

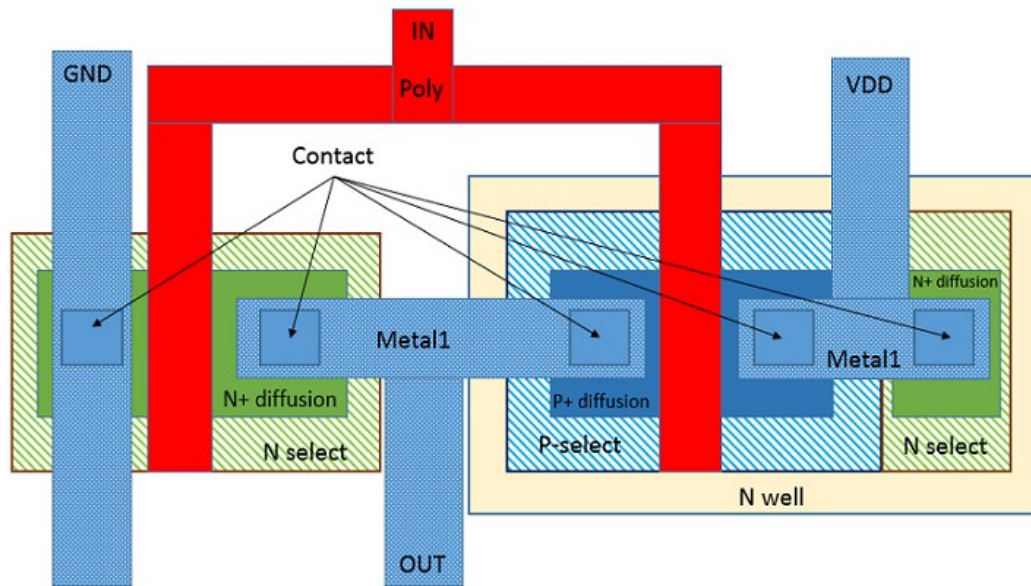
**Технологични методи за топологично копиране
(Фотолитографско структуриране – photolithographic patterning)
Доц. д-р Мария Александрова**

СЪДЪРЖАНИЕ:

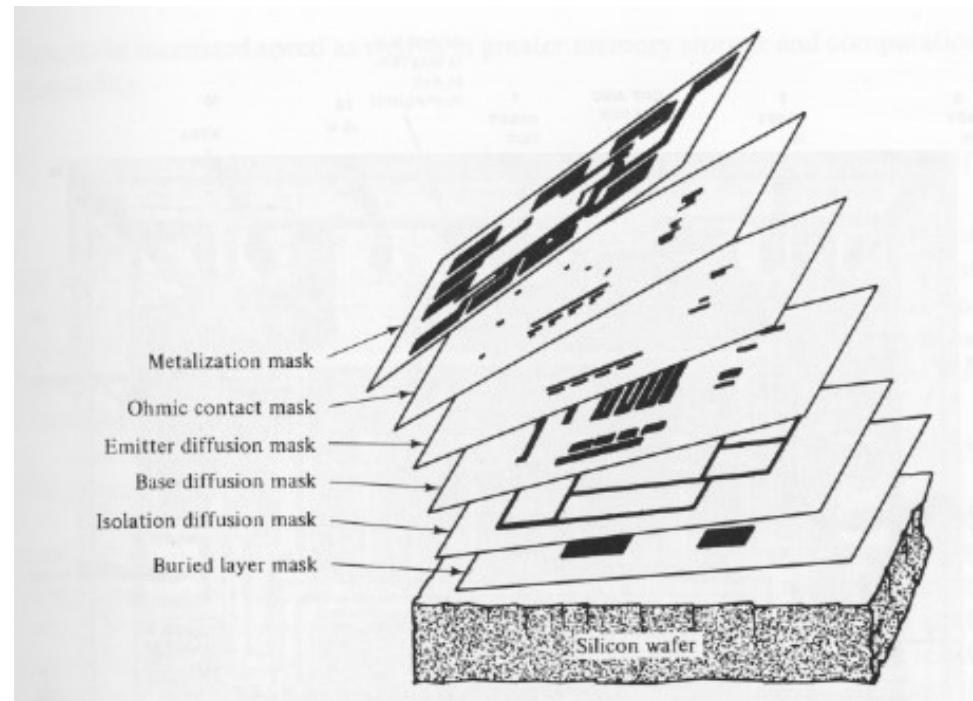
- Принцип на фотолитографското структуриране на покрития.
- Разновидности на фотолитографията (контактна, полуконтактна, проекционна).
- Изготвяне на комплект фотомаски и съвместяване по маркери.
- Видове фоторезисти (ФР). Основни параметри. Изисквания към фоторезистите. Технологии за нанасяне на ФР слоеве. Термични обработки на фоторезиста, експониране и проявяване. Технологично оборудване.
- Разновидности на литографския процес за получаване на наноструктурирани обекти: „сива“ литография, безмаскова лазерна литография, двуфотонна литография, холограмна (интерференчна) литография, термолитография

Фотолитографията (ФЛ) е процес на прехвърляне на желаната топология върху повърхността на работната пластина. Това става на няколко основни етапа. Първо конфигурацията (или изображението) на даден елемент се създава върху фотомаска (фотошаблон), след което се прехвърля през нея върху предварително нанесен върху пластината помощен фоточувствителен слой (фоторезист – ФР).

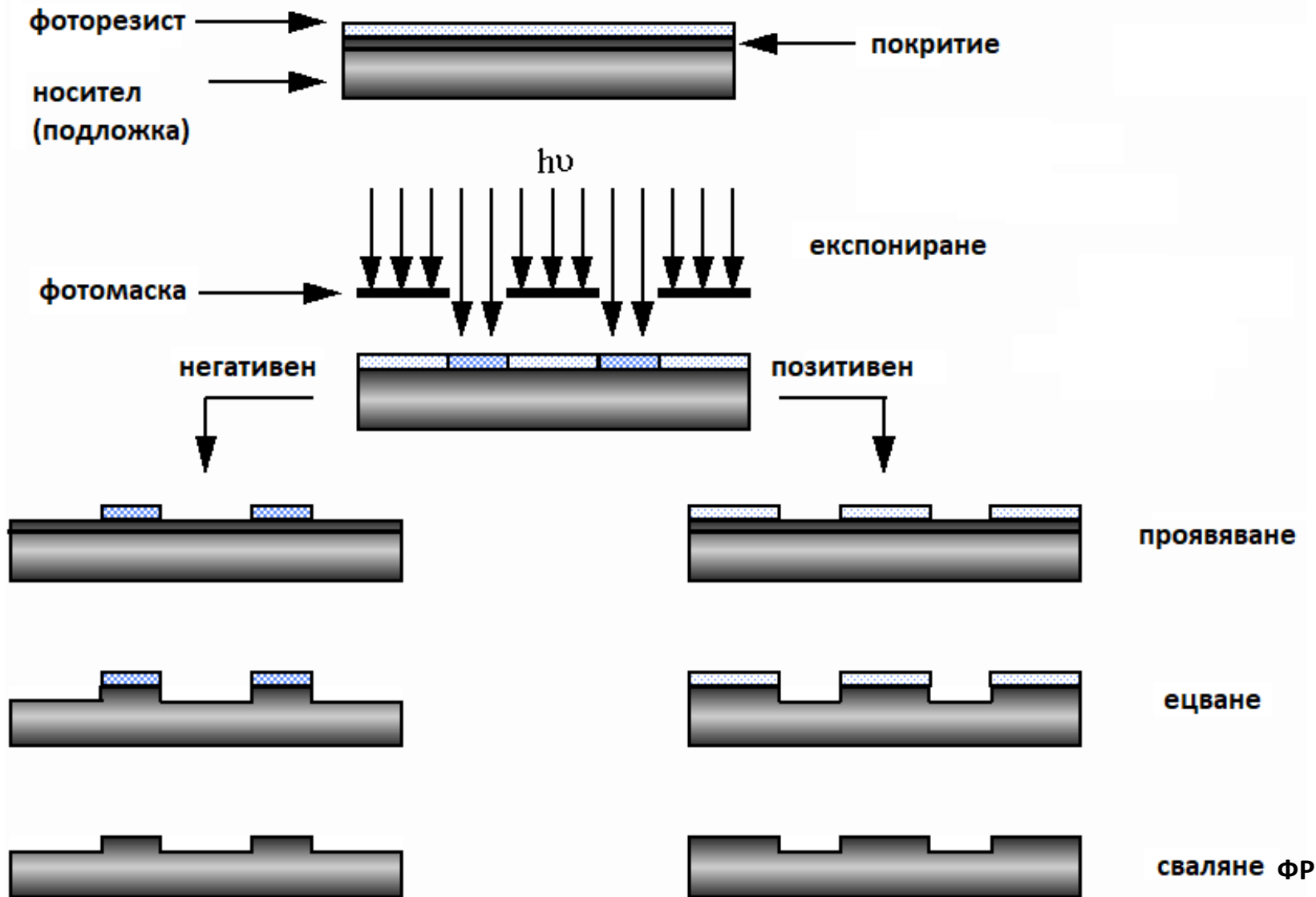
Освен прехвърлянето на изображение, фотолитографията решава още един съществен проблем от микроелектронното производство - получаването на малки размери (мащабиране) на компонентите с висока точност.



