

Efekty starzeniowe w detektorach gazowych

1. Wstęp.

Mówiąc o starzeniu się detektorów gazowych należy rozumieć ogólne pogorszenie parametrów detektorów w czasie ich pracy. Nie należy ograniczać się tylko do starzenia się drutu anodowego i tworzenia na nim osadów. Z czasem pracy detektorów maleje ich wzmocnienie gazowe, pogarsza się energetyczna zdolność rozdzielcza, rosną prądy upływu na izolatorach, wzrasta częstotliwość wyładowań/iskrzeń spontanicznych. Zjawiska związane ze starzeniem są bardzo skomplikowane i zależą od wielu czynników (rodzaju gazu roboczego, rejestrowanego promieniowania, koncentracji i rodzaju zanieczyszczeń, ilości czynnika gaszącego) i dla tego samego gazu roboczego mogą różnie przebiegać w różnych licznikach. Jest dużo zmiennych od których zależy ten proces i dlatego trudno jest go, a zwłaszcza jego szybkość opisywać poprzez jedną zmienną, którą najczęściej jest wielkość zakumulowanego/zebranego ładunku na jednostkę długości anody. Prawidłowa zmienna powinna zawierać informacje o parametrach mikroskopowych gazu roboczego (rozkład energii elektronów w lawinie, energie wytwarzanych fotonów, przekroje czynne na oddziaływanie elektronów i fotonów, reaktywność chemiczną atomów, molekuł i rodników). Wielkości te w detektorze są niemierzalne. Jedyne co możemy zrobić to zmierzyć pewne systematyczne zależności i podać ich interpretację jakościową. Interpretacja ilościowa, wyjaśniająca otrzymane zależności poprzez opis zjawisk fizycznych zachodzących w detektorze jest niemożliwa. Najczęściej też oczekiwania użytkowników detektorów ograniczają się do odpowiedzi na pytanie, co zrobić aby starzenie się liczników spowolnić, zrozumienie zjawiska jest drugoplanowe, zwłaszcza że szereg wielkości mających istotny wpływ na starzenie jest poza kontrolą. Testy laboratoryjne są w innych warunkach (np. większe natężenie prądu starzenia) niż detektory pracujące w rzeczywistych eksperymentach. Niektóre wyniki chemii plazmy mogą pomóc w zrozumieniu zjawisk starzenia się liczników, aczkolwiek tylko jakościowo. Detektory gazowe pracują najczęściej przy ciśnieniu gazu ≈ 1000 mBarów a pomiary chemii plazmy są dla ciśnień kilkunastu mBarów, mieszaniny które są interesujące dla liczników, nie budzą zainteresowań fizyków plazmy. Są też wspólne regiony, zauważono, że domieszka pary wodnej, alkoholu, tlenu, DME, wodoru lub CF_4

spowalnia procesy starzenia się liczników, jak i wpływa istotnie na przebieg zjawisk w chemii plazmy [1, 2, 22].

1.1 Wpływ starzenia detektorów na wzmocnienie gazowe [3, 4].

Zmiana wzmocnienia gazowego jest wyznaczana na podstawie zmian wysokości impulsu w widmie linii Fe-55. Oznaczając przez „ k ” współczynnik wzmocnienia wzmacniacza w torze spektrometrycznym, otrzymujemy następujące wyrażenie na wysokości impulsu U , na wyjściu toru pomiarowego,

$$U = f(\tau, t_r) \times k \times (E/W) \times A$$

gdzie:

$f(\tau, t_r)$ jest współczynnikiem zależnym od stałej czasowej kształtowania impulsu i kształtu impulsu z licznika,

t_r - czas narastania tego impulsu,

E – energia deponowana w detektorze,

W – średnia wartość energii na wytworzenie pary jon – elektron w gazie roboczym,

A – wzmocnienie gazowe.

Zakładając, że kształty impulsów generowanych w liczniku są identyczne, $t_r = \text{const}$, to dla określonej energii „ E ”, mierzonej w torze pomiarowym o parametrach τ, k i W , amplituda na wyjściu tego toru jest tylko funkcją wzmocnienia gazowego,

$$U = f_1(A).$$

Większość wielkości, które opisują wzrost lawiny elektronowej w polu elektrycznym a w szczególności α/p (α – pierwszy współczynnik jonizacji Townsenda, p – ciśnienie gazu roboczego w liczniku) są funkcjami natężenia pola elektrycznego E_r . W liczniku cylindrycznym o promieniu katody r_k i promieniu anody r_a natężenie pola dane jest wzorem:

$$E_r(r) = \frac{V}{r \ln \frac{r_k}{r_a}}$$

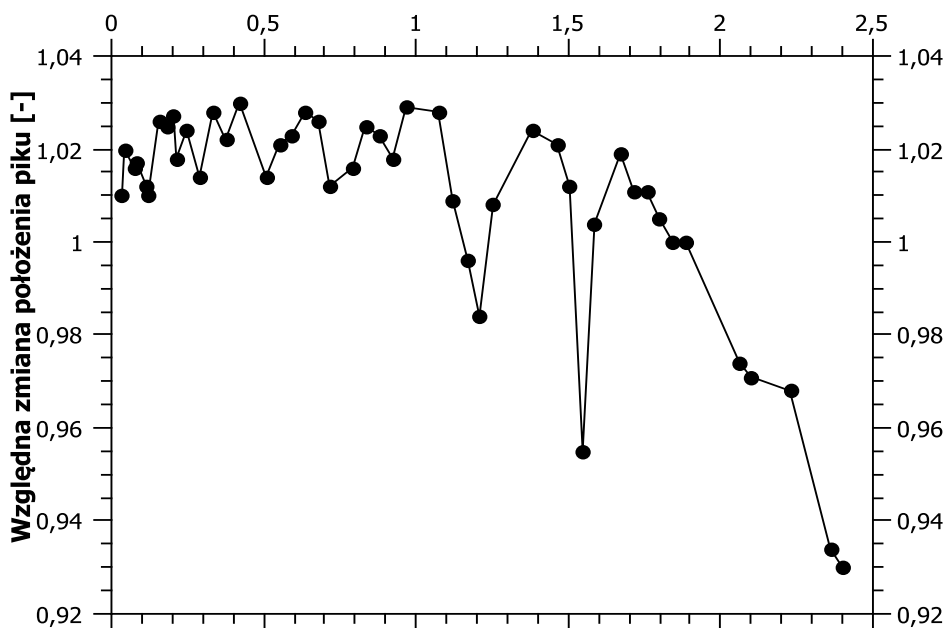
gdzie V jest napięciem polaryzacji detektora.

Otrzymujemy, że:

$$U = F(A(V, r_a)),$$

dla stałej wartości pozostałych parametrów.

Jednym z objawów starzenia się jest wzrost średnicy anody spowodowany przez zdeponowaną na niej izolującą albo przewodzącą warstwę. Prowadzi to do obniżenia wartości E_r i dużej jego niejednorodności a w konsekwencji do obniżenia wartości wzmocnienia gazowego. Np. wytworzenie warstwy o grubości $0,5 \mu\text{m}$ na anodzie o średnicy $25 \mu\text{m}$ może obniżyć wzmocnienie gazowe aż o (20 – 40%) [5]. Jeżeli warstwa jest izolatorem, anoda jest dodatkowo ekranowana, ponadto warstwa jest ładowana ujemnie. Prowadzi to do dalszej redukcji wzmocnienia gazowego przez obniżenie efektywnej różnicy potencjałów pomiędzy anodą i katodą. Przykładowe wyniki pomiarów względnych zmian wzmocnienia gazowego ((wzmocnienie gazowe w liczniku starzonym)/(wzmocnienie gazowe w liczniku niestarzonym)) jako funkcja zebranego na anodzie ładunku są przedstawione na rys. 1, 2 i 3. Szczegóły dotyczące warunków starzenia podano w podpisach rysunków. Na rys. 1 [4] widzimy, że wzmocnienie gazowe ulega obniżeniu dopiero po zebraniu ładunku ok. $1,7 \text{ C}/(\text{cm}$ długości anody). Dla mniejszego zebranego ładunku wzmocnienie gazowe jest stałe. Podobne wyniki są prezentowane w [6].

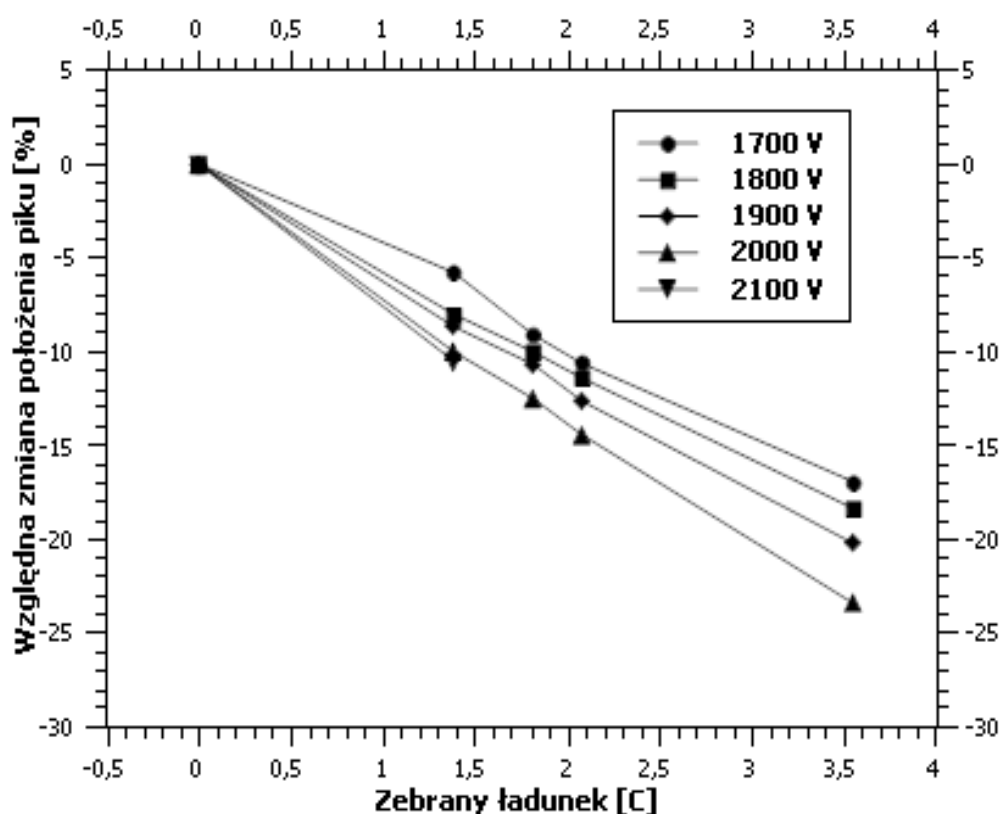


Rys. 1 Względna zmiana wysokości impulsu liczona jako stosunek amplitudy w liczniku zestarzonej do amplitudy impulsu w liczniku nowym w funkcji ładunku zebranego na jednostkę długości anody. Warunki starzenia i mieszanina $\text{Ar} + 20\%$

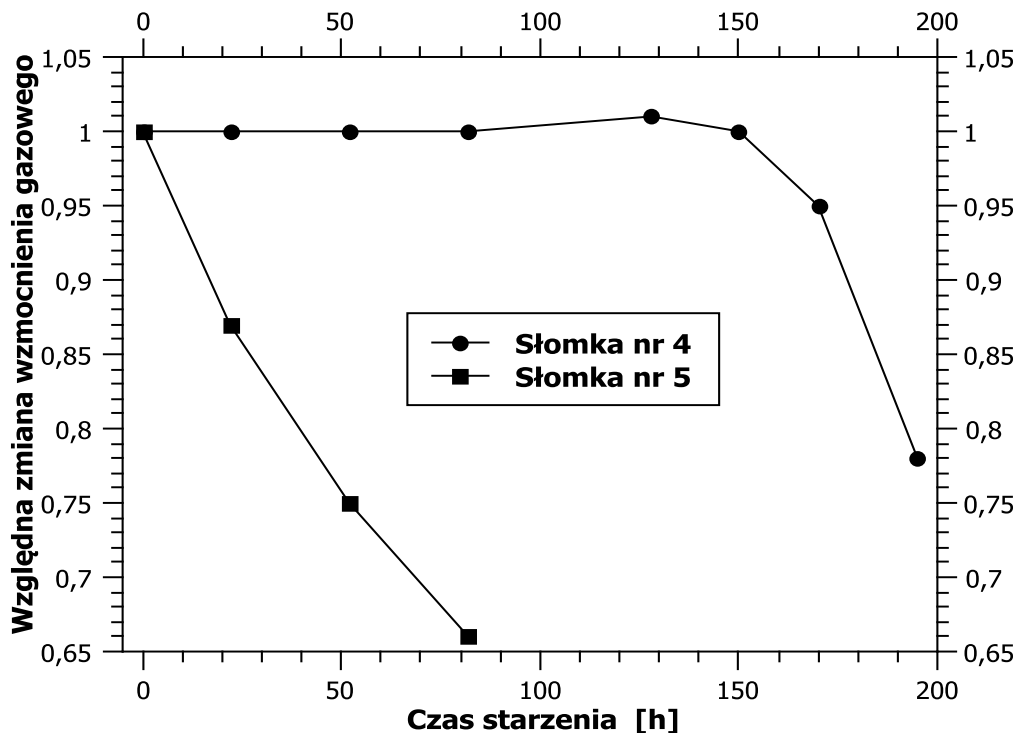
CO_2 , $r_a = 50 \mu\text{m}$, przekrój katody $6 \times 12 \text{ mm}^2$, źródło promieniowania – Cd^{109} , ciśnienie gazu roboczego $\sim 1000 \text{ hPa}$

Na rysunku 2 [3] przedstawiono inny typ zależności.

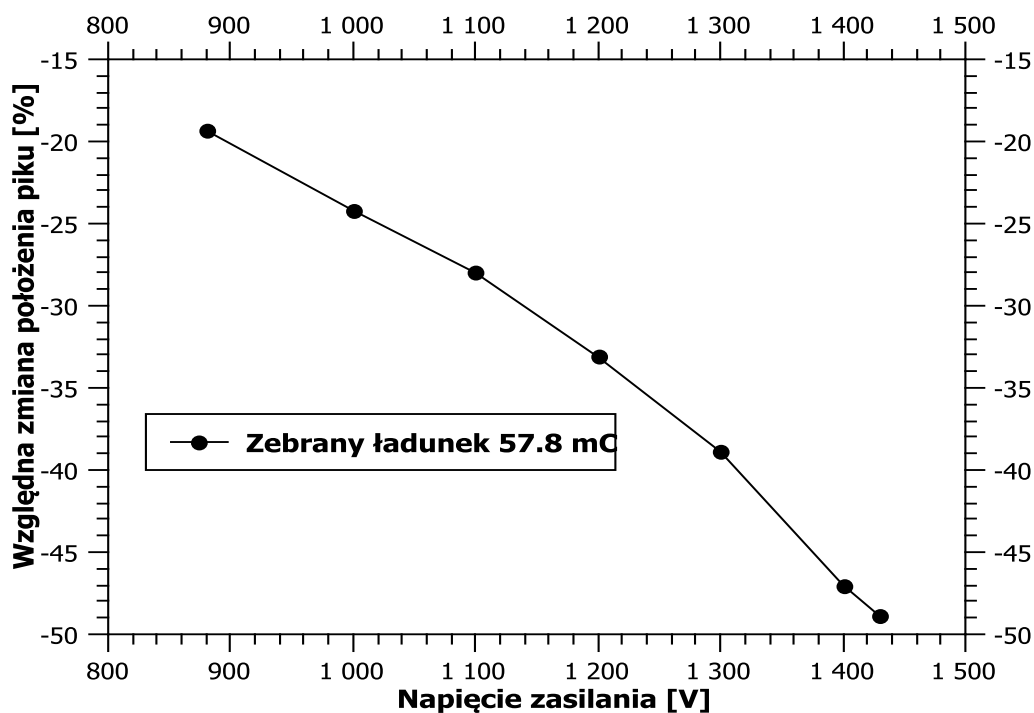
Z rys. tego widać, że względne obniżenie wzmocnienia gazowego może być liniową funkcją zebranego ładunku i efekt jest większy dla wyższych napięć zasilania. Rys. 3 [6] pokazuje, że w detektorach tego samego typu, tak samo naświetlanych można otrzymać obie powyższe zależności, że do pewnej wartości zebranego ładunku wzmocnienie gazowe jest stałe, albo że maleje liniowo wraz z zebraniem ładunkiem. Dla stałego zebranego ładunku, względna zmiana położenia pików (wzmocnienie gazowe) jest również funkcją liniową napięcia zasilania (rys. 4) [24] i zmiana szybko rośnie ze wzrostem napięcia zasilania.



