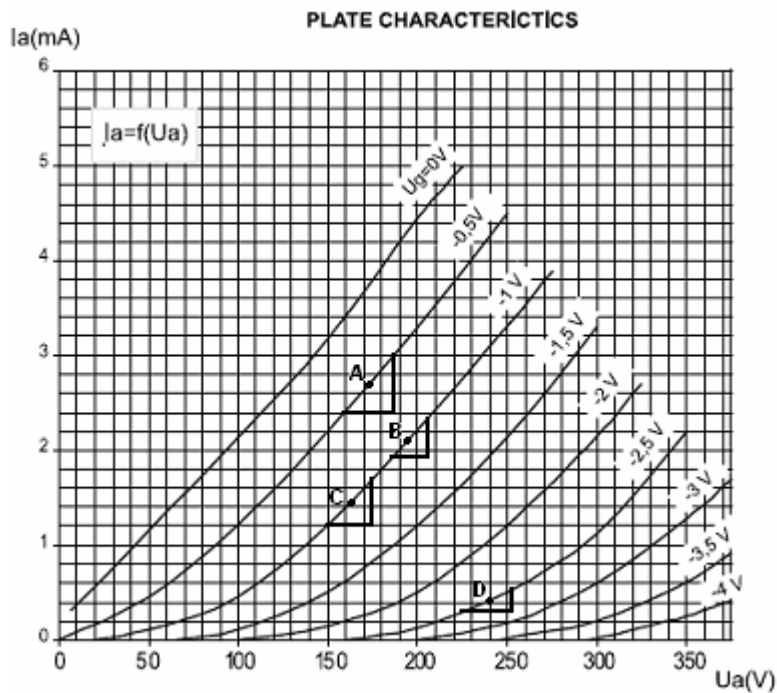
Pisteessä A:

$$r_a = \frac{186V - 160V}{3.0mA - 2.4mA} \approx 43k\Omega$$

Pisteessä D:

$$r_a = \frac{253V - 225V}{0.53mA - 0.31mA} \approx 127k\Omega$$

Koska anodiresistanssi on määritelty anodin toimintakuvaajassa olevien käyrien kulmakertoimien käänteisfunktiona ja käyrien kulmakertoimet kasvavat anodivirran (tai jännitteen) kasvaessa, anodiresistanssi pienenee anodivirran tai jännitteen kasvaessa.



Kuva 5.10. Anodiresistanssin määrittäminen anodin toimintakuvaajasta

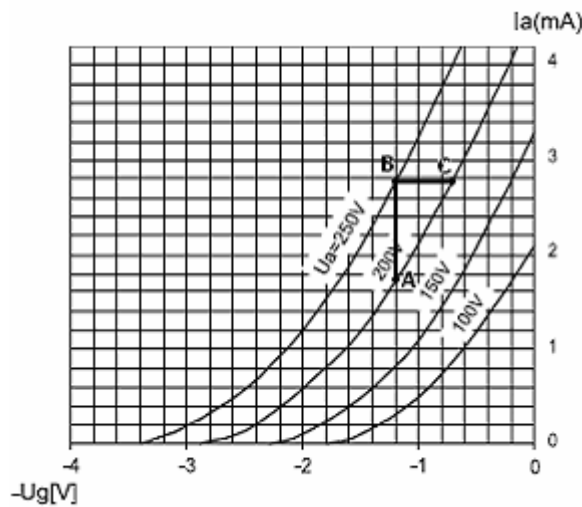
Vahvistuskerroin μ

Vahvistus kertoo meille hilan ja anodin suhteellisen vaikutuksen anodivirtaan eli kuinka paljon suurempi vaikutus hilalla verrattuna anodiin on anodivirtaan. Vahvistus määritellään seuraavasti:

$$\mu = \frac{\partial I_a / \partial U_g}{\partial I_a / \partial U_a} = \frac{\partial U_a}{\partial U_g} \approx \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \right)_{I_a = \text{vakio}}$$

Voimme määrittää vahvistuksen joko hilan tai anodin toimintakuvaajasta. Otetaan esimerkiksi hilan toimintakuvaaja (kuva 5.9). Valitaan ensin jokin toimintapiste kuvaajasta esim. $U_g = -1.2V$ ja $U_a = 200V$ (piste A). Tässä pisteessä $I_a = 1.7mA$. Seuraavaksi teemme muutoksen anodijännitteeseen pitäen hilajännitteen vakiona ja katsomme paljonko anodivirta muuttuu. Anodijännitteellä $U_a = 250V$ on anodivirta $I_a = 2.77mA$ eli anodijännitteen muutoksella $\Delta U_a = 50V$ on $\Delta I_a = 1.07mA$ (piste B). Nyt palaamme tästä pisteestä takaisin anodijännitteeseen 200V pitäen anodivirran 2.77mA:ssa, jolloin voimme määrittää vastaavan hilajännitteen muutoksen. Saamme hilajännitteeksi $U_g = -0.7V$ ja muutokseksi $\Delta U_g = 0.5V$ (piste C). Tämä tarkoittaa siis sitä, että hilajännitteen muutoksella 0.5V ja anodijännitteen muutoksella 50V saadaan aikaan yhtä suuri muutos anodivirtaan. Vahvistus toimintapisteessä A on siis $\mu = 50V/0.5V = 100$.

Vahvistus voidaan määrittää siis suoraan toimintakuvaajista pitämällä anodivirta vakiona ja katsomalla anodijännitteen muutosta vastaava hilajännitteen muutos (siis pisteet B ja C). Kuvaajasta voidaan havaita, että vahvistus on lähes vakio riippumatta anodivirran suuruudesta. Vahvistus kuitenkin pienenee anodivirran lähestyessä nollaa.



Kuva 5.11. Vahvistuksen määrittäminen hilan toimintakuvaajasta

Vahvistuksen, anodiresistanssin ja transkonduktanssin yhteys

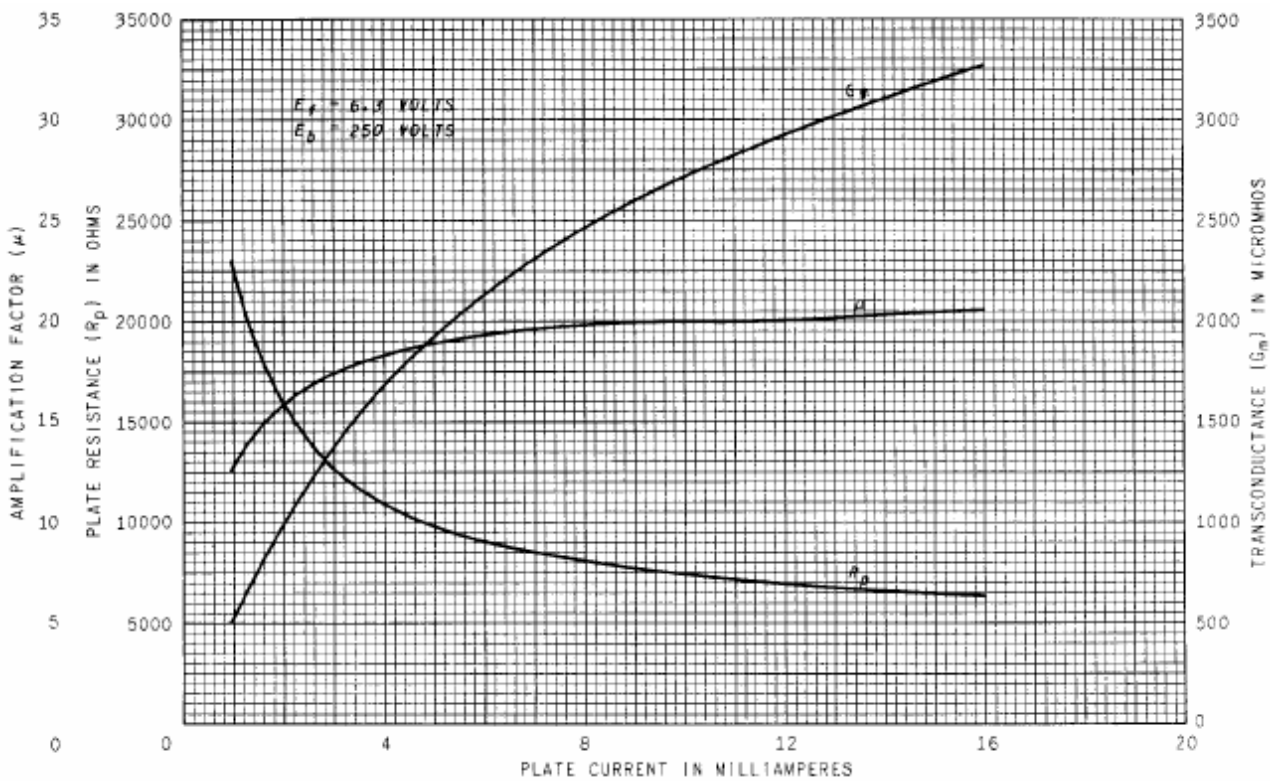
Jos tarkastellaan anodiresistanssin ($r_a = \partial U_a / \partial I_a$) ja transkonduktanssin ($g_m = \partial I_a / \partial U_g$) matemaattisia esitysmuotoja, havaitaan, että kummassakin esiintyy ∂I_a . Jos anodiresistanssi kerrotaan transkonduktanssilla saadaan $\partial U_a / \partial U_g$, joka on yhtä kuin triodin vahvistus μ . Eli:

$$\mu = r_a \times g_m$$

Yleensä putken datalehdellä on annettu vahvistus ja anodiresistanssi. Jos halutaan tietää putken transkonduktanssi, saadaan se vahvistuksen ja anodiresistanssin suhteesta:

$$g_m = \frac{\mu}{r_a}$$

Kuvassa 5.12 on esitetty triodin 6J5 parametrit anodivirran funktiona. Niin kuin nähdään, vahvistus on näistä kolmesta suureesta eniten vakio. Vaikka anodiresistanssi pienenee anodivirran kasvaessa, transkonduktanssi kuitenkin kasvaa samassa suhteessa pitäen vahvistuksen lähes vakiona.



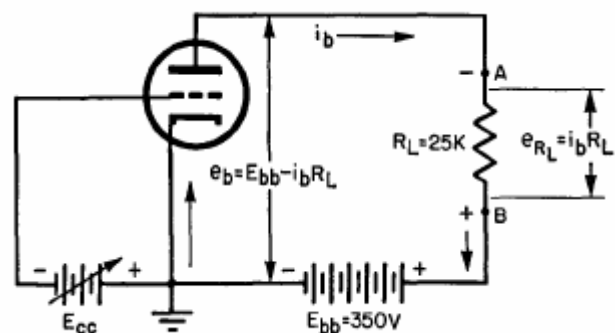
Kuva 5.12 Triodin 6J5 parametrit anodivirran funktiona ($U_a = 250V$)

Dynaamiset ominaisuudet

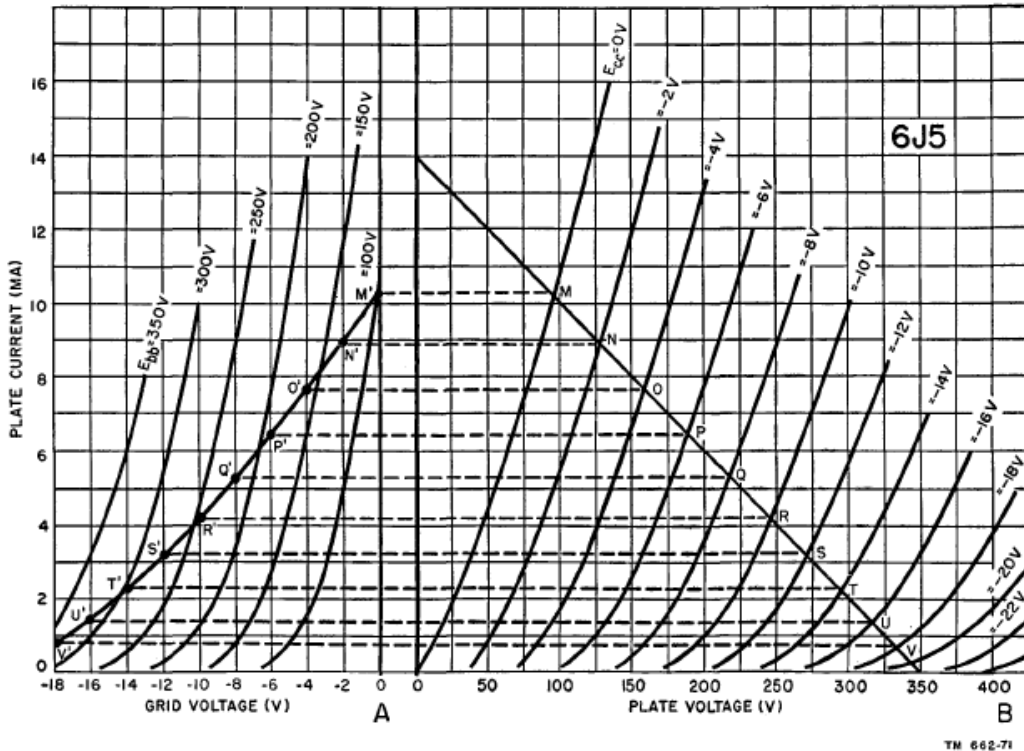
Triodin staattiset ominaisuudet havainnollistavat putken toimintaa tilanteissa joissa anodi on kytketty suoraan jännitelähteeseen. Käytännössä anodilla, eli triodin ulostulopiirissä, on kuitenkin kuorma, jolla anodivirta voidaan muuttaa jännitteeksi. Tällöin anodijännite ei pysy vakiona vaan muuttuu anodivirran muuttuessa. Tällainen kytkentä on esitetty kuvassa 5.13.

Nyt anodivirta i_b muutetaan kuormavastuksen R_L avulla ulostulojännitteeksi e_{RL} . Triodi toimii nyt siis jännitevahvistimena. Mitä suurempi virta kuormavastuksen läpi kulkee, sitä pienempi jännite anodilla on. Hilan ja katodin välinen jännitelähde E_{cc} ohjaa anodivirtaa. Riittävän negatiivisella jännitteellä triodi saadaan cut-offiin jolloin anodivirta on nolla ja anodilla näkyy täysi 350V.

Kuorman vaikutus on havainnollista esittää ns. kuormituskuorona putken toimintakuvaajiin. Tällainen kuvaaja on esitetty kuvassa 5.14.



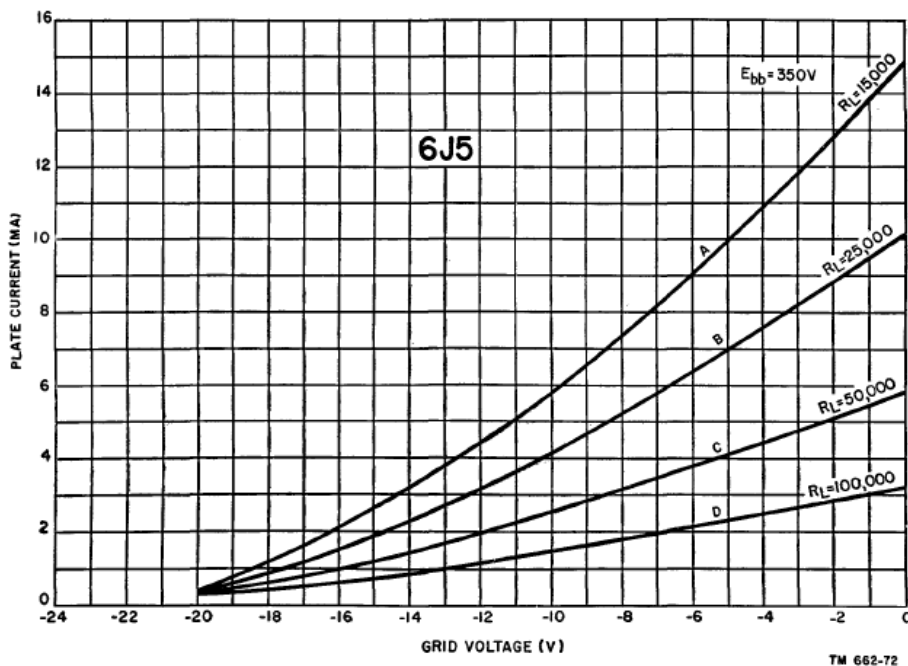
Kuva 5.13. Triodi ja kuorma anodilla



Kuva 5.14. Anodin ja hilan toimintakuvaajat ja kuormituskuora ($R_L = 25k\Omega$)

Kuorman vaikutus voidaan havaita kummasta tahansa toimintakuvaajasta. Jos tarkastellaan hilajännitteen vaikutusta anodivirtaan esimerkiksi pisteen P ympäristössä (esim. pisteet O ja Q), havaitaan, että muutokset anodivirrassa ovat yhtä suuret kumpaankin suuntaan. Jos taas tarkastellaan pistettä U, ei tilanne ole enää tällainen. Sama epälinearisuus on nähtävissä hilan toimintakuvaajaan piirrettyssä kuormituskuorassa, joka on saatu projisoimalla kuormituskuora anodin toimintakuvaajasta. Tästä johtuu triodin aiheuttama särö.