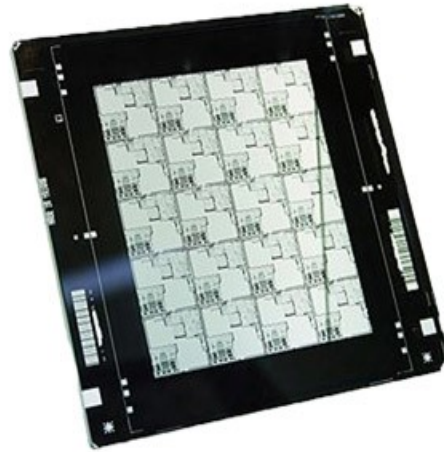
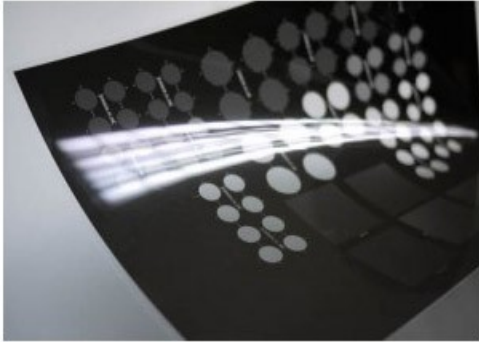
Примерна топология на проста интегрална схема (логически инвертор) – за физическата ѝ реализация са необходими 6 фотолитографски процеса за оформяне на геометричните размери и разположение на области от полупроводниковия кристал и елементи върху него.



Принцип на фотолитографското структуриране на покрития



Гъвкава и твърда фотомаски (фотошаблони) – оригинали, изработени чрез лазерно изрязване на контурите в топло- или фоточувствителна емулсия

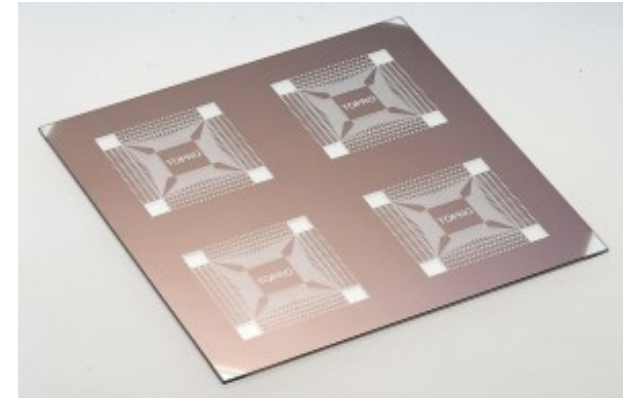


- Използва CAD дизайна на компонентите, като първоначален източник на изображение.

- Изображението се формира в емулсията в умален мащаб, за да се поберат множество еднотипни структури в съседство в един фотошаблон.

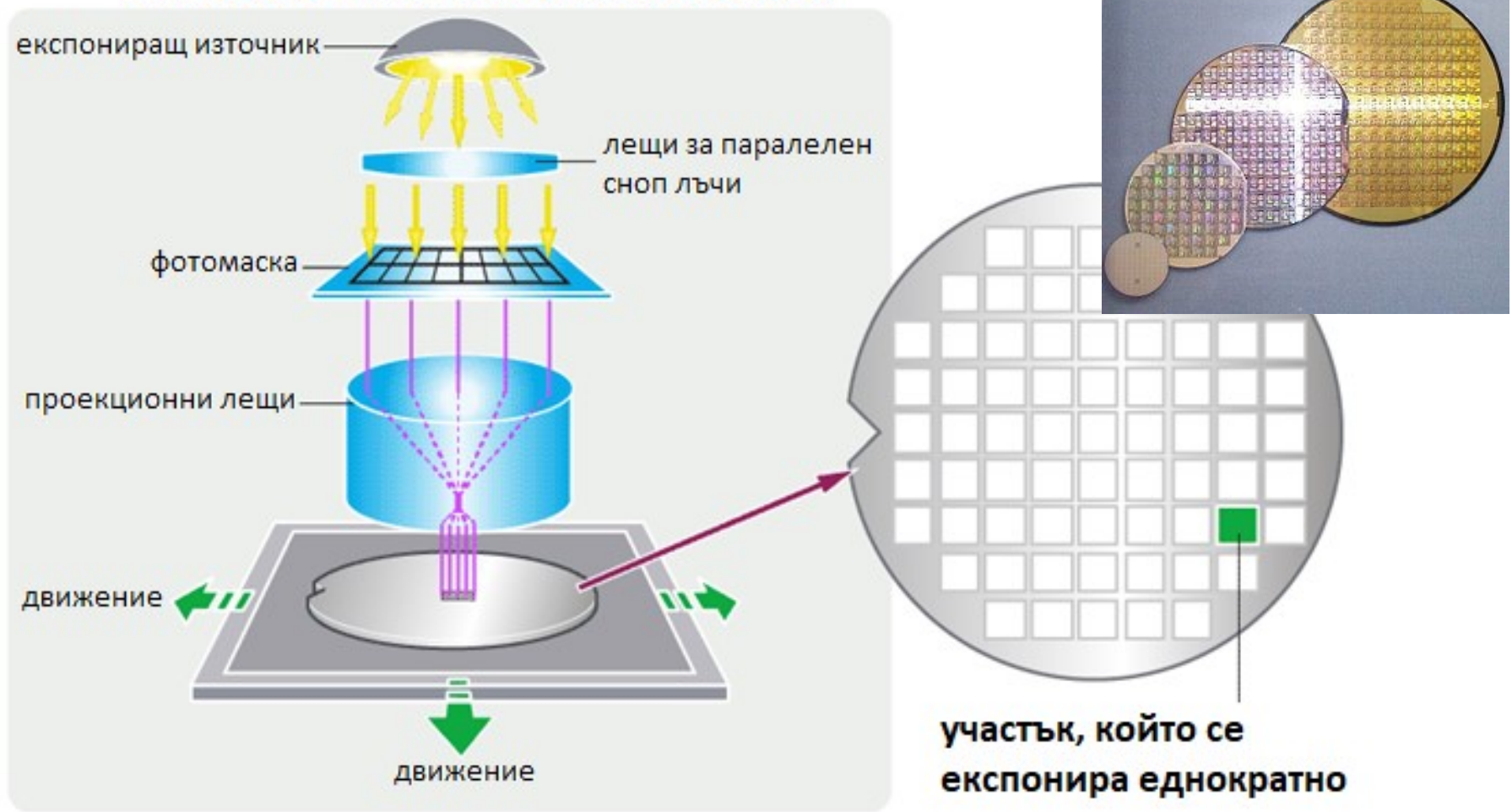
- От фотошаблона оригинал се изработват работни шаблони, покрити с хромни участъци, вместо с емулсионни за по-добра надежност при многократно ползване.

- Винаги се спазва изискването за плътни тъмни участъци, за да може качествено да се предпази фоточувствителният слой от засветяване в определени места и да се гарантира селективността и разделителната способност на процеса, тъй като от това зависи колко малки размери и с каква точност се прехвърлят.



Хромна фотомаска –
работно копие

степер и проекционна фотолитография



Относно мащаба, прехвърляният размер допълнително може да се намали по оптичен път чрез проекционна система, съдържаща специални лещи – проекционна фотолитография.

При контактната фотолитография фотшаблонът прилепва плътно върху фоторезиста и изображението от него се прехвърля със същия размер 1:1.

Предимство на контактната ФЛ е сравнително по-евтините и непретенциозни позиционираща и оптична системи на маскалайнера – устройството за съвместяване на фотомаски. Освен това цялата площ на пластината се обработва с едно експониране.

