

Výroba mikrostruktur metodou bezmaskové fotolitografie – [BML]

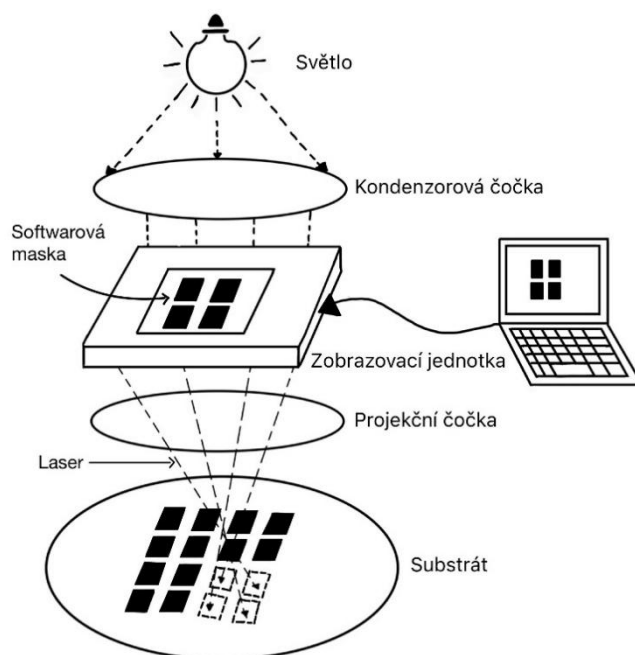
(Viet Tomáš Nguyen)

1. Úvod

Bezmasková litografie je moderní technologie používaná k vytváření velmi jemných struktur na povrchu materiálů, často v mikro- a nanoměřítku. Na rozdíl od klasické fotolitografie, která vyžaduje předem připravenou masku (šablonu) pro přenos vzoru, bezmasková litografie zapisuje požadovaný vzor přímo do světlocitlivé vrstvy (fotorezistu) pomocí úzce zaostřeného paprsku – nejčastěji elektronového, iontového nebo laserového. Tím umožňuje vysokou flexibilitu při návrhu a rychlé úpravy vzoru bez nutnosti výroby nové masky. Díky své přesnosti a univerzálnosti nachází uplatnění především ve výzkumu, vývoji polovodičových součástek, MEMS (mikro-elektro mechanické systémy) struktur nebo v nanotechnologiích.

2. Teorie

Bezmasková litografie je metoda používaná k vytváření jemných mikrostruktur na povrchu materiálů bez nutnosti použití fyzické fotomasky. Na rozdíl od klasické fotolitografie, kde se vzor přenáší na citlivou vrstvu pomocí masky a UV světla, bezmasková litografie využívá softwarově řízený světelný paprsek, který požadovaný vzor vykreslí přímo (Obr. 1). Tímto způsobem lze rychle a flexibilně vytvářet složité obrazce bez potřeby nákladné a časově náročné výroby masek.



Obrázek 1: Schématický nákres bezmaskového litografu.

Principem této metody je selektivní ozáření vrstvy **fotorezistu** – materiálu citlivého na světlo. Po ozáření dojde v rezistu k chemickým změnám, které umožňují selektivní odstranění ozářených nebo neozářených oblastí během následného vyvolání ve vývojce, rozpouštědle specifické pro daný rezist. Podle způsobu reakce na záření rozlišujeme pozitivní rezisty, které se po ozáření stávají rozpustnými ve vývojce, a negativní rezisty, které naopak vytvrzují. Volba vhodného rezistu závisí na použité metodě zápisu, požadovaném rozlišení a následných procesech (např. leptání nebo napařování kovu).

V bezmaskové litografii je vzor definován digitálně a může být snadno upravován pomocí vektorového grafického editoru. Vektorová maska slouží jako předloha, podle které je řízen pohyb a intenzita světelného paprsku. Díky tomu lze snadno měnit tvary, velikosti nebo rozmístění struktur bez fyzických úprav zařízení.

Proces bezmaskové litografie obvykle zahrnuje tyto kroky:

1. **Příprava substrátu** (očistění povrchu, na který bude rezist nanesen)
2. **Nanesení fotorezistu na substrát** (zpravidla rotační metodou, za účelem vytvoření rovnoměrné vrstvy)
3. **Preexpoziční zapékání** (vypaření rozpouštědla v rezistu, zvýšení přilnavosti nanesené vrstvy k substrátu)
4. **Expozice** (osvětlení povrchu dle softwarově vytvořeného vzoru)
5. **Postexpoziční zapékání** (dokončení chemických reakcí iniciovaných expozicí a ke zpevnění ozářených oblastí fotorezistu)
6. **Vyvolání** (odstranění části rezistu podle jeho typu)

3. Cíl práce

Cílem této úlohy je příprava mikrostruktur pomocí bezmaskové litografie. Toto zahrnuje seznámení se s jednotlivými kroky technologického procesu, tvorba virtuální masky ve vektorovém grafickém editoru, samotná tvorba vzorku a následná charakterizace optickou mikroskopií.