Rys. 2. Względna zmiana położenia pików linii ^{55}Fe jako funkcja zebranego ładunku dla licznika proporcjonalnego zamkniętego, wypełnionego gazem roboczym Ar + izopentan, 95/5. Parametrem krzywych jest napięcie zasilania detektora.



Rys. 3 Względna zmiana amplitudy impulsów w funkcji czasu naświetlania detektorów wiązką promieniowania X o szerokości 1 mm. Detektory słomkowe połączone szeregowo. (mieszanina Ar/CO₂/CF₄, 70/10/20) [6].



Rys. 4 Względna zmiana położenia pików linii ⁵⁵Fe jako funkcja napięcia zasilania dla licznika proporcjonalnego zamkniętego napełnionego mieszaniną Ar/CO₂/N₂/Izo-pentan 70/10/10/10. Pomiary wykonane dla zebranego ładunku 57,8 mC/(cm dł. anody). Licznik starzono ⁹⁰Sr, r_a = 50 μm, r_k = 16 mm.

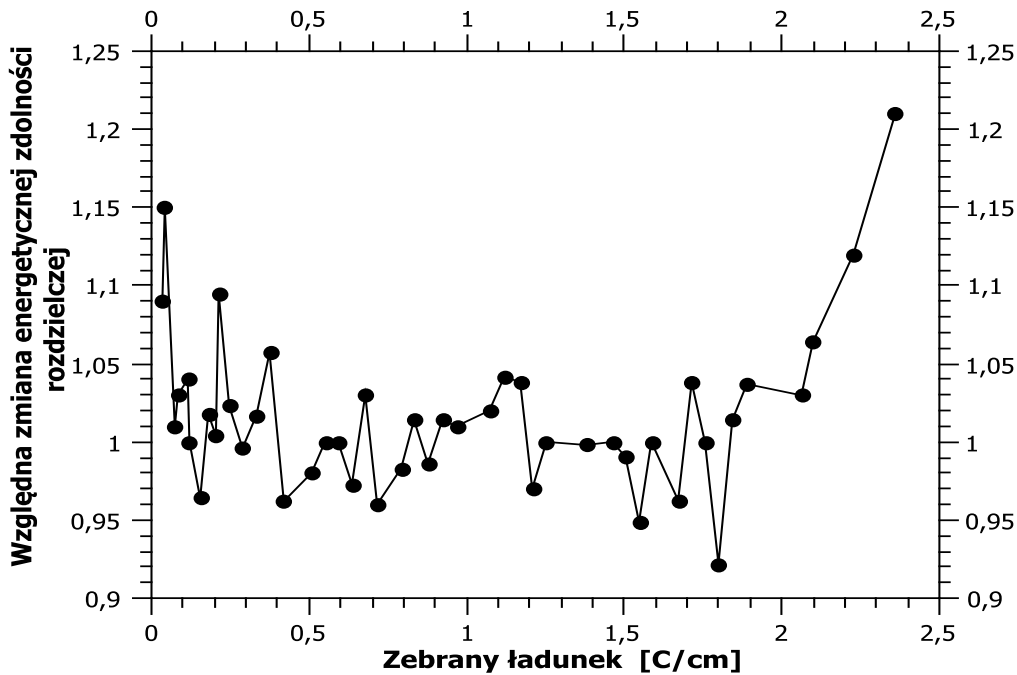
1.2 Wpływ starzenia na energetyczną zdolność rozdzielczą.

Jeżeli przyjmiemy, że miarą energetycznej zdolności rozdzielczej jest wariancja względna widma otrzymanego dla danego toru pomiarowego, to dla mono-energetycznego promieniowania o energii E , wariancja względna jest sumą trzech niezależnych składników.

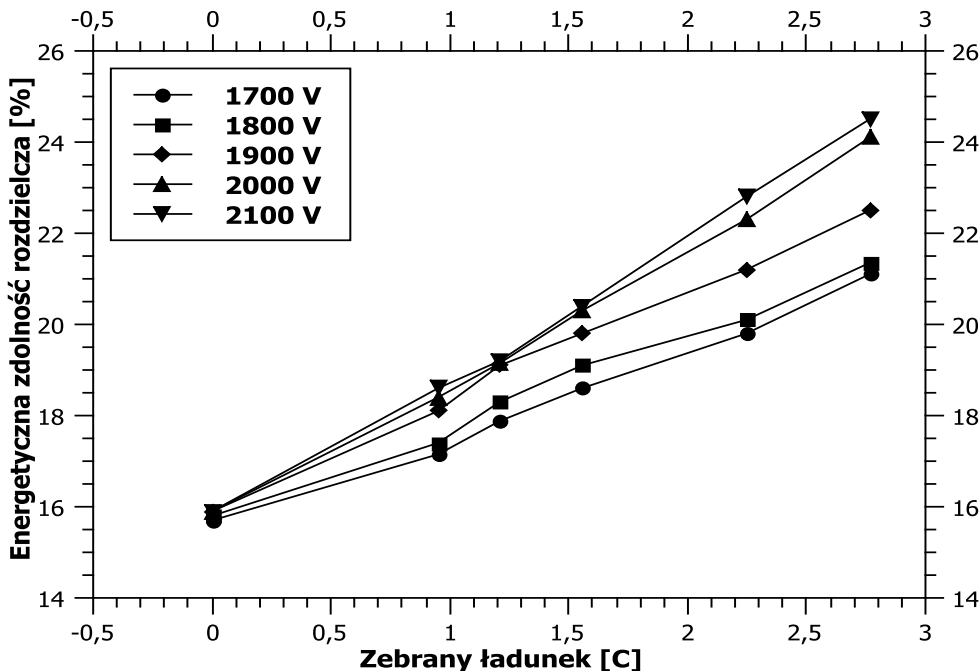
$$\left(\frac{\partial E}{E}\right)^2 = \left(\frac{\partial E_A}{E}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_n}{E}\right)^2 + \left(\frac{\partial E_0}{E}\right)^2.$$

Pierwszy składnik uwzględnia fluktuację wzmocnienia gazowego generacji ładunku w strefie mnożenia lawinowego. Drugi wyraz sumy uwzględnia fluktuację liczby par jon – elektron jonizacji pierwotnej. Te dwa wyrazy określają tzw. graniczną (najlepszą) energetyczną zdolność rozdzielczą. Szumy toru pomiarowego wnoszą dodatkowy wkład do fluktuacji amplitudy impulsu, co objawia się pogorszeniem energetycznej zdolności rozdzielczej. Jest jeszcze trzeci, statystycznie niezależny składnik, $\sigma E_0/E$ który ogranicza zdolność rozdzielczą każdego spektrometrycznego toru pomiarowego, rozrzut czasów narastania impulsów prądowych generowanych w liczniku. Różny od zera rozrzut czasów narastania impulsów jest zdeterminowany chociażby przez dyfuzję wzdłużną i poprzeczną chmury elektronów jonizacji pierwotnej zależną od względnego występowania obszarów słabych pól elektrycznych w objętości czynnej detektora. Możemy oczekiwać, że jakakolwiek deformacja pola elektrycznego w regionie mnożenia lawinowego prowadzi do poszerzenia mierzonego widma. Wzrasta zarówno względna wariancja wzmocnienia gazowego (pierwszy składnik powyższej sumy) jak i rozrzut czasów narastania generowanych impulsów (trzeci składnik sumy).

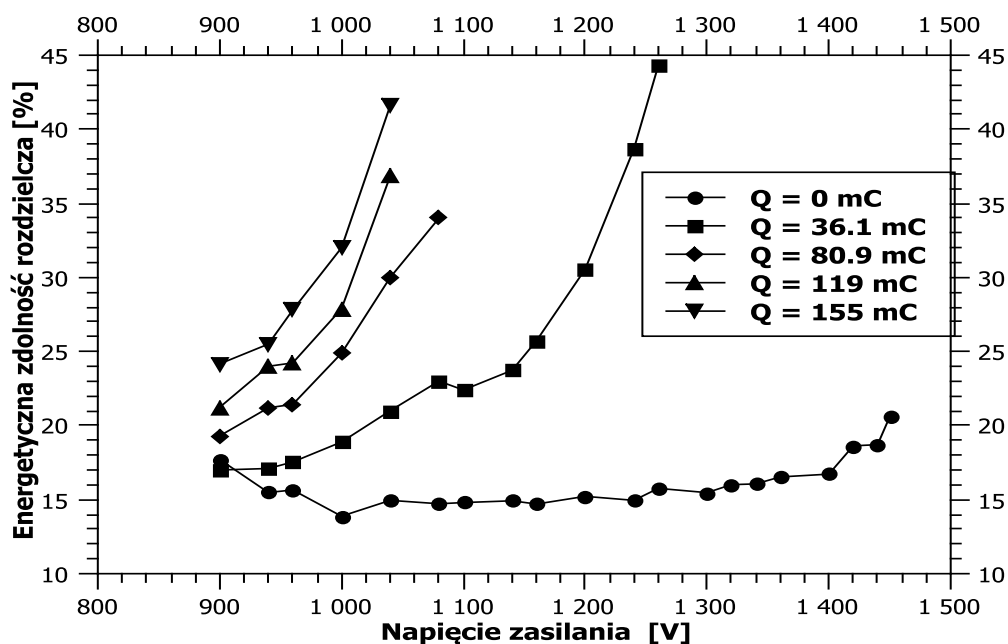
Formowanie się warstw przewodzących lub z izolatora na anodzie licznika jest głównym efektem jego długotrwałej ekspozycji na promieniowanie. Obecność warstwy prowadzi do lokalnej deformacji pola elektrycznego. Prowadzi to do degradacji energetycznej zdolności rozdzielczej i skrócenia długości jej plateau w funkcji zebranego ładunku na jednostkę długości anody (pokazano na rys. nr 5a, 5b i 6). Widać, że energetyczna zdolność rozdzielcza pogarsza się dopiero po zebraniu pewnej wartości ładunku (rys. 5a) pogarsza się liniowo wraz z zebraniem ładunkiem (rys. 5b) a jej plateau skraca się (rys. 6). Dla nowych liczników jego długość wynosi ok. 500 V, gdy dla zestarzanych plateau praktycznie nie istnieje.



Rys. 5a Względna zmiana energetycznej zdolności rozdzielczej liczona jako stosunek energetycznej zdolności rozdzielczej licznika zestarzonego do energetycznej zdolności rozdzielczej licznika nowego w funkcji zebranego ładunku, dla stałego napięcia zasilania: Pozostałe parametry starzenia jak na rys. 1. Widać, że energetyczna zdolność rozdzielcza nie ulega zmianie do wartości zebranego ładunku na jednostkę długości ok. 1,8 C/cm [4].



Rys. 5b. Wartość energetycznej zdolności rozdzielczej w funkcji zebranego ładunku, dla różnych napięć zasilania. Energetyczna zdolność rozdzielcza pogarsza się liniowo, z zebraniem ładunkiem, nawet dla niewielkich wartości zebranego ładunku [25].



Rys. 6 Energetyczna zdolność rozdzielcza linii Mn K_{α} (źródło ^{55}Fe) w funkcji napięcia zasilania dla różnych wartości zebranego ładunku. Warunki starzenia: gaz roboczy Ar/CO₂/N₂/Izo-pentan, 70/10/10/10, $r_a = 50 \mu\text{m}$, $r_k = 16 \text{mm}$, źródło ^{90}Sr . Już dla zebranego , ładunku 36,1 mC następuje wyraźne pogorszenie energetycznej zdolności rozdzielczej i skrócenie długości jej plateau [23].

1.3 Wpływ starzenia na efekt częstościowy.

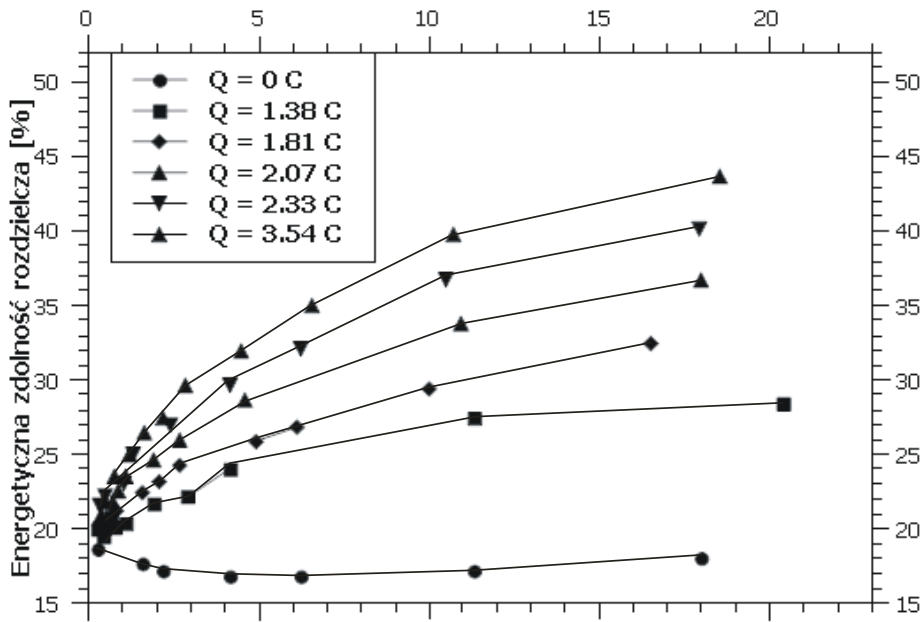
Licznik proporcjonalny nie ma czasu martwego. Wzrost częstości rejestrowanego promieniowania prowadzi do niekorzystnych zmian parametrów licznika takich jak położenie pików w widmie i energetyczna zdolność rozdzielcza. Stwierdzono, że pik ulega przesunięciu w stronę niższych energii a zdolność rozdzielcza pogarsza się ze wzrostem natężenia rejestrowanego promieniowania. Te niekorzystne zmiany są właśnie efektem częstościowym. Są cztery, różne koncepcje próbujące wyjaśnić zmiany położenia pików, przy zmianie częstości promieniowania. Wg Hendricks'a [8] obniżenie amplitudy na wyjściu toru pomiarowego jest spowodowane obniżeniem wzmocnienia gazowego w detektorze. Wolno poruszające się jony dodatnie w strefie mnożenia lawinowego ekranując anodę obniżają wartość pola elektrycznego. Spielberg i Tsarnass [9] zasugerowali, że wokół anody tworzy się luźno związana warstwa polarnych molekuł albo fragmentów molekuł pary gaszącej. Powoduje to efektywny wzrost średnicy anody co przy stałym napięciu zasilania powoduje obniżenie wzmocnienia gazowego (albo obniżenie

efektywnego potencjału polaryzacji detektora przez cząstki polarne zgromadzone wokół anody). W obu tych koncepcjach jakość powierzchni anody i jej średnica są istotne i mogą znacząco wpływać na wielkość zmian położenia pików. Wg Mahes'a [10, 11] obniżenie położenia pików spowodowane jest quasi – kolumnową rekombinacją elektronów jonizacji pierwotnej i rekombinacją objętościową blisko anody w obrębie lawiny elektronowej. Oba efekty obniżają ilość elektronów docierających do anody. Bednarek [12, 13] pokazał, że wzmocnienie gazowe jest stałe w szerokim zakresie natężeń rejestrowanego promieniowania. Obserwowana zmiana amplitudy impulsu spowodowana jest zmianą wartości średniej czasów narastania impulsów generowanych w liczniku a rozrzut tych wartości powoduje pogorszenie energetycznej zdolności rozdzielczej. Aby określić wpływ starzenia detektora na jego pracę przy wysokich natężeniach rejestrowanego promieniowania, wykonano następujące pomiary:

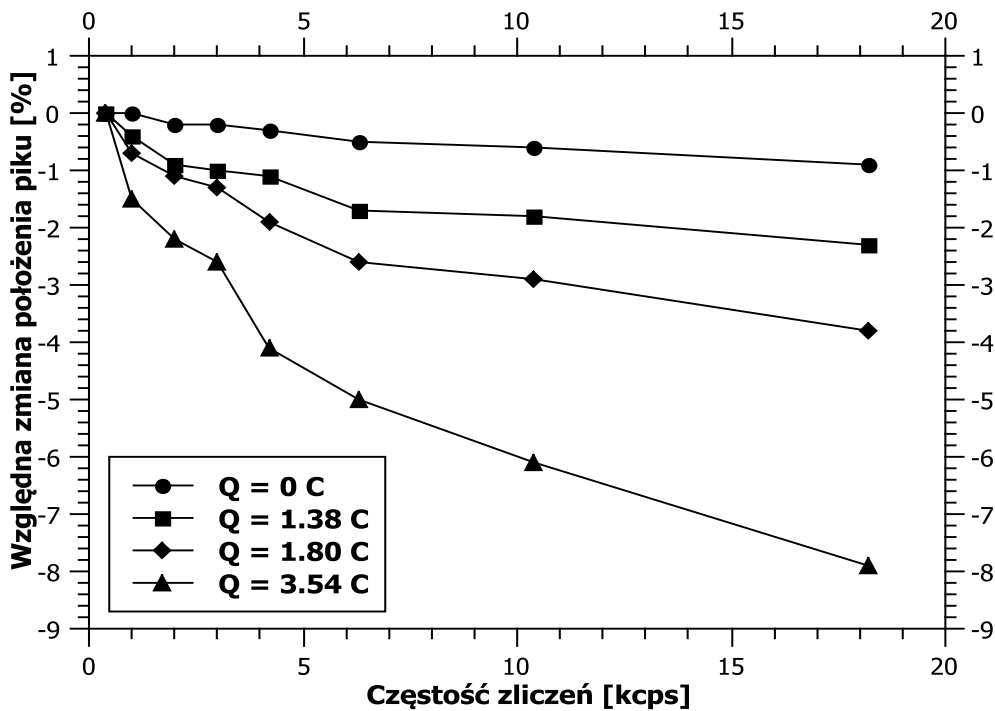
- zmierzono energetyczną zdolność rozdzielczą w funkcji natężenia rejestrowanego promieniowania dla różnych wartości ładunku zebranego przez licznik,
- zmierzono zmiany położenia pików linii $MnK\alpha$ w funkcji Q ,
- zmierzono kształty widm w czasie starzenia.