Kuorman vaikutus

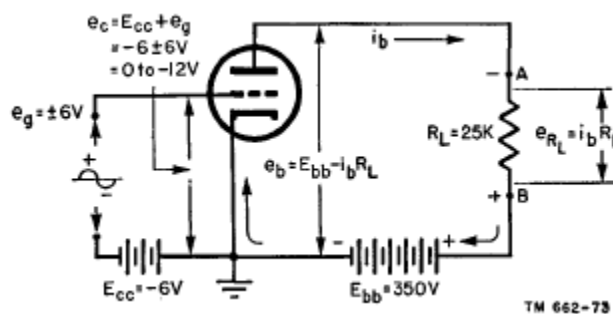


Kuva 5.15. Hilan dynaaminen toimintakuvaaja neljällä eri kuormalla

Kuorman kasvattaminen näkyy kuormituspuoran kulmakertoimen pientymisenä ja samalla myös epälineaarisuuden pientymisenä. Kuvassa 5.15 on esitetty hilan dynaaminen toiminta neljällä eri kuormalla. Niin kuin nähdään, käyrät ovat sitä suurempia, mitä suurempi on kuorma. Epälineaarisuuden pientyminen johtuu siitä, että kuorman kasvaessa putken anodiresistanssin (tai transkonduktanssin) vaikutus pienenee.

Toimintapisteen vaikutus

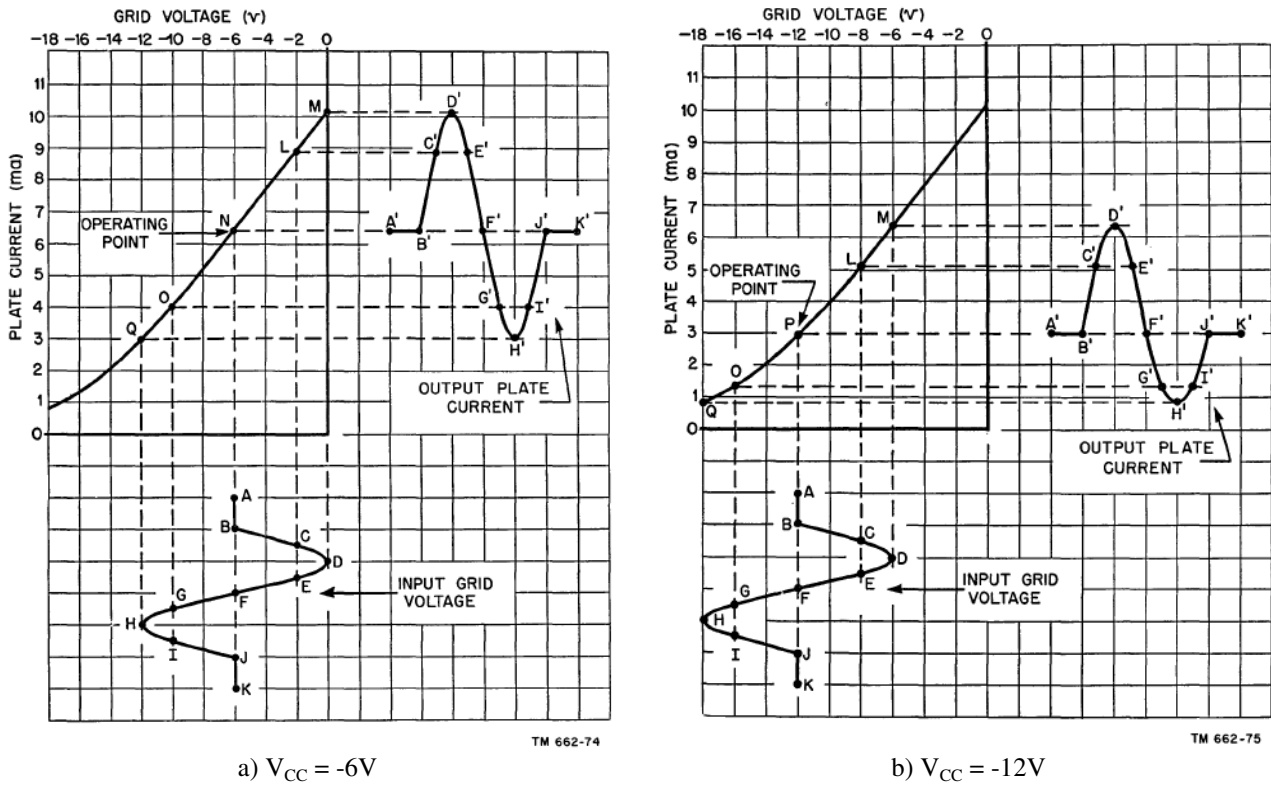
Kun triodia halutaan käyttää jännitevahvistimena, tuodaan hilalle biasjännitteen lisäksi vahvistettava signaali. Tämä sisäänmenosignaali summautuu tällöin valittuun toimintapisteeseen. Kuvassa 5.16 on esitetty sama kytkentä kuin kuvassa 5.13 paitsi, että nyt hilan dc-jännitteeksi, eli biasjännitteeksi on valittu -6V, johon sisäänmenosignaali summautuu aiheuttaen ulostulojännitteen kuormavastuksen yli. Biasointi on nyt toteutettu dc-jännitelähteellä mutta yleensä se toteutetaan muilla keinoilla.



Kuva 5.16. Yksinkertainen triodivahvistin

Riippuen valitusta toimintapistestä ja sisäänmenosignaalin suuruudesta, ulostulosignaali voi olla enemmän tai vähemmän säröytynyt. Jos särön määrä halutaan minimoida, täytyy toimintapiste valita mahdollisimman lineaariselta alueelta.

Kuvassa 5.17 on esimerkkinä valittu kaksi eri hilajännitettä: $E_{cc} = -6V$ ja $E_{cc} = -12V$ sisäänmenosignaalin suuruuden ollessa $12V_{p-p}$. Biasjännitteen ollessa -6V, ei ulostulosignaali ole havaittavasti säröytynyt, koska sisäänmenosignaali pysyy hilan dynaamisen toimintakuvaajan lineaarisella alueella. Jos biasjännitettä kasvatetaan, ei sisäänmenosignaali pysy enää hilan dynaamisen toimintakuvaajan lineaarisella alueella ja ulostulo säröytyy. Riittävän suurella hilajännitteellä saadaan ulostulojännite jopa leikkautumaan, kun triodi menee cut-offiin sisäänmenosignaalin negatiivisella puolijaksolla. Liian pieni biasjännite taas voi aiheuttaa sen, että sisäänmenosignaalin positiivisella puolijaksolla hilajännite käy 0V yläpuolella ja aiheuttaa hilavirran kasvun. Tällöin ulostulosignaali on myös säröytynyt.

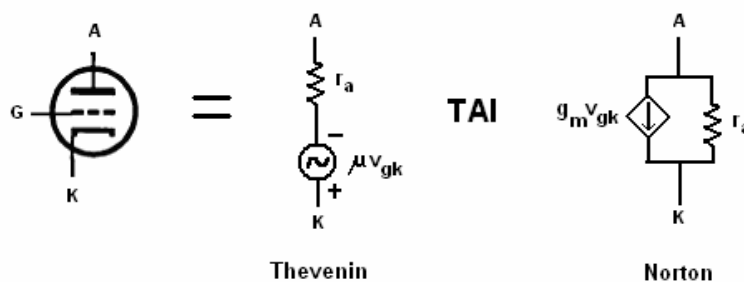


Kuva 5.17. Toimintapisteen vaikutus säröytymiseen

Kun triodeilla toteutettuja kytkentöjä halutaan analysoida tarkemmin ja tietää esimerkiksi jännitevahvistuksen suuruus on kätevää käyttää analysoinnin apuna ns. piensignaalmalleja.

