

Metody liniowe wysokonapięciowe przyspieszania cząstek

Streszczenie

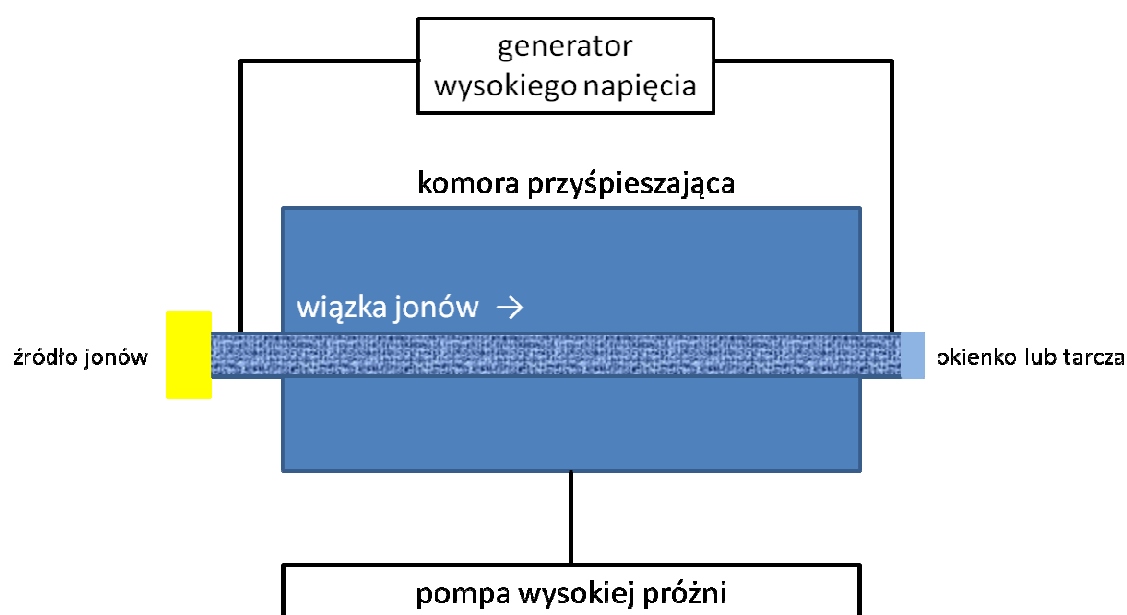
Artykuł ten opisuje najpopularniejsze metody liniowe wysokonapięciowe przyspieszania cząstek. Omawia zasadę działania, budowę oraz zastosowanie obecnie wykorzystywanych generatorów (generatory elektrostatyczne Van de Graaffa, generatory kaskadowe oraz dynamitrony i transformatory o izolowanym rdzeniu).

Słowa kluczowe: metoda elektrostatyczna, układ jednostopniowy, generatory elektrostatyczne Van de Graaffa, generatory kaskadowe, dynamitrony, transformatory o izolowanym rdzeniu

Wprowadzenie

Istnieje wiele metod przyspieszania cząstek:

Najprostszą metodą przyspieszania cząstek jest metoda elektrostatyczna. W metodzie tej stosuje się układ dwóch elektrod pomiędzy, którymi jest różnica potencjałów elektrostatycznych. Naładowana cząstka przyspieszana odpychana jest od elektrody posiadającej ten sam znak ładunku a tym samym przyciągana przez elektrodę o znaku przeciwnym. Aby skutecznie przyspieszyć cząstkę należy ograniczyć całkowicie zdarzenia rozpraszające. Stąd też między elektrodami stosuje się próżnię (w miarę możliwości), co pozwala zwiększyć stosunek średniej drogi zderzenia przyspieszanej cząstki z cząsteczkami gazu a odległością pomiędzy elektrodami. Metoda ta stosowana jest w akceleratorach liniowych wysokonapięciowych (Rys. 1).



Rys.1 Schemat jednostopniowego akceleratora wysokonapięciowego

Tego typu akcelerator zbudowany jest ze źródła jonów, komory przyspieszającej, na której końcu znajduje się okienko bądź tarcza. W celu uzyskania odpowiednich warunków przyspieszania stosuje się pompę wysokiej próżni. Ten typ akceleratora jest układem jednostopniowym, czyli energia maksymalna cząstek odpowiada napięciu maksymalnemu dostarczanemu przez generator. Wartość napięcia 100 kV – 30 MV. Należy pamiętać, że im niższe użyte napięcie tym większa żywotność akceleratora.

