Materiały elektroizolacyjne - podział

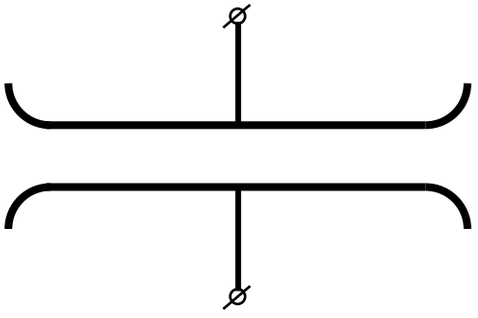
Dielektryki gazowe

Są stosowane w układach izolacyjnych wielu urządzeń elektrycznych, współpracują z elementami izolacyjnymi z materiałów stałych.

Dielektryki gazowe mogą być jedno- lub wieloskładnikowe. Ich podstawowe własności to:

- rezystywność $\rho = 10^{17}...10^{18}\ \Omega m$,
- praktycznie pomijalna stratność $tg\delta = 10^{-8}...10^{-7}$,
- przenikalność elektryczna powietrza $\varepsilon_r = 1{,}00059$.

Różnią się wytrzymałością elektryczną. Miarą wytrzymałości elektrycznej gazu jest napięcie przeskoku w nim iskry między równoległymi elektrodami płaskimi o odstępie 1 cm.



Szkic układu elektrod do badania wytrzymałości elektrycznej dielektryków gazowych

Powietrze atmosferyczne

Własności powietrza atmosferycznego:

- skład: 78 % N_2, 21 % O_2, 1 % CO_2 + H_2 + gazy szlachetne,
- warunki normalne: p_n = 1013 hPa, T_n = 293 K i w_n = 8,5 g wody w 1 m^3 powietrza,
- gęstość powietrza 1,25 $kg \cdot m^{-3}$,
- wytrzymałość elektryczna $U_p \cong$ 32 kV (elektrody płaskie, odstęp 1 cm),
- istotne czynniki: zanieczyszczenia, mgła, deszcz, śnieg, grad.

Wydzielone składniki powietrza

<u>Azot</u>

- niepalny, nietoksyczny, tani, obojętny (do około 60 °C),
- własności elektryczne zbliżone do własności powietrza,
- stosowany pod ciśnieniem do kilkunastu atmosfer.

Gazy syntetyczne

Sześciofluorek siarki (SF_6)

- bezbarwny, bezwonny, niepalny i nietoksyczny,
- chemicznie obojętny i trwały do temperatury prawie 800 K,
- gęstość pięciokrotnie większa od powietrza,
- najważniejsza własność - elektroujemność,
- wytrzymałość elektryczna 89 kV (elektrody płaskie, odstęp 1 cm),
- temperatura skraplania –63°C,
- stosowany jako izolacja urządzeń wysokiego napięcia: kabli, transformatorów, łączników, kompletnych rozdzielnic elektroenergetycznych.

Dielektryki ciekłe

Oleje mineralne

Oleje izolacyjne otrzymuje się z wybranych gatunków ropy naftowej przez jej destylację (frakcje od 8 do 12 atomów węgla w cząsteczce).

Przeprowadza się rafinację olejów z zastosowaniem kwasów (H_2SO_4), które wiążą niepożądane składniki. Następnie oczyszcza się je z reagentów i produktów rafinacji przez ługowanie, przemywanie wodą i filtrowanie.

Oleje mineralne izolacyjne to mieszanina węglowodorów:

- parafinowych - łańcuchy węglowe, C_nH_{2n} (n = 8...12),
- naftenowych - pierścienie węglowe, np. dekalina, $C_{10}H_{18}$,
- aromatycznych - pierścienie węglowe, pochodne benzenu.

Podstawowe własności elektryczne olejów mineralnych:

- $\rho = 10^8...10^{12}\ \Omega$m,
- ε_r = 2,1...2,5,
- $tg\delta$ = 0,001...0,01,
- U_p = 100...150 kV (elektrody płaskie w odległości 1 cm).

Oleje syntetyczne

- chlorowane dwufenyle (wycofywane z eksploatacji),
- oleje silikonowe (mieszaniny krzemowodorów):
  - trudniej zapalne niż oleje mineralne,
  - wysoka wytrzymałość cieplna (do 200°C),
  - niska temperatura krzepnięcia (do –90°C),
  - nieco mniejsza wytrzymałość elektryczną niż olejów mineralnych,
  - rzadko stosowane - wysoka cena.

Inne syntetyczne ciecze izolacyjne

(rzadko stosowane)

- syntetyczne węglowodory aromatyczne:
  - mała wartość stratności elektrycznej ($tg\delta \cong 10^{-4}$),
- estry:
  - stosunkowo duża przenikalność elektryczna (ε_r = 3...6).

Dielektryki stałe nieorganiczne

Materiały stapiane (szkła)

Kryterium podziału szkieł jest ich skład chemiczny i temperatura mięknienia. W szkłach wyróżnia się składniki szkłotwórcze i modyfikujące.

Podstawowe grupy szkieł:

1) szkło o bardzo niskiej temperaturze mięknienia < 300 °C, np. szkło ołowiowo-borowe (90 % PbO, 10 % B_2O_3) szkliwo wiążące, spoiwo do innych szkieł,

2) szkło miękkie ołowiowo-krzemowe, temp. mięk. < 550 °C, izolatory, części konstrukcyjne elektrycznych źródeł światła,

3) szkło miękkie wapniowo-alkaliczne, temp. mięk. 550...700 °C (składniki podstawowe: 70 % SiO_2, 16 % Na_2O, 6 % CaO), żarówki, świetlówki, klosze lamp,

4) szkło półtwarde borowo-krzemowe, temp. mięk. 700...750 °C (20 % B_2O_3, 73 % SiO_2), mała stratność elektryczna, mała rozszerzalność cieplna, elementy izolacyjno-konstrukcyjne urządzeń w.cz., szczelne połączenia z metalami,

5) szkło twarde glinowo-borowo-krzemowe, temp. miękn. 750...950°C (20% Al_2O_3, 9% B_2O_3, 56% SiO_2), złącza z metalami, elementy odporne na zmiany temperatury,

6) szkło kwarcowe (minimum 96% SiO_2) i kwarc topiony, temp. miękn. do 1660°C, elementy o małej stratności elektrycznej i dużej wytrzymałości mechanicznej.

Włókno szklane

- zawiera około 54% SiO_2 i mniej niż 0,8% tlenków alkalicznych,
- wytrzymałość mechaniczna większa niż większości włókien naturalnych i syntetycznych,
- współczynnik wydłużalności cieplnej, około $5 \cdot 10^{-6}$ K^{-1},
- rodzaje włókien szklanych:
    - ultracienkie o średnicy mniejszej od 1 μm,
    - mikronowe o średnicy od 1 do 3 μm,
    - normalne o średnicy od 3 do 9 μm,
    - roving o średnicy od 9 do 12 μm.

Zastosowanie włókna szklanego:

- oploty izolacyjne drutów nawojowych,
- materiały tkane o różnej jakości i grubości (jedwab szklany, tkaniny szklane, maty szklane),
- włókno szklane jest składnikiem:
    - materiałów izolacyjnych złożonych, tzw. laminatów,
    - izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych.

Własności elektryczne szkieł (wartości orientacyjne):

- $\varepsilon_r > 3{,}9$ (dla szkieł ołowiowych $\varepsilon_r = 16{,}5$),
- $tg\delta$ dochodzi do 0,1 (czysty kwarc $tg\delta = 0{,}0001$),
- $\rho_v = 10^8\ \Omega$m dla szkieł alkalicznych,
- $\rho_v = 10^{18}\ \Omega$m dla czystego kwarcu.

Materiały wypalane (ceramika)

Ceramika to bogaty zbiór materiałów o różnorodnych własnościach.

