

Технологични процеси за изграждане на триизмерни структури в микро- и наносистемите

Доц. д-р Мария Александрова

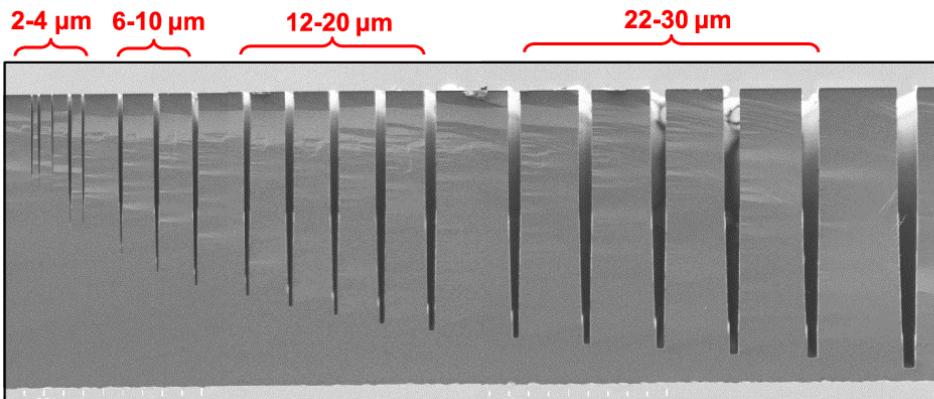
- Триизмерна структура в микро-/наносистема – дефиниция. Съотношение на размерите (aspect ratio – AR)
- Изграждане на триизмерна структура чрез повърхностна микрообработка. LIGA процес.
- Изграждане на триизмерна структура чрез обемна микрообработка. Bosch процес.

Триизмерни структури в микро- и наноелектрониката

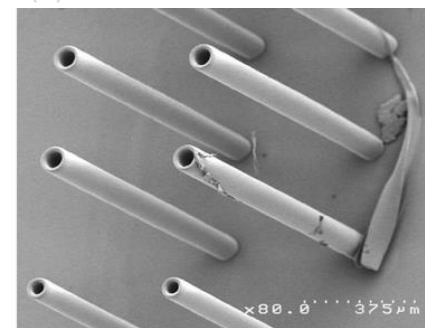
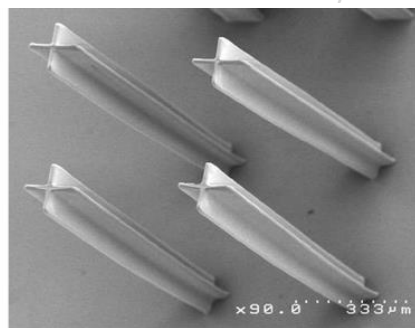
high-aspect-ratio microstructures (HARMs) – разлика между вертикален и хоризонтален размер повече от 50 пъти

Повърхностна микрообработка →

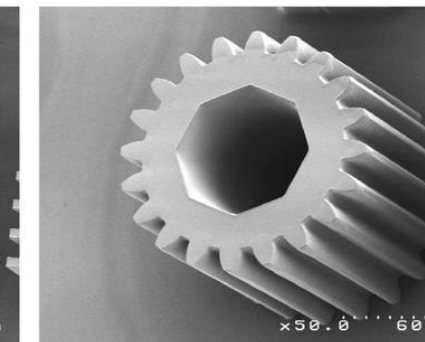
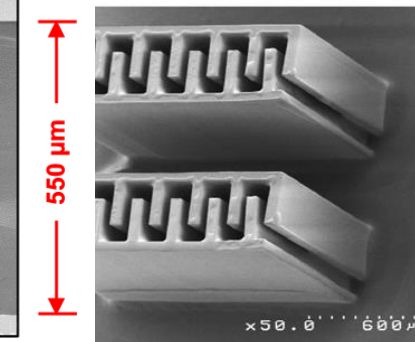
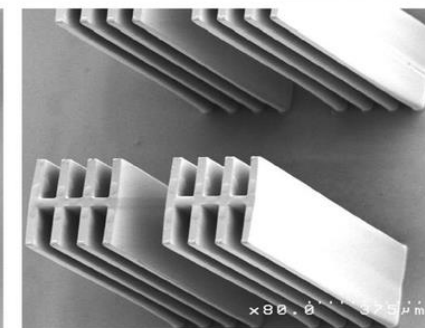
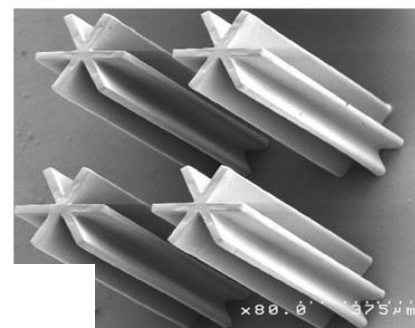
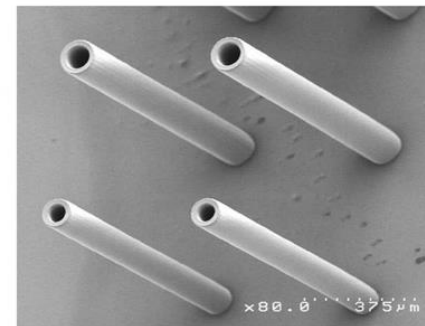
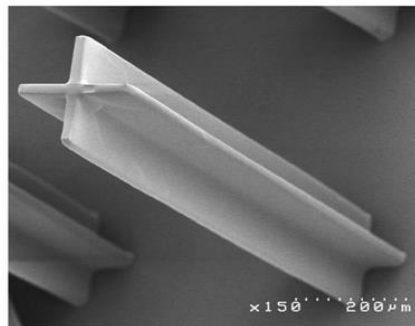
Обемна микрообработка ↓