Energia kinetyczna cząstki przyspieszanej w generatorze wysokonapięciowym jest zależna od napięcia (w rzeczywistości potencjału) oraz wielkości ładunku przyspieszanego:

$$E_k = q \times V \quad (1)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna [J]

q – ładunek elektryczny cząstki przyspieszanej [C]

V – napięcie [V]

W przypadku elektronu, cząstki najczęściej przyspieszanej równanie (1) przyjmuje postać:

$$E_k = eV \quad (2)$$

gdzie:

eV – elektronowolt

Energię jednego elektronowolta uzyskuje każda cząstka o ładunku równym ładunkowi elektronu przyspieszana w polu elektrycznym o różnicy napięć (potencjałów) między elektrodami 1V. Z tej definicji $1\text{eV} = 1,6 \times 10^{-19}\text{J}$. Jednak znacznie częściej stosowane są wielokrotności tej wielkości (Tab. 1).

Nazwa	Skrót	Wielokrotność eV
kiloelektronowolt	keV	10^3
megaelektronowolt	MeV	10^6
gigaelektronowolt	GeV	10^9
tetraelektronowolt	TeV	10^{12}

Tab. 1. Jednostki napięć

Metoda ta pozwala wykorzystywać napięcia rzędu MeV, aby stosować wyższe napięcia należy zastosować inną metodę.

Powyższe zależności ulegają transformacji w momencie, gdy przyspieszanymi cząstkami są ciężkie jony:

$$E_k = \frac{q}{A} V \quad (3)$$

gdzie:

E_k – energia kinetyczna przypadająca na jeden nukleon Równanie (3) w rzeczywistości opisuje energię kinetyczną przyspieszanego pojedynczego nukleonu [keV/nukleon]

q – ładunek jonu; wyrażony w jednostkach ładunku elektronu:

$$q = ne \quad (4)$$

A – liczba masowa jonu

Po uwzględnieniu zależności (4) równanie (3) przyjmuje postać:

$$E_k = \frac{ne}{A} V \quad (5)$$

gdzie:

n – stopień zjonizowania jonu

Przy całkowitym zjonizowaniu jonu ładunek równy jest:

$$q = Ze \quad n = Z \quad (6)$$

gdzie:

Z – liczba porządkowa danego jonu.

Zależności te trudno potwierdzić empirycznie dla jonów o dużych ładunkach, gdyż bardzo szybko ulegają one rekombinacji. Z zależności (5) wynika, że zwiększenie stopnia zjonizowania jonu

powoduje jego przyśpieszenie w polu elektrycznym przy takim samym napięciu do większych energii, która będzie wprost proporcjonalna do n .

Skuteczność tej metody określa tzw. gradient energetyczny. Gradient energetyczny to energia, jaką uzyskuje wiązka przyśpieszanych przez akcelerator cząstek, na drodze tego akceleratora. Wielkość ta wyrażana jest w keV bądź MeV przypadających na jednostkę drogi wyrażonej w metrach, zatem keV m^{-1} lub MeV m^{-1} . W akceleratorach mogą być stosowane:

- a. gradient liniowy – stosowany w akceleratorach liniowych, gdzie tor przyśpieszania cząstek jest linią prostą i długość kanału akceleratora jest przemierzana tylko jeden raz
- b. gradient skuteczny – stosowany w akceleratorach kołowych, gdzie tor przyśpieszania cząstek nie jest linią prostą a długość kanału akceleratora jest przemierzana wielokrotnie

Generatory wysokiego napięcia

Do generatorów wysokiego napięcia zalicza się: generatory elektrostatyczne Van de Graaffa, generatory kaskadowe oraz dynamitrony i transformatory o izolowanym rdzeniu.

Generator elektrostatyczny Van de Graaffa [1]

Jest urządzeniem wykorzystywanym w technice do wytwarzania niezwykle wysokich napięć rzędu kilku MV. Napięcia te potrzebne są do nadawania dużych prędkości cząstkom, które w rezultacie są w stanie rozbić jądro atomowe. Urządzenie to zbudowane jest z:

- a. pustej wewnątrz kolumny – wykonana z materiału izolacyjnego
 - b. jedwabnych pasów – znajdują się one pomiędzy dwoma wałami, z których jeden znajduje się u dołu kolumny, a drugi u góry wewnątrz olbrzymiej metalowej kuli
 - c. źródło wysokiego napięcia – znajduje się w dolnej części kolumny; napięcie wytwarzane jest rzędu 10^4 V (np. transformator i prostownik).
 - d. odbiorców ładunków
- pas – gromadzi ładunki i przenosi je ku górze do kuli; pas pozbawiony ładunków biegnie dalej ku dołowi po nowe ładunki.
 - kolce – przenoszą ładunek z pasa na kulę
 - kule – ładują się ładunkiem jednego znaku, przez co pomiędzy kulami powstaje napięcie

rzędu kilku milionów woltów.

