Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Libor Pátý

Iontové vývěvy a fysikální procesy v nich

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 1, 46--52

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/137381

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* http://project.dml.cz

FYSIKA

IONTOVÉ VÝVĚVY A FYSIKÁLNÍ PROCESY V NICH

LIBOR PÁTÝ
(Katedra vysoké frekvence a vakuové techniky, Karlova universita)

V článku je podán přehled vývoje konstrukce iontových výměv, t. j. výměv, založených na principu ionisace plynu. Jsou popsány dva způsoby, jimiž se dnes řeší problém konstrukce iontové výměvy s velkou čerpací rychlostí, způsob odstraňování čerpaného plynu pomocí vypařovaného aktivního kovu a způsob transportu ionisovaných částic elektrickým polem ve výboji v magnetickém poli. Věnována je pozornost fysikálním procesům v těchto výměvách.

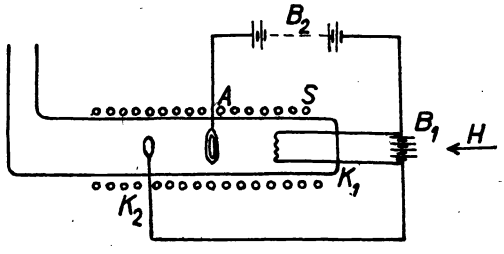
Tento článek si klade za úkol podat přehled dosavadních iontových výměv a přehled pokusů o výklad fysikálních procesů, probíhajících v těchto výměvách.

V iontových výměvách se využívá čerpacího efektu, který za určitých podmínek provází ionisaci plynu. K pokusům s prvními iontovými výměvami bylo přikročeno ze snahy nahradit difusní vysokovakuové výměvy výměvami pracujícími na jiném principu než difusním, když se ukázalo marným úsilí po odstranění některých nepříjemných vlastností difusních výměv, citlivost na náhlé vniknutí vzduchu u výměv s minerálním olejem, nutnost odstraňovat páry rtuti z čerpaného prostoru u výměv rtuťových, nehospodárnost výměv s vysokými čerpacími rychlostmi, obtíže spojené se snižováním mezního tlaku.

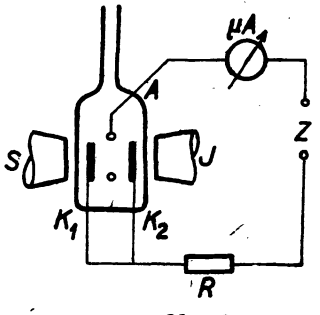
Výměvy s malou čerpací rychlostí

Fysiky uvedl na cestu pokusů s iontovými výměvami známý zjev klesání anodového proudu v čase u výbojek. První vysvětlení tohoto podal H. Schwarz [1]; pokles tlaku vysvětluje úbytkem molekul ve výbojce, jež ionisovány ve výboji adsorbují na vnitřní povrch skleněné baňky výbojky, který se v důsledku dopadu elektronů na něj nabíjí záporně. Jak Schwarz ukazuje, dá se rychlost poklesu anodového proudu, a tím i čerpací rychlost výbojky značně zvětšit vhodným uspořádáním elektrod a vložením výbojky do magnetického pole. Schema uspořádání je na obr. 1. Elektrony, vystupující ze žhavé katody, procházejí anodovým otvorem, v důsledku působení magnetického pole opisují dráhu po spirále, takže nemohou dopadnout na anodu, dostávají se do elektrického pole druhé katody a letí proto zpět. Toto kmitání elektronu mezi katodami trvá tak dlouho, až elektron ztratí při srážkách s molekulami tolik energie, že dopadne na anodu. Tímto způsobem se dosahuje intensivní ionisace plynu. Ve výboji se vytváří za jednotku času daleko více iontů než ve výbojce obvyklé, a výboj trvá i při tlacích až řádu 10^{-7} mm Hg. Čerpací rychlost takovéto výbojky je i tak velmi malá a nelze ji ani měřit prostředky ve vakuové technice obvyklými. Další nevýhodou takovéto výměvy je, že její čerpací efekt ustane, jakmile se stěny výbojky nasytí ionty.