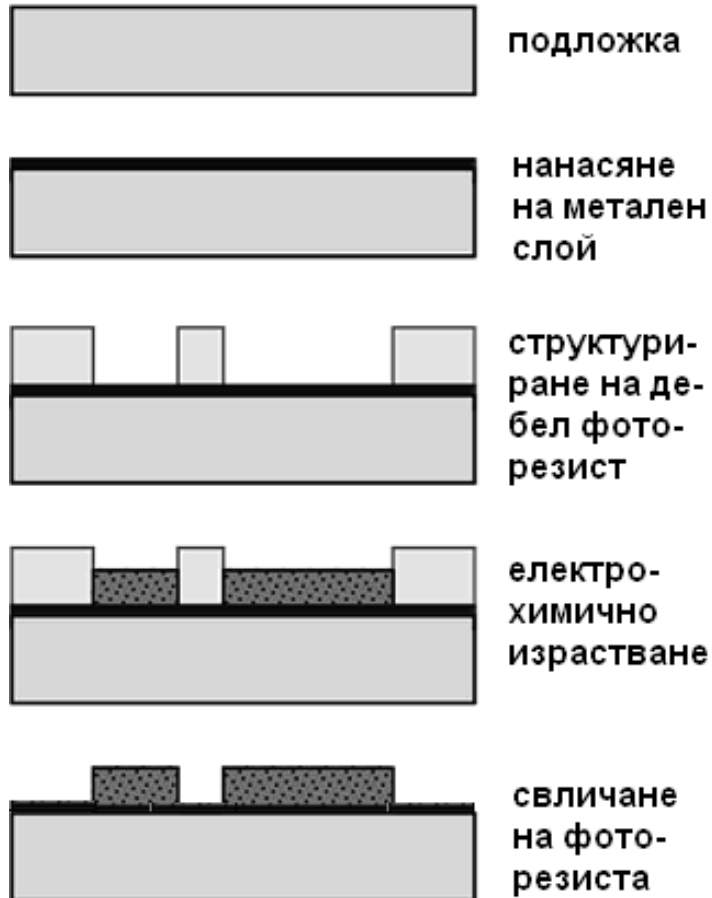
(A)



(B)



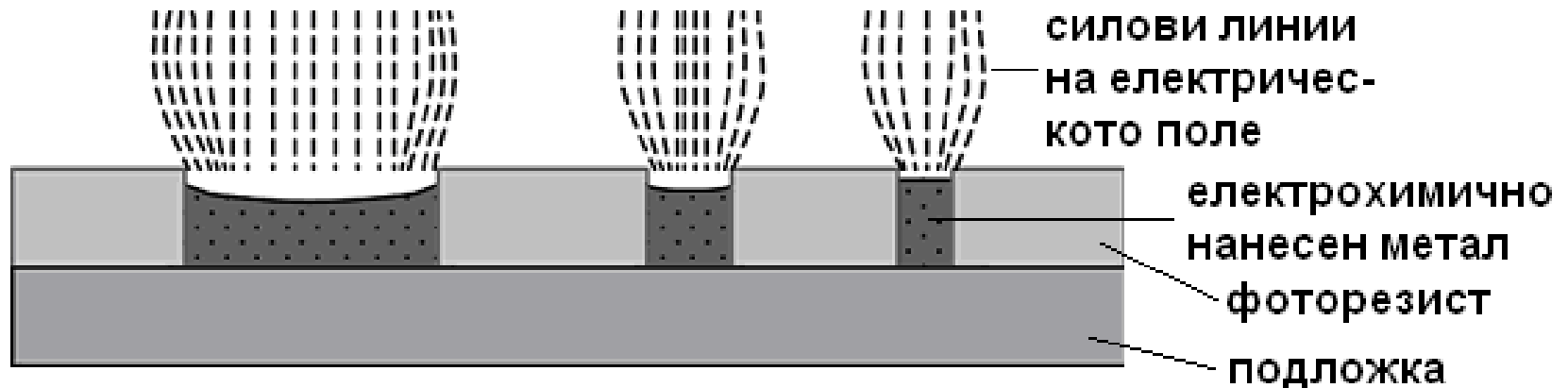
LIGA процес (Lithography&Galvanic)



Технологична последователност на LIGA процеса.

- обработка на дебел фоторезист
- експониращ източник, генериращ електромагнитни вълни с голяма проникваща способност, като рентгеновите или УВ, но с по-голяма енергийна доза на лъчението.
- процесът е комбиниран с галванично израстване на метал за запълване на отворите, формирани във фоторезиста.
- не се предявяват специални изисквания към вида на носителя-подложка, стига да е електропроводящ.

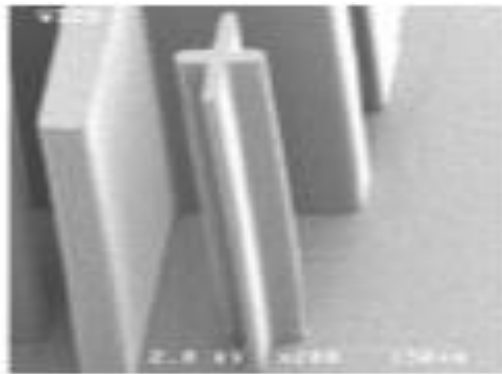
Специфични особености



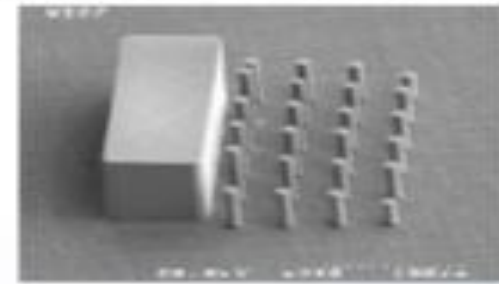
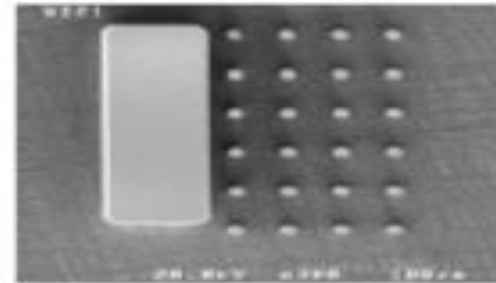
Разпределение на електрическите силови линии върху фоторезистивно структурирани форми с различни размери.

- тъй като катодната повърхност е структурирана с фоторезист, то силовите линии се изкривяват и стават по-интензивни при ръбовете. Това води до наслявяване на по-голямо количество материал по ръбовете, отколкото в централните участъци на топологичните структури. Получава се неравномерност в дебелината на металните структури, респективно изкривяване във формата им.

- UV-LIGA процесът не може да достигне разделителната способност и съотношението височина:широчина на формите, както X-LIGA процес (1:100, но стойностите на тези параметри се оказват достатъчни за някои приложения - възможно е постигане на съотношение 6:1.

