

3.4. Vedení proudu v plynech a ve vakuu



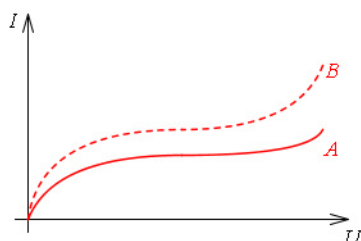
1. Seznámit se s principem vedení proudu v plynech.
2. Umět popsat ampérvoltovou charakteristiku nesamostatného výboje.
3. Nastudovat doutnavý, obloukový a jiskrový výboj.
4. Znat mechanismy uvolňování elektronů z povrchu kovu a nastudovat jejich technické aplikace.



3.4.1. Vedení proudu v plynech

Plyny jsou za běžných tlaků a teplot dobrými izolanty, neboť obsahují malou koncentraci iontů. Elektricky vodivými se stanou **ionizací**, kdy se z neutrálních molekul plynu uvolňují elektrony. Může se také stát, že se elektron zachytí na neutrální molekule a vznikne tak záporný iont. **Rekombinace iontů**, která vede k tomu, že z iontu stane neutrální molekula, doprovází ionizaci. Za stabilních podmínek se po určité době objeví rovnováha mezi ionizací a rekombinací. Ionizaci vyvolávají uměle ionizační činidla (ultrafialové, rentgenové, gama záření), případně vysoká teplota. Ionizace se děje i přirozenou cestou vlivem kosmického záření a záření radionuklidů obsažených v zemské kůře. Prostředky, které ionizaci vyvolávají, se nazývají **ionizátory**.

Má-li dojít k ionizaci molekuly (atomu), tedy k vytržení elektronu, je nutné vnějšími silami vykonat na elektronu práci proti silám, jimiž se atom (molekula) snaží elektron udržet. Minimální energie, která je potřebná na uvolnění elektronu, se nazývá **ionizační energie**. Například ionizační energie vodíku je 13,595 eV, kyslíku 13,614 eV a dusíku 14,53 eV.



Obr. 3.4.-1

Jestliže do prostoru s vyšetřovaným plynem umístíme dvojici elektrod, získáme experimentální uspořádání použitelné pro studium vedení elektrického proudu v plynech. Na elektrody se přivede z vnějšího zdroje napětí U a měří se proud. Pro malá napětí je výsledkem **ampérvoltová charakteristika nesamostatného výboje** (Obr. 3.4.-1). Zvyšujeme postupně od nuly napětí mezi elektrodami. Zpočátku roste proud lineárně, což znamená,

že platí Ohmův zákon. Další zvyšování napětí vede k tomu, že přestane platit Ohmův zákon až se plyn dostane do stavu, kdy nezávisí proud na napětí. Horizontální část charakteristiky se nazývá **plató**. Nový vzrůst proudu následuje až po překonání plató.

Na tvar ampérvoltové charakteristiky má značný vliv povaha ionizačního činidla. Jestliže ozáříme plyn rentgenovým, ultrafialovým či radioaktivním zářením, zjistíme pro danou hodnotu napětí vyšší velikost proudu (Obr. 3.4.-1, křivka B). Nesamostatný výboj se vyznačuje velmi malou proudovou hustotou. Například v oblasti plató nabývá hodnot v mezích $10^{-3} - 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Jestliže dosáhne napětí kritickou hodnotu, která se nazývá **zápalné napětí** U_z , přechází nesamostatný výboj v **samostatný**. Kritická hodnota napětí závisí na součinu tlaku plynu a vzdálenosti elektrod (**Paschenův zákon**). Elektrony díky silnému elektrickému poli získají dostatečnou energii k tomu, aby nárazem ionizovaly neutrální molekuly (atomy). Oba elektrony, uvolněný z molekuly a původní, jsou opět urychlovány elektrickým polem do té

míry, že mohou ionizovat další molekulu. V důsledku toho začne elektrický proud prudce růst.