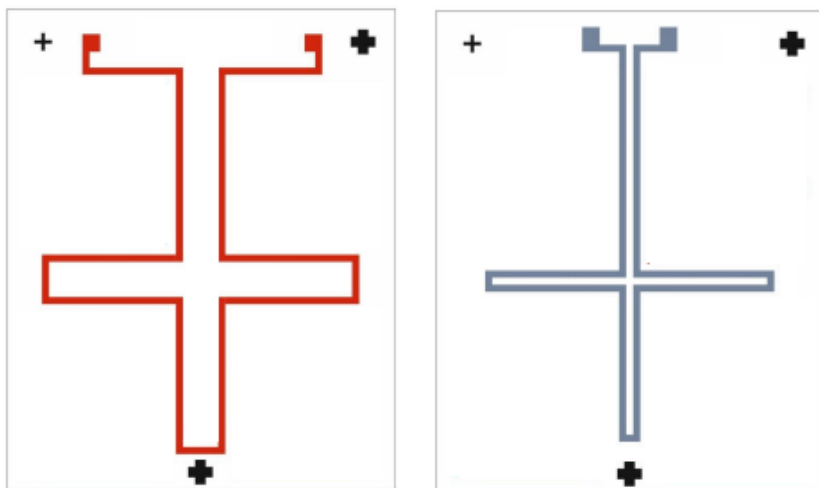
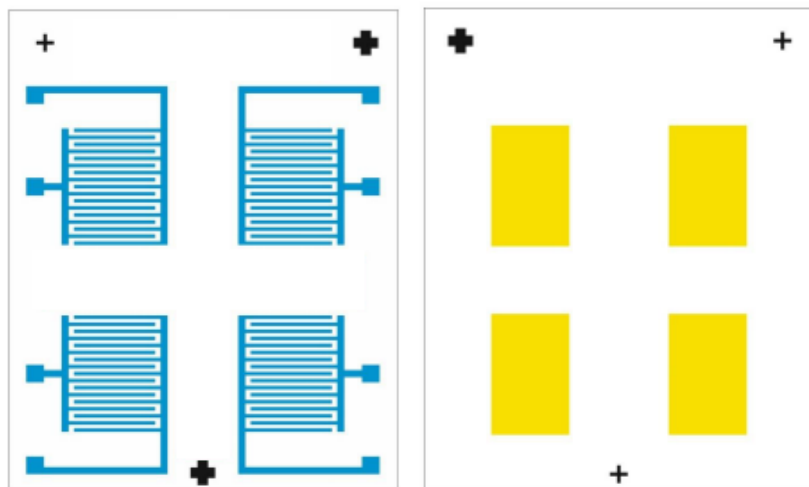
Недостатъците са, че не може да се премащабира изображението, фотомаските бързо се износват, дефектите на фотомаските се проявяват във ФР, а при контактуването им с ФР слой може да се наруши целостта му.

Независимо от вида на фотошаблоните (твърд/гъвкав, оригинален/работен), освен точността на размера важни са контраста на контура и неговата гладкост, което също е елемент на точността.

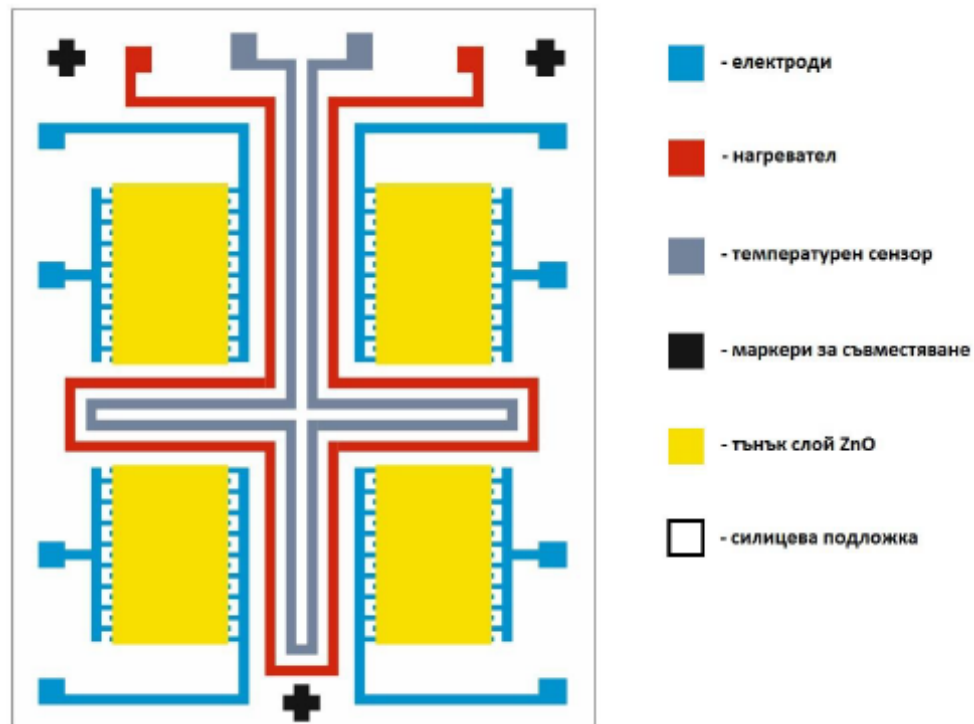
Фотошаблоните трябва да отговарят на следните условия:

- да имат висока разделителна способност;
- да осигурят висока контрастност на прехвърляното изображение, като непрозрачните участъци са с висока оптична плътност (непропускливост), а прозрачните с висока пропускливост за експониращата дължина на вълната;
- конфигурацията на изображението да е стабилна във времето (да не се надраскват оптично плътните участъци и да не се нарушават при контактна фотолитография и последващо почистване на шаблона);
- работната страна на фотошаблона да е плоскопаралелна, за да се избегне подсветване от неравномерен и непътен контакт при контактна фотолитография.

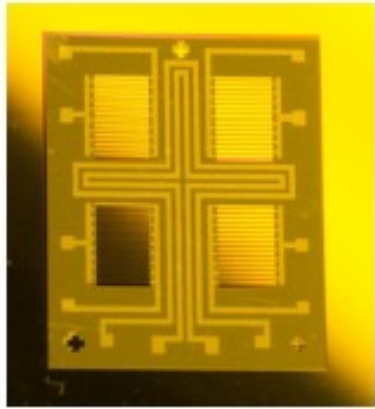
Комплект фотомаски и съвместяване по маркери



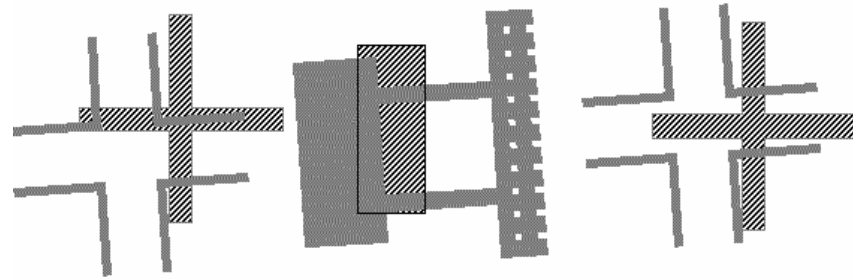
Пример за амонячен сензор с нагревател и температурен сензор.



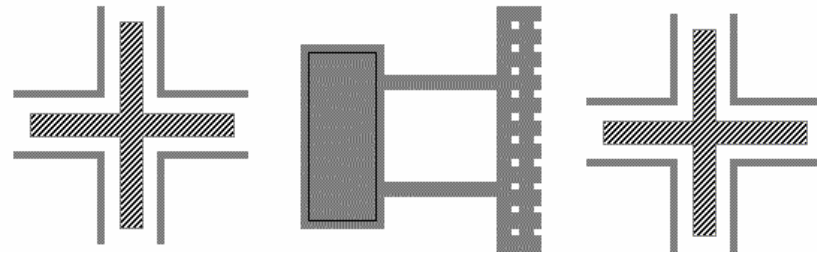
Всеки слой е получен вакуумно от различен материал и според дизайна трябва да бъде с различна конфигурация – в този случай са необходими 4 фотомаски със съвместени едно спрямо друго изображения.



