

Jonizacja gazów

potencjał jonizacyjny J

minimalna energia potrzebna do wytworzenia pary jonów

średnia praca jonizacji W

$$E = N_i \cdot W \quad (1)$$

bilans energii dla jonizacji gazu

$$E = N_i \cdot \bar{E}_i + N_{ex} \cdot \bar{E}_{ex} + N_i \cdot \bar{E}_{se} \quad (2)$$

E – całkowita energia cząstki naładowanej

N_i – liczba par jonów wytworzonych przez cząstkę w gazie

\bar{E}_i – średnia energia zjonizowanego atomu

N_{ex} – liczba wzbudzonych atomów

\bar{E}_{ex} – średnia energia wzbudzonego atomu

\bar{E}_{se} – średnia energia powolnych elektronów

$$W = \bar{E}_i + \frac{N_{ex}}{N_i} \cdot \bar{E}_{ex} + \bar{E}_{se} \quad (3)$$

$$\frac{W}{J} \quad 1,7 \text{ dla gazów szlachetnych}$$

$$\frac{W}{J} \quad 2,1 \text{ do } 2,6 \text{ dla gazów cząsteczkowych}$$

$$v_0 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} \quad (\sim 2,19 \cdot 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1})$$

$$W = W_0 + A \cdot E^{-1/2} \quad \text{dla } v < \frac{v_0}{2} \quad (4)$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

$$\frac{dW}{dE} \approx 0 \text{ to } W \approx W' \quad W' \equiv \frac{\frac{dE}{dx}}{\frac{dN_i}{dx}} \quad \begin{array}{l} \frac{dE}{dx} \text{ LET} \\ \frac{dN_i}{dx} \text{ gęstość jonizacji} \end{array}$$

$$W' = \frac{W}{1 - \frac{E}{W} \frac{dW}{dE}} \quad (5)$$

dla ciężkich i powolnych jąder

$$\frac{dW}{dE} = -\frac{1}{2} A \cdot E^{-3/2}$$

$$W' = \frac{W}{1 + \frac{1}{2} \frac{A}{W \sqrt{E}}} \quad (6)$$

Średnia praca jonizacji w mieszaninie gazów

$$\frac{1}{W} = \sum_i \frac{x_i}{W_i} \quad (7)$$

zależność doświadczalna dla mieszaniny dwuskładnikowej

$$\frac{1}{W} = \left(\frac{1}{W_1} - \frac{1}{W_2} \right) \cdot z + \frac{1}{W_2} \quad z = \frac{p_1}{p_1 + a \cdot p_2} \quad (8)$$

mieszanina	a
N ₂ -H ₂	0,28
N ₂ -Ar	0,53
N ₂ -O ₂	1,06
He-Ar	0,75
He-H ₂	3,55
He-N ₂	8,47
He-CH ₄	0,68
Ar-H ₂	0,56
H ₂ -CH ₄	4,03

Dozymetria promieniowania jonizującego

0,13% Ar w He zmniejsza W z 41,3eV do 29,7eV

0,12% Ar w Ne zmniejsza W z 36,3eV do 26,1eV



Jonizacja w ciałach stałych

$$W = E_g + r \cdot \bar{E}_r + 2\bar{E}_f \quad (9)$$

$$W = 2,2 \cdot E_g + r \cdot \bar{E}_r \quad (10)$$

W – praca jonizacji

E_g – szerokość pasma wzbronionego

r – liczba fononów przypadająca na parę dziura-elektron

\bar{E}_r – średnia energia fononu

\bar{E}_f – średnia energia resztkowa elektronu (albo dziury) wytworzonej pary

dla Ge $W \approx 2-3$ eV, a dla Si $W \approx 3-4$ eV

temperaturowy współczynnik pracy jonizacji w półprzewodniku

-0,001 eV/K

Dozymetria promieniowania jonizującego

Energia potrzebna do wytworzenia pary elektron – dziura w krzemie

Źródło	W, eV	
McKay & McAfee (1953)	$3,6 \pm 0,3$	cząstki α
Baldinger et al. (1962)	$3,52 \pm 0,04$ $3,55 \pm 0,02$	cząstki α (dioda prod. RCA) cząstki α , detektor z barierą powierzchniową
Halbert & Blankenship (1960)	$3,50 \pm 0,05$	cząstki α
Bussolati et al. (1964)	$3,61 \pm 0,01$ $3,79 \pm 0,01$	cząstki α , 300 K elektrony, 300 K
Vavilov (1965)	$4,2 \pm 0,6$	elektrony, 10 – 25 keV
Smithtrick & Mayers (1966)	$3,64 \pm 0,04$	jony ${}^3\text{T}$ 2,7 MeV