Čerpací efekt byl pozorován též u výbojového manometru s magnetickým polem (Penningova manometru). Schema tohoto manometru je na obr. 2, systém elektrod je velmi podobný systému na obr. 1, jen s tím rozdílem, že místo žhavé katody je zde katoda studená, terčovitá, celý systém je symetrický a je umístěn v magnetickém poli magnetu. V tomto manometru dochází k značnému poklesu tlaku v čase v oboru tlaků 10^{-4} až 10^{-5} mm Hg. Studiem výboje v tomto manometru se zabývali K. Haefer [2] a É. M. Rejchruděl se spolupracovníky [3]; v těchto pracích je věnována pozornost zejména vlivu magnetického pole na zápalné napětí, velikost iontového proudu a ostatním parametrům výboje. Na čerpací efekt manometru upozornil J. Vermandé [4] a iontovou výměnu na principu Penningova manometru konstruovali první



Obr. 1.



Obr. 2.

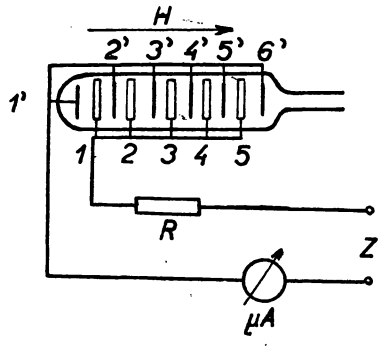
Obr. 1. Výbojka v magnetickém poli se dvěma katodami a prstencovou anodou. A — anoda, K_1 — žhavená katoda, K_2 — terčovitá studená katoda, B_1, B_2 — žhavicí a anodová baterie, S — vinutí solenoidu.

Obr. 2. Výbojový manometr s magnetickým polem. A — prstencová anoda, K_1, K_2 — studené terčovité katody, S, J — pólové nástavce magnetu, R — zatěžovací odpor, Z — zdroj napětí, μA — mikroampérmetr.

A. M. Gurewitsch a W. F. Westendorp [5]. Katody této výměny jsou z uhlíku, prstencová anoda z molybdenu, baňka výměny z nerezavějící oceli. Výměna čerpala v oboru tlaků $1 \cdot 10^{-1}$ až $6 \cdot 10^{-7}$ mm Hg s velmi malou čerpací rychlostí. Na elektrody bylo přiváděno napětí přibližně 5 kV (užíváno bylo jak stejnosměrného proudu, tak i střídavého 60 c). V práci [6] je proměřena čerpací rychlost výbojového manometru se skleněnou baňkou a molybdenovými elektrodami pro různé plyny. Podle této práce má takovýto manometr značnou čerpací rychlost pro vzduch v oboru tlaků 10^{-3} až 10^{-5} mm Hg; čerpá jak chemicky aktivní plyny (kyslík, vzduch), tak i dusík a inertní plyny, ovšem s různými čerpacími rychlostmi. Vedle adsorpce iontů na povrch katod je podle této práce též závažným čerpacím procesem adsorpce molekul a iontů na naprášenou vrstvičku kovu elektrod na skle baňky, jež se během čerpání obnovuje. U iontové výměny tohoto typu nebylo pozorováno nasycení ani při dlouhotrvajícím čerpání. V práci E. M. Rejchruděla a spolupracovníků [7] je popsána výměna, sestavená z několika systémů výbojového manometru (obr. 3) vedle sebe spojených. Mezní tlak této výměny byl $5 \cdot 10^{-8}$ mm Hg, nasycení čerpací schopnosti nebylo též pozorováno přes dlouhotrvající zkoušky. Proces adsorpce ve výbojovém manometru studovali J. H. Leck a E. Brown [8, 9]. S užitím hmotového spektrometru zjistili, že adsorpce iontů na povrch elektrod je provázena desorpcí iontů s povrchu, které byly dříve adsorbovány.