Doutnavý a obloukový výboj jsou obvyklé formy **stacionárního samostatného výboje**.

Doutnavý výboj

vzniká za nízkého tlaku ($1\text{--}10^3$ Pa) a samozřejmě po překročení zápalného napětí. Proudová hustota se pohybuje řádově v mezích $10^{-1}\text{--}10$ A·m⁻² a je stacionární, pokud je přiložené napětí konstantní. Největší spád potenciálu je v blízkosti katody a je roven skoro celému napětí mezi elektrodami. Rozložení potenciálu v plynu závisí nejen na druhu plynu, ale i na materiálu, ze kterého je katoda vyrobena. Spektrální složení světelného záření plynu je charakteristické pro daný plyn a vychází téměř z celé části výbojové dráhy. Protože v podstatné části závislosti proudové hustoty na napětí i při nepatrné změně napětí se vyvolá značná změna proudové hustoty, doutnavý výboj je možné použít ke stabilizaci napětí stejnosměrných zdrojů. K rozšířeným světelným zdrojům, které pracují na principu doutnavého výboje, patří **zářivky**.



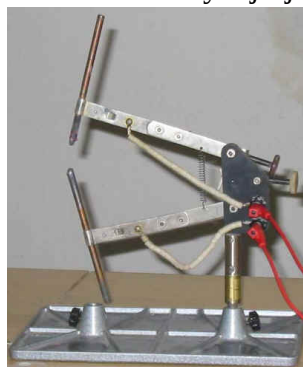
Základem zářivky je trubice plněná parami rtuť a argonem. V nich nastává doutnavý výboj, který ale září v neviditelné ultrafialové oblasti. Toto záření dopadá na stěny trubice, které jsou pokryty luminoforem. Tato látka absorbuje ultrafialové záření a sama září ve viditelné oblasti. Zářivka je napájena střídavým napětím z rozvodné sítě. Po zapnutí startovací obvod žhaví elektrody, aby termoemisí uvolněné elektrony vytvořily podmínky pro vznik doutnavého výboje. **Kompaktní výbojky**

Obr. 3.4.-2

pracují na mnohem vyšší frekvenci (desítky kHz), které je dosaženo elektronickým měničem napájecího napětí. V současnosti nahrazují obyčejné žárovky s wolframovým vláknem, neboť při srovnatelném světelném výkonu mají mnohem menší příkon (Obr. 3.4.-2). **Doutnavky** jsou krátké trubice, ve kterých také probíhá doutnavý výboj. Vyžadují velmi malý příkon a proto se používaly v signálních světlech, odkud je vytlačily světelné diody. V současnosti se používají například ve zkoušečkách nebo jako dekorativní svítidla.

Obloukový výboj

Narozdíl od doutnavého výboje vzniká ve velmi širokém oboru tlaků. Jedna forma obloukového výboje je pozorována ve vzduchu atmosférického tlaku: Poté, kdy se dotknou dvě uhlíkové elektrody, zahřejí se na dostatečně vysokou teplotu Joulovým teplem, tzn. přiloží se ke zdroji napětí cca 120 V (Obr. 3.4.-3), a oddálí, objeví se intenzivně svítící výboj s vysokou koncentrací nosičů volného náboje při poměrně malém napětí 20-50 V. Proudová hustota je 10^5 A·m⁻² a více. Obě elektrody se značně zahřívají, více však elektroda kladná (3000-4000 °C). Pro zachování výboje je nutná dostatečná teplota záporné elektrody. Výboj vydává intenzivní záření, které má ultrafialovou složku. Druhá forma obloukového výboje se projevuje za nižšího než atmosférického tlaku, jestliže proudová hustota překročí určitou hodnotu. Za



Obr. 3.4.-3

vhodných podmínek (volba materiálu záporné elektrody) může obloukový výboj existovat, i když mají elektrody poměrně nízkou teplotu.

