



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

TERMOEMISNÍ ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

THERMIONIC GENERATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alois Primes

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marian Brázdil

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Alois Primes**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marian Brázdil**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Termoemisní zdroje elektrické energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Termoemisní generátory jsou tepelné stroje, které přímo přeměňují teplo na elektřinu. Pracovní látku v nich tvoří elektrony, podobně jako v případě termoelektrických jevů a na nich založených termoelektrických generátorů, které se ale vzájemně liší svou podstatou. Termoemise se může uplatnit ve fotovoltaických aplikacích, v budoucnu by ale mohla představovat jeden ze způsobů, jak zvýšit účinnost i vysokoteplotních energetických zařízení. Je proto žádoucí jí věnovat pozornost.

Cíle bakalářské práce:

Popsat fyzikální principy termoemise.
Popsat hlavní komponenty a používané materiály termoemisních parních a vakuových generátorů.
Provést rešerši existujících experimentálních termoemisních generátorů.
Provést zhodnocení použitelnosti termoemisních generátorů jako zdrojů elektrické energie.

Seznam doporučené literatury:

HATSOPOULOS, G. N., GYFTOPOULOS, E. P. Thermionic Energy Conversion: Vol. 1: Processes and Devices. Cambridge, USA: The MIT Press, 1973. ISBN 978-0262080590.

HATSOPOULOS, G. N., GYFTOPOULOS, E. P. Thermionic Energy Conversion: Vol. 2: Theory, Technology, and Application. Cambridge, USA: The MIT Press, 1979. ISBN 978-0262080606.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se věnuje termoemisním zdrojům elektrické energie. V první části práce byla provedena rešerše týkající se principu termoemisní přeměny a fyzikálních jevů, které se při této přeměně vyskytují. V další části je uvedeno rozdělení termoemisních generátorů dle konstrukce. Z provedené rešerše vyplývá, že v současné době se testují především vakuové termoemisní generátory. Poté následuje přehled vybraných termoemisních generátorů a je uvedeno, za jakým účelem byly zkonstruovány a jakých výsledků dosáhly. Bylo zjištěno, že pro experimentální účely se využívalo ohřevu elektrickým proudem, což může uměle zvyšovat účinnost testovaných zařízení. Závěr je věnován porovnání výkonů a účinností termoemisních zařízení a jejich možnému využití v blízké budoucnosti. Dá se předpokládat, že se některé typy termoemisních generátorů uplatní v elektrárnách využívajících vysokoteplotní zdroje tepla, a zvýší tak jejich účinnost.

Klíčová slova

Termoemisní generátor, termionický konvertor, termoemise

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with thermionic generators. In the first part of the thesis thermionic conversion principle and related physical phenomena are described. In the next part, the distribution of thermionic generators according to the construction is presented. The performed research shows that currently vacuum thermionic generators are being tested. This is followed by an overview of selected thermionic generators, and the purpose for which they were designed and the results achieved. It has been found that electric heating was used for experimental purposes, which can artificially increase the efficiency of the tested devices. The conclusion is dedicated to the performance and efficiency of thermionic devices and their possible use in the near future. It can be assumed that some types of thermionic generators will be used in power plants using high-temperature heat sources to increase their efficiency.

Key words

Thermionic generator, thermionic converter, thermionic emission

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRIMES, Alois. *Termoemisní zdroje elektrické energie* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113145>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marian Brázdil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Termoemisní zdroje elektrické energie vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval Ing. Marianu Brázdilovi za vstřícný přístup a za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce.

Obsah

Úvod	10
1 Fyzikální popis	11
1.1 Princip termoemisní přeměny	11
1.2 Účinnost termoemisní přeměny	13
2 Typy termoemisních generátorů	16
2.1 Vakuové termoemisní generátory	16
2.2 Parní termoemisní generátory	18
3 Vznik a vývoj termoemisních zařízení	20
3.1 Experimentální termoemisní generátory	20
3.2 Spalovací termoemisní generátory	22
3.3 Solární termoemisní generátory	23
3.4 Jaderné termoemisní generátory	23
3.5 Mikrotermoemisní generátory	25
4 Termoemisní generátory v současnosti	27
4.1 Fotovoltaicko-termoemisní generátory	28
4.2 Termoemisní generátory s alkalickými kovy	31
4.3 Termoemisní generátory s emisí na krátkou vzdálenost	32
4.4 Současné termoemisní generátory	34
5 Vlastní zhodnocení	35
5.1 Možné budoucí aplikace	36
ZÁVĚR	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	43
SEZNAM OBRÁZKŮ	44
SEZNAM TABULEK	45

Úvod

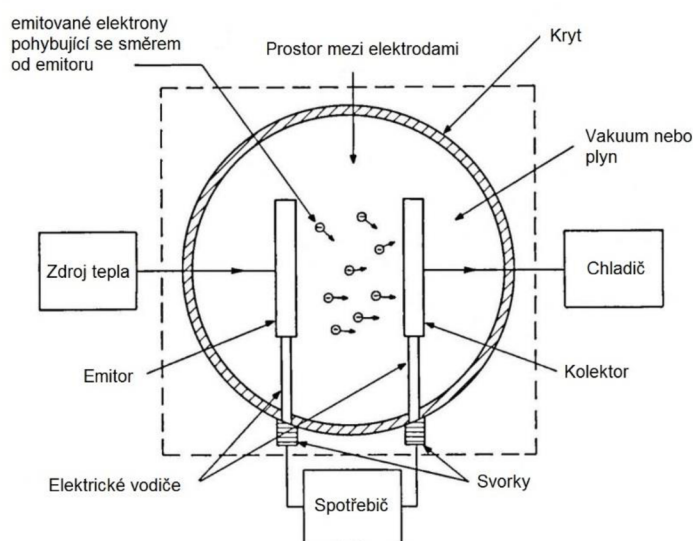
Termoemisní generátory jsou tepelné stroje schopné přímé přeměny tepla na elektrickou energii. Využívají k tomu fyzikálního jevu termoemise, což je schopnost ohřátého materiálu emitovat elektrony ze svého povrchu. Pracovní látkou jsou tedy elektrony, které se přemísťují ze zahřátého povrchu (emitor) na chladnější povrch (kolektor) díky rozdílu potenciálů a vytváří mezi těmito povrchy elektrický proud. Pracovní teploty se pohybují v rozsahu 1200-2200 K na emitoru a 500-1200 K na kolektoru. Termoemisní zařízení mají účinnost 5-10 %, v posledních letech se však účinnost u nových typů termoemisních generátorů zvyšuje a v brzké době by mohly najít své uplatnění v elektrárnách pracujících s vysokoteplotními zdroji tepla.

Úvodní část této práce se věnuje popisu termoemisního generátoru a jevů spojených s provozem takového zařízení. V další části práce popisuje rozdělení termoemisních generátorů podle způsobu snížení vlivu prostorového náboje. Následující kapitoly popisují vybrané termoemisní generátory od počátečních konceptů z roku 1956 až po současné aplikace. V těchto kapitolách je také uveden účel, za kterým generátory byly sestaveny a jakých výkonů a účinností dosahovaly. Závěr shrnuje předchozí kapitoly do dvou grafů, které ilustrují vývoj účinnosti a výkonu termoemisních generátorů. Poslední podkapitola se věnuje možnému uplatnění termoemisních zařízení v budoucnu.

1 Fyzikální popis

1.1 Princip termoemisní přeměny

Termoemisní generátory se skládají ze 2 elektrod – emitoru a kolektoru. Emitor je zahříván na takovou teplotu, kdy se z něj uvolňují elektrony. Ty pak zachycuje kolektor, který má nižší teplotu, jak je zobrazeno na obr. 1. Mezera mezi elektrodami může být vyplněna vakuem, plynem nebo plazmatem. Na začátku se elektrony mohou pohybovat po vnějším povrchu emitoru, ale nemohou z něj uniknout. Aby se elektrony dostaly z povrchu, musí překonat výstupní práci – minimální energii k tomuto nutnou. Výstupní práce je definována jako rozdíl energie vakua a Fermiho energie. Jedná se o materiálovou konstantu, která závisí na struktuře povrchu a vměstcích. V tabulce 1 na následující stránce jsou uvedeny hodnoty výstupní práce pro různé kovové materiály. Jakmile mají elektrony dostatečnou kinetickou energii k překonání výstupní práce, opouští povrch emitoru a jsou zachyceny chladnějším kolektorem. Na kolektoru se pak shromažďuje záporný náboj a vytváří napětí mezi emitorem a kolektorem. Toto napětí způsobuje tok elektrického proudu přes spotřebič, kde se vykoná elektrická práce. Elektrony následně pokračují zpět do emitoru a celý proces se opakuje, dokud není zastaven přísun tepla [1].



Obr. 1 Základní procesy a komponenty termoemisního generátoru (upraveno z [1])

K emisi elektronů lze využít i vnějšího elektrického pole. Vlivem vnějšího pole může docházet ke snížení výstupní práce a ke zvýšení proudu mezi emitorem a kolektorem. Tento jev se nazývá Schottkyho efekt. V určitém případě, kdy elektrické pole bude velmi silné (intenzita větší než $10^8 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$), bude také docházet k tzv. Fowler-Nordheimovu tunelovému jevu, což znamená, že se některé elektrony dostanou z materiálu ven do prostoru, přestože energie těchto elektronů není větší než výstupní práce emitoru [9] [10].

Tabulka 1 Hodnoty výstupní práce pro různé materiály [4]

<i>Materiál</i>	<i>Výstupní práce [eV]</i>
Molybden	4,15
Nikl	4,61
Tantal	4,12
Wolfram	4,54
Baryum	2,11
Cesium	1,81
Iridium	5,40
Platina	5,32
Rhenium	4,85

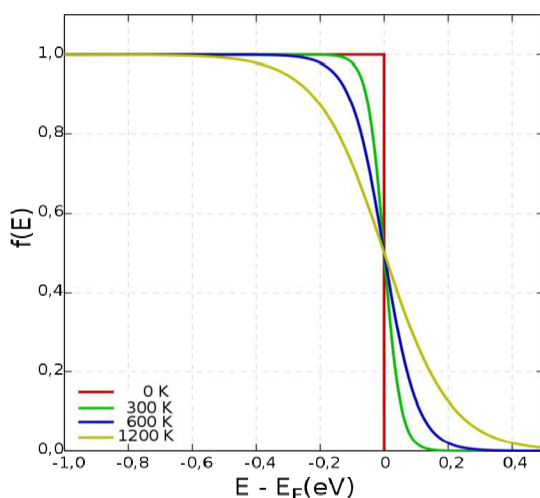
Fermiho energie

Z Pauliho vylučovacího principu vyplývá, že žádné dva elektrony nemají stejná kvantová čísla, na jedné energetické hladině tedy mohou být pouze 2 elektrony s opačným spinem. Valenční elektrony tedy nemohou mít kinetickou energii rovnu nule, ale budou obsazovat nejnižší možné energetické hladiny. Nejvyšší energetická hladina, do které se valenční elektrony dostanou při teplotě 0 K, se nazývá Fermiho hladina nebo také Fermiho energie [5][7].

Pokud je termodynamická teplota vyšší než 0, část elektronů ležících blízko Fermiho hladiny může díky své vyšší tepelné energii excitovat do hladin nad Fermiho energií. Tento jev lze popsat distribuční funkcí, tzv. Fermi-Diracovou rozdělovací funkcí.

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}} \quad 1.1$$

Pomocí této funkce lze vypočítat, jaká je pravděpodobnost zaplnění energetické hladiny při dané teplotě (viz obr. 2) [6].



Obr. 2 Průběh Fermi-Diracovy funkce za různých teplot [8]

1.2 Účinnost termoemisní přeměny

Účinnost Carnotova cyklu

Na termoemisní generátory se lze dívat jako na tepelné stroje, jejichž účinnost je omezena Carnotovou účinností. Jedná se o vratný kruhový děj skládající se ze dvou izotermických a dvou adiabatických dějů [2].

$$\eta_{CA} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad 1.2$$

η_{CA} je účinnost Carnotova cyklu, T_C je teplota kolektoru a T_H je teplota emitoru.

Chambadalova-Novikova účinnost

Ve skutečnosti dochází ke ztrátám tepla a cyklus tedy není vratný. Reálnou účinnost lze přibližně spočítat pomocí Chambadalova-Novikova vztahu [3].

$$\eta_{CN} = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}} \quad 1.3$$

Termoemise

Z povrchu kovu nacházejícího se v páře inertního plynu za teploty větší než 0 K se uvolňují nabitě částice (elektrony, ionty) do okolí. Tento jev se nazývá termoemise. Emitované částice se následně vrací zpátky na povrch kovu. Proud částic z povrchu a zpátky na povrch kovu je v rovnováze, elektrický proud je tedy roven nule. Přidáme-li do soustavy další kov, který je připojen k původnímu kovu, nabitě částice mohou kondenzovat na povrchu nového kovu. Elektrický proud v takovém případě může být různý od nuly. Emise elektronů z povrchu lze dosáhnout 3 způsoby: termoemisí, fotoemisí nebo působením silného elektrického pole [1].

Pro hustotu elektrického proudu při termoemisí pak platí Richardsonova-Dushmanova rovnice [4].

$$J = AT^2 e^{(-\frac{\varphi}{kT})} \quad 1.4$$

kde J je hustota elektrického proudu, A je Richardsonova konstanta, T je absolutní teplota, φ je výstupní práce materiálu a k je Boltzmannova konstanta. Ze vztahu pak vyplývá, že teplota a výstupní práce materiálu má významný vliv na hustotu elektrického proudu.

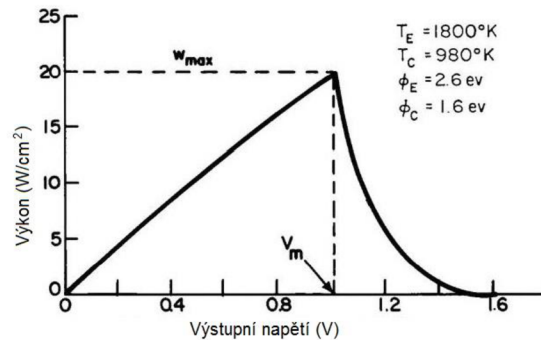
V termoemisních generátorech máme 2 oblasti, které závisí na výstupním napětí U .

$$J = AT_E^2 e^{-\frac{\varphi_E}{kT_E}} - AT_C^2 e^{-\frac{\varphi_E - eV}{kT_C}} \quad \text{pro } U < \frac{\varphi_E - \varphi_C}{e} \quad 1.5a$$

$$J = AT_E^2 e^{-\frac{\varphi_C + eV}{kT_E}} - AT_C^2 e^{-\frac{\varphi_C}{kT_C}} \quad \text{pro } U > \frac{\varphi_E - \varphi_C}{e} \quad 1.5b$$

φ_E je výstupní práce emitoru, φ_C je výstupní práce kolektoru, T_E je teplota emitoru, T_C je teplota kolektoru a e je elektrický náboj elektronu.