Oba procesy probíhají současně, molekuly jsou ve výměvě ionisovány, adsorbovány, ionty mohou potom znovu desorbovat a rekombinovat. V iontových výměvách tohoto druhu proto nedochází při čerpání k odstranění molekuly plynu z čerpaného prostoru jednou pro vždy (jako je tomu u mechanických a difusních výměv), nýbrž molekula se dostává zpět, desorbuje-li; desorpce je ovšem značně menší než adsorpce. Dále bylo zjištěno, že vedle mechanismu adsorpce iontů na povrch elektrod dochází též k absorpci, k pronikání iontů do hloubi materiálu elektrod, oba tyto mechanismy probíhají současně.

Jako iontová výměva může pracovat též ionisační manometr se žhavou katodou. V geometrické konfiguraci elektrod s kolektorem v ose válcové mřížky je ionisačního manometru užíváno jako výměvy s mezním tlakem řádu 10^{-11} mm Hg k čerpání vakuových systémů o objemu nejvýše několika litrů. Manometr byl popsán Bayardem a Alpertem [10]. Manometr má čerpací rychlost v oboru tlaků 10^{-6} až 10^{-11} mm Hg jen několik setin litru za vteřinu. Manometr čerpá jednak adsorpcí iontů, jednak chemickým slučováním atomů chemicky aktivních plynů, vznikajících tepelnou disociací molekul při styku se žhavou katodou, s vnitřními povrchy manometru. Manometr vykazuje po určité době čerpací nasycení. Podrobněji bylo referováno o ionisačním manometru jakožto iontové výměvě na jiném místě [11] v souvislosti s metodami získávání ultravysokého vakua.



Obr. 3. Iontová výměva s pěti systémy elektrod. *R* — zatěžovací odpor, *Z* — zdroj napětí, *μA* — mikroampérmetr, *1* až *5* — prstencové anody, *1'* až *6'* — terčovité katody.

Závěrem k iontovým výměvám typu výbojového manometru s magnetickým polem a typu ionisačního manometru se žhavou katodou lze říci, že jejich užití přichází v úvahu zejména v odtavených systémech s malým objemem, jelikož mají malou čerpací rychlost. Výměvy tyto mají poněkud širší pracovní obor než výměvy difusní a jsou schopny čerpat jak plyny aktivní, tak inertní, a současně mohou v čerpaném systému sloužit jako měřicí přístroje tlaku. Fysikální podstata čerpacího procesu je složitá a dosud ještě plně nevyjasněná, část čerpacího efektu připadá na adsorpci iontů na povrchy uvnitř výměvy, část na chemické slučování molekul a atomů čerpaného plynu s naprašovaným ev. vypařovaným kovem elektrod, pokud k naprašování neb vypařování ve výměvě dochází.

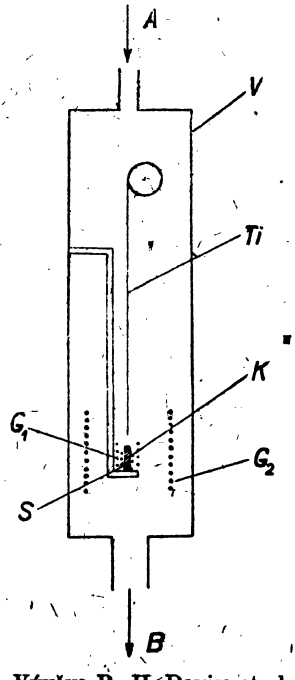
Výměvy s velkou čerpací rychlostí

Adsorpční čerpací mechanismus ve své podstatě vylučuje konstruování iontové výměvy s velkými čerpacími rychlostmi. Problém konstruovat výměvy s velkou čerpací rychlostí, čerpající bez nasycení čerpacího efektu a s vyhovujícím mezním tlakem byl řešen v současné době dvěma způsoby.