Wyróżnia się osiem podstawowych grup materiałów ceramicznych:

1) porcelana elektrotechniczna, surowce:
   kaolin ($Al_2O_3 \cdot 3SiO_2 \cdot 2H_2O$), krzemionka ($SiO_2$) i skaleń ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$),
2) ceramika steatytowa (talk $3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$),
3) ceramika kondensatorowa (ε_r = 10 do 160),
4) ceramika kordierytowa i celsjanowa (łuko- i żaroodporna),
5) ceramika porowata (materiały szamotowe),
6) ceramika alundowa (90...98 % Al_2O_3)
7) ceramika korundowa (Al_2O_3 powyżej 98 %),
8) ceramika tlenkowa (BeO, MgO, ZrO_2).

Mika

- nieorganiczny materiał kopalny o strukturze warstwowej,
- mika potasowa, *muskowit*, $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$,
- mika magnezowa, *flogopit*, $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$,
- muskowit - lepszy: $\rho_v \cong 10^{14}\ \Omega m$, $\varepsilon_r \cong 7$, $tg\delta \cong 0{,}0004$,
- E_p muskowitu około 1300 $kV \cdot cm^{-1}$ (płytka o grubości 0,05 mm),
- mikę wydobywa się metodami górniczymi w postaci bloków,
- oczyszczanie i dzielenie na płytki o grubości od 0,05 do 0,17 mm,
- dalszy podział - mika łuszczona,
- najcieńsze uzyskiwane płytki miki mają grubość około 0,2 μm,
- odpad po oczyszczeniu stanowi 90 % materiału wyjściowego,
- *mika syntetyczna* (fluoroflogopit) $KMg_3AlSi_3O_{10}F_2$,
- mikę syntetyczną wytapia się w piecach elektrycznych.

Dielektryki stałe organiczne

Materiały łatwo topliwe

- dzielą się na trzy podgrupy: żywice, asfalty i woski,
- większość materiałów jest pochodzenia naturalnego,
- niektóre materiały naturalne są modyfikowane chemicznie,
- temperatura mięknienia od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu stopni Celsjusza,
- materiały hydrofobowe (duża rezystywność powierzchniowa),
- duża plastyczność większości materiałów.

<u>Niskotopliwe żywice naturalne i syntetyczne</u>

Kalafonia - naturalna żywica pochodzenia roślinnego uzyskiwana w procesie destylacji frakcyjnej żywicy sosnowej,

Kopale - naturalne żywice uzyskiwane z pewnych gatunków drzew,

Szelak - żywica naturalna pochodzenia zwierzęcego,

Żywice syntetyczne - wielkocząsteczkowe produkty polimeryzacji różnych związków organicznych.

Asfalty naturalne, ponaftowe i węglowe

Asfalty naturalne - mieszanina węglowodorów z dodatkiem siarki, tlenu i azotu - materiały kopalne,

Asfalty ponaftowe - asfalty sztuczne, pozostałość po destylacji ropy naftowej bezparafinowej,

Asfalty węglowe - najcięższe frakcje suchej destylacji węgla.

Woski

Parafina - z ropy naftowej parafinowej, C_nH_{2n+2} n około 30,

Cerezyna - podobna do parafiny - z ozokerytu (wosku ziemnego),

Wosk carnauba - z liści rosnącej w Brazylii palmy Carnauba,

Woskol - wosk syntetyczny - produkt chlorowania naftalenu ($C_{10}H_8$).

Materiały włókniste

- materiały naturalne pochodzenia roślinnego,
- materiały sztuczne (materiały roślinne przetworzone chemicznie),
- materiały naturalne pochodzenia zwierzęcego,
- materiały syntetyczne (otrzymane z żywic syntetycznych).

Materiały naturalne pochodzenia roślinnego

- podstawowy składnik: celuloza $(C_6H_{10}O_5)_n$,
- surowiec: drewno, bawełna, len, konopie i juta:
  - *bibułka celulozowa* - najcieńszy wyrób papierowy,
  - *papier izolacyjny* - grubość rzędu 0,05...0,1 mm,
  - *preszpan* - twardy (zwykły), miękki (formowalny),
  - *sznury, taśmy, tkaniny* - z bawełny, lnu, konopi i juty.

Materiały roślinne przetworzone chemicznie

- *bawełna acetylowana* (kotopa) - otrzymywanie: reakcja zawartego w celulozie błonnika z chlorkiem kwasu octowego,
- *jedwab octanowy* - produkt przeróbki chemicznej celulozy,
- *jedwab wiskozowy* - produkt przeróbki chemicznej celulozy.

Materiały naturalne pochodzenia zwierzęcego

- *jedwab naturalny* - dobre własności izolacyjne i mechaniczne.

Materiały syntetyczne

- *włókna poliamidowe* (nylon, stylon, kapron, perlon) - dobre własności izolacyjne i duża wytrzymałość mechaniczna.

Elastomery (gumy)

- polimery organiczne,
- cząsteczki mają kształt spiralny lub zygzakowaty,
- surowiec: kauczuki naturalne i syntetyczne,
- wulkanizacja - sieciowanie (wiązania międzyatomowe poprzeczne),
- odkształcenie elastyczne w granicach 100...1000 %.

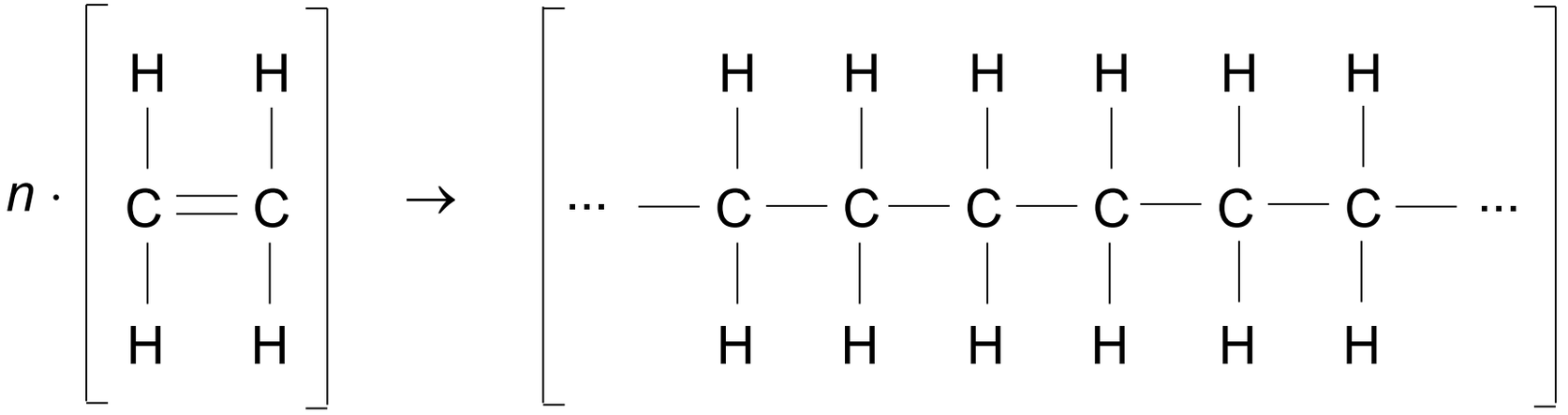
Najczęściej stosowane elastomery:

- *kauczuk butadienowy* - najbardziej rozpowszechniony, produkt polimeryzacji butadienu (C_4H_6),
- *kauczuk butadienowo-akrylonitrylowy* - produkt kopolimeryzacji butadienu i akrylonitrylu,
- *kauczuk butadienowo-styrenowy* - produkt kopolimeryzacji butadienu i styrenu (C_8H_8),
- *kauczuk butylowy* - produkt kopolimeryzacji izobutylenu (C_4H_8) i izoprenu (C_5H_8),
- *kauczuk silikonowy* - łańcuch cząsteczek z połączonych na przemian atomów krzemu i tlenu.