Piensaigalimallit

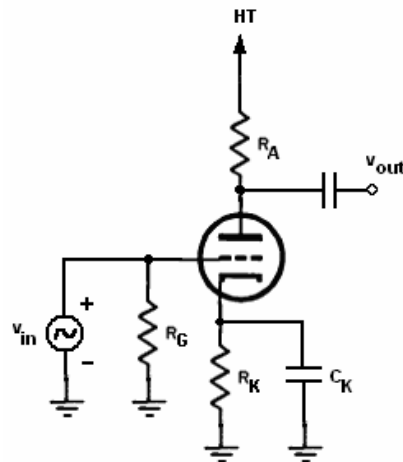
Määritimme aiemmin triodille sen ac-toimintaa kuvaavia parametreja kuten anodiresistanssi, transkonduktanssi ja vahvistus. Nämä suureet olivat riippuvaisia valitusta toimintapisteestä lukuunottamatta vahvistusta, joka on lähes vakio. Kun olemme määrittäneet toimintapisteen ja tiedämme nämä vakiot, voimme tehdä kytkennästä ns. ac-ekvivalenttikytkennän eli piensignaalmallin. Ekvivalenttikytkennästä voimme tehdä joko Theveninin tai Nortonin. Kuvassa 5.18 on esitetty nämä mallit keskitaajuusalueelle. On hiomioitavaa, että nämä mallit eivät ota huomioon mitenkään signaalin säröytymistä vaan pätevät ainoastaan piensignaaleille. Korkeilla taajuuksilla putken sisäiset hajakapasitanssit alkavat vaikuttamaan ja ne voitaisiin sisällyttää piensignaalmalliin. Matalilla taajuuksilla taasen pitäisi ottaa huomioon kytkentä- ja ohituskondensaattoreiden vaikutukset.



Kuva 5.18. ac-ekvivalenttikytkennät

Yhteisanodikytkenän analysointi piensignaalinmallilla

Kuvassa 5.18 on esitetty yksinkertainen yhteisanodikytkeä. Nyt biasointi on toteutettu ns. self-bias menetelmällä.

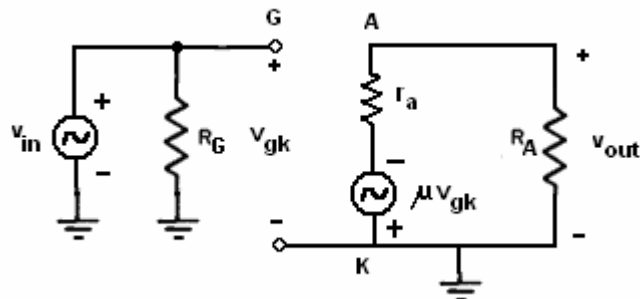


Kuva 5.19. Yhteisanodikytkeä

Oletetaan, että kytkentä on biasoitu sopivaan toimintapisteeseen. Nyt voimme piensignaalinmallia apuna käyttäen analysoida kytkennälle jännitevahvistuksen, sisäänmenoimpedanssin ja ulostuloimpedanssin.

Piensignaalinanalyysissä kondensaattorit korvataan oikosuluilla (riippuu tietysti kondensaattoreiden tarkoituksesta) ja jännitelähteet kytketään maahan. Triodi korvataan sen piensignaalinmallilla. Käytetään tässä tapauksessa theveninin ac-ekvivalenttikytkentää.

Kuvassa 5.19 on esitetty piensignaalinmalli.



Kuva 5.20. Yhteisanodikytkenän piensignaalinmalli

Ulostuloksi saadaan jännitteenjaolla:

$$v_{out} = \frac{R_A}{r_a + R_A} \cdot (-\mu v_{gk})$$

Koska $v_{gk} = v_{in}$, saadaan jännitevahvistukseksi:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\mu \frac{R_A}{r_a + R_A}$$

Tästä yhtälöstä voidaan nähdä kuorman vaikutus. Koska anodiresistanssi r_a on riippuvainen anodijännitteestä, voidaan sen vaikutus minimoida kasvattamalla R_A vastusta.

Koska hilalle ei kulje virtaa on sisäänmenoimpedanssi:

$$Z_{in} = R_G$$

Ulostuloimpedanssi saadaan ”katsomalla” sisään ulostuloon sisäänmenon ollessa nolla. Ulostuloimpedanssiksi saadaan:

$$Z_{out} = r_a \parallel R_A$$

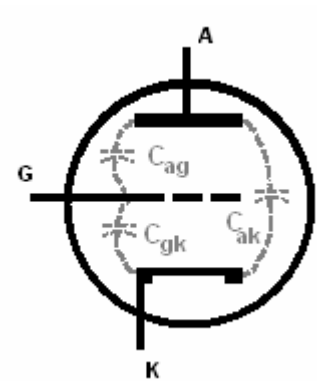
Hajakapasitanssit ja Miller-efekti

Triodin toimintaa korkeilla taajuuksilla rajoittaa sen sisäiset hajakapasitanssit elektrodien välillä (interelectrode capacitances). Nämä hajakapasitanssit muodostuvat anodin ja hilan välille, anodin ja katodin välille sekä hilan ja katodin välille. Esimerkiksi JJ-Electronicin ECC83 double-triodille datalehti ilmoittaa arvoiksi: $C_{ag} = 1.7pF$, $C_{gk} = 1.6pF$ ja $C_{ak} = 0.33pF$.

Kun triodia käytetään jännitevahvistimena on lisäksi otettava huomioon Miller-efekti. Miller-efektin seurauksena hilan ja anodin välinen kapasitanssi C_{ag} kertautuu jännitevahvistuksella ja tämä kapasitanssi näkyy efektiivisesti anodin ja signaalimaan välillä. Tarkemmin ottaen efektiivinen kapasitanssi hilan ja signaalimaan välillä Miller-efekti huomioon ottaen on:

$$C_{tot} = C_{gk} + C_{ag}(1 + A_v)$$

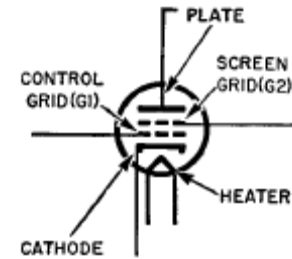
Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi RF-häiriöiden minimoimisessa lisäämällä hilalle vastus, joka muodostaa hajakapasitanssien kanssa alipäästösuotimen.



Kuva 5.21. Triodin hajakapasitanssit

6. Tetrodi

Triodin toimintaa korkeilla taajuuksilla rajoittaa sen hajakapasitanssit ja erityisesti kapasitanssi anodin ja ohjaushilan välillä. Ratkaisuna tähän ongelmaan keksittiin ohjaushilan ja anodin välille laittaa yksi hila lisää, ns. suojahila, jolla anodi saadaan elektrostaattisesti suojattua ohjaushilasta ja näin ollen anodin ja ohjaushilan välinen kapasitanssi huomattavasti pienemmäksi. Tämän lisäksi vahvistus ja anodiresistanssi ovat huomattavasti suurempia, koska anodin kyky vaikuttaa anodivirtaan on entistä pienempi. Esimerkiksi tetrodin 24-A anodin ja hilan välinen kapasitanssi on luokkaa 0.007pF, vahvistus luokkaa 600 ja anodiresistanssi luokkaa 600kΩ. Näiden suuruudet riippuvat tietysti valitusta toimintapisteestä. Tetrodin toimintaa rajoittaa sekundäärinen emissio tuomat ilmiöt, jotka rajoittavat käyttökelpoista toiminta-aluetta huomattavasti.

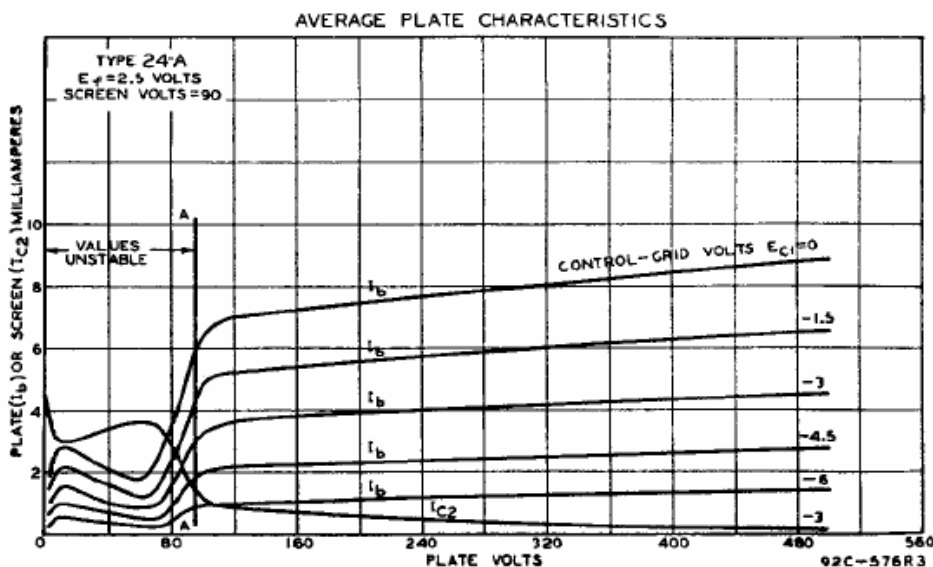


Kuva 6.1. Tetrodin piirikaaviosymboli

Suojahilan vaikutus

Suojahilan tarkoituksena on pääasiassa elektrostaattisesti suojata ohjaushila anodilta ja kiihdyttää elektroneja katodin elektronipilvestä kohti anodia. Koska suojahila muodostuu ohjaushilan tavoin harvakseltaan viereisessä olevasta metallilangasta, suurin osa elektroneista kulkee hilalankojen välistä ja päättyy anodille. Osa taas osuu suoraan suojahilaan ja aiheuttaen suojahilavirran. Katodin elektronipilven muodostama virta jakaantuu siis kaikkien hilojen kesken niin kuin triodissakin. Normaalisti ohjaushila pidetään kuitenkin negatiivisessa jännitteessä, jolloin sen virta voidaan pitää nollassa ja katodivirta on jakaantunut anodin ja suojahilan kesken.