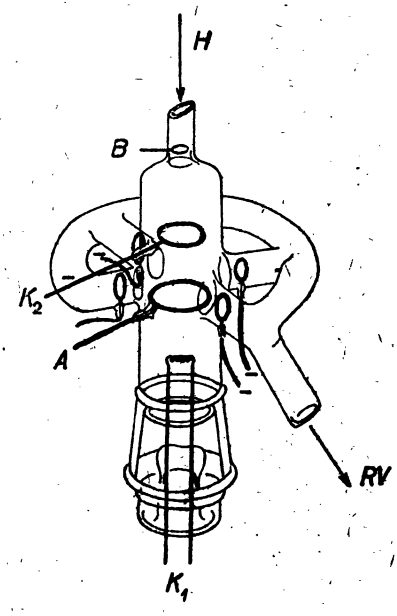
První způsob spočívá ve využití adsorpce molekul na stále se obnovující vrstvičku kovu na stěnách výměvy (jeden z čerpacích mechanismů Penningova manometru, jak bylo výše řečeno) a v slučování vypařovaného kovu ve výměvě s molekulami čerpaného plynu v prostoru výměvy.

Druhý způsob řešení problému je založen na ionisaci molekul v části vývěvy spojené s čerpaným prostorem a rekombinaci iontů v části vývěvy spojené s pomocnou předvakuovou vývěvou, kam jsou ionty odváděny pomocí elektrického pole.

Prvního způsobu užili R. H. Davis se spolupracovníky [12, 13] ke konstrukci vývěvy, která pro svou vysokou čerpací rychlost byla určena k vyčerpávání velkého urychlovače. Náčrt vývěvy je na obrázku 4. Válec vývěvy z nerezavějící oceli v dolním konci přechází v potrubí, vedoucí k předvakuové vývěvě;



Obr. 4. Vývěva R. H. Davise et al. *A* — vstupní otvor, *B* — výstupní otvor, G_1, G_2 — mřížky ionisačního systému, *K* — žhavená katoda, *Ti* — titanový drát, *V* — válec vývěvy.



Obr. 5. Schwarzova pokusná iontová vývěva. K_1 — žhavená katoda, K_2 — studená katoda, *A* — prstencová anoda, znaménko — označuje čtyři elektrody ve výstupních otvorech, *B* — elektroda ve vstupním otvoru, *RV* — potrubí k předvakuové vývěvě.

ve spodní části vývěvy je umístěna elektrická pícka z grafitu, do níž se během čerpání plynule spouští vlákno z kovu. Kov se v pícce vypařuje a jeho molekuly na své cestě na stěnu vývěvy, kde kondensují, slučují se s molekulami plynu. V horní části vývěvy je vstupní otvor a též systém mřížek a žhavé katody, jež odčerpává již uvedeným způsobem adsorpce iontů na záporně nabité povrchy. Tohoto druhého způsobu čerpání je ve vývěvě užito k vyčerpávání molekul, jež se neslučují s vypařovaným kovem. Pro velkou čerpací rychlost je důležitou volba vypařovaného kovu. Velmi vhodným kovem je titan, který vyniká velkou aktivitou s většinou obecných plynů — s vodíkem, dusíkem a kyslíkem. Další dobrou vlastností titanu je nízká tense jeho par i par jeho sloučenin; sloučeniny titanu jsou též velmi stálé při normální teplotě. Vypařování většího množství titanu je však dosti nesnadné. Zejména činí potíže materiál pícky pro vysokou aktivitu roztaveného titanu; za nejvhodnější