Termoplasty

- materiały syntetyczne składające się z polimerów organicznych,
- cząsteczki mają najczęściej kształt liniowy niekiedy rozgałęziony,
- makrocząsteczki powiązane słabymi wiązaniami międzycząsteczkowymi,
- możliwości wielokrotnego topienia lub zmiękczania,
- należą do najlepszych materiałów izolacyjnych (polietylen, polipropylen):
  - $\rho_v = 10^{16}\ \Omega$m,
  - $tg\delta = 0{,}0001$,
  - $\varepsilon_r \cong 2{,}2...2{,}7$,
  - E_p do 1000 kV·cm^{-1} (warstwa około 0,1 mm),
- łatwe formowanie przez: wtryskiwanie, wytłaczanie, wyciąganie, prasowanie, odlewanie,
- proces sieciowania - połączenie wiązaniami międzyatomowymi makrocząsteczek metodą chemiczną lub przez napromieniowanie,
- sieciowanie zwiększa wytrzymałość mechaniczną, odporność cieplną i odporność na starzenie.

Polietylen (PE)



Polimeryzacja etylenu:

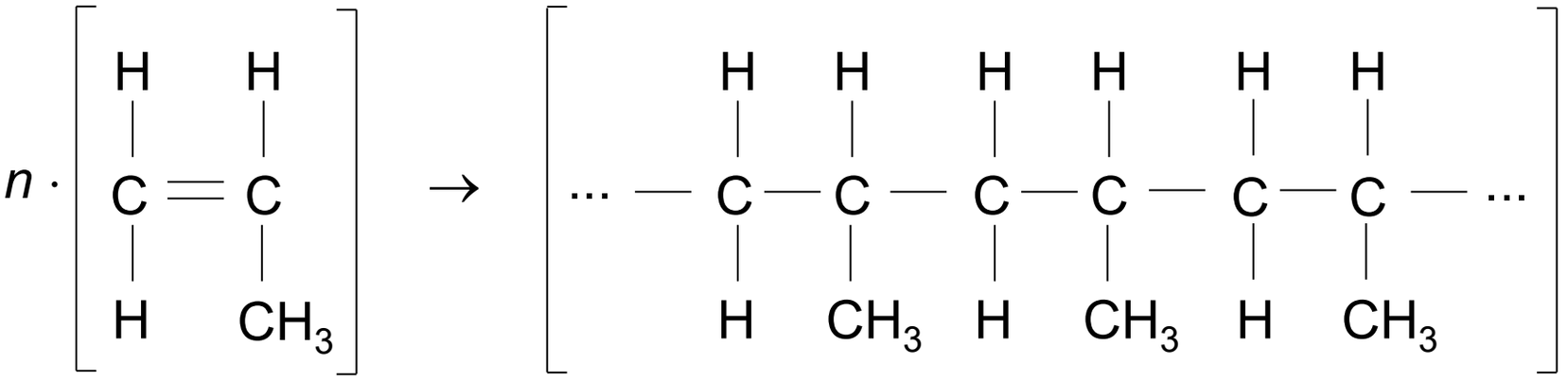
- metoda wysokociśnieniowa - PE o gęstości (0,91...0,92 g·cm^{-3},
- metoda średniociśnieniowa - PE o gęstości 0,93...0,94 g·cm^{-3},
- metoda niskociśnieniowa - PE o gęstości i 0,95...0,96 g·cm^{-3}.

Struktura regularna: krystality - udział objętościowy 40...95 %,

Polietylen o małej gęstości usieciowany (XLPE):

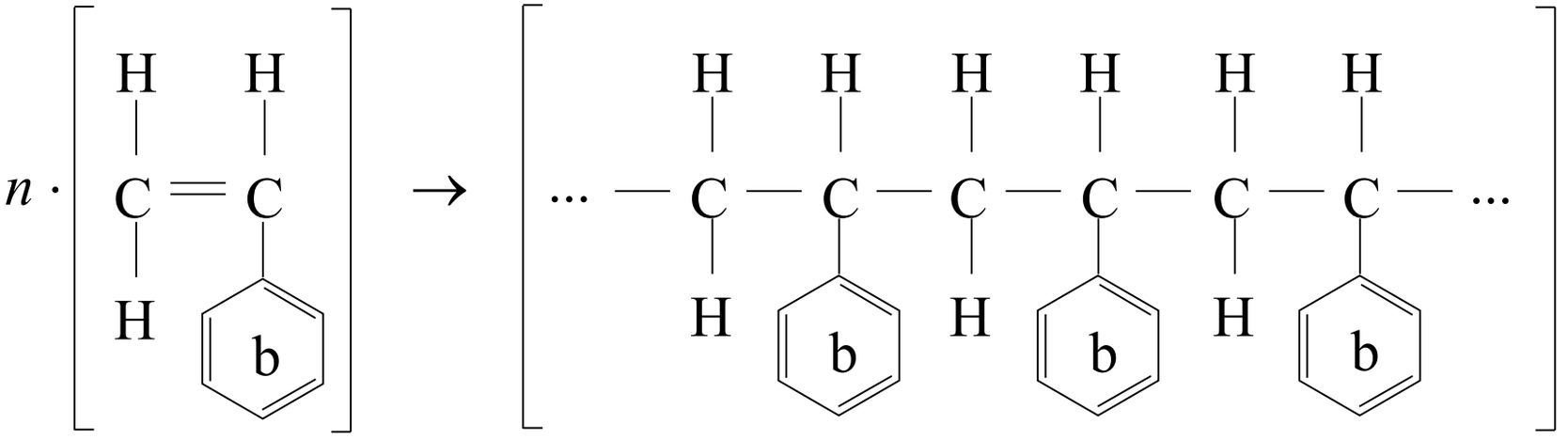
- dopuszczalna temperatura pracy ciągłej do 90 °C,
- szerokie zastosowanie izolacyjne.

Polipropylen (PP)



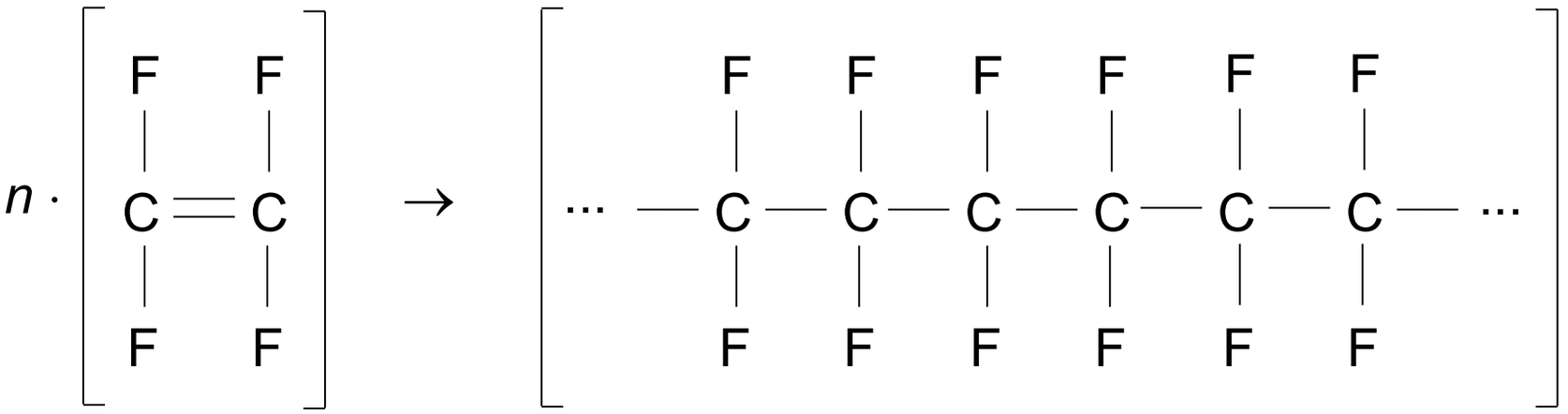
Ma lepsze własności mechaniczne od polietylenu, jego gęstość wynosi 0,90...0,91 g·cm^{-3}, a dopuszczalna temperatura pracy ciągłej dochodzi do 140°C.