4. Popis zařízení

Před vlastní expozicí se nejprve na substrát nanese tenká a rovnoměrná vrstva fotorezistu pomocí **rotační odstředivky** (*spincoater*, Obr. 2). Substrát se připevní na otočný terč v pracovní komoře odstředivky a po nanesení definovaného objemu rezistu se vysokorychlostním otáčením vytvoří rovnoměrná vrstva požadované tloušťky.



Obrázek 2: Spincoater skládající se z pracovní komory (1) a řídicího panelu (2).

Pro samotnou expozici vzorků při bezmaskové litografii se v této úloze využívá zařízení MicroWriter ML3 – **bezmaskový litograf** určený pro přímý zápis mikrostruktur do světlocitlivých vrstev. Zápis vzoru je řízen softwarově, přičemž se využívá laser o vlnové délce 365 nm. Zařízení má kompaktní konstrukci s výklopnými dvířky na čelní straně, pod nimiž se nachází pracovní plošina pro substrát. Ovládání probíhá přes připojený počítač s řídicím softwarem, kde lze nastavit geometrii, polohu vzoru, expoziční dávku a další parametry expozice. Základní konstrukční a funkční prvky přístroje jsou uvedeny níže (Obr. 3):

1. LED dioda
2. Digital micromirror device čip (polovodičový čip se soustavou mikrozrcadel pro projekci světla v pixelech)
3. Chladicí jednotka
4. Pracovní plošina pro substrát



Obrázek 3: Litograf zvenku s připojeným počítačem (vlevo) a jeho vnitřní konstrukce (vpravo).

5. Postup práce

1. Příprava substrátu

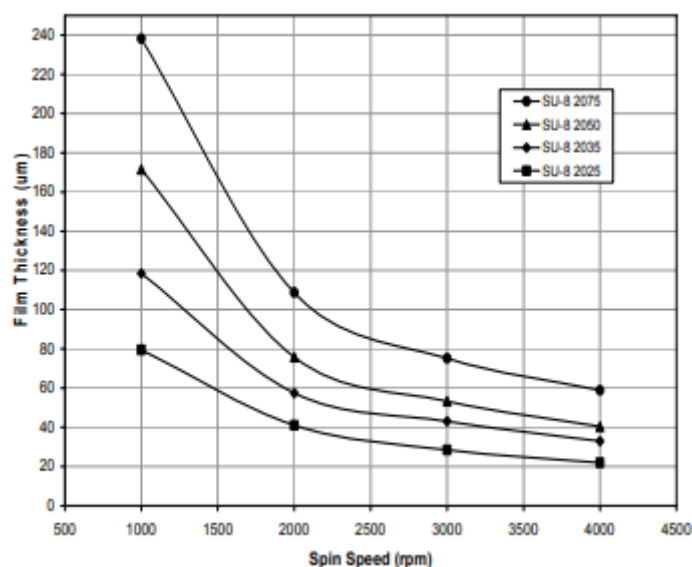
- 1) Důkladně opláchněte křemíkový plátek (substrát) isopropylalkoholem, acetonem a demineralizovanou vodou v této posloupnosti po dobu 30s. Vyčištěný substrát dehydratujte na plotně při teplotě 150 °C po dobu minimálně 5 minut.

2. Nanesení fotorezistu na substrát

- 1) Vložte substrát do pracovní komory doprostřed otočného terče.
- 2) Aplikujte množství rezistu (1ml na 1 palec průměru substrátu) doprostřed substrátu
- 3) Spusťte program s odpovídajícími parametry podle Tab. 1 a Obr. 4.

Tabulka 1: Parametry pro rotační nanášení fotorezistu

Fotorezist	Krok	Otáčky za minutu	Náběh [RPM/s]	Čas [s]
SU-2050	1	500	100	10
	2	3000	300	30



Obrázek. 4: Závislost tloušťky vrstvy na otáčkách za minutu pro různé typy SU-8.