5mm



несъвместени
изображения



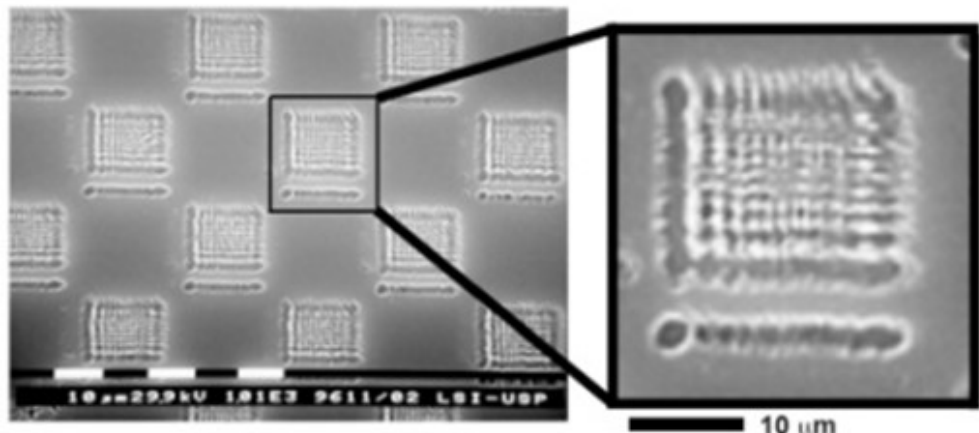
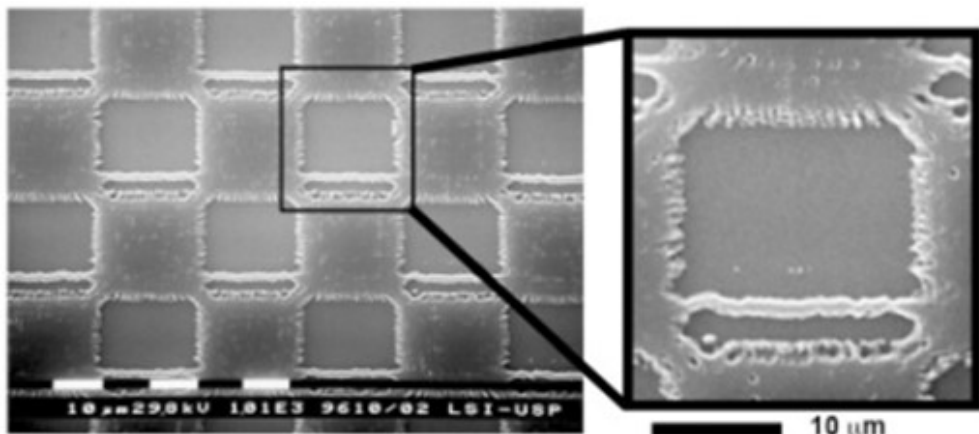
правилно
съвместени
изображения

Маркери за съвместяване на изображения



Маскалайнер с микрометрични настройки
за микроскопско съвместяване на фото-
маски

Грешка (влошаване на резолюцията) при неплътен контакт от неправилна ориентация на фотомаската при контактна фотолитография, заради паразитни оптични явления в междината между маската и пластината с нанесен фоторезист.



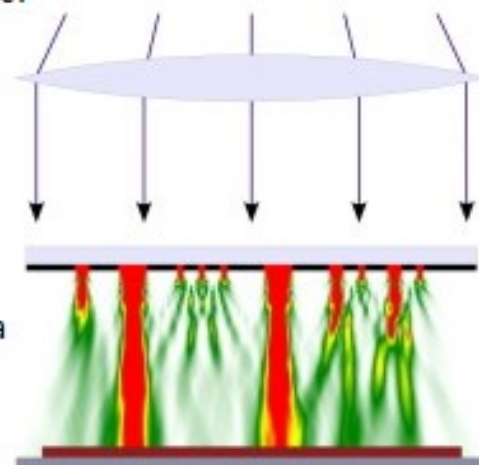
леца за паралелност
на снопа лъчи

УВ светлина

фотомаска

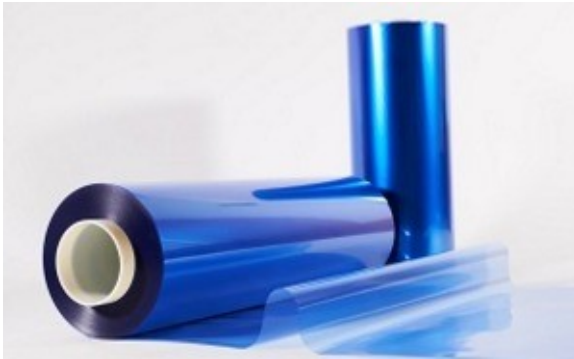
дифракционна
картина

обработвана
пластина



След преминаване на УВ светлината (от нанометров обхват дължина на вълната) през процеп с определен брой пъти кратни размери на нея, се получава дифракция (разклоняване на снопа) и подсветяване под плътните участъци на фотомаската. Изображението се размива.

Сух фоторезист

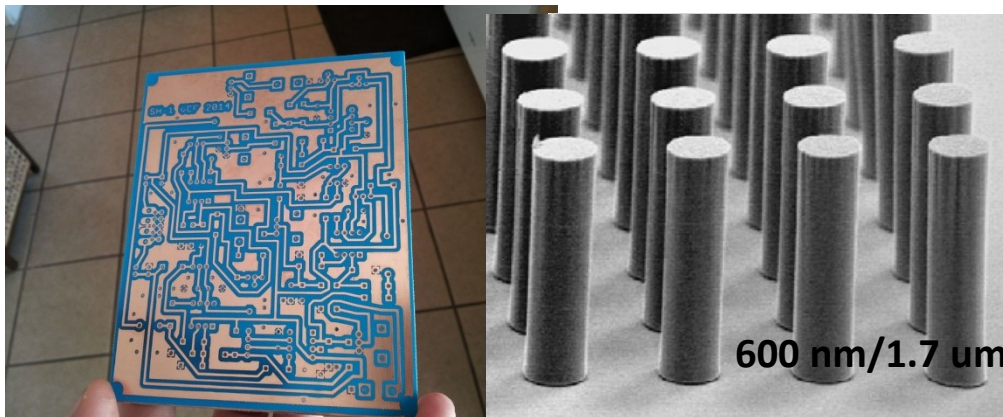


- + Дебелината му е голяма и фиксирана (обикновено 100-200 микрометра).
- + По-евтин е и не изисква сушене.
- Неподходящ е за прехвърляне на обекти с много по-малки размери от дебелината.

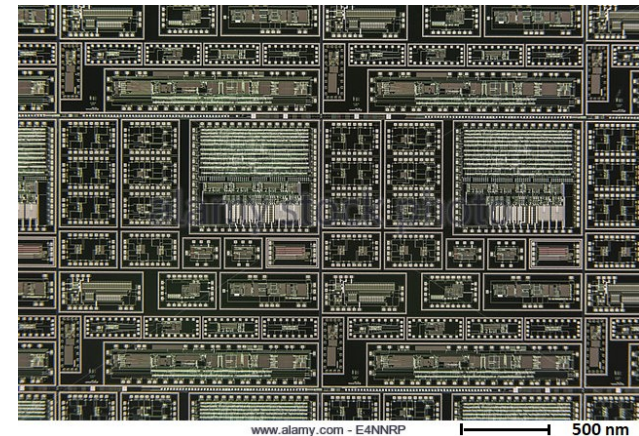
Течен фоторезист



- + Дебелината му може да се настройва (обикновено 0.5-3 микрометра).
- + Подходящ е за прехвърляне на фини обекти с много по-малки размери от дебелината.
- По-скъп е и изисква сушене.



Използва се за формиране на проводящи шини и контактни площадки в печатните платки, а в микросистемите за 3D обекти с голямо съотношение височина/ширина



Използва се за формиране на функционалните части на интегрални схеми и МЕМС/НЕМС

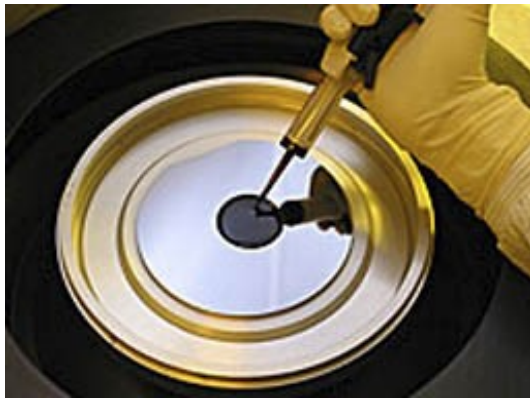
Технологичен ред на ФЛ процес при работа с течен фоторезит за прецизно прехвърляне на обекти с размери 5 - 20 микрометра

- Почистване на подложката от замърсявания
- Темперирание на фоторезиста (ФР)
- Нанасяне на фоторезиста (на центрофуга ако пластините с кръгли)
- Изсушаване
- Позициониране на фотошаблон 1
- Експониране (засветяване с УВ светлина през прозрачните участъци на фотошаблона)
- Проявяване на изображението
- Промиване на пластината
- Микроскопски контрол на степента на премахване на ФР
- Термична обработка на непроявения ФР
- Ецване (селективно разтваряне на слой незащитен с ФР)
- Сваляне на фоторезиста
- Почистване
- Микроскопски контрол
- Нанасяне на фоторезист за следваща фотолитография 2
- Изсушаване

