

TÖBBSZÖRÖS LEKÉPEZÉSI MÓDSZEREK AZ OPTIKAI MIKROLITOGRÁFIÁBAN

Erdélyi Miklós
egyetemi adjunktus
erdelyi@titan.physx.u-szeged.hu

Horváth Zoltán
egyetemi docens

Szabó Gábor
az MTA
levelező tagja

Bor Zsolt
az MTA rendes tagja
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

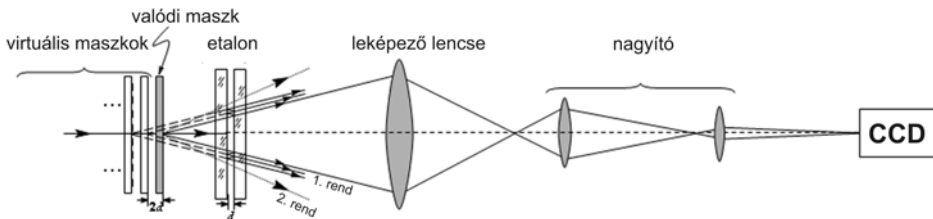
Az optikai mikrolitográfiában alapvető cél, hogy a maszkon lévő mintázat képe leképezési hibák nélkül a lehető legnagyobb kicsinyítéssel kerüljön egy fényérzékeny lemezre. A mintázat méretét a rendszer feloldóképessége (R) korlátozza, ami alapvetően az alkalmazott fény hullámhosszától (λ) és a rendszer numerikus apertúrájától (NA) függ. Növelve a numerikus apertúrát vagy csökkentve az alkalmazott fény hullámhosszát, a rendszer feloldóképessége nő ($R \propto \lambda/NA$), és így finomabb mintázatok is leképezhetővé válnak. Ezzel egyidejűleg azonban a mélységélesség (DOF) csökken ($DOF \propto \lambda/NA^2$). Ez a korlátozó feltétel arra ösztönözte a kutatókat, hogy más módszereket dolgozzanak ki a feloldóképesség és a mélységélesség egyidejű növelésére. A koherens többszörös leképezés egy olyan módszer, amely alkalmas a mélységélesség és a feloldóképesség

együttes javítására (Erdélyi et al., 1997; Horváth et al., 1997; Erdélyi et al., 2000).

A koherens többszörös leképezés alapelve

A tradicionális leképezés során a fotomaszknak egy kicsinyített képe jelenik meg a fényérzékeny lemezen. A többszörös koherens leképezés lényege, hogy egy optikai eszközzel megsokszorozzuk a maszk képét, amely képeket a lencse koherens (azaz egymással interferencia képes) módon szuperponál. A javasolt technika elvi vázolata az 1. ábrán látható.

Az interferométerben bekövetkező többszörös reflexió miatt a valódi maszknak több virtuális képe jön létre. A virtuális maszkok távolsága $2d$, intenzitásarányuk R^2 , ahol d az interferométer tükreinek távolsága, R pedig a reflexiós képességük. Mivel a tükrök távolsága egy piezo-eltolóval könnyedén



1. ábra

változtatható, a képpontok közti szeparáció is állítható. A szomszédos képek közötti relatív fáziskülönbség $\delta = 2\pi \cdot 2d/\lambda$. A maszkok képeinek távolsága $2dM^2$, ahol M^2 a lencse longitudinális nagyítása. A leképező objektív által létrehozott végső kép a valódi és a virtuális maszkok képeinek szuperpozíciója. Itt érdemes bevezetni a relatív képsűrűség fogalmát (N), amely megadja, hogy egy mélységelességen belül hány kép van: $N = \text{DOF}/2dM^2$. Ha N kisebb, mint 1, akkor a képek szeparáltan jelennek meg. Bár mind a relatív képsűrűség, mind a relatív fáziskülönbség az interferométer tükreinek távolságától függ, praktikus okok miatt célszerű független paraméterként kezelni őket.

