



---

TESIS - SM 142501

**KO-OPTIMASI *SOURCE* DAN POLA *MASK*  
BERDASARKAN ALGORITMA MULTI-OBJEKTIF  
*PARTICLE SWARM OPTIMIZATION***

ZENDHIASTARA ARTHANANDA

NRP 06111450010040

DOSEN PEMBIMBING

Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

Prof. Hung-Fei Kuo

PROGRAM MAGISTER

DEPARTEMEN MATEMATIKA

FAKULTAS MATEMATIKA, KOMPUTASI DAN SAINS DATA

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2017



---

THESIS - SM 142501

**SOURCE MASK PATTERN CO-OPTIMIZATION  
BASED ON MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM  
OPTIMIZATION ALGORITHM**

ZENDHIASTARA ARTHANANDA

NRP 06111450010040

SUPERVISORS

Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si

Prof. Hung-Fei Kuo

MASTER PROGRAM

DEPARTMENT OF MATHEMATICS

FACULTY OF MATHEMATICS, COMPUTATION AND DATA SCIENCE

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SURABAYA

2017

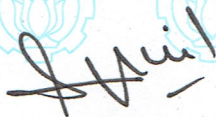
Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di

Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :  
**ZENDHIASTARA ARTHANANDA**  
NRP. 1214201040

Tanggal Ujian : 11 Januari 2018  
Periode Wisuda : Maret 2018

Disetujui oleh:



**Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si**  
NIP. 19660414 199102 2 001

(Pembimbing I)



**Endah Rokhmati M.P., S.Si, MT, Ph.D**  
NIP. 19761213 200212 2 001

(Penguji)



**Dr. Budi Setiyono, S.Si, MT**  
NIP. 19720207 199702 1 001

(Penguji)



**Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si**  
NIP 19830517 200812 1 003

(Penguji)



**Prof. Dr. Basuki Widodo, M.Sc**  
NIP. 19650605 198903 1 002



M10412801

Thesis Advisor: Hung-Fei Kuo



# 碩士學位考試委員會審定書

## Qualification Form by Master's Degree Examination Committee

Department: Graduate Institute of Automation and Control

Student's Name: ZENDHIASTARA ARTHANANDA YUDHI

Thesis Title:

Source Mask Pattern Co-Optimization Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization Algorithm

This is to certify that the dissertation submitted by the student named above, is qualified and approved by the Examination Committee.

### Degree Examination Committee

Members' Signatures:

Shao-Yun Fang

Hung-Fei Kuo

Sendren Sheng-Dong Xu

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Advisor:

Hung-Fei Kuo

Program Director's Signature: \_\_\_\_\_

Department/Institute Chairman's Signature:

M. J. Tsai

Date: 2017 / 7 / 27 (yyyy/mm/dd)

# KO-OPTIMASI *SOURCE* DAN POLA *MASK* BERDASARKAN ALGORITMA MULTI-OBJEKTIF *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*

Nama : Zendhiastara Arthananda  
NRP : 06111450010040  
Pembimbing 1 : Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si  
Pembimbing 2 : Prof. Hung-Fei Kuo

## ABSTRAK

Studi ini mengintegrasikan algoritma multi-objektif particle swarm optimization (MOPSO) kedalam proses ko-optimasi *source* dan *mask* (SMO) untuk meningkatkan performa lithografi pada sinar ekstrim ultraviolet (EUV). Sebuah metode proses secara simultan dari *source* dan pola *reticle* dikembangkan pada riset ini. Untuk konstruksi *source* berbentuk bebas (*freeform*), sebuah optimasi berbasis *pixel* digunakan pada platform PC. Algoritma MOPSO digunakan untuk menghasilkan *source* berbentuk bebas (*Source Freeform*). Model berbasis pendekatan koreksi optik (*Optical Proximity Correction* or OPC) digunakan untuk mengoreksi pola dari *mask layout*. Dengan mempertimbangkan karakteristik dari sistem lithografi EUV, metode SMO dikembangkan dengan algoritma MOPSO menggunakan dua fungsi tujuan: *error* (EPE) dan bias horizontal/vertikal. Sebuah pola satu-dimensi *line/space* (L/S) digunakan sebagai informasi dasar untuk menguji Pareto dari algoritma SMO. Kemudian, pola 2D dengan half-pitch 22-nm diuji menggunakan algoritma yang sama. Algoritma MOPSO berhasil untuk mengkonstruksi solusi non-dominan (*non-dominated*) dari *source Freeform* dan Pareto. Indikator performa menunjukkan kondisi *process windows* (PW) seperti *aerial image*, *exposure latitude* (EL), *depth of focus* (DOF) dan bias. Algoritma menunjukkan bahwa PW meningkat untuk EL namun DOF menunjukkan penurunan. EL meningkat sebesar 5.26% dan DOF menurun sebesar 11.34% untuk 1D L/S. EL dan DOF meningkat 43.6% dan 18.11% untuk pola 2D.

**Kata kunci:** lithografi ekstrim ultraviolet (EUV), multi-objektif particle swarm optimization (MOPSO), process window (PW), optimasi *source* dan *mask* (SMO).

# **SOURCE MASK PATTERN CO-OPTIMIZATION BASED ON MULTI-OBJECTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION ALGORITHM**

**Name** : Zendhiastara Arthananda  
**ID No.** : 06111450010040  
**Supervisor 1** : Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si  
**Supervisor 2** : Prof. Hung-Fei Kuo

## **ABSTRACT**

This thesis integrates multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm into the source and mask co-optimization (SMO) process to enhance the extreme ultraviolet (EUV) lithography imaging performance. A simultaneous source and reticle pattern process method is developed in this research. For the freeform source construction, a pixelated-based optimization process was performed on PC platform. The MOPSO algorithm was applied to generate freeform source. Model-based optical proximity correction (OPC) was applied to correct the mask layout patterns. Considering the characteristics of the EUV lithography system, the developed SMO with the MOPSO algorithm is constrained by two cost functions: the edge placement error (EPE) and horizontal/vertical bias. A one-dimensional line/space (L/S) pattern is used as the baseline information to test the Pareto behavior of the developed SMO algorithm. Then, the 2D pattern with half-pitch 22-nm was assessed using the developed algorithm. The proposed MOPSO algorithm succeeded to construct non-dominated solutions of freeform sources and Pareto front which four of those solutions are presented. The performance indicators include process windows (PW) condition such as the aerial image contrast, exposure latitude (EL), depth of focus (DOF), and bias errors. The proposed algorithm shows that the common PW conditions improved on EL while the DOF is slightly suffering. The EL increased for 5.26% and DOF suffers for 11.34% in 1D L/S and both EL and DOF increased for 43.6% and 18.11%, respectively for the 2D pattern.

**Keywords:** *extreme ultraviolet (EUV) lithography, multi-objective particle swarm optimization (MOPSO), process windows (PW), source mask optimization (SMO).*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah robbil ‘alamin, segala puji bagi Allah SWT, tuhan semesta alam. BerkatNya lah penulis dapat menyelesaikan studi magister di ITS dan NTUST. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua yang telah mendukung, mendoakan, serta memberikan semangat demi mendapatkan gelar magister. Tesis ini adalah hasil penelitian penulis atas program magister *Double Degree* antara Departemen Matematika ITS dan Departemen Automation and Control NTUST. Program *Double Degree* ini didukung oleh beasiswa NTUST serta *Fresh Graduate* ITS dari pemerintah Indonesia.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Profesor Hung-Fei Kuo sebagai pembimbing di NTUST atas bantuan, bimbingan serta arahan selama penulis menuntut ilmu di NTUST. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Profesor Erna Apriliani, M.Si sebagai pembimbing di ITS atas dukungan, doa dan bimbingan kepada penulis. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para penguji tesis antara lain Shao-Yun Fang, Sendren Sheng-Dong Xu, Dr. Endah Rochmati, Ph.D, Dr. Budi Setiyono, S.Si, MT serta Dr. Dieky Adzkiya, S.Si, M.Si atas saran dan masukan kepada penulis terkait penulisan dan penjabaran isi tesis. Sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.

Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Mahmud Yunus, M.Si dan Bapak Dr. Subiono, M.Sc selaku kaprodi S2 Departemen Matematika ITS periode 2016-2020 dan periode 2010-2015. Berkat arahan dan bimbingannya, penulis mampu menempuh dan menyelesaikan program *Double Degree*. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Imam Mukhlash, S.Si, MT dan Ibu Dr. Dra. Mardlijah, MT atas bantuannya dalam memperlancar administrasi penulis untuk menyelesaikan pendidikan magister di ITS.

Penulis juga sangat berterima kasih kepada seluruh dosen di Departemen Matematika ITS, Bapak Subchan, M.Sc, Ph.D, Ibu Endah Rochmati, Ph.D, Ibu Tahiyatul Asfihani, M.Si, Bapak Lukman H., M.Si, Bapak Bandung S., M.Si serta Bapak Prof. DR. M. Isa Irawan, MT atas dukungannya kepada penulis.

Penulis juga ingin menyampaikan salam hangat kepada Frederick, Anifatul Faricha, Muhammad Faisal, Huang Yu Lu, Gao Kuang Hsien, Zhu Liang Xiu, Lin Zi Han, Tsu Wei Xiang atas bantuannya dalam menyelesaikan tesis di NTUST.

Tak lupa ucapan terima kasih kepada teman-teman magister Matematika 2014, keluarga Kece Badai, seluruh mahasiswa Indonesia di NTUST Taiwan, teman-teman Taiwanese atas dukungan, persahabatan serta kenangan manis bersama. Semoga kita semua selalu dalam lindungan Allah SWT dan diberikan kesuksesan. Aamiin.

Desember 2017

Penulis



## DAFTAR ISI

hlm

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR NOTASI.....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan.....	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Kerangka Penulisan Penelitian.....	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Iluminasi dan Proyeksi Optik pada Sistem Litografi EUV .....	7
2.2 Efek <i>Mask</i> 3D EUV.....	9
2.3 Efek <i>Shadowing</i> dan <i>Compensation</i> .....	11
2.4 Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i> .....	14
<b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>19</b>
3.1 Tahapan Penelitian .....	19
3.2 Blok Diagram Penelitian .....	20
<b>BAB 4 PEMBAHASAN .....</b>	<b>21</b>
4.1 Multi-Objektif <i>Particle Swarm Optimization</i> untuk Litografi Ekstrim Ultraviolet .....	21
4.2 Prosedur Optimasi dari Ko-Optimasi <i>Source</i> dan <i>Mask</i> .....	24
4.3 Hasil Uji Coba Informasi Dasar ( <i>Baseline</i> ) pada Pola 1D L/S .....	26
4.4 Peningkatan <i>Contrast</i> , <i>Depth of Focus</i> , and <i>Mask Error Enhancement</i> <i>Factors</i> untuk Analisis Hasil Pola 2D.....	29

<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN PENELITIAN LANJUTAN.....</b>	<b>39</b>
5.1 Kesimpulan .....	39
5.2 Kontribusi .....	39
5.3 Penelitian Lanjutan .....	40
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>41</b>
<b>BIODATA PENULIS</b>	<b>47</b>

## DAFTAR GAMBAR

	<b>hlm</b>
Gambar 2-1	Skema Desain Optik pada Sistem Litografi EUV ..... 7
Gambar 2-2	Ilustrasi dari <i>Order Imbalance</i> . (a) <i>Order</i> ke-0; (b) <i>Order</i> ke -0 dan ke-1 ..... 9
Gambar 2-3	Ilustrasi dari <i>Mask Shadowing</i> pada Pola Bias di EUVL..... 12
Gambar 2-4	Layout (a) <i>Absorber</i> Vertikal; (b) <i>Absorber</i> Horizontal pada <i>Mask</i> EUV ..... 13
Gambar 2-5	Busur <i>Slit</i> pada Bidang <i>Exposure</i> ..... 14
Gambar 2-6	Skema Update Kecepatan dan Posisi ..... 15
Gambar 4-1	(a) Perhitungan EPE Berdasarkan Titik Evaluasi Diskrit; (b) Perhitungan pada Berbagai Kondisi Proses..... 23
Gambar 4-2	Diagram Operasi Simetri dari <i>Source</i> Berbasis <i>Pixel</i> pada Bidang Pupil Iluminasi ..... 23
Gambar 4-3	Sebuah <i>Unit Cell</i> dari Pola <i>Mask</i> hp 35-nm L/S, dengan <i>Transmittance</i> 0.06 dan <i>Phase</i> Diatur pada $180^\circ$ ..... 26
Gambar 4-4	(a) <i>Source</i> Dipole; (b) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source Dipole</i> untuk <i>Exposure</i> Pola L/S dengan hp 35-nm..... 27
Gambar 4-5	(a) <i>Source Freeform</i> ; (b) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source Freeform</i> untuk <i>Exposure</i> Pola L/S dengan hp 35-nm..... 27
Gambar 4-6	Solusi Pareto dari <i>Source Freeform</i> Berdasarkan Algoritma MOPSO ..... 28
Gambar 4-7	PW dari Pola 1D L/S antara <i>Source</i> Dipole dan MOPSO <i>Freeform</i> .... 29
Gambar 4-8	Sebuah <i>Unit Cell</i> dari Pola <i>Mask</i> 2D dengan beberapa <i>metrology sites</i> . <i>Transmittance</i> 0.06 dan <i>Phase</i> Diatur pada $180^\circ$ ..... 30
Gambar 4-9	(a) <i>Source</i> Quasar; (b) Pola <i>Mask</i> 2D setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source</i> Quasar ..... 30
Gambar 4-10	Solusi Pareto dari <i>Source Freeform</i> Berdasarkan Algoritma MOPSO untuk Pola 2D ..... 31

Gambar 4-11	(a) <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 1; (b) Pola <i>Mask</i> 2D setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 1 .....	32
Gambar 4-12	(a) <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 2; (b) Pola <i>Mask</i> 2D setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 2 .....	32
Gambar 4-13	(a) <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 3; (b) Pola <i>Mask</i> 2D setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 3 .....	33
Gambar 4-14	(a) <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 4; (b) Pola <i>Mask</i> 2D setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas <i>Aerial Image</i> Menggunakan <i>Source</i> MOPSO <i>Freeform</i> 4 .....	33
Gambar 4-15	<i>Feature</i> Pola <i>Mask</i> 2D dari <i>Process Window</i> antara <i>Source</i> Quasar dan MOPSO <i>Freeform</i> .....	35
Gambar 4-16	<i>The Slit Position Dependence</i> pada Beberapa Posisi <i>Slit</i> .....	36

## DAFTAR TABEL

	<b>hlm</b>
TABEL I	<i>Roadmap</i> Metrologi ITRS .....2
TABEL II	<i>Numerical Aperture</i> Tinggi pada Desain Sistem Optik EUV untuk NA>0.45 untuk Memperluas EUVL pada Fitur Sub-30nm ..... 10
TABEL III	Prosedur Berbasis MOPSO untuk Mendapatkan Bentuk Iluminasi ( <i>Source</i> ) .....25
TABEL IV	Hasil <i>Metrology</i> dari <i>Exposure</i> Pola L/S dengan Hp 35-nm Menggunakan <i>Source Dipole</i> dan MOPSO <i>Freeform</i> .....28
TABEL V	Hasil Penilaian dari <i>Error CD</i> dan <i>Contrast</i> pada Beberapa <i>Metrology Sites</i> dengan <i>Source Quasar</i> dan <i>Freeform</i> .....34
TABEL VI	Distribusi dari MEEFs pada Beberapa <i>Metrology Sites</i> .....37

## DAFTAR NOTASI

$s$	<i>Shadowing</i>
$h$	Ketebalan <i>absorber</i>
$\varphi$	Sudut kejadian miring pada bidang objek
$\alpha$	Sudut busur yang dibentuk pada proyeksi sinar kejadian pada bidang <i>mask</i> dan tepi normal
$B_{max}$	Lebar maksimal shadowing
$\theta$	Sudut <i>azimuthal</i>
$w$	Lebar <i>slit</i>
$x$	Posisi <i>slit</i>
$v_i(t + 1)$	Vektor kecepatan <i>particle</i> ke- $i$ pada saat $t+1$
$x_i(t + 1)$	Vektor posisi <i>particle</i> ke- $i$ pada saat $t+1$
$P_{best}$	Posisi terbaik dari <i>particle</i> ke- $i$
$G_{best}$	Posisi terbaik dari kawanan ( <i>swarm</i> )
$c_1$	<i>Learning factor</i>
$c_2$	<i>Learning factor</i>
$r_1$	Fungsi random <i>uniform</i> pada rentang [0,1]
$r_2$	Fungsi random <i>uniform</i> pada rentang [0,1]
$S(\bullet)$	Fungsi sigmoid
$x_{ibest}$	Lokasi optimal dari <i>particle</i>
$x_{gbest}$	Lokasi optimal dari kawanan ( <i>swarm</i> )
$F1$	Fungsi objektif 1
$F2$	Fungsi objektif 2
$w_j$	Fungsi bobot dalam optimasi
$EPE$	<i>Edge placement error</i>
$\Delta dose$	<i>Dose</i> pada <i>process windows</i>
$\Delta focus$	<i>Focus</i> pada <i>process windows</i>

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sirkuit terpadu atau yang dikenal sebagai *integrated circuits* (ICs) adalah komponen dasar yang terdiri dari resistor, transistor dan lain. ICs merupakan komponen yang digunakan sebagai otak dalam peralatan elektronika. Pada alat semikonduktor, ICs juga sering digunakan sebagai *microprocessor* (mikroprosesor). ICs ini telah diobservasi dan diprediksi oleh Gordon Moore pada tahun 1965. Moore mengemukakan bahwa jumlah transistor per inch kuadrat pada ICs telah meningkat dua kali lipat setiap dua tahun dan akan terus meningkat secara eksponensial [1]-[4]. Istilah ini sekarang dikenal sebagai Hukum Moore. Dalam beberapa dekade, industri semikonduktor memproduksi ICs berdasarkan prediksi Moore, dan sekarang, transistor pada ICs telah mencapai ukuran yang sangat kecil. Transistor pada ICs didorong untuk menjadi kecil dan lebih kecil karena adanya batasan ukuran diantara transistor. Semakin kecil transistor diproduksi, semakin banyak transistor yang dapat dimasukkan ke dalam ICs.