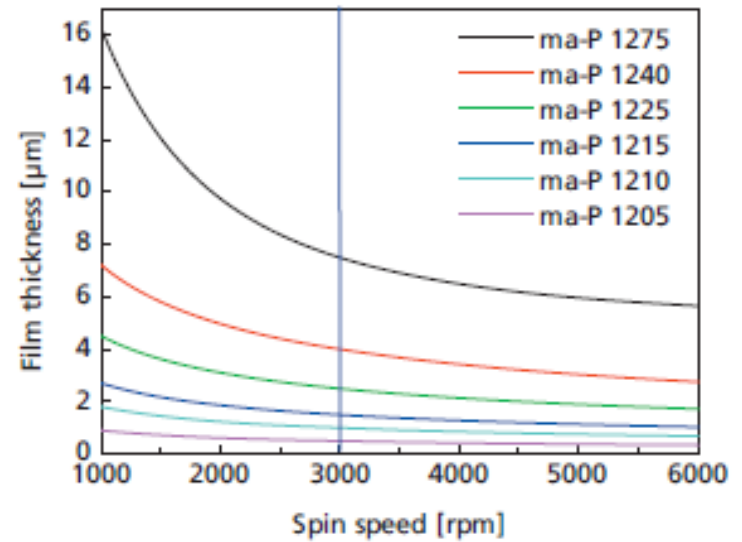
.....



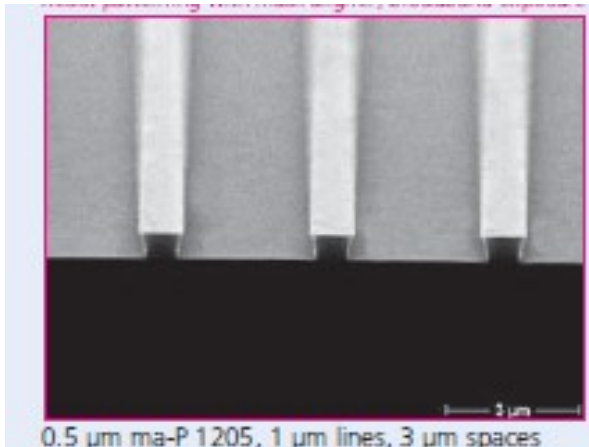
Ултразвукова вана за почистване



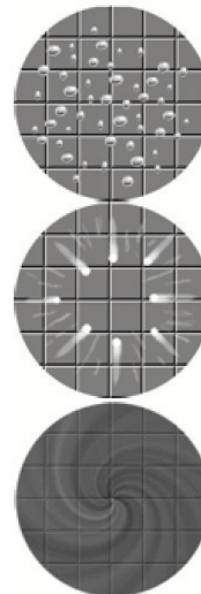
Нанасяне на течен ФР на центрофуга - центробежните сили разпределят течността от центъра към периферията и изхвърлят извън зоната излишното количество материал за постоянна и възпроизводима дебелина.



Връзка между дебелина на ФР слой и скорост на въртене на центрофугата, валидна за даден вискозитет.



Минимално възможни постижими параметри, дадени от производителя.



Дефекти във фоточувствителния слой при несъобразени за даден вискозитет на ФР начално ускорение и постоянна скорост на въртене.

Състав на течния ФР:

В състава на фоторезистите влизат няколко групи компоненти:

- фоточувствителни мономери/полимери, чиято роля е да направят коефициента на поглъщане за УВ светлина максимален за спектъра на експониране;
- филмообразуващи компоненти, определящи вискозитета; на основата на епоксидни или други смоли;
- добавки имащи за цел да изменят спектралната чувствителност или пък адхезията към дадена основа.
- добавки, определящи киселинната устойчивост на фоторезиста по време на ецване.
- също така е много важно повърхностното напрежение на разтворителя, защото то определя омокрянето на повърхността на носителя от ФР.

В зависимост от типа на фотореакцията различаваме два вида фоторезисти – позитивни и негативни, като обикновено точният състав представлява фирмена тайна или патент. При позитивните фоторезисти в засветените участъци ФР става лесно разтворим, поради отслабване на химическите връзки в него, така че тези участъци се премахват от пластината при проявяване. Прехвърленото изображение е точно копие на конфигурацията от фотомаската. При негативните ефектът на засветяването (експонирането) е обратен, а изображението инверсно.

Изисквания към течните фоторезисти

Изискванията, на които трябва да отговарят течните ФР са:

- да образуват плътни, бездефектни и безпорести слоеве с дебелина варираща в граници от 100 nm до 5 μ m (под долната граница, принципът на прехвърляне на изображение не разчита на оптичен принцип за активиране на фотохимичен ефект;
- висока адхезия към подложката;
- добра покриваща способност на релефни повърхности;
- висока механична устойчивост;
- да бъдат киселинноустойчиви към киселинни и алкални разтвори;
- да бъдат термоустойчиви;
- да имат максимална чувствителност към определена дължина на вълната, при която се експонират и минимална светочувствителност към околната светлина.
- да имат висока разделителна способност;
- да проявява стабилни свойства във времето.

Течните ФР се съхраняват в тъмни шишенца, а фолиевите - в тъмни боксове, и се обработват в стая със специално жълто осветление, за да се намали вероятността от нежелана промяна на свойствата на материала, поради осветяване;

Разделителната способност на ФР се определя от максималния брой успоредни линии с еднаква ширина l (μm) и разстояние между тях, равно на ширината им, които могат да се вместят в участък с определена големина от повърхността на пластината (най-често на 1 мм). Колкото ФР слой е по-тънък (с нисък вискозитет и/или нанасян при високи обороти на центрофугата), толкова разрешаващата му способност е по-висока, но същевременно се намаляват и защитните му свойства.

ФР	Фирма производител	Позитивен (+)/ негативен (-)	Характеристики
SU-8	MicroChem Corp.	(-)	На епоксидна основа, 2-2000 μm дебелина, няма нужда от допълнителни адхезиви, UV чувствителност при 350-400 nm.
SJR5740	Shipley	(+)	Дебелина до 20 μm , чувствителен в широк спектър на UV, позволява голямо отношение височина към широчина на топологичните елементи.
S1800	Shipley	(+)	С общо предназначение, дебелина между 0,5 и 3 μm
AZ4562	Clariant Corp.	(+)	Дебел
AZ9260	Clariant Corp.	(+)	Дебел

Aldrich[®] Negative Photoresist Kit I

1 Product Result | Match Criteria: Product Name, Description

654892

Sigma-Aldrich

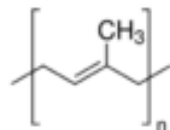
[SDS](#) [Close](#)

SKU-Pack Size	Availability	Pack Size	Price (EUR)	
654892-1KT	Available to ship on 05.11.20 - FROM	1 kit	208.00	

To order products, please contact your local dealer. [Click here](#)

Negative photoresist I

1 Product Result | Match Criteria: Product Name, Description



CAS Number: [9003-31-0](#)

651796

Sigma-Aldrich

[SDS](#) [Close](#)

SKU-Pack Size	Availability	Pack Size	Price (EUR)	
651796-100ML	Only 4 left in stock (more on the way) - FROM	100 mL	190.00	

To order products, please contact your local dealer. [Click here](#)



Karl Suss MJB3 Research Mask Aligner Tag #11

Condition: **Used**

Price: **US \$32,500.00**

Buy It Now

Add to cart

Best Offer:

Make Offer

[Add to Watchlist](#)

30-day
Returns

Longtime
Member

Shipping: May not ship to Bulgaria - Read item description or [contact seller](#) for shipping options. | [See details](#)

Item location: Freehold, New Jersey, United States

Ships to: United States [See exclusions](#)

Delivery: Varies

От съществено значение за бездефектна фотолитография е режимът на изсушаване. При изискване за висока прецизност трябва да се отчита че при процеса на изсушаване фоторезиста губи маса и дебелина, при което се променят вътрешните напрежения.

Във фотолитографията (ФЛ) все още основно се използва ултравиолетова (УВ) светлина за прехвърляне на изображението от маската върху помощното фоторезистивно покритие.