materiál se považuje grafit. Mezní tlak této vývěvy jest až $2 \cdot 10^{-7}$ mm Hg. Čerpací rychlost je různá pro různé plyny (viz tab. 1), pro inertní plyny velmi malá, pro vzduch 1000 l/sec. Nevýhodou vývěvy je rozpadání grafitové pícky během času, takže je nutno ji vyměňovat. Tuto nevýhodu poněkud mírní novější konstrukce této vývěvy stejných autorů, v níž místo pícky je užito grafitového sloupku. Tento sloupek ohřívá se na vysokou teplotu bombardováním elektrony, vystupujícími ze žhavé katody, jež je současně katodou ionisačního systému. U této vývěvy je velmi zajímavě technicky vyřešena otázka spouštění titanového drátku do vypařovacího prostoru. Čerpací rychlost závisí velmi výrazně na množství vypařovaného kovu. Hlavní výhody vývěvy tkví v tom, že nevnáší do čerpaného prostoru páry pracovní kapaliny tak, jako vývěvy difusní, že je v provozu hospodárná a že jí samé lze použít jako detektoru netěsností čerpaného prostoru s užitím helia.

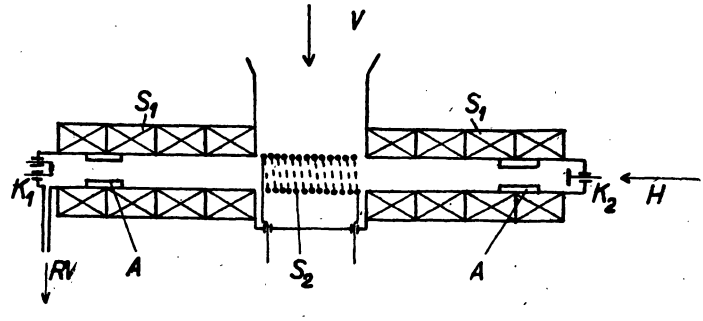
Tabulka 1

Druh plynu	Čerpací rychlost v l/sec	Tlak v mm Hg
vodík	$7 - 8 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^{-6}$
dusík	$6{,}5 - 7{,}5 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
kyslík	$6{,}5 - 7{,}5 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
vzduch	$6{,}5 - 7{,}5 \cdot 10^3$	$1{,}5 \cdot 10^{-6}$
argon	9	$4 \cdot 10^{-6}$
helium	4	$3 \cdot 10^{-5}$

Druhého způsobu užil první H. Schwarz ve své pokusné vývěvě [14]. Tato vývěva je na obr. 5. Skleněná válcová baňka má šest otvorů. V horní části je vstupní otvor, zbývajících pět otvorů je potrubím vzájemně spojeno a připojeno k předvakuové vývěvě. Elektrody této vývěvy jsou: žhavená katoda z wolframové spirály ve spodní části, prstencová anoda v rovině čtyř středních otvorů a druhá katoda, reflexní, v horní části vývěvy, též ve tvaru prstence. V každém ze čtyř otvorů je malá prstencová elektroda se záporným napětím, konečně ve vstupním otvoru je prstencová elektroda s kladným napětím, která zabraňuje difusi kladných iontů do čerpaného prostoru. Celá vývěva je umístěna v magnetickém poli solenoidu, napětí na anodě vůči katodě je přibližně 2 kV. Elektrody oscilují mezi oběma katodami v důsledku působení axiálního magnetického pole stejně jako u zmíněného manometru Penningova. Ionty jsou přitahovány k záporným elektrodám, zejména k elektrodám ve čtyřech otvorech, kde neutralisují a jsou odssávány do předvakua. Vývěva dle údajů autora dosahuje tlaku až $5 \cdot 10^{-6}$ mm Hg při malé čerpací rychlosti 0,5 l/sec a nevykazuje nasycení. Tato vývěva je jen laboratorním modelem, hodícím se k čerpání jen malých objemů. Přesto, že je důvodným názor, že vývěva též čerpá pouze čerpacím mechanismem adsorpčním a nikoli transportem iontů k výstupním otvorům, jak udává H. Schwarz, její konstrukce dala podnět ke konstrukci vývěvy velké, založené na principu transportu iontů.