První člen v rovnici vyjadřuje hustotu elektrického proudu emitoru a druhý člen kolektoru.



Obr. 3 Výkon termoemisního generátoru v závislosti na výstupním napětí (upraveno z [1])

Pro výkon pak platí vztah

$$P = JU \quad 1.6$$

Z grafu na obr. 3 je zřejmé, že maximálního výkonu generátor dosahuje, když se výstupní napětí rovná rozdílu výstupních prací emitoru a kolektoru.

Iontový saturační proud

Běžné povrchy kovů jsou velmi špatnými emitory kladných iontů. Pro praktické výpočty tedy vliv takto emitovaných iontů zanedbáváme. Pokud je však povrch kovu ve styku s vhodným plynem (např. wolfram v cesiových parách), emise iontů může být za určitých podmínek, jako nízký tlak plynu a vysoká teplota povrchu kovu, podstatně zvýšena. Iontový saturační proud pak lze spočítat vztahem

$$\tilde{J}_s = \frac{ep_g}{(2\pi m_g k T_g)^{\frac{1}{2}} \left[1 + 2e^{\frac{E_I - \varphi}{kT}} \right]} \quad 1.7$$

kde \tilde{J}_s je hustota iontového saturačního proudu, p_g , T_g , m_g a E_I jsou tlak, teplota, hmotnost a první ionizační energie plynu. Hodnota 2 před exponenciální funkcí v rovnici 1.7 platí pro ionty cesia. Pro ionty jiných prvků se hodnota před exponenciální funkcí může lišit [1].

Výpočet účinnosti termoemisního generátoru

Účinnost termoemisního generátoru je dána vztahem

$$\eta = \frac{SJ(U - U_L)}{Q_E + \left[Q_L - \left(\frac{Q_d}{2} \right) \right] + (Q_r + Q_k)} \quad 1.8$$

kde S je aktivní plocha emitoru, U_L je úbytek napětí ve vodiči, Q_E je tepelný tok elektronů, Q_L je tepelný tok, který by prošel vodičem při nulovém proudu, Q_d je tok Jouleova tepla, Q_r je tepelný tok mezi elektrodami a Q_k je tepelný tok procházející emitorem.

Napětí je v ideálním případě rovno rozdílu výstupních prací emitoru a kolektoru, podělené nábojem elektronu.

$$U = \frac{\varphi_E - \varphi_C}{e} \quad 1.9$$

Jouleovo teplo lze vypočítat pomocí vztahu

$$Q_d = S^2 J^2 \rho_L \frac{l_L}{S_L} \quad 1.10$$

kde ρ_L je měrný elektrický odpor vodiče, l_L je délka vodiče a S_L je plocha průřezu vodiče. Q_L pak lze spočítat

$$Q_L = \lambda \frac{S_L}{l_L} (T_E - T_C) \quad 1.11$$

kde λ je tepelná vodivost elektrického vodiče. Pro rychlost ochlazování elektronů platí vztah

$$Q_E = S J_{EC} \frac{\varphi_E - E_{FE} + 2kT_E}{e} - S J_{CE} \frac{\varphi_E - E_{FE} + 2kT_C}{e} \quad 1.12$$

kde J_{EC} je hustota elektrického proudu tekoucího z emitoru na kolektor, J_{CE} je hustota proudu tekoucího z kolektoru na emitor a E_{FE} je Fermiho energie emitoru. Teplo Q_r lze spočítat jako

$$Q_r = S \sigma_0 \epsilon (T_E^4 - T_C^4) \quad 1.13$$

kde σ_0 je Stefanova – Boltzmannova konstanta a je rovna $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ a ϵ je poměrná zářivost (emisivita). Q_k spočteme pomocí této rovnice

$$Q_k = \alpha (T_E - T_C) \quad 1.14$$

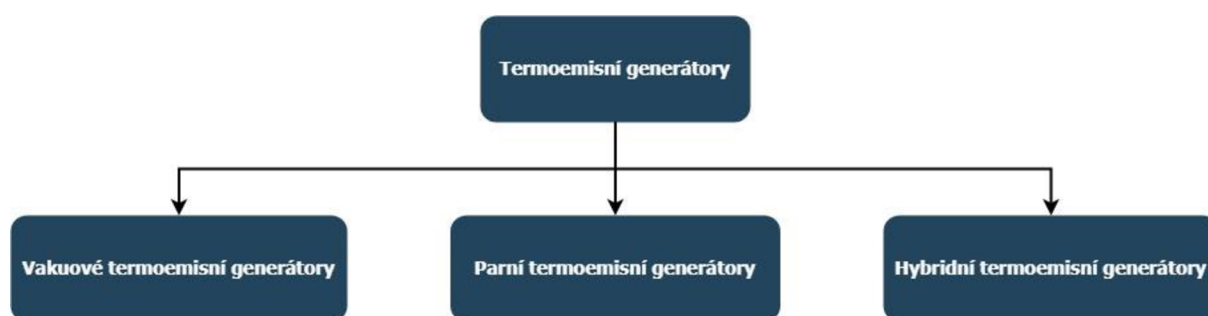
kde α značí součinitel prostupu tepla. Nakonec můžeme i spočítat úbytek napětí ve vodiči.

$$U_L = S J \rho_L \frac{l_L}{S_L} \quad 1.15$$

Po dosazení všech proměnných do rovnice 1.8 získáme hodnotu účinnosti termoemisního generátoru [1].

2 Typy termoemisních generátorů

Termoemisní generátory lze rozdělit podle několika kritérií. Na obr. 4 je rozdělení podle způsobu potlačení vlivu prostorového náboje. Tento vliv lze potlačit zúžením mezery mezi elektrodami, čehož využívají vakuové termoemisní generátory nebo vyplněním mezery ionizovatelným plynem za nízkého tlaku, který výrazně snižuje vliv prostorového náboje. V takovém případě se jedná o plazmové termoemisní generátory. Termoemisní zařízení lze dělit také podle zdroje tepla, a to na spalovací, solární a jaderné. Novější generátory pak využívají kromě termoemise i jiné jevy využitelné pro výrobu elektrické energie. Tyto generátory budou popsány samostatně v kap. 4. Následující podkapitoly se věnují detailnějšímu popisu jednotlivých generátorů [1][17].

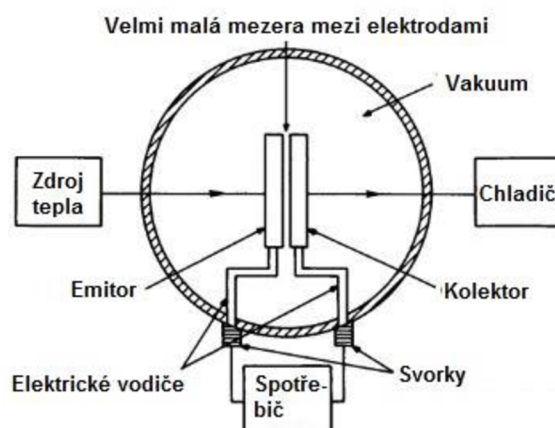


Obr. 4 Schéma rozdělení termoemisních generátorů dle potlačení vlivu prostorového náboje

2.1 Vakuové termoemisní generátory

Hlavním znakem vakuových termoemisních generátorů je malý výskyt jiných částic než elektronů, a proto jsou interakce těchto částic s elektrony zanedbatelné. Interakce mezi elektrony však zanedbat nelze, jelikož vytváří v prostoru mezi elektrodami síly, které zpomalují emitované elektrony, a tím snižují výstupní elektrický proud. George N. Hatsopoulos navrhl 3 druhy termoemisních vakuových generátorů, které vliv zpomalujících sil elektronů snižují. Jedná se o tzv. close-spaced vakuové diody, vakuové magnetické triody a vakuové elektrostatické triody [1].

Úzké vakuové diody

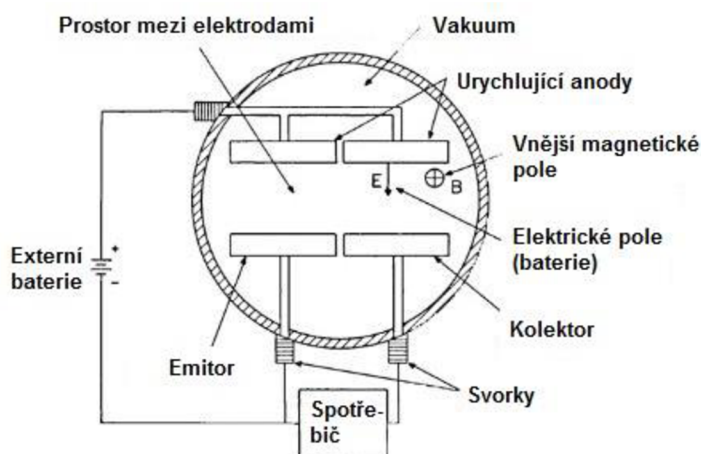


Obr. 5 Schéma úzké vakuové diody (upraveno z [1])

Základní schéma úzké vakuové diody lze vidět na obr. 5. Emitor je zahříván zdrojem tepla, což způsobuje emitování elektronů z jeho povrchu. Elektrony pak přechází úzkou mezerou v řádech jednotek mikrometrů na chladnější kolektor. Následně jsou odvedeny pomocí vodiče na spotřebič. V pracovním prostoru je vakuum a celý systém je uzavřen v krytu. Vzdálenost mezi elektrodami je malá, aby se omezil negativní vliv prostorového náboje. [1] Výhodou tohoto typu diody je možnost pracovat i při relativně nízkých teplotách emitoru a možnost dosáhnout vysokých hodnot výstupního napětí. Mezi negativa pak patří náročnost výroby úzké diody, a především vlastnosti materiálů pro emitor. Materiály s nízkou výstupní prací mají nízkou životnost, a naopak materiály s dlouhou životností mají velké hodnoty výstupní práce a výsledný výkon je tedy nízký. Problém s vhodným materiálem je společný pro všechny vakuové termoemisní generátory [18].

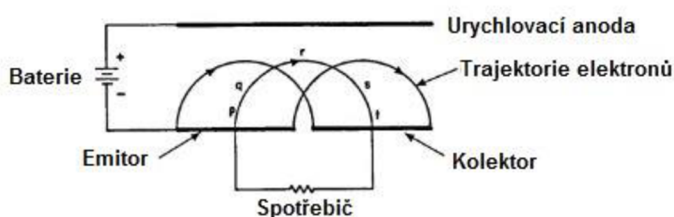
Vakuové magnetické triody

Dalším typem vakuového termoemisního generátoru je vakuová magnetická trioda. Ta nepotřebuje úzkou mezeru mezi elektrodami, ale využívá zkříženého elektrického a magnetického pole k potlačení vlivu prostorového náboje.



Obr. 6 Schéma vakuové magnetické triody (upraveno z [1])

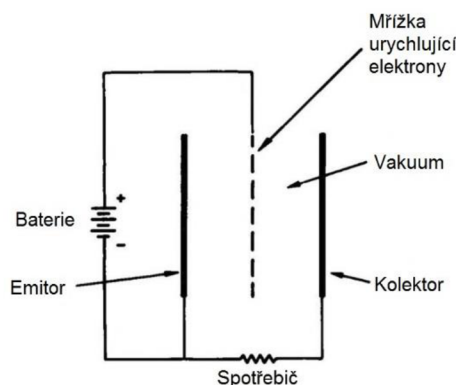
Na obr. 6 je zobrazen emitor souběžně s kolektorem, naproti nim je třetí elektroda – urychlovací anoda, která je zapojena k externí baterii, na kterou je přímo připojen emitor a nepřímě, přes zátěž, kolektor. Baterie pak vytváří elektrostatické pole v prostoru mezi emitorem, kolektorem a urychlovací anodou. V prostoru mezi elektrodami také působí magnetické pole vytvořeno permanentním magnetem. Pracovní prostor je vyplněn vakuem a uzavřen ve schránce. Princip této triody spočívá v urychlování emitovaných elektronů z emitoru směrem k urychlovací anodě vlivem elektrického pole. Prostorový náboj kolem emitoru je potlačen v závislosti na intenzitě elektrického pole. Elektrické pole dodává elektronům hybnost



Obr. 7 Trajektorie elektronů uvnitř magnetické triody (upraveno z [1])

a magnetické pole elektrony stáčí po křivce směrem ke kolektoru. Velikost intenzity elektrického pole a velikost magnetické indukce jsou přizpůsobeny pro konkrétní zařízení. Při experimentech s tímto typem generátoru se ukázalo, že dochází k relativně velkým ztrátám elektrického proudu vlivem nestability toku elektronů a kolizím mezi elektrony. Kvůli nízkým výstupním hodnotám výkonu nebyl tento typ generátoru dále zkoumán [1][19].

Vakuové elektrostatické triody



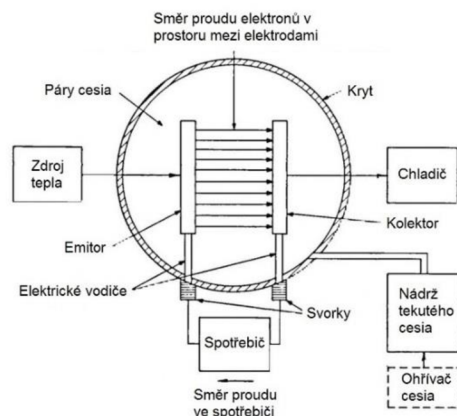
Obr. 8 Schéma vakuové elektrostatické triody (upraveno z [1])

Jako alternativu k vakuové magnetické triodě navrhl G. Hatsopoulos vakuovou elektrostatickou triodu (obr. 8). Ta využívá k potlačení vlivu prostorového náboje urychlovací mřížku připojenou ke zdroji a umístěnou mezi emitorem a kolektorem. Po zkonstruování a otestování této triody se však ukázalo, že asi 50 % emitovaných elektronů se o mřížku „zachytí“ a efektivita takového zařízení je ještě menší než u magnetické triody [1].

2.2 Parní termoemisní generátory

Vliv prostorového náboje lze také omezit generováním iontů s kladným nábojem. Kladné ionty se v prostoru diody spojují s elektrony a vytvářejí elektricky neutrální oblast, čímž vliv prostorového náboje silně omezují. Toho se dá dosáhnout 2 způsoby, které vedly ke vzniku dvou typů parních termoemisních generátorů – plazmových termoemisních generátorů a generátorů s obloukovou triodou [17].