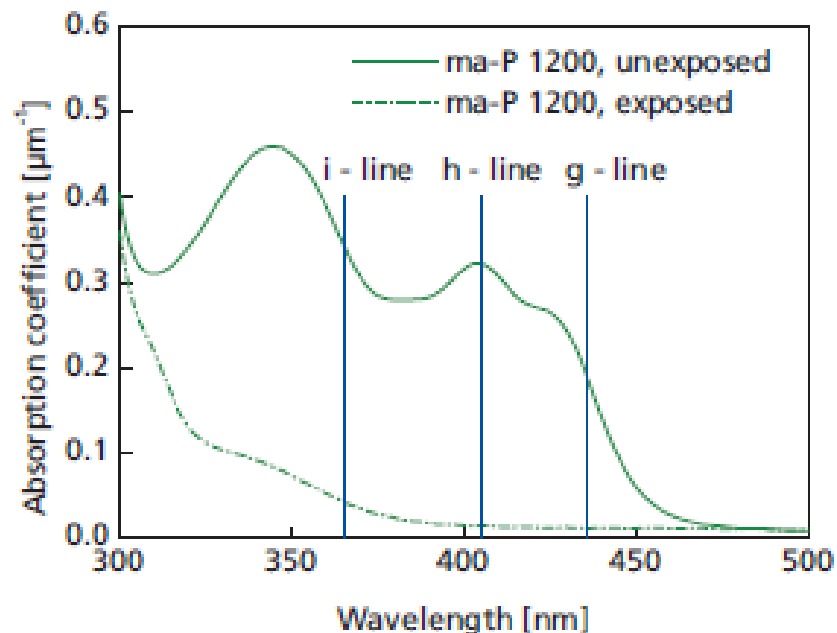
При поставянето на фотошаблона трябва да се съблюдава страната, от която е нанесено хромовото покритие да е ориентирана към повърхността на пластината, за да се избегне изкривяване на експониращите лъчи още при преминаването им през оптичната дебелина на фотошаблона.

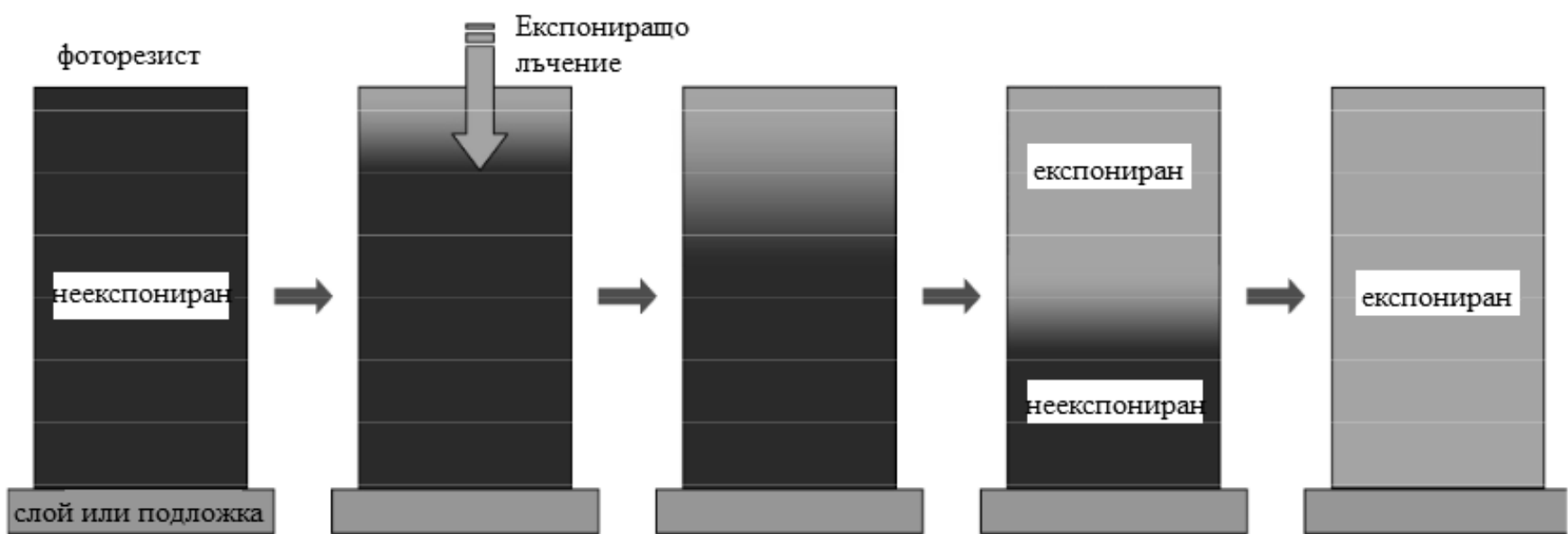
Когато светлината пада през тесен процеп (апертура) се получава дифракция. В случая тези процепи са прозрачните участъци от фотомаската (или разстоянията между непрозрачните участъци). Тъй като размерите на апертурата са близки до дължината на вълната за видимата светлина, то дифракционните явления се засилват. За да се избегнат е необходимо дължината на вълната на падащата светлина да е по-малка от размерите на апертурата. Това е причината да се използват УВ източници за експониране, а вече и рентгенви.

- Експониращ източник - живачна лампа с широк спектър на излъчване в УВ областта и с филтърно покритие, което пропуска определена спектрална ивица и филтрира топлинната компонента, тъй като загряването на шаблона или подложката при експониране води то топлинно разширение на фотошаблона, изкривяване на изображението и грешка в размера на прехвърлената топология. Охлаждане на лампата – с азот.

- От значение за качеството на прехвърляното изображение е и хода на експониращите лъчи. За да се гарантира успоредност на падащия сноп се използва система от огледала.

Експониране на слой от течен ФР.



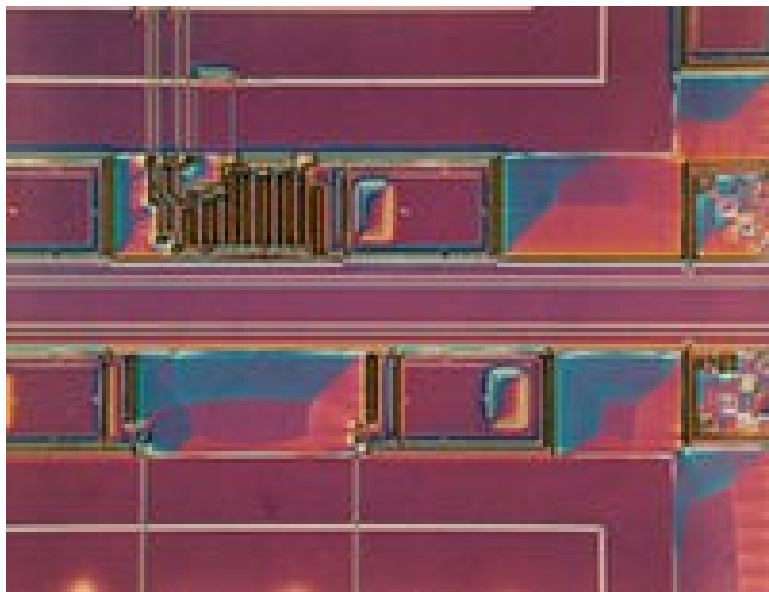


Промяна на разтворимостта на фоторезист според енергийната доза на експониращото лъчение съобразно дебелината на фоторезиста.



Паразитно обратно отражение на експониращите лъчи от отразителна повърхност на слой, например алуминиев

Проявяване на експонирания фоторезист (developing)

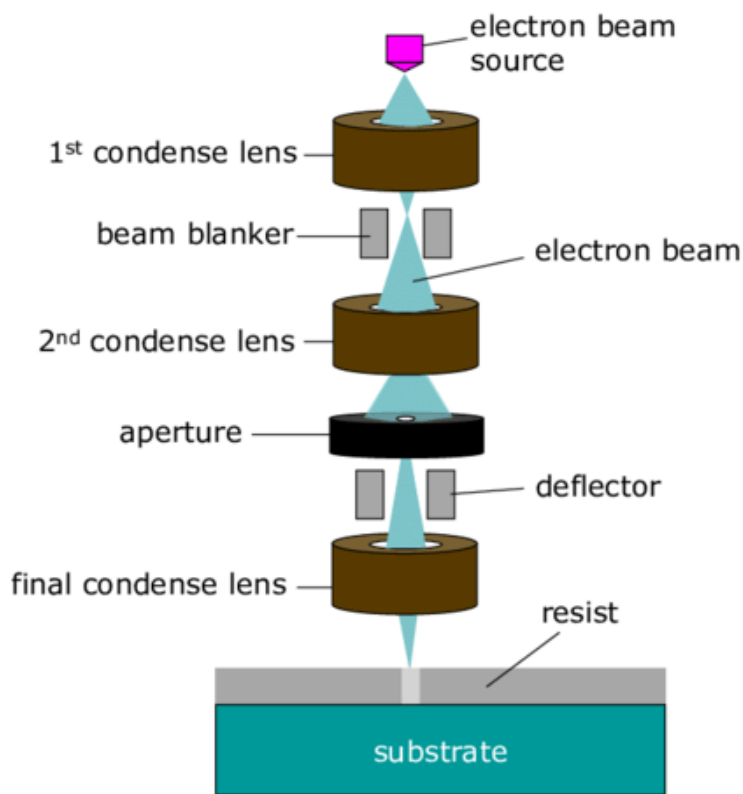


Отделянето на участъците от ФР с променена разтворимост след експониране се нарича проявяване и се извършва най-често в 1% воден разтвор на калиева основа при стайна температура за повечето от течните позитивни ФР, в ксилол за повечето течни негативни и в натриев карбонат, загрят до 40-45°C при повечето сухи ФР.