Kebutuhan akan keakuratan dalam proses dan kontrol kualitas pada produksi semikonduktor dalam volume tinggi meningkat dengan cepat dan dimensi serta ukuran dari struktur nano menjadi lebih padat dan ketat. Penyusutan dimensi dijaga dengan beberapa teknik litografi yang berkembang, sebagai contoh, multi-beam, laser litografi, litografi *immersion* 193-nm, serta litografi sinar EUV. Oleh karena itu, seperti yang tercantum pada *International Technology Roadmap for Semiconductor* (ITRS), struktur nanoteknologi menjadi lebih rumit dan menantang. *Roadmap metrology* ITRS dari tahun 2014 hingga ditunjukkan pada Tabel I. Ini menunjukkan bahwa ukuran dan dimensi struktur nano menurun untuk *flash*, *DRAM*, *MPU printed and physical gate* dalam sepuluh tahun terakhir. Penyusutan ini menarik perhatian dari para peneliti untuk mengembangkan teknik litografi seperti litografi *immersion* 193-nm dan litografi sinar EUV.

Saat ini, nanolitografi telah memasuki sub-panjang gelombang lebih kecil dibandingkan panjang gelombang 193-nm yang digunakan pada sistem lithografi *deep ultraviolet* (DUV). Karena bertambah cepatnya penurunan *critical dimension* (CD) pada ICs, ini menyebabkan penggunaan litografi DUV sulit untuk

TABEL I  
*Roadmap Metrologi ITRS*

Tahun	2014	2017	2021	2024
Flash 1/2 Pitch (nm)	17	13	8.9	8
DRAM 1/2 Pitch (nm)	26	20	14	11
Panjang MPU Printed Gate (nm)	25	17.7	11.1	7.9
Panjang MPU Physical Gate (nm)	18	14	9.7	7.4

diterapkan agar tetap stabil. Menurut *International Technology Roadmap for Semiconductor* (ITRS), EUV merupakan salah satu penerus yang menjanjikan dari lithografi *immersion* 193nm dengan panjang gelombang 13.5 nm [5],[6]. Dewasa ini, produsen alat litografi, ASML, mendukung perkembangan litografi EUV dengan target utama untuk perangkat *logic* 7nm [7].

Industri manufaktur litografi EUV memanfaatkan panjang gelombang yang sangat pendek untuk mengimbangi permintaan percetakan pada fitur yang lebih kecil. Desain optik yang digunakan pada sistem lithografi EUV bersifat reflektif, sehingga semua material menyerap cahaya EUV. Selain itu, sistem litografi EUV menerapkan sistem pencitraan reflektif, *off-axis* dan *non-telecentric*. Sistem ini menggunakan sinar laser plasma (LPP) sebagai sumber cahaya, dimana intensitas cahaya karbon dioksida yang tinggi terfokus pada tetesan Tin (Sn) yang mengandung ion bermuatan sangat tinggi dan memancarkan radiasi foton EUV. Foton EUV dikumpulkan dan ditransfer ke *mask* dengan sudut kemiringan sekitar 6 derajat dan sudut *azimuthal* yang bervariasi di celah *ring* eksposur. Selain itu, *mask* EUV bersifat reflektif karena terdiri dari lapisan *multilayer* molybdenum/silicon (Mo/Si) dan peredam yang merefleksikan dan menyerap sinar EUV. *Scanner* EUV berada di bidang litografi proyeksi optik. Untuk peningkatan performansi, *scanner* EUV dapat menerapkan teknik peningkatan resolusi (RET) pada *scanner* ARF seperti iluminasi *off-axis* [8],[9].



Sistem litografi EUV telah menarik perhatian para peneliti akhir-akhir ini. Terdapat banyak karya yang telah diterbitkan dan dipresentasikan mengenai kandidat yang menjanjikan dalam nanolitografi. Dalam sebuah jurnal yang dipublikasikan oleh *Hsu, 2015*, sebuah teknik peningkatan resolusi EUV (RETs) untuk  $k_1$  kurang dari sama dengan 0.4, mereka mengembangkan metode inovatif *source and mask optimization* untuk mengurangi *edge placement error* (EPE) secara signifikan [10]. Pada *Liu, 2014*, telah dipresentasikan *source ad mask optimization* EUV untuk node 7nm [11],[12]. Pada jurnal tersebut, telah digunakan model NXE M3D+ untuk memprediksi efek *mask* reflektif 3D, memungkinkan pupil yang simetris serta mengurangi bias H-V yang dihasilkan dari *shadowing mask* dan *non-telecentricity*. Hasil yang ditunjukkan terjadi peningkatan pada *CD uniformity* sebesar 20%. Jurnal lain yang dipublikasikan oleh *Raghunathan, Hsu, Howel, 2015*, telah dikembangkan model pendekatan koreksi optic (OPC) dengan mempertimbangkan efek *mask* 3D dan kompensasi dari *high-numerical aperture* (NA) [13]. Jurnal ini bertujuan untuk menggunakan model OPC yang mencakup kompensasi *mask shadowing* untuk mendapatkan kemungkinan memperpanjang dari model OPC yang ada untuk beberapa *numerical aperture* tertentu.

Di *E. van Setten, 2013*, *scanner* EUV dengan iluminasi fleksibel dianggap mampu menghasilkan perangkat *logic* dengan resolusi setengah *pitch* (*half-pitch* or *hp*) dibawah 13nm [14]. Iluminasi fleksibel membutuhkan optimasi *source* berbasis pixel untuk membentuk *source* berbentuk bebas (*Source Freeform*) [15],[16]. Kombinasi dari metode iluminasi berbentuk bebas (*freeform*) dan OPC digunakan sebagai teknik ko-optimasi *source* dan *mask* (SMO) untuk meningkatkan resolusi secara efektif dalam proses litografi [17],[18]. Berbagai algoritma telah diimplementasikan dalam teknik SMO seperti algoritma *gradient descent* (GD), algoritma *augmented Lagrangian*, algoritma *level-set*, dan algoritma genetika (GA). Algoritma GD dan *augmented Lagrangian* digunakan berdasarkan gradien fungsi objektif untuk menemukan iluminasi yang optimal serta terbatas untuk memperbaiki bentuk iluminasi [19]-[22]. Algoritma *level-set* digunakan untuk mendapatkan solusi dibawah kondisi nominal tanpa

mempertimbangkan kondisi proses [23]. Selain itu, GA terbatas pada kecepatan komputasi [24]-[26].

Pada jurnal *Xu M., et al, 2015*, yang berjudul *Gradient-based inverse extreme ultraviolet lithography* telah dipresentasikan tentang invers berbasis gradien untuk litografi EUV [21]. Pada jurnal ini telah dikembangkan metode berbasis blok untuk mengoptimalkan *feature* utama dan *sub-resolution assist feature* (SRAFs) secara iteratif dan mengompensasi efek *mask shadowing* dengan menggunakan metode *retargeting* pada model *shadowing* yang dikalibrasi. Jurnal lain oleh *Lei W., Sikun L., et al, 2016*, telah dipresentasikan optimasi *source* berbasis *pixel* untuk litografi menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) [36]. Pada jurnal ini telah dibandingkan beberapa metode seperti PSO, GA, dan algoritma GD. Metode PSO mengalami konvergensi lebih cepat dibandingkan GA dan di saat yang sama mampu meningkatkan kualitas *image* dan tidak membutuhkan perhitungan gradien dibandingkan algoritma GD.

Pada tesis ini, algoritma optimasi *source* berbasis *pixel* yang digunakan adalah *particle swarm optimization* (PSO) [27]-[29]. PSO mendapatkan perhatian diantara peneliti karena memberikan kecepatan yang cepat dan efisien untuk menemukan solusi optimal. PSO adalah algoritma evolusioner yang diadopsi dari perilaku sebuah kawanan seperti burung, lebah, ikan dll [30]. Algoritma dimulai dengan populasi *random* dan menggunakan *fitness function* untuk mengevaluasi populasi. Ini mencari hasil optimal dengan mengupdate populasi. Algoritma ini telah digunakan secara luas di beberapa bidang seperti optimasi portofolio, pengenalan pola, model sistem biologi dll [31]-[34]. Penelitian sebelumnya menunjukkan PSO dengan satu objektif (SOPSO) untuk melakukan optimasi *source* berbasis *pixel* pada litografi [35],[36]. SOPSO bergantung pada *edge placement errors* sebagai fungsi biaya untuk proses optimasi. Tetapi, pada litografi EUV, banyak faktor mempengaruhi hasil *exposure* dikarenakan perbedaan desain optik, sebagai contoh, bias, *line edge roughness*, dan *flare*. Lebih banyak fungsi objektif diperlukan untuk mengakomodasi optimasi. Penelitian ini juga mengintegrasikan prosedur multi-objektif PSO (MOPSO) ke dalam ko-optimasi *source* dan *mask* (SMO) untuk mengoptimalkan performa

EUV termasuk *contrast*, *depth of focus* (DOF) dan bias horizontal/vertikal (*HV bias*) sebagai fungsi objektif.

## 1.2 Permasalahan

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah

1. Bagaimana efek optik pada sistem litografi EUV
2. Bagaimana prosedur optimasi litografi EUV menggunakan multi-objektif *particle swarm optimization*
3. Bagaimana peningkatan performansi pada litografi EUV

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini antara lain :

1. Untuk menganalisis efek optik pada percetakan CD (*CD printing*) pada sistem litografi EUV.
2. Untuk mengetahui prosedur optimasi litografi EUV menggunakan pendekatan multi-objektif *particle swarm optimization* (MOPSO).
3. Untuk mengetahui performansi meliputi MEEF, *contrast* dan *depth of focus* (DOF) dalam litografi EUV.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan MATLAB dan PROLITH™ X5.2 dengan parameter seperti nilai sigma, *numerical aperture*, derajat polarisasi dan panjang gelombang EUV.

## 1.4 Kerangka Penulisan Penelitian

Penulisan tesis ini adalah sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan. Pada bab ini diperkenalkan perkembangan terkini dari litografi EUV dalam industri semikonduktor. Tujuan penelitian juga diberikan pada bab ini.

Bab 2 Litografi EUV. Pada bab ini dijelaskan desain optik sistem litografi EUV termasuk optik iluminasi dan optik proyeksi serta efek optik. Pada bab ini juga dijelaskan mengenai algoritma *particle swarm optimization*.

Bab 3 Metodologi Penelitian. Pada bab ini diuraikan metode penelitian yang meliputi tahapan penelitian serta diagram alur penelitian.

Bab 4 Pembahasan. Pada bab ini dijelaskan mengenai multi-objektif PSO untuk litografi EUV, prosedur ko-optimasi *source* dan *mask* (SMO), serta hasil pengujian pada informasi dasar (1D *Line/Space*) dan pola 2D.

Bab 5 Kesimpulan dan Penelitian Lanjutan. Pada bab ini berisi kesimpulan dari penelitian. Kontribusi serta penelitian lebih lanjut juga diberikan pada bab ini.

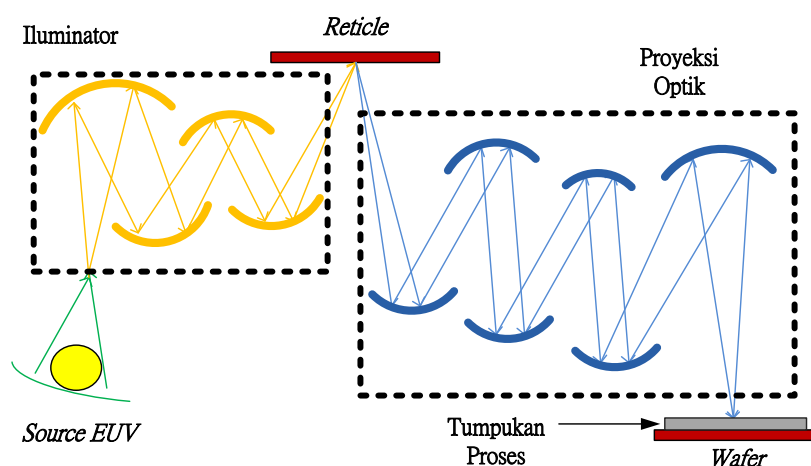
## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan mengenai materi-materi penunjang yang digunakan dalam pengerjaan tesis ini, meliputi desain optik serta efek optik dari sistem EUV serta algoritma *particle swarm optimization*.

#### 2.1 Illuminasi dan Proyeksi Optik pada Sistem Litografi EUV

Plasma dengan intensitas tinggi diarahkan ke target  $Sn$  untuk menghasilkan foton EUV pada 13.5 nm. Karena pendeknya panjang gelombang, desain optik perlu didesain bersifat reflektif untuk menyebarkan sinar EUV [34]. Sinar EUV dikoreksi oleh illuminator berdasarkan bentuk yang dibutuhkan dan diarahkan ke *reticle* yang reflektif. Sinar EUV pada *pattern layout* dikumpulkan oleh proyeksi optik sebelum diproyeksikan ke dalam *process stack* di tahap *wafer*. Illuminator pada Gambar 2-1 terdiri atas cermin pembentuk sinar, komponen *grating*, *aperture stop* untuk menjamin koherensi iluminasi dan intensitas bidang yang seragam.



Gambar 2-1. Skema Desain Optik pada Sistem Litografi EUV

Selanjutnya, bentuk *source* konvensional dari modul illuminator antara lain bentuk *conventional* (CON), *annular* (ANN), *dipole* (DIP) dan *quasar* (QUA) [37],[38]. Sinar EUV menyinari *reticle* reflektif dengan sudut kejadian miring  $6^\circ$  dan sudut *azimuthal* yang bervariasi  $\pm 24.6$  derajat [39],[40]. *Reticle* EUV terdiri atas *multilayer Molybdenum*(Mo) dan *Silicon*(Si). Lapisan *capping* Ru melindungi tumpukan *multilayer* dan *absorber* diletakkan di atas lapisan *capping*. Kemudian proyeksi optik memproyeksikan sinar yang dipantulkan oleh *reticle* menuju *photoresist* pada *process stack* di tahap *wafer* dengan NA 0.33 dan *demagnification* 4x. *Slit arc* (busur *slit*) memindai area *exposure* dengan ukuran  $26 \times 33 \text{ mm}^2$ .