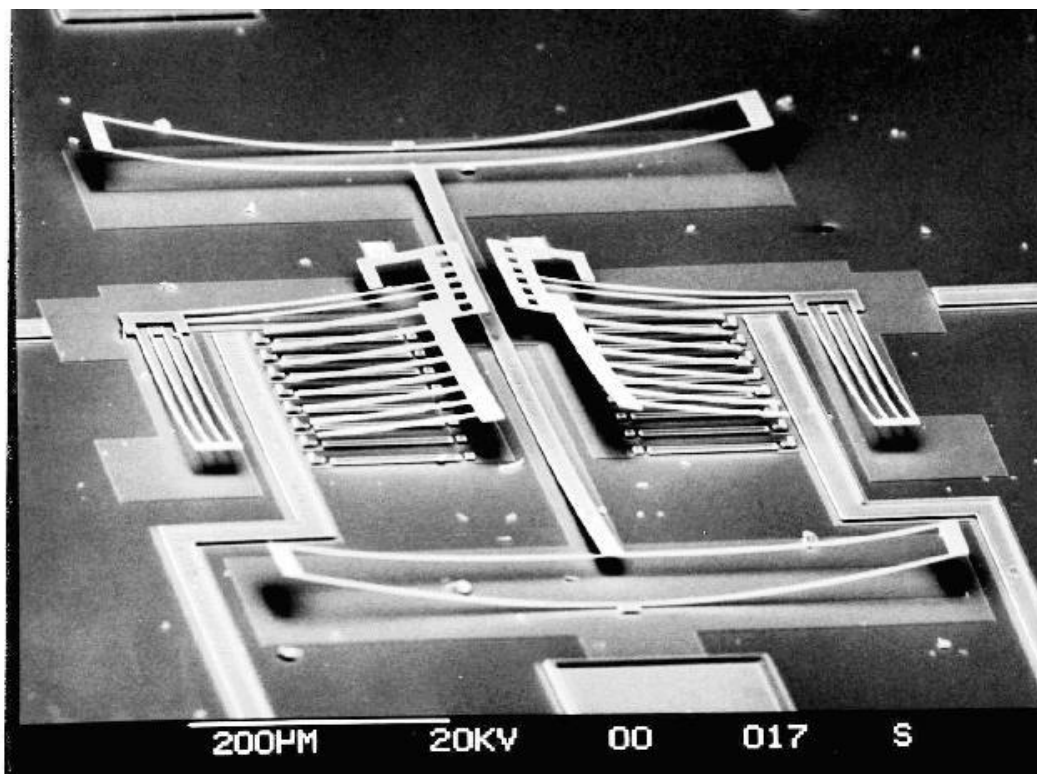


Height: ~360 μ m
Width: ~14 μ m



Пример за създадени контактни микроигли от метал във фотолитографски структуриран дебел фоторезист.

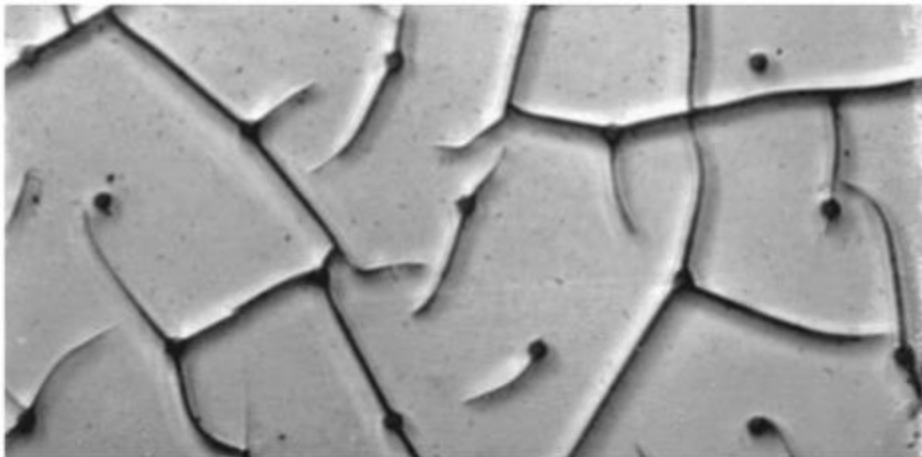
- за реализиране на проводящите връзки в по-сложните микросистеми или за реализиране на сложни микромеханични структури, се налага изграждането на метални слоеве на няколко нива, както и отвори за връзка между отделните нива.



Микроскопска снимка на подвижни електроди, реализиращи електрически контакт или прекъсвачи такъв при преместване нагоре-надолу

- след електрохимично удебеляване на хоризонтално лежащите метални слоеве, диелектричната основа се ецва селективно на принципа на жертвения слой, с което се създават «висящи» мостови структури с въздушна междина под тях и с достатъчна степен на свобода за механично преместване.

SU-8 и полиметилметакрилат (PMMA) – фоторезисти специално разработени за LIGA процес.



Микроскопска снимка, показваща напукване в 500 микрометра дебел слой фоторезист, който не е специално разработен за LIGA процес и е получен чрез 5 отделни нанасяния на центрофуга с наслявяване.

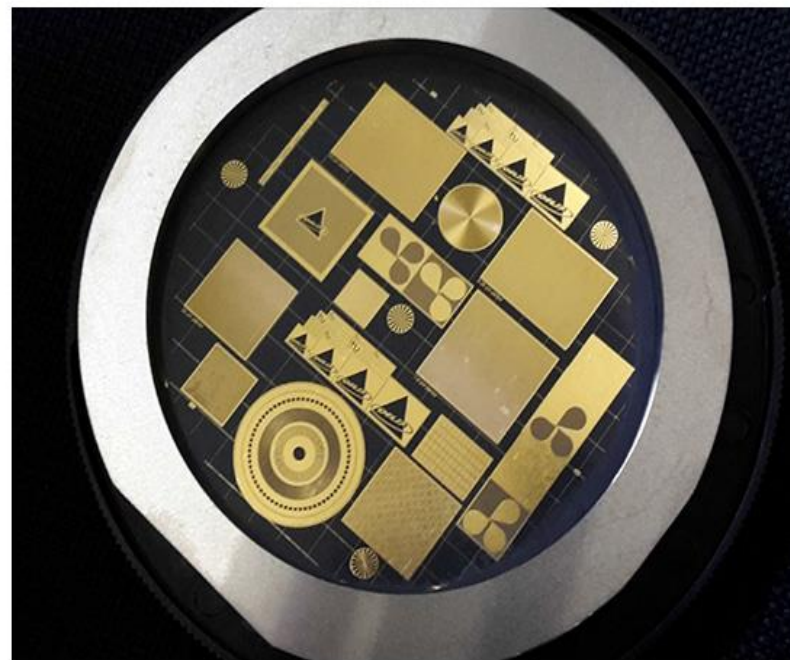
- фоторезистите специално разработен за LIGA процес трябва да имат:
- висока чувствителност към рентгеново лъчение (типичното време на експониране за дебелина на PMMA 500 микрона е шест часа при енергия на фотоните 2,5 keV),
- висока разделителна способност,
- да са устойчиви при мокро и сухо ецване,
- да са термично стабилни при температури по-големи от 150°C,
- да има много добра адхезия към подложката,
- да бъде устойчив при потапяне в електролита с дадено рН, в който става електрохимичното израстване, както и към неговата температура.