Jos anodijännite on riittävän pieni ja siihen osuvilla elektroneilla on riittävän suuri liikeenergia, ne voivat iskeytyessään anodiin aiheuttaa sekundäärinen emissio, jolloin anodilta irtoaa yksi tai useampi elektroni yhtä siihen iskeytyvää elektronia kohti. Nämä irronneet elektronit suuntaavat suojahilalle ja kasvattavat suojahilavirtaa. Seuraavassa kuvassa on esitetty tetrodin 24-A anodin toimintakuvaaja, jossa nämä ilmiöt ovat havaittavissa.



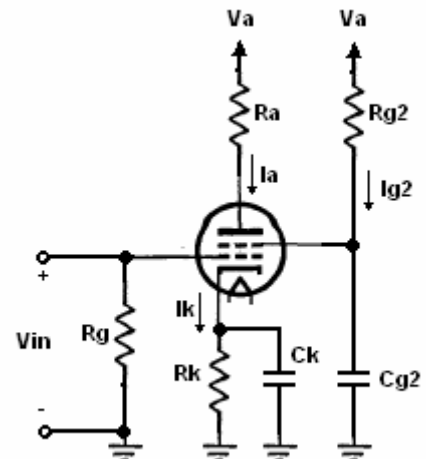
Kuva 6.2. Tetrodin 24-A toimintakuvaaja

Jos tarkastellaan anodivirran käyttäytymistä anodijännitteen kasvaessa nolasta muutama sataan volttiin, suojahilan ollessa 90V, havaitaan seuraavaa:

- (1) Anodijännitteen arvolla 0V anodivirta ei ole nolla. Tämä johtuu siitä, että suojahilan kiihdyttämistä elektroneista pienellä osalla on riittävä nopeus päätyä anodille, vaikka suojahila on korkeammassa potentiaalissa kuin anodi. Suurin osa elektroneista päätyy tässä tapauksessa suojahilalle ja näkyy kuvaajassa noin 4.5mA suojahilavirtana. Kun anodijännitettä kasvatetaan noin 10V:n asti, anodivirta kasvaa samassa suhteessa suojahilavirran pienentyessä. Yhä useammalla elektronilla on riittävä kineettinen energia päätyä anodille.
- (2) Anodijännitteillä 10V-70V anodivirta laskee. Tämä johtuu siitä, että anodiin iskeytyvillä elektroneilla on niin suuri kineettinen energia, että osuessaan anodiin ne aiheuttavat siinä sekundääriseen emission, jolloin yksi tai useampi elektroni irtoaa anodista ja suuntaa korkeammassa potentiaalissa olevalle suojahilalle aiheuttaen kasvavan suojahilavirran. Tietyillä tetrodeilla anodi on sellaisesta materiaalista, joka on hyvin herkkä sekundääriseen emissiolle ja yhden elektronin iskeytyessä siihen se voi irroittaa niin monta elektronia, että anodivirta voi kääntää suuntansa negatiiviseksi.
- (3) Kun anodijännite lähestyy suojahilan jännitettä ja ylittää sen, yhä vähemmän anodilta irronneita elektroneja jaksaa kulkea suojahilalle asti. Yhä useampi irronnut elektroni pysähtyy ja kääntää suuntansa takaisin anodille. Tämä näkyy anodivirran nopeana kasvuna.
- (4) Kun anodijännite on selkeästi ylittänyt suojahilan jännitteen, kaikki sekundääriseen emission aiheuttamat elektronit palaavat takaisin anodille. Anodilla on tällöin vain hyvin vähän vaikutusta anodivirtaan. Sillä on kuitenkin jonkun verran vaikutusta, koska hilarakenteet ovat epätäydellisiä elektrostaattisia suoja. Tämä näkyy anodivirran lievänä kasvuna anodijännitteen kasvaessa.

Tetrodia käytetään siten, että suojahila kytketään vakiojännitteeseen, joka on selvästi matalampi kuin anodijännite. Anodijännitteen tulisi pysyä suojahilajännitteen yläpuolella, jotta suojahilan virta ei kasvaisi liian suureksi. Koska anodilla ei ole juurikaan vaikutusta anodivirtaan, suojahilan merkitys on tetrodissa vastaava kuin anodin merkitys triodissa. Jotta tetrodi toimisi halutulla tavalla, tulisi suojahilajännitteen olla mahdollisimman vakaa. Tämä tuo mahdollisesti lisävaatimuksia tehollähteelle, jos anodi- ja suojahilajännite on muodostettu samasta jännitelähteestä.

Kuvassa 6.2 on esitetty yksinkertainen kytkentä, jossa näkyy kuinka suojahila on biasoitu. Koska suojahila on positiivisessa jännitteessä, se vetää elektroneja katodin läheisyydessä olevasta elektronipilvestä puoleensa. Osa näistä elektroneista osuu suojahilaan aiheuttaen virran I_{g2} , jolla muodostetaan jännitehäviö vastuksen R_{g2} yli ja näin ollen anodijännitettä pienempi jännite. Suurin osa elektroneista kuitenkin päätyy anodille, koska suojahila muodostuu kohtuu harvakseltaan olevista metallilangoista (niin kuin ohjaushilakin). Jos suojahilalla oleva jännite halutaan pitää vakiona sisäänmenosignaalin läsnäollessa, täytyy suojahilalla näkyvä signaalivirta ohittaa maihin. Tämä on toteutettu kondensaattorilla C_{g2} . Myös muita tapoja toteuttaa biasointi tetrodille on olemassa.