Plazmové termoemisní generátory



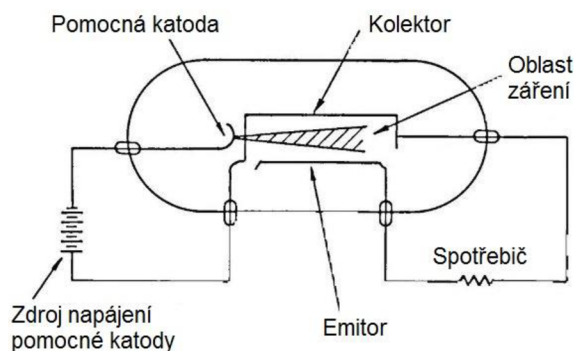
Obr. 9 Schéma cesiového termoemisního generátoru (upraveno z [1])

U plazmových termoemisních generátorů se využívá snadno ionizovatelných par alkalických kovů. Nejčastěji se používá cesium díky svému nízkému ionizačnímu potenciálu a také kvůli schopnosti adsorbovaného cesia snížit výstupní práci materiálů používaných na obou elektrodách, čímž zvyšuje účinnost generátoru. Cesium se dostává do prostoru diody, kde spolu s elektrony tvoří nízkoteplotní plazma. Díky tomu se minimalizuje velikost zpomalujících elektrických sil na emitované elektrony, čímž se zvýší proud mezi emitorem a kolektorem [20].

Plazmový termoemisní generátor může pracovat ve dvou základních režimech. V nevznětovém režimu je plazma udržována pomocí tepelné ionizace, ke které dochází v místě kontaktu cesiových par a rozžhaveného emitoru. Při tomto režimu nedochází k vnitřním ztrátám elektrické energie, na druhou stranu vyžaduje velmi nízký tlak a vysokou teplotu emitoru (více než 2200 K). Vznětový režim se liší od předchozího tím, že plazma je udržována pomocí ionizace nárazem, kdy se atomy par cesia sráží s velmi horkým elektronovým plynem. Teplota na emitoru se pohybuje v rozmezí od 1600 K do 2000 K a tlak kolem 130 Pa. Pro praktické aplikace se obvykle používá právě vznětový režim, kvůli nižší teplotě emitoru, což znamená delší životnost zařízení a nižší cenu [21]. Povrch emitoru je z thoriovaného wolframu a povrch kolektoru je běžně tvořen niklem [17].

Termoemisní generátory s obloukovou triodou

Termoemisní generátory s pomocným výbojem fungují na podobném principu jako plazmový generátor. Rozdíl spočívá v zavedení 3. elektrody pod napětím a vyplnění prostoru mezi elektrodami inertním plynem (místo páry alkalického kovu). Inertní plyn se pomocí výboje z pomocné elektrody ionizuje a společně s elektrony vytvoří plazma. Výhodou tohoto typu generátoru je možnost provozu za relativně nízkých teplot emitoru (1500 K), takže jako zdroj tepla lze použít i fosilní paliva. Výstupní proud závisí na vlastnostech výboje, tlaku plynu a na umístění pomocné elektrody.



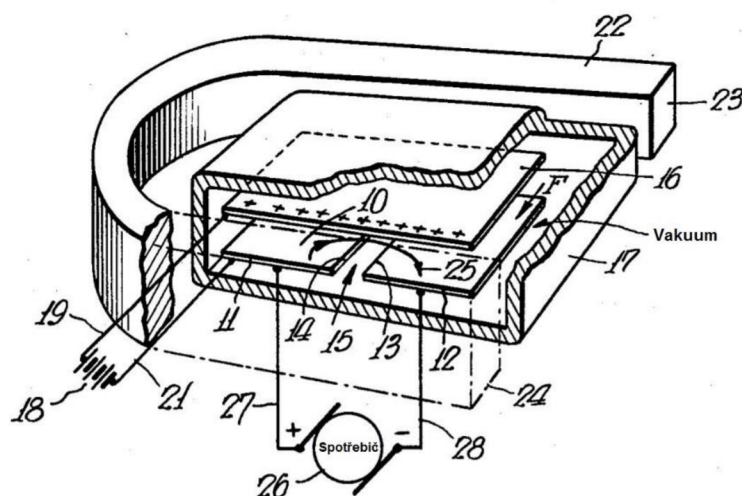
Obr. 10 Schéma termoemisního generátoru s obloukovou triodou (upraveno z [1])

3 Vznik a vývoj termoemisních zařízení

Jako první termoemisi pozoroval francouzský fyzik Edmond Becquerel v roce 1853. Jako další tento jev pozoroval Frederick Guthrie v roce 1873 při pozorování rozžhavené železné koule nabité záporným nábojem. Koule z tehdy neznámého důvodu ztrácela záporný náboj. Na konci 19. století se Thomas Alva Edison snažil zjistit příčinu přepálení vlákna žárovky a jevu, který tvořil tmavý povlak s bílým pruhem v rovině vlákna na vnitřní straně žárovky. V roce 1883 se rozhodl přidat do žárovky kovovou destičku a následně pozoroval, že mezi kladně nabitou destičkou a vláknem protéká elektrický proud. V tentýž rok si nechal patentovat zařízení, které využívalo tohoto jevu – termionickou diodu. Roku 1904 John Ambrose Fleming na základě znalostí Edisonova výzkumu zkonstruoval první diodu a o 2 roky později Lee de Forest vynalezl triodu [23][24]. Na začátku 20. století přišel W. Schlichter ve své práci s myšlenkou využít termoemisi jako způsob generování elektřiny. V 30. letech 20. století americký chemik Irving Langmuir posunul znalosti termoemise na úroveň dostačující k sestavení jednoduchého zařízení využívajícího tohoto jevu. Ke skutečnému průlomů však došlo až o více jak 20 let později, kdy roku 1956 americký vědec George N. Hatsopoulos popsal a navrhl první termoemisní generátor. Jeho práce vedla k rychlému rozvoji této technologie během následujících let [17][25]. Rané úsilí ve Spojených státech a tehdejším Sovětském svazu na počátku 60. let zahrnovalo výzkum jak solárních, tak jaderných „in-core“ termoemisních generátorů. Výzkum solárních termoemisních generátorů byl opuštěn na začátku 70. let z důvodu nízkých výkonů testovaných zařízení, které nevyhovovaly tehdejším požadavkům pro využití ve vesmíru [21]. Vývoj jaderných generátorů však pokračoval až do konce 20. století. V následujících podkapitolách budou chronologicky popsány jednotlivé programy zabývající se termoemisními generátory.

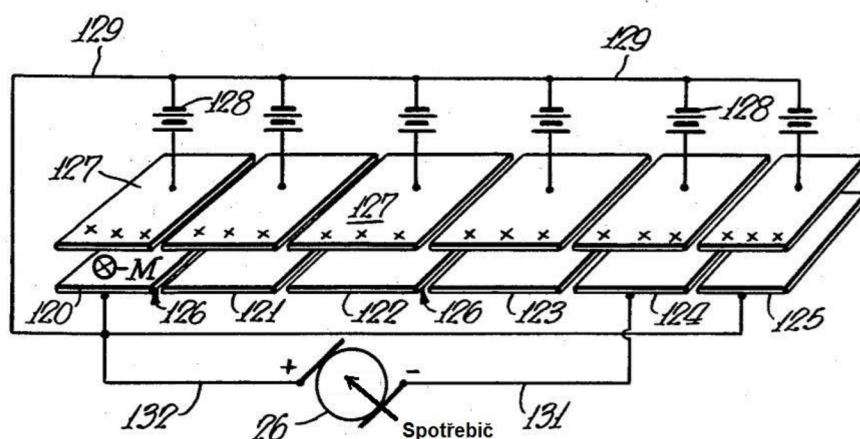
3.1 Experimentální termoemisní generátory

První termoemisní generátor byl navržen a popsán v roce 1956 americkým vědcem Georgem N. Hatsopoulosem [39]. Účelem tohoto generátoru bylo ověřit, zda je možné využít termoemisi k výrobě elektrické energie. Tento generátor měl celkem 5 variant konstrukčních řešení. Pro jednoduchost byl zvolen elektrický ohřev emitorů, a to u všech pěti testovacích modelů.



Obr. 11 První verze vakuového termoemisního generátoru (upraveno z [11])

Všechny varianty měly prostor mezi elektrodami vyplněny vakuem, jednalo se tedy o vakuové termoemisní generátory. Na obr. 11 lze vidět částečný řez první verzi vakuového termoemisního generátoru. Uspořádání elektrod je relativně jednoduché, z toho také plyne poměrně nízké vygenerované napětí v řádech jednotek voltů. V tomto konstrukčním řešení je povrch emitoru (10, 12), kterým je kovová deska (11), zahříván vhodným zdrojem tepla. Emitované elektrony zachytává kolektor (16) umístěný nad oběma emitory. Tento systém je uzavřen ve vakuu v zapečetěném obalu (17), který je z vhodného nemagnetického materiálu. K emitoru i kolektoru jsou připojeny vodiče (19,21) z baterie (18). Celý systém obklopuje permanentní magnet (22), který je zasazen v generátoru tak, že opačné póly (23,24) magnetu jsou umístěny na protilehlých stranách obalu. Tím generují magnetický tok ve směru naznačeném na obrázku šipkou F [11]. Dalším konstrukčním řešením může být libovolné množství dvojic desek, z nichž jedna je emitorem a druhá kolektorem. Na obr. 12 lze vidět 6 dvojic desek uspořádaných vedle sebe. Desky se mohou lišit rozměry, jednotlivé dvojice by však měly mít stejné rozměry. Mezery mezi deskami jsou velmi malé, ideálně v řádech mikrometrů. Celý systém se opět nachází ve vakuu a je uzavřen krytem.

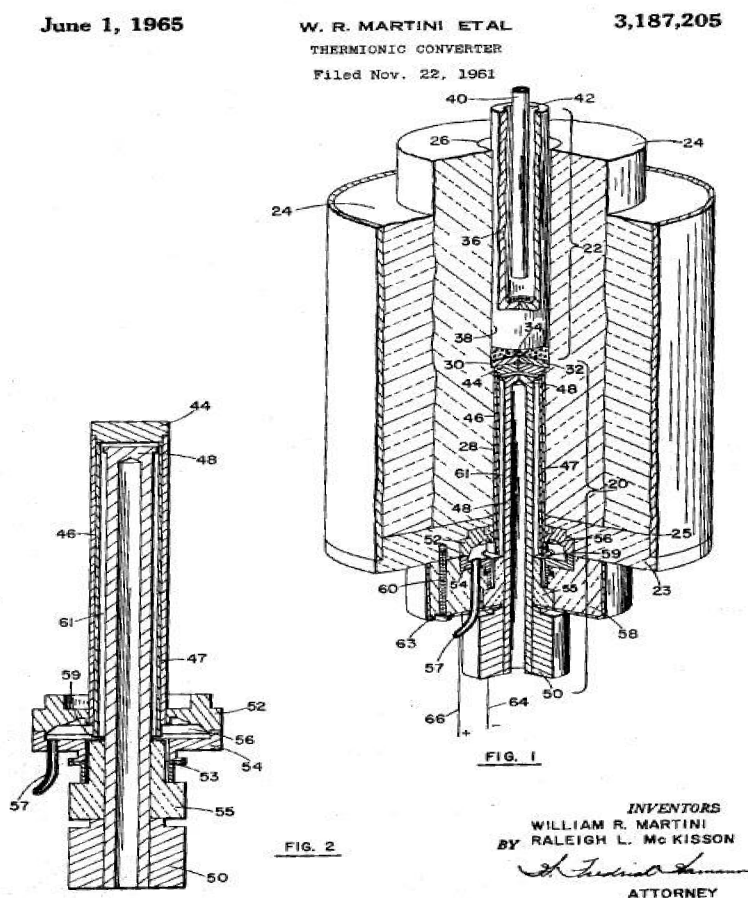


Obr. 12 Sériové uspořádání desek termoemisního generátoru (upraveno z [11])

U všech podobných konstrukčních řešení včetně těch, které zde nejsou zmíněny, jsou kolektory vyrobeny z nemagnetických kovů, emitory pak mohou být vyrobeny z jakéhokoliv materiálu schopného emitovat elektrony např. wolfram, oxid lanthanitý nebo oxid thoričitý. Použití konkrétního materiálu je dáno hlavně provozní teplotou [11]. Většina měření probíhala na modelu č. 4, který lze vidět na obr. 12. Elektrody měly při prvních experimentech povlak tvořený oxidy barya či stroncia. Tyto povlaky však nebyly stabilní za vyšších teplot a později byly vyměněny za povlaky z uhlíčanů stroncia a barya, které bylo možné testovat i za teplot kolem 1500 K na emitoru [21]. Při teplotě 1500 K elektrody generovaly výkon kolem 1 W/cm^2 a dosahovaly účinnost kolem 5-10 % [40].

3.2 Spalovací termoemisní generátory

První spalovací termoemisní generátor byl navržen Williamem R. Martinim v roce 1961. Hlavním účelem tohoto generátoru bylo poskytnout jednoduchý přístroj pro výzkum, na kterém by bylo možné experimentovat. Na tomto přístroji byl studován vliv jednotlivých parametrů a na základě tohoto studia byly vytvořeny funkční závislosti popisující např. vliv teploty na výkon. Tento generátor využíval běžné fosilní palivo jako zdroj tepla. Poskytoval také možnost jednoduché výměny diod. Většina experimentů s tímto zařízením využívala pouze jedné termoemisní diody. Důvodem byla snadná výměna diody různých rozměrů a vlastností. Dioda se pak dá jednoduše přizpůsobit experimentům při různých podmínkách.



Obr. 13 Řez spalovacím termoemisním generátorem [12]

Obr. 13 znázorňuje 2 řezy generátorem. V prvním řezu, označeným jako FIG. 1, je vidět termoemisní dioda (20), nad kterou je oblast ohřevu (22). Tyto dvě oblasti jsou odděleny pečetí z karbidu křemíku (30). Teplo ze spalovací komory je vedeno přes pečeť (30) na katodu (44) a ohřívá ji na min. 1400°C. Spodní strana katody (44) pak emituje elektrony na anodu (48). Mezi oběma elektrodami je mezera v řádech milimetrů. Mezi přírubou (52) a nádobou (54) je dutá uzavřená komora (56) s cesiem. Cesium je do komory přivedeno z nádrže trubcí (57). Odběr elektrického proudu lze vidět ve spodní části generátoru (64,66). Celý systém je izolován krytem (24) [12][13]. Při testování, které proběhlo o 3 roky později diody dosahovaly 0,15 – 2 % účinnosti a výkonů pod 1 W/cm² [38].