Маски за литография с рентгеново лъчение

- маската, както и при стандартната УВ фотолитография, трябва да съдържа изображението, което ще се прехвърля във фоторезиста при експониране, с тази разлика, че експонирането е с рентгенови лъчи. Маските са скъпи, изработката им отнема време, особено очертаването на топологините контури с електронно-лъчев сноп, както и постигането на малка дебелина на пропускащите зони и едновременно с това голяма дебелина на абсорбиращите зони.

- тънка титанова мембрана под 2 микрометра (титанът има нисък атомен номер) се използва за прозрачните за рентгеновите лъчи участъци. Мембраната трябва да издържи теглото на дебелие непрозрачни за рентгеновите лъчи участъци от фотомаската.

- над 10 микрометра дебел златен слой се нанася като абсорбер за формиране на непрозрачните участъци от фотомаската. Златото има голям атомен номер и затова голям коефициент на поглъщане на рентгеновите лъчи.

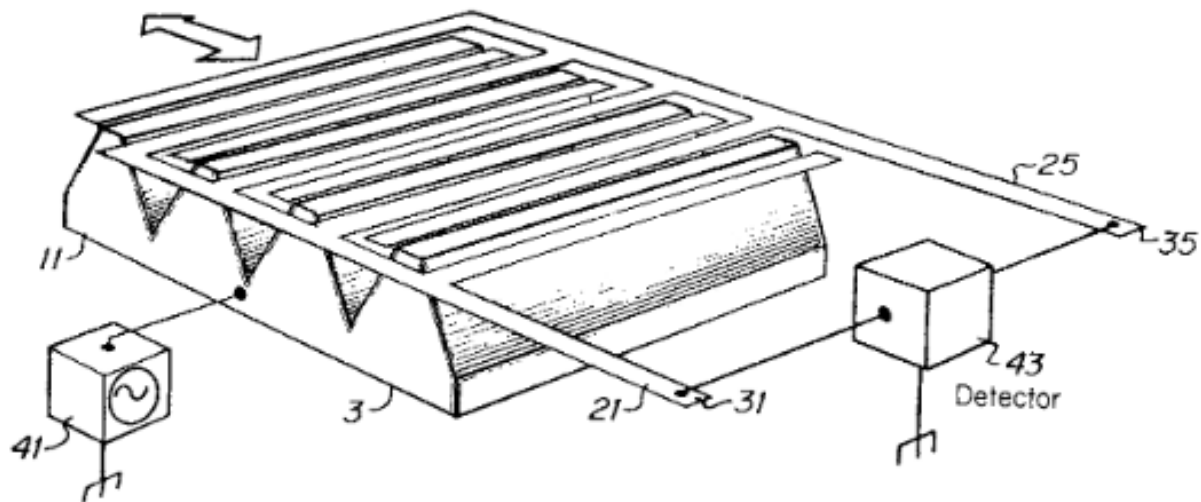


Рентгенова фотомаска с тестови структури

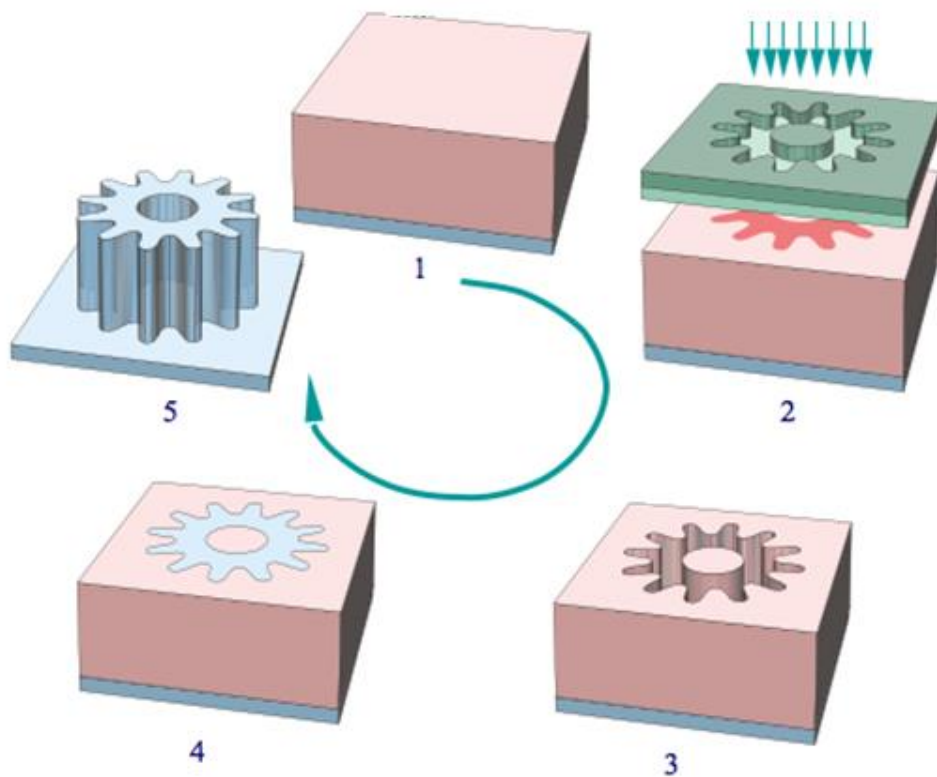
- За получаване на висок контраст (>200) абсорбиращият слой трябва да е с дебелина $>10 \mu\text{m}$, а неабсорбиращият – с $1 \mu\text{m}$.
- Необходима е доза енергия няколко стотин пъти по-голяма от тази за планарните (не триизмерни) микроструктури и микросистеми – около 1 MJ/cm^2 .
- За да се осигури дълбочинно проникване във фоторезистивния слой дължината на вълната на лъчението е $0.2 - 0.6 \text{ nm}$, за разлика от УВ, където е 365 nm .
- Тъй като една част от маската е мембранен тип, механичното усилие, предизвикано от натиска на абсорберите могат да предизвикат огъването ѝ и изкривяване на изображението. Затова за мембраната се избира материал с висок модул на Юнг.
- Загряването от прекомерна експозиция също може да деформира мембраната, затова се избира материал с подходяща топлопроводимост и температурен коефициент на линейно разширение. Най-подходящ е титанът.