Kula gromadzi ładunek zgodnie ze wzorem (7), gdzie potencjał uzyskany na kuli przyrządu zależy od wielkości naboju wprowadzonego na powierzchnię kuli oraz pojemności kuli.

$$V = \frac{Q}{C} \quad (7)$$

gdzie:

Q – ładunek [C]

V – potencjał [V]

C – pojemność [F]

Potencjał jest wprost proporcjonalny do ładunku elektrycznego, a odwrotnie proporcjonalny do pojemności przewodnika.

Wielkość otrzymanego na kuli potencjału można określić w przybliżeniu po długości iskry, jaką otrzymamy przy rozbrajaniu kuli (między klami o niewielkiej średnicy przy średnim stopniu jonizacji powietrza na każdy milimetr długości iskry przypada różnica potencjałów odpowiadająca napięciu $U \approx 3000$ V).

Ważnym parametrem w generatorze jest gęstość powierzchniowa. Na przewodnikach kulistych gęstość powierzchniowa δ jest rozłożona równomiernie.

$$\delta = \frac{Q}{S} \quad (8)$$

gdzie:

Q – ładunek [C]

S – powierzchnia ładowana [cm²]

Przestrzeń otaczająca kulę posiada pole elektryczne. Natężenie tego pola (E) w rzeczywistości jest siłą, z jaką pole oddziałuje na ładunek próbny umieszczony w polu, zależy od gęstości powierzchniowej i jest największa przy powierzchni czasy

$$E = 4\pi\delta \quad (9)$$

gdzie:

E – natężenie pola [A]

δ – gęstość powierzchniowa [Cxc⁻²]

Natężenia pola maleje ze wzrostem odległości od powierzchni czasy (jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości).

Moc tego generatora można określić przez przemnożenie natężenia prądu przez napięcie uzyskane na kuli przyrządu. Generator Van de Graaffa produkuje małą moc w porównaniu z mocą wytwarzaną przez inne generatory stosowane w technice. Jednak istnieją układy wielostopniowe – tandemowe, które pozwalają na dwukrotne przyśpieszanie tej samej wiązki jonów. W układzie wielostopniowym o maksymalnym napięciu przyśpieszającym V_0 istnieje możliwość zwiększania energii przyśpieszanych jonów poprzez zwiększenie ładunku q:

układ dwustopniowy: $E_{\max}=V_0(1+q)$

układ trójstopniowy: $E_{\max}=V_0(2+q)$

układ czterostopniowy: $E_{\max}=V_0(2+2q)$

Energie tandemów obecnie używanych przyjmują wartości w zależności od masy jonu: dla jonów ciężkich np. uranu 1 MeV/nukleon a dla jonów lekkich np. tlenu 10 MeV/nukleon.

Wykorzystanie laboratoryjne najprostszego generatora Van de Graaffa przedstawia tabela (Tab.2).

Przykłady doświadczeń	Cel	Wykonanie
Rozmieszczenie ładunków na powierzchni przewodnika	Udowodnienie miejsca zbierania się ładunków – zewnętrzna powierzchnia przewodnika	Łączymy generator z siatką Faraday'a
Linie sił pola elektrycznego	Wyznaczenie sił pola elektrycznego	Połączenie końca rozbrajacza nitka na której zawieszona będzie igła elektryczna
Działanie ostrzy	Elektryzowanie się ciał	Do jednego grzebienia generatora przyłączamy młynek Franklina
Działanie ciepłne iskry	Zapalenie waty przez iskrę	Na drodze iskry między uziemionym konduktorem kulistym, a kulą generatora umieszczamy watę osadzoną na drewnienku i zwilżoną benzyną.