V minulosti se obloukový výboj používal ve svítlidlech (nahrazeny vysokotlakými výbojkami), v současnosti pro tavení v obloukových pecích a ke sváření, kdy jednou elektrodou je svařovaný předmět a druhou elektroda obalená struskotvorným materiálem.

Jiskrový výboj

je samostatný nestacionární výboj s velmi krátkou dobou trvání. Je doprovázen světelnými a zvukovými efekty. Tento výboj nastává za normálního tlaku při překročení dielektrické pevnosti daného plynu, tj. intenzity elektrického pole, která způsobí jiskrový výboj. Suchý vzduch má dielektrickou pevnost přibližně $3 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Jiskru tvoří soustava jasně svítících rozvětvených kanálků, v nichž je teplota až 30 000 K.

S jiskrovým výbojem se můžete přímo setkat, když si například sundáte svetr s umělými vlákny a dotknete se uzemněného kovového předmětu. Podstatně větší jiskrový výboj je blesk. Proud v blesku dosahuje v maximu až 10 000 A, unáší dolů náboj kolem 20 C a napětí mezi mrakem a zemí dosahuje až 10^9 V . Blesk vzniká i mezi mraky. Země je nabitá záporně a potenciál ve vzduchu je kladný. Blesky svádějí do země záporné náboje. Mimoto existuje stálý elektrický proud hustoty řádově v pikoampérech na metr čtvereční, který z atmosféry přenáší na zem nosiče kladného náboje. Za stálého počasí je napětí mezi povrchem Země a vzduchem ve výšce 50 km asi 400 000 V. S ohledem na obsah povrchu Země dosahuje celkový proud, jež přivádí do Země kladné náboje, hodnotu 1800 A.

Jiskrový výboj se využívá při jiskrovém obrábění kovů, k elektrickému zapalování, pro fotografické účely apod.

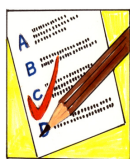


KO 3.4.1.-1 Jakými prostředky lze podpořit ionizaci, jež nastává přirozenou cestou?

KO 3.4.1.-2 Jak se nazývá horizontální část ampérvoltové charakteristiky nesamostatného výboje?

KO 3.4.1.-3 Popište podmínky vzniku doutnavého, obloukového a jiskrového výboje.

KO 3.4.1.-4 Jmenujte praktické využití doutnavého, obloukového a jiskrového výboje.



TO 3.4.1.-1 Po překročení zápalného napětí proud v plynu

- a) prudce klesne.
- b) prudce stoupne.
- c) zůstane konstantní.

3.4.2. Vedení proudu ve vakuu

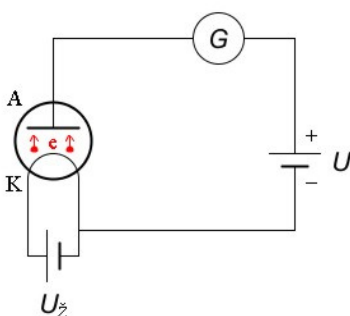
Samozřejmě i ve vakuu je elektrický proud zprostředkován nabitými částicemi, jenže ty se ve vakuu nevyskytují. Musíme je proto dodat z jiného prostředí. K tomu slouží obvykle kov, z něhož se mohou uvolňovat elektrony těmito mechanismy **elektronové emise: termická emise, fotoemise, autoemise a sekundární emise**. K tomu, aby došlo k elektronové emisi, je zapotřebí dodat elektronu energii, která odpovídá rozdílu mezi energií volného elektronu uvnitř kovu a ve vakuu. Minimální hodnota tohoto rozdílu je vlastností pevné látky a nazývá se výstupní práce (Tab. 3.4.-1).

Tab. 3.4.-1 Výstupní práce vybraných prvků v elektronvoltech (eV).