Energia potrzebna do wytworzenia pary elektron – dziura w germanie

Źródło	W, eV	
McKay (1951)	$3,0 \pm 0,4$	cząstki α
McKay & McAfee (1953)	$2,94 \pm 0,15$	cząstki α
Halbert & Blankenship (1960)	$2,83 \pm 0,03$	cząstki α
Vavilov (1965)	$3,6 \pm 0,4$ $4,5 \pm 1,5$	elektrony, 5 – 15 keV elektrony, 420 keV
Zareba (1959)	$2,8 \pm 0,3$	elektrony, 22,7 keV

Energia potrzebna do wytworzenia pary elektron – dziura w różnych materiałach

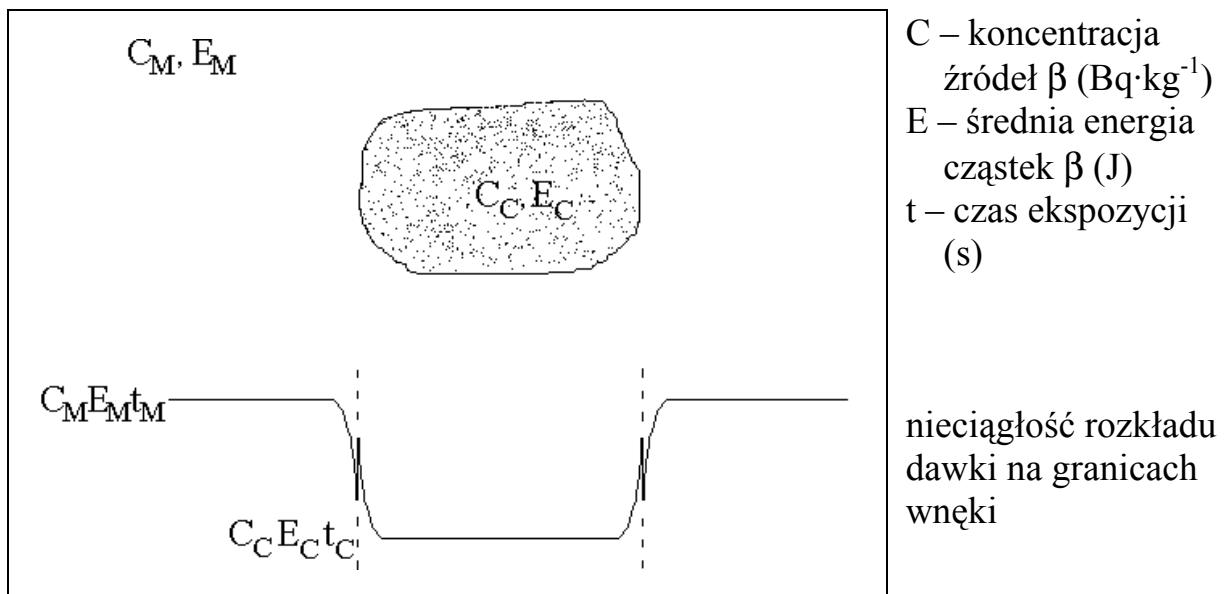
Źródło	W, eV	
Goldstein (1965)	8 ± 1	fosforek galu
Tauc (1959)	0,6	antymonek indu
McKay (1951)	10	diamant
	7,6	chlerek srebra
	5,8	bromek srebra
	5 – 10	siarczek kadmu
Gale (1963)	5,06	siarczek kadmu
Mills (1962)	5,2	siarczek kadmu
Dearnaley & Northrop (1963)	7,3	siarczek kadmu
	6,3	arsenek galu
	8,0	tlenek ołowiu

Dozymetria promieniowania jonizującego

Teoria komór wnekowych

Pomiar dawki w ośrodku wystawionym na działanie promieniowania jonizującego, wymaga wprowadzenia do tego ośrodka urządzenia pomiarowego. Zwykle takie urządzenie czułe na promieniowanie różni się od ośrodka co do składu atomowego (liczby atomowej) i gęstości, stanowiąc nieciągłość, którą nazywamy „wnęką”. Skojarzenie z komorą jonizacyjną powoduje, że wnękę widzimy jako przestrzeń w ciele stałym wypełnioną gazem.

W szerszym znaczeniu wnęka może wystąpić w ośrodku stałym, ciekłym lub gazowym, i może być zarówno bardziej lub mniej gęsta od ośrodka.