3.3 Solární termoemisní generátory

Cílem Solar Energy Technology Thermionic (SET) programu bylo otestovat výkon 135 termoemisních zařízení, zkonstruovat alespoň 4 generátory s konfigurací 4 konvertorů uvnitř každého z nich a jejich následné testování v laboratoři. Na závěr pak otestovat tyto generátory s parabolickým zrcadlem. Většina SET generátorů byla testována při teplotách 1900-2000 K na emitoru, dosahovala životnosti 7000–11000 hodin při účinnosti **7-10 %**. Jeden z generátorů dosáhl životnosti 20 000 hodin a produkoval 25 W/cm². 150 W generátory v programu SET měly účinnost **9-11 %**, pracovali při teplotě 1700 K na emitoru a **17-22 W/cm²**. Je ale nutné dodat, že tyto hodnoty byly dosaženy díky elektrickému ohřevu elektrod. Tento program měla na starosti americká společnost Jet Propulsion Laboratory (JPL) a pracovala na něm od roku 1961 do začátku 70. let, kdy byl program ukončen [21].

3.4 Jaderné termoemisní generátory

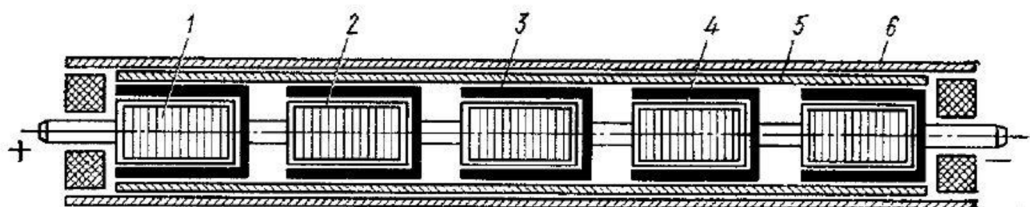
V roce 1970 byla pro vývoj vybrána společnost General Atomics, která měla za úkol pokračovat ve vývoji jednotlivých součástí termoemisního generátoru a zkonstruovat termoemisní testovací reaktor. V tomto programu se pracovalo jak na zařízeních pro použití ve vesmíru, tak pro použití na zemi. Dále se řešila optimalizace výroby jednotlivých součástí generátoru. Testovací reaktor TRIGA Mark III otestoval 37 in-core termoemisních generátorů od roku 1962 do 1973. Zdrojem tepla pro testování bylo jaderné palivo. Generátory pracovaly při teplotě až 1900 K a dosahovaly životnosti 12 500 hodin [21]. O účinnosti a výkonech jednotlivých generátorů se nepodařilo najít žádná data.

TOPAZ I a TOPAZ II

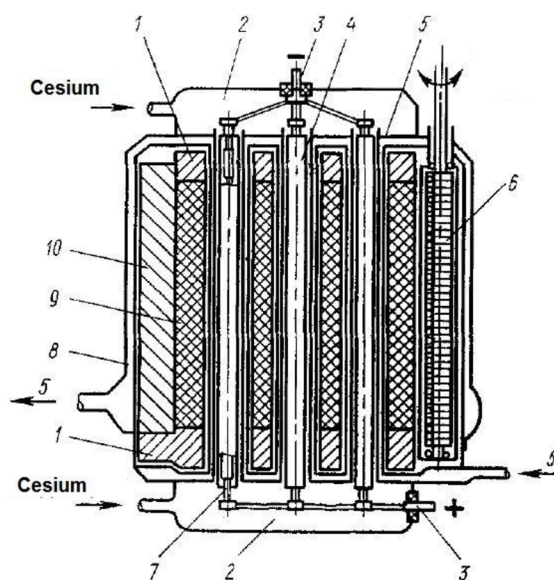
Sovětský svaz v 60. letech zahájil program pro vývoj a testování in-core termoemisních reaktorů za použití palivových elementů s oxidem uraničitým. Při testování se nicméně jaderné palivo nepoužívalo a teplo na elektrody bylo zajištěno elektricky. Cílem týmu bylo především zvýšit životnost a spolehlivost jaderných generátorů. V programu byly 2 týmy, kdy jeden z týmu vyvíjel generátor s jednočláňkovými palivovými elementy (TOPAZ II) a druhý tým využíval mnohočláňkové palivové elementy (TOPAZ I). Zatímco TOPAZ II úspěšně demonstroval výhody technologií vyvinutých v Sovětském svazu, TOPAZ I byl nakonec použit pro mise ve vesmíru v roce 1987, konkrétně na satelitech Cosmos 1818 (142 dní na oběžné dráze) a Cosmos 1867 (342 dní na oběžné dráze) [14][21].

Návrh reaktoru TOPAZ I měl disponovat výkonem 10 kW, avšak při testování měl výkon 5 kW při teplotách emitoru kolem 1770 K. TOPAZ II byl navržen i testován s výkonem 6 kW při teplotách emitoru od 1800 K do 2100 K. Oba reaktory byly chlazeny slitinou sodík-draslík a regulační tyče byly vyrobeny z hydridu zirkonia [22]. V roce 1992 byly 2 reaktory TOPAZ II převezeny do USA, kde byly testovány. Poznatky z testování sloužily k vylepšení amerických termoemisních generátorů [28]. Na obr. 14 lze vidět napájecí kanál tvořen trubíci ze slitiny wolframu případně molybdenu, kterou je zajištěn přísun obohaceného uranu. Trubice vede přes 5 jader (1), kde se uran štěpí. Vyzářené teplo pak ohřívá stěny jádra, které fungují jako emitory (2) a přenáší elektrony na katodu (3) mezerou mezi elektrodami (3) vyplněnou parami cesia. Celý systém je izolován (5) a uzavřen krytem (6). Obr. 15 zobrazuje samotný reaktor s třemi napájecími kanály (4). Do prostoru kanálů je přiváděno cesium z horní a dolní

cesiové komory (2) a oblast kolem anod je chlazena slitinou sodík-draslík (5) uvnitř chladicího obalu (8). Vedení (3,7) proudu je uchyceno na horní a dolní části trubic, které jsou uvnitř napájecích kanálů (4). Jadernou reakci kontroluje regulační tyč (6) a moderátory (9). Boční a horní reflektory (1,10) pak mají za úkol uniklé neutrony vracet zpět do jádra [15][16]. Program byl ukončen v roce 1996. K ukončení programu došlo kvůli pochybnostem ohledně významu testování bez použití jaderného paliva a finančním důvodům. Při testování se dosáhlo výkonu kolem $2-3 \text{ W/cm}^2$ [21], účinnost dosahovala kolem 5 % [28].



Obr. 14 Napájecí kanál jaderného termoemisního generátoru [15]

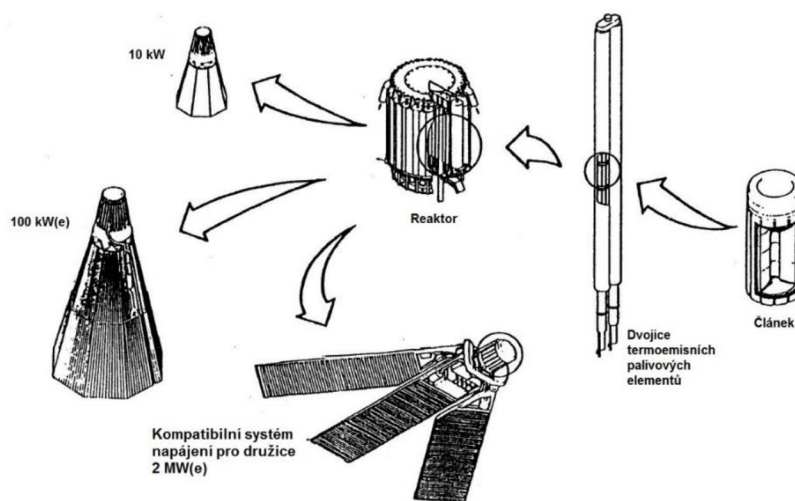


Obr. 15 Částečný řez generátorem (upraveno z [15])

Program termoemisních palivových elementů

V roce 1981 americká vládní agentura NASA začala společně s Ministerstvem energetiky USA pracovat na projektu, který měl za cíl navrhnout vysoce výkonný jaderný reaktor s minimálním výkonem 100 kW jako zdroj energie ve vesmíru. Tento program byl nazván SP-100 a soustředil se především na využití termoelektrického jevu. V roce 1986 byl SP-100 doplněn i o nový program nazvaný Thermionic fuel element verification (TFEV), který měl za cíl vyvinout opět jaderný generátor, tentokrát s využitím termoemise. Tento program volně navazoval na program Thermionic reactor and fuel element program (viz kap. 3.4). Později byl cíl tohoto programu změněn dle požadavků ministerstva obrany USA na vývoj jaderného termoemisního generátoru s výkonem v rozmezí od 5 kW do 40 kW [22].

Program TFEV měl také jiné cíle, které souvisely především se zvýšením životnosti zařízení na 1,5 až 5 let. Životnost omezovalo napuchání paliva, poškození použitých materiálů vlivem radiace. Tyto problémy bylo potřeba demonstrovat a následně vyhodnotit tak, aby bylo možné předpovídat napuchání paliva, ověřit hodnoty deformace emitoru a posoudit vliv radiace na těsnění a izolátory. Ověřovány byly také životnost a výkon termoemisních palivových elementů a dalších součástí generátoru [21]. Zdrojem tepla v experimentech byl 93% obohacený uran. Generátory v tomto programu byly testovány více než 30 000 hodin, maximální účinnost dosahovala hodnoty **9,3 %** při teplotě emitoru 1800 K a kolektoru 1000 K, výkony byly v rozmezí od **2-4 W/cm²**. Mimo to se také podařilo zpřesnit výpočetní modely nebo vyvinout izolační materiály na bázi hliníku vhodné pro provoz termoemisního jaderného zařízení [41].



Obr. 16 Části termoemisního reaktoru a možnosti jeho sestavení (upraveno z [22])

Termoemisní jaderný generátor se skládá z jednotlivých termoemisních palivových elementů, které se podle požadovaného výkonu spojují do tří různých sestav, jak je znázorněno na obr. 16. Samotný článek má válcovitý tvar, v horní části je otvor pro palivové pelety z obohaceného uranu. Pelety se po vhození zastaví v oblasti emitoru a po dosažení teploty přes 1500 K začne proud elektronů přecházet na kolektor umístěný pod emitorem přes mezeru vyplněnou parami cesia. V dolní části článku se nachází vodiče [22].

3.5 Mikrotermoemisní generátory

Pod záštitou Defense Threat Reduction Agency (DTRA) začala společnost Sandia National Laboratories (SNL) v roce 1998 pracovat na projektu Microminiature Thermionic Converter (MTC). Projekt se zabýval vývojem velmi malých (v řádu mikrometrů) termoemisních konvertorů za použití technologie výroby polovodičů. Tato technologie umožňuje vyrábět levně, přesně a ve velkém množství [26]. MTC generátory řeší jeden z hlavních problémů u vakuových termoemisních generátorů, které k překonání vlivu prostorového náboje vyžadují mezeru mezi elektrodami v řádech mikrometrů. Generátory v projektu MTC měly mít výhody jako tichý provoz, nízké nároky na údržbu, dlouhou životnost a kompaktnost. Také měly mít relativně vysokou účinnost, a to za použití nižších teplot než u ostatních typů termoemisních generátorů.

V roce 1999 následně proběhlo testování tří prototypů termionických diod s velikostí mezer mezi elektrodami 15-20 μm . Zdroj tepla použitý při testování není znám. Při teplotě 1173 K na emitoru a 973 K na kolektoru byla jedna z těchto diod schopna dodat jen **1,2 mW/cm²** při účinnosti **2 %**. Na kolektor dopadl totiž jen zlomek emitovaných elektronů, což bylo příčinou tak malého výkonu [21]. Mezi cíle projektu MTC patřil kromě zmiňovaného testování také vývoj povlaku pro zlepšení vlastnosti elektrod, simulace ideální struktury a tvaru generátoru pro snížení dodávaného tepla potřebného k udržení teploty na emitoru a simulace provozu elektrod pro nalezení podmínek vedoucí k vysoké účinnosti a výkonu [27].

4 Termoemisní generátory v současnosti

Jednou z vlastností termoemisních generátorů je provoz za vysokých teplot, což dává těmto zařízením možnost využít vysokoteplotní zdroje tepla, na které jiná zařízení nejsou uzpůsobena. Termoemisní generátory se tak dají využít například v už fungujících elektrárnách, kde by využily zdroj tepla o vysoké teplotě a odpadní teplo by odvedly do následujícího cyklu vyžadujícího nižší pracovní teploty [30]. Další možností je umístění termoemisního generátoru do cyklu tak, aby byl kolektor chlazen plynem vstupujícím do spalovací komory, čímž by zároveň samotný plyn předehřival. Horký plyn ze spalovací komory by poté sloužil jako zdroj tepla pro emitör. Současný vývoj termoemisních generátorů se zabývá i vývojem nových materiálů. Na tyto materiály je kladeno hned několik požadavků, které budou níže podrobněji rozebrány včetně nově užívaných materiálů či principů. Jako další budou popsány nové typy termoemisních generátorů.

Materiály emitöru

K hlavním vlastnostem na materiál emitöru patří především nízká hodnota výstupní práce a odolnost vůči vysokým teplotám. Stále větší význam má i povrchová úprava nebo emisivita materiálu. Od počátku vývoje termoemisních generátorů v polovině 20. století se používaly především kovy jako wolfram nebo molybden. Žárovzdorné kovy jsou stále nejpoužívanější materiály pro termoemisní zařízení, využívá se však především monokrystalů těchto kovů, které mají lepší vlastnosti. Tyto kovy jsou nejčastěji používány v generátorech společně s cesiem, které se adsorbují na povrch kovu a snižují tak jeho výstupní práci. Kromě cesia se používají i oxidy stroncia, barya nebo vápníku, které také snižují výstupní práci kovu. V současné době se začínají pro emitöry využívat i polovodiče. U polovodičů lze regulovat Fermiho hladinu i výstupní práci díky dopování příměsí. K těm nejpoužívanějším polovodičům patří např. diamant dopovaný fosforem či dusíkem, nitrid boru nebo nitrid hliníku. Tyto materiály se vyznačují relativně vysokou teplotou tání a nízkou elektronovou afinitou. Potenciálním materiálem emitöru mohou být i uhlíkové nanotrubičky, které se vyznačují nízkým odporem, na druhou stranu mají relativně vysokou hodnotu výstupní práce. Oproti ostatním materiálům jsou ovšem schopny pracovat i s vysokými teplotními gradienty [25].