Wybrane wyniki są pokazane na rys. 7 i 8. Energetyczna zdolność rozdzielcza, ER , dla nowego licznika słabo zależy od częstości rejestrowanego promieniowania ale mocno zależy dla liczników zestarzonych. Np. dla strumienia fotonów ok. 10 kcps, $ER = 16\%$ dla licznika nowego, dla zebranego ładunku $Q = 1,38 C$, $ER = 26\%$ a dla $Q = 3,54 C$, $ER = 38\%$. Tak samo, względna zmiana położenia pików, w funkcji natężenia promieniowania silnie zależy od stopnia zestarzenia licznika, dla licznika nowego względna zmiana położenia pików linii ^{55}Fe wynosi tylko – 0,8%, a po zebraniu ładunku $Q = 3,54 C$ aż - 8% czyli jest aż 10 razy większa. Na rys. 9 pokazano zmiany kształtu widma dla różnych natężeń rejestrowanego promieniowania, I , ale dla tej samej wartości zebranego ładunku, $Q = 1,47 C$.

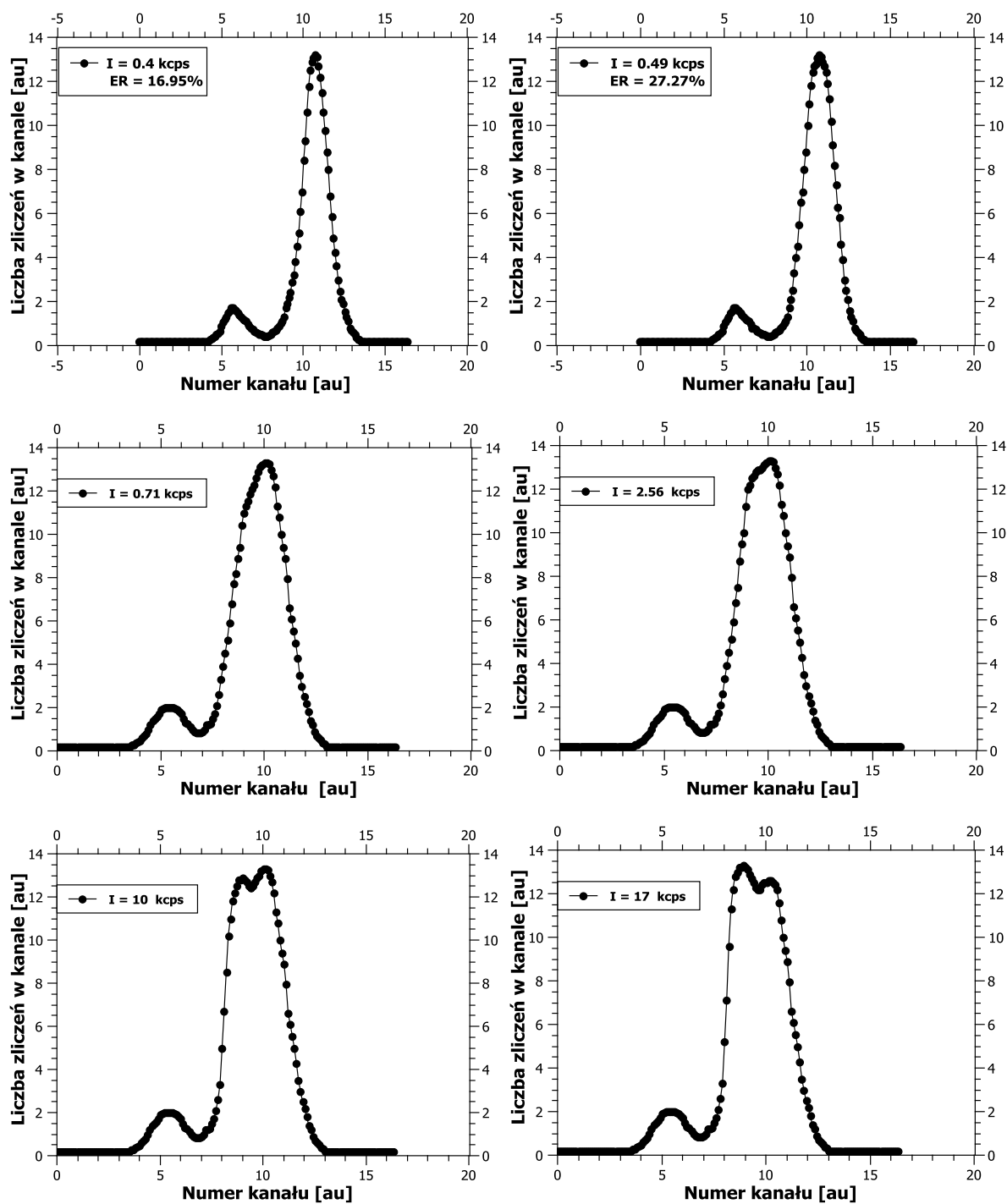
Należy podkreślić, że dla $I \sim 400$ cps, $ER \sim 17\%$, dla $I \sim 500$ cps, $ER \sim 27\%$ (licznik jest nadal dobry) a dla $I \sim 710$ cps drugi pik już zaczyna się pojawiać. Z rys. 7, 8 i 9 widać, że liczniki, które dla $I \sim 1$ kcps wykazują już objawy zestarzenia, mogą nadal prawidłowo pracować przy $I \sim 400$ cps. Efekt częstościowy silnie zależy od stopnia zestarzenia licznika i jego wzrost może być jego pierwszym symptomem.



Rys. 7 Energetyczna zdolność rozdzielcza jako funkcja częstości zliczeń, dla stałego napięcia zasilania detektora i różnych wartości zebranego ładunku.



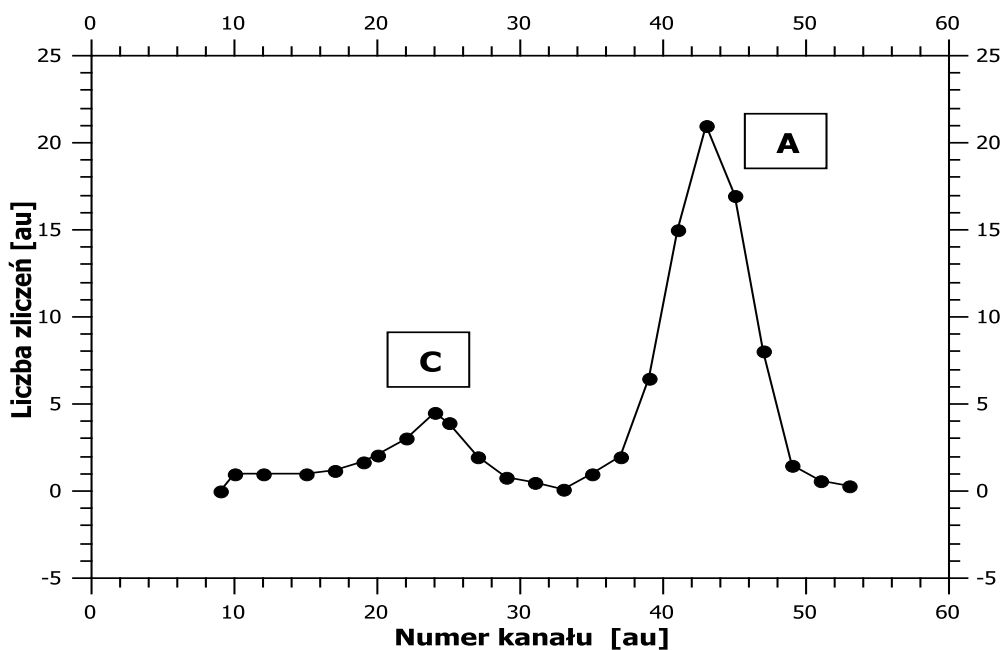
Rys. 8 Względna zmiana wysokości impulsu w funkcji natężenia rejestrowanego promieniowania, dla stałego napięcia polaryzacji detektora i różnych wartości zebranego ładunku. Wysokość impulsu przy danej częstości odnoszono do wysokości impulsu przy częstości rejestrowanego promieniowania poniżej 400 cps.



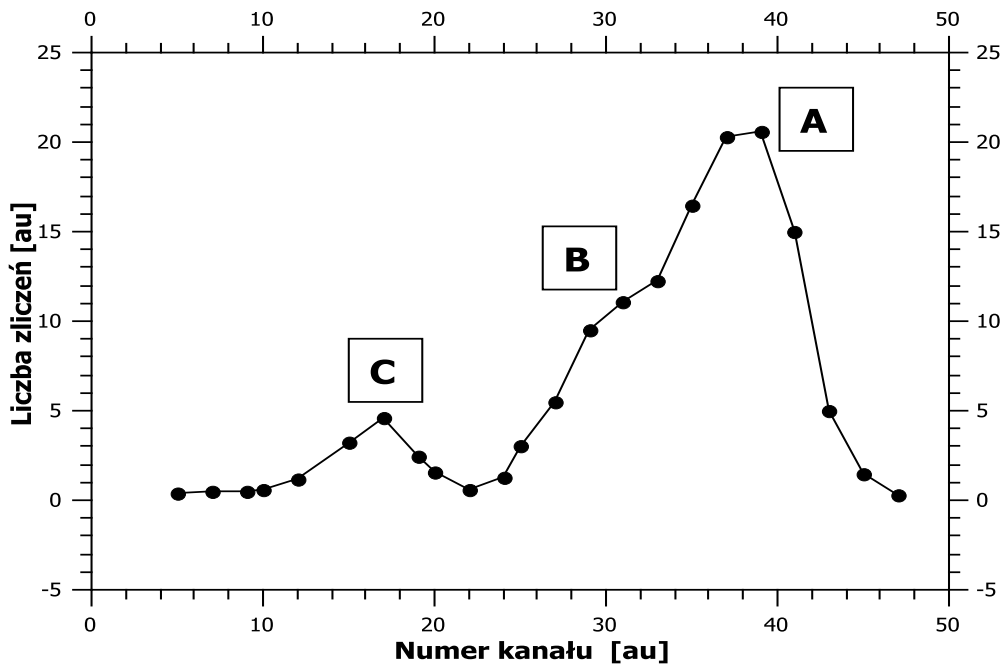
Rys. 9 Kształt widma, dla zebranego ładunku 1,47 C i stałego napięcia zasilania $HV = 2100$ V i różnych częstości rejestrowanego promieniowania I . Należy zwrócić uwagę, na pojawiający się od lewej strony drugi pik.

1.4 Wpływ starzenia na kształt widma.

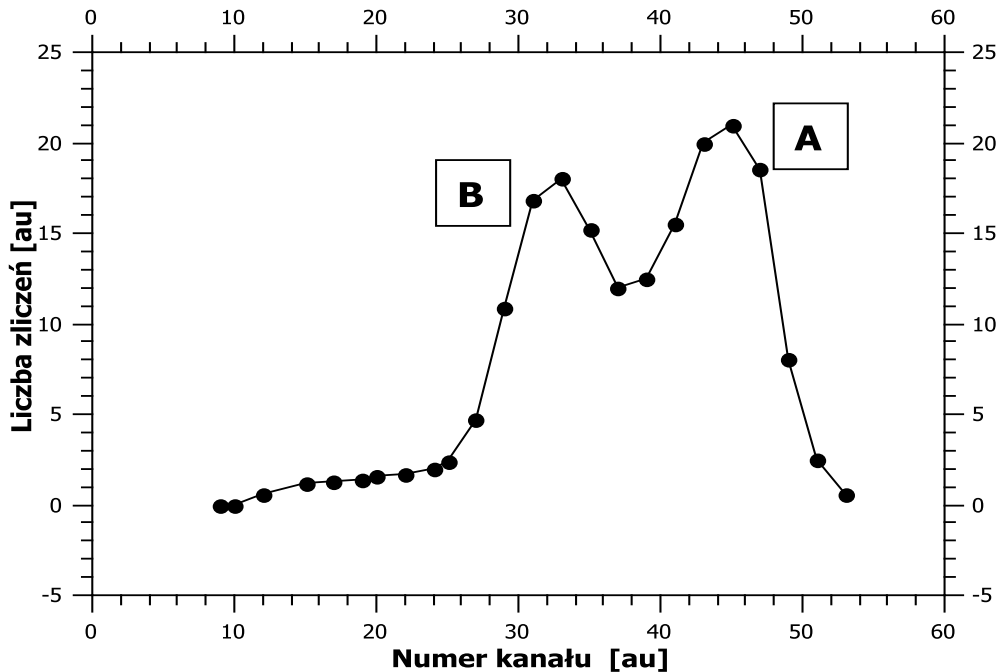
Zmiany położenia pików i energetycznej zdolności rozdzielczej są określane na podstawie zdejmowanych widm dla określonej energii, najczęściej dla źródła promieniowania ^{55}Fe . Na rys. 10 i 11 pokazane są typowe zmiany kształtów widm w czasie starzenia [14, 15, 16 i 26]. Kształt pików linii ^{55}Fe zmienia się jak pokazano na kolejnych widmach na rys. 10 (a - d). Pierwotnie pik główny „A” obniża się o kilka procent/(1,6 mC/(mm dł. anody)), pik wykazuje wyraźną asymetrię lewej strony, aż pojawia się drugi pik „B” przy zebranych ładunku (1,6 – 3,2) mC/(mm dł. anody). Drugi pik „B” przesuwa się w stronę niższych energii a liczba zliczeń pod nim maleje. Zmiany położenia pików „A” i „B” odzwierciedlają zmiany wzmocnienia gazowego. W liczniku pojawiają się obszary, w których wzmocnienie gazowe jest niższe. Wielkość tych obszarów rośnie wraz ze wzrostem zebranego przez licznik ładunku. Obszar słabego pola elektrycznego staje się dominujący (rys. 10 d). Inny przebieg zmian kształtu mierzonego widma pokazano na rys. 11. W tym przypadku pik też przesuwa się w stronę niższych energii, ale obserwujemy deformację pików z prawej strony, od strony wyższych energii. W liczniku „nagle” pojawia się dominujący obszar słabszego pola elektrycznego. Pik „B” staje się pikiem dominującym. To, że widma psują się w trakcie pracy licznika jest naturalne i zrozumiałe. Istnienie dwóch pików jest niejasne, oznacza ono, że w liczniku są wyraźnie wydzielone dwa obszary o różnych wzmocnieniach gazowych.



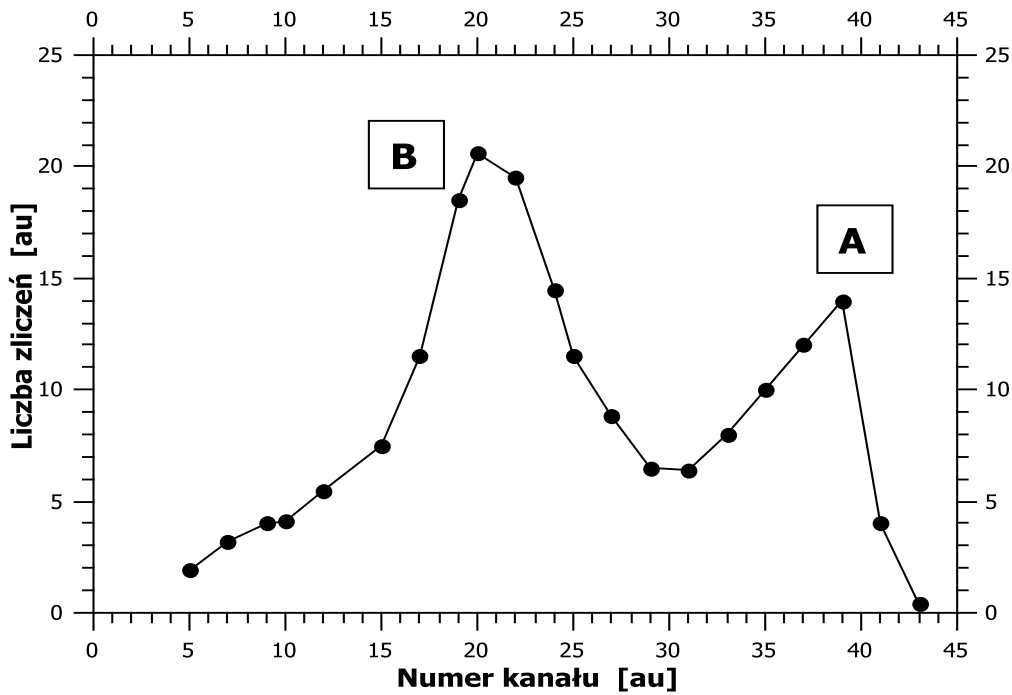
Rys. 10 a Widmo z licznika nowego, dla źródła ^{55}Fe . Licznik napełniony mieszaniną roboczą na bazie Ar. A - pik główny, C – pik ucieczki.