Polistyren (PS)



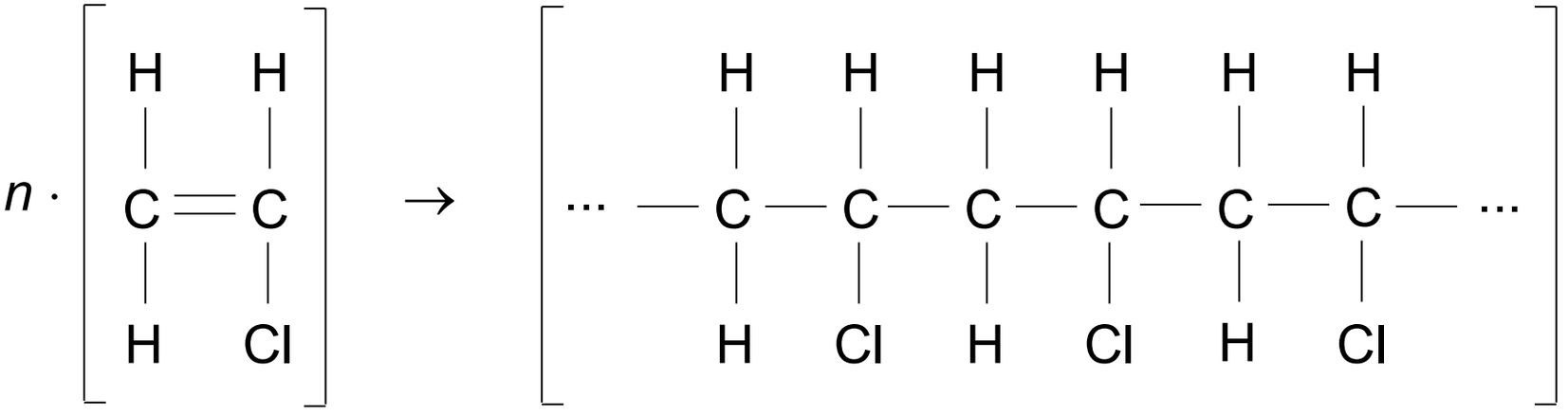
Jest twardy, ma dużą wytrzymałość mechaniczną oraz niską temperaturę dopuszczalną pracy ciągłej (75°C). Jest stosowany jako dielektryk w kondensatorach pracujących przy w.cz.

Policzterofluoroetylen (PTFE) teflon



Zawiera krystality 45...80 %, ma dużą odporność cieplną i chemiczną. Jest niepalny, może pracować w zakresie od –200 °C do +250 °C. Jest drogi i trudny w produkcji.

Polichlorek winylu (PVC)



Posiada mierne własności elektryczne, jest odporny na działanie czynników chemicznych. Charakteryzuje się stosunkowo niską temperaturą mięknienia (85 °C), jest tani i łatwy w produkcji.

Duroplasty

To syntetyczne polimery organiczne uzyskiwane w procesie polikondensacji przez formowanie i utwardzanie.

Utwardzanie, przez podgrzanie lub zastosowanie utwardzaczy, jest procesem nieodwracalnym. Element izolacyjny jest w całej objętości usieciowany przez wiązania międzyatomowe.

Podstawowe własności duroplastów:

- $\rho_v = 10^7...10^{14}\ \Omega m$,
- $tg\delta = 0{,}001...0{,}01$,
- $\varepsilon_r = 3{,}5...10$),
- $E_p = 120...350\ kV \cdot cm^{-1}$.

Zastosowanie: żywice lane, tłoczywa, lakiery, kleje.

<u>Tworzywa fenolowo-formaldehydowe</u>

- produkty polikondensacji formaldehydu z fenolami,
- tłoczywa z różnymi wypełniaczami (bakelity, tekstolity),
- bardzo dobre własności mechaniczne,
- mierne własności elektryczne.

Tworzywa melaminowo-formaldehydowe

- produkty polikondensacji formaldehydu z melaminą,
- stosuje się z napełniaczami nieorganicznymi,
- odporne na wyładowania elektryczne (komory łukowe).

Tworzywa epoksydowe

- makrocząsteczki liniowe - sieciowane w procesie utwardzania,
- dobra przyczepność do materiałów nieorganicznych,
- wytrzymałe laminaty na bazie tkaniny szklanej.

Tworzywa silikonowe

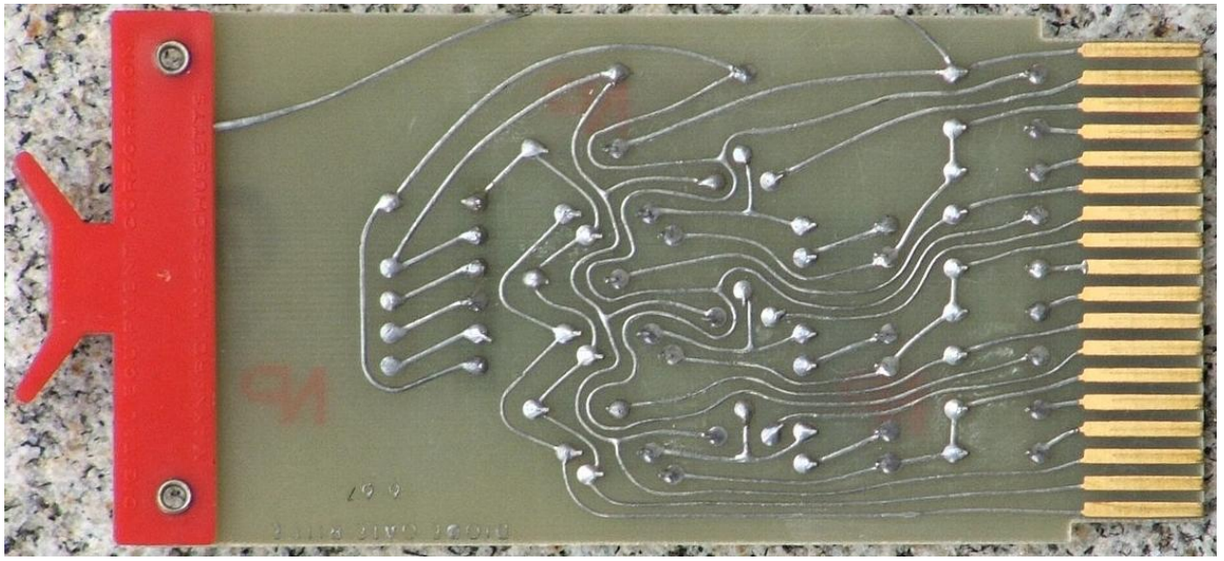
- łańcuchy makrocząsteczek - na przemian atomy krzemu i tlenu,
- boczne obiekty: grupy metylowe (CH_3) lub fenylowe (C_6H_5),
- mogą być kwalifikowane jako elastomery lub duroplasty, zależnie od stopnia usieciowania i zawartości wypełniaczy,
- są hydrofobowe, mają mierne własności elektryczne i mechaniczne,
- temperatura pracy do 180...250°C, przy zastosowaniu wypełniaczy ceramicznych do 300...400°C.

Materiały izolacyjne w budowie obwodów drukowanych (PCB)