Materiály kolektöru

Kolektor by se měl vyznačovat nízkou výstupní prací, vysokou hodnotou Richardsonovy konstanty a nízkým odporem. Je nutno dodat, že výstupní práce musí být ještě nižší než v případě emitöru. Jako materiál pro kolektor lze vybrat většinu materiálů, které lze použít pro emitör. Fosforem dopovaný diamant dosáhl hodnoty výstupní práce 0,9 eV s teplotní stabilitou do 765 °C a jedná se tedy o velmi vhodný materiál pro kolektor [30]. Některé výzkumy se kromě vývoje vhodných materiálů zaměřují i na jiné metody zvyšování účinnosti termoemisních generátorů. Například povlaky na kolektöru se zápornou elektronovou afinitou mohou v některých případech snížit vliv prostorového náboje a zvýšit tak proud mezi elektrodami. Většina odborných publikací na toto téma se však zaměřuje spíše na optimalizaci materiálu a povlaku pro konkrétní termoemisní zařízení [25].

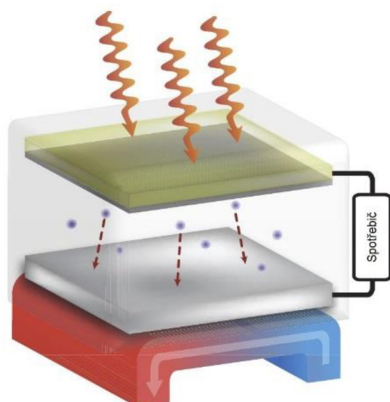
Mezera mezi elektrodami

Vzdálenost mezi elektrodami má zásadní vliv na účinnost termoemisních zařízení. Pokud je tato mezera příliš velká, vliv prostorového náboje může významně snížit proud mezi elektrodami. Jak již bylo zmíněno v kap. 2, existuje více možností, jak omezit vliv

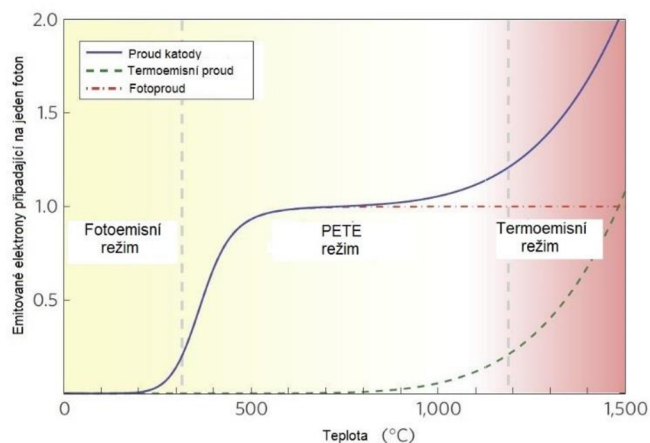
prostorového náboje. V novodobých termoemisních generátorech se tento vliv nejčastěji potlačuje zúžením mezery mezi elektrodami, a to na mezeru v řádech desítek mikrometrů až stovek nanometrů. Pro spolehlivý provoz zařízení s takto malými mezerami je potřeba distanční vložka, která bude udržovat konstantní vzdálenost mezi elektrodami. Mezi materiály používanými k těmto účelům patří např. oxid křemičitý nebo oxid hlinitý. Distanční vložka pro použití v termoemisním generátoru musí odolat vysokým teplotám a teplotním gradientům, mít vysoký odpor a nízkou teplotní vodivost. Další možností, jak omezit vliv prostorového náboje, je přidání další elektrody nebo mřížky do termoemisního generátoru. Schéma takového zařízení by odpovídalo vakuové magnetické triodě, resp. vakuové elektrostatické triodě (viz kap 2.1). R. Wanke a spol. ve své publikaci navrhuje využití nanostrukturovaného grafenu nebo jiných 2D materiálů pro materiál mřížky. Tyto materiály musí disponovat vysokou propustností elektronů a vysokou teplotní stabilitou. Při vhodné úpravě těchto mřížek je možné dosáhnout nad 80 % propustnosti elektronů [43]. V současné době nejméně využívaná metoda potlačení vlivu prostorového náboje je využití kladně nabitých cesiových iontů. Tato metoda totiž snižuje účinnost generátoru o 30-50 % a je třeba zajistit přísun cesia do oblasti mezi elektrodami [25].

4.1 Fotovoltaicko-termoemisní generátory

Foton s dostatečně velkou energií dopadající na fotovoltaický článek excituje elektron z valenčního pásu do oblasti vodivostního pásu. Pokud má však foton i po excitaci elektronu přebytečnou energii, tato energie zůstane nevyužita a přemění se na teplo. To samé platí i pro fotony, které nemají dostatek energie pro excitaci elektronu uvnitř fotovoltaického článku. Tyto ztráty představují zhruba 50 % dopadající solární energie [29]. Photon-enhanced thermionic emission (PETE) kombinuje fotovoltaický jev a termoemisi. Odpadní teplo z povrchu článku je využito jako zdroj tepla pro termoemisi. Cíle experimentů provedených na PETE generátorech byly: demonstrovat jejich funkčnost [30], zvýšit kvantovou účinnost pomocí heterostruktur katody [34] a zjistit ideální umístění kontaktní mřížky na katodě [35]. Generátor fungující na principu PETE má podobnou konstrukci jako jednoduchý termoemisní generátor. Má dvě paralelně umístěné destičky (elektrody) oddělené mezerou vyplněnou vakuem. Emitorem je v tomto případě místo kovu polovodič typu P. PETE generátor funguje na principu, který se skládá celkem ze tří kroků. Jako první se elektrony v emitoru excitují do vodivostního pásu díky slunečnímu záření. V druhém kroku se elektrony zahřívají a prostupují



Obr. 17 Základní schéma PETE generátoru (upraveno z [30])



Obr. 18 Počet emitovaných elektronů v závislosti na teplotě (upraveno z [30])

skrz emitor. Poslední krok je stejný jako u běžného termoemisního generátoru. Pokud se elektron s energií vyšší, než je výstupní práce materiálu dostane až k povrchu emitoru, uniká do vzduchoprázdné mezery mezi elektrodami a je zachycen kolektorem, kde se generuje elektrický proud. Každému emitovanému elektronu je tedy na začátku dodána energie fotonem pro excitaci do vodivostního pásu, kde se následně zahřeje a tuto tepelnou energii využije pro překonání výstupní práce materiálu a únik do vakua. Na obr. 18 lze vidět, že od 200 °C začíná růst počet excitovaných elektronů připadajících na 1 above-gap foton. Tento růst pokračuje až do teploty okolo 700 °C, kdy je každý fotonem excitovaný elektron emitován do vakua. Při vyšších teplotách začíná převažovat termoemise nad fotoexcitací. Pro názornost není v tomto grafu brána v potaz excitace elektronů vysokoenergetickými fotony [30].

Potenciál kombinace fotoelektrického jevu a termoemise byl experimentálně ověřen v roce 2004. Greg P. Smestad při testování zahřál fotokatodu tvořenou oxidem stříbrným s povlakem cesia na teplotu pod 100 °C a nechal na ni svítit světlo. Takto generovaný výkon byl vyšší, než když fotokatodu pouze osvětlil nebo zahřál [31]. Pro ověření PETE procesu o 6 let později byla použita fotokatoda z nitridu gallitého pokrytá vrstvou cesia. Tato fotokatoda byla vložena do komory s ultravysokým vakuem spolu s měřicími zařízeními a byla měřena emise elektronů v závislosti na teplotě. Teplota v komoře se měnila od 50-225 °C a ohřev byl zajištěn elektricky. Jako zdroj světla sloužil xenonový 330 nm laser s výkonem 150 W. Při testování od počáteční do konečné teploty se proud více než zdvojnásobil a výtěžek emitovaných elektronů se tedy s rostoucí teplotou zvyšoval. Fotokatoda byla následně dopována cesiem pro dosažení záporné elektronové afinity. Při testech této fotokatomy byl pozorován mírně klesající výtěžek emitovaných elektronů, což odlišuje fotoemisi od PETE procesu.

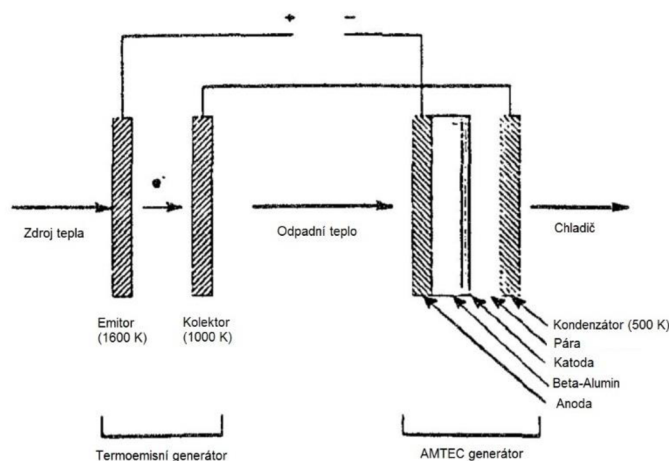
Ze simulací a výpočtů vyplývá, že z hlediska účinnosti je optimální šířka zakázaného pásu katody mezi 1,1 – 1,7 eV. Účinnost PETE generátorů se zvyšuje s rostoucí koncentrací slunečního svitu. Při koncentraci 300 sluncí byla maximální účinnost **32 %** a při koncentraci 3000 sluncí **47 %**. Bylo také zjištěno, že s rostoucí elektronovou afinitou prvku roste i výstupní napětí, katoda se ale musí zahřát na vyšší teplotu. Například zařízení s elektronovou afinitou 0,4 eV má maximální účinnost 25 % při teplotě 200 °C, zařízení s elektronovou afinitou 1 eV může mít účinnost až 40 %, vyžaduje však teplotu 800 °C. Nitrid gallitý se ukázal jako vhodný pro ověření principu PETE, nicméně pro využití ve fotovoltaických elektrárnách je nevhodný zejména z důvodu šířky zakázaného pásu (3,3 eV), kterou překoná pouze 1 % fotonů. Při vlnové délce 330 nm byla kvantová účinnost materiálu pouze 0,14 %. Za takto nízkou účinností stojí kromě zmiňované šířky zakázaného pásu také nízká absorpce a rekombinace [30]. V roce 2012 stejný tým provedl nový experiment. Heterostrukturální katoda je tvořena dvěma vrstvami – absorpční vrstvou arsenidu gallitého (GaAs) a nanovrstvou arsenidu hliníku a gallia (AlGaAs) s povlakem cesia a kyslíku. Toto technologické řešení umožňuje zřetelné odlišení mezi PETE procesem a fotoemisí či termoemisí. Lze tak nastavit minima vodivostního pásu absorpční vrstvy a emitoru. Díky minimální energetické bariéře na rozhraní emitoru a vakua umožňuje nezávisle studovat a optimalizovat toto rozhraní pro co nejefektivnější emisi. Tato rozhraní je možné oddělit i při velmi malých tloušťkách (cca 100 nm). Elektronů se díky velmi malé tloušťce emitující vrstvy (170 nm) mohou pohybovat touto vrstvou s velmi nízkým rozptylem a rekombinací. Právě kvůli rekombinaci byla kvantová účinnost u předchozího experimentu velmi nízká, zatímco při testování o 2 roky později už byla naměřena kvantová účinnost 1,4 % při teplotě 120 °C. Kvantová účinnost u těchto zařízení může být ještě vyšší, pokud se nahradí povlak cesia a kyslíku teplotně stabilnějším povlakem (300-500 °C). Účinnost dále omezuje

i rekombinace v oblasti emitující vrstvy [34]. V předchozích dvou experimentech také nebylo zohledněno umístění elektrických kontaktů, resp. kontaktní mřížky na katodě. Ty mají vliv na účinnost zařízení v závislosti na umístění a velikosti kontaktů a také teplotě katody. Na povrchu kontaktů může docházet k rekombinaci a jejich pozice může stínit záření, čemuž se lze vyhnout přesunutím kontaktů na zadní část katody, která je určena pro emisi elektronů.

Pro testování byla použita křemíková katoda při koncentraci 1000 sluncí. Ta byla testována při umístění kontaktní mřížky na přední části katody a poté na zadní části a výsledky pak byly porovnány. U konfigurace s kontakty na přední části při teplotě 600 K nebyla zaznamenána rekombinace na kontaktech a většina emitovaných elektronů byla zachycena anodou. Kvantová účinnost při této teplotě a 10% pokrytí byla kolem 60 %. S rostoucí teplotou (do 950 K) rostla i kvantová účinnost způsobená termoemisí. Vliv pokrytí katody kontaktní mřížkou byl znatelný – při pokrytí 50 % katody se zhruba stejné procento uvolněných elektronů pohybovalo směrem ke kontaktům místo k zadní části katody. Při velmi malém pokrytí byl tento jev zanedbatelný. Měření výkonu a účinnosti byly prováděny při 10 % pokrytí katody. Výkon (17 W/cm^2) měl při této konfiguraci nejvyšší při teplotě 850 K. Při teplotě 750 K byl však výkon nižší, než u 550 K, a to z důvodu poklesu napětí. Účinnost se naopak s rostoucí teplotou mírně snižovala do hodnot mezi 750-850 K, poté došlo k exponenciálnímu nárůstu vlivem termoemise až na hodnotu 40 %. Účinnost při nižších teplotách snižovalo i samotné pokrytí katody, což se dá očekávat kvůli stínění a rekombinaci na kontaktech. V případě výroby PETE generátorů s kontakty na přední část je tedy žádoucí, aby bylo pokrytí katody co nejmenší, stejně jako se tomu děje v případě vývoje koncentrovaných fotovoltaických článků. Při konfiguraci s kontakty na zadní části je možné očekávat dva jevy ovlivňující výkon zařízení. Vzdálenost mezi vrchní částí katody a kontakty vede k nižší rekombinaci na povrchu kontaktů. Na druhou stranu je omezena emitující plocha katody (spodní část), což může vést ke shromažďování elektronů uvnitř katody a tím i k zvýšené rekombinaci. V simulacích se nicméně ukázalo, že k výrazně zvýšené rekombinaci nedochází. Oproti předchozímu řešení je při teplotě 600 K kvantová účinnost 90 %, tento rozdíl se dále zvyšuje s rostoucí teplotou. Účinnost tohoto konstrukčního řešení je také vyšší – konfigurace s kontakty na spodní části umožňuje použití větších kontaktů při stejné hodnotě účinnosti. Závislost účinnosti na teplotě měla stejný průběh jako tomu bylo v předchozím případě. Pokud je použitý materiál katody schopen pracovat v režimu, kdy převažuje efekt termoemise, větší kontakty jsou schopny v některých případech zvýšit účinnost zařízení, a to i navzdory stínění, které má vliv při zapojení kontaktů na přední části katody. Je také žádoucí, aby kontakty pohlcovaly co nejvíce záření, měly by proto být co nejtmavší, ideálně černé. Při porovnání obou konfigurací se jeví zapojení s kontakty ve spodní části jako efektivnější možnost, a to v celém teplotním rozsahu. Komplikací při této konfiguraci může být umístění kontaktní mřížky tak, aby nedošlo ke zkratu mezi katodou a anodou, protože mezera mezi elektrodami je v řádu jednotek mikrometrů [35].