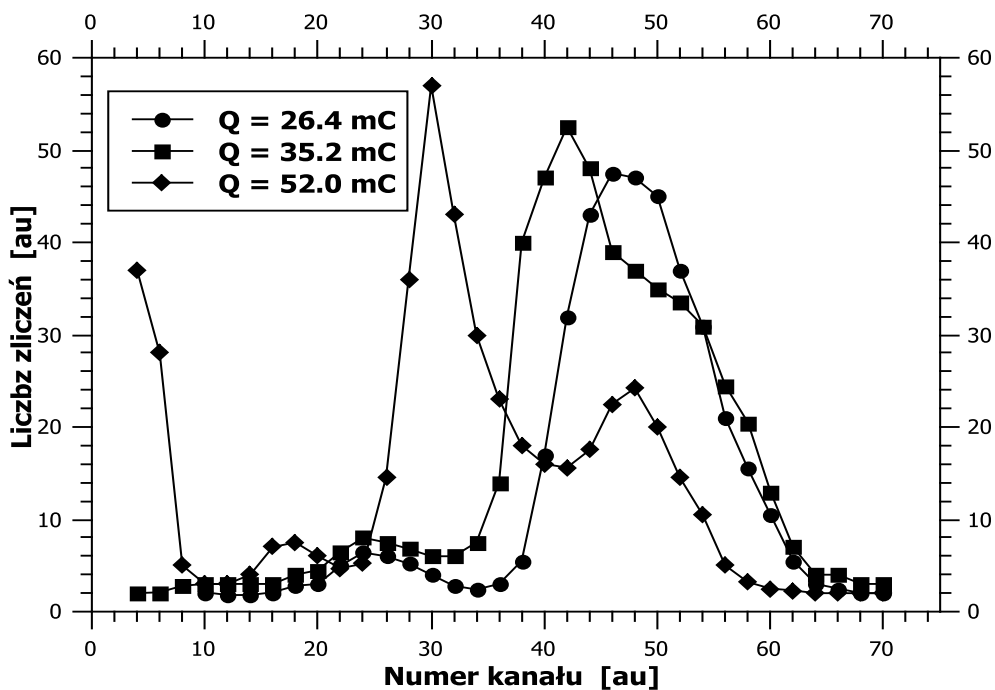
Rys. 10 b Widmo z licznika, który zebrał ładunek ok. 1,6 mC/(mm dł. anody). Pik główny A przesunął się z 44# (rys. 10a) do 38#. Pojawia się wyraźna deformacja po lewej stronie piku A.



Rys.10c Pik B wyraźnie wydzielony. Zebrany ładunek ok. 3 mC/(mm. dł anody). Pik ucieczki C niewidoczny.



Rys. 10 d Pik B jest pikiem dominującym. Obserwujemy wyraźnie rozdzielone dwa piki.



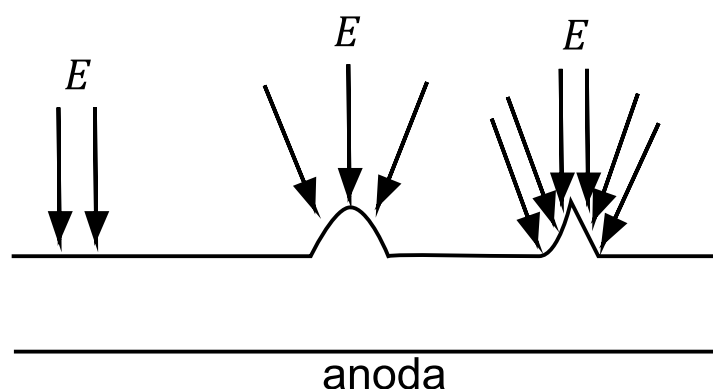
Rys. 11 Zmiana kształtu impulsu dla różnych wartości zebranego ładunku Q . Obserwujemy deformację z prawej strony piku. Dla $Q = 52.0 \text{ mC}$ obserwujemy znaczny wzrost "małych impulsów" tuż nad progiem dyskryminacji.

2. Efekty starzeniowe na anodzie licznika.

Otoczenie anody w licznikach można rozpatrywać jako obszar plazmy pod ciśnieniem 0,1 MPa. Lawiny elektronowe mogą produkować molekuły różnego typu, energia dysocjacji wielu organicznych par gaszących jest zwykle (2 – 5) razy mniejsza niż energia potrzebna do zjonizowania danej molekuly. W czasie dysocjacji powstają wolne rodniki, które zostają przyciągane do powierzchni anody przez gradient pola elektrycznego. Są one bardzo aktywne chemicznie, chętnie rekombinują tworząc molekuły, z których powstały lub zupełnie inne, poprzez etapy takie jak [2]:

- inicjacja – molekułą wyjściową jest cząsteczka pary gaszącej, z której pod wpływem elektronu z lawiny lub fotonu tworzą się reaktywne fragmenty, wolne rodniki,
- propagacja – polimer zaczyna się tworzyć, może on zacząć narastać w gazie, następnie dyfundować do elektrody i zostać do niej przyłączony, gdzie nadal rośnie, może też zacząć rosnąć dopiero po przyłączeniu do anody, jeżeli fragmenty polimeru są zjonizowane, są wówczas przyciągane do elektrod przez pole elektryczne,
- zakończenie – fragmenty rosną aż przyłączą rodniki, tak by wszystkie elektrony były sparowane, powoduje to spadek reaktywności, polimer staje się stabilny, polimer taki może później zacząć ponownie rosnąć po zderzeniu z elektronem, jonem lub fotonem, jeśli spowoduje ono rozerwanie wiązania między atomami węgla.

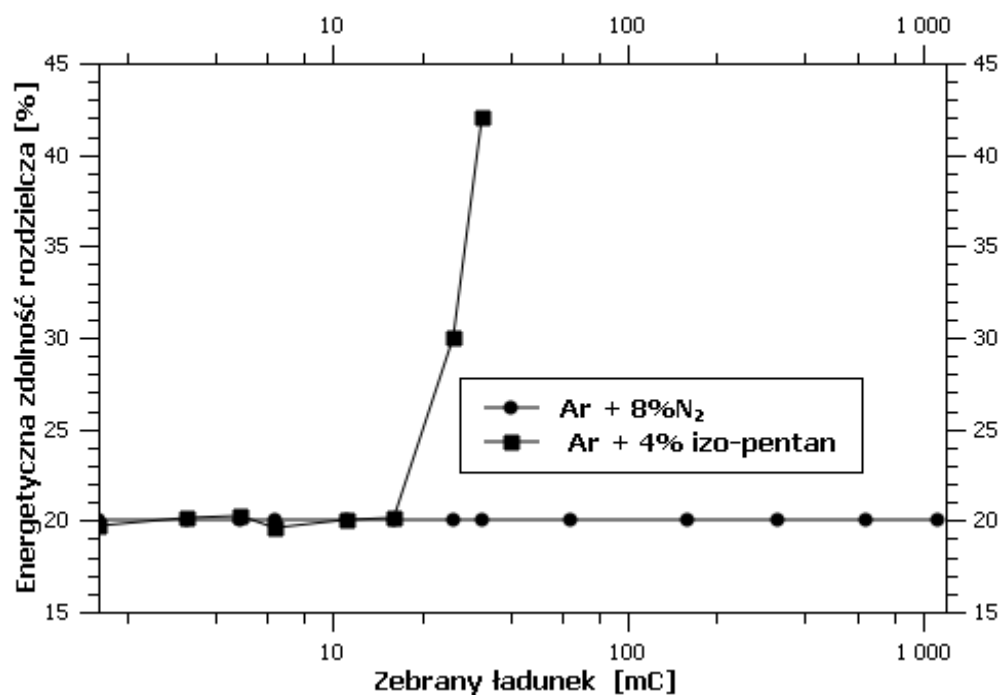
Powierzchnia anody nie jest idealna, zawsze występują na niej lokalne defekty, wżery lub piki. Natężenie pola elektrycznego jest proporcjonalne do r^{-2} , gdzie r jest promieniem lokalnej deformacji krzywizny. Średnia wartość natężenia pola na anodzie, przy wzmocnieniu gazowym $\sim 10^4$, wynosi ok. (300 – 400) kV/cm. Linie pola koncentrują się głównie na wierzchołkach lokalnych nierówności, pików, na których natężenie pola może być kilka razy wyższe (rys. 12).



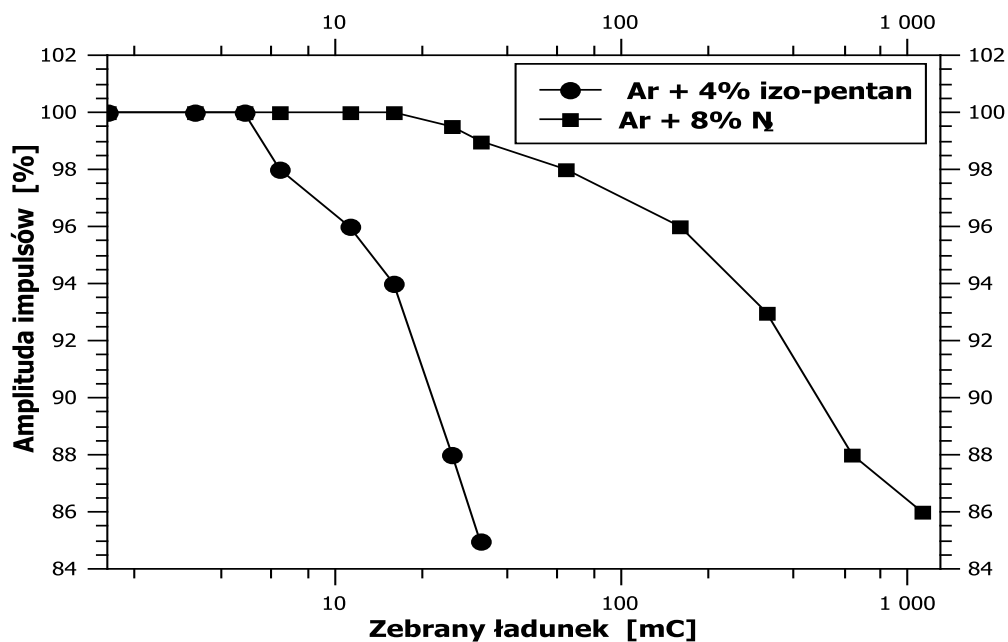
Rys. 12 Obrazowe przedstawienie zagęszczenia linii pola elektrycznego E na lokalnych nierównościach anody.

Dlatego też większość elektronów i ujemnie naładowanych polimerów wygenerowanych w lawinie dociera do anody w tych właśnie miejscach. Proces tworzenia warstwy polimeru zaczyna się na wierzchołkach pików i nierówności, w miejscach o najwyższym natężeniu pola elektrycznego. Włókna polimerowe tworzą sieć punktowych, lokalnych defektów na powierzchni, rozmieszczonych niejednorodnie. Ponadto, prawdopodobieństwo, że naładowany polimer po neutralizacji przyklei się do anody jest małe i zależy od jego prędkości, a ta rośnie ze wzrostem natężenia pola. Po wytworzeniu pierwszej monowarstwy polimeru, prawdopodobieństwo przyklejania się kolejnych polimerów gwałtownie rośnie powodując szybki wzrost grubości warstwy na anodzie.

Średnia energia elektronów w lawinie wynosi ok. (10 – 15) eV, co oznacza bardzo wysoką lokalną temperaturę. Energia elektronów bombardujących anodę, szczególnie na nierównościach może osiągnąć wartość nawet kilkaset eV. Powierzchnia anody jest polerowana, rośnie średni promień lokalnych nierówności i maleje różnica ich wysokości. Linie pola elektrycznego są rozłożone na większej powierzchni, lokalne natężenie pola a więc i prędkości naładowanych polimerów są niższe. Duża ilość polimerów jest potrzebna aby wytworzyć ciągłą warstwę na znacznie większej powierzchni wierzchołka nierówności. Efekty starzeniowe występują wówczas dopiero po zebraniu odpowiedniego ładunku. (rys. 13 i 14) [15].



Rys. 13 a



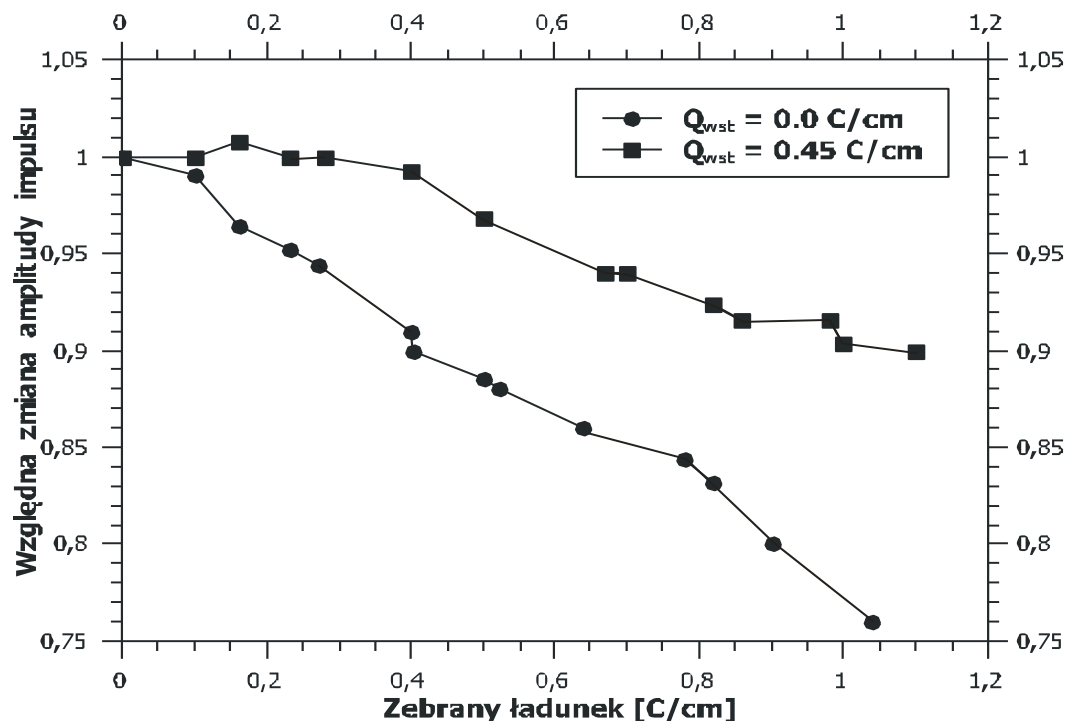
Rys. 13 b

Rys. 13 a,b. Zależność energetycznej zdolności rozdzielczej (rys. 13a) i amplitudy impulsów (rys. 13b) od zebranego ładunku na jednostkę długości anody. Widać, że zarówno energetyczna zdolność rozdzielcza jak i położenie piku zmieniają się dopiero po zebraniu pewnej wartości ładunku.