Ośrodek mógłby też być wystawiony na zewnętrzne promieniowanie $X/\gamma/n$. Jeżeli założyć, że wiązka promieniowania jest praktycznie nie osłabiona, to dawka pochłonięta jest równa kermie, czyli energii promieniowania przekazanej cząstkom wtórnym w postaci energii kinetycznej. Udział w dawce promieniowania γ o energii $(T_\gamma, T_\gamma + dT_\gamma)$ wynosi:

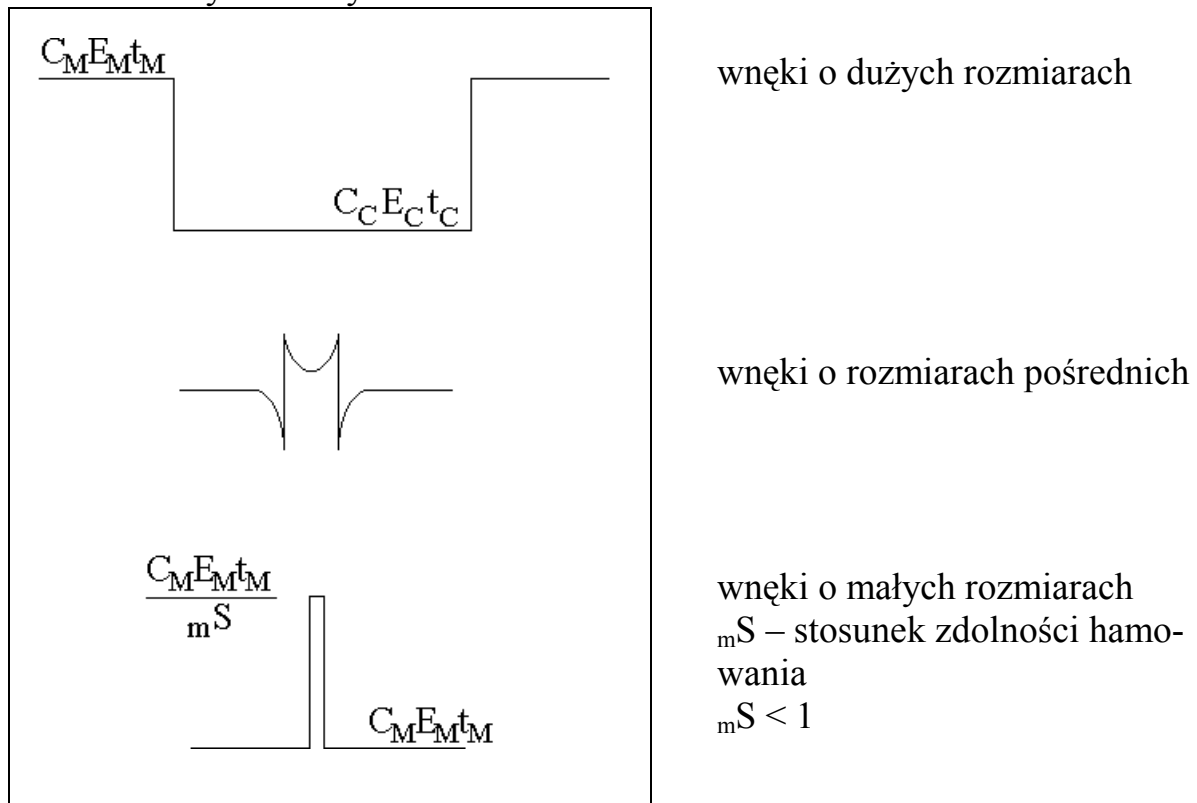
$$D(T_\gamma, T_\gamma + dT_\gamma) = N T_\gamma \frac{\mu_K}{\rho} dT_\gamma$$

gdzie N – strumień całkowity promieniowania γ o energii T_γ , μ_K/ρ – masowy współczynnik przekazu energii, a całkowita dawka pochłonięta:

$$D = \int_0^{T_{\max}} N T_\gamma \frac{\mu_K}{\rho} dT_\gamma.$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Wielkość wnęki można porównać z zasięgiem elektronów w ośrodku, i w tym kontekście wyróżniamy:



Założenia teorii komór wnękowych

Wnęka wypełniona gazem otoczona ośrodkiem stałym (tzn. ściankami komory jonizacyjnej). Rozmiary wnęki są takie, że:

1. Widmo elektronów w ośrodku (w ściankach komory) nie jest zakłócone obecnością gazu we wnęce.
2. Oddziaływanie fotonów z atomami gazu prowadzące do generacji elektronów we wnęce można zaniedbać.