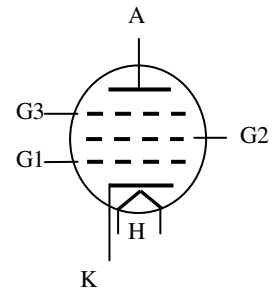


Kuva 6.2. Tetrodin biasointi

7. Pentodi

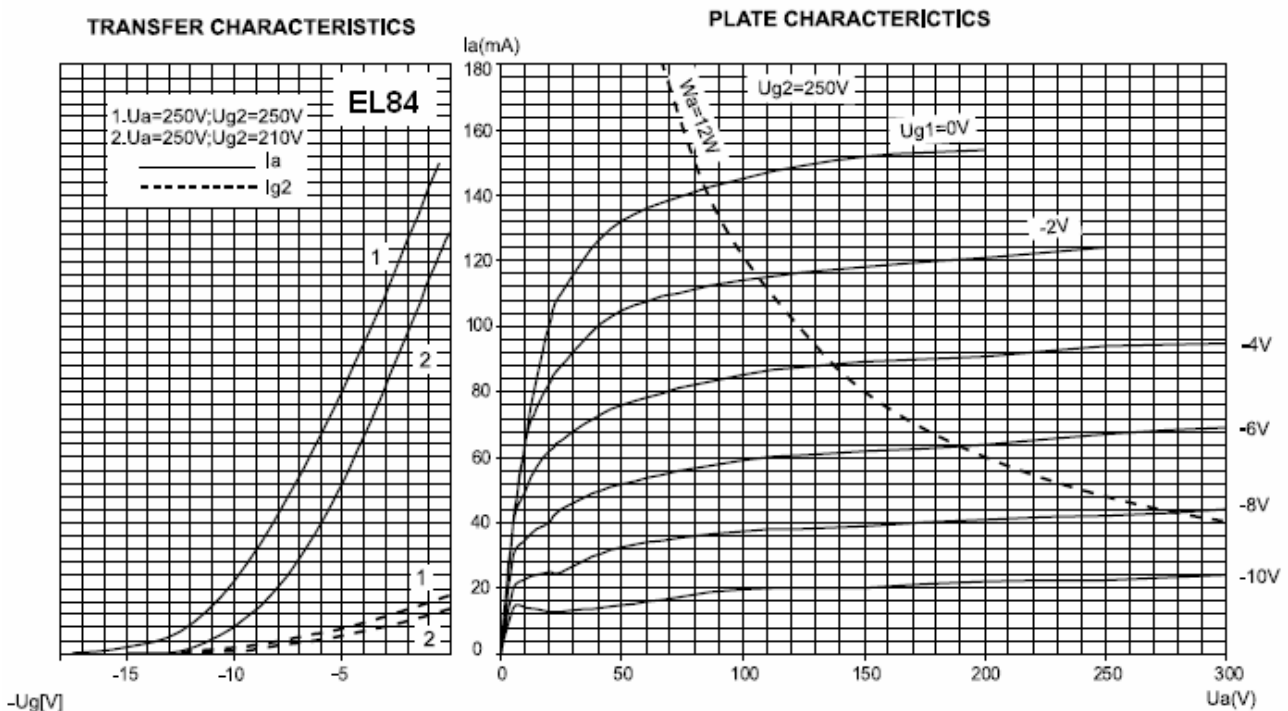
Pentodi on viisi-elektrodinen putki ja sen piirikaaviosymboli on esitetty kuvassa 7.1. Sen elektrodien nimet ovat järjestyksessä katodi (K), ohjaushila (G1), suojahila (G2), jarruhila (G3) ja anodi (A). Tetrodiin nähden se eroaa suojahilan ja anodin välisen jarruhilan takia. Jarruhilan tarkoitus on palauttaa anodilta irtoavat elektronit takaisin anodille ja näin minimoida sekundääriseen emissioon aiheuttamat haitat.

Pentodia käytetään normaalisti siten, että suojahila pidetään positiivisessa vakiojännitteessä ja jarruhila on yhdistetty suoraan katodiin. Useissa pentodeissa jarruhila onkin sisäisesti jo yhdistetty katodiin. Jarruhilan vaikutus on sellainen, että anodijännitteen käyttökelpoinen toiminta-alue on suurempi kuin tetrodilla. Tetrodilla anodijännitteen pitää olla suojahilajännitteen yläpuolella, kun taas pentodilla anodijännite voi mennä selvästi sen alapuolelle, ennenkuin anodivirta alkaa laskemaan. Tämä voidaan nähdä seuraavassa EL84 pentodin anodivirta-anodijännite toimintakuvaajassa. Suojahilan jännite on nyt 250V ja anodivirta alkaa laskemaan selkeästi vasta anodijännitteen laskiessa alle 100V:n.



Kuva 7.1. Pentodin piirikaaviosymboli

Pentodia käytetään normaalisti siten, että suojahila pidetään positiivisessa vakiojännitteessä ja jarruhila on yhdistetty suoraan katodiin. Useissa pentodeissa jarruhila onkin sisäisesti jo yhdistetty katodiin. Jarruhilan vaikutus on sellainen, että anodijännitteen käyttökelpoinen toiminta-alue on suurempi kuin tetrodilla. Tetrodilla anodijännitteen pitää olla suojahilajännitteen yläpuolella, kun taas pentodilla anodijännite voi mennä selvästi sen alapuolelle, ennenkuin anodivirta alkaa laskemaan. Tämä voidaan nähdä seuraavassa EL84 pentodin anodivirta-anodijännite toimintakuvaajassa. Suojahilan jännite on nyt 250V ja anodivirta alkaa laskemaan selkeästi vasta anodijännitteen laskiessa alle 100V:n.



Kuva 7.2. Pentodin EL84 toimintakuvaajat

Jarruhila toimii myös lisä-elektrostaattisena suojana ohjaushilan ja anodin välillä, jonka seurauksena anodin ja ohjaushilan välinen hajakapasitanssi voi olla tetrodiakin pienempi. Suojahila ja jarruhila siis yhdessä minimoivat anodin vaikutuksen anodivirtaan. Tämä näkyy kuvaajassa lähes vaakasuorina anodivirran käyrinä. Koska anodivirta muuttuu vain hyvin vähän anodijännitteen muuttuessa paljon, anodiresistanssi ja vahvistus on hyvin suuri.

Vastaavalla periaatteella kuin triodissa ja tetrodissa, eri elektrodien jännitteet vaikuttavat omalta osaltaan enemmän tai vähemmän katodivirtaan:

$$I_k = I_a + I_{g2} + I_g = G \left(U_g + \frac{U_{g2}}{\mu_{g2}} + \frac{U_a}{\mu_a} \right)^m$$

missä I_k on katodivirta (space current)

I_a on anodivirta

I_{g2} on suojahilavirta

I_g on ohjaushilavirta

G on putken dimensioista riippuva vakio (perveance)

U_g on ohjaushilan jännite

U_{g2} on suojahilan jännite

U_a on anodin jännite

μ_{g2} on suojahilan vahvistuserroin

μ_a on anodin vahvistuserroin

m on noin 1.5. Oletettavasti vaihtelee niinkuin triodeilla.

Jos ohjaushila pidetään negatiivisessa jännitteessä, voidaan olettaa, että ohjaushilavirta on nolla. Virta jakautuu siis tällöin anodin ja suojahilan kesken. Kuvassa 7.2 on esitetty myös suojahilavirta samaan kuvaajaan anodivirran kanssa ohjaushilajännitteen funktiona. Suojahilavirta on selkeästi pienempi eli suurin osa virrasta kulkee anodille.

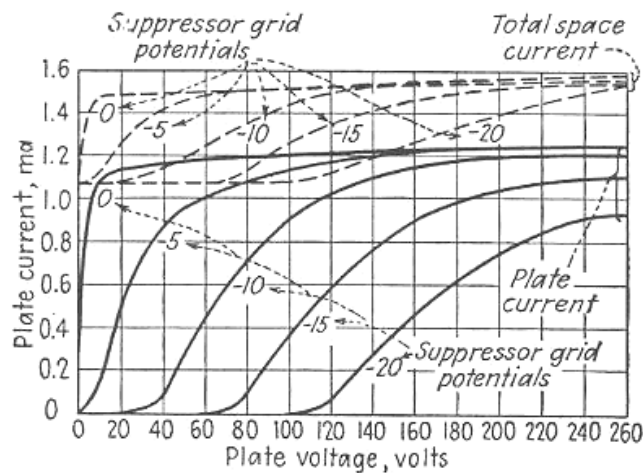
Vahvistuskertoimet määritellään vastaavalla tavalla kuin triodille. Eli anodin vahvistuserroin μ_a kertoo meille ohjaushilan ja anodin suhteellisen vaikutuksen anodivirtaan eli kuinka paljon suurempi vaikutus hilalla verrattuna anodiin on anodivirtaan. Vastaavalla tavalla suojahilan vahvistuserroin μ_{g2} kertoo meille ohjaushilan ja suojahilan suhteellisen vaikutuksen anodivirtaan. Putkien datalehdellä on usein ilmoitettu suojahilan vahvistuserroin muodossa $\mu_{g1/g2}$. Esimerkiksi JJ-Electronicin putkelle EL84 tietyssä toimintapisteessä $\mu_{g1/g2} = 19$. Pentodeille voidaan määrittää myös muita parametreja vastaavalla tavalla kuin triodeille kuten esimerkiksi anodiresistanssi, suojahilaresistanssi ja transkonduktanssi. Datalehdet eivät yleensä ilmoita kuin transkonduktanssin, anodiresistanssin ja suojahilan vahvistuskertoimen. Muut parametrit voidaan määrittää toimintakuvaajista.