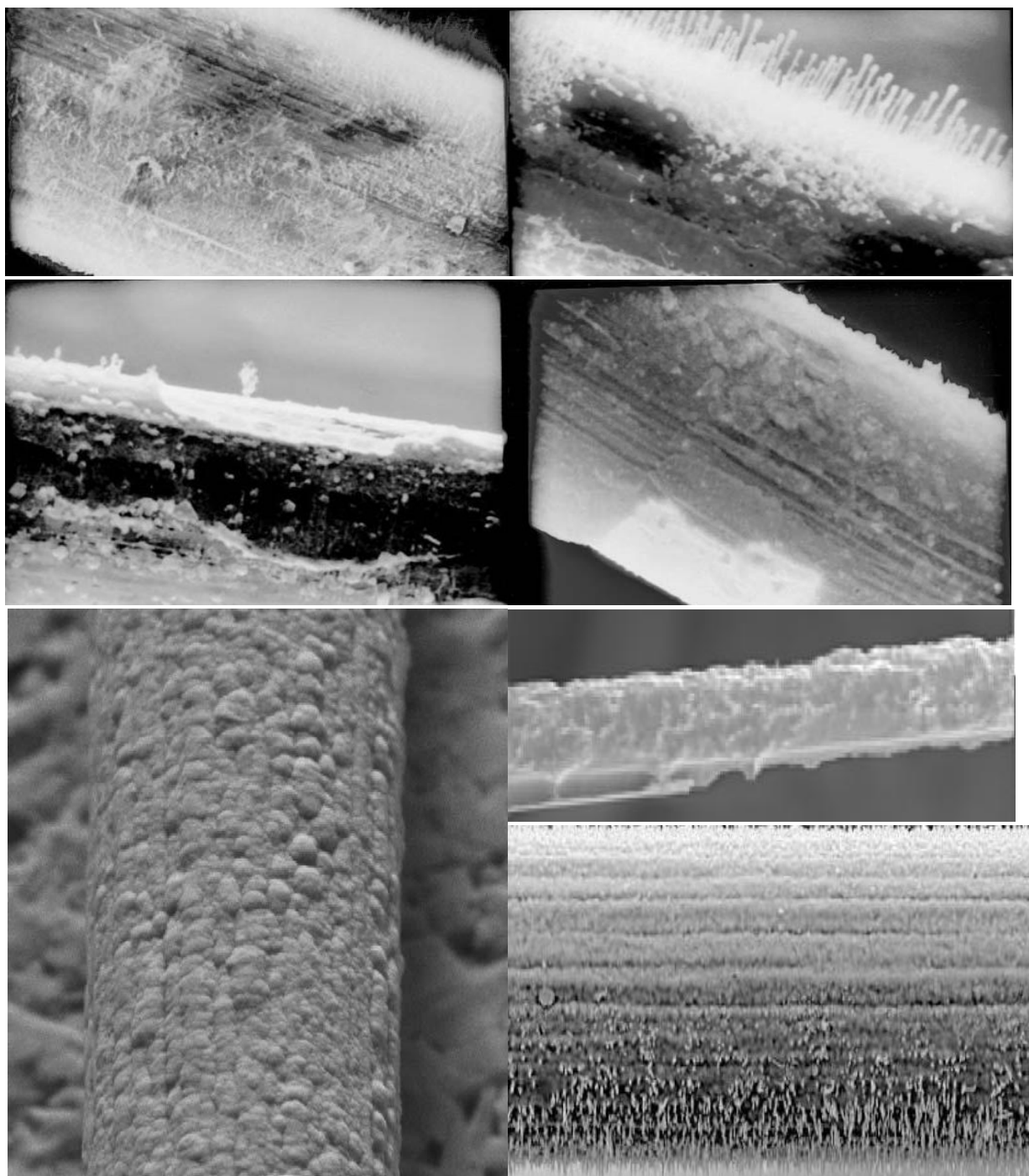
Tworzenie się warstwy polimeru zaczyna się na powierzchni wierzchołków nierówności, w miejscach o największym natężeniu pola elektrycznego. W miejscach tych występuje też największa produkcja polimerów na jednostkę powierzchni anody, a więc i szybkość wzrostu grubości warstwy na anodzie. W ten sposób, po zebraniu odpowiedniej dawki promieniowania otrzymujemy na anodzie warstwę (nić polimeru) o grubości (długości) proporcjonalnej do ilości linii pola skoncentrowanych na linii polimeru (wiskersie), która rośnie ze wzrostem jego długości. Średnica obszaru zbierania linii pola jest z dobrym przybliżeniem równa długości wiskersa. Po zebraniu pewnej dawki praktycznie wszystkie linie pola i wygenerowane w lawinie elektronowej polimery są zbierane na końcach wiskersów i wzrost warstwy na drucie anodowym i wiskersach o mniejszej długości nie zachodzi. W wyniku tego efektywny promień anody a więc i obniżenie wzmocnienia gazowego zależy od długości wiskersów i ich liczby na jednostkę powierzchni anody.

Zdjęcia zestarzanych anod (najbardziej typowe depozyty) pokazano na rys. 15. We wszystkich przypadkach stwierdzono istnienie warstwy polimeru na powierzchni drutu. Włókna w warstwach mają różne kształty. Powyższy model wzrostu włókna

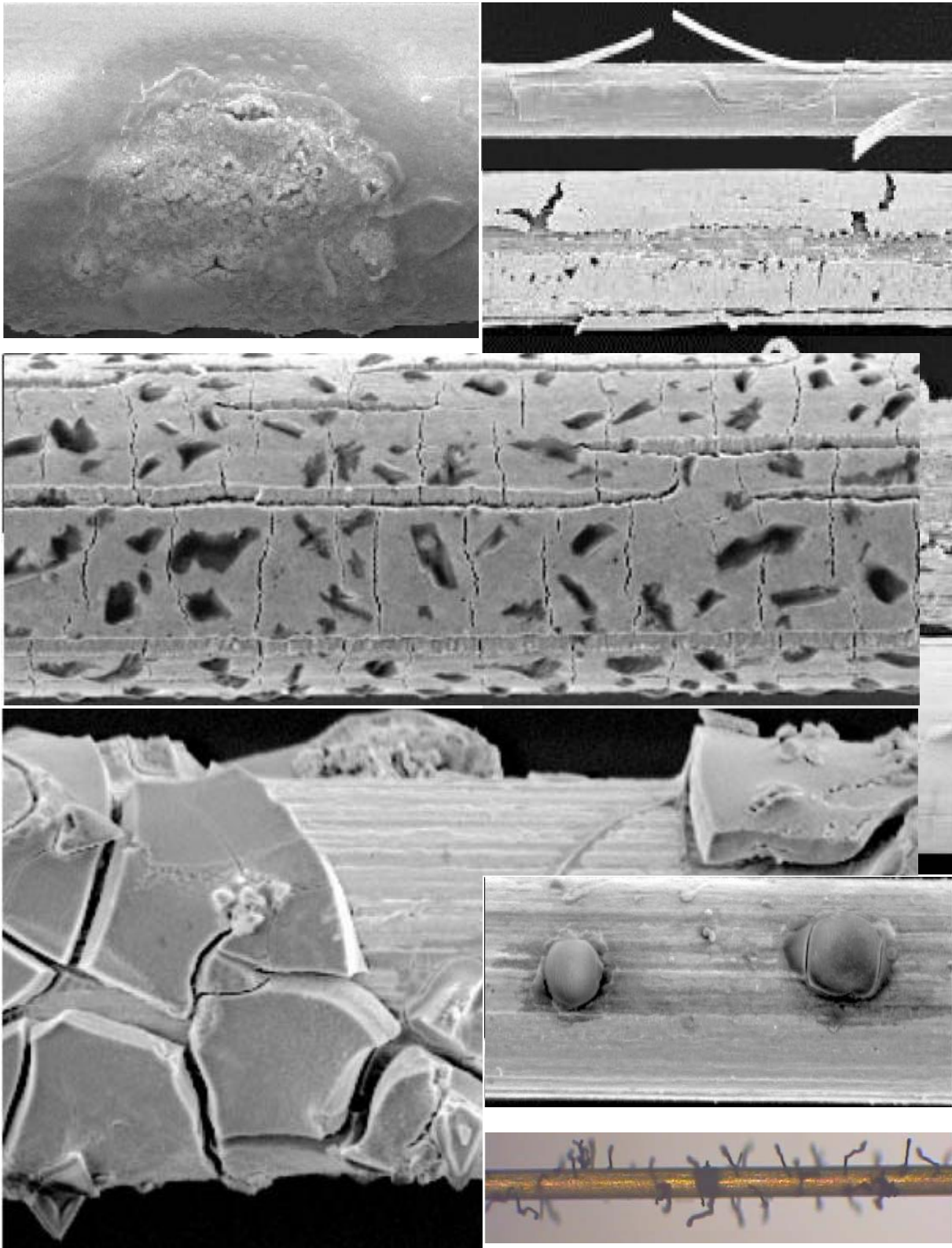
polimerowego jest prawidłowy tylko w przypadku włókien o dobrej przewodności. W rzeczywistości, w wielu pomiarach wykazano, że warstwy polimerów są złymi przewodnikami [16, 17].



Rys. 14 Względna zmiana położenia piku linii ^{55}Fe – 5.9 keV jako funkcja zebranego ładunku. Kółka – układ nie był wstępnie naświetlany w czystym gazie, Kwadraty – układ wstępnie naświetlany w czystym gazie, dopiero po zebraniu ładunku powyżej 0,4 C/cm można zaobserwować obniżenie amplitudy impulsów. Wstępne naświetlenie spowodowało wyrównanie powierzchni anody [7].



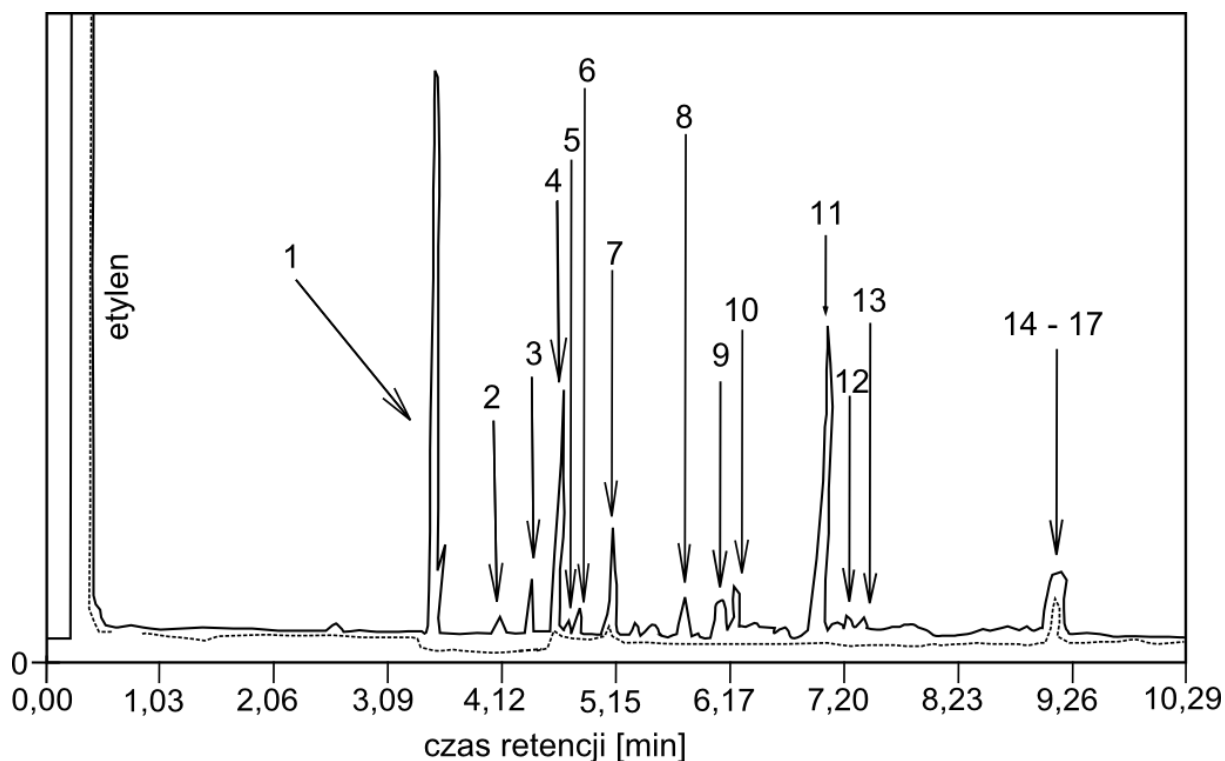
Rys. 15 Zdjęcia ze starzonych anod [7, 6, 14, 43].



Rys. 15 Zdjęcia ze starzonych anod [7, 14, 6]

Przewodność w istotny sposób wpływa na wzrost wiskersa. Włókno polimeru na powierzchni anody jest dodatnio naładowane i linie pola są skoncentrowane na jego końcu. Prąd elektronów z lawiny i ujemnie naładowanych polimerów jest neutralizowany przez ładunki dodatnie zgromadzone na końcu włókna. Jeżeli włókno jest dobrym przewodnikiem, ładunek jest regenerowany, rozkład linii pola nie zmienia się i następuje wzrost długości włókna. Przy niskiej przewodności włókna, ładunek na końcu włókna nie jest regenerowany, zarówno linie pola jak i molekuly polimerów poruszają się wzdłuż włókien w kierunku powierzchni anody. Średnica wiskersa rośnie, zmienia się jego struktura, powstają rozgałęzienia. Wzrost średnicy powoduje obniżenie oporu włókna, zarówno linie pola jak i molekuly polimerów ponownie wędrują na koniec włókna i obserwujemy wzrost długości wiskersa. Przy bardzo złej przewodności włókien, ich wzrost kończy się przy małej długości. Linie pola i molekuly polimerów rozkładają się równomiernie na powierzchni drutu, tworząc jednorodną warstwę. Prąd elektronów i ujemnie naładowanych cząstek polimerów są funkcją gęstości natężenia prądu anodowego, który zależy od wzmocnienia gazowego, natężenia rejestrowanego promieniowania, rodzaju rejestrowanych cząstek i ich rozkładu przestrzennego. Dlatego też, przy określonej przewodności włókien ich długość i forma zależą od wzmocnienia gazowego i natężenia rejestrowanego promieniowania, rodzaju rejestrowanych cząstek i jakości powierzchni drutu anodowego. Na rys. 16 [27] pokazano chromatograf analizy gazu na wyjściu licznika wypełnionego mieszaniną Ar + C₂H₄ (50/50). Wykryto ponad 20 różnych komponentów. Piki o największym natężeniu zostały zidentyfikowane (tabela 1), podano również informacje o możliwości tworzenia polimerów a w tabeli nr 2 pokazano reakcje chemiczne, prowadzące do powstania zidentyfikowanych pików.

Przedstawiony model osadzania się polimerów na lokalnych nierównościach anody doskonale zgadza się z wynikami prezentowanymi w [28], szczegóły podano w podpisie rysunku 17.



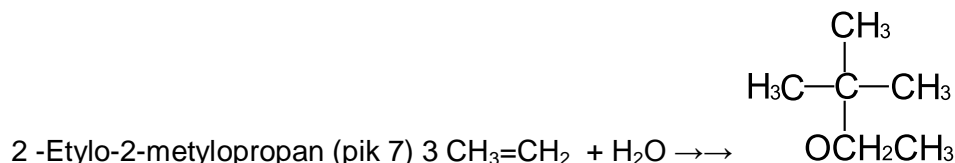
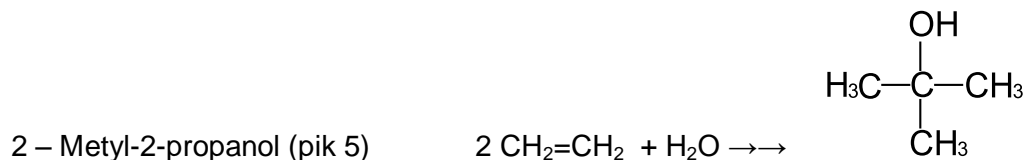
Rys. 16 Chromatogram gazu roboczego na wyjściu naświetlanego detektora (gaz roboczy Ar + C₂H₄, 50/50) [27].

Tabela 1 – Piki chromatogramu z rys. 16 i źródło ich pochodzenia [27].

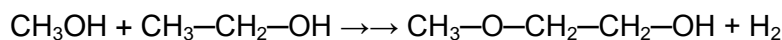
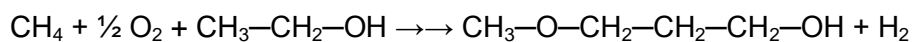
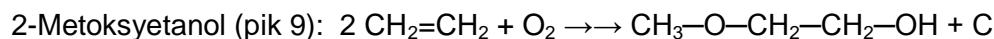
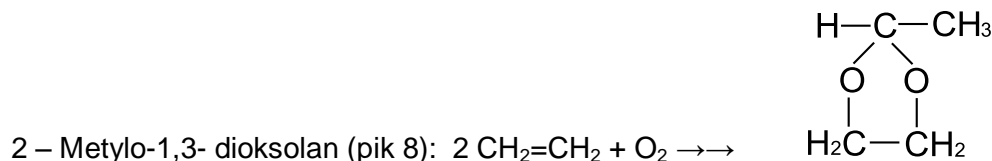
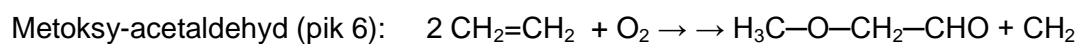
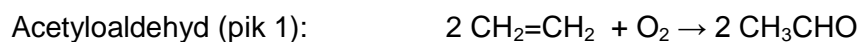
Nr	Składnik	Pochodzenie, źródło	Uwagi
1	Acetaldehyd	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
2	1,3 - Butadien	lawina elektronowa	Polimeryzuje bardzo gwałtownie
3	Etanol	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
4	1,3 - Pentadien	lawina elektronowa	Może polimeryzować
5	2 - Metyl - 2 - propanol	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
6	Metoksy - acetaldehyd	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
7	2 - Etylo - 2 - metylopropan	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
8	2 - Metylo - 1,3 - dioksolan	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
9	2 - Metoksyetanol	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
10	1, 3 Heksadien	lawina elektronowa	Może polimeryzować
11	3 - Metyl - 1, 3 - pentadien	lawina elektronowa	Może polimeryzować
12	4 - Metylo - 1, 4 - heksadien	lawina elektronowa	Może polimeryzować
13	2, 4 - Heksadien	lawina elektronowa	Może polimeryzować
14	Tetrachloroetylen	system gazowy	Zanieczyszczenie etylenu
15	1 - Etenyl - 4 - etylobenzen	lawina elektronowa	Może polimeryzować
16	2,3 dwuhydro -1 - metylinden	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje
17	Etylobenzoaldehyd	lawina elektronowa	Nie polimeryzuje

Tabela 2 Potencjalne reakcje chemiczne, w wyniku których mogą powstać substancje przedstawione na chromatografie, rys. 16, [27].