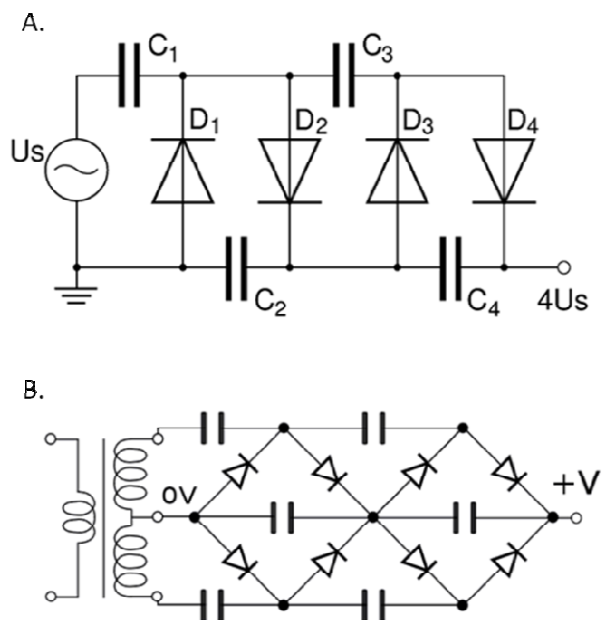
Efekty świetlne wyładowań	• Obserwacja wyładowań elektrycznych, które mają postać wiotkich miotełek fiołkowego światła.	• Generator umieszczamy w zaciemnionym pomieszczeniu. • Do powierzchni kuli generatora zbliżamy konduktor na podstawie.
Neonówka	• Zaobserwowanie zmian w intensywności świecenia neonówki zależności od odległości od generatora	• Neonówkę (uziemioną) zbliżamy do powierzchni kuli generatora

Tab. 2 Proste doświadczenie możliwe do wykonania na generatorze Van de Graaffa [2]

Oprócz badań podstawowych (fizyka i chemia atomowa) współczesne akceleratory wykorzystywane w szerokim zakresie [3, 4]. Akceleratory Van de Graaffa odegrały szczególnie ważną rolę w rozwoju techniki przyspieszania cząstek naładowanych. Akceleratory te były dostępne także w medycynie w szczególności w radioterapii rutynowej. Mimo, iż znane są one więcej niż pół wieku ciągle są wykorzystywane do przyspieszania cząstek jest to wynikiem emitowania wiązek o wysokiej jakości: mały rozrzut energetyczny, duża stabilność energii końcowej, brak pulsacji napięcia. Możliwe jest również wykorzystanie tego typu generatorów do pracy impulsowej

Generatory kaskadowe

Na początku lat 30 w technice przyspieszania cząstek naładowanych niesymetrycznymi układami kaskadowymi ważną rolę odegrali Cockroft i Walton. Stąd generatory kaskadowe zwane są akceleratorami Cockrofta-Waltona. Akcelerator tego typu zbudowany jest z n liczby stopni zwanych kaskadami, każdy stopień złożony jest z kondensatorów C i prostowników P (Rys.2).



Rys. 2 Schemat generatora kaskadowego: A. w układzie niesymetrycznym; B. w układzie symetrycznym

W praktyce jednak stosuje się układ symetryczny. Wartość napięcia opisana jest tak samo dla obu generatorów (symetrycznych nie symetrycznych):

$$U_n = 2\sqrt{2}nU_0 \quad (10)$$

gdzie:

n – liczba kaskad

U_0 – wartość skuteczna napięcia wtórnego transformatora Tr

Różnice pomiędzy układem symetrycznym i niesymetrycznym:

Układ niesymetryczny:

$$\Delta U_1 = \frac{I}{fC} \frac{n}{3} (2n^2 + 1)$$

$$\partial U_1 = \frac{I}{fC} \frac{n}{2} (n + 1)$$

Układ symetryczny:

$$\Delta U_2 = \frac{I}{fC} \frac{n}{3} \left(\frac{n^2}{2} + 1 \right)$$

$$\partial U_2 = \frac{I}{fC} \frac{n}{2}$$

gdzie:

I – natężenie prądu stałego [A]

f – częstotliwość napięcia zasilającego [Hz]

C – pojemność danego stopnia [F]