Oraz dodatkowo:

3. Strumień pierwotnych fotonów w obszarze, z którego elektrony wtórne docierają do wnęki, jest przestrzennie równomierny.

Dozymetria promieniowania jonizującego

Teorie komór wnekowych przyjmują za dane:

Praca jonizacji (średnia energia potrzebna na wytworzenie jednej pary jonów) W jest znana i stała (niezależna od energii).

Znane są zdolności hamowania elektronów w materiałach ośrodka i gazie (wzór Bethego), oraz ich odpowiednie średnie w przypadku rozkładu energii elektronów.

Dla ciężkich cząstek naładowanych

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N_0}{mv^2} \rho \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right], \text{ gdzie } \beta = \frac{v}{c}$$

Dla elektronów

$$-\frac{dT}{dx} = \frac{2\pi e^4 N_0}{mv^2} \rho \frac{Z}{A} \left\{ \ln \frac{mv^2 T}{2I(1-\beta^2)} - \left[2(1-\beta^2)^{1/2} - 1 + \beta^2 \right] \ln 2 - \beta^2 + \frac{1}{8} \left[1 - (1-\beta^2)^{1/2} \right]^2 - \delta \right\}$$

I – średni potencjał wzbudzeniowo-jonizacyjny atomów ośrodka (tylko ta wielkość jest znana z małą dokładnością)

δ – korekta na polaryzację ośrodka przez cząstkę naładowaną.

Orientacyjne średnie wartości I	
ośrodek (stały)	I (eV)
gazowy H ₂	20,7
wodór (związki nasycone)	17,6
wodór (związki nienasycone)	14,8
węgiel (grafit)	78,4
węgiel (związki nasycone)	77,3
węgiel (związki nienasycone)	75,1
węgiel (związki silnie chlorowane)	64,8
azot (aminy, azotki)	99,5
azot (pierścień)	76,8
tlen (-O-)	98,5
tlen (O=)	88,9
gazowe powietrze	85
aluminium	164
gazowy argon	190
miedź	306
cyna	517
ołów	812

Dozymetria promieniowania jonizującego

Komory jonizacyjne

Elementy konstrukcji:

Materiał ścianki i gazu – stosuje się specjalnie opracowane tworzywa sztuczne odpowiadające powietrzu, tkance miękkiej lub kościom i dopasowane do nich mieszanki gazowe (odporne na promieniowanie).

Grubość ścianek – powinna zapewnić ustalenie stanu równowagi wtórnych cząstek naładowanych i jednocześnie nie osłabiać wyraźnie natężenia promieniowania.

Elektrody ochronne – eliminują prądy upływu po powierzchni izolatora, kształtują objętość czynną komory.

Materiały izolacyjne – lucyt, polistyren, polietylen, nylon, teflon, mylar.

Wymagania eksperymentalne

- a) wydajność zbierania jonów
- b) prądy upływu
- c) jonizacja wokół przewodów elektrycznych
- d) materiał ścianek (obecność elektrody zbierającej jony naniesionej na ścianki powoduje zwykle kłopoty przy opisie jonizacji)

Dozymetria promieniowania jonizującego

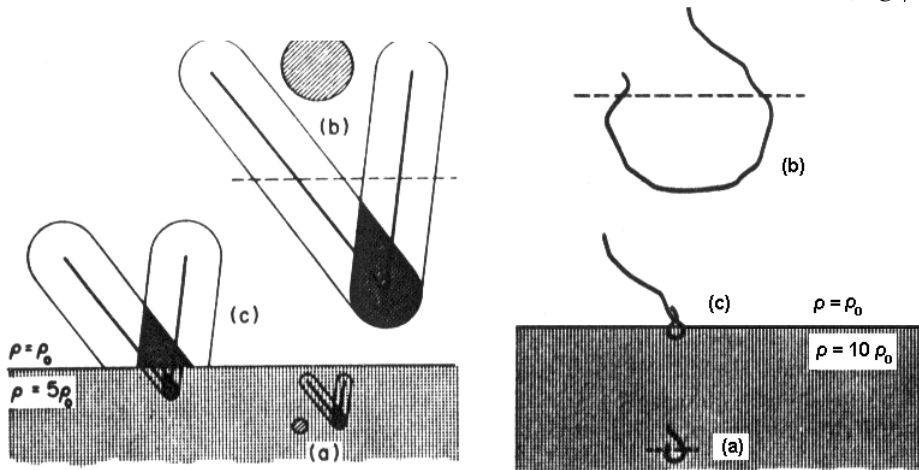
Wnęka o małych rozmiarach

Zasada równoważności Gray'a

Rozważmy dwie małe objętości, geometrycznie podobne, w ośrodku stałym i w gazie (wnęka). Stosunek zdolności hamowania tych ośrodków wynosi

$$s = \left(-\frac{dT}{dx} \right)_M / \left(-\frac{dT}{dx} \right)_C$$

i jest równy stosunkowi rozmiarów liniowych tych objętości $s = (V_C/V_M)^{1/3}$.