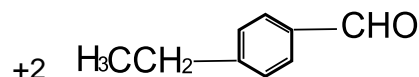
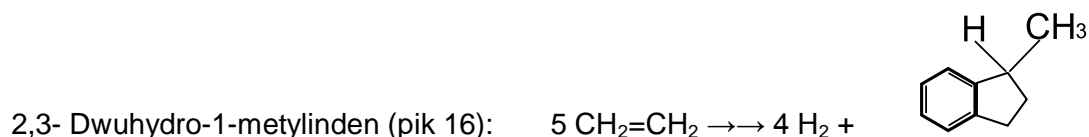
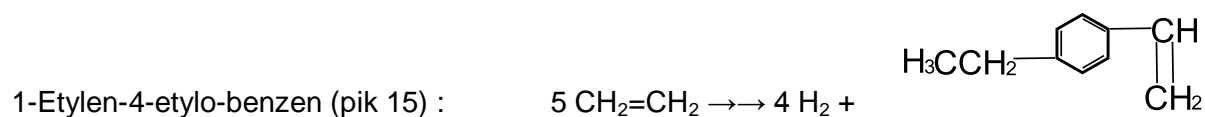
I Etylen + para wodna:

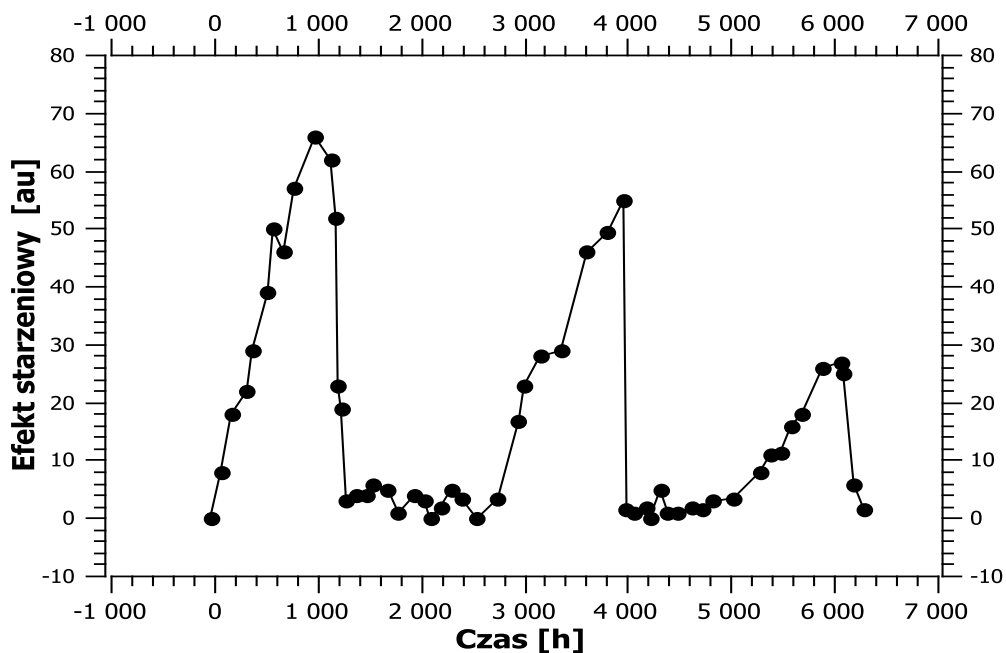


II Etylen + tlen:



III Produkcja węglowodorów aromatycznych



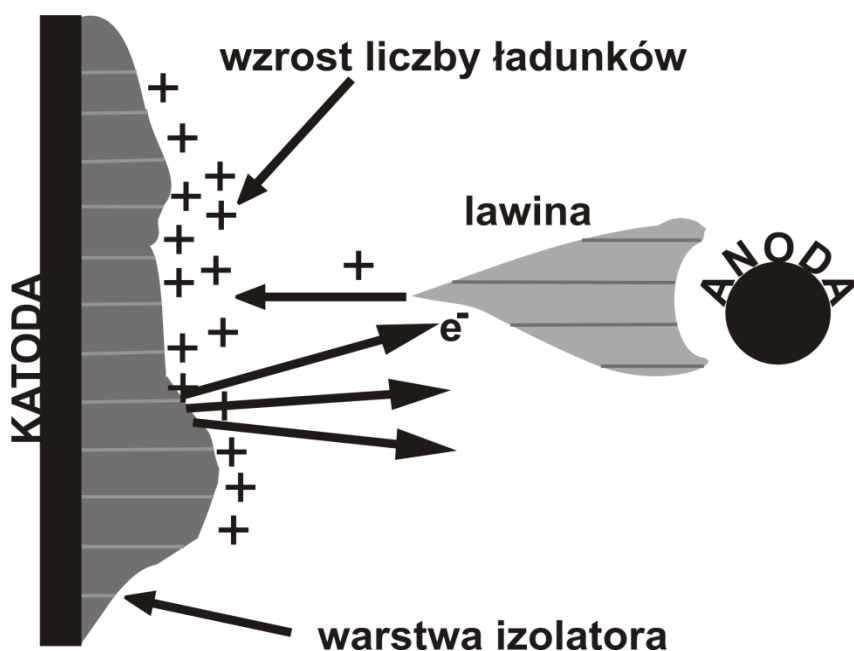


Rys. 17. Detektory słomkowe z mieszaniną Xe/CO₂/O₂, 70/27/3, ($r_k = 2$ mm, $r_a = 15$ μ m, wzmocnienie gazowe $\approx 2,5 \times 10^4$, przepływ gazu 0,15 cm³/min/słomka) były starzone promieniowaniem X (CuK α – linia) przez 1200 godzin. Zaobserwowano zmianę położenia piku ok. 65 %. Po tym czasie detektory ze starzone były płukane gazem Ar/CO₂/CF₂/70/26/4 (wzmocnienie gazowe, prąd jw.) przez 126 h. Po tym zabiegu detektory odzyskały pierwotne parametry, nastąpiło oczyszczenie anody. Detektory były ponownie starzone z gazem roboczym na bazie Xe. Po pierwszej procedurze oczyszczania anody, detektory mogły prawidłowo pracować przez ok. 1400 h, nie wykazując objawów starzenia i przez ok. 800 godzin ze zmianą położenia piku wykazując objawy starzenia przez następne 600 h. Powtórzono procedurę oczyszczania. Czas oczyszczania uległ znacznej redukcji, 126 h \rightarrow 22 h \rightarrow 9 h. Otrzymane wyniki są zgodne z przedstawionym modelem osadzania się polimerów na lokalnych nierównościach anody. Dla nowej anody, promień nierówności był mały i nastąpiła znaczna lokalna deformacja pola, warstwa polimeru była gruba o czym świadczy długi czas jej usuwania (126 h). W trakcie pracy i oczyszczania następuje polerowanie powierzchni anody, rosną promienie lokalnych krzywizn. Polimery są deponowane na większej powierzchni, nie obserwujemy efektów starzenia. Przy tej samej masie wytwarzanego polimeru jego grubość jest mniejsza a więc i czas ich usuwania znacznie krótszy (22 h i 9 h). [28].

3. Efekty starzeniowe związane z katodą.

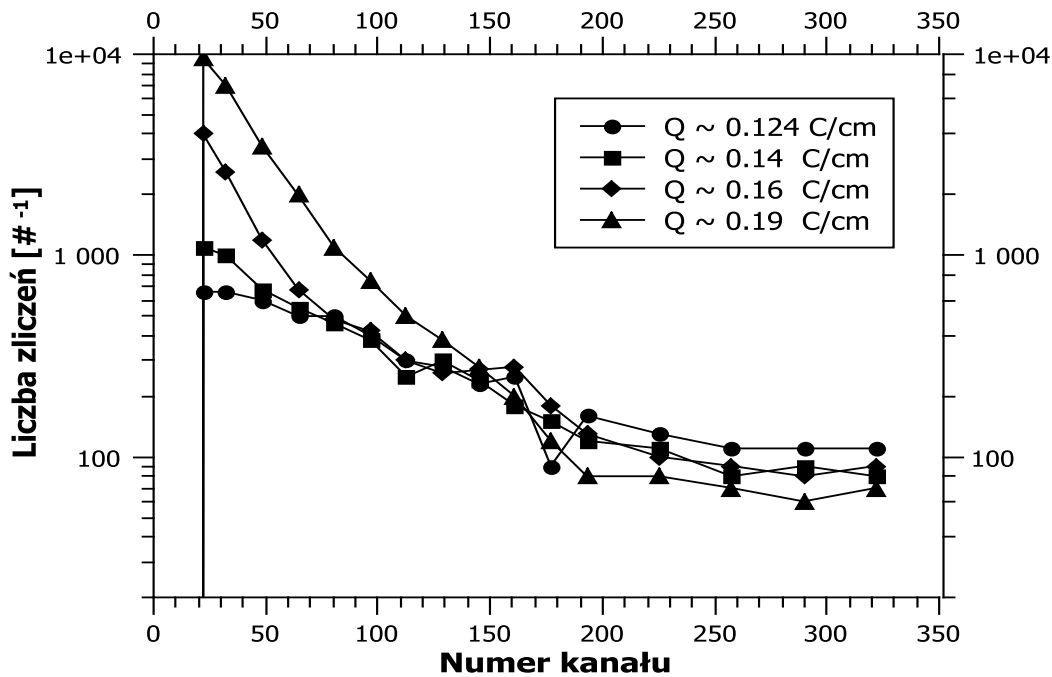
Na wewnętrznej powierzchni katody na potencjale zerowym, w wyniku odkładania cienkiej warstwy nieprzewodzącej, jony dodatnie są izolowane od tej powierzchni. Tworzy się dipol

między dodatnio naładowanymi jonami a katodą. Powstałe wówczas pole elektryczne może osiągać wartości rzędu 10^7 V/cm. Tak duże natężenie powoduje wyrwanie elektronów z katody, które mogą z łatwością przenikać warstwę izolatora (efekt Maltera) (rys. 18). Po jej przeniknięciu część może neutralizować jony dodatnie, a część może zmierzając w kierunku anody poprzez jonizację lawinową tworzyć kolejne jony dodatnie, które zwiększą wartość natężenia pola w warstwie izolatora. Takie dodatnie sprzężenie może prowadzić do przepływu dużego prądu przez licznik, a w efekcie do jego uszkodzenia.

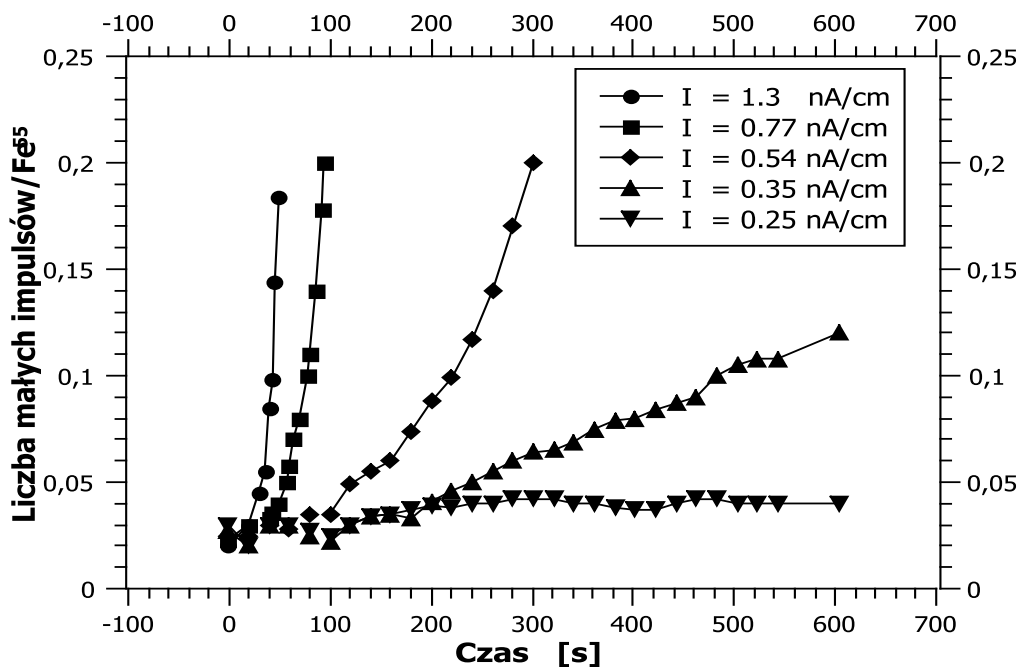


Rys. 18
Schematyczne
przedstawienie
efektu Maltera

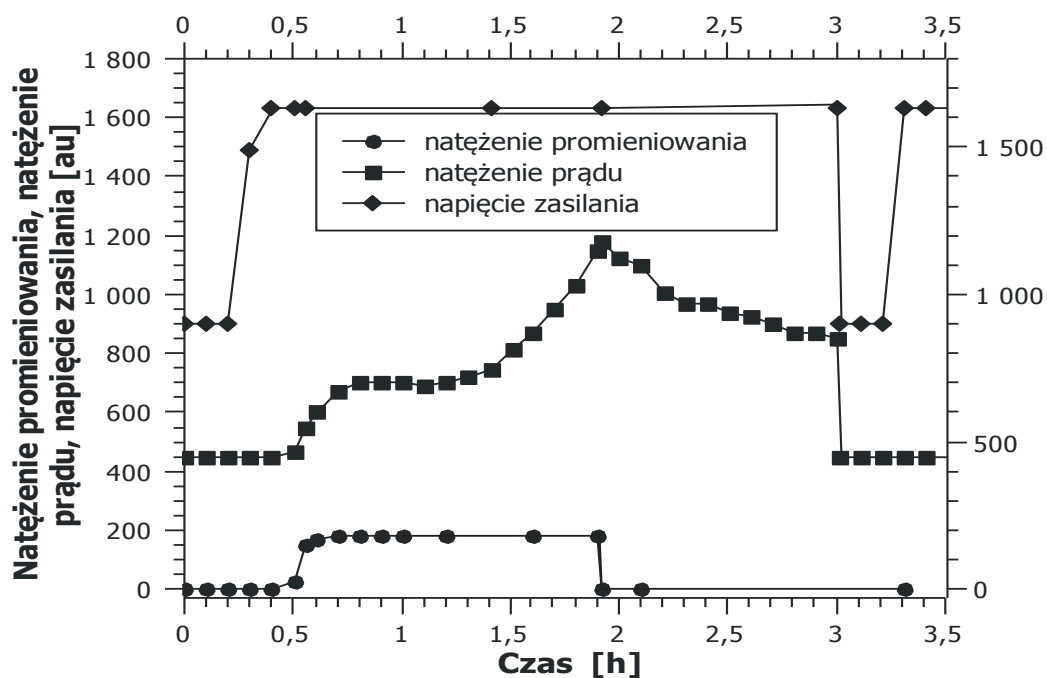
Na widmach amplitudowych, efekt Maltera objawia się znacznym wzrostem liczby zliczeń o małej amplitudzie, tuż ponad progiem dyskryminacji (rys. 19) [30, 31] lub wzrostem prądu ciemnego [32].



Rys. 19 Ilustracja efektu Malter'a. Pokazano tylko widmo dla niskich energii tuż nad progiem dyskryminacji. Pik linii ^{55}Fe jest znacznie wyżej. Widać, że liczba „małych impulsów” rośnie ze wzrostem ładunku Q zebranego przez licznik [30].



Rys. 20 Zależność względnej liczby „małych impulsów” w funkcji czasu pracy detektora dla różnych wartości prądu I płynącego przez detektor w zestarzonej liczniku wypełnionym gazem roboczym He/izobutan, 80/20. Widać wyraźne sprzężenie pomiędzy efektem Malter'a a natężeniem (prądem) rejestrowanego promieniowania [31].