4.2 Termoemisní generátory s alkalickými kovy

Alkali metal thermal to electric converters (AMTEC) jsou v mnoha směrech podobné termoemisním generátorům. Autoři T. H. Van Hagan a J. N. Smith se pokusili ověřit pomocí dat z dříve provedených experimentů potenciál kombinace termoemisních a AMTEC generátorů. Tato zařízení přeměňují teplo na elektřinu a nemají žádné pohyblivé součásti. Pracovní látkou je sodík (případně jiný alkalický kov), který se na anodě ionizuje a vlivem rozdílu tlaku mezi katodou a anodou proudí přes β -aluminovou membránu. Elektronů vzniklé z ionizace sodíku putují přes vnější elektrický obvod na katodu, kde se opět spojí se sodíkovými ionty a vytvoří nízkotlaký plyn sodíku. Tento plyn se poté přesune na chladič, kde zkondenzuje a je opět přiveden na začátek cyklu. Zdroj tepla má teplotu od 900-1300 K, zatímco chladič má 400 až 800 K. Účinnost zařízení závisí na teplotách během cyklu a konstrukčním řešení generátoru, pohybuje se od **15-25 %** [21][32].



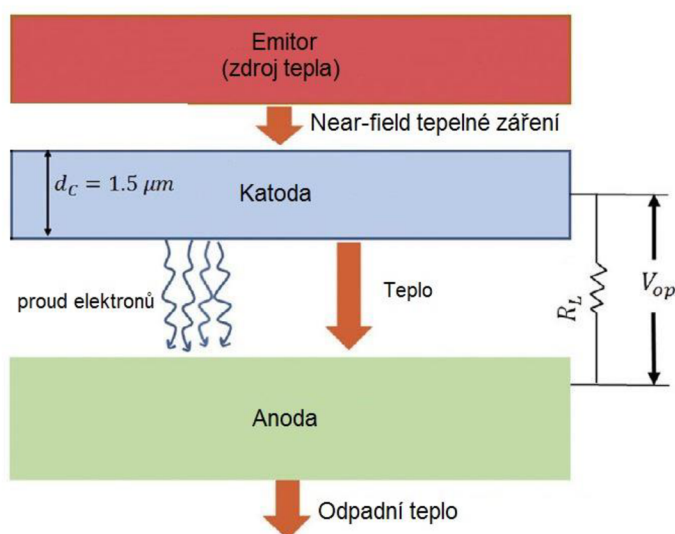
Obr. 19 Schéma kombinace termoemisního a AMTEC generátoru (upraveno z [33])

Termoemisní generátory produkují odpadní teplo o teplotě, která odpovídá pracovní teplotě u AMTEC generátorů. Jednoduché schéma hybridního generátoru je zobrazeno na obr. 19. Termoemisní část je sériově spojena s AMTEC částí. Kolektor je spojen s kladnou katodou AMTECu a mezi oběma generátory je třívrstvá izolace zajišťující dobrou tepelnou vodivost a fungující jako elektrický izolant. Vzhledem k cylindrickému tvaru AMTEC článků se nabízí 2 možnosti konstrukce generátoru. Jednou z možností je umístění třívrstvé izolace mezi termoemisní a AMTEC články, podobně jako na schématu znázorněném výše. Druhou možností je integrovat trojvrstvou izolaci přímo na kolektor, čímž by se ušetřil prostor mezi oběma generátory. Při testování tohoto konceptu byla použita data z TFEV (pro termoemisní generátor) programu a data společnosti Advanced Modular Power System Inc. (pro AMTEC generátor). Zdroj tepla pro emitore nebyl v publikaci uveden. Nejvyšší účinnosti, tedy **29 %**, bylo dosaženo při výstupním napětí 1,35 V. Nejvyšší hustoty elektrického proudu a výkonu bylo dosaženo u obou veličin při 1,25 V, a to 7 A/cm² resp. **8 W/cm²** [33].

4.3 Termoemisní generátory s emisí na krátkou vzdálenost

Near-field thermionic emission conversion (NETEC) generátory využívají jevu near-field (NF) vyzařování, což je takový případ záření, kdy je alespoň jedna charakteristická délka řádově stejná nebo menší než vlnová délka daného záření [36]. Účelem simulací provedených M. Ghashamim a spol. bylo zjistit potenciál NF záření v PETE generátorech. NETEC generátory využívají polovodič typu P jako katody (například InSb, GaSb, InAs) s malou šířkou zakázaného pásu odděleného od zdroje tepelného záření mezerou, která je řádově stejná jako vlnová délka tohoto záření (řádově stovky nanometrů). Mezera mezi katodou a kovovou anodou je vyplněna vakuem. NETEC generátory pracují se zdroji tepla o teplotě od 800 K do 1600 K, čímž se liší od běžných termoemisních generátorů, které nabývají praktických účinností až při velmi vysokých teplotách. Na obr. 20 je ilustrováno základní schéma, kde lze vidět přenosy tepla mezi jednotlivými částmi generátoru.

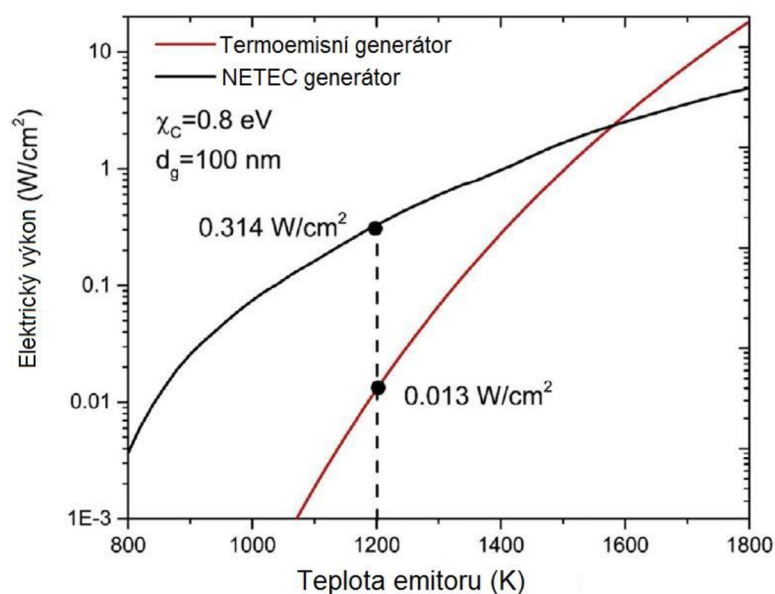
Pro testování a simulace NETEC generátoru byl vybrán materiál katody – arsenid gallia a india ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$) dopovaný berylliem s šířkou zakázaného pásu 0,74 eV (při 300 K), výstupní práci 0,8 eV a tloušťkou 1,5 μm . Jako zdroj tepla byla použita wolframová destička, která byla zahřáta na 1200 K, zatímco anoda s výstupní prací 0,7 eV byla udržována při teplotě 300 K. Mezera mezi wolframovou destičkou a katodou byla 100 nm.



Obr. 20 Schéma NETEC generátoru [37]

Závislost výkonu na napětí byla podobná jako u běžných termoemisních generátoru. Při provozním napětí menším, než je rozdíl výstupních prací obou elektrod se výkon zvyšuje. Jakmile provozní napětí překročí rozdíl výstupních prací, výkon klesá z důvodu posilování energetické bariéry zabraňující emisi elektronů z katody. Rozdíl mezi výkony termoemisního a NETEC generátoru lze vidět na obr. 21. U termoemisního generátoru byla katoda přímo vystavena zdroji tepla, kdežto u NETEC generátoru byla stále zdrojem tepla wolframová destička. Při simulacích nebyl brán v potaz zdroj tepla pro emitor. Z grafu je jasně patrné, že NETEC generátory jsou schopny dosahovat lepších výkonů až do 1600 K.

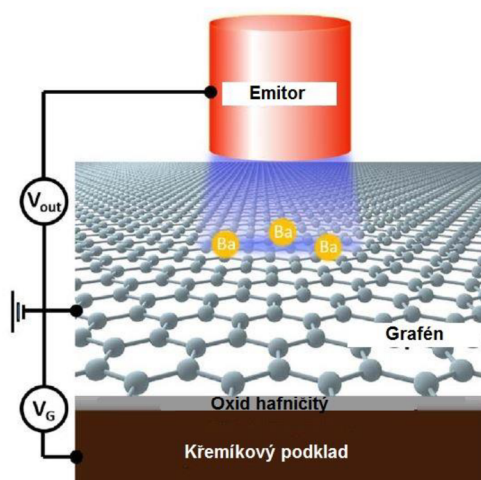
Poté dosahuje vyššího výkonu termoemisní generátor. Zvyšování teploty emitoru u NETEC generátoru má za následek zvýšenou fotoexcitaci elektronů místo zvyšování teploty katody. Při další simulaci byly porovnávány výkony NETEC a NF termofotovoltaického zařízení (NTPV), které bylo simulováno při teplotě 1500 K. NETEC generátor měl výkon **1,57 W/cm²**, zatímco NTPV dosahovalo výkonu jen 0,92 W/cm². Předpokládaná účinnost NETEC generátorů u běžných aplikací je mezi **30 až 40 %**. Ta se zvyšuje s rostoucí teplotou asi do 1000 K, poté se vlivem teploty sníží i výstupní práce katody a účinnost přeměny se tak sníží. Vyšší účinnosti je možné dosáhnout zeštíhlením katody. Mezera mezi emitorem a katodou má také vliv na účinnost. Od původních 500 nm do 400 nm se zvyšuje a poté pozvolna klesá. Výkon se však zvyšuje, a to až do hodnoty **7,34 W/cm²** při mezeře 10 nm mezi zdrojem tepla a katodou. Při simulacích nebyl brán v potaz vliv prostorového náboje, který by mohl mít vliv na účinnost a výkon zařízení. Pro snížení tohoto vlivu je možné změnit konstrukci z diody na triodu (viz kap. 2.1 – Vakuové elektrostatické triody). V neposlední řadě je důležité i teplotní stabilita mnohých materiálů (převážně III. a IV. periody) za vysokých teplot.



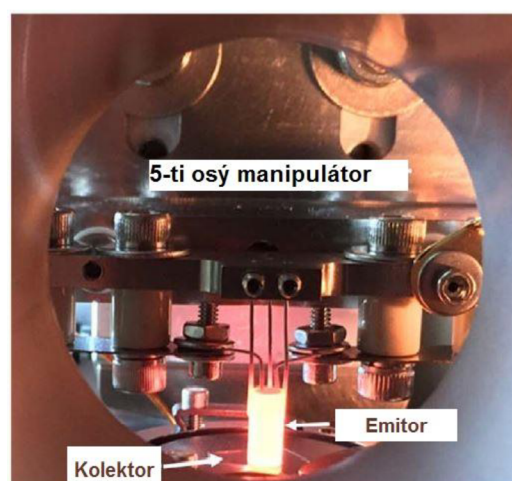
Obr. 21 Rozdíl výkonů termoemisního a NETEC generátoru (upraveno z [37])

4.4 Současné termoemisní generátory

Jeden z nedávno zkonstruovaných čistě termoemisních generátorů vznikl na Stanfordské univerzitě a výsledky experimentu na něm provedené byly publikovány v roce 2017. Účelem tohoto zařízení bylo experimentálně ověřit vlastnosti grafenu v termoemisních generátorech a demonstrovat vliv mezery mezi elektrodami na výkon zařízení. Tento termoemisní generátor sestává z emitoru, kolektoru a z 5-ti osého manipulátoru. Materiálem emitoru je wolfram impregnovaný baryem. Baryum při teplotě 600 °C začne difundovat na povrch emitoru a vytváří zde tenkou vrstvu, která snižuje výstupní práci emitoru. Při 1000 °C je baryum emitováno na povrch kolektoru, kde také snižuje výstupní práci. Kolektor je tvořen 20 nm vrstvou oxidu hafničitého umístěnou na křemíkovém podkladu. Na tuto vrstvu je nanesen grafen a na spodní část vrstvy HfO₂ je přivedeno napětí, kterým se reguluje výstupní práce grafenu. 5-ti osý manipulátor je spojen s emitorem, dodává baryum a reguluje mezeru mezi elektrodami. Elektrody se nachází v komoře s ultravysokým vakuem. Při testování tohoto generátoru se první měřila voltampérová charakteristika při vzdálenosti 1 mm mezi elektrodami a teplotě emitoru 1000 °C, kterou na zahřival odporový ohřivač. Na spodní stranu kolektoru v tomto měření nebylo přivedeno napětí. Výsledkem byl výkon 50 μW. Další měření probíhalo za využití manipulátoru, který pohyboval s emitorem tak, aby zúžil mezeru mezi elektrodami na



Obr. 22 Schéma zapojení termoemisního generátoru (upraveno z [42])

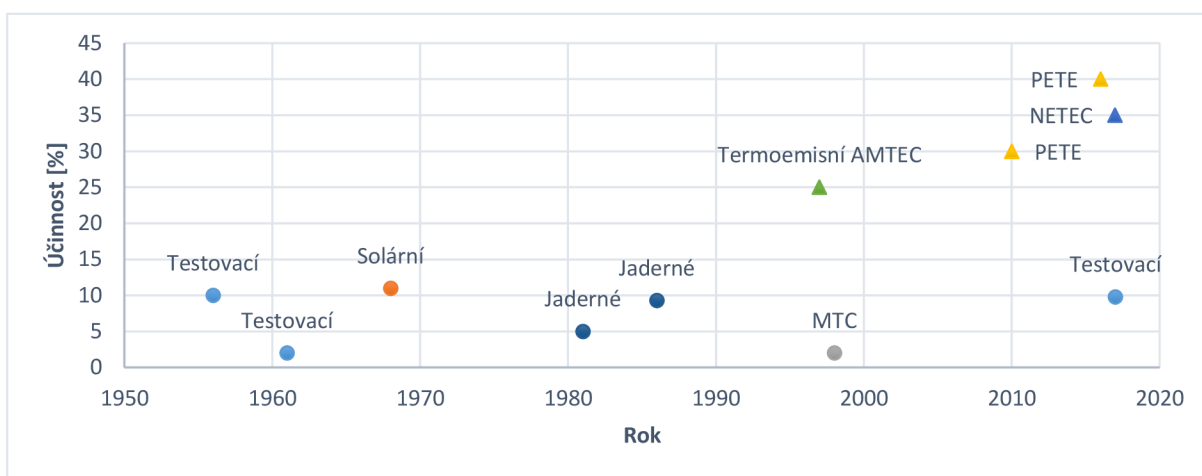


Obr. 23 Prototyp termoemisního generátoru během provozu (upraveno z [42])

konečných 17 μm. Při tomto nastavení generátor dosáhl výkonu 1,53 mW, tedy asi třicetkrát více než při předchozím pokusu. Při posledním měření se na zadní stranu kolektoru přivedlo napětí (5 V), mezera mezi elektrodami byla opět 17 μm. Přivedení napětí na kolektor mělo za následek snížení výstupní práce kolektoru o 0,16 eV (z 1,85 eV na 1,69 eV) a výkon se zvýšil na 3,3 mW, což po přepočtení znamená **0,036 W/cm²**. V porovnání s běžnými materiály kolektoru a emitoru se za těchto podmínek jedná asi o šestkrát vyšší výkon. Účinnost generátoru byla vypočtena při teplotě kolektoru 200 °C a byla získána hodnota **9,8 %**. Vyšší účinnosti lze dosáhnout zvýšením teploty emitoru a snížením jeho plochy [42].