Позициониране на рентгеновата маска спрямо топологията на подложката.

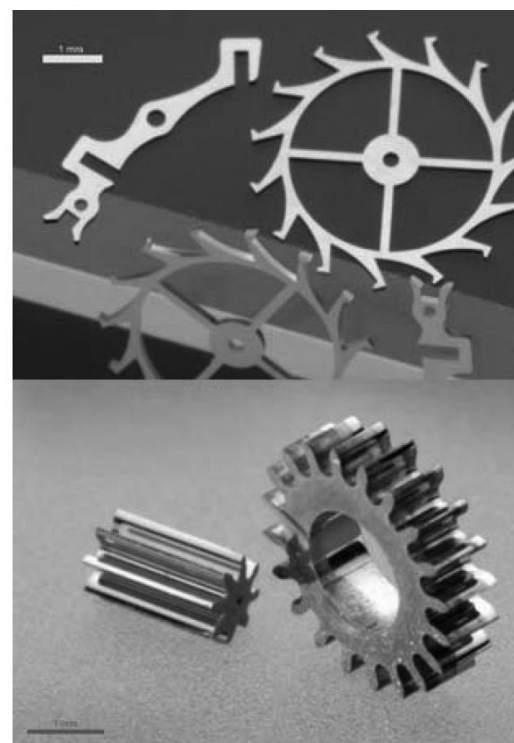
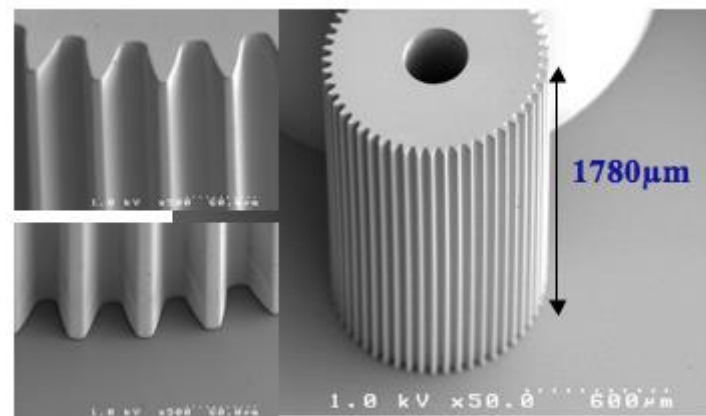
Съвместяването на рентгеновата маска към подложката е силно затруднено от липсата на визуален контакт, тъй като тя е непрозрачна за видимата светлина. Принципът за съвместяване разчита на „капацитивно зрение“ – тоест прихваща се изменението в капацитета формиран между допълнителни проводящи ивици отдолу на маската и различни топологични формирания върху подложката.



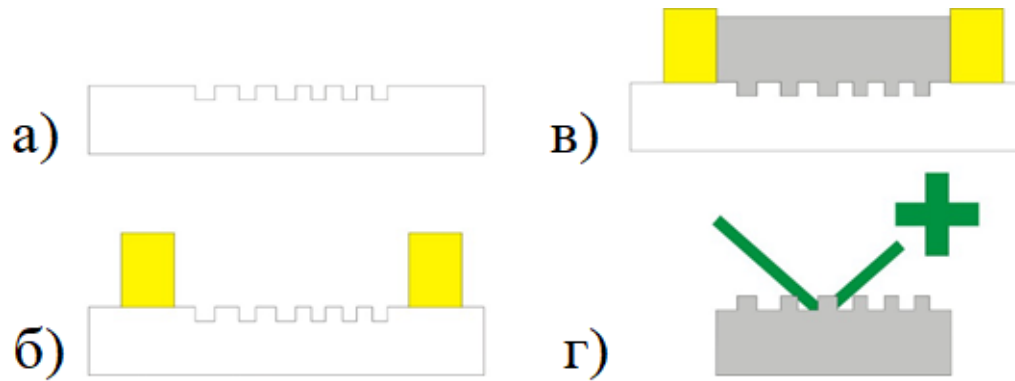
Подход за съвместяване на изображения при рентгеновата литография с използване на проводящи ивици на маската, които контактуват с релефните повърхности от подложката (патент 4,654,581/2014 USA)



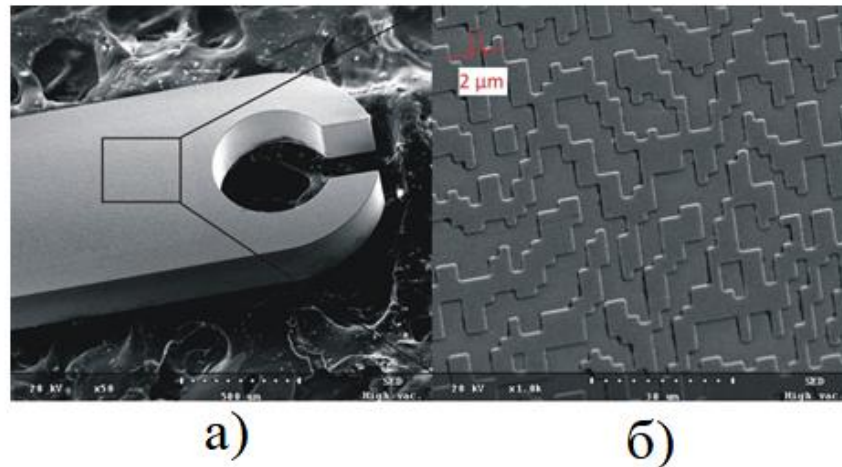
Зъбно колело изработено с висока точност
чрез LIGA-технология



Зъбни колела от златни и никелови
покрития за ръчен часовник и
микромотор



Технологична последователност за получаване на структури с интегрирани дифракционни оптични елементи (ДОЕ) (а) Структуриране на нанорелеф за ДОЕ върху подложка, използвайки стандартна микрообработка; (б) структуриране на втора топология със специализиран фоторезист SU-8 чрез UV-LIGA; (в) електрохимично отлагане електрохимично отлагане по темплейта оформен от фоторезиста и от ДОЕ; (г) премахване на подложката и на фоторезиста и оформяне на свободно стоящ ДОЕ, използван за уникална кодировка на информация.



