

---

**KATEDRA PRZYRZĄDÓW  
PÓŁPRZEWODNIKOWYCH I OPTOELEKTRONICZNYCH**

*Laboratorium Mikrotechnologii*

---

# **Inżynieria Wytwarzania**

**Ćwiczenie 4**

**Fotolitografia**

## 1. Podstawy teoretyczne

### 1.1. Klasyfikacja metod odwzorowywania kształtów.

Fotolitografia jest podstawowym procesem wykorzystywanym do odwzorowywania kształtów w produkcji przyrządów półprzewodnikowych. W procesie tym kształty z przygotowanej uprzednio maski fotolitograficznej są odwzorowywane na cienkiej warstwie emulsji światłoczułej rozprowadzonej na powierzchni płytki krzemowej. W rezultacie możliwe jest selektywne prowadzenie takich procesów jak trawienie krzemu, domieszkowanie, tworzenie ścieżek przewodzących na powierzchni struktur.

Najistotniejszymi parametrami procesu fotolitografii są **długość stosowanej fali promieniowania** naświetlającego (od ultrafioletu do promieniowania X – zmniejszanie długości fali umożliwia odwzorowywanie mniejszych elementów) oraz **odległość** płytki z emulsją światłoczułą od maski fotolitograficznej (tryb zbliżeniowy lub kontaktowy). Warunkują one bezpośrednio wielkość najmniejszej struktury możliwej do odtworzenia, tzw. **wymiar krytyczny** (np. szerokość bramki tranzystora MOS) – obecnie osiągający wartość nawet 0,065  $\mu\text{m}$  (Intel), co z kolei wiąże się z gęstością upakowania elementów półprzewodnikowych na powierzchni krzemu. Wymiar krytyczny **CD** (*critical dimension*) w danej technologii w przybliżeniu można określić następującą zależnością:

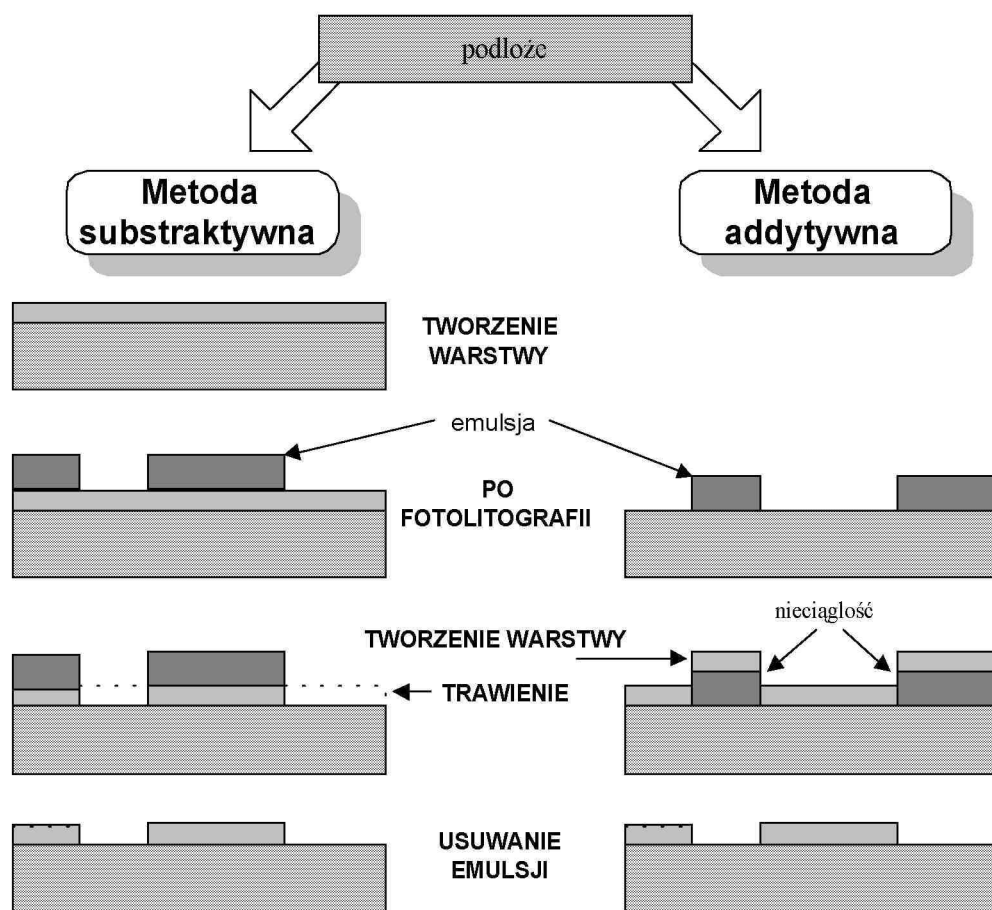
$$CD = \frac{\lambda}{2 \cdot N_A}$$

gdzie  $\lambda$  - długość fali promieniowania naświetlającego,  $N_A$  – apertura układu optycznego (rzędu 0,6 - 1)

Na końcową jakość procesu duży wpływ mają również stan maski fotolitograficznej a także czystość podłoża, emulsji i otoczenia podczas procesu. Wszelkie zadrapania bądź zanieczyszczenia maski powodują błędy odwzorowania i w konsekwencji prowadzą do wykonania struktury wadliwej. Dlatego procesy fotolitografii prowadzi się zawsze w pomieszczeniach o najwyższym możliwym poziomie czystości. Jest to tym bardziej istotne, że wykonanie nawet układów scalonych o niskim stopniu skomplikowania wymaga kilku – kilkunastu procesów fotolitografii z użyciem różnych masek, co znacznie zwiększa ryzyko pojawienia się krytycznych błędów w którymkolwiek z procesów. Dodatkowo zastosowanie więcej niż jednego procesu fotolitografii wymusza konieczność prowadzenia precyzyjnego centrowania masek z wykonanymi we wcześniejszych procesach fotolitografii strukturami na podłożu krzemowym.

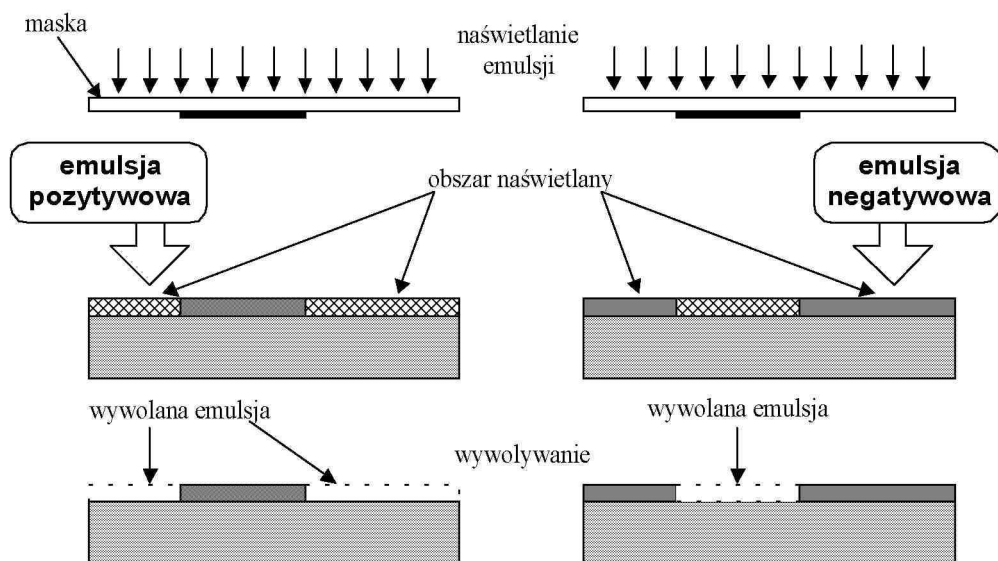
Możliwe jest stosowanie dwóch metod odwzorowywania kształtów (rys. 2.1.):