Tato vývěva, velmi výkonná, je popsána v práci J. S. Fostera a spolupracovníků [15]. Schematické znázornění vývěvy je na obr. 6. Vývěva se skládá z válcové trubice dlouhé přes tři metry o průměru asi 15 cm, která

má ve střední části vstupní otvor, připojený k čerpanému prostoru. V jednom konci je žhavá katoda z wolframu, v druhém konci chladná reflexní katoda. V malé vzdálenosti od obou katod jsou umístěny dvě prstencovité anody. Potrubí k předvakuové vývěvě dosahující mezního tlaku $5 \cdot 10^{-4}$ mm Hg je spojeno s oběma konci trubice. Kolem trubice je vinutí solenoidu. V prostoru vstupního otvoru je vinutí solenoidu ze silného drátu, které umožňuje získat magnetické pole dostatečné intensity v trubici při nepatrném vstupním vakuovém odporu. Na anody se vkládá stejnosměrné napětí, urychlující elektrony,



Obr. 6. Vývěva J. S. Fostera et al. *A* — prstencové anody, K_1 — žhavená katoda, K_2 — studená katoda, *RV* — potrubí k pomocné vývěvě, S_1 — vinutí solenoidu, S_2 — vinutí solenoidu v prostoru vstupního otvoru, *V* — vstupní otvor.

emitované žhavou katodou. Elektrony oscilují mezi oběma katodami a ionisují molekuly plynu, které se dostávají do vývěvy z čerpaného prostoru vstupním otvorem. Elektrony, které ztratily ve srážkách s molekulami energii, se dostávají na anody. Kladné ionty, které vznikají ionisací, mají daleko menší rychlost než elektrony, a menší střední volnou dráhu. Tím se utvoří ve výboji kladný prostorový náboj, který způsobuje stálý pohyb iontů směrem ke katodám. Tak dochází ke stálému ubývání molekul v prostoru vstupního otvoru a k hromadění iontů v prostoru u katod. Ionty v blízkosti katod jednak chemicky reagují s materiálem katod, jednak jsou u katod neutralisovány a jako neutrální částice, neovlivňované magnetickým polem, opouštějí prostor výboje a jsou odssávány předvakuovou vývěvou. Některé ionty se adsorbují na povrch výbojové trubice v blízkosti katod, kam se katody rozprašují. Jiné ionty, které jsou u katod neutralisovány, difundují výbojem směrem zpět k vstupnímu otvoru vývěvy v důsledku spádu tlaků. Po své cestě se mohou buď znovu ionisovat, nebo prodifundují až do čerpaného systému. K těmto částicím přispívají též molekuly, které vznikají rekombinací ve výboji. Adsorpce a chemisorpce u této vývěvy činí jen malý zlomek podílu na čerpacím efektu a probíhá, i když je vývěva oddělena od předvakuové vývěvy. Při nízkých tlacích ve střední části vývěvy je množství vzniklých iontů malé a výboj by měl nepříznivé parametry (optimální hodnoty proudu a napětí jsou 10—20 A a 300—400 V). Je proto nutné připouštět plyn do prostoru u katod připouštěcím ventilem. Důležitou úlohu při konstrukci vývěvy má geometrická konfigurace elektrod, zejména pak průměr anodového otvoru, který může být jen o málo větší než průměr výboje, aby byla co nejvíce omezena zpětná difuse molekul. Charakteristické hodnoty vývěvy jsou: Čerpací rychlost $3—7 \cdot 10^3$ l/sec, mezní tlak $8 \cdot 10^{-7}$ mm Hg, příkon solenoidů 32 kW, příkon katody 4,5 kW. — Této

vývěvy bylo užito k čerpání balonu o objemu 48 m³, jejž vývěva odčerpala až na tlak $5 \cdot 10^{-6}$ mm Hg. Vývěva je vhodná pro svou velkou čerpací rychlost k čerpání velkých objemů.