Недостатъчна доза УВ лъчение, непълна експонация, невъзможност за проявяване

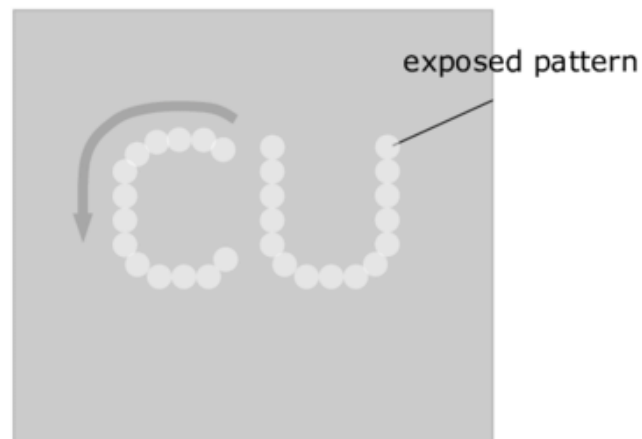
Колкото по-дебел е ФР слой толкова по-дълго е времето за пълното му експониране в дълбочина до границата с покритието, което ще се структурира. При недостатъчно време за експониране остават участъци от ФР, които не са променили химическите си свойства, поради липса на фотохимична реакция там. Така при проявяване, съответните участъци не могат да се оформят по желания начин, например ако е позитивен ФР, не може да се разтворят напълно. Това влияе на качеството на изображението, което се цели да се получи в структурираното покритие.

- Високотемпературно изпичане на проявения фоторезист (hard backing)
- Селективно ецване на незащитените с фоторезист участъци от слоя или пластината (etching).
- Премахване на ненужния ФР (stripping)



(a) Side view

Електронно-лъчева литография (не фото-литография)

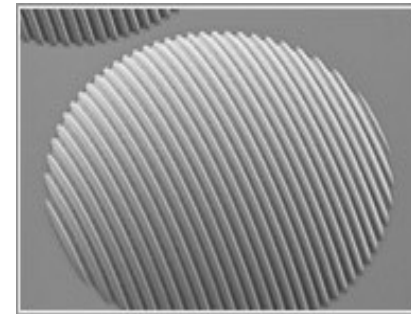
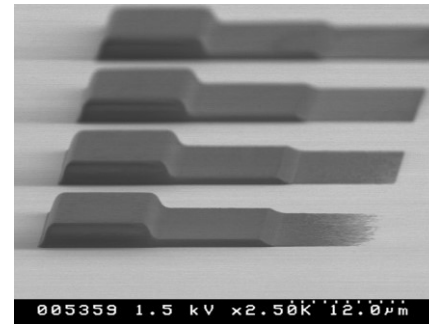
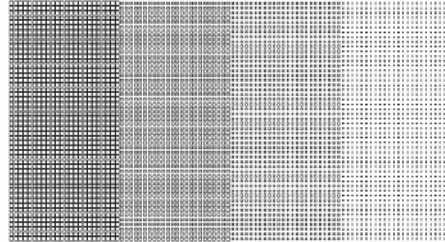
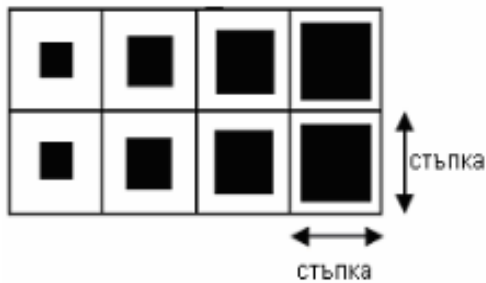


(b) Top view

Разновидности на литографския процес за получаване на наноструктурирани обекти:

- „сива“ литография (Gray – Scale Lithography)

- за създаване на триизмерни обекти с наклонени под определен ъгъл стени, които да се получават в един цикъл на проявяване. Този подход се използва за MEMS устройства тип микродюза, за части от микрофлуидно устройство, микроканални или аеродинамични структури за въртящи се микромеханизми.

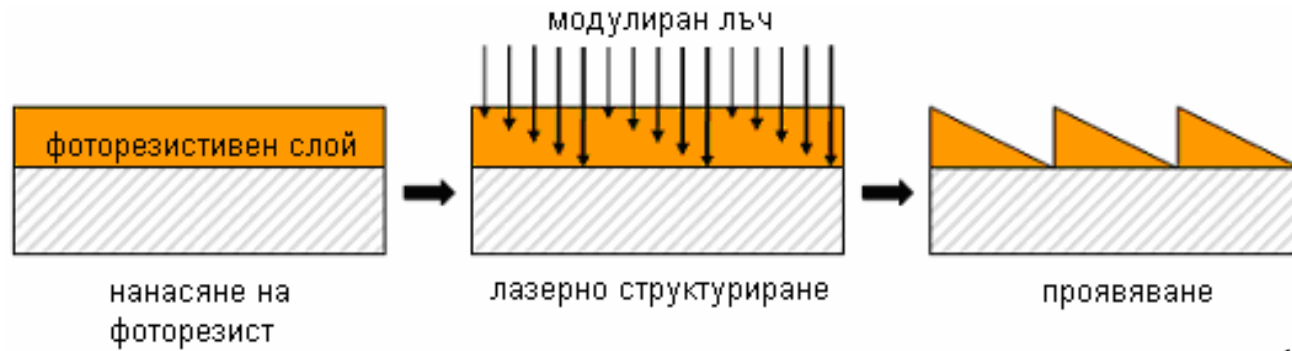


Примерно изображение на фотомаска за “сива” литография, резултантна фотолитографска картина и микроскопски снимки на релеф, получен чрез “сива” литография (снимката отдясно представлява оптична микролееща, разработчик Heidelberg Instruments).

- За реализацията са нужни система за стъпково преместване и фотомаска, чрез които се модулира интензивността на UV светлина. Заради тази модулация фоторезистът ще се експонира до определена дълбочина, която е различна за съседните стъпки.
- Получава се плавен релеф на фоторезиста след проявяване. Модулацията на интензитета е вследствие използването на различни по размер изображения, формиращи “сива скала” или плавен преход между напълно експониран и неекспониран фоторезист (AZ 4620).

- **безмаскова лазерна литография**

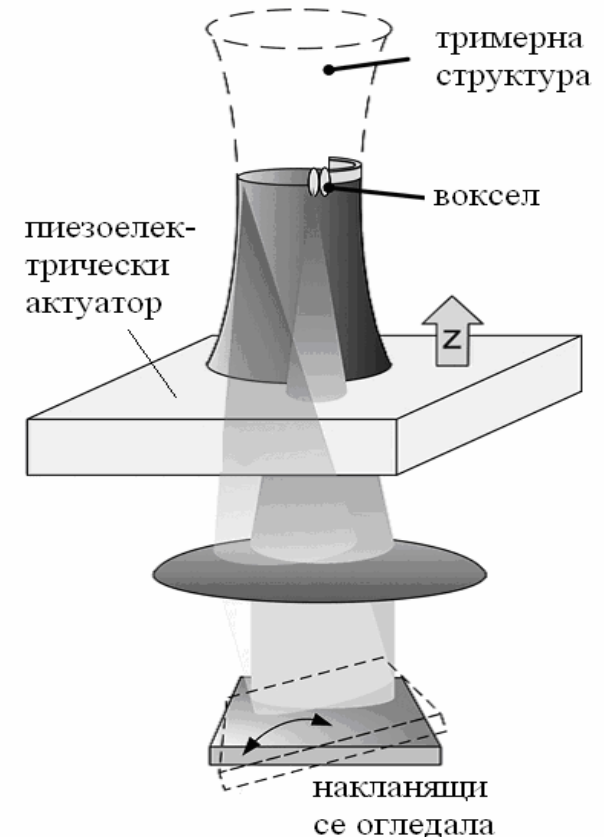
- използва предварително модулиран лазерен сноп, който гравира повърхността на резиста, като го експонира с регулируема доза енергия.