Микроскопска снимка на LIGA обработен участък за кодировка с наноструктуриран ДОЕ: а) макро-вариант 200 μm дебел функционален компонент с ецнат ДОЕ; б) детайлизиран изглед от близо на наноструктурите.

Предимства на X-LIGA:

Голяма височина на структурите
и гладки вътрешни стени

Възможност за вариране на
дебелината в диапазона
100-1000 μm

Висока пространствена резолюция

Големи съотношения височина:широчина

Недостатъци на X-LIGA:

Висока цена, заради апаратурата и
материалите.

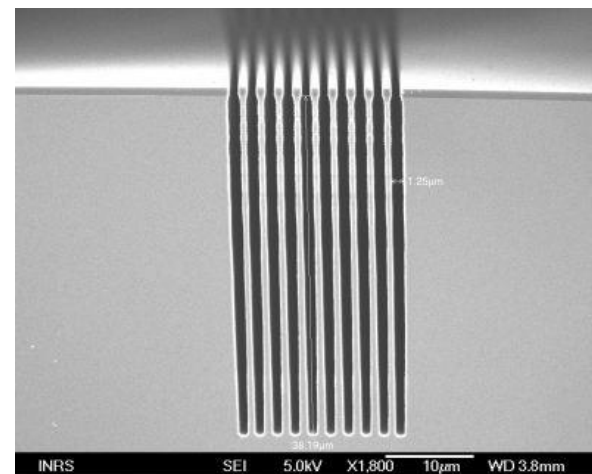
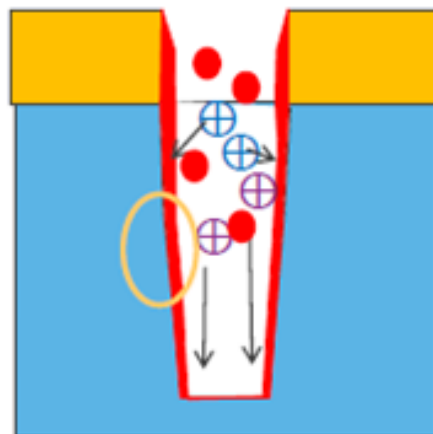
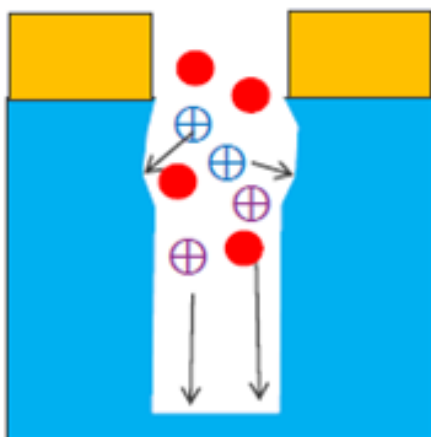
Бавен процес.

Енергоемък процес.

Трудност при пренасянето на
технологията от изследователските
лаборатории в серийното
производство.