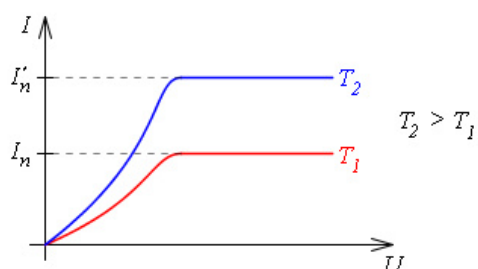
C	4,8	K	2,25
Ca	3,2	Mn	3,8
Cs	2,1	Na	2,3
Fe	4,6	Ti	4,45

Termická emise

Poprvé ji zaznamenal T. A. Edison (1883). Jestliže se dostatečně zvýší teplota látky, začnou se z ní uvolňovat elektrony. Termickou emisí můžeme pozorovat na dvuelektrodové elektronce zvané **dioda** (Obr. 3.4.-4). Katoda je žhavana proudem z nízkonapětového zdroje, případně se dotýká topné spirály. Je připojena k zápornému pólu zdroje napětí U .

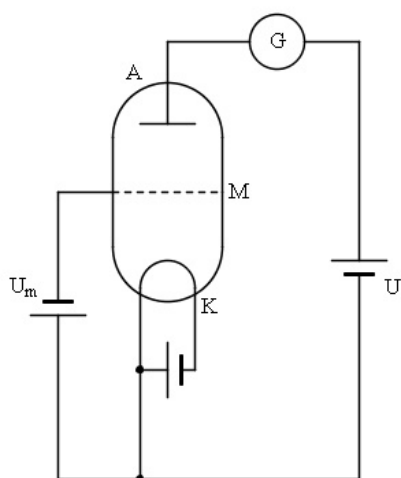


Obr. 3.4.-4 Dvuelektrodová elektronka v zapojení ke studiu termické emise. A je anoda a K katoda z materiálu, z něhož se termickou emisí uvolňují elektrony.



Anodová charakteristika popisuje závislost emisního proudu na přiloženém napětí (Obr. 3.4.-5). Proud přestane být na napětí závislý poté, kdy dosáhne hodnotu nasyceného proudu. Teplota a druh materiálu katody ovlivňují velikost nasyceného proudu I_n (Obr. 3.4.-5). Dioda se nejčastěji užívala k usměrňování střídavého napětí.

Obr. 3.4.-5



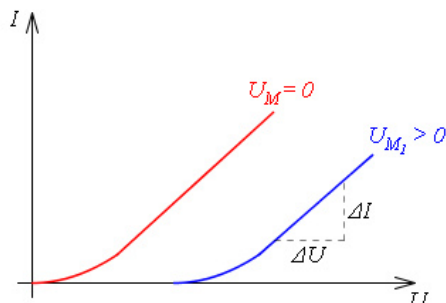
Obr. 3.4.-6

Jestliže do blízkosti katody umístíme mřížku (např. z molybdenu nebo niklu), která propouští elektrony, získáme **triodu**. Bude-li nabitá kladně, malá část elektronů se na mřížce zachytí, větší část projde přes mřížku mnohem větší rychlostí, než by tomu bylo, kdyby mřížka nebyla připojena ke kladnému pólu zdroje. Záporně nabitá mřížka naopak elektrony zpomaluje (Obr. 3.4.-6). Tvar anodové charakteristiky bude záviset na napětí mřížky. Již malá změna mřížkového napětí vede ke značné změně proudu. Trioda je použitelná jako prvek zesilující malá časově proměnná napětí. Kromě anodové charakteristiky sledujeme na triodě mřížkovou charakteristiku, která vyjadřuje závislost anodového proudu na napětí mřížky při konstantním napětí U na anodě.

anodě (Obr. 3.4.-7). Zesilovací účinek triody kvantifikuje **zesilovací činitel**:

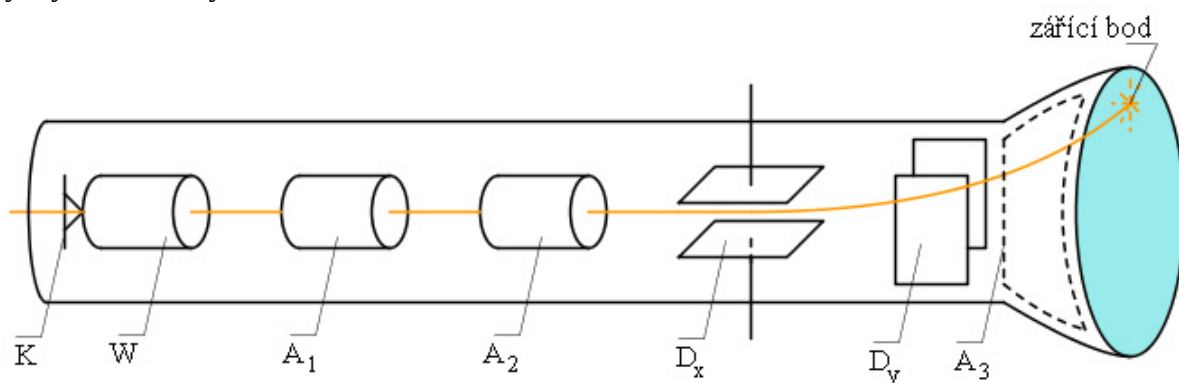
$$\mu = \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_M} \right)_{I=\text{konst.}}$$

Existují elektronky, které mají více mřížek (**tetroda**, **pentoda** ad.).



Obr. 3.4.-7 Mřížková charakteristika triody.

Známostou vakuovou elektronkou je **obrazová elektronka**. Nebudeme se zabývat historií a přehledem postupných kroků, které vedly ke zdokonalování obrazovek, jejichž základem je katodová trubice, až do současné podoby. Popíšeme pouze jednoduchou obrazovku, která se využívá v osciloskopech (Obr. 3.4.-8). Elektrony jsou emitovány rozžhavenou katodou K. Ve Wehneltově válci W, který nese záporný náboj, jsou fokusovány do úzkého svazku. Elektrony dále urychlují elektrické síly od anod A₁ a A₂. Pak se postupně dostávají mezi dva páry vychylovacích destiček D_x a D_y, které slouží k vychýlení svazku ve vodorovném a svislém směru působením elektrické síly. Elektrony ve vychýleném svazku dále urychluje anoda A₃. Na destičky se přivádí signál, který vstupuje do osciloskopu; například napětí, jehož průběh chceme zobrazit. Elektrony dopadem na stínítko obrazovky vyvolávají světelné záření z místa dopadu. Stínítko obrazovky je totiž pokryto vrstvou luminoforu (např. vrstva ZnS s nepatrným množstvím Ag). Místo vychylovacích destiček se v obrazovkách používaly vychylovací cívky.



Obr. 3.4.-8 Obrazová elektronka se žhavenou katodou.

Fotoemise

Fotoemisi můžeme studovat ve stejném uspořádání jako termickou emisi. Katoda není žhavana, ozařuje se však elektromagnetickým zářením, jehož fotony mají dostatečnou energii k tomu, aby pro dané napětí zdroje katoda emitovala elektrony. Hodnota nasyceného emisního proudu roste s intenzitou dopadajícího záření.

Autoemise

Elektrony jsou vytrhovány z látky katody vnějším magnetickým polem, obvykle s intenzitou větší než $10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Sekundární emise

Je vyvolána dopadem urychlených elektronů nebo jiných hmotných částic na povrch katody.



KO 3.4.-5 Vyjmenujte mechanismy uvolňování elektronů z povrchu kovu, které znáte.

KO 3.4.-6 Co je výstupní práce kovu?