Pontszerű fényforrások leképezése

A javasolt módszer a mélységelességen túl a feloldóképességet is megnöveli. Ennek demonstrálására vizsgáljuk meg a rendszer pontátviteli függvényét, azaz számítsuk ki és mérjük meg egy pontszerű fényforrás esetén a képet. A Fabry-Perot-interferométer bázistávolságát úgy kell megválasztani, hogy csak egy gyűrű haladjon át a lencse apertúrájának szélén. Megmutatható, hogy ilyenkor a lencse képsíkjának közelében kialakult intenzitás radiális eloszlása a J_0^2 függvénnyel jellemezhető, ahol J_0 a nulladrendű Bessel-függvény. Határesetben – amikor a Fabry-Perot-gyűrű végtelenül keskeny és teljesen az apertúra szélén van – a feloldás 60 %-kal javítható. Fontos megemlíteni azonban, hogy a J_0^2 függvény mellékmaximumai jóval intenzívebbek, mint az Airy-féle elhajlási kép esetén voltak. Míg utóbbinál az első mellékmaximum intenzitása nem haladja meg a főmaximum 2 %-át, addig a Bessel-függvény négyzete esetén ugyanez az arány 16%.

A fény hullámtermészetét figyelembe vevő hullámoptika segítségével a leképező lencse mögötti fényintenzitás kiszámítható. A hengerszimmetria miatt az intenzitás a z és az r koordináták függvénye, ahol z és r a

megfigyelési pontnak a fókuszsíktól, illetve az optikai tengelytől mért távolsága. Az etalon bázistávolságának csökkentésével a képsűrűség (N) növekszik, aminek következtében az optikai tengely mentén az oszcilláció eltűnik, az intenzitást megadó görbe simább lesz, és a mélységelesség az Airy-féle képhez tartozó értékének többszörösére nő. A kísérleti eredmények szerint mikor a lencsére csak egy (éles) Fabry-Perot-gyűrű esik, akkor az optikai tengelyre merőleges síkokban az intenzitást a nulladrendű Bessel-függvény négyzete írja le. Ezt a számolási eredményeink megerősítik.

Kiterjedt mintázatok leképezése

A pontszerű források leképezése sok gyakorlati és elméleti tapasztalattal szolgál a javasolt módszerre vonatkozóan, gyakorlati jelentősége azonban csekély. Az integrált áramkörökön lévő mintázatokat ugyanis optikai litográfiai úton hozzák létre, azaz az egész struktúrát egyszere képezik le, és nem „húzzák” a vonalakat. A kérdés tehát az, hogy kiterjedt mintázatok esetén hogyan használható a koherens többszörös leképezés. Itt az ún. *off-set* kontaktusokból álló mintázatok leképezését vizsgáljuk meg részletesen.

A szimulációk és a kísérletek során alkalmazott hullámhossz 441,6 nm (*He-Cd* lézer), a tükrök reflexiója $R = 0,97$, a bázistávolság 122 μm volt. A nagy reflexiónak és a kicsi képsűrűségnek ($N = 4$) köszönhetően az apertúra szélén lévő Fabry-Perot-gyűrű vékony. A szimuláció során alkalmazott paraméterek megegyeztek a kísérletek során alkalmazottakkal.