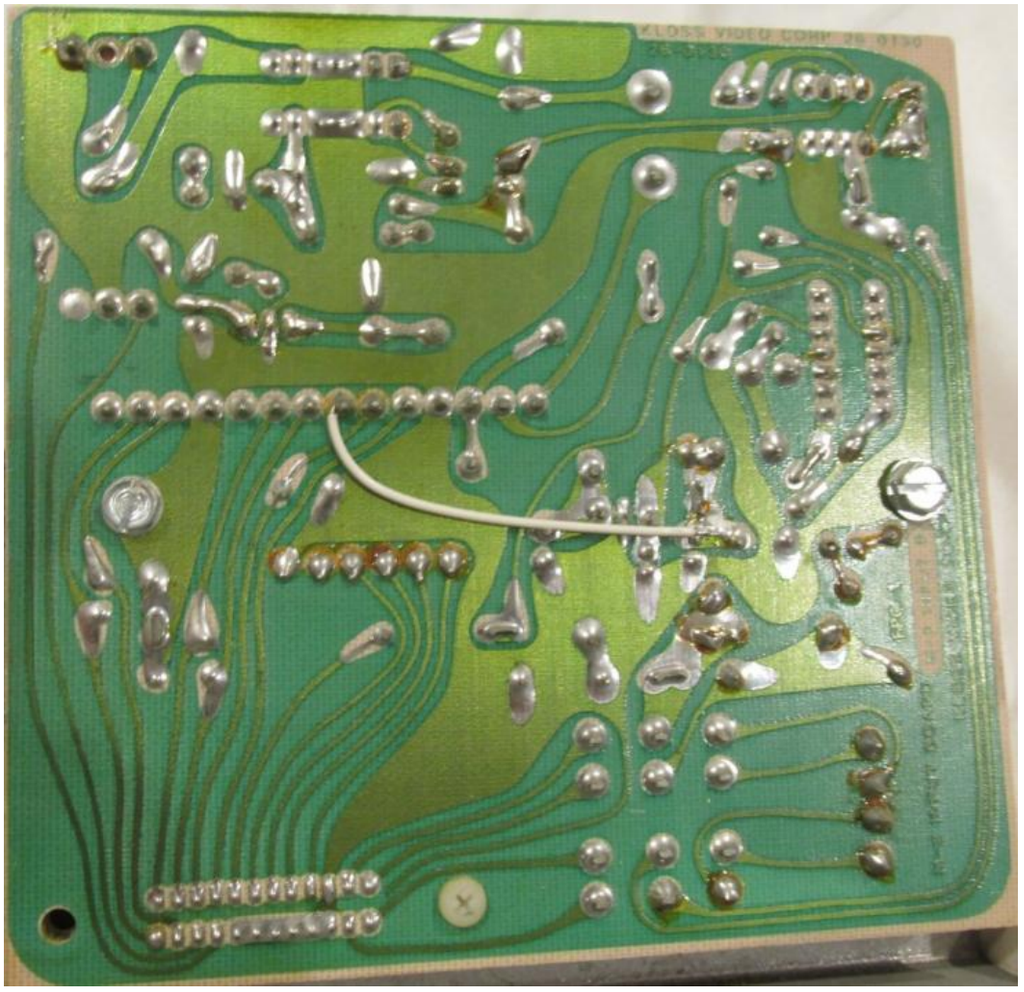
Płytka obwodu drukowanego (PCB - *Printed Circuit Board*) to płytka z materiału izolacyjnego z siecią ścieżek wykonanych z folii miedzianej, przeznaczona do montażu podzespołów elektronicznych (tranzystorów, rezystorów, układów scalonych itp.).

Płytka drukowana może być bazową częścią konstrukcyjną chassis w urządzeniach elektronicznych (telewizorach, radioodbiornikach, monitorach, laptopach itp.). Może być jednostronna, dwustronna lub wielowarstwowa.

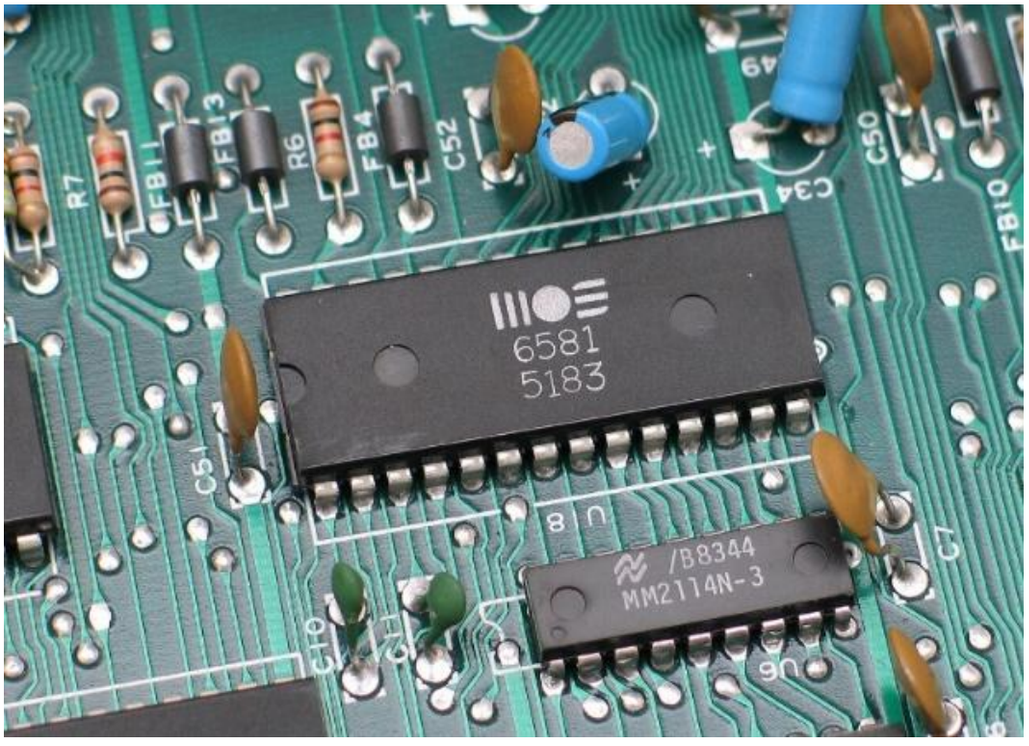
Podzespoły elektroniczne na płytce montuje się metodą przewlekania (*Through-Hole Technology, THT*) albo powierzchniowo (*Surface-Mount Device, SMD*).



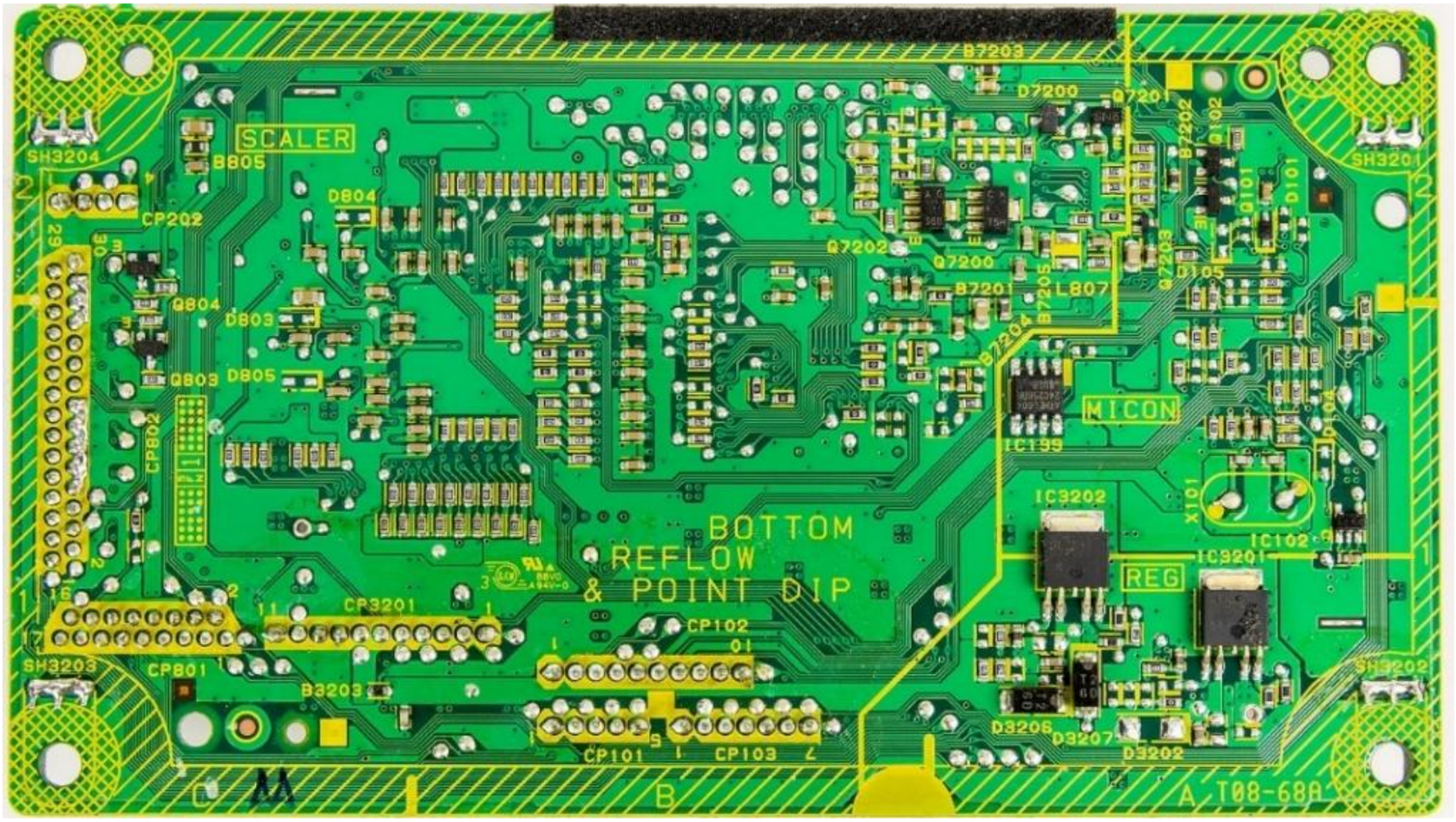
PCB z 1967 roku, zaprojektowana ręcznie z użyciem taśmy klejącej