1. W **metodzie substraktywnej** najpierw wytwarzana jest warstwa poddawana obróbce (na przykład warstwa tlenku krzemu), na której z kolei rozprowadzany jest emulsja światłoczuła. Po rozprowadzeniu fotorezyst jest naświetlany przez maskę i wywoływany. Następnie warstwa poddawana obróbce jest trawiona w miejscach nie osłoniętych emulsją. Na koniec usuwana jest pozostała część fotorezystu. Kształt z maski zostaje odwzorowany na warstwie poddawanej obróbce.
2. W **metodzie addytywnej** (zwanej „lift – off”) emulsja światłoczuła jest rozprowadzana, naświetlana i wywoływana na powierzchni płytki, a dopiero potem nakładana jest warstwa podlegająca obróbce (warstwą tą może być np. metal naporowywany próżniowo). Nieciągłość naniesionej warstwy, która musi być cieńsza od warstwy emulsji, umożliwia rozpuszczenie pozostałego fotorezystu i usunięcie niepotrzebnych fragmentów warstwy naniesionej. Zaletą tej metody jest to, iż składa się ona z jednego kroku mniej w stosunku do metody substraktywnej, wadą zaś jest trudność uzyskania właściwej nieciągłości oraz brak możliwości nakładania warstw w procesach wysokotemperaturowych.



Rys. 4.1. Metody odwzorowywania kształtu.

Podobnie jak w fotografii popularnej, w procesie fotolitografii możliwe jest używanie dwóch rodzajów emulsji światłoczułej: pozytywowej i negatywowej - rys. 2.2.



Rys. 4.2. Różnica pomiędzy naświetlaniem emulsji pozytywowej i negatywowej przy użyciu tej samej maski.

- W przypadku używania **emulsji pozytywowej** naświetlone fragmenty emulsji zostają wypłukane podczas wywoływania, zaś zaciemnione fragmenty pozostają na płytce. Kształt na płytce jest identyczny ze wzorem na masce.
- Odwrotna sytuacja ma miejsce w przypadku użycia **emulsji negatywowej**: zaciemnione obszary fotorezystu zostają wypłukane podczas wywoływania, zaś naświetlone – pozostają na płytce. Kształt na płytce jest odwrotny w stosunku do wzoru na masce.

Własności fotorezystu decydujące o jego przydatności w technologii półprzewodnikowej:

- **duża czułość** na promieniowanie o wybranej długości fali (np.  $\lambda = 436, 405, 365, 248, 193 \text{ nm}$ )
- **duży kontrast** zapewniający ostre krawędzie (brak efektów dyfrakcyjnych przy odtwarzaniu małych struktur)
- **kompatybilność** z technologią krzemową (łatwość nakładania / wywoływania / usuwania, brak zanieczyszczeń)
- **mała absorpcja światła** (fotorezyst musi jednakowo naświetlać się w różnych odległościach od powierzchni)
- **minimalne odbicie światła**, szczególnie od powierzchni fotorezyst – podłoża
- **odporność** na działanie roztworów trawiących warstwy (np. HF) oraz bombardowanie jonowe podczas implantacji
- **dobra adhezja** do różnych podłoży (krzem, tlenek krzemu, metalizacja)