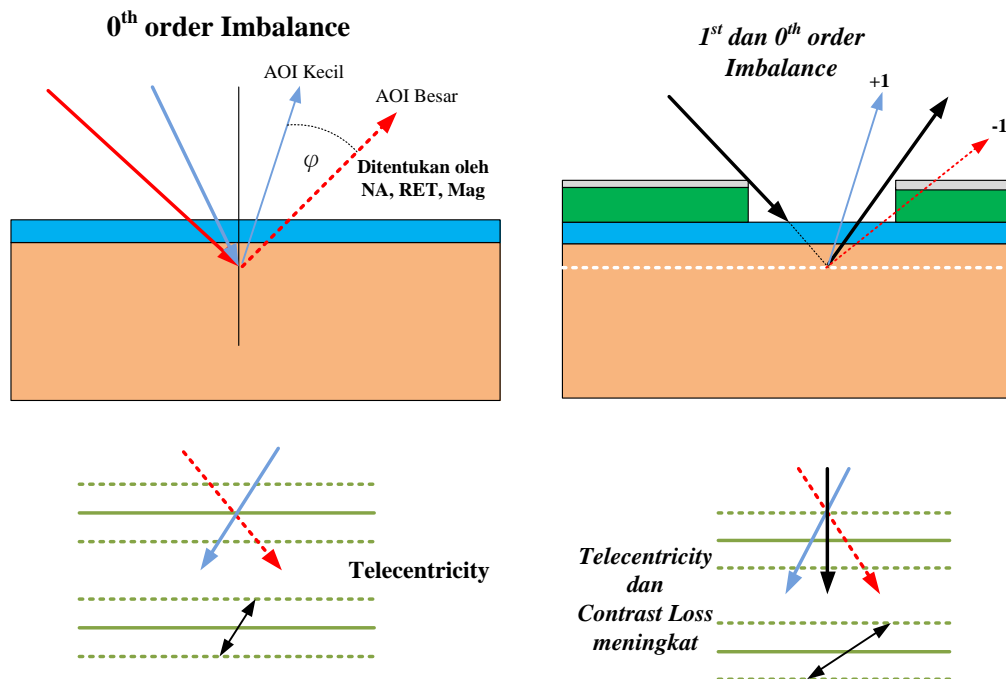
*Numerical aperture* (NA) adalah bagian tak terpisahkan dari proyeksi optik dalam sistem EUV [41]. Penelitian sebelumnya yang menggunakan NXE:3100 dengan NA 0.25 dan NXE:3300 dengan NA 0.33 menggunakan iluminasi pada mask dengan sudut kejadian miring (CRAO) 6 derajat. Menurut *roadmap* metrologi ITRS, NA yang besar akan dibutuhkan pada manufaktur di 10nm *half-pitch* (hp) *node* di masa mendatang. Ini berarti alat produksi dengan NA tinggi sangat esensial di masa mendatang. Dewasa ini, beberapa penelitian mengusulkan nilai NA tinggi untuk optik EUV. Salah satu menawarkan NA 0.45 untuk *demagnification* 4x namun mengubah CRAO menjadi  $9^\circ$ , sementara yang lain meningkatkan NA dari 0.33 menjadi 0.45 dengan CRAO  $6^\circ$  namun memodifikasi *demagnification* menjadi 6x. Hal ini dilakukan karena adanya mode reflektif dari illuminator menuju proyeksi optik.

*Mask* EUV, atau yang dikenal sebagai *reticle*, mewakili keakuratan dari pola *circuit* yang diinginkan [42]. Ini adalah substrat LTEM seluas 6-inch<sup>2</sup> dan tebal 0.25 inch yang dilapisi oleh *multilayer* reflektif EUV dan ditutupi oleh material penyerap yang terukir pada pola *circuit*. *Mask* EUV berbeda dari *mask* optik pada umumnya. Pertama, seperti elemen optik EUV, *mask* EUV bersifat reflektif, namun *mask* pada umumnya bersifat transmisif. Kedua, sinar datang berpusat di tengah namun tidak *normally incident* (biasanya terdapat sudut kejadian miring  $6^\circ$ ), dimana *mask* optik menerima cahaya berpusat di tengah dengan normal. Hal ini menyebabkan iluminasi asimetris atau *shadowing* terhadap cahaya. Ketiga, *mask* optik memiliki penutup pelindung dan bersifat transmisif yang disebut

*pellicle*. *Pellicle* berfungsi untuk menghentikan partikel untuk mendekati *wafer*, menahannya di bidang yang jauh dari *focus* dan mencegahnya untuk tidak menjadi rusak di *wafer*.

## 2.2 Efek *Mask 3D EUV*

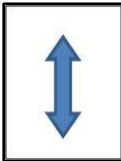

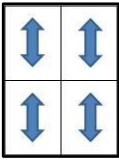
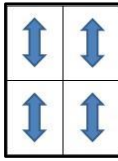
EUV menggunakan panjang gelombang 13.5 nm, proyeksi optik bersifat reflektif dan *mask* reflektif dibawah sudut kejadian miring sebesar  $6^\circ$ . kondisi ini dibutuhkan karena material optik konvensional sangat absorptif pada panjang gelombang EUV. Oleh karena itu, ini dapat menyebabkan banyak efek yang tidak diinginkan yang terkait dengan *mask* topologi 3D yang dikenal sebaga efek *mask 3D*. Ini adalah EUV yang unik dari lithografi EUV karena ini disebabkan oleh konfigurasi dari sudut kejadian miring. Konfigurasi ini mengarahkan kepada iluminasi asimetris yang terlihat di *mask*, shingga, beberapa efek *printing* pada litografi EUV yang tidak terlihat dapat dihindari pada sistem pencitraan (*imaging*).



Gambar 2-2. Ilustrasi dari *Order Imbalance*. (a) *Order ke-0*; (b) *Order ke-0* dari ke-1

Efek *mask* 3D yang spesifik pada sistem litografi EUV adalah *telecentricity error* dan *contrast loss* diakibatkan dari *order* difraksi ke-0 dan ke-1 (dari *mask*) yang *incident* ke *wafer* pada gambar 2-2. Terdapat struktur *absorber* menghasilkan *telecentric error* yang lebih besar karena sisi *absorber* (dari area *non-shadowed*) menghalangi persentase cahaya *order* ke-0 yang dicerminkan. Kombinasi dari reflektivitas ini menurun terhadap sudut kejadian miring dan tepi *absorber* menghalangi sudut refleksi yang lebih besar. Hal ini menyebabkan peningkatan ketidakseimbangan *order* ke-0 pada *numerical aperture* yang lebih besar. Diasumsikan bahwa spesifikasi kontrol fokus sebanding, ini menghasilkan *telecentricity error* yang lebih besar di tahap *wafer* pada pengaturan NA yang lebih besar. Ketika peningkatan NA dan adanya sudut kejadian miring meningkatkan *telecentricity error*, peningkatan *demagnification* akan mengurangi *range* dari sudut kejadian miring pada *mask*.

TABEL II  
*Numerical Aperture* Tinggi pada Desain Sistem Optik EUV Untuk  $NA > 0.45$   
 Untuk Memperluas EUVL pada Fitur Sub-30nm

Spesifikasi Sistem	6M		8M	
	Full Field	Half Field	Quarter Field	Quarter Field
NA	0.45	>0.45	0.5	0.6
Perbesaran	6x	5x	8x	8x
CRAO	6°-7°	7°	6°	6°-7°
Transmisi Relatif	100%	80%	100%	<40%
Ukuran <i>Mask</i>	9	6	6	6
Ratio <i>Pupil Fill</i> Minimal	9%	12%	15%	10%
Bidang <i>Scan</i>	26x33	16.5x26	13x16.5	13x16.5
Arah <i>Scan</i>				



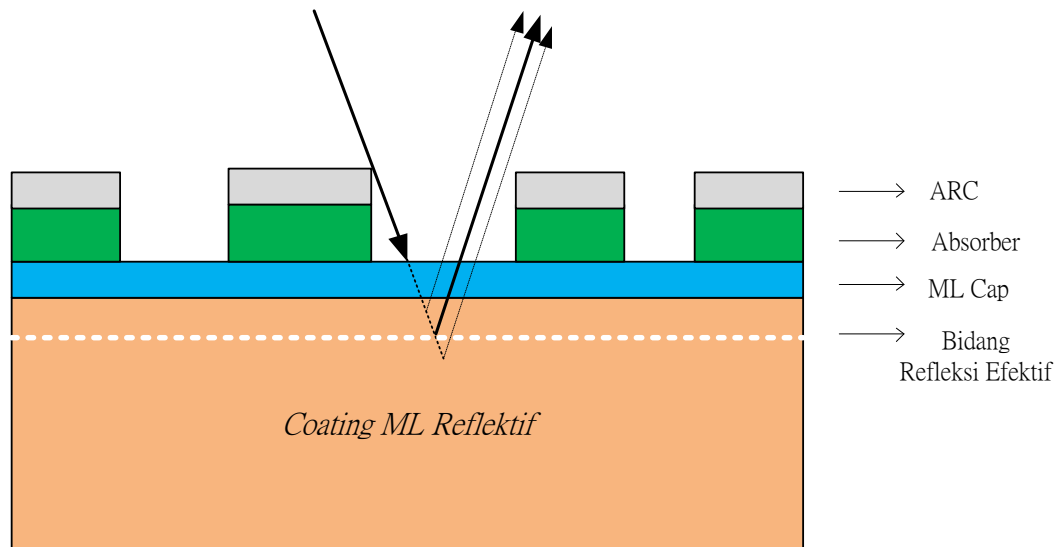
Selain ketidakseimbangan *order* ke-0, cahaya yang dicerminkan oleh *order* ke-1 yang tertutup menyebabkan *contrast loss*. Karena *feature* dimensi menjadi lebih kecil, jumlah cahaya *order* ke-1 yang tertutupi oleh sisi *absorber* meningkat. Efek serupa diobservasi pada 0.25 untuk pola dimensi yang lebih besar dikarenakan asimetris *order* difraksi kedua. Perbedaan paling signifikan diantara optik transmisi dan litografi EUV adalah *overlay budget* bergantung pada fokus kontrol. Fokus *budget* menjadi lebih ketat untuk memenuhi *telecentricity error*. Meskipun sebagian besar dari *focus error* adalah acak, *telecentricity error* bergantung pada tipe pola, iluminasi dan penempatan pola pada *reticle*. Ketika *telecentricity error* dapat dikurangi dengan *focus control* yang lebih ketat, *contrast loss* dari ketidakseimbangan *order* ke-1 muncul di semua *wafer focus* sehingga tidak dapat dikontrol. Efek *mask 3D* ini menjadi sangat penting pada *numerical aperture* yang lebih besar. Efek *mask shadowing* meningkat karena sudut kejadian miring menjadi lebih besar

Karena *absorber* dari CD menjadi lebih kecil dan sudut dari cahaya yang terrefleksi (*order* ke-0 dan *order* ke-1) menjadi lebih besar di NA yang lebih besar, *telecentricity error* dan *contrast loss* menjadi sangat penting. Desain optik untuk NA yang lebih tinggi disajikan pada tabel II yang dibutuhkan untuk merubah *magnification* yang lebih besar dan atau sudut kejadian miring [40]. Desain NA yang lebih besar dapat dibagi ke dalam desain 6 cermin dan 8 cermin. Desain 6 cermin dapat diperluas ke NA 0.5 ketika  $NA > 0.5$  membutuhkan dua tambahan cermin. Untuk desain NA yang lebih besar, diperlukan kombinasi dari *magnification* yang lebih besar atau sudut kejadian miring yang lebih besar.

### **2.3 Efek *Shadowing* dan *Compensation***

Salah satu efek *mask 3D* adalah efek *shadowing* asimetris yang muncul sebagai bias *HV print* antara *feature* horizontal (H) dan vertical (V). Meskipun ini dapat disajikan dengan menggunakan *rule-based* bias *mask HV* dalam model *mask thin*, keakuratan menjadi tidak cukup karena ukuran *feature* berkurang. Ini disebutkan pada bab sebelumnya bahwa tumpukan *mask* (*mask stacks*) yang digunakan untuk mencerminkan cahaya EUV terdiri dari empat puluh *multilayer* Mo/Si dengan lapisan *capping* dan *absorber* di atas yang ditunjukkan pada

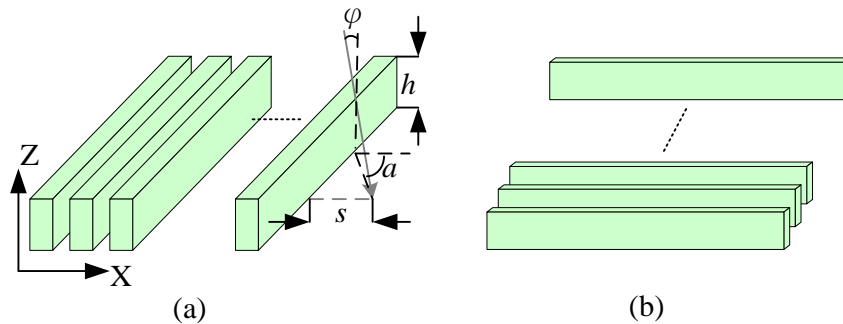
gambar 2-3. Karena sudut kejadian miring adalah  $6^\circ$ , ada sebagian *mask* yang tidak menerima cahaya karena bayangan *absorber*. Ini dapat dilihat bahwa ketebalan *absorber* yang efektif yang lebih besar dari ketebalan tumpukan *absorber*.



Gambar 2-3. Ilustrasi dari *Mask Shadowing* pada Pola Bias di EUVL.

Dalam geometris sederhana seperti pada gambar 2-4, *shadow width* ditentukan dengan ketinggian efektif dari *absorber*. Geometris *shadowing* ini dimodifikasi oleh interaksi kompleks dari medan listrik dengan tiga-dimensi dari *absorber* dan topologi *multilayer*. Dimensi yang dicetak dari *wafer* menjadi *dependent* pada orientasi pola serta jenis dan ukuran pola. Gambar 2-4 mengilustrasikan efek *shadowing* pada pola *line/space* (L/S) di posisi pusat di *scanning slit* [43],[44],[46]. Pengaturan *absorber* secara vertikal dan horizontal pada gambar 2-4 (a) dan (b) adalah tipe dari pola L/S yang berada di tumpukan *multilayer* Mo/Si. *Absorber* secara vertikal berbentuk vertikal terhadap sumbu-Y dimana *absorber* secara horizontal berbentuk horizontal atau tegak lurus terhadap sumbu-Y. Ketika sinar EUV menorehkan kejadian miring pada pola L/S pada pola L/S, *shadow* membentuk pola horizontal L/S karena adanya ketebalan *absorber* dan membuat gambar pada *near field* dari pola L/S lebih lebar dari pada pola yang

dirancang pada *reticle*. Namun, vertical L/S tidak menderita efek *shadowing* ini. Gambar pola vertikal dan horizontal di *reticle* disebarkan ke tumpukan *wafer process* melalui sistem proyeksi optik. Efek ini juga bergantung pada penempatan pola sepanjang busur iluminasi pada *scanner* dan menginduksi bias CD terarah antara pola horizontal dan vertikal. Sehingga, ini memegang peran penting dalam proses litografi EUV.



Gambar 2-4. *Layout* (a) *Absorber* Vertikal; (b) *Absorber* Horizontal pada *Mask* EUV.