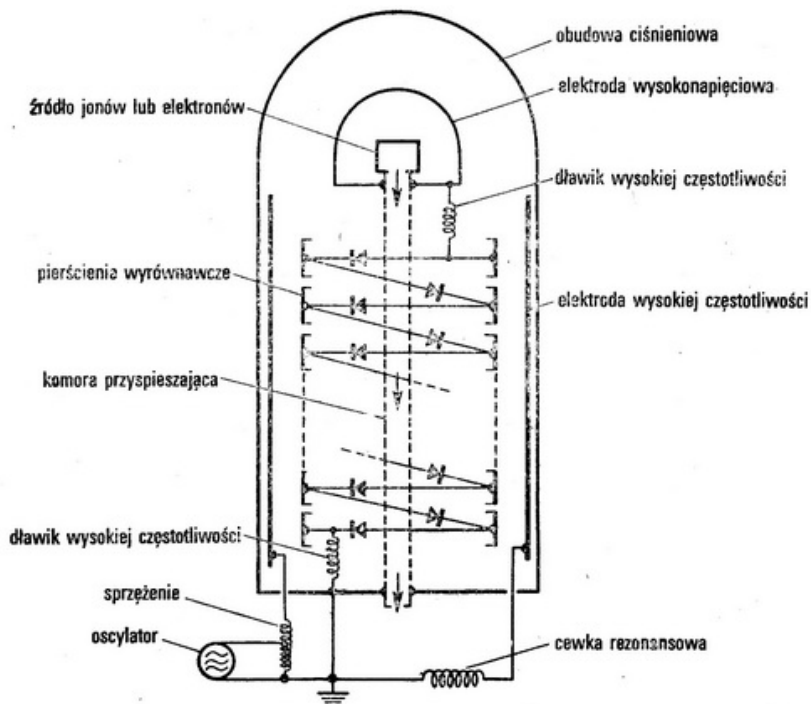
n – liczba stopni

Dla obu układów zasilanie stanowią przetwornice częstotliwości pracujące w zakresie 0,5-10 kHz.

Ten typ generatorów stosowany jest jako wtryskiwacze do akceleratorów a także obróbkę radiacyjnych. Obecnie co raz częściej wykorzystuje się je w mikroskopii akceleratorowej (użyte napięcie to kilka MV). Jednak zastosowanie to wymaga dużej stabilności napięcia – rząd 10^{-6} z uwzględnieniem napięcia pulsacji. Firmą przewodnią generatorów kaskadowych jest firma Haefely.

Dynamitrony [5]

Dynamitrony jest nazwa handlową akceleratorów produkowanych przez amerykańską firmę Radiation Dynamic. Akcelerator tego typu zbudowany jest z obudowy ciśnieniowej, w której znajdują się elektrody o kształcie litery D zasilane generatorem o częstotliwości 100 kHz. Napięcie tych elektrod wzbudza odpowiednie napięcie układu odbiorczego, które jest połączone z prostownikami. Wyprostowane napięcie jest sumowane (z poszczególnych sekcji) i zasila elektrodę wysokonapięciową. Napięcie stałe wytworzone przez jedną sekcję ma wartość 50 kV. Ten typ akceleratorów zaliczany jest do akceleratorów o najwyższych mocach wiązek (nawet do 200 kW).



Rys. 3 Schemat akceleratora typu Dynamitron (prod. Radiation Dynamics, USA) [6]

Transformatory o izolowanym rdzeniu (ICT)

Tego typu generatory zaliczamy do klasycznych transformatorów wysokonapięciowych. Cechą charakterystyczną ich budowy jest to iż rdzeń magnetyczny jest uziemiony. Ze względu na to są najrzadziej z powyższych stosowane do przyspieszania cząstek. W generatorze tym uziemienie zastąpiono izolacjami sekcji rdzenia. Rdzeń wzbudzany jest w układzie trójfazowym. Transformator ten umieszczony jest w komorze ciśnieniowej wypełnionej gazem SF₆. Transformatory te najczęściej stosowane są do obróbek radiacyjnych.

Podsumowanie

Istnieje wiele różnych możliwości przyspieszania cząstek. Wszystkie one jednak oparte są na tej samej prawach fizyki. Zastosowanie ich bywa jednak różne ze względu na wykorzystywane przez nie napięcie i rodzaj cząstek jaki można łatwo w nich przyspieszyć.

Literatura

-
- [1] <http://perunwit.w.interia.pl/graaff.htm>
 - [2] <http://www.dydaktyka.fizyka.szc.pl/>
 - [3] J. B. Schroeder i in. 1987. Nucl. Instrum. Methods Phys. B24/25: 763-66
 - [4] G.J.F. Legge i in. 1988. Ultramicroscopy 24: 283-98
 - [5] W. Scharf. 1994. Akceleratorzy biomedyczne. Wydawnictwo Naukowe PWN
 - [6] <http://www.if.pw.edu.pl>