PCB - przykład ręcznie rysowanych ścieżek widocznych po wytrawieniu miedzi



Elementy zamontowane metodą przewlekania (THT) na płytce PCB komputera domowego Commodore 64 z połowy lat 80



Płytka drukowana z zieloną maską lutowniczą i żółtym sitodrukiem

Aktualnie stosowane laminaty do produkcji PCB

FR-2 - papier, żywica fenolowa, T_m = 105°C,

FR-3 - tkanina szklana, żywica epoksydowa, T_m = 105°C,

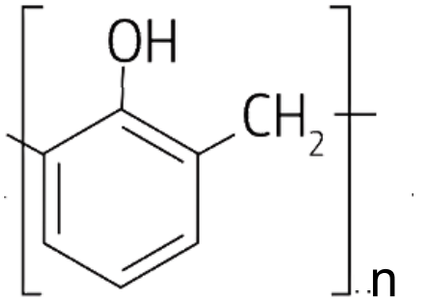
FR-4 - tkanina szklana, żywica epoksydowa, T_m = 130°C,

CEM-1 - papier, tkanina szklana, żywica epoksydowa, T_m = 130°C,

CEM-3 - włóknina szklana, tkanina szklana, żywica epoksydowa, T_m = 130°C,

Laminat typu FR-2 powstaje przez laminowanie papieru nasączanego żywicą fenolową (najczęściej fenoplastem fenolowo-formaldehydowym).

Fenoplasty to tworzywa sztuczne na bazie żywic fenolowo-formaldehydowych o poniższym wzorze strukturalnym, które otrzymywane są w wyniku polikondensacji fenolu i formaldehydu.

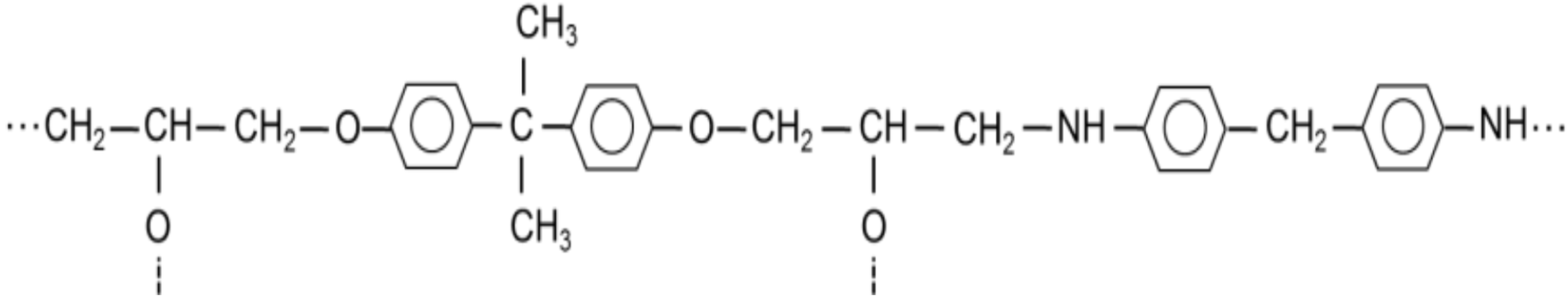


Laminaty FR-2 są jednymi z najpopularniejszych w przemyśle, zwłaszcza w formie niedrogich, jednowarstwowych płytek PCB w sprzęcie konsumenckim.

Charakteryzują się przenikalnością elektryczną ε_r = 4,5 (przy 1 MHz) oraz wytrzymałością elektryczną U_p = 29 kV/mm.

Laminat typu FR-4 jest drugim, co do popularności, laminatem w sprzęcie elektronicznym. Ma lepsze własności mechaniczne i elektryczne niż FR-2. Powstaje z nałożonych na siebie kilku warstw tkaniny szklanej i nasączeniu ich żywicą epoksydową. Dla standardowej PCB o grubości 1,6 mm jest to osiem warstw.

Epoksydowy materiał kompozytowy (CEM*, Composite Epoxy Material*) może składać się z warstw tkaniny szklanej, włókniny szklanej lub papieru połączonych żywicą epoksydową.



Wzór strukturalny żywicy epoksydowej

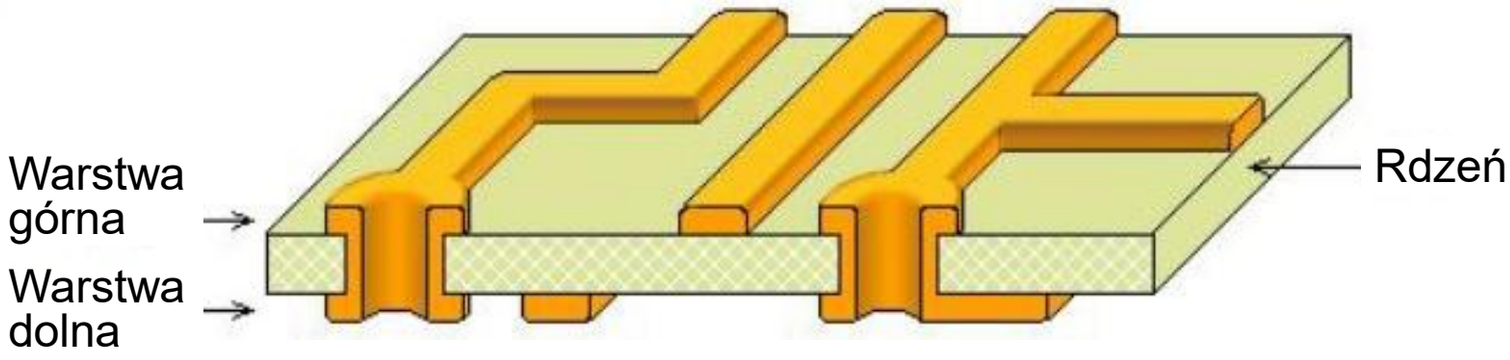
Laminat CEM-1 jest najtańszym z laminatów typu CEM. Wykonywany jest z jednej warstwy papieru celulozowego laminowanej z pojedynczą warstwą tkaniny z włókien szklanych.

Laminat CEM-3 wykonywany jest z wielu warstw włókniny szklanej nasączonych żywicą epoksydową.

Wszystkie laminaty pokrywane są przewodzącą folią, w znakomitej większości miedzianą. Typowo folia ma grubość 35 µm. Nazywana jest folią 1 oz. (uncja) od faktu, że stopa kwadratowa takiej folii waży dokładnie jedną uncję (ok. 28,35 g). Jednak możliwe jest zastosowanie grubszych folii, na przykład 70 µm lub 105 µm, jeśli konieczne jest uzyskanie np. mniejszej rezystancji ścieżek przy zadanej ich szerokości.

Jednostronne (jednowarstwowe) płytki PCB są przeznaczone do produkcji nieskomplikowanych układów i urządzeń, najczęściej codziennego użytku.