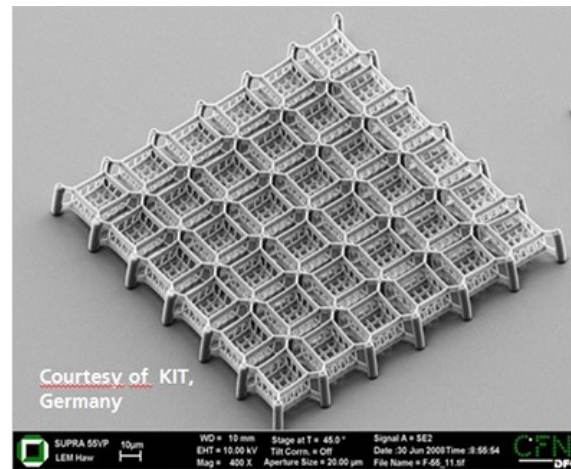
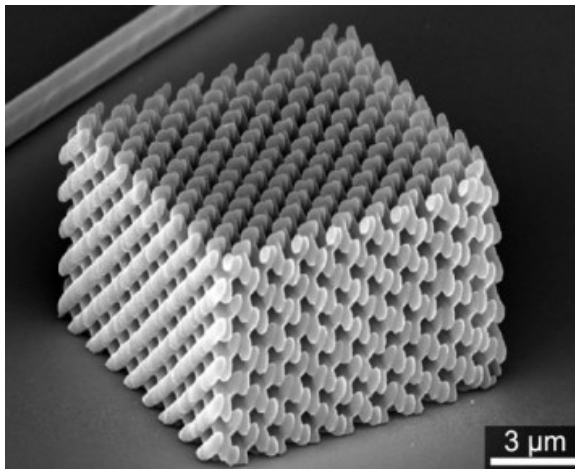


- **двуфотонна литография (Two photon lithography)**

- използва преминаване на нефокусирани лазерни импулси през прозрачна фотомаска, съдържаща на повърхността си релефни структури с по-малки размери от дължината на вълната. Генерира се сложно триизмерно разпределение на интензитета близо до повърхността на фотомаската. Така разпределеният интензитет експонира дебели слоеве от прозрачен фотополимер, който има двуфотонна чувствителност.

- Фемтосекундни лазери титан:сапфир с дължина на вълната около 800 нм + фоточувствителната смола SCR500, която се втвърдява при облъчване с лазера, формира отделните воксели (3D пиксели).

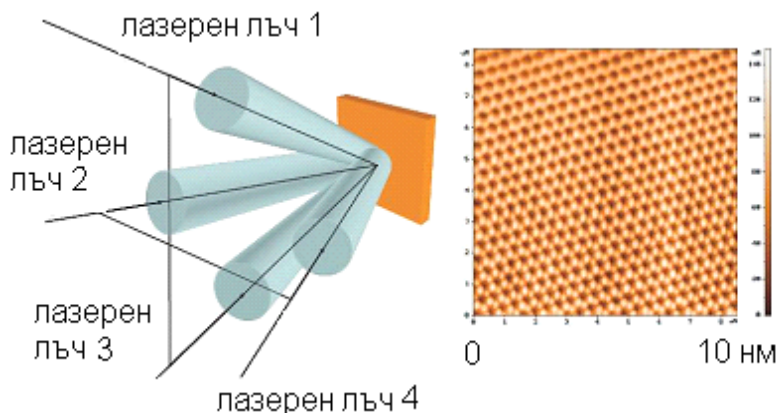




Примерни тримерни структури, получени чрез двуфотонна литография

- Изготвят се структури с линейни размери няколко микрометра и разрешаваща способност на миниатюрните обекти “гравирани” в тях от порядъка на нанометри, което позволява изключително висока степен на детайлност.
- За създаване на тримерни кристали, използвани като оптични микро/наноелементи в сензори с оптична детекция. При попадане на светлина върху тях падащата светлина се отразява многократно, което води до интерференция, зависеща от редица параметри, например, дължината на вълната, ъгъла на падане и периодичността на структурата. Така за някои дължини на вълната се получава силно отражение, вследствие на което обектът се наблюдава в ярък, наситен цвят.
- Предимствата са добре дефинираните им оптични характеристики като отражение/пропускане и високи нива на чувствителност, което води до много точни граници на детекция при сензори и разделителна способност при многоцветни дисплеи.

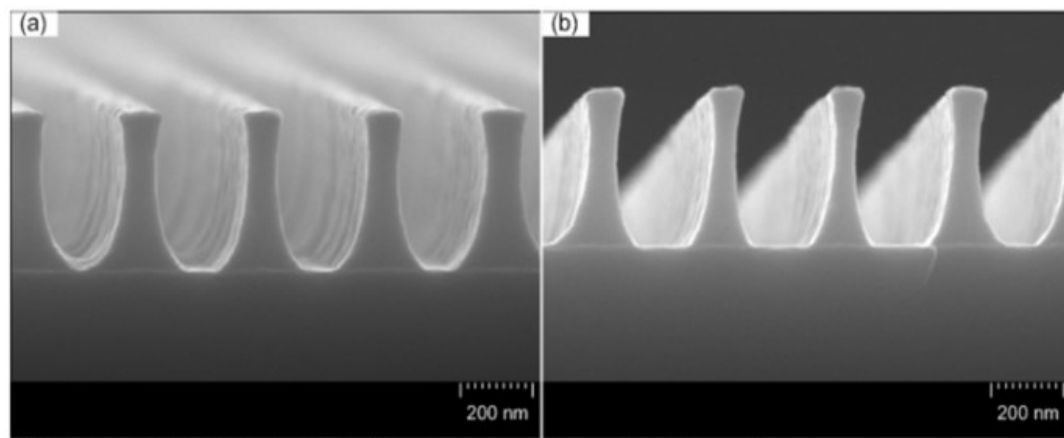
- **Холограмна (интерференчна) литография**



Използване на 4-канална система
за холограмна литография

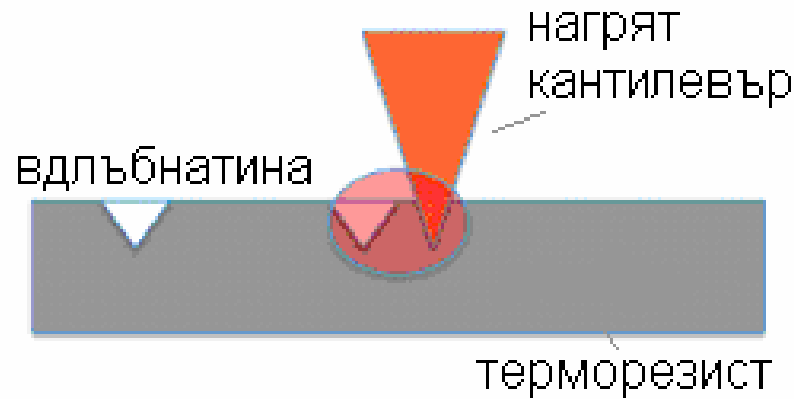
- техника за получаване на фини наноструктури без използване на сложни оптични системи или фотомаски с резолюция около 20 nm. Интерференчна картина от две или повече кохерентни светлинни вълни се настройва и се прехвърля върху фоторезистивен слой. Интерференчната картина се състои от периодична серия вълни с определен интензитет на минимума и максимума. При проявяването изплува картина, съответстваща на този периодичен интензитет.

Наноканали за флуиден сензор.



- Предимството на този тип литография е бързото генериране (в една стъпка) на плътни наноразмери върху голяма площ без загуба на фокус. Ограничението на метода е, че може да се прилага само за получаване на матрици от орнаменти на обекта (организиранни в колони и редове) и не може да се използва за структури с различна или произволна форма.

- **Термолитография (thermal lithography)**



- При този тип литография резистът не е фоточувствителен, а е топлинно чувствителен полимер, който влиза в директен контакт с релефна маска. След притискане на маската към материала контактният участък се загрева за кратко време с лазерен лъч с висок интензитет. Релефната маска е от метал с висока топлопроводимост и бързо се загрева, докато полимерът не. След загреване маската прехвърля топлина върху полимера само в приповърхностната контактна област.

- За разлика от други прецизни литографски методи този предлага ниска цена, прост инструментариум за техническата реализация и липса на ограничения от оптичен характер. Недостатък на метода е по-ниската скорост за прехвърляне на релефа.

БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!