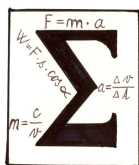
KO 3.4.-7 Jaký je rozdíl mezi termickou emisí, fotoemisí, autoemisí a sekundární emisí.

KO 3.4.-8 Popište konstrukci dvoelektrodové elektronky a triody.

KO 3.4.-9 Vysvětlete princip činnosti obrazovky osciloskopu.



U 3.4.-1 Vyjádřete v joulech výstupní práci železa (4,6 eV).



Plyny jsou za běžných tlaků a teplot dobrými izolanty, neboť obsahují malou koncentraci iontů. Elektricky vodivými se stanou **ionizací**, kdy se z neutrálních molekul plynu uvolňují elektrony. Může se také stát, že se elektron zachytí na neutrální molekule a vznikne tak záporný iont. **Rekombinace iontů**, která vede k tomu, že z iontu stane neutrální molekula, doprovází ionizaci. Za stabilních podmínek se po určité době objeví rovnováha mezi ionizací a rekombinací.

Ionizaci vyvolávají uměle ionizační činidla (ultrafialové, rentgenové, gama záření), případně vysoká teplota. Ionizace se děje i přirozenou cestou vlivem kosmického záření a záření radionuklidů obsažených v zemské kůře. Prostředky, které ionizaci vyvolávají, se nazývají **ionizátory**. Minimální energie, která je potřebná na uvolnění elektronu, se nazývá **ionizační energie**.

Jestliže do prostoru s vyšetřovaným plynem umístíme dvojici elektrod, získáme experimentální uspořádání použitelné pro studium vedení elektrického proudu v plynech. Na elektrody se přivede z vnějšího zdroje napětí U a měří se proud. Pro malá napětí je výsledkem **ampérvoltová charakteristika nesamostatného výboje** (Obr. 3.4.-1).

Na tvar ampérvoltové charakteristiky má značný vliv povaha ionizačního činidla.

Jestliže dosáhne napětí kritickou hodnotu, která se nazývá **zápalné napětí** U_z , přechází nesamostatný výboj v **samostatný**. Elektrický proud začne prudce růst. Kritická hodnota napětí závisí na součinu tlaku plynu a vzdálenosti elektrod (**Paschenův zákon**).

Doutnavý a obloukový výboj jsou obvyklé formy **stacionárního samostatného výboje**.

Doutnavý výboj

vzniká za nízkého tlaku ($1 \cdot 10^3 \text{ Pa}$) a samozřejmě po překročení zápalného napětí. Proudová hustota se pohybuje řádově v mezích $10^{-1} \cdot 10 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ a je stacionární, pokud je přiložené napětí konstantní. Největší spád potenciálu je v blízkosti katody a je roven skoro celému napětí mezi

elektrodami. Rozložení potenciálu v plynu závisí nejen na druhu plynu, ale i na materiálu, ze kterého je katoda vyrobena. Spektrální složení světelného záření plynu je charakteristické pro daný plyn. Doutnavý výboj je možné použít stabilizaci napětí stejnosměrných zdrojů. K rozšířeným světelným zdrojům, které pracují na principu doutnavého výboje, patří **zářivky**. **Kompaktní výbojky** v současnosti nahrazují obyčejné žárovky s wolframovým vláknem, neboť při srovnatelném světelném výkonu mají mnohem menší příkon (Obr. 3.4.-2). **Doutnavky** jsou krátké trubice, ve kterých také probíhá doutnavý výboj. Vyžadují velmi malý příkon a proto se používaly v signálních světlech, odkud je vytlačily světelné diody. V současnosti se používají například ve zkoušečkách nebo jako dekorativní svítidla.