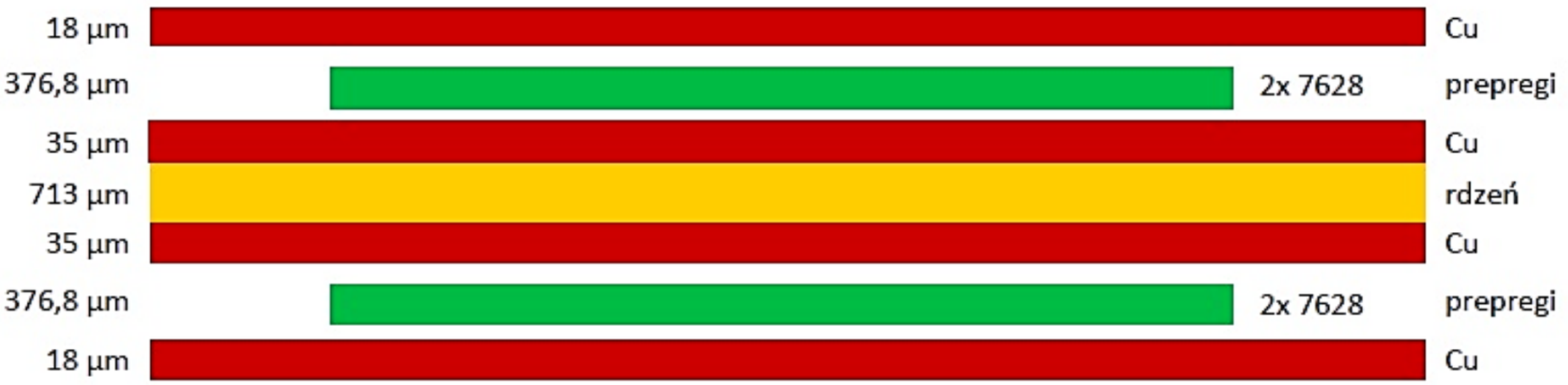
Dwustronne (dwuwarstwowe) płytki PCB mają ścieżki po obu stronach, które mogą być łączone tzw. przelotkami. Z racji zastosowań i większych wymogów odnośnie trwałości do ich produkcji stosuje się materiał FR-4.



Zasada budowy obwodu dwuwarstwowego (dwustronnego)

Wielowarstwowe płytki PCB mają formę stosu o regularnej strukturze warstwowej, zwykle symetrycznej względem środka.

W przekroju poprzecznym takich laminatów występują trzy elementy: folie miedziane oraz rdzenie i prepregi, które są wykonane najczęściej z laminatu FR-4.



Zasada budowy obwodu czterowarstwowego

Technologie wytwarzania PCB

Materiałem wyjściowym jest płytka laminatu pokryta z jednej (płytka jednostronna) lub z dwóch stron (płytka dwustronna) folią miedzianą. Stosowane grubości warstwy miedzianej to: 18 µm, 35 µm, 70 µm, 105 µm.

Wiertarką numeryczną wykonywane są otwory do metalizacji (pady THT- służące do montażu przewlekanego oraz przelotki - otwory, dzięki którym ścieżki mogą zmieniać bieg z jednej warstwy na drugą), z kolei metodą elektrochemiczną (galwanizacja) wykonywana jest metalizacja tych otworów.

Następnie w sposób fotochemiczny nanoszony jest na nie rysunek połączeń (ścieżki, pady, przelotki) w formie substancji zabezpieczającej przed trawieniem.

Z kolei płytka zostaje zanurzona w kąpieli trawiącej (tylko powierzchnie niezabezpieczone ulegają trawieniu). Następnie usuwa się tę substancję, a powierzchnie płytki drukowanej są pokrywane (metodą sitodruku) izolacyjną maską przeciw-lutowniczą (najczęściej w kolorze zielonym), która zasłania (zabezpiecza) przelotki i ścieżki, a odsłania tylko punkty lutownicze.

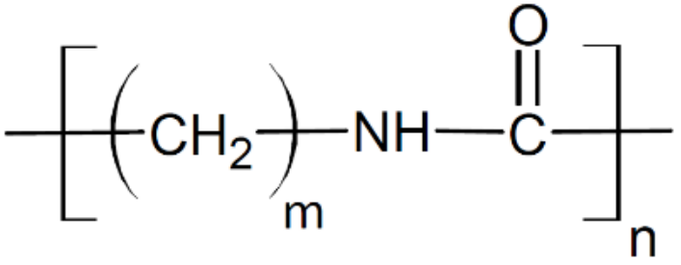
Dodatkowo metodą sitodruku nanoszone są napisy, np. nazwa płytki, informacje montażowe, nazwy i oznaczenia elementów, ich orientacje itp.

Technologia wykonywania płytek cztero- i więcej warstwowych różni się (w dużym skrócie) od wyżej opisanej technologii produkcji płytek 2-warstwowych.

Różnica polega na tym, że płytki takie są wykonywane w wyniku sklejenia (klejem epoksydowym) na odpowiednim etapie produkcji ze sobą kilku płytek dwuwarstwowych.

Elastyczne płytki PCB (typu flex) zawierają elastyczne laminaty, najczęściej z cienkiej folii z poliimidu (duromeru). Duromery zachowują kształt przy długotrwałych obciążeniach w wysokich temperaturach, są więc idealnym materiałem na cienkie, elastyczne płytki drukowane.

Typowe laminaty poliimidowe mają grubość zaledwie kilkudziesięciu mikrometrów. Ścieżki gotowe płytek drukowanych są pokrywane także poliimidami, które spełniają funkcję maski lutowniczej.



Wzór strukturalny wybranego poliimidu

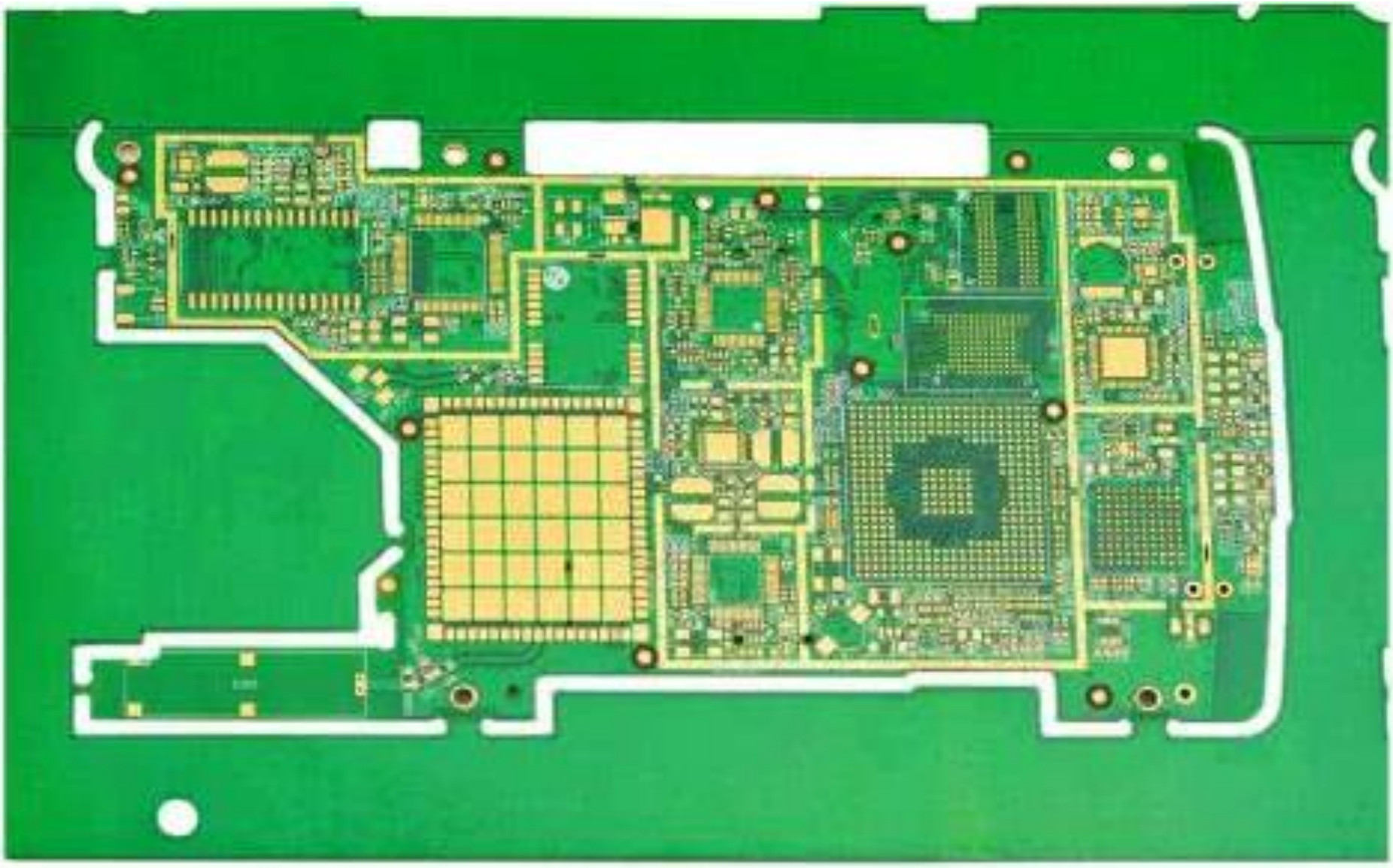
Płytki drukowane o wysokiej integracji (HDI)