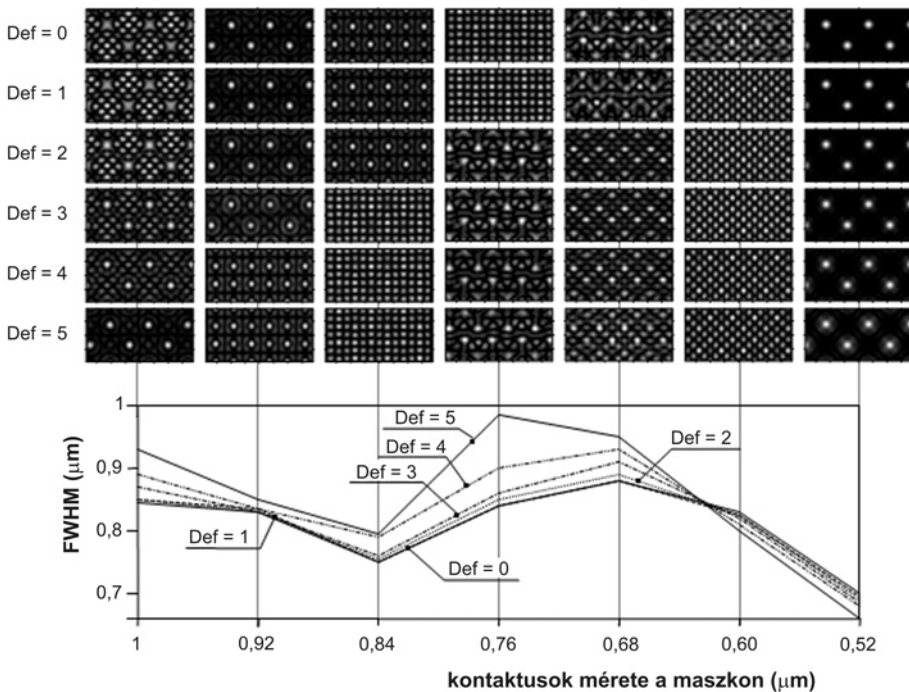
A leképező lencse által létrehozott képet két, kaskád módon egymás után elhelyezett mikroszkópobjektívvel nagyítottuk fel, és *CCD*-kamerával vizsgáltuk. A két objektív együttes nagyítása $20 \times 40 = 800$ volt. Az első objektívet egy z -eltolóra helyeztük, aminek következtében az axiális intenzitáseloszlást is fel lehetett venni.

A keletkezett kép minőségét az határozza meg, hogy mennyi Fourier-komponens vesz részt a leképezésben. Fabry-Perot-szűrő nélkül a lencse numerikus apertúrája önmagában meghatározza az átengedett maximális térbeli frekvenciakomponenst, és végső soron a kép minőségét. Minél kisebb a periódus a maszkon, annál nagyobb a diffrakciós szög, illetve a diffrakciós rendek térbeli szeparációja. A mintát nem lehet leképezni, ha csak a nulladik rend halad át a lencsén.

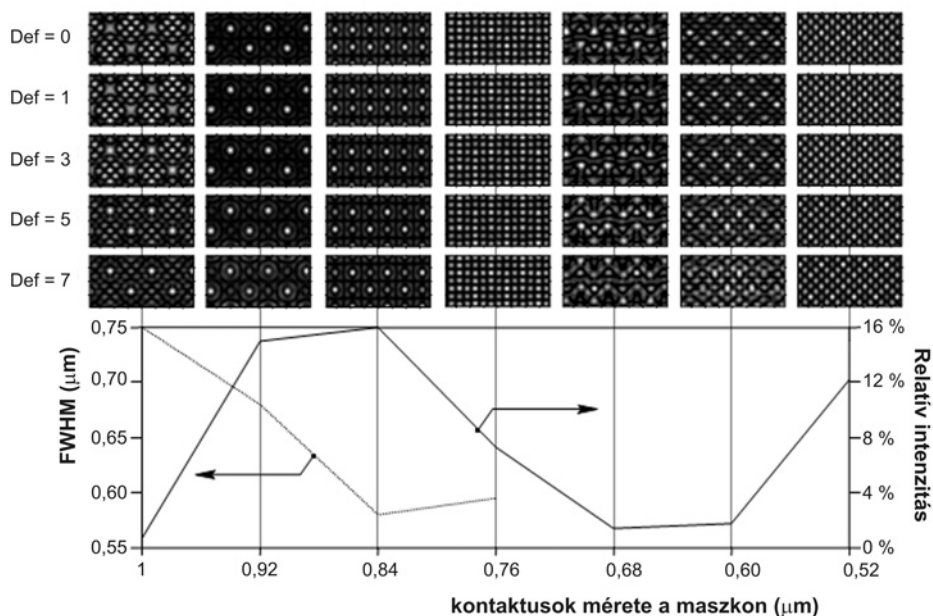
A 2. ábra a számolt intenzitáseloszlásokat mutatja hét minta esetén különböző mélység-élességek mellett. Az ábrázolt $7,5 \times 15 \mu\text{m}^2$ területek kiértékeléséből nyert $FWHM$ értékek szintén láthatóak. A $FWHM$ (szimulált feloldás) függése a CD -től (a maszkon mért tényleges méret) minden mélység esetén hasonló karakterisztikát mutat. Ugrásszerű változás akkor tapasztalható, amikor a CD $0,84 \mu\text{m}$ alá csökken, ekkor ui. a ± 2 rendek már nem haladnak