Liczba elektronów przechodzących przez gazową wnękę jest równa s^2 razy liczba elektronów przechodzących przez objętość ośrodka stałego, a objętość s^3 razy większa. W równomiernie napromienionym fotonami γ ośrodku stałym, gdzie występuje równowaga promieniowania elektronów, energia przekazana ośrodkowi przez elektrony wtórne w pewnej objętości jest równa energii straconej przez fotony w oddziaływaniach w tej objętości (zakładając, że promieniowanie hamowania można pominąć). W takim przypadku zasadę równoważności można sformułować następująco.

Energia tracona przez elektrony na jednostkę objętości wnęki wynosi $\frac{1}{s}$ razy energia tracona przez promienie γ na jednostkę objętości ośrodka stałego.

Z zasady równoważności wynika bezpośrednio związek Bragga – Graya

$${}_v E = s \cdot W \cdot {}_v J,$$

${}_v E$ – energia pochłonięta na jednostkę objętości ośrodka stałego,

W – średnia praca jonizacji ośrodka gazowego,

${}_v J$ – jonizacja na jednostkę objętości ośrodka gazowego.

Dozymetria promieniowania jonizującego

Związek Bragga – Graya można też zapisać alternatywnie

$${}_m E = {}_m S \cdot W \cdot {}_m J$$

$$\text{lub } {}_m S = \frac{{}_m E}{W \cdot {}_m J}$$

gdzie

$${}_m S = \left(-\frac{dT}{dm} \right)_M \bigg/ \left(-\frac{dT}{dm} \right)_C \quad \text{i} \quad -\frac{dT}{dm} = -\frac{1}{\rho} \frac{dT}{dx},$$

Wnęka o dużych rozmiarach

(energię pochłoniętą w pobliżu granicy można pominąć w porównaniu z energią pochłoniętą we wnęce)

Energia pochłonięta na jednostkę masy w każdym ośrodku (z dala od granicy) jest proporcjonalna do masowego współczynnika pochłaniania (energii)

$$\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_C \quad \text{lub} \quad \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_M.$$

Zatem związek między wartościami energii pochłanianej na jednostkę masy każdego ośrodka można zapisać następująco

$${}_m E_M = \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_M \bigg/ \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_C \cdot {}_m E_C, \quad \text{lub} \quad {}_m E_M = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_M}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_C} \cdot {}_m J \cdot W.$$

Wnęka jest wprowadzana do ośrodka zwykle po to, żeby zmierzyć dawkę pochłoniętą w punkcie ośrodka kiedy wnęki tam nie ma. Jeżeli obecność wnęki zaburza strumień fotonów w ośrodku (z powodu różnic w pochłanianiu i rozpraszaniu fotonów), to wprowadza się czynnik korygujący A .

$${}_m E_M = A \cdot \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_M}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_C} \cdot {}_m J \cdot W$$

Czynnik A wynosi 1 tylko gdy gęstości i liczby atomowe materiałów ośrodka i wnęki są jednakowe.

Dozymetria promieniowania jonizującego

Pośrednie rozmiary wnęki

Dla celów praktycznych pomiarów znaczenie mają wnęki o wymiarach porównywalnych z zasięgiem elektronów. W takim przypadku żaden z poprzednich modeli nie może być bezpośrednio stosowany. Widmo elektronów jest istotnie zakłócone obecnością wnęki i energia pochłaniana w obszarach przyściennych z pewnością nie może być zaniedbana.

Dla takich przejściowych rozmiarów nie opracowano ścisłej teorii, ale można dokonywać empirycznej wpływu wnęki na strumień elektronów.

Specjalny przypadek zachodzi gdy materiał ośrodka i wnęki ma identyczny skład atomowy a różnią się tylko gęstością.

Teoremat Fano

„W ośrodku o określonym składzie, w jednorodnym polu promieniowania pierwotnego, strumień promieniowania wtórnego jest (1) jednorodny, (2) niezależny od gęstości ośrodka i (3) niezależny od zmian gęstości ośrodka od punktu do punktu, przy założeniu, że oddziaływania promieniowania pierwotnego i wtórnego z atomami ośrodka nie zależą od jego gęstości.”