Jarruhilan vaikutus

Kun jarruhila on yhdistetty suoraan katodiin, anodin ja jarruhilan välinen sähkökenttä on suunnaltaan aina sellainen, että se saa anodilta irtoavat sekundaarisen emission aiheuttamat elektronit palaamaan takaisin anodille. Koska anodilta irtoavien elektroneiden liike-energia on hyvin pieni, pienikin anodijännite riittää palauttamaan ne anodille. Katodin ja suojahilan välinen sähkökenttä taas on riittävä antamaan katodin elektronipilvestä irtoaville elektroneille riittävän suuren nopeuden, jotta ohittaessaan suojahilan (osa törmää suojahilaan) ne eivät pysähdy ennen jarruhilaa. Lähestyessään jarruhilaa, elektronit hidastavat vauhtiaan mutta ohittavat kuitenkin sen ja päätyvät anodille. Tämä johtuu siitä, että jarruhila on epätäydellinen elektrostaattinen suoja (niinkuin muutkin hilat) eikä pysty täysin eristämään anodin sähkökentän vaikutusta suojahilan ja jarruhilan välillä. Jos anodijännite on hyvin pieni, sen vaikutus ei ole riittävä jarruhilan ja suojahilan välissä, jolloin sen sähkökenttä ei vedä jarruhilan läheisyyteen saapuvia elektroneja yhtä nopeasti puoleensa kuin jarruhilan läheisyyteen saapuu. Osa jarruhilalle saapuvista elektroneista tällöin pysähtyy ja kääntyy takaisin suojahilalle. Osalla elektroneista taas on riittävä liike-energia ja ne päätyvät anodille. Suojahilan ja jarruhilan välille muodostuu tällöin ns. virtuaalikatodi, joka on

vastaavanlainen elektronipilvi kuin katodinkin läheisyydessä. Toimintakuvaajassa virtuaalikatodin vaikutus näkyy pienillä anodijännitteillä, jolloin anodivirta tippuu nopeasti.

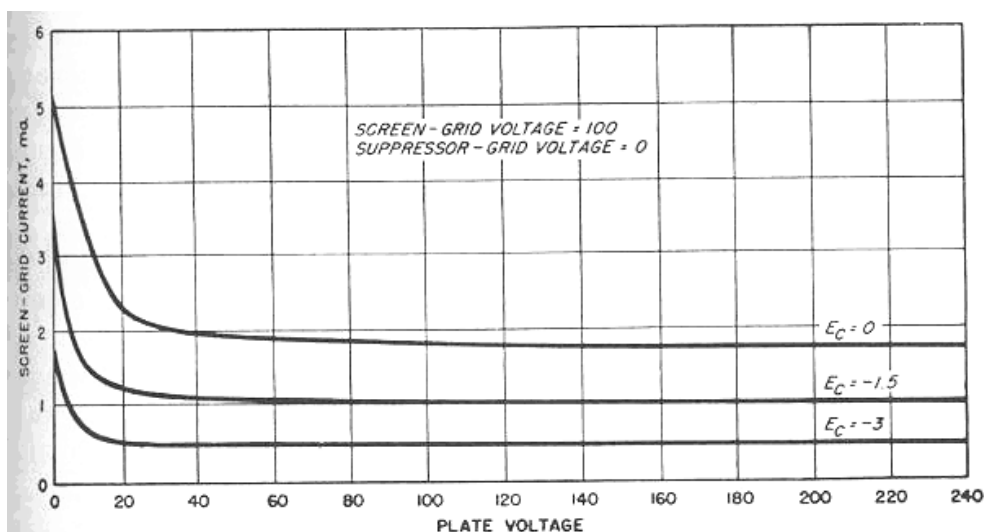
Kuvassa 7.3 on esitetty tarkemmin jarruhilan jännitteen vaikutus anodivirtaan. Kun jarruhilan jännitettä ruvetaan laskemaan negatiivisesta jännitteestä, anodijännitteen käyttökelpoinen alue kasvaa ja saavuttaa optimitilanteen kun jarruhilan jännite on nolla eli se on suoraan yhdistetty katodiin. Voidaan havaita myös se, että anodijännitteellä on sitä enemmän vaikutusta anodivirtaan, mitä negatiivisempi jarruhilan jännite on. Tämä tarkoittaa sitä, että jarruhilalla voidaan vaikuttaa anodiresistanssin suuruuteen.



Kuva 7.3. Jarruhilan jännitteen vaikutus anodivirtaan

Suojahilavirta

Kuvassa 7.4 on esitetty tarkemmin kuinka suojahilavirta käyttäytyy pentodissa anodijännitteen funktiona.



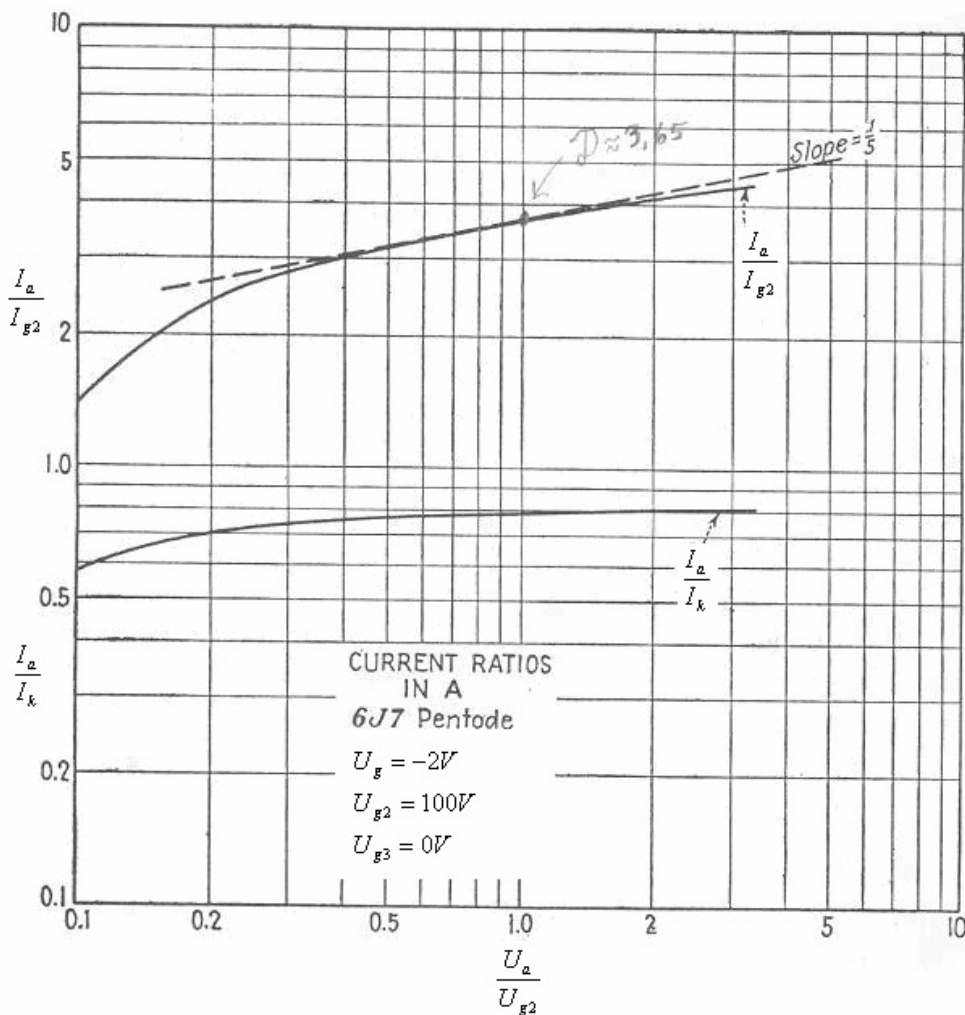
Kuva 7.4. Suojahilavirta anodijännitteen funktiona

Kun anodijännite on riittävän pieni suhteessa suojahilan jännitteeseen, muodostuu suojahilan ja jarruhilan välille virtuaalikatodi. Tällöin anodille suuntaavat elektronit ohittaessaan suojahilan vaihtavat suuntaansa ja päätyvät suojahilalle. Tämä asteittainen suojahilavirran kasvu näkyy kuvassa pienillä anodijännitteiden arvoilla.

Suurilla anodijännitteiden arvoilla virta jakaantuu anodin ja suojahilan kesken (sillä oletuksella, että ohjaushilavirta on nolla). On odotettavaa, että anodivirta on jossain määrin suhteellinen anodi- ja suojahilan jännitteisiin. Samoin on myös anodivirran ja suojahilavirran suhteen [6]. Kuvassa 7.5 on esitetty anodivirta/suojahilavirta käyrämuoto anodijännite/suojahilajännite funktiona. Suhde I_p/I_2 on anodivirran ja suojahilavirran suhde, suhde I_p/I_s on anodivirran ja katodivirran suhde. Yksinkertaista teoreettista analyysia ei ole olemassa kummallekaan suhteelle [6]. Kuvaajasta voidaan määrittää lähes logaritmiselle käyrän osalle (suora logaritmisella asteikolla) virtasuhde. Eli:

$$\frac{I_a}{I_{g2}} = D \left(\frac{U_a}{U_{g2}} \right)^m$$

missä D on anodivirran I_a ja suojahilavirran I_{g2} suhde kun anodi ja suojahila ovat samassa jännitteessä eli suhde $U_a/U_{g2} = 1.0$ (sillä oletuksella, että muut hilat eivät kerää elektroneja). Potenssi m on kuvaajassa käyrälle piirretyn suoran tangentin kulmakerroin. Kuvassa esitetylle pentodille 6J7 nämä arvot ovat $D \approx 3.65$ ja $m \approx 1/5$. On huomioitava, että tangentin kulmakerroin ei ole vakio.