Závěr

H. Schwarz a obdobným způsobem P. F. Váradi [16] se pokusili o výpočet čerpací rychlosti ze známých parametrů vývěvy. Oba vycházeli z podmínky $n_i > \Delta N$, t. j. že počet iontů n_i, vytvořených za jednotku času, to jest proud procházející vývěvou, musí být větší než proud molekul ΔN, difundujících zpět v důsledku rozdílu tlaků z prostoru výstupního otvoru do prostoru vstupního otvoru. Výpočtem odvozují vztah pro čerpací rychlost vývěvy. Tento vztah, jak poznamenává N. A. Florescu [17], neodpovídá skutečnosti, jelikož by po dosazení hodnot specifická čerpací rychlost překročila maximální hodnotu 11;67 l/sec, což je největší hodnota specifické čerpací rychlosti. Florescu upozorňuje, že ve výpočtu je chybným použití Knudsenova vztahu pro vodivost potrubí při molekulárním proudění. Zůstává proto problém kvantitativního vyřešení čerpacího procesu v iontových vývěvách zatím otevřeným.

Vývěvy typu Fosterova mají nevýhodu ve žhavené katodě, která má omezenou životnost. Vedle vypařování materiálu katody způsobeného žhavením se tato též poškozuje iontovým bombardováním zejména při náhodném zvýšení tlaku v čerpaném prostoru, jehož možnost ve vakuové technice nelze nikdy zcela vyloučit. Přítomnost žhavené katody též ztěžuje odčerpávání plynů a par, reagujících s materiálem katody při vysokých teplotách. Přesto má značné výhody a přednosti před vývěvami difusními a zdá se proto, že iontové vývěvy naleznou uplatnění jak v laboratoři, tak v průmyslu, zejména podaří-li se konstruovat vývěvu s čerpací rychlostí několika set l/sec, která by měla současně menší příkon než Fosterova vývěva.

Literatura

[1] Schwarz N.: Zs. Phys. 117 (1941), 23.
[2] Haefer R.: Acta phys. Austr. 7 (1953), 50; 7 (1953), 251; 8 (1954) 200.
[3] Rejchruděl E. M., Černětskij A. V., Michněvič V. V., Vasiljeva I. A.: ŽTF 22 (1952), 1945.
[4] Vermandé J.: Le Vide N° 38 (1952), 1145.
[5] Gurewitsch A. M., Westendorp W. F.: Rev. Sci. Instr. 25 (1954), 389.
[6] Pátý L.: Čs. čas. fys. 7 (1957), 108.
[7] Rejchruděl R. M., Smirnickaja G. V., Borisenko A. I.: Radiotěch. i elektronika, 1 (1956), 253.
[8] Leck J. H.: J. Sci. Instr. 30 (1953), 271.
[9] Brown E., Leck J. H.: Brit. J. Appl. Phys. 6 (1955), 161.
[10] Bayard R. T., Alpert D.: Rev. Sci. Instr. 21 (1950), 571.
[11] Pátý L.: Čs. čas. fys. 6 (1956), 550.
[12] Divatia A. S., Davis R. H., Herb R. G.: Phys. Rev. 93 (1954), 926.
[13] Davis R. H., Divatia A. S.: Rev. Sci. Instr. 25 (1954), 1193.
[14] Schwarz H.: Le Vide N° 42 (1952), 1262; Rev. Sci. Instr. 24 (1953), 371.
[15] Foster J. S., Lawrence E. O., Lofgren E. J.: Rev. Sci. Instr. 24 (1953), 388.
[16] Váradi P. F.: Acta tech. Hungar. 9 (1954), 343.
[17] Florescu N. A.: Le Vide N° 48 (1953), 1428.