W praktyce rzadko można dobrać gaz i ścianki komory o takim samym składzie. Możliwe są konstrukcje następujących homogenicznych komór jonizacyjnych:

- etylen w polietylenie (najszersze praktyczne zastosowanie)
- acetylen w polistyrenie
- deuteroetylen w polideuteroetylenie

Pełne dopasowanie wymaga jednakowych wartości masowych współczynników pochłaniania (γ) i masowych zdolności hamowania (elektronów wtórnych). W przypadku różnych materiałów, np. mieszanin o różnych składzie, nie jest możliwe jednoczesne spełnienie obu warunków.

W rzeczywistości nawet wtedy, kiedy składy gazu i ścianek są jednakowe, trzeba wprowadzać poprawki na różnice gęstości.

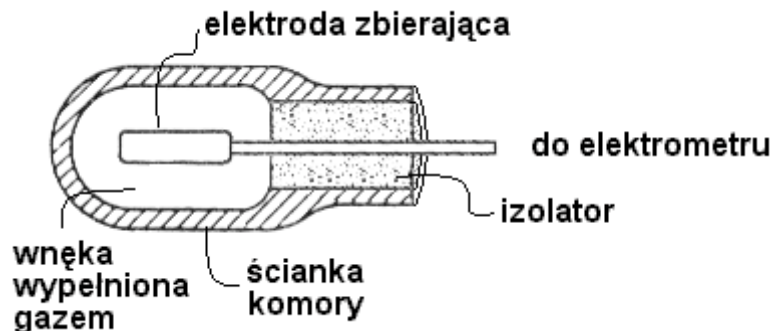
W praktyce, dla celów wyznaczenia dawki pochłoniętej w organizmie ludzkim, buduje się komory jonizacyjne z materiałów równoważnych tkance.

Na przykład twarde tkanki – kości – są dobrze symulowane przez aluminium.

Dozymetria promieniowania jonizującego

Komory jonizacyjne do pomiarów dozymetrycznych

Wnękowa komora jonizacyjna



Komory wnekowe buduje się zwykle do celów punktowych pomiarów mocy dawki lub rozkładu mocy dawki. Wtedy ich małe rozmiary są ograniczone możliwościami technologii wykonania i pomiarów bardzo małych prądów jonizacji.

Elementy projektu i konstrukcji komory jonizacyjnej

Materiał ścianki i gazu: stosuje się specjalnie opracowane tworzywa sztuczne odpowiadające powietrzu, tkance miękkiej lub kościom i dopasowane do nich mieszanki gazowe (odporne na promieniowanie). W takim przypadku, poza efektem zależności zdolności hamowania od gęstości (efekt polaryzacji), na granicy między gazem a ścianką nie ma zmian mocy dawki.

Grubość ścianek: powinna zapewnić stan równowagi wtórnych cząstek naładowanych i jednocześnie nie osłabiać wyraźnie natężenia promieniowania (krzywe wzrostu dawki – build-up curves).