Rys. 21 Przykład rozwoju prądu Malter'a w funkcji czasu. Pokazano również zależność czasową napięcia zasilania detektora i częstości rejestrowanego przez detektor promieniowania. Należy zwrócić uwagę na wzrost prądu przy stałym natężeniu promieniowania. Po usunięciu źródła promieniowania nadal płynie prąd, który zanika dopiero po wyłączeniu napięcia zasilania [32].

Aby efekt Malter'a mógł wystąpić musi być:

- izolator na katodzie,
- tempo wzrostu ładunku na warstwie izolującej większe niż tempo jego usuwania,
- impuls zapoczątkowujący cały proces.

Gęstość powierzchniowa jonów na warstwie izolatora, $n(t)$, opisywana jest równaniem [33]

$$\frac{dn(t)}{dt} = j_+ - j_-$$

gdzie j_+ jest gęstością jonów na jednostkę czasu docierających do katody, j_- liczbą procesów neutralizacji na jednostkę czasu i powierzchni. Jeżeli na katodzie istnieje warstwa izolatora o oporze właściwym ρ i stałej elektrycznej ϵ , gęstość prądu przez tę warstwę jest dana zależnością $n/\epsilon\rho$. Wytwarzana gęstość powierzchniowa jonów, zanika eksponencjalnie ze stałą czasową,

$$\tau = \epsilon\rho = (2 \cdot 10^{-13} + 3 \cdot 10^3)[s], (\epsilon_r = 3)$$

wartości graniczne policzono dla dobrego przewodnika o oporze właściwym

$$\rho = 7,5 \cdot 10^{-3} \Omega m \text{ i czystego polimeru (węglowodoru) o } \rho \approx 10^{14} \Omega m.$$

W pierwszym przypadku warstwa jonów nie wytworzy się, natomiast w drugim gęstość jonów będzie rosła, aż do przebicia warstwy izolatora. Już cienka warstwa izolatora może być wystarczająca do zapoczątkowania wyładowania ciągłego. Warstwa ta może rosnąć w wyniku polimeryzacji, jeżeli gaz ma odpowiednie własności.

Dla ładunku Q , produkowanego przy anodzie przez cząstkę poruszającą się prostopadle do anody, gęstość prądu przy katodzie o promieniu r_k wynosi:

$$j_+ = \frac{Q}{\Delta t \cdot \Delta z \cdot 2\pi r}$$

gdzie $\Delta z \approx 30\mu\text{m}$ jest długością lawiny jonów wzdłuż anody a $\Delta t \approx 1\mu\text{s}$ jest jej rozmyciem czasowym. Dla cząstek minimalnie jonizujących (MIP) dla licznika o średnicy 10 mm, $Q \sim 10^6$ elektronów, a dla cząstek o dużej gęstości jonizacji (HIP) $Q \sim 10^8 e$. Jeżeli $\Delta t \ll \tau$, to gęstość ładunku na warstwie $n = j_+ \cdot \Delta t \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{C/m}^2$ dla MIP i $n \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{C/m}^2$ dla HIP. Taka wartość ładunku wytwarza w warstwie minimalne pole o natężeniu $\sim 10 \text{kV/cm}$, wystarczające aby uwolnić elektron z katody. W stanie ustalonym wartość średnia n wynosi:

$$\langle n \rangle = \tau \langle j_+ \rangle = \rho \varepsilon \langle I \rangle / 2\pi r$$

gdzie $\langle I \rangle$ jest wartością średnią liniowej gęstości prądu i nie przekracza wartości $0,5 \mu\text{A}/(\text{cm długości anody})$ aby wyeliminować efekt ładunku przestrzennego.

Aby wytworzyć pole o natężeniu 10kV/cm przy powyższych warunkach pracy liczników, warstwa izolatora powinna mieć opór właściwy $\rho \sim 3 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$. Jeżeli taka warstwa zostanie wytworzona na katodzie to efekt Malter'a może wystąpić.

Sposobów powstawania warstwy izolującej jest wiele: lawina produkująca polimery, klej na elektrodach, zanieczyszczenia gazu, izolujące osady pozostające po iskrzeniach, oporowe tlenki metalu katody, niewystarczające przewodzenie „przewodzących klejów epoksydowych”, pozostałości po trawieniu katody a nawet odciski palców montażysty.

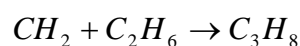
Prąd Malter'a może składać się z impulsu pojedynczego elektronu, który z łatwością może zostać pominięty, jeżeli elektronika odczytu jest nieczuła na detekcje pojedynczych elektronów. Jest to bardzo ważne do wczesnego wykrywania przed rozwinięciem warstwy osadu na katodzie. Pozytywne sprzężenie pomiędzy emisją elektronów na katodzie a wzmocnieniem gazowym może prowadzić do miejscowego wzrostu gęstości jonizacji a to z kolei może prowadzić do większego osadzania cząstek w danym miejscu na katodzie do stopnia wystarczającego do ustalenia klasycznego samopodtrzymującego wyładowania malterowskiego, które może spowodować nieodwracalne uszkodzenie detektora.

4. Procesy powodujące starzenie.

W gazie podczas lawiny wiele molekuł rozpada się w zderzeniach z elektronami, podczas deeksytacji atomów, w procesie absorpcji fotonów UV. Podczas gdy większa część procesów jonizacji wymaga od elektronów energii większej niż 10eV, to na przerywanie wiązań kowalencyjnych i utworzenie wolnych rodników potrzeba zaledwie 3 – 4 eV (tabela 3 i 4). Elektrony i fotony w typowej lawinie mają wystarczającą energię potrzebną do rozerwania typowych wiązań molekularnych. Ogólnie rzecz biorąc:

$$E_{\text{cieplnej dysocjacji}} < E_{\text{uderzenie elektronów}} < E_{\text{energia jonizacji}}$$

Idealnie byłoby, wykorzystując transfer ładunku, aby do katody docierały jony, które nie polimeryzują lub polimeryzują bardzo słabo. Może dojść nawet do tego iż będzie większa koncentracja wolnych rodników niż jonów w objętości czynnej. Stąd też, polimeryzacja wolnych rodników jest uważana za dominujący mechanizm w procesie starzenia komór drutowych. Wolne rodniki są bardzo aktywne chemicznie i mogą albo rekombinować do form oryginalnych molekuł albo innych niestabilnych form, albo mogą zacząć formować struktury molekularne z rosnącą masą atomową. Kiedy taki spolimeryzowany łańcuch stanie się wystarczająco duży, dochodzi wówczas do osadzania na powierzchni elektrody. Początkowo polimer może się przyłączać do powierzchni bardzo słabo, chyba, że jakaś dodatkowa reakcja chemiczna zajdzie pomiędzy atomami polimeru a atomami, z których zbudowana jest anoda. Ponadto, przypuszcza się, że wiele wolnych rodników ma moment dipolowy – stąd elektrostatyczne przyciąganie do drutu, które również może odgrywać znaczącą rolę w procesie osadzania. Dla obojętnej złotej powłoki na anodzie prawdopodobieństwo przyklejania polimerów do powierzchni jest raczej małe, aż do wytworzenia pierwszej monowarstwy, która znacząco ułatwia dalsze osadzanie. Na przykład polimeryzacja węglowodorowych molekuł jest często poprzedzana przez produkcję rodnika CH_2^* , który jest typowym prekursorem do produkcji polietylenu (doskonałego izolatora). Rodniki CH_2^* mogą być produkowane np. w reakcji (jeżeli gaz roboczy zawiera metan):



Proces trwa do momentu, aż węglowodór stanie się stały i łatwo może przykleić się do anody. Gazy, takie jak mieszanka argonu i CO₂, nie wywołują podobnych reakcji chyba, że są zanieczyszczone węglowodorami. Dlatego, bardzo istotne jest unikanie takich zanieczyszczeń w układach detekcyjnych [22].

Tabela 3 Energia wiązania niektórych wiązań kowalencyjnych [34, 35]

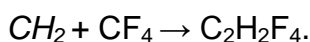
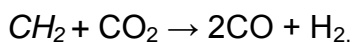
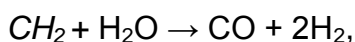
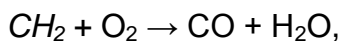
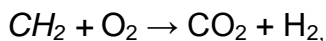
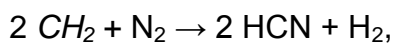
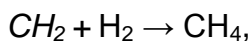
Wiązania	Energia wiązania [eV]
C-H	4,3
C-C	3,6
C-O	3,7
C-N	3,2
N-H	4,0
O-H	4,8
O-O	1,5
F-H	5,8
F-C	5,4
C-Cl	3,5
C=C	6,4
C=N	9,3
C=O	7,8

Tabela 4 Energia dysocjacji i energia jonizacji niektórych gazów [34, 35]

Gaz	Energia dysocjacji (eV)	Energia jonizacji (eV)
Ar	-	15,8
Xe	-	12,1
H ₂	4,5	15,6
N ₂	9,7	15,5
O ₂	5,1	12,5
CH ₃ CH ₂ OH (etanol)	≥ 8,2	10,5
(CH ₃) ₂ CHOH (izopropanol)	≥ 8,2	10,2
(CH ₃) ₂ O (DME)	≥ 8,2	10,0
C ₂ H ₆	≥ 8,6	11,5
H ₂ O (para)	4,8	12,6
CH ₂ (OCH ₃) ₂ (metylal)	≥ 8,2	10,0
CO ₂	7,8	13,8
i C ₄ H ₉ (izobutan)	≥ 8,2	10,6
CH ₄	4,3	12,6

4.1 Sposoby zapobiegania polimeryzacji.

W niektórych przypadkach istnieje możliwość użycia pewnych dodatków zapobiegających polimeryzacji. Np. użycie następujących dodatków (O₂, H₂, N₂, H₂O, CO₂, CF₄) w plazmie chemicznej daje możliwość eliminacji rodników CH₂ przez tworzenie stabilnych, lotnych produktów, które spowalniają proces polimeryzacji:

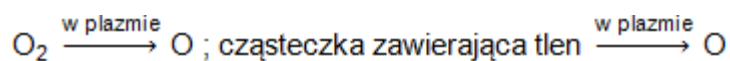


Bardziej ogólnie, w wyniku reakcji atomowych tlenu z węglowodorowymi rodnikami końcowymi produktami tych reakcji są lotne molekuly, takie jak CO, CO₂, H₂O i H₂, (tabela

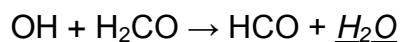
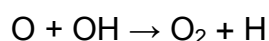
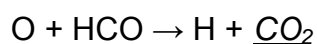
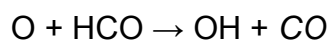
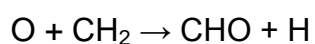
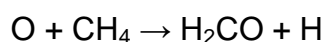
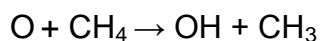
5) które są wystarczająco stabilne i mogą być usunięte w układach przepływowych przez dostateczny przepływ gazu. Co więcej, organiczne związki z tlenem zawierające grupy -COOH, -CO-, -OCO-, -OH, -O-, -C=O są generalnie niechętnie do formowania polimerów w środowisku plazmowym.

Tabela 5 Łańcuch reakcji chemicznych zapobiegających polimeryzacji w CH₄ w mieszaninie zawierającej tlen.

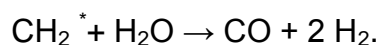
(1)



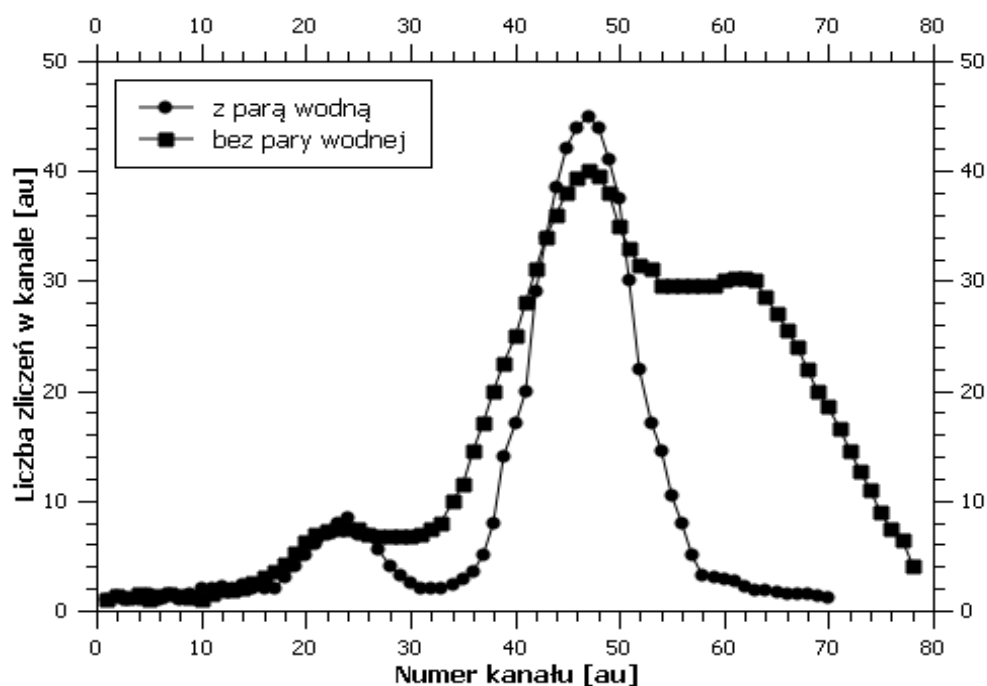
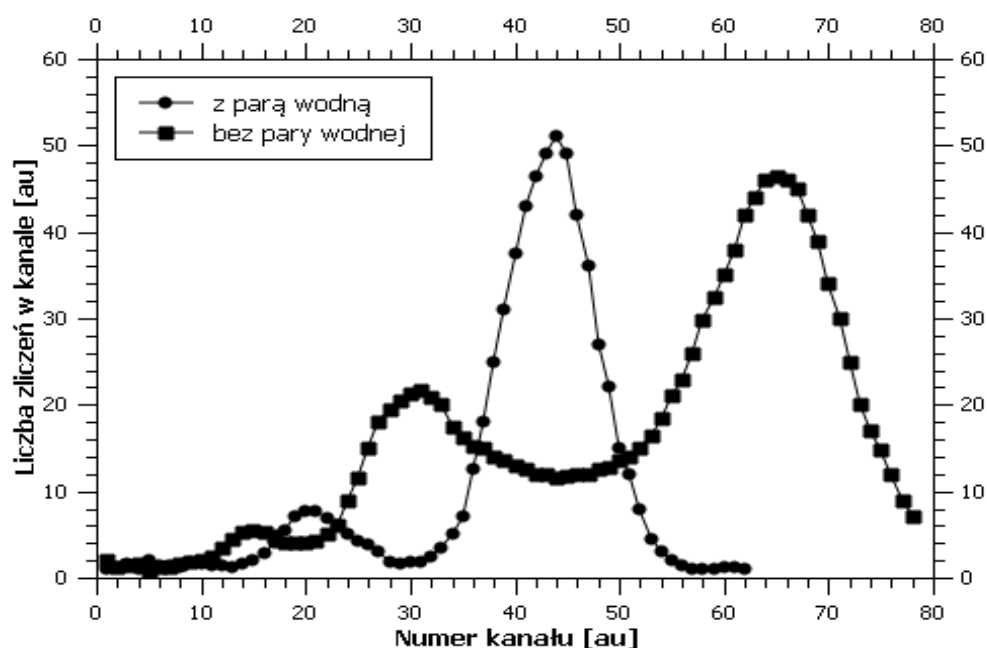
(2)



Pary wody, alkoholi i eterów stały się typowymi dodatkami do mieszanin gazowych, które wydłużają czas życia detektora. Para wodna zapobiega rozpoczęciu procesu polimeryzacji poprzez reakcję:



Para wodna wprowadzona do gazu roboczego zestarzonego licznika. już po uformowaniu osadów na anodzie lub katodzie uprzewadnia je, przywracając pierwotne działanie w zestarzonych detektorach (rys. 22) [18]. Dodatek pary wodnej jedynie poprawia pracę detektora, nie usuwa jego zepsucia. Kiedy ten dodatek zostaje usunięty w detektorze ponownie ujawniają się efekty zesterzenia.



Rys. 22a,b. Przykładowe widma z liczników „zestarczonych” bez i z dodatkiem pary wodnej do mieszaniny Ar + 15%CO₂.

Ponadto para wodna nie polimeryzuje, ma duży moment dipolowy, a zatem duży przekrój czynny na rozpraszanie elektronów. Prowadzi to do zmniejszenia średniej energii elektronów w lawinie.