## 1.2. Algorytm procesu fotolitografii.

Jednorodna, cienka warstwa emulsji światłoczułej uzyskiwana jest poprzez wirowanie płytki z nałożoną małą ilością fotorezystu. Grubość uzyskanej w ten sposób warstwy jest funkcją lepkości emulsji i prędkości wirowania. Po nałożeniu emulsji jest ona suszona wstępnie w temperaturze 60...120°C i naświetlana promieniowaniem ultrafioletowym w czasie kilku – kilkudziesięciu sekund w urządzeniu do naświetlania ("mask – aligner"). Przed naświetlaniem płytka zostaje zbliżona do maski na odległość 10...25  $\mu\text{m}$  (tryb zbliżeniowy) lub też styka się z maską (tryb kontaktowy). Jeśli dany proces fotolitografii jest drugim lub kolejnym procesem na danej płytce, dokonuje się jeszcze zgrywania wzoru maski z płytką krzemową. Po naświetleniu płytka jest umieszczana w odpowiednim dla danej emulsji wywoływaczu, suszona i ponownie wygrzewana w temperaturze 80...150°C – w przypadku emulsji pozytywowej i 130...180°C – w przypadku emulsji negatywowej. Przeprowadzony w ten sposób proces fotolitografii umożliwia trawienie obszarów nie osłoniętych fotorezystem (i np. miejscowe usunięcie warstwy dwutlenku krzemu). Po zakończeniu trawienia pozostały fotorezyst jest usuwany przez rozpuszczenie emulsji w odpowiednim rozpuszczalniku.

## 2. Wykonanie ćwiczenia

### 2.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wykonanie kompletnego procesu fotolitografii z wykorzystaniem płytek poddanych utlenianiu. W skład ćwiczenia wchodzi: rozprowadzenie fotorezystu na płytce krzemowej, naświetlanie i wywoływanie emulsji oraz trawienie odsłoniętych obszarów warstwy dwutlenku krzemu, obserwacja gotowej struktury i określenie wymiaru krytycznego. W ćwiczeniu wykorzystania zostanie metoda subtraktywna.

UWAGA: Ze względu na bezpieczeństwo i wymagania odnośnie czystości podczas wykonywania ćwiczenia należy stosować odzież ochronną składającą się z maski chroniącej twarz, fartucha i rękawic gumowych.

## 2.2. Wykonanie ćwiczenia:

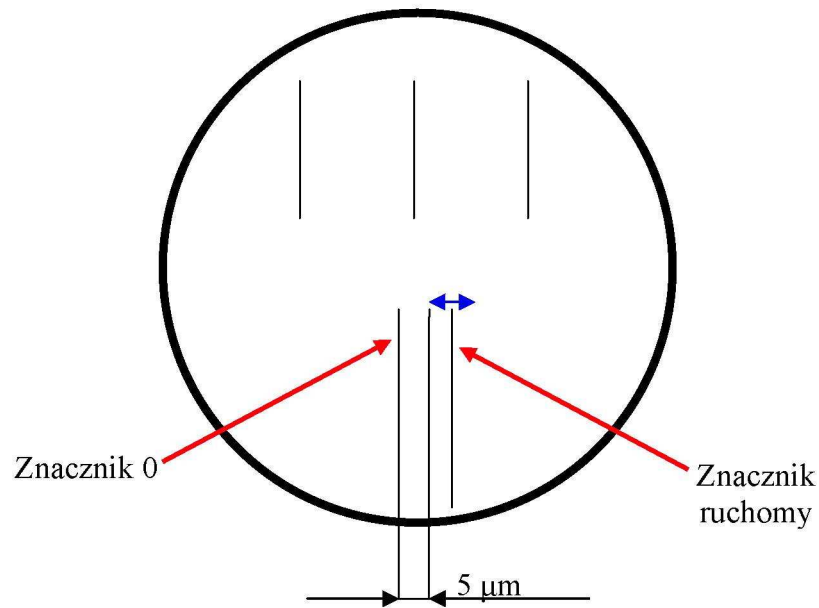
1. Sprawdzić czy lampa mask – alignera została włączona (wcześniejsze włączenie lampy jest istotne dla uzyskania prawidłowego widma światła).
2. Włączyć wirówkę i sprawdzić jej ustawienia. Optymalne wartości dla używanej emulsji pozytywowej to: prędkość obrotowa 5 000 obr/min, opóźnienie 0 (maksymalne przyspieszenie), czas wirowania 20 sekund (fot. 4.1.).