át a lencse apertúráján, így nem vesznek részt a leképezésben. A $FWHM$ jelentősen megnő, míg a mélységélesség csökken. Tovább csökkentve a CD értékét, a ± 1 rendek egyre közelebb kerülnek az apertúra széléhez, csökkentve ezzel a $FWHM$ értékét.

Egy keskenysávú Fabry-Perot-szűrő jelentős szelekciót vezet be a térbeli Fourier-komponensek között: csak azok a diffrakciós rendek vesznek részt a leképezésben, amelyek áthaladnak a szűrőn. Ez egyúttal erős mintázatfüggőséget jelent. A 3. ábrán a Fabry-Perot-szűrő használatával nyert szimulációs képeket láthatjuk. A szimulált mintázatok karakterisztikája nagymértékben függ a mintázat periódusától, de nem érzékeny a mélység-élesség változtatására. Figyelemreméltó, hogy a $FWHM$ $0,75 \mu\text{m}$ -ról $0,58 \mu\text{m}$ -re csökkent a $0,84 \mu\text{m}$ -es mintázat esetén. Ez a mintázat a legjobban leképezhető a fényvesztés szempontjából is, ugyanis ebben az esetben a 2.



2. ábra • Szimulált képek Fabry-Perot-szűrő használata nélkül



3. ábra • Szimulált képek Fabry-Perot-szűrő használatával

diffrakációs rendek éppen a Fabry-Perot-szűrő transzmissziós maximumára esnek. Tovább csökkentve a mintázat periódusát, a 2. rendek kívülre kerülnek az apertúrán, csökkentve mind a feloldást, mind az intenzitást.

Összefoglalás

Egy Fabry-Perot-etalon alkalmazásán alapuló koherens többszörös leképezési eljárást

vizsgáltunk elméleti és kísérleti módszerekkel. Az eljárás elsősorban kontaktusok leképezésénél alkalmazható, ahol megfelelően választott paraméterek mellett a feloldás 25 %-kal, míg a mélységélesség 300 %-kal volt növelhető.

Kulcsszavak: *többszörös leképezés, optikai litográfia, mélységélesség, feloldóképesség*

IRODALOM

Erdélyi M. – Horváth Z. L. – Szabó G. – Bor Zs. – Tittel, F. K. – Cavallaro, J. R. – Smayling, M. C. (1997): Journal of Vacuum Science and Technology B. **15**, 2, 287–92

Erdélyi M. – Bor Zs. – Wilson, W. L. – Smayling, M. C. – Tittel, F. K. (2000): Applied Optics. **39**, 7, 1121–29

Horváth Z. L. – Erdélyi M. – Szabó G. – Bor Zs. – Tittel, F. K. – Cavallaro, J. R. (1997): Journal of the Optical Society of America A. **14**, 11, 3009–13