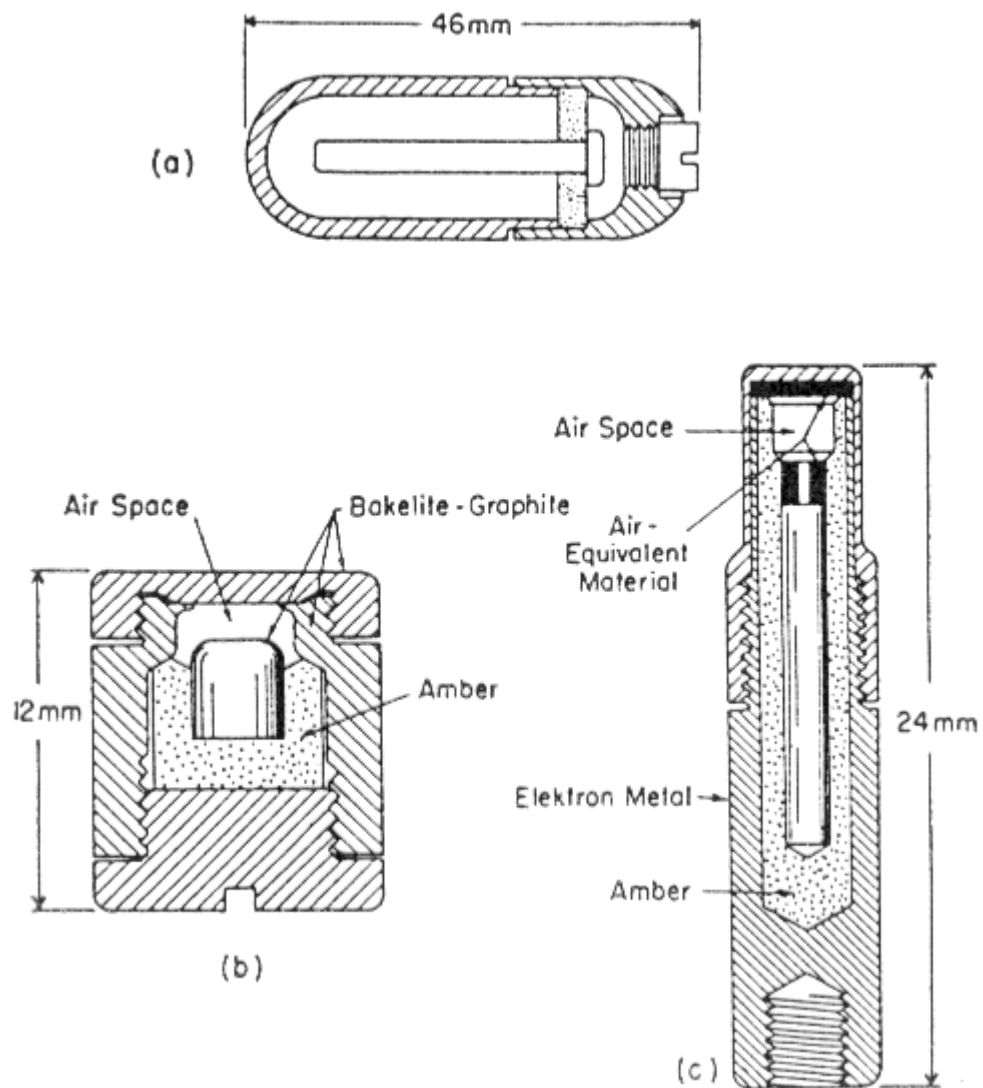
Elektrody ochronne: eliminują prądy upływu po powierzchni izolatora, kształtują objętość czynną komory (zmieniają rozkład pola elektrycznego):

- pierścienie ochronne
- drutowe elektrody kształtowania pola w komorach bezściankowych

Materiały izolacyjne: lucyt, polistyren, polietylen, nylon, teflon, mylar.

Zbieranie jonów: zapewnienie pełnego zbierania jonów.

Dozymetria promieniowania jonizującego



Wnękowe komory powietrzne

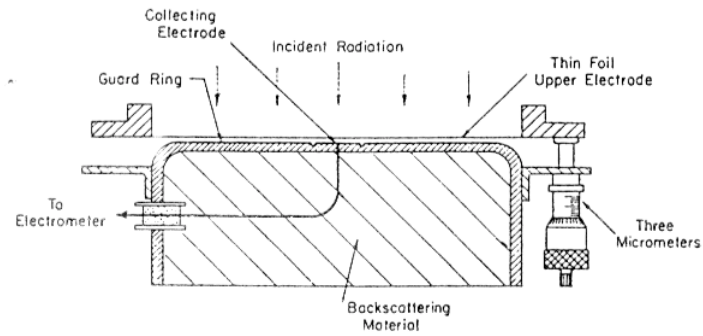
(a) – dozometr indywidualny (450 V/R)

(b) – do pomiarów w fantomach (5 – 15 V/R)

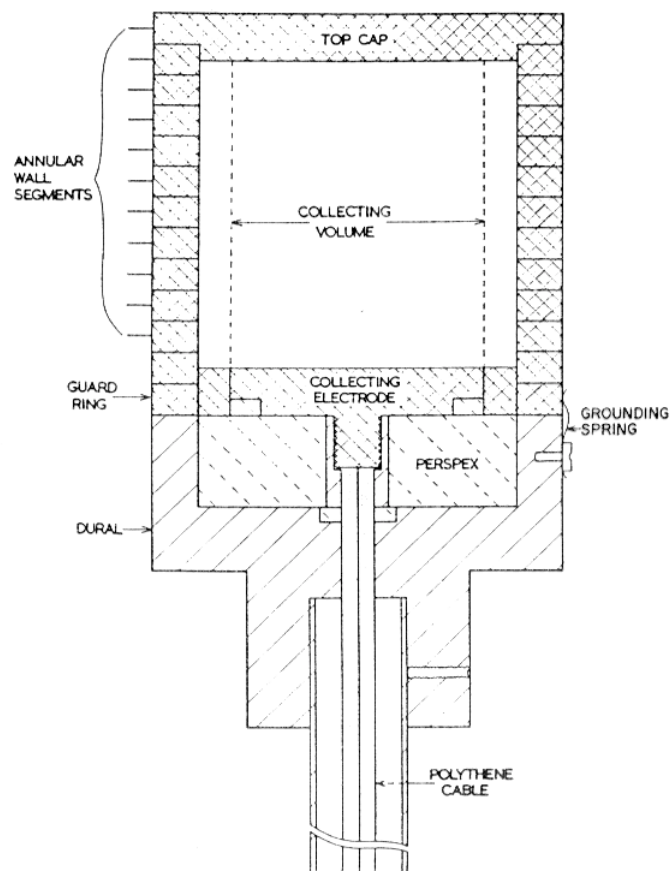
(c) – do pomiarów ekspozycji we wnękach ciała (1,5 V/R)