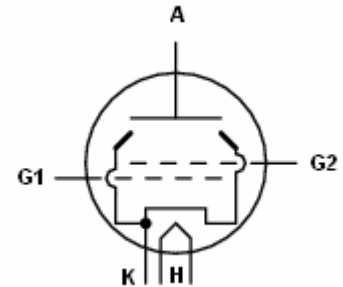


Kuva 7.5. Pentodin 6J7 virtasuhteet jännitesuhteiden funktiona

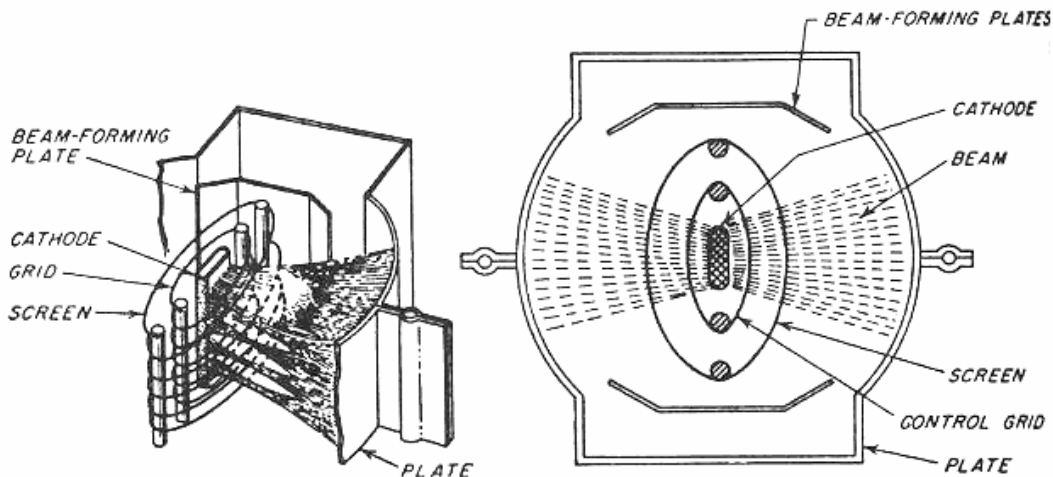
8. Beam power putket

Kun sekundäärisen emission aiheuttamaan ongelmaan keksittiin ratkaisuna sijoittaa ylimääräinen ns. jarruhila suojahilan ja anodin väliin tämä patentoitiin heti. Muut putken valmistajat tutkivat muita mahdollisuuksia toteuttaa vastaava ja keksittiin ns. Beam power putket. Kuvassa 8.1 on esitetty putken piirikaaviosymboli. Usein käytetään myös pelkkää tetrodin piirikaaviosymbolia.

Beam power putkissa fyysinen jarruhila on poistettu ja sen vaikutus on toteutettu muuttamalla putken rakennetta kuvan 8.2 esittämällä tavalla, jolla suojahilan ja anodin välille saadaan muodostettua vahva elektronipilvi, joka palauttaa anodilta irtoavat elektronit takaisin anodille. Tämä on toteutettu siten, että katodista on tehty litteä ja sen sivuille on lisätty erityiset levyt (beam-forming plates), joiden vaikutuksesta elektronit suuntautuvat tiheinä säteinä kohti anodia. Suurentamalla anodin ja suojahilan väliä, saadaan tiheet elektronisäteet alentamaan anodin ja suojahilan välistä potentiaalia pienemmäksi kuin mitä anodi tai suojahila on. Tämän seurauksena anodilta irtoavat elektronit suuntaavat takaisin anodille. Lisäksi suojahilalangat on sijoitettu ohjaushilalankojen ”varjoon”, jolloin vain hyvin pieni osa elektroneista osuu suojahilaan. Tämä pienentää suojahilavirtaa huomattavasti.

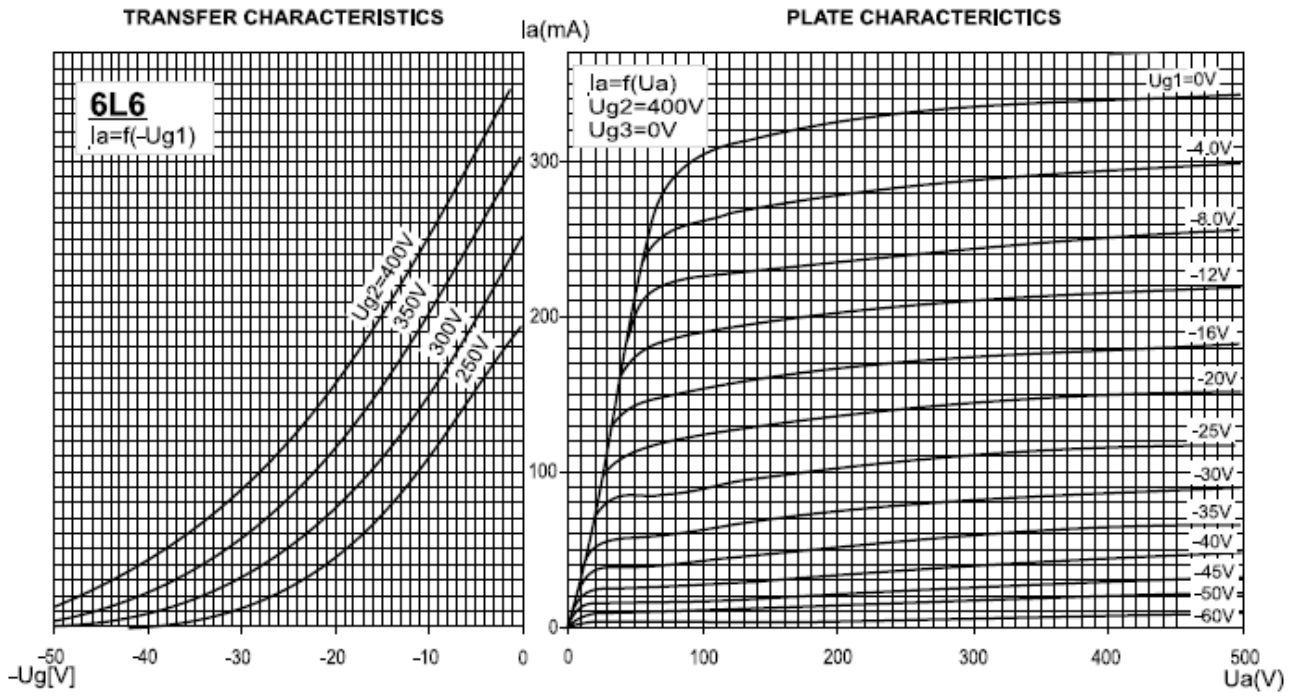


Kuva 8.1. Beam power putken piirikaaviosymboli



Kuva 8.2. Beam power putken rakenne

Tällainen toteutus mahdollistaa beam power putkelle suuremman antotehon kuin pentodilla on mahdollista saada, koska käyttökelpoinen toiminta-alue on laajempi. Beam power putkia kutsutaan vaihtelevasti beam tetrodeiksi ja beam pentodeiksi. Myös nimeä kinkless tetrode käytetään. Kuvassa 8.3 on esitetty beam power putken 6L6 GC toimikuvajaajat.



Kuva 8.3. Beam power putken 6L6 GC toimintakuvaajat

8. Lähdeluettelo

- [1] Basic Theory and Application of Electron Tubes – Department of the Army Technical Manual (TM 11-662 1952)
- [2] Vacuum and Solidstate Electronics – Harris and Robson (1963)
- [3] Valve Amplifiers – Morgan Jones (3rd ed. 2003)
- [4] Theory and Applications of Electron Tubes – Herbert Reich (1944)
- [5] Electronic and Radio Engineering – F.E. Terman (4th ed. 1955)
- [6] Vacuum Tubes – Karl R. Spangenberg (1948)
- [7] Englanninkielinen wikipedia eri hakusanoilla