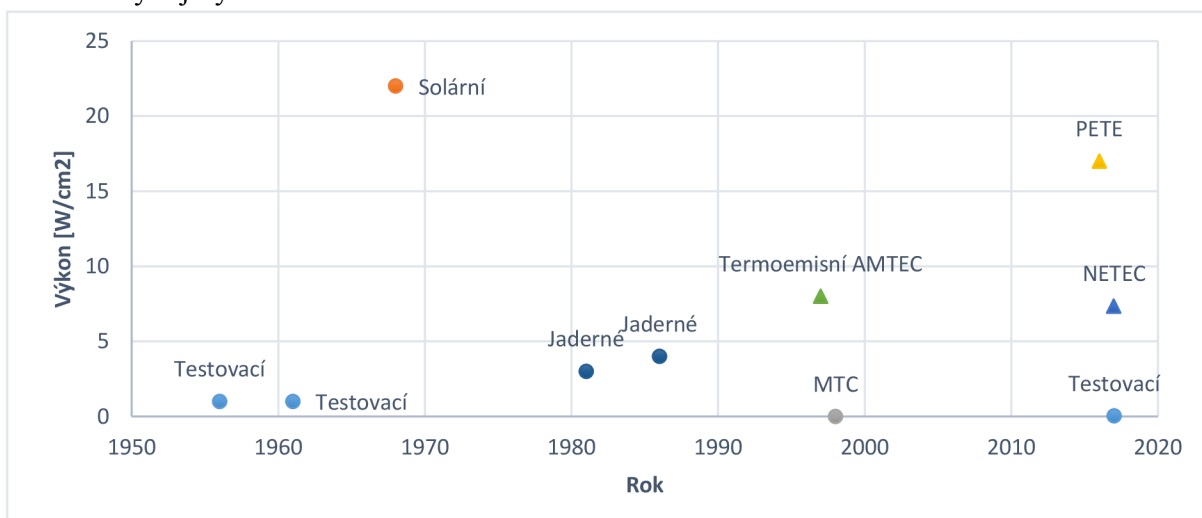
5 Vlastní zhodnocení

Obr. 24 zobrazuje vývoj účinnosti vybraných termoemisních zařízení od roku 1956, kdy byl sestrojen první termoemisní generátor, až do současnosti. Nejasný trend vývoje účinnosti je dán především cíli programů, pod kterými se jednotlivé generátory testovaly. Například termoemisní generátor sestrojený Martinim z roku 1961 sloužil především ke studiu termoemise jako takové, generátor tedy nepotřeboval vysoké hodnoty účinnosti nebo výkonu. Dalším důvodem nejasného trendu vývoje je i testování generátorů využívajících nejen termoemisi ale i další jevy. Jako příklad lze uvést testování MTC generátoru z roku 1998, který dosahoval velmi nízkých hodnot nejen účinnosti, ale i výkonu (viz kap. **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Nutno dodat, že účinnosti AMTEC (1997), PETE (2010, 2016) a NETEC (2017) termoemisních generátorů jsou hodnoty z výpočetních modelů a reálná účinnost bude velmi pravděpodobně nižší. Proto jsou tyto hodnoty od ostatních tvarově odlišeny.



Obr. 24 Vývoj účinnosti termoemisních zařízení v čase

Obr. 25 znázorňuje vývoj výkonu termoemisních zařízení v závislosti na čase. Graf rozdělen celkem do 7 kategorií dle typu generátorů. Zatímco nárůst výkonu u čistě termoemisních generátorů je jen mírný (s výjimkou solárních), PETE generátory dosáhly zvýšení výkonu o 4 W/cm^2 během tří let. Solární termoemisní generátory testované v programu SET mají dodnes nejvyšší výkon, a to díky vysokým teplotám na emitoru během testování a elektrickému ohřevu. Vývoj výkonu či účinnosti u ostatních zařízení není znám.



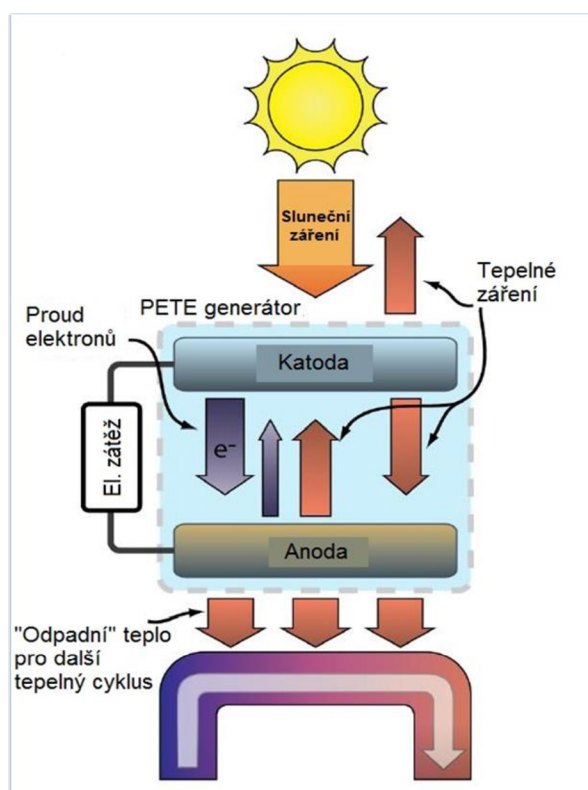
Obr. 25 Vývoj výkonu termoemisních zařízení v čase

5.1 Možné budoucí aplikace

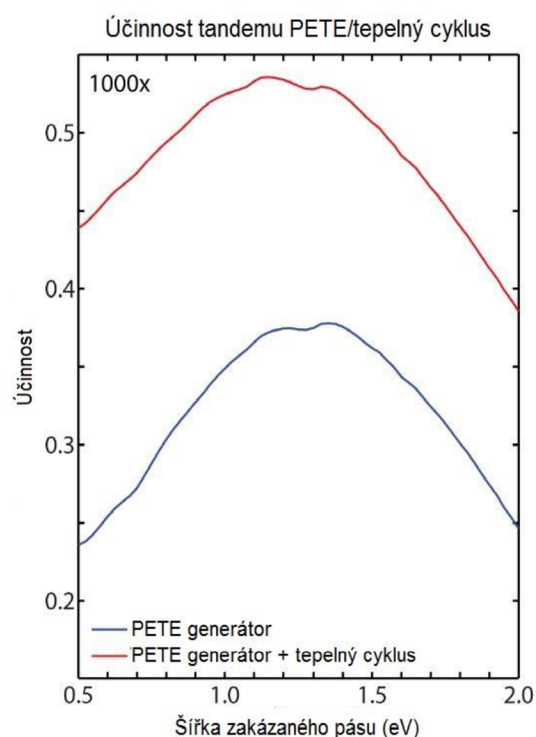
Termoemisní generátory mají největší šanci na uplatnění v elektrárnách využívajících vysokoteplotní zdroj tepla, který nedokáží plně využít. Uplatnění by v takovém případě mohly najít PETE generátory, na jejichž vývoji se pracuje od roku 2009 a od roku 2012 je program vývoje PETE dotován americkým ministerstvem energetiky. Tato zařízení by bylo možné umístit na již postavené solární koncentrátorové elektrárny, a zvýšit tak jejich účinnost z asi 30 % nad 50 %. V současné době se pracuje především na vývoji vhodných materiálů,



Obr. 26 Solární koncentrátorová elektrárna [44]

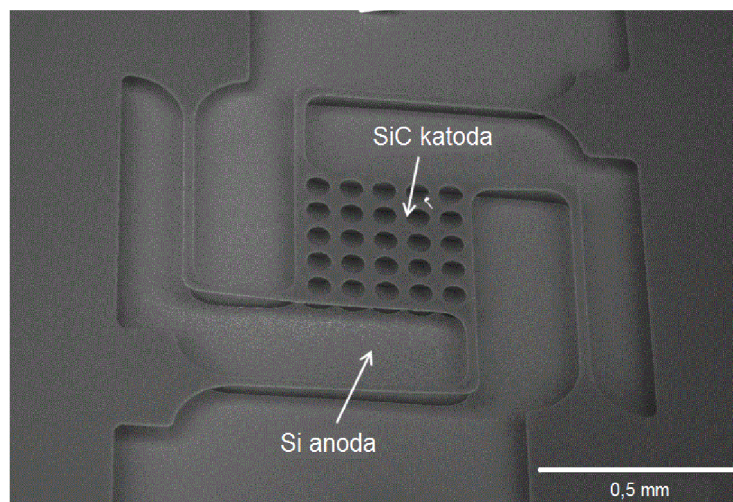


Obr. 27 Schéma umístění PETE generátoru v elektrárně (upraveno z [44])



Obr. 28 Porovnání účinnosti PETE generátoru a tandemu PETE/tepelný cyklus (upraveno z [44])

kteře budou schopny pracovat v PETE režimu a za teplot kolem 600 °C, budou schopny absorbovat více světla nebo mít nižší výstupní práci. Schéma systému lze vidět na obr. 28. Sluneční záření je absorbováno katodou PETE generátoru, která emituje elektrony a tepelné záření na anodu. Odpadní teplo z anody je odvedeno do následujícího tepelného cyklu, kde slouží k ohřevu pracovní látky. Z anody se pak vrací elektrony zpět na katodu a generují při tom elektrickou energii. Účinnost kombinace PETE generátoru a tepelného cyklu je vykreslena na obr. 27 pro koncentraci 1000 sluncí, teplotu anody 285 °C a účinností tepelného cyklu 31,5 %. Při 1,15 eV je možné dosáhnout až 53% účinnosti. Výhodou by mohla být i relativně levná výroba PETE generátorů při použití technologií pro výrobu struktur Micro Electro Mechanical Systems (MEMS, viz obr. 29) [30].



Obr. 29 Termoemisní generátor vyrobený technologií pro MEMS (upraveno z [45])

ZÁVĚR

V úvodní části této práce byl popsán princip fungování termoemisních generátorů a fyzikální jevy a veličiny, které jsou důležité pro provoz těchto generátorů. Termoemisní generátor je tepelný stroj přeměňující teplo na elektřinu. Teplo v tomto stroji předává energii elektronům, a tyto elektrony jsou následně zachyceny kolektorem, čímž tvoří elektrický proud. Z textu vyplývá, že významnou roli u termoemisních zařízení hraje provozní teplota a materiál, ze kterého jsou elektrody tvořeny. Účinnost a výkon těchto generátorů roste s rostoucí teplotou a klesající výstupní prací elektrod, rozdíl napětí mezi elektrodami však musí zůstat stejný.

Následující část se věnuje rozdělení termoemisních generátorů, ty dělí podle zdroje tepla a způsobu potlačení vlivu prostorového náboje. V podkapitolách je uveden princip, jakým tato zařízení potlačují vliv prostorového náboje a také je zobrazeno jednoduché schéma daného typu generátoru. Ve 20. století byly používány především generátory, které měly prostor mezi elektrodami vyplněny parami cesia. K ionizaci cesia byla potřeba energie, která snižovala účinnost zařízení o 30-50 %. U vývoje nových a účinných termoemisních zařízení není možné takové ztráty tolerovat, proto se v současné době vyvíjí především takové generátory, které mají pracovní prostor vyplněn ultravysokým vakuem.

V přehledu historických a současných aplikací jsou uvedeny jednotlivé termoemisní generátory nebo programy, pod kterými byly tyto generátory navrženy a případně i sestaveny. Experimentální termoemisní generátory sloužily v počátcích především pro ověření teoreticky odvozených vztahů a studování jevů, které provoz termoemisních generátorů přináší. Důležitým milníkem byl zájem světových velmocí o vesmír a přistání na Měsíci. USA i tehdejší Sovětský svaz financovaly i výzkum termoemisních zařízení. Jednalo se o solární a jaderné termoemisní generátory. Účelem programů, které tyto generátory vyvíjely, bylo ověřit potenciál termoemisních zařízení pro využití ve vesmíru. Řešila se samotná konstrukce generátorů, vliv jaderného záření na funkci zařízení nebo vývoj vhodných izolačních materiálů. Z této doby pochází také nejvýkonnější termoemisní generátory, které vznikly v programu Solar Energy Thermionic (SET). Při teplotách na emitoru 1900-2000 K dosahovaly tyto generátory účinnosti 9-11 % a výkonu až 2,5 kW/m². Ohřev elektrod v tomto programu byl zajištěn elektricky, není tedy jasné, zda by takových hodnot dosáhly i v případě, kdy by bylo zdrojem tepla sluneční záření. Jediný termoemisní generátor, který se dostal až do vesmíru byl TOPAZ I, který byl použit na sovětských družicích Cosmos 1818 a Cosmos 1867. Žádná z těchto družic nicméně nebyla funkční déle než 1 rok. Na konci 20. století se začaly vyvíjet i tzv. hybridní termoemisní generátory. Ty nevyužívaly pouze termoemise, ale i jiných jevů k výrobě elektrické energie. Za zmínku stojí termoemisní generátory využívající jevu photon enhanced thermionic emission (PETE). Na jejich vývoji se pracuje od roku 2009 a při vhodném umístění mohou zvýšit účinnost koncentračních solárních elektráren i přes 50 %.