Pary alkoholu mają duży przekrój czynny na absorpcję fotonów UV. Potencjał jonizacji tych domieszek jest niższy niż potencjał jonizacji typowych węglowodorów (tabela 4). Jeśli cząsteczki tych par rozpadną się, rekombinują one natychmiast z powodu silnej elektroujemności tlenu, lub też powstają lotne produkty reakcji z tlenem (tabela 5), które mogą być łatwo usuwane z objętości czynnej licznika z przepływającym gazem w układach przepływowych. Do rozpadu molekuł tych domieszek wystarcza energia kilku eV (tabela 3). Podczas ich rozpadu mogą powstać fragmenty łatwo polimeryzujące. Jest to jednak efekt daleko mniej znaczący niż polimeryzacja właściwych węglowodorów stosowanych jako czynniki gaszące i dlatego dodanie do mieszaniny gazowej pary wodnej (rys. 22a,b), pary alkoholi, eterów uważane jest za korzystne.

Dodanie wodoru do mieszaniny gazowej pomaga w przyłączeniu rodników do ich macierzystych cząsteczek, np. rodniki $\text{CH}_2\cdot$ mogą odbudować molekuły CH_4 . Proces ten konkuruje z polimeryzacją rodników. Kontrola, który proces jest dominujący, jest trudna i zazwyczaj rezultaty dodania wodoru są niejednoznaczne [36].

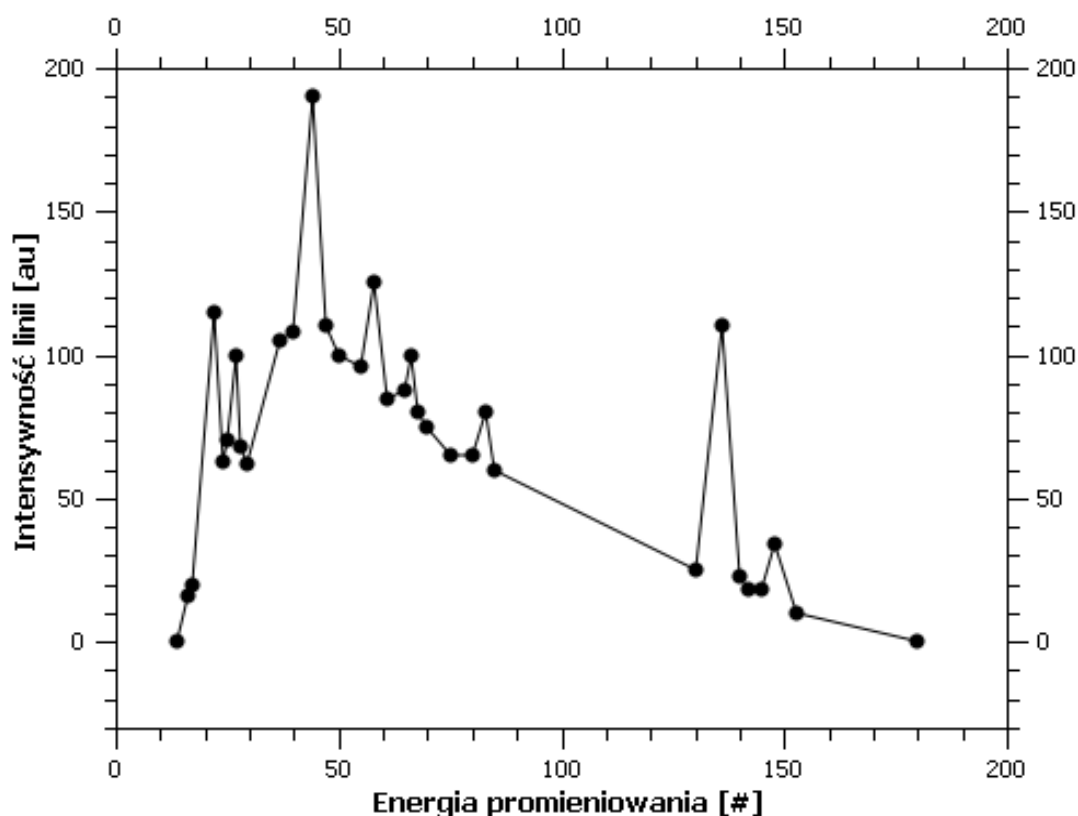
CF_4 jest związkami stosowanym jako składnik mieszanin gazowych w proporcjonalnych komorach drutowych. Dodanie do gazu głównego CF_4 zapobiega tworzeniu się warstw na anodzie. Wysoki potencjał dysocjacji CF_4 (5.2 eV, tabela 4) powoduje, że CF_4 może także hamować proces formowania się polimerów a nawet usuwać osady z anody [37]. Polimery zawierające węgiel, krzem i tlen osadzone na anodzie, są „atakowane” przez rodniki i jony ujemne powstałe podczas jonizacji CF_4 , co prowadzi do ich usuwania z powierzchni elektrod.

4.2 Zanieczyszczenia przyspieszające efekt starzenia.

Z analizy danych z różnych eksperymentów wynika, że najczęściej znajdowanymi na elektrodach związkami są: węgiel, polimery bazujące na węglu, molekuły zawierające krzem, halogeny i związki siarki (rys. 23). Krzem jest pierwiastkiem znajdującym w wielu analizach składu chemicznego osadów na anodach i określenie źródła jego pochodzenia jest trudne i bardzo często pozostaje nieznanne. Krzem jest obecny w butlach gazowych w formie zanieczyszczeń (SiH_4 lub SiF_4). Konfiguracja elektronowa na powłoce walencyjnej krzemu i węgla jest taka sama, a zatem pierwiastki te mają kilka wspólnych cech. Krzem

może polimeryzować zarówno w obecności węglowodorów jak i tlenu tworząc polisilikony i krzemiany. Produkty reakcji tlenu z rodnikami węglowodorów są lotne i mogą być usuwane przez przepływający gaz. W przypadku cząsteczek zawierających krzem nie jest to tak proste, gdyż są one cięższe. W plazmie stwierdzono znacznie wyższe tempo polimeryzacji Si niż C. Stąd nawet śladowe ilości zanieczyszczenia Si mają znacznie większą tendencję do tworzenia osadów niż podobne ilości węglowodorowych molekuł.

Halogeny są związkami szeroko stosowanymi w przemyśle i dlatego istnieje duża szansa, że butle z gazem będą je zawierać. Halogeny są związkami silnie reaktywnymi ze względu na dużą elektroujemność. Tworzą one tylko pojedyncze wiązania, które są zwykle słabsze niż wiązania C-H. Zatem na dysocjację CH_4 na wolne rodniki potrzebna jest większa energia niż na dysocjację węglowodorów halogenowych (tabela 4). Oznacza to, że niektóre węglowodory halogenowe produkują więcej wolnych rodników, a zatem łatwiej polimeryzują. W środowisku plazmy [38] nawet niewielkie dodatki halogenów znacząco zwiększają tempo polimeryzacji CH_4 , C_2H_2 i C_2H_6 .



Rys. 23 Analiza widmowa składu chemicznego osadów powstałych na anodzie przeprowadzona metodą fluorescencji rentgenowskiej. Piki od lewej: Ni- K_α , Na- K_α , **Si- K_α** , S- K_α , Cl- K_α , K- K_α , Cr- K_α , Mn- K_α + Cr- K_β . Materiał anody – chromonikielina.

5. Ogólne uwagi technologiczne wpływające na czas życia detektorów [39, 40, 41, 42].

Procesy starzenia się detektorów gazowych, mimo wielu lat badań, nadal są głównym czynnikiem limitującym ich zastosowanie w silnych polach radiacji. Istotnie wzrosło zrozumienie procesów odpowiedzialnych za pogorszenie parametrów liczników. Pozwala to co najmniej zredukować szybkość tego procesu. Po wielu latach intensywnych badań i rozwoju radiacyjnie odpornych detektorów zebrano dużo różnorodnych danych eksperymentalnych. Gazowanie materiałów konstrukcyjnych liczników i systemów gazowych są głównym źródłem zanieczyszczeń domieszkami ograniczającymi czas życia detektorów. Dane te dostarczają wskazówek jak budować detektory i jak prowadzić badania efektów starzeniowych (np. w identycznych warunkach naświetlać kilka liczników).

Podstawowe wskaźniki do konstrukcji i pracy typowych komór drutowych, które zostały opracowane podczas wieloletniego ich użytkowania:

- Tworzenie w miarę czystego otoczenia podczas konstrukcji detektorów. Wszystkie elementy muszą być wyczyszczone i odtłuszczone przed montażem, najlepiej w warunkach ultradźwiękowych.
- Przed włączeniem wysokiego napięcia cały układ powinien przez kilka miesięcy być płukany czystym gazem, np. Ar w celu oczyszczenia jego wewnętrznych powierzchni.
- System gazowy i detektory powinny tolerować obecność ozonu (jeżeli mieszanina gazowa zawiera tlen jako składnik lub zanieczyszczenie to o silnych polach radiacji powstaje w niej ozon).
- Komponenty (O-ringi, uszczelki, złącza...) nie mogą zawierać Si.
- Unikać obecności szkodliwych molekuł w gazie aktywnym (Si, halogeny, siarka).
- Odpowiedni dobór składu gazu roboczego (gazy szlachetne, freony, CO₂, DME, H₂O, alkohole...).
- Odpowiedni dobór geometrii i warunków pracy (średnica anody, wzmocnienie gazowe).

Efekty starzeniowe zależą od: rodzaju gazu głównego i jego czystości; rodzaju czynnika gaszącego i śladowych zanieczyszczeń, materiałów konstrukcyjnych, przepływu gazu, wielkości naświetlonej powierzchni detektora gazowego, rodzaju cząstek i ich energii, dlatego też ujęcie ilościowe tego procesu jest bardzo trudne a dla konstruktorów i

użytkowników pozostają „kuchenne metody” postępowania. Ponadto wymusza to, aby wszelkie pomiary laboratoryjne były jak najbardziej zbliżone do realnych warunków eksperymentu.

Literatura

[1] J. Va'vra, *Physics and chemistry of aging – early developments*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)1- 14.

J. Va'vra, *Review of wire chamber aging*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 252**(1986)

[2] M. Capeans, *Study of the ageing of gaseous detectors and solutions for the use of MSGCs in high rate experiments*, Ph.D. Thesis, Univ. de Santiago de Compostela, 1995.

[3] T.Z. Kowalski, B. Mindur, *Manifestation of aging effects in gas proportional counters*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)180-184.

[4] B. Bednarek, et al., (T.Z. Kowalski), *A study of aging effect in gas proportional detectors at BAC calorimeter at ZEUS Experiment*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 348**(1996)228 – 231.

B. Bednarek et al., (T.Z. Kowalski), *Anode wire ageing in proportional detectors at the BAC calorimeter of the ZEUS Experiment*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 392**(1997)52 -54.

[5] J.A. Kadyk, *Wire chamber aging*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 300**(1991)348.

[6] T. Akesson et al., (T. Kowalski), *Aging studies for the ATLAS Transition Radiation Tracker (TRT)*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)166-179.

[7] V.E. Blinov, I.N. Popkov, A.N. Yushkov, *Aging measurements in wire chambers*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)95-107.

[8] R.W. Hendricks, *Space charge effects in proportional counter*, *Rev. Sci. Instr.* **40,9**(1969)1216.

[9] N. Spielberg and D.I.Tsarnas, *Counting rate dependent gain in flow proportional counters*, *Rev. Sci. Instr.* **46,8**(1975)1086-1091.

[10] K. Mahesh, *On the counting rate-dependence amplitude shifts in proportional counters*, *Nucl. Instr. and Meth.* **133**(1976)57-60.

[11] K. Mahesh, *On peak shifts and space charge effects in proportional counters*, *Nucl. Instr. and Meth.* **153**(1978)465-466.

[12] B. Bednarek, *Experimental results of count rate effect in some X-ray proportional counters*, *Nucl. Instr. and Meth.* **175**(1980)431-439.

- [13] B. Bednarek, *On a new interpretation of the count rate effect in gas proportional detectors*, *Nucl. Instr. and Meth.* **178**(1980)173-180.
- [14] J. Adam, et al., *A study of ageing effects in wire Chambers*, *Nucl. Instr. and Meth.* **217**(1983)291-297.
- [15] A. Dwurażny et al., *Inorganic gas mixtures for proportional counters*. *Nucl. Instr. and Meth.* **217**(1983)301.
- [16] A. Smith, M. Turner, *Lifetime of proportional counters filled with xenon-methane and argon-methane*, *Nucl. Instr. and Meth.* **192**(1982)475 – 481.
- [17] M. Atac, *Wire chamber aging and wire material*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-34(1)**(1987)476.
- [18] A. Algeri, et al., *Anode wire ageing in proportional counters: the problem of analog response*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 338**(1994)348 – 367.
- [19] K. Silander, et al., *Aging studies with argon/methane based gas mixtures*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 367**(1995)298 – 301.
- [20] M. Titov, et al., *Summary and Outlook of the International Workshop on Aging Phenomena in Gaseous Detectors* (DESY, Hamburg, October, 2001), arXiv:hep-ex/0204005v1 4Apr 2002.
- [21] M. Titov, *Radiation damage and long – term aging in gas detectors*, arXiv:physics/0403055v2, 2004.
- [22] J. Va'vra, *Physics and Chemistry of Aging – Early Developments*, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford **CA 94309** USA.
- [23] M. Deptuch, T.Z. Kowalski, B. Mindur, *Selected problems in aging effects with gas proportional counters*, *Nucl. Phys. B, Proc. Suppl.* **150**(2006)394-397.
- [24] Dorota Karsznia, Praca magisterska (opiekun T. Kowalski), *Efekty starzeniowe w detektorach gazowych*, AGH w Krakowie, Wydz. Fizyki i Techniki Jądrowej, 2000.
- [25] Klaudia Hajder, Praca magisterska (opiekun T. Kowalski), *Praca detektorów gazowych przy wysokich częstościach rejestrowanego promieniowania. Chwilowy efekt starzenia się detektorów*, AGH w Krakowie, Wydz. Fizyki i Techniki Jądrowej, 2004.
- [26] T.Z. Kowalski, B. Mindur, *A study of aging effects in the gas – monitoring proportional counters of the BAC calorimeter in the ZEUS experiment*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)60 – 64.
- [27] K. Kurvinen et al., *Results of organic compounds formed in elektron avalanches in a proportional counter filled with Ar/C₂H₄*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)118 – 125.

- [28] V. Bondarenko et al., Prezentacja na spotkaniu roboczym współpracy TRT eksperymentu ATLAS, luty 2003, CERN.
- [29] Damian Kabat, Praca magisterska (opiekun T. Kowalski), *Wpływ geometrii gazowych liczników proporcjonalnych na szybkość ich starzenia się*, AGH w Krakowie, Wydz. Fizyki i Techniki Jądrowej, 2003.
- [30] C. Lu, *BaBar drift chamber aging study*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 518**(2004)125 – 128.
- [31] A.M. Boyarski, *Additives that prevent or reverse cathode aging in drift chamber with helium-isobutane gas*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)190 – 195.
- [32] H. Albrecht et al., *Aging studies for the large honeycomb drift tube system of the Outer Tracker of HERA-B*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)155 – 165.
- [33] K. Berkhan et al., *Observations on cathode aging (Malter effect) in honeycomb drift chambers under high irradiation load*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 515**(2003)185 – 189.
- [34] R.I. Reed, *Ion Production by Electron Impact*, ACADEMIC PRESS, London and New York, 1962.
- [35] L.G. Christophorou, *Atomic and Molecular Radiation Physics*, WILEY-INTERSCIENCE, London, 1972.
- [36] Stephanie Zimmermann, *High rate and ageing studies for the drift tubes of the ATLAS muon spectrometer*, Ph.D. Thesis, Albert-Ludwige-Universität Freiburg im Breisgau, 2004.
- [37] R. Openshaw et al., *Etching of anode wire deposits with CF₄/Isobutane (80:20) avalanches*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 307**(1991)
- [38] M. Spiegel, *On the lifetime of proportional counters*, Ph.D. Thesis, Technische Universität Wien, 1998.
- [39] T. Akeson et al. (T. Kowalski), *Aging effects in the ATLAS transition radiation tracker and gas filtration*, *Nucl. Sci. Symp. Conf. Record*, **V2, P1185**, IEEE 2005.
- [40] M. Capeans et al., (T. Kowalski), *Recent aging studies for the ATLAS transition radiation tracker*, *IEEE Trans. on Nucl. Science* **51,3**(2004)960 – 967.
- [41] M. Capeans, S. Konovalov, A. Romaniouk, *About aging of gas detectors: a compilation of some validation studies carried out for LHC*, **RD 51** Note – 2009 – 002.
- [42] M. Capeans, *Radiation Hardness of Gaseous Detectors*, 4th MC – PAD Network Training Event Gaseous Detectors, CERN, marzec 2011.
- [43] T. Ferguson et al., *Anode wire swelling – a possible phenomenon in anode wire aging under high – accumulated dose*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A 482**(2002)698 – 712.