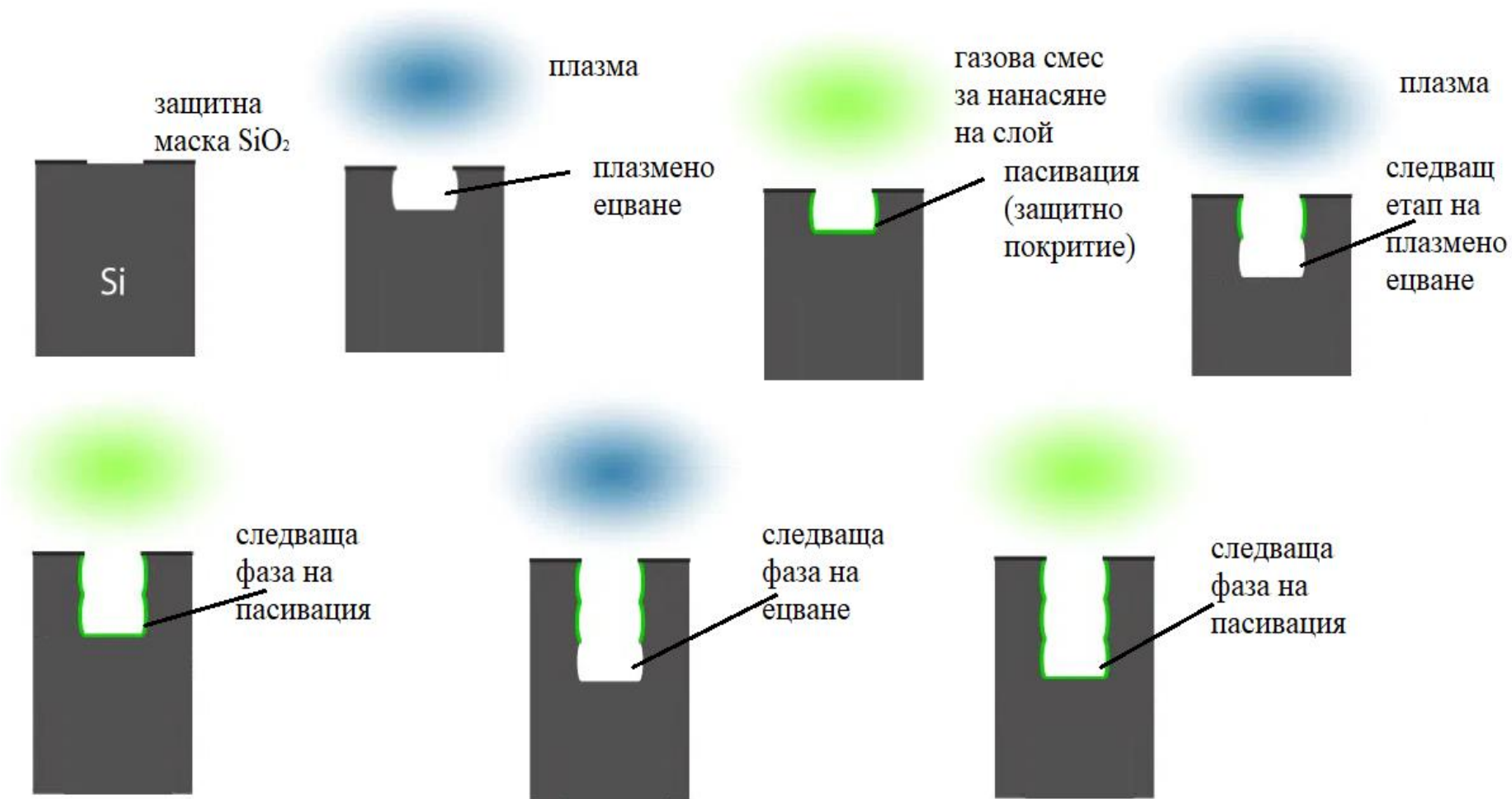
Bosch процес

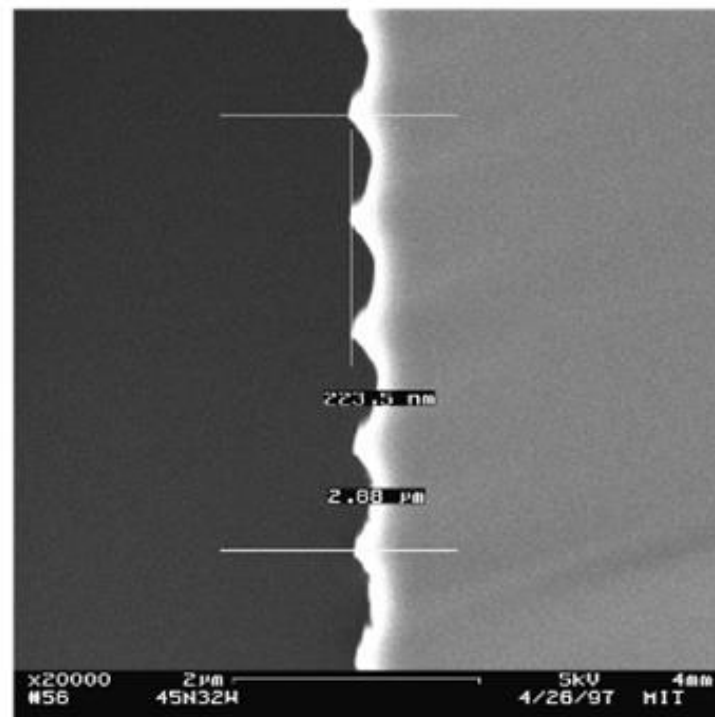
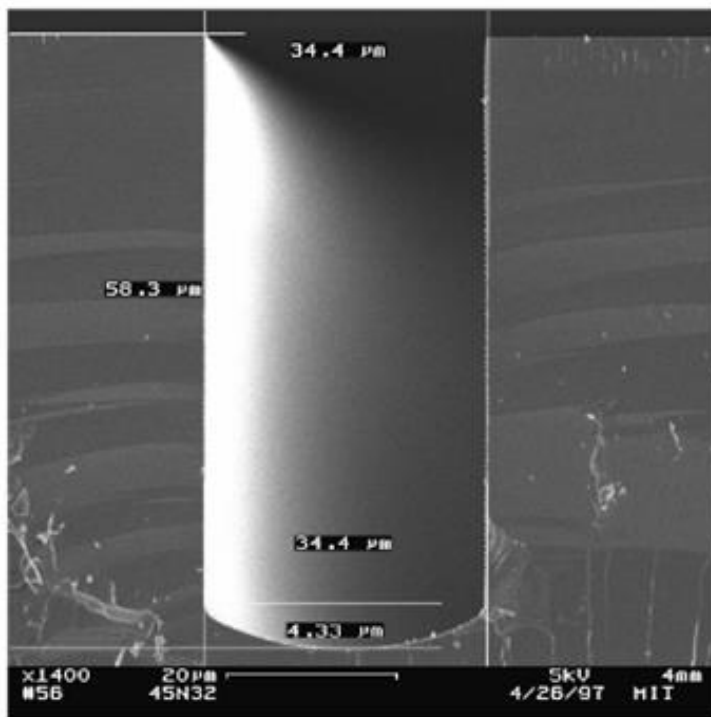
Редуване на дълбоко сухо ецване непосредствено с нанасяне на материал по вътрешните стени на ецнатите канали. Използва се за обемно изготвяне на тримерни структури (под повърхността, в обема на материала за разлика от LIGA процеса, който е вид повърхностна обработка). Целта на втория цикъл (нанасяне на материал) след ецването е да се повиши гладкостта на вътрешните стени.



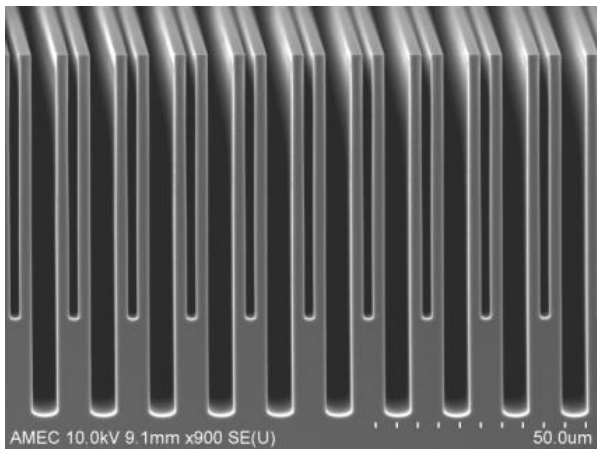
Микроканали в сензор за флуиден поток, формирани чрез Bosch процес.