Termoemisní generátory by mohly být v budoucnu použity v podmínkách, kde se nachází zdroj vysokoteplotního tepla. Jejich výhodou je především tichý provoz, nízká hmotnost, absence pohyblivých částí a nízké nároky na údržbu. Nevýhodou jsou vysoké provozní teploty a vysoká cena související s použitými materiály. Možné budoucí použití termoemisních generátorů závisí především na pokroku ve výzkumu vhodných materiálů s nízkou výstupní prací a teplotní stabilitou za vysokých teplot. Důležité je i zmenšení velikosti mezery mezi elektrodami vhodnou konstrukcí generátoru.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HATSOPOULOS, G. N., GYFTOPOULOS, E. P. Thermionic Energy Conversion: Vol. 1: Processes and Devices. Cambridge, USA: The MIT Press, 1973. ISBN 978-0262080590.
- [2] Carnot efficiency. Energy Education [online]. Calgary [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: http://energyeducation.ca/encyclopedia/Carnot_efficiency
- [3] Endoreversible Thermodynamics: Curzon-Ahlborn Engine. Stanford Education [online]. Stanford, 2010 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/askarov2/>
- [4] Definition: Richardson-Dushman Equation. In: SIMION [online]. Ringoes, c1996-2016 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: http://simion.com/definition/richardson_dushman.html
- [5] Fermi level and Fermi function. HyperPhysics [online]. Atlanta [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/Fermi.html>
- [6] Fermi-Dirac Probability Function. AK LECTURES [online]. 2014 [cit. 2017-11-19]. Dostupné z: <http://www.aklectures.com/lecture/fermi-dirac-probability-function>
- [7] Fermi Energy of Electrons. AK LECTURES [online]. 2014 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: <http://www.aklectures.com/lecture/fermi-energy-of-electrons>
- [8] Fermi-Verteilung für verschiedene Temperaturen. In: Wikipedia [online]. 2009 [cit. 2017-11-20]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Dirac-Statistik#/media/File:Fermi-Verteilung_\(Temperatur\).svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Fermi-Dirac-Statistik#/media/File:Fermi-Verteilung_(Temperatur).svg)
- [9] Schottky effect: Physics. ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA [online]. London [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Schottky-effect>
- [10] Automatizace měření ve fyzikálním praktiku [online]. Brno, 2011 [cit. 2017-11-27]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/175317/prif_b/bc_prace.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Zdeněk Navrátil.
- [11] HATSOPOULOS, George N. a Joseph KAYE. Conversion of thermal energy into electrical energy. 1956. USA. US 2915652 A. Uděleno 1.12.1959. Zapsáno 18.4.1956.
- [12] MARTINI, William R. a Raleigh L MCKISSON. Thermionic Converter. 1961. USA. US3187205 A. Uděleno 1.6.1965. Zapsáno 22.11.1961.
- [13] Flame heated thermionic converter research. In: Defense Technical Information Center [online]. USA: Armed Services Technical Information Agency, 1965 [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/285237.pdf>
- [14] The Soviet Space Nuclear Power Program. In: Central Intelligence Agency [online]. USA, 2000 [cit. 2018-02-19]. Dostupné z: https://www.cia.gov/library/readingroom/docs/DOC_0000500622.pdf
- [15] KUZNETSOV, V. A. et al. Development and construction of the thermionic nuclear power installation "TOPAZ". In: Springer [online]. USA, 1974 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01127230.pdf>
- [16] SPINRAD, Bernard I. a Wade MARCUM. Nuclear reactor. In: Encyclopaedia Britannica [online]. USA, 1999 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/nuclear-reactor/Fuel-types>
- [17] Thermionic power converter. ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA [online]. London [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/thermionic-power-converter>

- [18] TAVKHELIDZE, Avto a Jonathan S. EDELSON. Thermionic vacuum diode device with adjustable electrodes. 1998. US6720704B1. Uděleno 13.4.2004. Zapsáno 31.8.1998.
- [19] ZGORZELSKI, Maciej. Optimization of the Magnetic Triode-Type Thermionic Converter. In: Journal of Applied Physics [online]. American Institute of Physics, 1964 [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.1713067>
- [20] ISRAEL, Allan D. a Herbert H. FOWLER. Cesium vapor thermionic current generator. 1979. USA. US4298768A. Uděleno 3.11.1981. Zapsáno 13.3.1979.
- [21] NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Thermionics Quo Vadis?: An Assessment of the DTRA's Advanced Thermionics Research and Development Program [online]. Washington, DC: National Academies Press, 2002, 84 s. [cit. 2019-05-23]. ISBN 978-0-309-17019-2. Dostupné z: <https://www.nap.edu/catalog/10254/thermionics-quo-vadis-an-assessment-of-the-dtras-advanced-thermionics>
- [22] BUDEN, David. Summary of Space Nuclear Reactor Power Systems (1983-1992). In: U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information [online]. Idaho National Engineering Laboratory, 1992 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/10151265>
- [23] PAXTON, William. Thermionic electron emission properties of nitrogen-incorporated polycrystalline diamond films [online]. Nashville, Tennessee, 2013 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: https://etd.library.vanderbilt.edu/available/etd-03262013-131559/unrestricted/Paxton_Thesis.pdf. Disertace. Faculty of the Graduate School of Vanderbilt University.
- [24] REDHEAD, P. A. The birth of electronics: Thermionic emission and vacuum. Journal of Vacuum Science & Technology [online]. 1998, 16(3), 1394-1401 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1116/1.581157. Dostupné z: <https://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.581157>.
- [25] Thermionic Energy Conversion in the Twenty-first Century: Advances and Opportunities for Space and Terrestrial Applications. Frontiers of Mechanical Engineering [online]. 2017, (3) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.3389/fmech.2017.00013. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2017.00013/full>
- [26] Skripta_technologie. In: PÁNEK, Petr et al. Fyzikální principy technologie výroby polovodičů [online]. Brno, 2013, s. 28 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://is.muni.cz/www/limu/trans/navody/skripta_technologie.pdf
- [27] KING, Donald B. The microminiature thermionic converter. AIP Conference Proceedings [online]. AIP, 2001, 2001, , 1152-1157 [cit. 2019-04-08]. DOI: 10.1063/1.1358065. ISSN 0094243X. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1358065>
- [28] KULCINSKI, G.L. History of Soviet Topaz Reactors. In: Fusion Technology Institute [online]. Madison (Wisconsin): University of Wisconsin-Madison, 2000 [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://fti.neep.wisc.edu/neep602/SPRING00/lecture35.pdf>
- [29] BECHNÍK, Bronislav. Stručná historie fotovoltaiky. In: TZB-info [online]. 2014 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/11652-strucna-historie-fotovoltaiky>
- [30] SCHWEDE, Jared W. et al. Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems. Nature Materials [online]. 2010, 1 August 2010, 9(9), 762-767 [cit. 2019-04-17]. DOI: 10.1038/nmat2814. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/nmat2814>

- [31] SMESTAD, Greg P. Conversion of heat and light simultaneously using a vacuum photodiode and the thermionic and photoelectric effects. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [online]. 2004, 1 May 2004, 82(1), 227-240 [cit. 2019-04-28]. DOI: 10.1016/j.solmat.2004.01.020.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024804000297>
- [32] P. BANKSTON, C., T. COLE, Ross JONES a R. EWELL. The alkali metal thermoelectric converter /AMTEC/ - A new direct energy conversion technology for aerospace power [online]. In: . 1982 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/23887898_The_alkali_metal_thermoelectric_converter_AMTEC_-_A_new_direct_energy_conversion_technology_for_aerospace_power
- [33] VAN HAGAN, T.H., J.N. SMITH a M. SCHULLER. Thermionic/AMTEC cascade converter concept for high-efficiency space power. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* [online]. 1997, 12(7), 10-15 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1109/62.596648. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/596648>
- [34] SCHWEDE, J.W. et al. Photon-enhanced thermionic emission from heterostructures with low interface recombination. *Nature Communications* [online]. 2013, 4 [cit. 2019-04-29]. DOI: 10.1038/ncomms2577.
Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/ncomms2577.pdf>
- [35] SANDOVSKY, Rama, Gideon SEGEV a Abraham KRIBUS. Investigation of contact grid geometry for photon-enhanced thermionic emission (PETE) silicon based solar converters. *Solar Energy* [online]. 2016, (133), 259-273 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/j.solener.2016.03.066.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16300196>
- [36] FRANCOEUR, Mathieu. Near-Field Thermal Radiation. *Handbook of Thermal Science and Engineering* [online]. 1. Springer, Cham, 2018, s. 1-43 [cit. 2019-05-06]. ISBN 978-3-319-32003-8. Dostupné z: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-32003-8_63-1.pdf
- [37] GHASHAMI, Mohammad, Sung Kwon CHO a Keunhan PARK. Near-Field Enhanced Thermionic Energy Conversion for Renewable Energy Recycling. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [online]. 2017, (198), 59-67 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.04.033. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022407317302029>
- [38] MARTINI, W.R. a R.L. MCKISSON. Progress in the development of flame-heated thermionic power sources. *Advanced Energy Conversion* [online]. 1963, 3(1), 123-136 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.1016/0365-1789(63)90082-1. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0365178963900821>
- [39] HATSOPOULOS, G.N. The thermo-electron engine [online]. Cambridge (Massachusetts), 1956 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/12098>. Disertace. Massachusetts Institute of Technology. Vedoucí práce Joseph Kaye.
- [40] HATSOPOULOS, G.N. a J. KAYE. Analysis and Experimental results of a Diode Configuration of a Novel Thermoelectron Engine. *Proceedings of the IRE* [online]. 1958, 46(9), 1574 - 1579 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1109/JRPROC.1958.286932. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4065530>
- [41] HOUTS, Mike. Thermionic Programs of the Early 1990s - TFEVP and Topaz International Program. In: NASA Technical Reports Server [online]. Huntsville

- (Alabama), 2014 [cit. 2019-05-13].
Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140016877.pdf>
- [42] YUAN, Hongyuan et al. Back-gated graphene anode for more efficient thermionic energy converters. *Nano Energy* [online]. 2017, 32(2), 67-72 [cit. 2019-05-20]. DOI: 10.1016/j.nanoen.2016.12.027.
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211285516305912>
- [43] WANKE, R. et al. Magnetic-field-free thermoelectronic power conversion based on graphene and related two-dimensional materials. *Journal of Applied Physics* [online]. 2016, 119(24) [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1063/1.4955073. Dostupné z: <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4955073?class=pdf>
- [44] MELOSH, Nicholas A. Nx-TEC: Next-Generation Thermionic Solar Energy Conversion [online]. In: Menlo Park (California): SLAC National Accelerator Laboratory, 2012, s. 1-23 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/01/f7/csp_review_meeting_042313_melosh.pdf
- [45] LEE, Jae Hyung et al. Microfabricated silicon carbide thermionic energy converter for solar electricity generation. *IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)* [online]. 2012, 1262 [cit. 2019-05-23]. DOI: 10.1109/MEMSYS.2012.6170386.
Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6170386>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	Richardsonova konstanta	$A/cm^2/K^2$
E	Energie	J
e	Elementární náboj	C
E_F	Fermiho energie	J
f (E)	Fermi-Diracova rozdělovací funkce	-
J	Hustota elektrického proudu	A/cm^2
J_S	Hustota iontového proudu	A/cm^2
k	Boltzmannova konstanta	J/K
l	Délka	m
m	Hmotnost	kg
p	Tlak	Pa
P	Výkon	W
Q	Tepelný tok	W
S	Plocha	m^2
T	Termodynamická teplota	K
U	Napětí	V
α	Součinitel prostupu tepla	$W/m^2/K$
ε	Poměrná zářivost (emisivita)	-
η	Účinnost	-
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W/m/K$
ρ	Měrný elektrický odpor	Ω/m
σ	Stefanova – Boltzmannova konstanta	$W/m^2/K^4$
φ	Výstupní práce materiálu	J

SET	Solar Energy Technology
JPL	Jet Propulsion Laboratory
TFEV	Thermionic Fuel Element Verification
DTRA	Defense Threat Reduction Agency
SNL	Sandia National Laboratories
MTC	Microminiature Thermionic Converter
PETE	Photon-enhanced Thermionic Emission
AMTEC	Alkali Metal Thermal to Electric Converters
NETEC	Near-field Thermionic Emission Conversion
NF	Near-field
NTPV	Near-field Thermophotovoltaic
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Základní procesy a komponenty termoemisního generátoru (upraveno z [1]).....	11
Obr. 2 Průběh Fermi-Diracovy funkce za různých teplot [8].....	12
Obr. 3 Výkon termoemisního generátoru v závislosti na výstupním napětí (upraveno z [1]).....	14
Obr. 4 Schéma rozdělení termoemisních generátorů dle potlačení vlivu prostorového náboje	16
Obr. 5 Schéma úzké vakuové diody (upraveno z [1])	16
Obr. 6 Schéma vakuové magnetické triody (upraveno z [1]).....	17
Obr. 7 Trajektorie elektronů uvnitř magnetické triody (upraveno z [1]).....	17
Obr. 8 Schéma vakuové elektrostatické triody (upraveno z [1])	18
Obr. 9 Schéma cesiového termoemisního generátoru (upraveno z [1])	18
Obr. 10 Schéma termoemisního generátoru s obloukovou triodou (upraveno z [1])	19
Obr. 11 První verze vakuového termoemisního generátoru (upraveno z [11])	20
Obr. 12 Sériové uspořádání desek termoemisního generátoru (upraveno z [11])	21
Obr. 13 Řez spalovacím termoemisním generátorem [12].....	22
Obr. 14 Napájecí kanál jaderného termoemisního generátoru [15].....	24
Obr. 15 Částečný řez generátorem (upraveno z [15]).....	24
Obr. 16 Části termoemisního reaktoru a možnosti jeho sestavení (upraveno z [22]).....	25
Obr. 17 Základní schéma PETE generátoru (upraveno z [30])	28
Obr. 18 Počet emitovaných elektronů v závislosti na teplotě (upraveno z [30]).....	28
Obr. 19 Schéma kombinace termoemisního a AMTEC generátoru (upraveno z [33])	31
Obr. 20 Schéma NETEC generátoru [37].....	32
Obr. 21 Rozdíl výkonů termoemisního a NETEC generátoru (upraveno z [37]).....	33
Obr. 22 Schéma zapojení termoemisního generátoru (upraveno z [42]).....	34
Obr. 23 Prototyp termoemisního generátoru během provozu (upraveno z [42]).....	34
Obr. 24 Vývoj účinnosti termoemisních zařízení v čase	35
Obr. 25 Vývoj výkonu termoemisních zařízení v čase	35
Obr. 26 Solární koncentrátorová elektrárna [44]	36
Obr. 28 Schéma umístění PETE generátoru v elektrárně (upraveno z [44])	36
Obr. 27 Porovnání účinnosti PETE generátoru a tandemu PETE/tepelný cyklus (upraveno z [44])	36
Obr. 29 Termoemisní generátor vyrobený technologií pro MEMS (upraveno z [45]).....	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Hodnoty výstupní práce pro různé materiály [4] 12