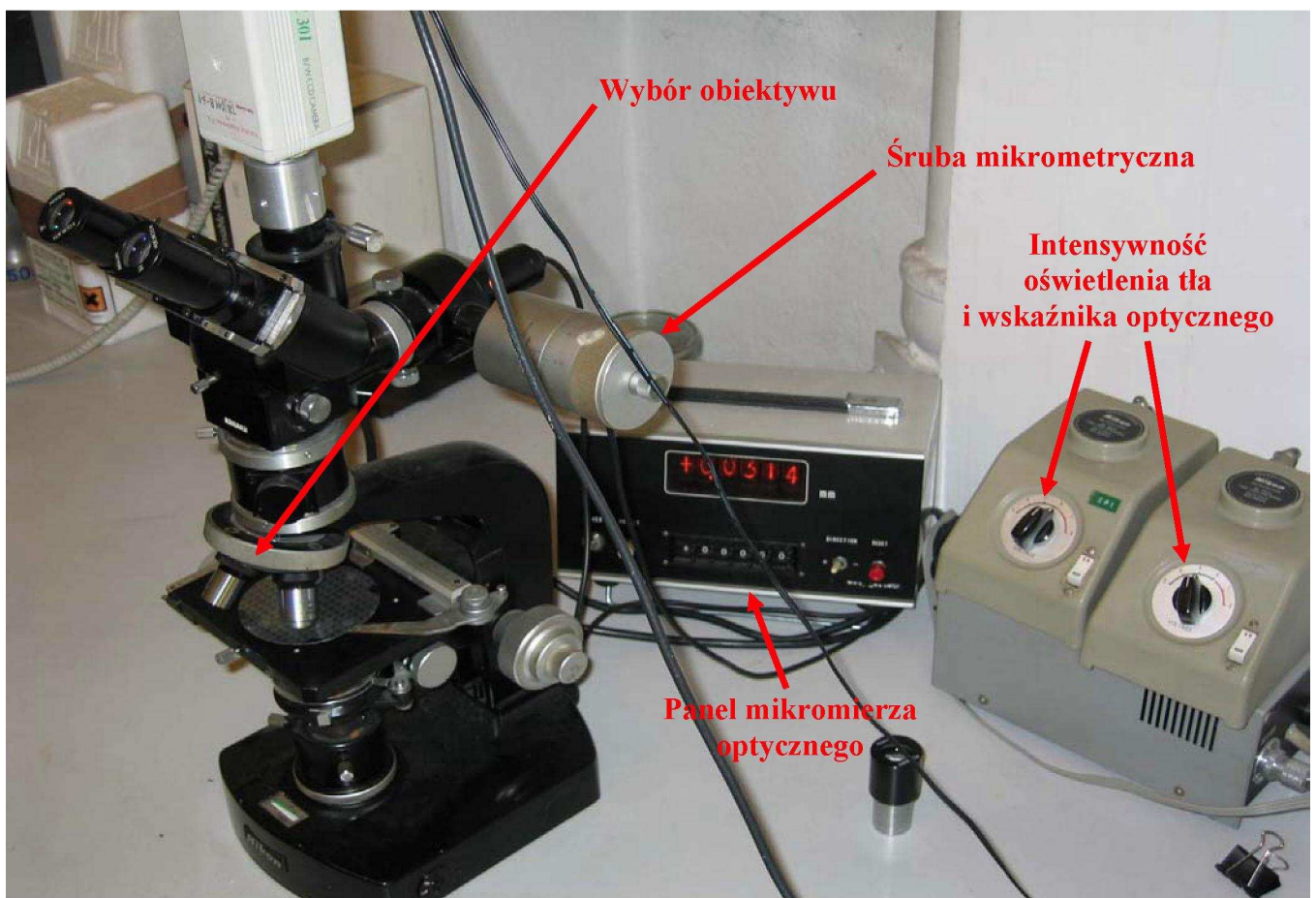
Fot. 4.1. Panel kontrolny wirówki.