Dozymetria promieniowania jonizującego

Komory do celów specjalnych:

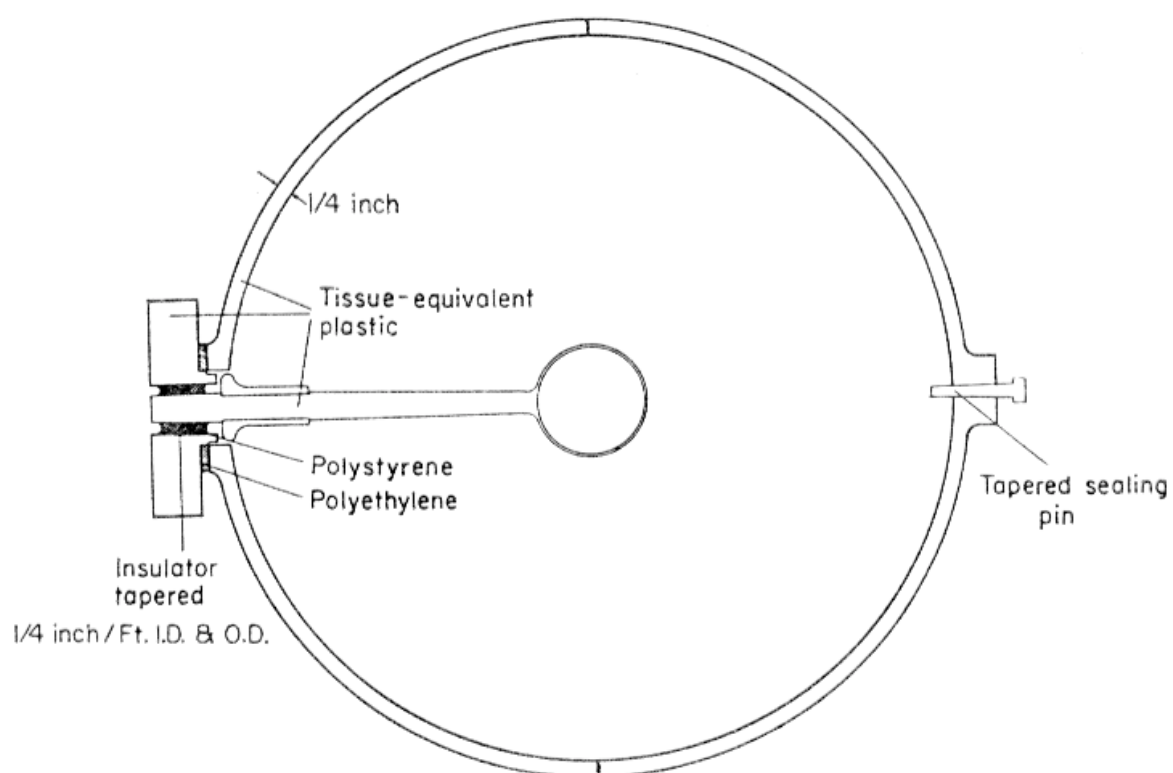


Komora o bardzo małej grubości powietrza.



Komora z jednorodnym polem elektrycznym.

Dozymetria promieniowania jonizującego



Komora sferyczna o objętości 16 l do pomiarów naturalnego promieniowania tła.

Dozymetria promieniowania jonizującego

Liczniki Geigera – Muellera i proporcjonalne

Sygnal z licznika G-M jest związany z liczbą cząstek jonizujących a nie z ich energią.

W praktyce wykorzystuje się liczniki gazowe ze względu na dużą czułość i względną prostotę budowy. Konieczna jest wtedy kalibracja w polach wzorcowych o odpowiednich charakterystykach.

Sygnal zależy od:

- materiału ścianek katody
- energii promieniowania
- kierunku i geometrii promieniowania

Licznik proporcjonalny przepływowy