Sebuah formula telah digunakan untuk menilai bias HV di suatu celah (*slit*) karena efek *shadowing* [46]. Secara geometris, *shadowing* atau lebar bias pada bagian atas *multilayer* yang dibutuhkan untuk mengecek pola pada target CD didefinisikan sebagai:

$$s = h * \tan \varphi \cos \alpha \quad (2.1)$$

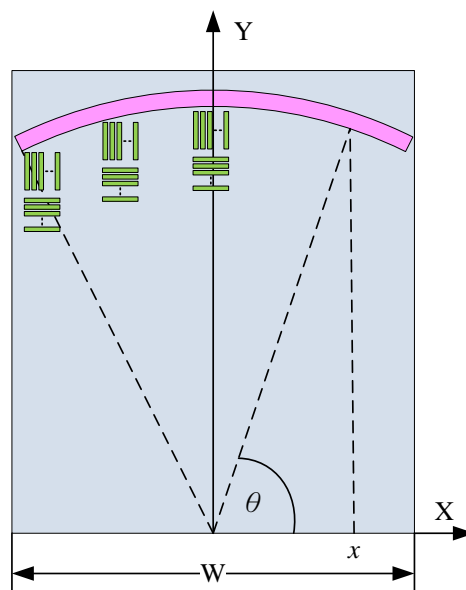
dimana  $h$  adalah ketebalan *absorber*,  $\varphi$  adalah sudut kejadian miring pada bidang objek dan  $\alpha$  adalah sudut busur yang dibentuk oleh proyeksi sinar kejadian pada bidang *mask* dan tepi normal. Ketika  $\alpha$  nol, sudut kejadian miring menjadi tegak lurus terhadap tepi pola. Lebar maksimal *shadow* menjadi

$$B_{\max} = h * \tan \varphi \quad (2.2)$$

Efek *mask shadowing* menginduksi penyusutan pola dari lebar *shadowing* dimana  $s$  menyatakan *edge placement error* (EPE). Seperti pada [48], lebar *shadowing*  $s$  dirumuskan sebagai

$$s = B_{\max} \cos \alpha \quad (2.3)$$

Pola L/S yang dicetak melalui celah busur (*arc slit scanning*) ditunjukkan pada gambar 2-5. Sudut *azimuthal*  $\theta$  dari iluminasi bervariasi terhadap posisi celah (*slit*)  $x$ . Lebar *slit*  $W$  adalah 26mm dan posisi slit  $x=0$  didefinisikan sebagai pusat dan sudut *azimuthal*  $\theta=0^\circ$ . CD dari pola yang dicetak menunjukkan ketergantungan terhadap masing-masing posisi [43],[45]. Penelitian merancang proses optimasi dengan memperhatikan pola yang terletak pada posisi slit  $x=0$ . Selain posisi *slit*  $x=0$ , posisi koordinat- $x$  pada  $x=6\text{mm}$  dan  $x=13\text{mm}$  juga akan diperiksa. Pengujian pola L/S pada simulator PROLITH dengan arah horizontal dan vertikal akan diatur pada posisi celah  $\theta=66^\circ$ ,  $\theta=78^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=102^\circ$ , dan  $\theta=114^\circ$  untuk menganalisis bias antara dua pola. Pada gambar 2-5, ini menggambarkan hubungan antara posisi *slit* dan orientasi pola. Pola vertikal pada pusat *slit* akan memiliki  $0^\circ$  antara pola dan sudut kejadian. Pola horizontal pada pusat akan memiliki  $90^\circ$  antara pola dan sudut kejadian.

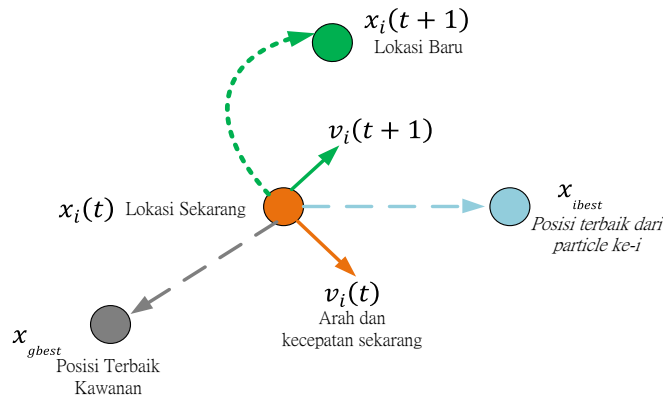


Gambar 2-5. Busur *Slit* pada Bidang *Exposure*.

## 2.4 Algoritma *Particle Swarm Optimization*

Algoritma *particle swarm optimization* adalah algoritma evolusioner yang pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Kennedy dan Dr. Eberhart pada tahun 1995.

Ini adalah salah satu algoritma optimasi kecerdasan yang dikembangkan dalam beberapa tahun terakhir dan didasarkan atas perilaku sebuah koloni atau kumpulan serangga seperti semut, rayap, lebah, tawon, sekawanan burung dan sekelompok ikan [30]. Algoritma optimasi ini meniru perilaku sosial dari kumpulan di atas. Algoritma ini memiliki populasi awal dari solusi selektif *random*. Setiap solusi potensial disebut sebagai *particle*. *Particle* menunjukkan, misalnya, sebuah lebah dalam suatu koloni dan burung dalam suatu kawanan. Ini bergerak secara terdistribusi. Sebagai contoh, ketika satu *particle* menemukan *path* makanan yang baik, kawanan lainnya akan mengikuti *path* secara langsung meskipun lokasinya sangat jauh dari kawanan.



Gambar 2-6. Skema Update Kecepatan dan Posisi.

Secara umum sistem PSO, *particle* bergerak dalam ruang pencarian dengan kecepatan yang secara dinamis berdasarkan pengalaman dari suatu *particle* dan kawanan. Pada gambar 2-6, setiap *particle* mengupdate dirinya dengan melacak posisi terbaik (*best position*) individu dan *best position* global sesuai dengan kecepatan sebelumnya. Secara matematis, setiap *particle* memodifikasi posisi dan kecepataannya sesuai dengan formulasi:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 r_1 (P_{best} - x_i(t)) + c_2 r_2 (G_{best} - x_i(t)) \quad (2.4)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2.5)$$

Pada ruang pencarian multi-dimensi, adalah  $v_i(t+1)$  vektor kecepatan dari *particle* ke- $i$  pada saat  $t+1$ . Posisi *particle* ke- $i$  pada saat  $t+1$  dinyatakan sebagai  $x_i(t+1)$ .  $P_{best}$  dan  $G_{best}$  adalah posisi terbaik (*best position*) dari *particle* ke- $i$  dan posisi terbaik di kawanan.  $c_1$  dan  $c_2$  didefinisikan sebagai *learning factor*, mewakili daya tarik *particle* terhadap keberhasilan dirinya sendiri dan tetangganya. Sebagai alternatif, kedua konstanta  $r_1$  dan  $r_2$  adalah fungsi *random* seragam (*uniform random function*) dalam rentang  $[0,1]$

*Particle swarm optimization* telah diaplikasikan secara luas dalam masalah kehidupan nyata. Beberapa masalah berkaitan dengan satu objektif yang dikenal sebagai optimasi objektif-tunggal (*single-objective optimization* or SOO) dan masalah lainnya berkaitan dengan dua atau lebih objektif yang saling bertentangan yang dikenal sebagai optimasi multi-objektif (*multi-objective optimization* or MOO). SOO dan MOO memiliki representasi dan pemecahan solusi masalah yang berbed. SOO menyatakan masalah minimasi dan maksimasi untuk mendapatkan solusi tunggal. Di sisi lain, MOO menyatakan masalah minimasi dan maksimasi yang mengevaluasi atau mengoptimalkan lebih dari satu fungsi objektif. Oleh karena itu, MOO tidak menghasilkan solusi unik atau tunggal.

Dalam praktiknya masalah MOO menggunakan konsep dominasi (*dominance*) karena masalah MOO menghasilkan solusi alternatif di antara fungsi objektif yang saling bertentangan yang disebut sebagai solusi *non-dominated*. [28],[47]. Ini dikatakan bahwa jika solusi  $x_i$  lebih baik daripada solusi  $x_j$ , maka solusi  $x_i$  mendominasi solusi  $x_j$ . Solusi  $x_i$  mendominasi solusi  $x_j$  jika kondisi berikut benar :

1.  $x_i$  lebih baik daripada  $x_j$  untuk semua objektif.
2.  $x_i$  benar-benar lebih baik (*strictly better*)  $x_j$  untuk paling sedikit satu objektif.

Konsep dominasi lainnya juga dikenal dengan sebutan *optimal Pareto*. Konsep ini ditemukan oleh seorang sosiolog dan ekonom Italia bernama Vilfredo Federico Damaso Pareto. Pareto sendiri mempelajari matematika di Polytechnic Institute of Turin, Italia. Dia menuliskan konsep optimalitas sebagai alokasi optimal dari sebuah *resources* diperoleh ketika tidak mungkin membuat orang lain lain lebih buruk tanpa membuat yang lainnya lebih buruk pula. Secara matematika, dapat

dituliskan sebagai  $x^*$  adalah Pareto optimal jika dan hanya jika tidak terdapat solusi  $x$  yang mungkin sedemikianhingga  $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ ,  $\forall x_i \in \{1, 2, \dots, n\}$  dengan paling sedikit  $f_i(x) < f_i(x^*)$ . Konsep inilah yang dikenal sebagai Pareto Optimal dan solusi yang ditemukan melalui konsep ini disebut (*strong*) Pareto optimum. Solusi optimal yang diperoleh bukan berupa satu titik melainkan kumpulan beberapa titik yang memenuhi konsep Pareto optimal. Kumpulan titik tersebut dinamakan Pareto Set atau Pareto front, karena semua titik tersebut mendominasi titik-titik yang lain. Konsep ini sering digunakan untuk menyelesaikan masalah MOO.

**(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)**



## **BAB 3**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bagian ini diuraikan metodologi penelitian yang meliputi tahapan penelitian untuk mencapai tujuan penelitian.

#### **3.1 Tahapan Penelitian**

Tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap ini dikumpulkan informasi mengenai perkembangan industri semikonduktor, litografi, serta algoritma *particle swarm optimization* (PSO). Informasi tersebut diperoleh dari buku-buku, jurnal ilmiah, penelitian terdahulu, dan artikel-artikel terkait mengenai penelitian.

2. Mempelajari Desain Optik dan Sistem pada Litografi Ekstrim Ultraviolet (EUV)

Pada tahap ini dipelajari bagaimana desain optik dan sistem pada litografi EUV. Desain optik meliputi desain iluminasi dan proyeksi yang digunakan pada sistem litografi EUV. Setelah itu, dipelajari efek-efek optik yang terdapat pada sistem.

3. Menerapkan Algoritma PSO pada Sistem Optimasi

Setelah mempelajari desain optik dan sistem pada litografi EUV, kemudian mempelajari algoritma PSO yang digunakan pada sistem optimasi. Algoritma PSO yang digunakan adalah multi-objektif PSO (MOPSO).

4. Melakukan Simulasi serta Menyajikan Pola 1D *Line/Space* dan Pola 2D Sebagai Hasil Uji Coba pada Sistem

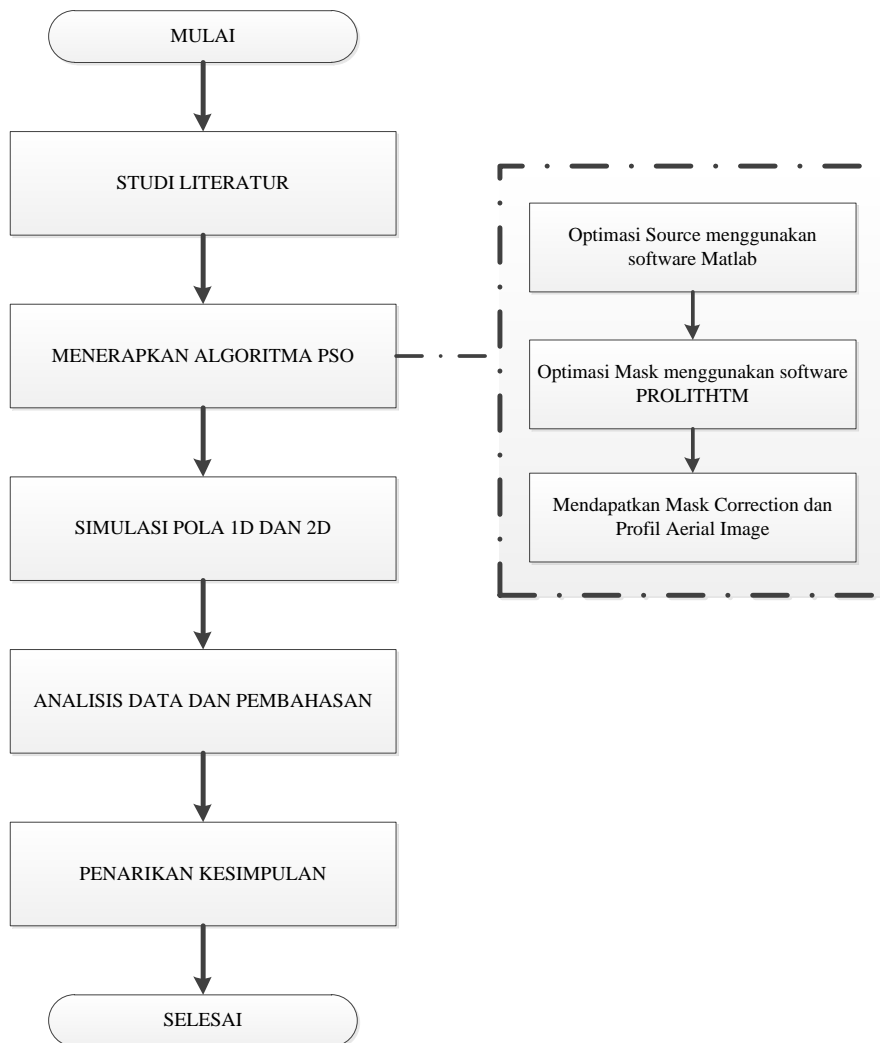
Untuk mempermudah pemahaman tentang bagaimana penerapan algoritma PSO pada sistem litografi EUV, maka dilakukan simulasi serta contoh

sebagai hasil uji coba. Simulasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB serta PROLITH™ X5.2. Pola 1D *line/space* dan pola 2D digunakan sebagai contoh untuk mendapatkan hasil uji coba pada sistem.

5. Menganalisis Hasil Simulasi serta Mengambil Kesimpulan

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil simulasi. Hasil simulasi berupa hasil *source freeform* serta peningkatan performansi pada sistem litografi EUV baik pola 1D maupun pola 2D. Langkah berikutnya adalah menarik kesimpulan dari penelitian menjelaskan kontribusi penelitian serta menjelaskan hal-hal yang dapat dilakukan sebagai bahan penelitian di masa mendatang.

3.2 Blok Diagram Penelitian



## **BAB 4**

### **PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini, diterapkan algoritma multi-objektif *particle swarm optimization* (MOPSO) dalam litografi ekstrim ultraviolet (EUV) untuk informasi dasar (*baseline*) pada pola 1D L/S. Pola dengan hp-35nm digunakan sebagai pola 1D. Algoritma MOPSO dikombinasikan dengan optimasi *source* dan *mask* untuk mengoptimalkan litografi EUV dengan mengandalkan *edge placement error* (EPE) dan *error bias* sebagai fungsi objektif. Proses optimasi menghasilkan *source freeform* dan juga menghasilkan *process windows* (PW). Hasil dapat berkontribusi bagi industri semikonduktor.

Pada bab ini diterapkan proses optimasi untuk pola 2D, dilakukan optimasi *source* dan *mask* serta dijelaskan mengenai prosedur optimasi. Prosedurnya adalah melakukan *source mask optimization* secara bersamaan. Selain itu, optimasi dievaluasi oleh *edge placement error* and *error bias*. Pola *complicated* dengan beberapa *metrology sites* dipilih sebagai pola 2D untuk menilai apakah optimasi berhasil dilakukan. Hasil dari kondisi PW, *contrast*, CD pada beberapa *metrology sites*, *mask errors enhancement factors* (MEEFs) dan *slit position dependency* di tunjukkan pada akhir bab.