3. Używając strzykawki z końcówką jednorazowego użytku nałożyć około 400µl emulsji na środek płytki i ponownie uruchomić wirówkę.
4. Wstępnie wygrzać rozproszoną emulsję w temperaturze 90°C w czasie 1 minuty.
5. Umieścić płytkę na stoliku mask – alignera, załadować maskę zwracając uwagę na właściwe jej umieszczenie (warstwa chromowa maski od strony naświetlanego podłoża z emulsją światłoczułą) i naświetlić emulsję na płytce przez maskę.
6. Umieścić płytkę w wywoływaczu na czas 1...4 minut. Po wywołaniu wypłukać płytkę w wodzie dejonizowanej i wysuszyć ją sprężonym azotem.
7. Sprawdzić wynik procesu pod mikroskopem. Zwrócić uwagę na ostrość krawędzi odwzorowanego kształtu, jednorodność i ciągłość pozostałego fotorezystu oraz ocenić ewentualne zanieczyszczenia.
8. Wygrzać płytkę ponownie w temperaturze 120°C w czasie 2 minut w celu zwiększenia adhezji emulsji do podłoża i odporności na działanie kwasów.
9. Wykonać trawienie dwutlenku krzemu przy użyciu mieszaniny kwasu fluorowego (HF) i fluorku amonowego (NH<sub>4</sub>F) w proporcji 1:7. Szybkość trawienia tlenku krzemu wynosi około 60 nm/min. W tym procesie należy używać naczyń i narzędzi wykonanych wyłącznie z teflonu.
10. Usunąć pozostałą emulsję przy użyciu acetonu, wypłukać płytki w wodzie dejonizowanej i wysuszyć je sprężonym azotem.
11. Przeprowadzić ocenę jakości odwzorowania pod mikroskopem.

Za pomocą mikromierza optycznego określić najmniejszy wymiar odwzorowanej struktury. W tym celu należy najpierw ustawić najmniejsze dostępne powiększenie mikroskopu. Zmniejszyć intensywność oświetlenia tła, a oświetlenie wskaźnika optycznego ustawić na maksimum. Po tych czynnościach w okularze mikroskopu oprócz struktury powinny być widoczne również znaczniki mikromierza optycznego (rysunek 4.3.).



Rys. 4.3. Znaczniki mikromierza optycznego.



Fot. 4.2. Mikroskop z mikromierzem optycznym.

W celu odczytania wymiaru krytycznego należy zgrać znacznik 0 (rys. 4.3.) z krawędzią dowolnej ścieżki struktury, a następnie wyzerować wskazanie na panelu mikromierza optycznego (fot. 4.2.). Przy użyciu śruby mikrometrycznej zgrać ruchomy znacznik z drugą krawędzią wybranej ścieżki. Na panelu mikromierza pojawi się wartość liczbowa. Wymiar krytyczny mierzonej struktury jest równy wskazaniu na panelu, **po uwzględnieniu mnożnika**, zależnego od wybranego powiększenia mikroskopu CD = wskazanie na panelu \* mnożnik [ $\mu\text{m}$ ] (tab. 4.1.).

Obiektyw	Powiększenie	Mnożnik
A	x 75	x 8
B	x 150	x 4
C	x 300	x 2
D	x 600	x 1

*Tab. 4.1. Obiektywy i powiększenia mikroskopu oraz odpowiadające im mnożniki.*

Porównać wynik z wymiarem struktur wytwarzanych obecnie.

### 3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy zamieścić opis przeprowadzonego ćwiczenia, wnioski i spostrzeżenia dotyczące obserwacji mikroskopowej wyników przeprowadzonego procesu, a także wymiaru krytycznego uzyskanej struktury.

### 4. Literatura

1. R. Beck, *Technologia krzemowa*, PWN, Warszawa, 1991
2. Praca zbiorowa, *Procesy Technologiczne w elektronice półprzewodnikowej*, WNT, Warszawa, 1980