3. Preexpoziční zapékání

- 1) Položte substrát na plotnu a nastavte teplotu podle Tab.2.
- 2) Po zahřátí na stanovenou dobu nechte vzorek vychladnout na 65 °C

Tabulka 2: Parametry pro preexpoziční zapékání podle tloušťky vrstvy fotorezistu.

Tloušťka [μm]	Doba zapékání při 65°C [min]	Doba zapékání při 95°C [min]
25–40	1	5–6
45–80	1–2	6–7
85–110	2–5	8–10
115–120	5	10–12
160–225	5	12–15

4. Expozice

- 1) Položte vzorek doprostřed zvýrazněných obrysů na pracovní plošinu litografu
- 2) Zapněte litograf a spusťte ovládací software DMO
- 3) V prvním panelu softwaru Zaostřete na substrát a v nastavení zadejte průměr a tvar substrátu
- 4) Ve druhém panelu nahrajte soubor s vybraným motivem a určete jeho pozici na substrátu pomocí souřadnic
- 5) Dále nastavte expoziční parametry režim vykreslování a kvalita osvitů
- 6) V posledním panelu zkontrolujte dobu osvitů pomocí funkce RENDER a zadejte požadovanou intenzitu osvitů podle Tab. 3
- 7) Spusťte expozici
- 8) Po skončení expozice vyjměte vzorek a pokračujte v dalším kroku

Tabulka 3: Parametry pro expoziční dávku podle tloušťky vrstvy fotorezistu.

Tloušťka [μm]	Dávka expozice [mJ/cm^2]
25–40	150–160
45–80	150–215
85–110	215–240
115–120	240–260
160–225	260–335

5. Postexpoziční zapékání

- 1) Umístěte exponovaný vzorek na plotnu a zahřejte na předepsanou teplotu podle Tab. 4
- 2) Zapékejte po doporučenou dobu dle typu použitého fotorezistu, čímž dojde k dokončení polymerace ozářených oblastí.
- 3) Po zapékání nechte vzorek vychladnout na pokojovou teplotu.

Tabulka 4: Parametry pro postexpoziční zapékání podle tloušťky vrstvy fotorezistu.

Tloušťka [μm]	Doba zapékání při 65°C [min]	Doba zapékání při 95°C [min]
25–40	1	5–6
45–80	1–2	6–7
85–110	2–5	8–10
115–120	5	10–12
160–225	5	12–15

6. Vyvolání

- 1) Vychladlý vzorek ponořte do vyvolávacího činidla PGMEA
- 2) Agitujte roztok pro urychlení procesu krouživým pohybem nádoby s vývojkou
- 3) Opláchněte vyvolaný vzorek isopropylalkoholem a nechte uschnout. V případě zmlčnění vzorku ponořte vzorek zpět do vývojkou a opakujte krok 2)

6. Zpracování výsledků

Charakterizujte připravený vzorek na optickém mikroskopu, který je zakomponován přímo v litografu. Změřte charakteristické rozměry vyvolaných struktur vhodným softwarem a srovnajte je s rozměry vzorového designu (masky). Okomentujte příčinu případných vad ve vyvolaných vzorcích a navrhněte úpravu technologického postupu pro zlepšení kvality vzorku.

7. Bezpečnostní pokyny

Při práci s chemikáliemi používejte ochranný plášť, brýle a rukavice. Pracujte v dobře větraném prostoru nebo v digestoři. Při používání spincoateru a vyhřívaných ploten dbejte zvýšené opatrnosti a manipulujte se vzorky pouze pinzetou. Během expozice nepřistupujte k laserovému litografu a nikdy nezasahujte do zařízení během jeho chodu. Použité chemikálie nevylévejte do výlevky, ale vylejte do speciálních odpadních nádob. Po ukončení práce uklidte pracovní místo a vypněte všechna zařízení.

8. Kontrolní otázky

1. Jaký je rozdíl mezi pozitivním a negativním fotorezistem?
2. Jaký je účel preexpozičního a postexpozičního zapékání?
3. Proč se při nanášení fotorezistu používá spincoater?
4. Jaký princip využívá bezmasková litografie při tvorbě struktur?
5. Jaké výhody má bezmasková litografie oproti klasické fotolitografii?
6. Jaké bezpečnostní zásady je nutné dodržovat při práci s laserovým litografem?
7. Co by se stalo, kdyby byl vzorek nedostatečně zapékán po expozici?
8. Jak lze ověřit, zda byla struktura úspěšně vytvořena?
9. Jaký je význam expoziční dávky a jak ji lze upravit?