#### **4.1 Multi-Objektif Particle Swarm Optimization untuk Litografi Ekstrim Ultraviolet (EUV)**

Dalam sistem PSO diskrit, algoritma dioperasikan dalam ruang masalah biner. Populasi *particle* secara *random* diinisialisasi di ruang pencarian untuk menemukan solusi optimal dengan memperbarui generasi individu. Konsep dari kecepatan sebagai probabilitas digunakan sehingga posisi antara nol atau satu. Setiap *particle* memiliki kecepatan, posisi serta fungsi objektif yang dievaluasi dengan menggunakan posisi koordinat dari *particle* sebagai nilai input. Kecepatan diperbarui dengan (4.1) sedangkan cara yang berbeda diberikan pada (4.2) untuk memperbarui posisi. Persamaan berikut merumuskan kecepatan dan mengupdate posisi *particle* [30]:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + c_1 r_1 (x_{ibest} - x_i(t)) + c_2 r_2 (x_{gbest} - x_i(t)) \quad (4.1)$$

$$x_i(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{random} > S(v_i(t+1)) \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (4.2)$$

dimana

$$S(v_i(t+1)) = \frac{1}{1 + \exp(-v_i(t+1))} \quad (4.3)$$

$S(\bullet)$  adalah fungsi sigmoid untuk mengubah kecepatan menjadi probabilitas seperti pada (4.3).  $v_i(t+1)$  adalah kecepatan *particle*  $i$  pada waktu  $t+1$ ;  $v_i(t)$  adalah kecepatan *particle*  $i$  pada waktu  $t$ .  $c_1$  dan  $c_2$  adalah *learning factor* sedangkan  $r_1$  dan  $r_2$  secara acak menghasilkan jumlah *particle*.  $x_{ibest}$  adalah lokasi optimal dari *particle*, dan  $x_{gbest}$  adalah lokasi optimal kawanannya. Persamaan (4.2) digunakan untuk mengupdate lokasi dari ruang solusi dimana *particle* bergerak.  $x_i(t+1)$  adalah lokasi dari ruang solusi  $i$  pada saat  $t+1$ . Algoritma diakhiri ketika jumlah iterasi yang ditetapkan oleh *user* tercapai atau bila nilai adaptif telah memenuhi syarat.

Pada penelitian ini, optimasi berbasis *aerial image* digunakan untuk meningkatkan *process window* (PW) dari litografi serta kualitas *aerial image*. Fungsi objektif yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$F_1 = \sum_j w_j \|EPE(x_j, \Delta dose, \Delta focus)\|^p \quad (4.4)$$

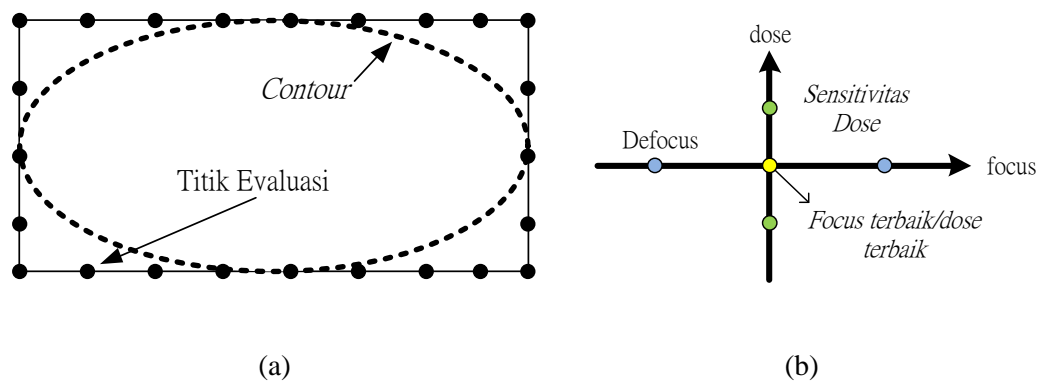
$$F_2 = B_{\max} \cos \alpha \quad (4.5)$$

Oleh karena itu, masalah multi-objektif direpresentasikan sebagai berikut:

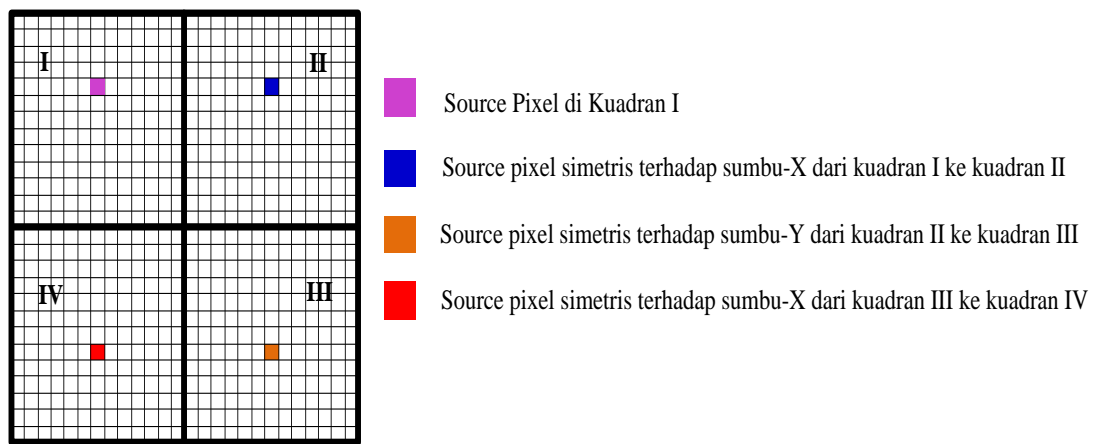
$$\text{Min}\{F_1, F_2\}$$

dimana  $F_1$  dan  $F_2$  adalah fungsi objektif dan  $w_j$  adalah faktor bobot (*weight*) dalam optimasi multi-objektif. *Edge placement error* (EPE) didefinisikan sebagai *error* antara bentuk *polygon* yang diinginkan dan bentuk *contour* dari *aerial image* yang ditunjukkan pada gambar 4-1 (a) [48]. Fungsi objektif  $F_1$  adalah jumlah nilai EPE di semua titik evaluasi (*eval.pts*) dengan kondisi PW yang berbeda. Fungsi objektif  $F_2$  adalah *error bias*. Titik evaluasi diterapkan untuk menghitung PW termasuk  $\Delta dose$  dan  $\Delta focus$  (dilambangkan dengan titik hijau dan

titik biru pada gambar 4-1 (b) dimana sesuai dengan *exposure latitude* (EL) dan *depth of focus* yang dioptimalkan.  $\Delta dose$  adalah komponen yang berkaitan dengan *contrast* yang dihasilkan pada *exposure* sedangkan  $\Delta focus$  berkaitan dengan *focus* yang dihasilkan pada saat optimasi. Titik kuning  $EPE_{nominal}$  mewakili yang diperlukan untuk mengendalikan kualitas *aerial image* saat nilai nominal dari *focus* dan *dose*.



Gambar 4-1. (a) Perhitungan EPE Berdasarkan Titik Evaluasi Diskrit; (b) Perhitungan pada Berbagai Kondisi Proses



Gambar 4-2. Diagram Operasi Simetri dari *Source* Berbasis *Pixel* pada Bidang Pupil Iluminasi.

Kondisi optimal dianggap sebagai bentuk *source* optimal yang dibentuk dari kombinasi pixel yang dikembangkan dengan menggunakan algoritma PSO [35],[49]. *Source freeform* terdiri dari kombinasi yang dipilih diantara  $51 \times 51$  *pixel* pada bidang *source*. Bidang dibagi menjadi empat kuadran seperti pada gambar 4-

2. Setiap kuadran memiliki 26 pixel pada sumbu- $x$  dan sumbu- $y$ ; sehingga jumlah *pixel* pada masing-masing kuadran adalah 676 *pixel*. Setiap *pixel* dianggap sebagai titik *source* dari iluminasi. PSO digunakan untuk memilih kombinasi dari 676 *pixel* pertama pada kuadran I. Operasi simetri selanjutnya diterapkan pada kuadran II, III dan IV. Kuadran II bersimetri dengan kuadran I pada sumbu- $y$  sedangkan kuadran III bersimetri dengan kuadran II pada sumbu- $x$ . Kuadran IV bersimetri dengan kuadran III pada sumbu- $y$ . *Pixel source* dipilih berdasarkan efek dari EPE dan bias.

#### 4.2 Prosedur Optimasi dari Ko-Optimasi *Source* dan *Mask*

Algoritma *source mask optimization* secara simultan yang berbasis *pixel* diusulkan untuk pola mask 1D dan 2D [10],[30]. Dalam algoritma optimasi, pola *mask* diinisialisasi sebagai pola yang diinginkan dan pola *source* diinisialisasi sebagai bentuk *source* konvensional (iluminasi *dipole* atau *quasar*). Dalam optimasi *source* dan *mask*, optimasi *mask* berdasarkan model pendekatan koreksi optik (*Optical Proximity Correction* or OPC) yang dilakukan oleh *software* PROLITH™. Pola awal yang diinginkan berdasarkan *source* konvensional awal. Setelah *mask* yang optimal diperoleh, *mask* akan diperbaiki dan optimasi *source* dilakukan dengan menggunakan optimasi multi-objektif PSO (MOPSO). Proses ini diulang sampai hasil optimasi memenuhi kriteria.

Urutan dari optimasi *source* berbasis *pixel* ditunjukkan pada tabel III. Pada awalnya, jumlah partikel diinisialisasi. Kemudian, kecepatan dinyatakan sebagai urutan dari *source pixel* untuk *particle i* pada waktu  $t$ . *Position* didefinisikan sebagai bentuk *source* optimal berdasarkan lokasi *pixel*. Lokasi *pixel* yang ditempat oleh bentuk *source* optimal terbaik untuk individu *particle i* adalah  $x_{ibest}$ . Selanjutnya,  $x_{gbest}$  yang merupakan lokasi *pixel* yang ditempati oleh bentuk *source* optimal untuk *swarm* dipilih dari  $x_{ibest}$  optimal dari masing-masing *particle*. *External archive* (EA) diinisialisasi untuk menyimpan jumlah solusi *non-dominated*. EA bernilai kosong pada awalnya.

Menurut informasi dari  $v_i(t)$ ,  $x_i(t)$ ,  $x_{ibest}$ , dan  $x_{gbest}$ , kecepatan  $v_i(t+1)$  dapat dihitung. Bentuk *source*  $x_i(t+1)$  dari *particle i* pada waktu  $t+1$  diperbarui setelah kecepatan dihitung. Kemudian, bentuk *source* dihitung. Kemudian, *leader* pada

*external archive* diupdate. *Leader* dipilih dari solusi *non-dominated*. Seluruh prosedur untuk mengupdate  $x_i(t)$  dilakukan selama proses optimasi dan setiap saat melibatkan penggunaan jumlah *particle* untuk menghasilkan *pixel*. Jumlah *particle* yang digunakan pada proses optimasi sebanyak 5 *particle* dan jumlah maksimal iterasi yang digunakan adalah 500 iterasi. Proses optimasi dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah iterasi, *error* bias yang dihasilkan serta kriteria *PW threshold* pada proses litografi. Prosedur mencatat jumlah *non-dominated* dari koreksi *source* yang optimal untuk setiap perhitungan. Pada akhirnya, *source* optimal dari *edge placement error* terendah dan bias dari solusi *non-dominated* dilaporkan sebagai output dari bentuk *source*.

TABEL III  
Prosedur Berbasis MOPSO untuk Mendapatkan Bentuk Iluminasi  
(*Source*)

---



---

1:	Inisialisasi <i>particle</i>
2:	Mengacak posisi dan kecepatan <i>particle</i>
3:	For i=1 to n_particles
4:	Menentukan bentuk <i>source</i> awal
5:	$x_{ibest}$ adalah bentuk <i>source</i> dengan biaya minimum
6:	$x_{gbest}$ adalah minimum dari $x_{ibest}$
7:	<i>Objective functions</i> ← meminimumkan EPE dan bias
8:	$F_1$ ← mengevaluasi EPE
9:	$F_2$ ← mengevaluasi bias
10:	end
11:	Membuat sebuah External Archive (EA) kosong
12:	Menyalin ( <i>copy</i> ) solusi <i>non-dominated</i> ke dalam EA
13:	WHILE iter=1 to max_iter
14:	For i=1 to n_particles
15:	Pilih <i>particle leader</i> dari EA
16:	Mengupdate kecepatan <i>particle</i>
17:	Mengupdate bentuk <i>source particle</i> (posisi)
18:	Mengupdate fungsi objektif
19:	end
20:	Mengupdate solusi <i>non-dominated solutions</i> ke dalam EA
21:	End WHILE

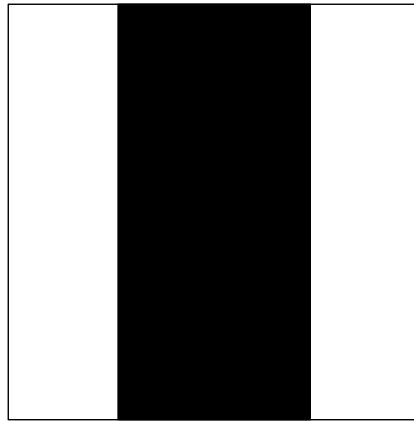
---



---

### 4.3 Hasil Uji Coba Informasi Dasar (*Baseline*) pada Pola 1D L/S

*Mask* dengan setengah *pitch* (*hp*) pada pola 1D L/S 35-nm digunakan dalam demonstrasi pertama, seperti ditunjukkan pada gambar 4-3. Algoritma MOPSO dikembangkan dengan menggunakan PROLITH™ X5.2 melalui API *interface* untuk proses optimasi. Kriteria PW adalah sebagai berikut: variasi



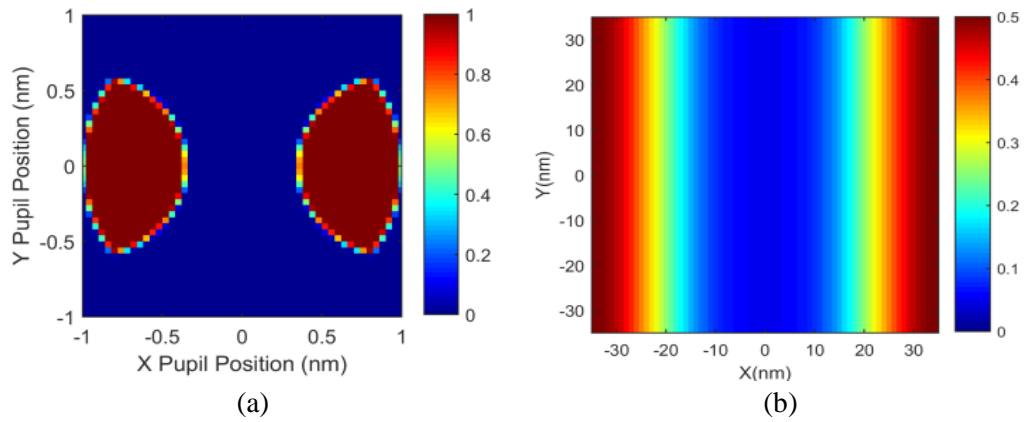
Gambar 4-3. Sebuah *Unit Cell* dari Pola *Mask* hp 35-nm L/S, dengan *Transmittance* 0.06 dan *Phase* Diatur pada  $180^\circ$ .

CD kurang dari  $\pm 10\%$ , *sidewall angle*  $> 80^\circ$ , dan *resist loss*  $< 10\%$ . Rasio reduksi optik dan NA optik adalah 4 dan 0.33. Polarisasi *azimuthal* juga digunakan dengan derajat polarisasi 1.0. untuk membedakan *aerial image* dan menghasilkan *aerial image contour*, ambang batas (*threshold*) dari *aerial image* ( $AI_{th} = 0.19$ ) digunakan. Dalam penelitian ini, *source dipole* (*center sigma/radius sigma* = 0.95/0.60) digunakan sebagai referensi *source* pada gambar 3-5. Proses optimasi dilakukan pada platform PC di Intel Core i7 (3.6 GHz) dengan memori 4GB.