Obloukový výboj

Narozdíl od doutnavého výboje vzniká ve velmi širokém oboru tlaků. Jedna forma obloukového výboje je pozorována ve vzduchu atmosférického tlaku. Výboj vydává intenzivní záření, které má ultrafialovou složku. Druhá forma obloukového výboje se projevuje za nižšího než atmosférického tlaku, jestliže proudová hustota překročí určitou hodnotu. Za vhodných podmínek (volba materiálu záporné elektrody) může obloukový výboj existovat, i když mají elektrody poměrně nízkou teplotu.

V minulosti se obloukový výboj používal ve svítidlech (nahrazeny vysokotlakými výbojkami), v současnosti pro tavení v obloukových pecích a ke sváření, kdy jednou elektrodou je svařovaný předmět a druhou elektroda obalená struskotvorným materiálem.

Jiskrový výboj

je samostatný nestacionární výboj s velmi krátkou dobou trvání. Je doprovázen světelnými a zvukovými efekty. Tento výboj nastává za normálního tlaku při překročení dielektrické pevnosti daného plynu, tj. intenzity elektrického pole, která způsobí jiskrový výboj. Suchý vzduch má dielektrickou pevnost přibližně $3 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$. Jiskru tvoří soustava jasně svítících rozvětvených kanálků, v nichž je teplota až 30 000 K.

Jiskrový výboj se využívá při jiskrovém obrábění kovů, k elektrickému zapalování, pro fotografické účely apod.

Samozřejmě i ve vakuu je elektrický proud zprostředkován nabitými částicemi, jenže ty se ve vakuu nevyskytují. Musíme je proto dodat z jiného prostředí. K tomu slouží obvykle kov, z něhož se mohou uvolňovat elektrony těmito mechanismy **elektronové emise: termická emise, fotoemise, autoemise a sekundární emise**. K tomu, aby došlo k elektronové emisi, je zapotřebí dodat elektronu energii, která odpovídá rozdílu mezi energií volného elektronu uvnitř kovu a ve vakuu. Minimální hodnota tohoto rozdílu je vlastností pevné látky a nazývá se výstupní práce.

Termická emise

Poprvé ji zaznamenal T. A. Edison (1883). Jestliže se dostatečně zvýší teplota látky, začnou se z ní uvolňovat elektrony. Termickou emisi můžeme pozorovat na dvuelektrodové elektronce zvané **diody** (Obr. 3.4.-4). Jestliže do blízkosti katody umístíme mřížku (např. z molybdenu nebo niklu), která propouští elektrony, získáme **triody** (Obr. 3.4.-6). Již malá změna mřížkového napětí vede ke značné změně proudu. Trioda je použitelná jako prvek zesilující malá časově proměnná napětí. Zesilovací účinek triody kvantifikuje **zesilovací činitel**:

$$\mu = \left(\frac{\Delta U}{\Delta U_M} \right)_{I=\text{konst.}}$$

Existují elektronky, které mají více mřížek (**tetroda, pentoda** ad.).

Známou vakuovou elektronkou je **obrazová elektronka**.

Fotoemise

Fotoemisi můžeme studovat ve stejném uspořádání jako termickou emisi. Katoda není žhavena, ozařuje se však elektromagnetickým zářením, jehož fotony mají dostatečnou energii k tomu, aby pro dané napětí zdroje katoda emitovala elektrony. Hodnota nasyceného emisního proudu roste s intenzitou dopadajícího záření.

Autoemise

Elektrony jsou vytrhovány z látky katody vnějším magnetickým polem, obvykle s intenzitou větší než $10^7 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Sekundární emise

Je vyvolána dopadem urychlených elektronů nebo jiných hmotných částic na povrch katody.

Klíč



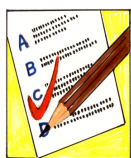
KO 3.4.-1 Zvýšením teploty, ultrafialovým, rentgenovým, gama zářením.

KO 3.4.-2 platí

KO 3.4.-8 viz Obr. 3.4.2.-1 a Obr. 3.4.2.-3



U 3.4.-1 $7,37 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



TO 3.4.-1 b)