Отделни фази на Bosch процеса

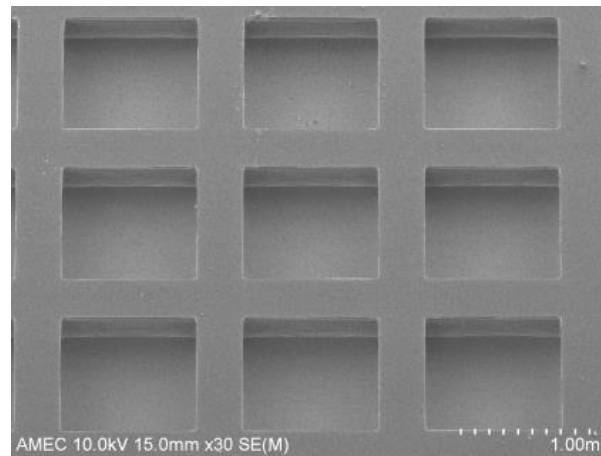




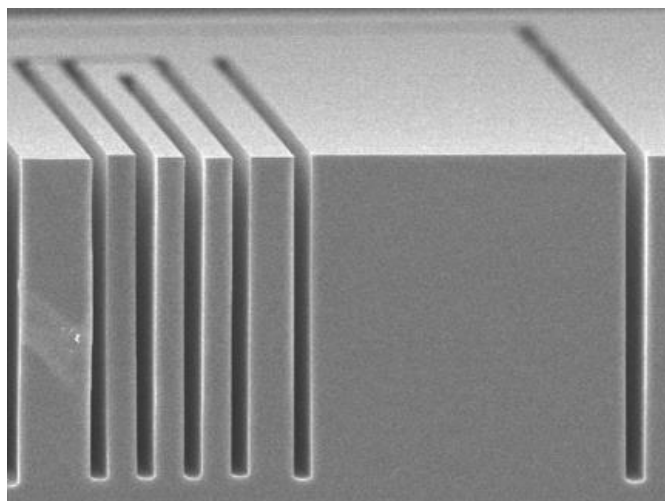
Заглаждане на стените на ецнати обемни структури чрез Бош процес



Част от жирокоп (за навигация, стабилизиране и поддържане на курса)



Матрица бутони, чувствителни на докосване



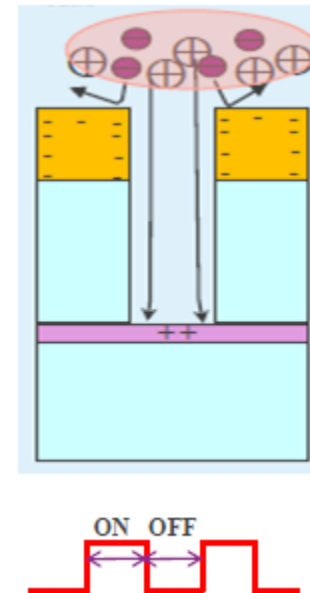
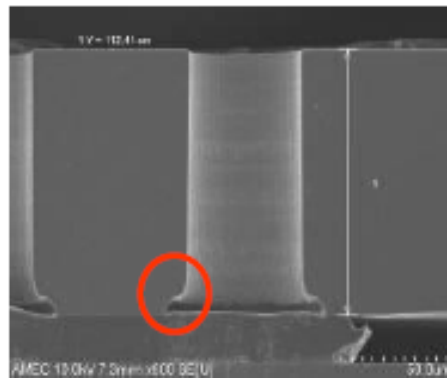
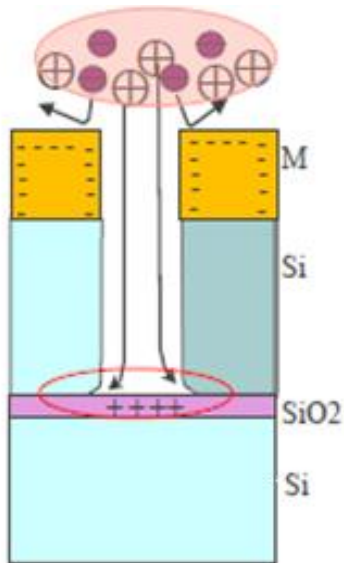
Част от акселерометър (измерва ускорението на движещи се обекти)

Предизвикателства	Пример	Влияние
постигане на вертикален профил без наклон		Променя резонансната честота на MEMS сензори
гладки стени		влияе върху чувствителността на инерциални сензори
липса на процеди		влияе върху надеждността
липса на зареждане от плазмения процес		влияе върху функционалността
равномерност на израстване		влияе върху ефективността на преобразуване

Причина за отклонението от вертикалните стени е отклонение в траекторията на йоните по време на дълбокото сухо йонно ецване, а това се дължи на неравномерност в плазмата-источник на йони.

Причина за грапавите стени е разяждащото действие на йоните по време на сухо реактивно ецване. Проблемът се решава чрез заглаждане на стените с нанасяне на фин слой материал. За целта след цикъл ецване следва цикъл нанасяне и се редуват. Гладкостта на стените на каналите е важна и за микродюзи, през които преминава флуиден поток (използват се в сензори на поток), за да не се задържа вещество в грапавините.

Причина за срезове в дъното на микроканалите – изкривяване на траекторията на йоните от ецващата плазма заради некомпенсиран заряд в оксидни слоеве, ако на дъното на процепа има такива. Елиминира се с подаване на импулсно компенсиращо зарядите напрежение .



Исползвана литература:

Introduction: LIGA and Its Applications, *Volker Saile*, *Advanced Micro & Nanosystems Vol. 7*, © 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, Weinheim.

Grégoire Genolet and Hubert Lorenz, UV-LIGA: From Development to Commercialization, *Micromachines*, 2014, 5, 486-495.

http://me.umn.edu/courses/me8254/attfiles/Lecture%2012%20LIGA_Full.pdf

http://www.sciencedirect.com/science?_ob=MiailImageURL&_cid=271437&_user=961305&_pii=S0026269203002957&_check=y&_origin=&_coverDate=29-Feb-2004&view=c&wchp=dGLbVlk-zSkWz&_valck=1&md5=82bfcfb24453b7ea7383a12725e6a32&ie=/Sdarticle

[Infrastructure de Nanostructures et Femtoscience](#)

<https://plasticsengineeringblog.com/page/3/>

[microworks - high-precision metal microstructures](#)

Semicon – Europa, Deep Silicon Etch Technology for Advanced MEMS Applications, Shenjian Liu, AMEC, 2016.