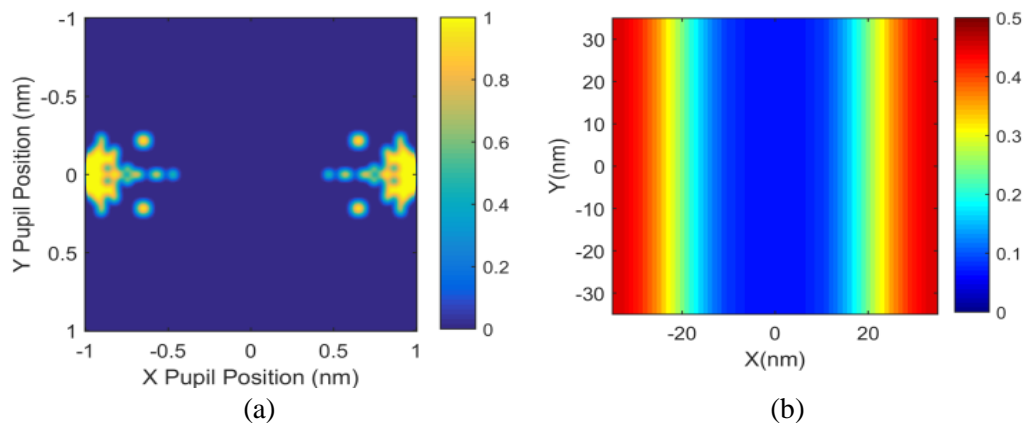
MOPSO menghasilkan solusi *non-dominated* dari *source* berbentuk bebas (*freeform*). Dari solusi tersebut, satu solusi diilustrasikan pada gambar 4-5. Hasil metrologi dari *source freeform* dan *dipole* untuk *exposure* pola L/S dengan hp-35nm dituliskan dalam tabel IV. Ketika *source dipole* dan *freeform* digunakan. *contrast* dari *aerial image* adalah 0.81 dan 0.77. Ketika menggunakan *source dipole*, profil *aerial image contour* lebih tajam daripada saat menggunakan *source freeform*. Metrologi menunjukkan pada *error CD*



adalah 1.3% dan 0.5 untuk *source dipole* dan *freeform* MOPSO. *Error CD*



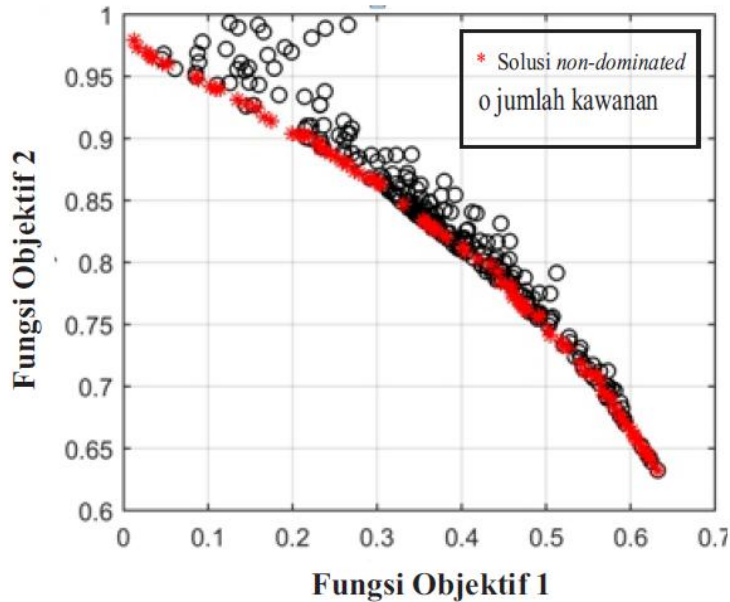
Gambar 4-4. (a) *Source Dipole*; (b) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source Dipole* untuk *Exposure* Pola L/S dengan hp 35-nm.



Gambar 4-5. (a) *Source Freeform*; (b) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source Freeform* untuk *Exposure* Pola L/S dengan hp 35-nm..

masih berada dalam kisaran 10% yang dapat diterima. Selain itu, *source coherent* juga digunakan sebagai *source* uji coba pada penelitian ini. Hasil yang diperoleh disajikan pada tabel IV. Solusi Pareto dari algoritma MOPSO untuk solusi optimal digambarkan pada gambar 3-7. Lingkaran hitam menunjukkan jumlah kawan dalam algoritma, sedangkan titik merah mewakili solusi *non-dominated*. Proses optimasi juga menghasilkan *optimal Pareto front* untuk menunjukkan solusi *non-dominated*. Hasil Pareto diperoleh

dengan 500 iterasi.



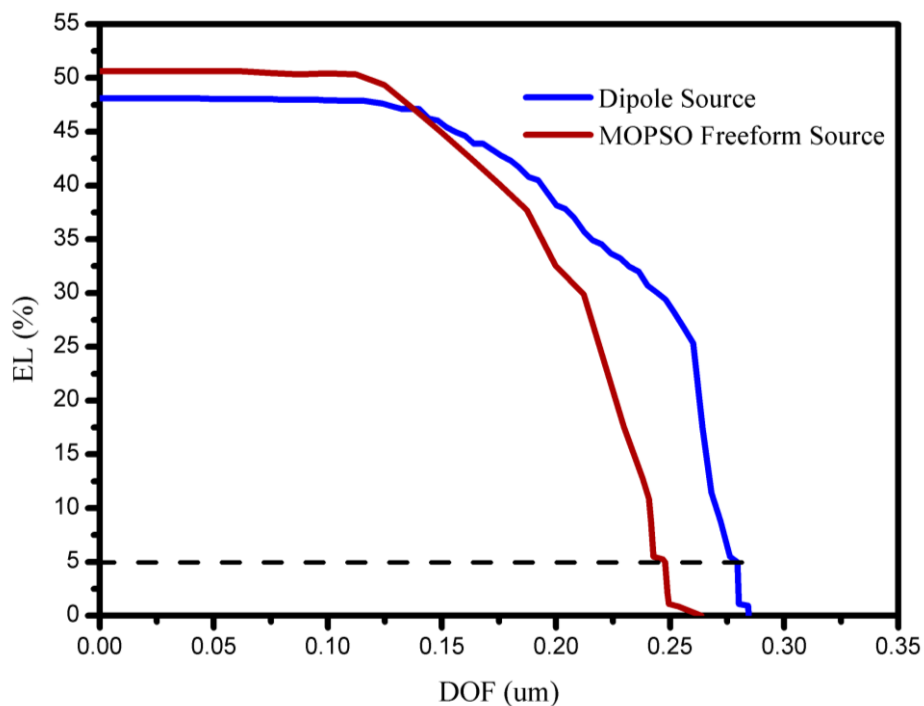
Gambar 4-6. Solusi Pareto dari *Source freeform* Berdasarkan Algoritma MOPSO.

TABEL IV  
Hasil Metrologi dari *Exposure* Pola 1D L/S dengan Hp 35-nm

Hasil Metrologi	<i>Source Coherent</i>	<i>Source Dipole</i>	<i>Source Freeform</i>
Hasil CD (nm)	36.1	34.5	34.8
<i>Error CD (%)</i>	4.3	1.3	0.5
<i>Contrast</i>	0.70	0.81	0.77
NILS	2.11	2.71	2.46

PW pada pola 1D L/S dibenarkan dalam penelitian ini seperti pada gambar 4-7. Kurva biru dan merah mewakili *exposure latitude vs depth of focus* (EL vs DOF) dari *source dipole* dan MOPSO *freeform*. Garis putus-putus menunjukkan EL sebesar 5%. DOF pada EL 5% masing-masing 0.28 dan 0.25  $\mu\text{m}$  untuk *source dipole* dan MOPSO *freeform*. Selanjutnya, ini diperoleh EL maksimal sebesar 48.09% dan 50.63% bila *source dipole* dan MOPSO *freeform* digunakan. DOF

tidak mengalami peningkatan signifikan hanya sebesar 5.26% dan EL maksimal meningkat sebesar 11.34% saat *source freeform* digunakan. Hasil ini menunjukkan bahwa PW dari pola 1D L/S berada dalam *trade-off* antara DOF yang lebih rendah dan EL yang lebih tinggi saat *source MOPSO freeform* digunakan.

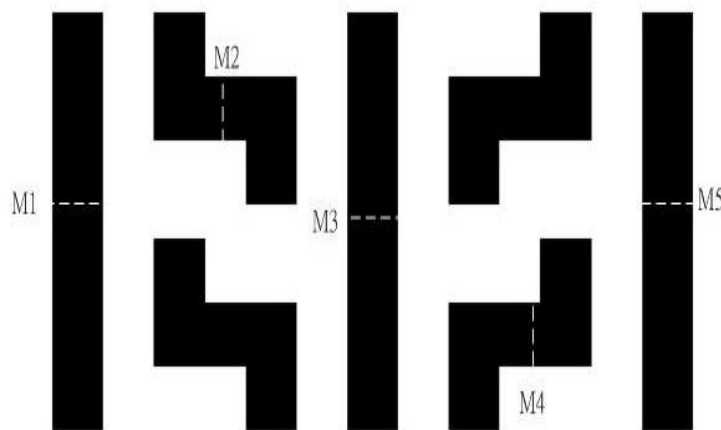


Gambar 4-7. PW dari Pola 1D L/S antara *Source Dipole* dan *MOPSO Freeform*

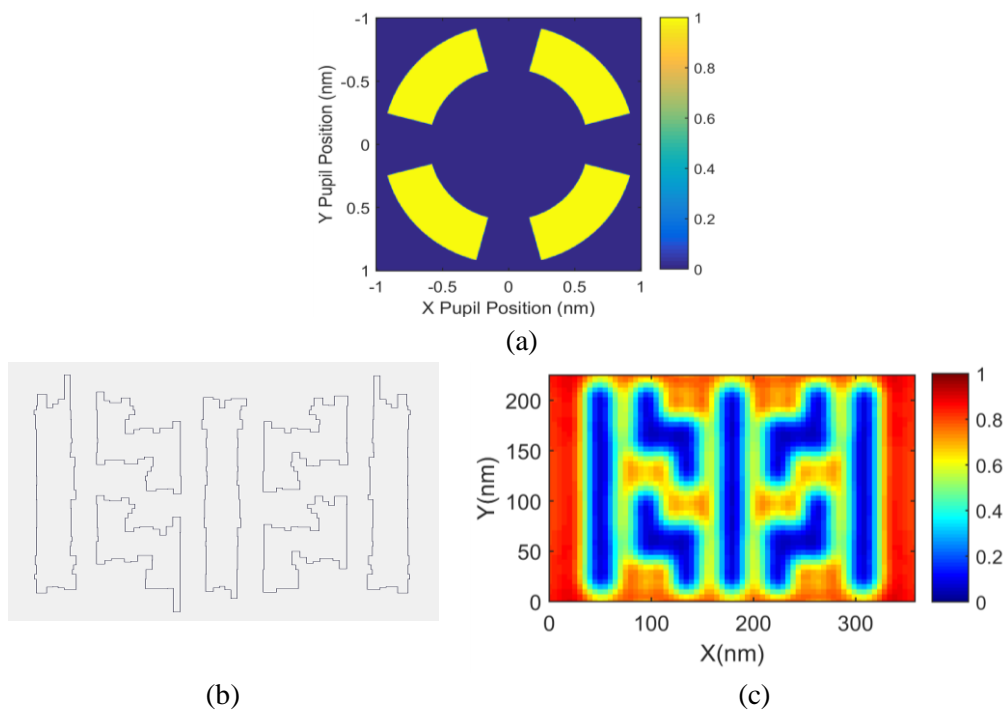
#### 4.4 Peningkatan *Contrast, Depth of Focus, Mask Error Enhancement Factors* untuk Analisis Hasil Pola 2D

Pola *mask* 2D digunakan untuk mengevaluasi performa dari algoritma MOPSO berdasarkan dari SMO [30],[46]. Sebuah *unit cell* dari pola 2D dan beberapa *metrology sites* ditunjukkan pada gambar 4-8. Minimal *feature width* dari pola 2D adalah 22 nm, nilai *pitch* adalah 105 nm. Beberapa *metrology sites* ditempatkan pada pola tersebut. Sebuah *immersion* EUV dengan NA 0.33 digunakan untuk menyinari (*expose*) pola 2D. *Transmittance* dan *phase* diatur

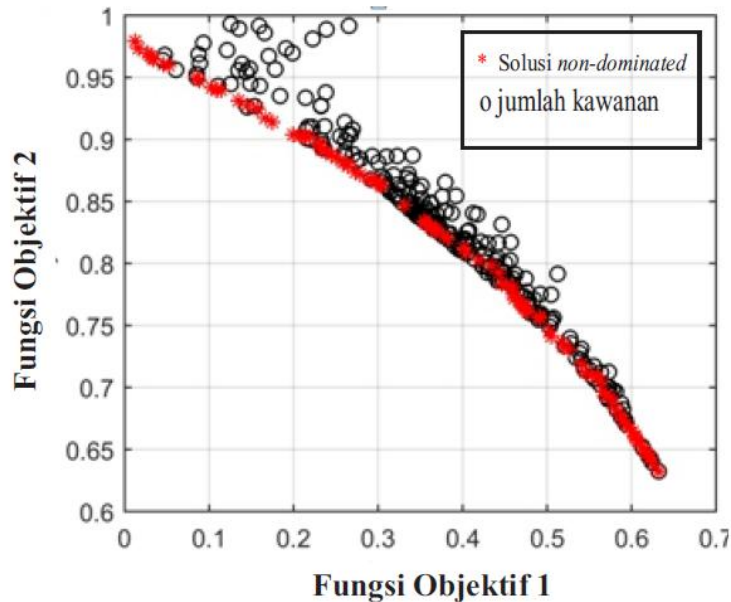
pada 0.06 dan  $180^\circ$  sebagai kondisi *exposure*. Gambar 4-9 (a) menunjukkan bentuk *source* konvensional *quasar* yang digunakan sebagai *reference*. *Outer sigma*, *inner sigma* dan *blade angle* adalah 0.95, 0.60,  $60^\circ$ . Polarisasi *azimuthal* juga digunakan dengan derajat polarisasi 1.0.



Gambar 4-8. Sebuah *Unit Cell* dari *Pola Mask 2D* dengan beberapa *metrology sites*. *Transmittance* 0.06 dan *Phase* Diatur pada  $180^\circ$ ..

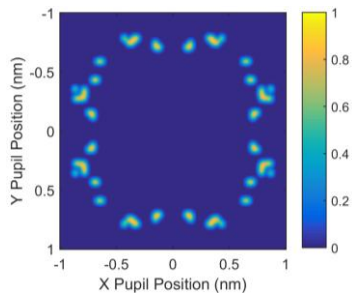


Gambar 4-9. (a) *Source Quasar*; (b) *Pola Mask 2D* Setelah Koreksi OPC; (c) *Intensitas Aerial Image* Menggunakan *Source Quasar*.

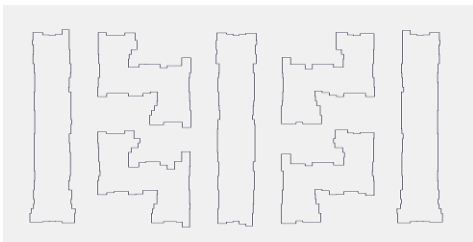


Gambar 4-10. Solusi Pareto dari *Source freeform* Berdasarkan Algoritma MOPSO.

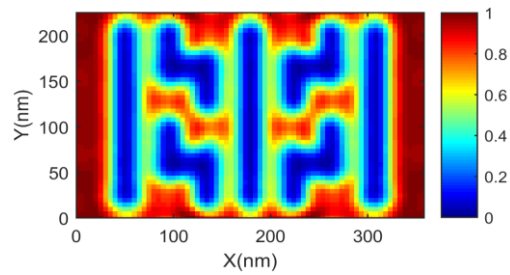
Gambar 4-10 menggambarkan plot Pareto dari MOPSO *freeform* untuk mendapatkan solusi optimal dari pola *mask 2D*. Proses optimasi menghasilkan *optimal Pareto front* untuk menunjukkan solusi *non-dominated*. Solusi *non-dominated* ditunjukkan dengan titik merah sedangkan lingkaran hitam mewakili jumlah dari *swarm* pada algoritma. Kami mendapatkan solusi Pareto dengan 500 iterasi. Selanjutnya, kami menunjukkan hasil dari intensitas *aerial image* dari *source MOPSO freeform*. *Source MOPSO freeform* menghasilkan beberapa solusi *non-dominated*. Empat solusi dari solusi *non-dominated* ditunjukkan pada gambar 4-11 – 4-14. Profil *contour* dari pola yang diinginkan dan *aerial image* menunjukkan kemiripan dari *source freeform* dan *quasar*. *Source freeform* menggambarkan *contrast* dari *aerial image* yang lebih tajam dan *error CD* yang lebih baik pada beberapa *metrology sites*. Ketika *source MOPSO freeform* digunakan, profil *contour* lebih baik digunakan dibandingkan *source quasar*.