Płytki HDI są to PCB o większej gęstości połączeń (ścieżek) na jednostkę powierzchni niż w przypadku konwencjonalnych płytek drukowanych.

Cechują się węższymi (poniżej 100 µm) ścieżkami i odstępami między nimi, mniejszymi otworami przelotek (<150 µm) i polami otaczającej je miedzi (<400 µm), a także zwiększoną gęstością pól lutowniczych (padów) - powyżej 20 padów na centymetr kwadratowy.

Przykładową płytkę drukowaną o wysokim stopniu integracji pokazano na następnej stronie. Jest to ośmiowarstwowa płytka PCB o grubości zaledwie 1 mm.

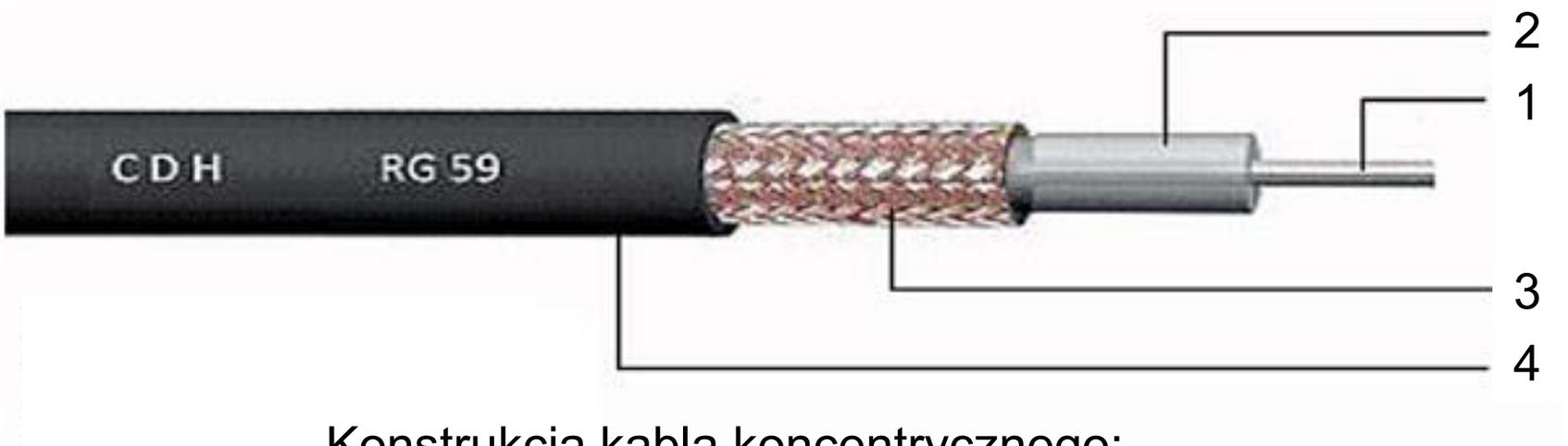
Wykonana jest z laminatu FR-4, ale wszystkie elementy na PCB mają dużo mniejsze wymiary niż typowo na tego rodzaju płytkach: ścieżki 4 mils (0,1 mm), otwory 0,1 mm itp. Obecne są także ślepe i zagrzebane przelotki.



Przykładowa płytka drukowana o wysokiej integracji

Materiały izolacyjne w budowie kabli koncentrycznych

Kabel koncentryczny to tor transmisyjny współosiowy zbudowany z pojedynczego przewodu izolowanego dielektrykiem, wokół którego umieszczony jest współosiowo drugi cylindryczny przewód pokryty powłoką termoplastyczną.



Konstrukcja kabla koncentrycznego:

1 - przewód wewnętrzny,
2 - izolacja,
3 - przewód zewnętrzny,
4 - zewnętrzna powłoka ochronna.

Przewód wewnętrzny wykonany jest przeważnie z miedzi jako jednodrutowy lub w postaci linki. Ze względu na zjawisko naskórkowości przy przesyle sygnałów wielkiej częstotliwości, przewód wewnętrzny może być powlekany srebrem lub wykonany jako dwuwarstwowy, z warstwą wewnętrzną ze stali lub aluminium oraz warstwą zewnętrzną z miedzi.

Izolacja kabla koncentrycznego może być wykonana z litego lub spienionego plastiku. Może ją także stanowić powietrze z wkładkami dystansowymi.

Rodzaj izolacji określa niektóre właściwości elektryczne i fizyczne kabla. W kablach o mniejszych stratach stosuje się często izolację z litego polietylenu (PE).

Przenikalność elektryczna względna ε_r litego polietylenu wynosi od 2,1 do 2,25.

Kable koncentryczne z izolacją ze spienionego polietylenu mają mniejszą pojemność oraz większy współczynnik propagacji fali elektromagnetycznej, ponieważ ε_r tego materiału wynosi od 1,3 do 1,6, a jego grubość musi być większa aby uzyskać wymaganą wytrzymałość elektryczną kabla.

Izolację kabli koncentrycznych narażonych na wysokie temperatury wykonuje się z litego teflonu (PTFE), charakteryzującego się podobnymi własnościami elektrycznymi, jak lity polietylen.

W niektórych kablach koncentrycznych rolę izolacji pełni powietrze (lub inny gaz). Koniecznym elementem konstrukcyjnym są tutaj wkładki izolacyjne utrzymujące przewód wewnętrzny w osi kabla.

Przewód zewnętrzny kabla koncentrycznego wykonany jest w postaci cylindrycznego oplotu z drutów miedzianych lub rurki z taśmy poliestrowej pokrytej jednostronnie lub dwustronnie aluminium i oplotu z drutów miedzianych ocynowanych.

W niektórych przypadkach przewód zewnętrzny wykonany jest w formie wielokrotnego oplotu z drutów miedzianych. Dzięki takiej budowie kable o torach współosiowych są bardziej odporne na zakłócenia zewnętrzne niż kable symetryczne.

Oplotowa konstrukcja przewodu zewnętrznego zapewnia elastyczność kabla koncentrycznego i dopuszcza jego zginanie w określonych granicach.

Zewnętrzna powłoka ochronna kabla koncentrycznego wykonywana jest z tworzyw termoplastycznych. Zapobiega mechanicznym i środowiskowym uszkodzeniom przewodu zewnętrznego.

W zależności od potrzeb środowiska w jakim pracuje kabel, mogą być użyte takie tworzywa termoplastyczne, jak: polichlorek winylu (PVC), polietylen (PE) lub tworzywa bezhalogenowe.

Kable układane bezpośrednio w ziemi są wypełnione pod powłoką ochronną żelem higroskopowym i posiadają barierę niedopuszczającą do wnikania wilgoci w głąb kabla.