(a)

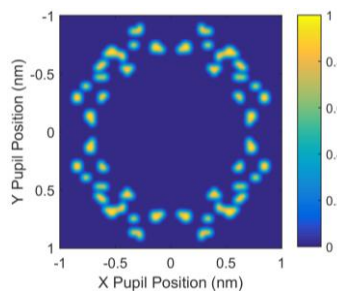


(b)

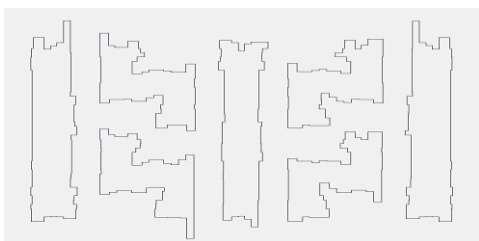


(c)

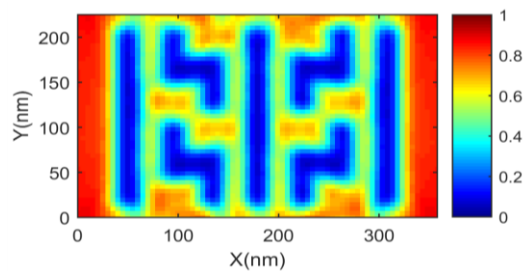
Gambar 4-11. (a) *Source MOPSO Freeform 1*; (b) Pola *Mask 2D* Setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source MOPSO Freeform 1*.



(a)

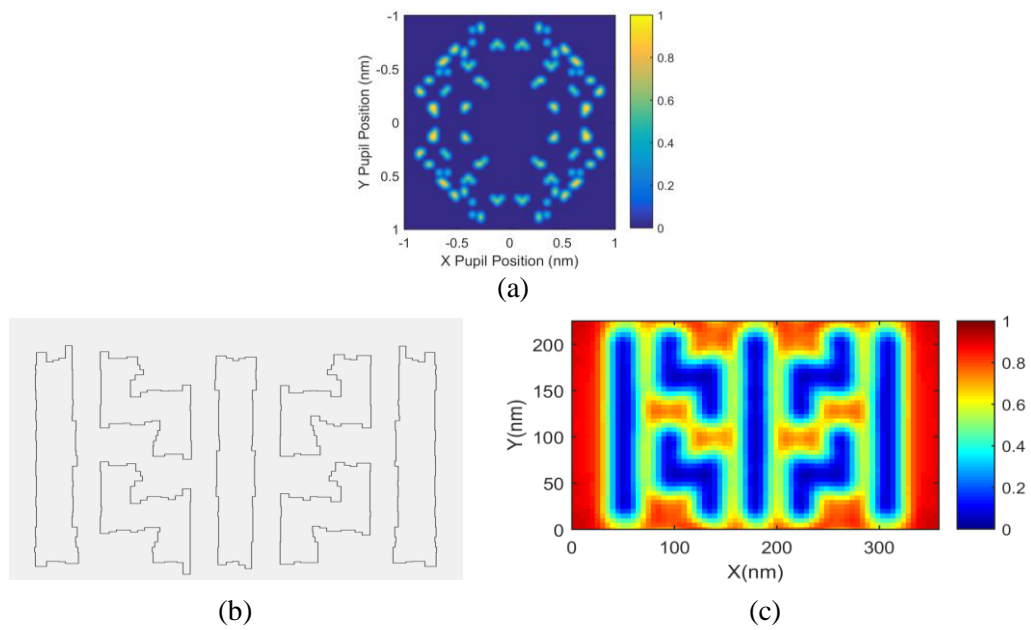


(b)

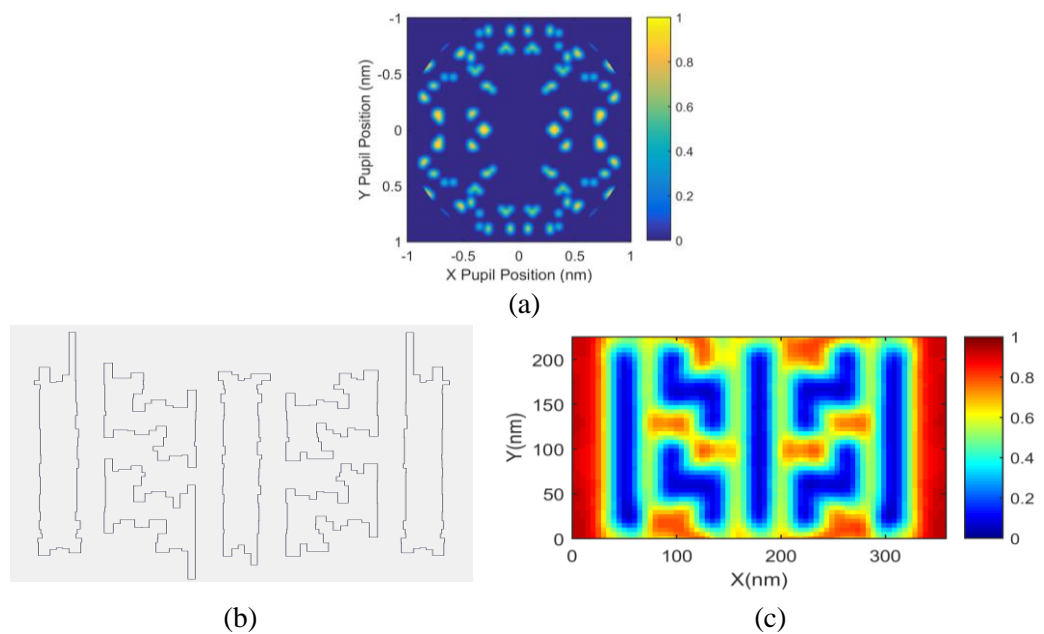


(c)

Gambar 4-12. (a) *Source MOPSO Freeform 2*; (b) Pola *mask 2D* Setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source MOPSO Freeform 2*.



Gambar 4-13. (a) *Source MOPSO Freeform 3*; (b) Pola *Mask 2D* Setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source MOPSO Freeform 3*.



Gambar 4-14. (a) *Source MOPSO Freeform 4*; (b) Pola *Mask 2D* Setelah Koreksi OPC; (c) Intensitas *Aerial Image* Menggunakan *Source MOPSO Freeform 4*.

*Error CD* dan penilaian *contrast* di beberapa *metrology sites* untuk *source* quasar dan MOPSO *freeform* ditunjukkan pada tabel V. Selain itu, *source incoherent* juga digunakan sebagai *source* uji coba pada penelitian ini. Hasil yang diperoleh disajikan pada tabel V. Secara umum, *error CD* dari *source* MOPSO *freeform* lebih baik dibandingkan *source quasar*. *Error CD* dari *source* MOPSO *freeform* 4 menunjukkan hasil yang terbaik secara rata-rata. Di sisi lain, *error CD* di *metrology sites* M2 dan M4 menunjukkan hasil yang lebih kecil dibandingkan *metrology sites* lain untuk *source quasar* dan *freeform*. Selanjutnya, *contrast* juga ditunjukkan di beberapa *metrology sites* M1, M2, M3, M4 dan M5. Iluminasi *source* M5 menunjukkan hasil yang lebih tajam untuk *contrast* dari *aerial image* pada pola 2D. Secara umum, *source freeform* menghasilkan *contrast* yang lebih baik dibandingkan *source quasar*.

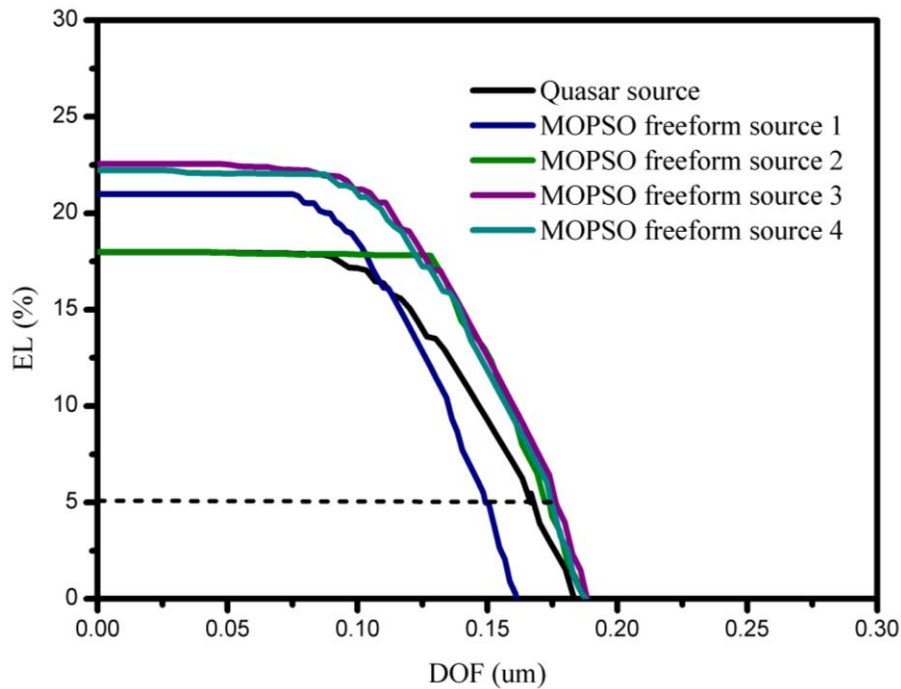
Selanjutnya, PW dinilai untuk memverifikasi *depth of focus* (DOF) pada beberapa *metrology sites*. Gambar 4-15 menggambarkan hasil PW saat *source quasar* dan MOPSO *freeform* digunakan. Garis hitam putus-putus menunjukkan

TABEL V  
Hasil Penilaian dari *Error CD* dan *Contrast* pada Beberapa *Metrology Sites*

Metrik	Sources	M1	M2	M3	M4	M5
<i>Error CD (%)</i>	Incoherent	0.7	2.9	1.4	4.2	1.0
	Quasar	0.5	1.6	0.7	3	0.6
	Freeform 1	0.4	1.6	1.1	1	0.2
	Freeform 2	0.4	2.1	0.6	1.2	0.3
	Freeform 3	0	0.9	0.5	1.9	0.2
	Freeform 4	0.1	1.3	0.1	1.6	0.2
<i>Contrast</i>	Incoherent	0.80	0.82	0.83	0.83	0.84
	Quasar	0.91	0.87	0.91	0.88	0.92
	Freeform 1	0.90	0.87	0.93	0.86	0.92
	Freeform 2	0.89	0.89	0.91	0.88	0.90
	Freeform 3	0.89	0.87	0.93	0.86	0.90
	Freeform 4	0.88	0.87	0.89	0.86	0.87

DOF di *exposure latitude* (EL) 5%. Garis hitam menunjukkan kurva EL vs DOF saat *source quasar* digunakan. EL maksimal dan DOF di EL 5%



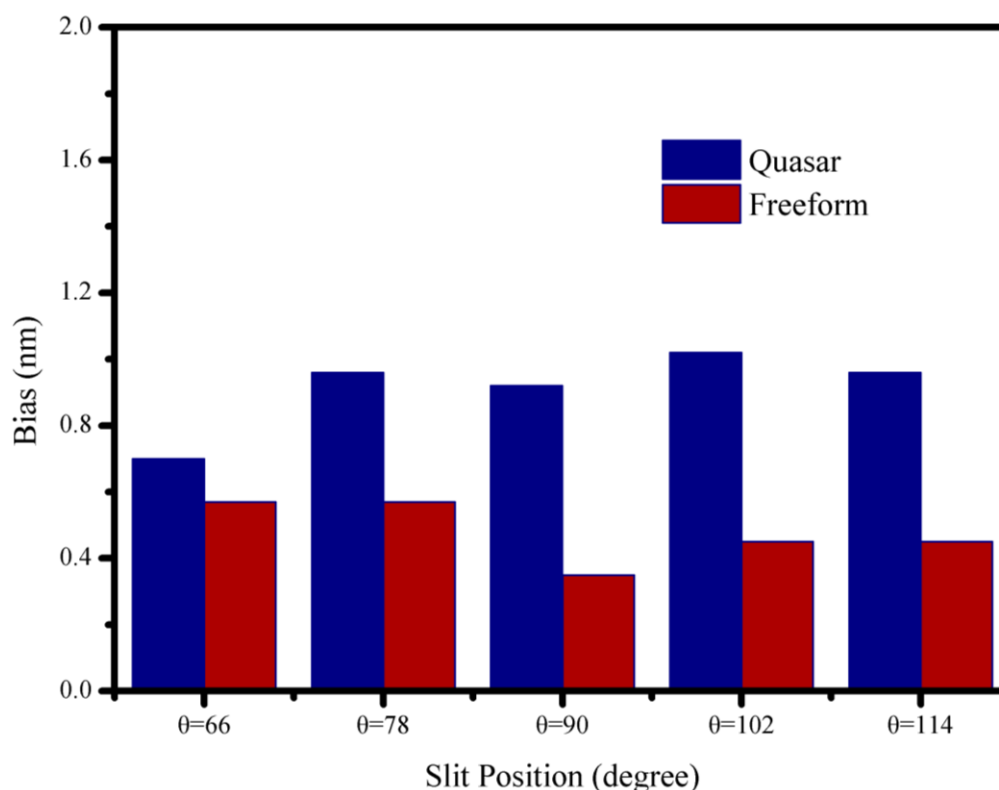


Gambar 4-15. *Feature Pola Mask 2D* dari *Process Window* antara *Source Quasar* dan *MOPSO Freeform*.

menunjukkan 17.98% dan 0.16  $\mu\text{m}$ . *Source freeform 1* menunjukkan EL yang lebih besar, tetapi DOF yang lebih rendah. Di sisi lain, *source freeform 2* menunjukkan DOF yang lebih besar, tetapi EL yang lebih rendah. *Source freeform 3* dan 4 memiliki perilaku yang sama. Kedua *source freeform* ini memiliki EL dan DOF yang lebih tinggi. *Source freeform 3* menghasilkan *source freeform* terbaik. Rata-rata EL maksimal adalah 20.93%. Hal ini meningkat sebesar 16.41% ketika *source MOPSO freeform* digunakan. Selain itu, rata-rata DOF juga mengalami peningkatan dari 0.16 ke 0.17  $\mu\text{m}$  di EL 5% dan meningkat sebesar 1.05%

*Slit position dependence* yang berkaitan dengan posisi busur *slit (arch slit)* ditunjukkan pada gambar 4-16 dievaluasi melalui beberapa posisi *slit* dari  $\theta$ . Kami mengevaluasi pada  $\theta=66^\circ$ ,  $\theta=78^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=102^\circ$  dan  $\theta=114^\circ$  untuk menganalisis bias antara dua arah pola (horizontal dan vertikal). *Slit position dependence*

pada saat *source quasar* digunakan untuk  $\theta=66^\circ$ ,  $\theta=78^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=102^\circ$  dan  $\theta=114^\circ$  adalah 0.7, 0.96, 0.92, 1.02, dan 0.96. Ketika menggunakan *source freeform*, kami mendapatkan *slit position dependence* untuk  $\theta=66^\circ$ ,  $\theta=78^\circ$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $\theta=102^\circ$  dan  $\theta=114^\circ$  adalah 0.57, 0.57, 0.35, 0.45, dan 0.45. Posisi *slit* diperiksa pada posisi tengah dimana  $\theta=90^\circ$ . Secara umum, *slit dependence* pada posisi tengah lebih mengalami peningkatan dibandingkan posisi *slit* yang lain.



Gambar 4-16. *The slit position dependences* pada Beberapa Posisi *Slit*.

*Mask error enhancement factors* (MEEFs) dievaluasi pada beberapa *metrology sites* menggunakan *source* konvensional *quasar* dan MOPSO *freeform* seperti pada tabel VI. Selain itu, *source coherent* juga digunakan sebagai *source* uji coba pada penelitian ini. Hasil yang diperoleh disajikan pada tabel VI. Ketika *source quasar* digunakan, MEEFs untuk M1, M2, M3, M4, dan M5 adalah 1.01, 1.35, 0.93, 1.38 dan 0.97. Rata-rata MEEFs untuk *source quasar* adalah 1.128. Namun, *source freeform* secara umum memiliki MEEFs yang lebih rendah dibandingkan *source quasar*. Rata-rata MEEFs terendah untuk *source freeform*

adalah *source freeform 2*, yakni 1.094. sehingga, ketika kami menggunakan *source freeform 2*, rata-rata MEEF meningkat sebesar 3.01%.

TABEL VI  
Distribusi dari MEEFs pada Beberapa *Metrology Sites*

Metrik	Sources	M1	M2	M3	M4	M5
MEEFs	Incoherent					
	Quasar	1.01	1.35	0.93	1.38	0.97
	Freeform 1	1	1.46	1	1.18	1
	Freeform 2	0.99	1.43	0.96	1.1	0.99
	Freeform 3	1	1.43	0.96	1.1	0.99
	Freeform 4	1	1.47	0.97	1.17	1

**(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)**

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN PENELITIAN LANJUTAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Studi ini berhasil menunjukkan *source mask optimization* (SMO) menggunakan algoritma multi-objektif *particle swarm optimization* (MOPSO) untuk memecahkan permasalahan optimasi dalam platform desain proses litografi EUV. Proses SMO menggabungkan algoritma MOPSO untuk menghasilkan *sources freeform*. Algoritma berbasis-model OPC juga digunakan untuk koreksi pola *reticle*. Hasilnya dilaporkan dalam bentuk pola dasar (*baseline*) L/S 1D dan 2D. Simulasi numerik menunjukkan bahwa *process windows* (PWs) meningkat pada *exposure latitude* (EL) dan *depth of focus* (DOF) daripada *source* konvensional. Pada hasil pola dasar L/S 1D, hasil menunjukkan bahwa PW secara umum meningkat sebesar 5.26% untuk EL dan 11.34% untuk DOF. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma yang diusulkan secara efektif mampu mencari bentuk *source* yang optimal pada platform PC litografi EUV. Terlebih lagi, SMO dengan metode usulan MOPSO juga mampu memberikan solusi alternatif pada platform PC untuk mendukung teknisi litografi dalam pengambilan keputusan. Hasil juga menunjukkan bahwa terdapat empat solusi yang dapat dipilih dari pola 2D dengan 5 *metrology sites* pada penelitian ini. Pada hasil pola 2D, hasil menunjukkan bahwa PW secara umum meningkat sebesar 16.41% untuk EL dan 1.05% untuk DOF. Hal ini menunjukkan bahwa MOPSO dapat digunakan sebagai pendekatan lain selain single-objektif untuk menghasilkan *source freeform* pada proses optimasi.

#### **5.2 Kontribusi**

Algoritma MOPSO bekerja pada fungsi multi-objektif untuk proses optimasi. Algoritma ini dikombinasikan dengan proses optimasi *source* dan *mask*. Penelitian ini diperoleh bahwa hasil MOPSO memberikan *compensation* atas efek optik dari EUV seperti bias horizontal/vertikal seperti yang ditunjukkan oleh *slit position dependence* pada posisi tengah. Algoritma ini juga diujikan pada pola dasar 1D dan 2D. ini menunjukkan peningkatan hasil *process windows*. Algoritma

yang diusulkan juga menyediakan solusi alternatif yang sangat bermanfaat bagi ahli litografi dalam mengambil keputusan.

### **5.3 Penelitian Lanjutan**

Pada saat ini, perkembangan dari optimasi sistem litografi EUV meningkat dengan sangat cepat. Dalam penelitian ini, algoritma MOPSO diintegrasikan dengan proses SMO untuk mengevaluasi performa litografi EUV. Namun, dalam manufaktur nanolitografi EUV, efek optik seperti efek *line edge roughness* (LER), *flare* dan *numerical aperture* (NA) yang lebih tinggi juga menjadi kontributor yang sangat penting dalam proses litografi EUV. Sehingga, analisis dari LER, *flare* juga penting untuk diikuti dalam proses optimasi di masa mendatang. Penggunaan NA yang lebih tinggi diharapkan dapat diterapkan sebagai hasil dari fabrikasi litografi EUV.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Mallik, J. Ryckaert, A. Mercha, *et al.* (2015). *Maintaining Moore's law: enabling cost-friendly dimensional scaling. Proceeding of SPIE*, vol. 9422, page 94221N
- [2] D. James. (2016). *Moore's law continues into the 1x-nm era. 27th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference ASMC*, page 324–329
- [3] A. Pirati, J. van Schoot, K. Troost, *et al.* (2017). *The future of EUV lithography: Enabling Moore's Law in the next decade. Proceeding of SPIE*, vol. 10143, page 101430G
- [4] H. Iwai. (2016). *End of the scaling theory and Moore's law. 16th International Workshop Junction Technology IWJT*, page 1–4
- [5] S.-S. Kim, R. Chalykh, H. Kim, *et al.* (2017). *Progress in EUV lithography toward manufacturing. Proceeding of SPIE*, vol. 10143, page 1014306
- [6] A. Pirati, R. Peeters, D. Smith, *et al.* (2016). *EUV lithography performance for manufacturing: status and outlook. Proceeding of SPIE*, vol. 9776, page 97760A
- [7] J. van Schoot, K. van Ingen Schenau, C. Valentin, *et al.* (2015). *EUV lithography scanner for sub-8nm resolution. Proceeding of SPIE*, vol. 9422, page 94221F
- [8] H. Aoyama, Y. Mizuno, N. Hirayanagi, *et al.* (2014). *Impact of realistic source shape and flexibility on source mask optimization. J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, vol. 13, no. 1, page 11005
- [9] J. Kostencka and T. Kozacki. (2015). *Off-axis illumination in object-rotation diffraction tomography for enhanced alignment and resolution. Proceeding of SPIE*, vol. 9525, page 95250M
- [10] S. Hsu, R. Howell, J. Jia, *et al.* (2015). *EUV resolution enhancement techniques (RETs) for k1 0.4 and below. Proceeding of SPIE*, vol. 9422, page 94221I

- [11] Liu, X., Howell, R., Hsu, S., *et al.* (2014). *EUV source-mask optimization for 7nm node and beyond. Proceeding of SPIE*, vol. 9048, page 90480Q
- [12] H. Matsui, T. Kamikubo, S. Nakahashi, *et al.* (2016). *Electron beam mask writer EBM-9500 for logic 7nm node generation. Proceeding of SPIE*, vol. 9985, page 998508
- [13] S. Raghunathan, G. McIntyre, G. Fenger, and O. Wood. (2013). *Mask 3D effects and compensation for high NA EUV lithography. Proceeding of SPIE*, vol. 8679, page 867918
- [14] E.van Setten, *et al.* (2013). *NXE:3300B platform: imaging applications for Logic and DRAM. Proceeding of SPIE*, vol. 8886, page 888604
- [15] J. Bekaert, B. Laenens, S. Verhaegen, *et al.* (2010). *Freeform illumination sources: an experimental study of source-mask optimization for 22-nm SRAM cells. Proceeding of SPIE*, vol. 7640, page 764008
- [16] M. Mulder, A. Engelen, O. Noordman, *et al.* (2010). *Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems. Proceeding of SPIE*, vol. 7640, page 76401P
- [17] D. Q. Zhang, G. S. Chua, Y. M. Foong, *et al.* (2012). *Source mask optimization methodology (SMO) & application to real full chip optical proximity correction. Proceeding of SPIE*, vol. 8326, page 83261V
- [18] J. Zhu, F. Wei, L. Chen, *et al.* (2016). *Source mask optimization study based on latest Nikon immersion scanner. Proceeding of SPIE*, vol. 9780, page 97801P
- [19] X. Ma, *et al.* (2015). *Gradient-based joint source polarization mask optimization for optical lithography. J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, vol. 14, no. 2, page 23504
- [20] J. Li, S. Liu, and E. Y. Lam. (2013). *Efficient source and mask optimization with augmented Lagrangian methods in optical lithography. Opt. Express*, vol. 21, no. 7, page 8076-8090
- [21] X. Ma, *et al.* (2015). *Gradient-based inverse extreme ultraviolet lithography. Appl. Opt.*, vol. 54, no. 24, page 7284–7300



- [22] Y. Peng, J. Zhang, Y. Wang, and Z. Yu. (2011). *Gradient-based source and mask optimization in optical lithography*. *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 20, no. 10, page 2856–2864
- [23] L. Pang, D. Peng, P. Hu, *et al.* (2010). *Optimization from design rules, source and mask, to full chip with a single computational lithography framework: level-set-methods-based inverse lithography technology (ILT)*. *Proceeding of SPIE*, vol. 7640, page 76400O
- [24] C. Yang, X. Wang, S. Li, *et al.* (2013). *Source mask optimization using real-coded genetic algorithms*. *Proceeding of SPIE*, vol. 8683, page 86831T
- [25] T. Fuehner, A. Erdmann, and T. Schnattinger. (2004). *Genetic algorithms for geometry optimization in lithographic imaging systems*. *Proceeding of SPIE*, vol. 5558, page 29-40
- [26] T. Fuhner and A. Erdmann. (2005). *Improved mask and source representations for automatic optimization of lithographic process conditions using a genetic algorithm*. *Proceeding of SPIE*, vol. 5754, page 415-426
- [27] L.Wang, S. Li, X. Wang, *et al.* (2016). *Pixel-based mask optimization via particle swarm optimization algorithm for inverse lithography*. *Proceeding of SPIE*, vol. 9780, page 97801V
- [28] W. U. Jian, T. Xinhua, and C. A. O. Yong. (2014). *The research of parallel multi-objective particle swarm optimization algorithm*. *IEEE 5<sup>th</sup> International Conference on Software Engineering and Service Science*, page 300-304
- [29] X.-S. Yang. 2014. *Nature-inspired optimization algorithms*. Elsevier
- [30] K. Deb. 2001. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons
- [31] J. Senthilnath, *et al.* (2013). *Multiobjective discrete particle swarm optimization for multisensor image alignment*. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no. 5, page 1095–1099

- [32] H. Zhu, *et al.* (2011). *Particle swarm optimization (PSO) for the constrained portfolio optimization problem*. *Expert System with Applications*, vol. 38, page 10161–10169
- [33] C. Blum and D. Merkle. 2008. *Swarm intelligence: Introduction and applications*. Springer
- [34] M. S. Nobile, *et al.* (2012). *Estimating reaction constants in stochastic biological systems with a multi-swarm PSO running on GPUs*. *14<sup>th</sup> Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, page 1421–1422
- [35] H. F. Kuo and W. C. Wu. (2015). *Forming freeform source shapes by utilizing particle swarm optimization to enhance resolution in extreme UV nanolithography*. *IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 14, no. 2, page 322–329
- [36] L. Wang, *et al.* (2016). *Pixelated source optimization for optical lithography via particle swarm optimization*. *J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, vol. 15, no. 1, page 13506
- [37] C. Wagner and N. Harned. 2010. *EUV lithography: Lithography gets extreme*. *Nature Photonics 4*. Page 24-26
- [38] A. Erdmann, *et al.* (2014). *Optical and EUV projection lithography: A computational view*. *Microelectron. Eng.*, vol. 132, page 21–34
- [39] R. Capelli, *et al.* (2014). *Scanner arc illumination and impact on EUV photomasks and scanner imaging*. *Proceeding of SPIE*, vol. 9231, page 923109
- [40] D. Hellweg, J. Ruoff, A. Herkommer, *et al.* (2011). *AIMS EUV: the actinic aerial image review platform for EUV masks*. *Proceeding of SPIE*, vol. 7969, page 79690H
- [41] O. Wood, S. Raghunathan, P. Mangat, *et al.* (2015). *Alternative materials for high numerical aperture extreme ultraviolet lithography mask stacks*. *Proceeding of SPIE*, vol. 9422, page 94220I
- [42] L. Van Look, V. Philipsen, E. Hendrickx, *et al.* (2015). *Alternative EUV mask technology to compensate for mask 3D effects*. *Proceeding of SPIE*, vol. 9658, page 96580I

- [43] H. Kang, S. Hansen, J. van Schoot, and K. van Ingen Schenau. (2008). *EUV simulation extension study for mask shadowing effect and its correction. Proceeding of SPIE*, vol. 6921, page 69213I
- [44] P. C. W. Ng, *et al.* (2011). *Fully model-based methodology for simultaneous correction of extreme ultraviolet mask shadowing and proximity effects. J. Micro/Nanolithography, MEMS, MOEMS*, vol. 10, page 13004
- [45] S. Raghunathan, G. McIntyre, G. Fenger, *et al.* (2013). *Mask 3D effects and compensation for high NA EUV lithography. Proceeding of SPIE*, vol. 8679, page 867918
- [46] H. Song, L. Zavyalova, I. Su, *et al.* (2011). *Shadowing effect modeling and compensation for EUV lithography. Proceeding of SPIE*, vol. 7969, page 79691O
- [47] N. Chase, *et al.* (2013). *A benchmark study of multi-objective optimization methods. Red Cedar Technology*, page 1–24
- [48] N.-Y. Chung, P.-S. Kang, N.-R. Bang, *et al.* (2014). *'Smart' source, mask, and target co-optimization to improve design related lithographically weak spots. Proceeding of SPIE*, vol. 9053, page 90530H
- [49] H.-F. Kuo. (2016). *Ant colony optimization-based freeform sources for enhancing nanolithographic imaging performance. IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 15, page 599–606

*(Halaman Ini Sengaja Dikосongkan)*

## BIODATA PENULIS



Zendhiastara Arthananda atau yang biasa dipanggil lahir di Sidoarjo, 26 September 1992. Penulis bertempat tinggal di Jalan Wilis Blok O No. 5 Kepuh Permai, Waru – Sidoarjo. Anak dari pasangan I Gede Yudhi Kartika dan Sudarsih ini memiliki kegemaran membaca serta *travelling*.

Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SD Al-Falah Darussalam Tropodo Sidoarjo (1999-2005), SMP Al-Falah Deltasari Sidoarjo (2005-2008), SMA Negeri 15 Surabaya (2008-2010), S1 Jurusan Matematika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (2010-2014). Kemudian penulis melanjutkan studinya magister di Jurusan Matematika di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan mendapatkan beasiswa *fresh graduate*. Penulis juga menempuh studi magister program *double-degree* di Jurusan Graduate Institute of Automation and Control di National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan (2015-2017) dengan mendapatkan beasiswa kampus Taiwan. Penulis memiliki minat riset pada bidang matematika terapan terutama pada bidang *operation research*, optimasi, serta *control theory*. Penulis juga mempelajari bidang elektro-optik dan nanoteknologi. Penulis juga aktif dalam aktivitas akademik yakni menjadi asisten dosen kalkulus 1 pada tahun 2013 serta menjadi *speaker* pada seminar internasional “IComPAC”.

Selain aktivitas akademik, penulis juga aktif dalam aktivitas non-akademik. Penulis aktivis dalam kegiatan kemahasiswaan Indonesia selama menempuh studinya di Taiwan. Penulis juga berprestasi dalam bidang olahraga dengan menjuarai pertandingan badminton seluruh mahasiswa Indonesia di Taiwan di sektor ganda campuran dan ganda putra pada tahun 2016 dan 2017.

Jika terdapat saran, kritik dan diskusi mengenai tesis, silahkan menghubungi email [zendhiezh@hotmail.com](mailto:zendhiezh@hotmail.com). Semoga bermanfaat.