

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MICROELETRÔNICA

TANIA MARA FERLA

## **Simulação Litográfica**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de  
Mestre em Microeletrônica

Ricardo Augusto da Luz Reis  
Orientador

Porto Alegre, Junho de 2014

## CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Ferla, Tania Mara

Simulação Litográfica / Tania Mara Ferla. – Porto Alegre: PG-MICRO da UFRGS, 2014.

75 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Microeletrônica, Porto Alegre, BR-RS, 2014. Orientador: Ricardo Augusto da Luz Reis.

1. Litografia óptica. 2. Simulação litográfica. 3. Simulação de imagem aérea. 4. Microeletrônica. I. Reis, Ricardo Augusto da Luz. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do PGMICRO: Prof. Gilson Inácio Wirth

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*A vantagem de ter péssima memória é divertir-se muitas vezes com as mesmas coisas boas como se fosse a primeira vez. Friedrich Nietzsche*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe e meu pai, por todo seu apoio. E, um agradecimento especial ao Guilherme Flach por seu incentivo e por sua contribuição imensurável para este trabalho e a Gracieli Posser por todo seu incentivo e ajuda. E por fim, agradeço ao meu orientador Ricardo Reis e ao CNPQ por esta oportunidade.



## Litographic Simulation

### ABSTRACT

Optical Lithography is the process whereby the patterns designed by the integrated circuit designers are transferred to the wafer by light waves. With the miniaturization of components, the gap between the projected patterns and what is actually printed is steadily increasing as the pattern dimensions are now smaller than the wavelength used to print them.

Therefore, in this work we present the problem of optical lithography and its mathematical foundations, as well as techniques to efficiently implement a lithographic simulator. These techniques were used to develop the Lithux simulator. We also briefly present techniques for resolution enhancement, where many of them use lithographic simulators to simulate their efficiency.

Thus, it is essential to know or to have an approximation of what will be printed before the circuit manufacturing to eliminate potential defects through the use of resolution enhancement techniques. This approximation is obtained by optical lithography simulators that have the challenge of getting this approximation in a practicable time.

**Keywords:** Lithography, lithographic simulation, aerial image simulation, optics.



## RESUMO

Litografia óptica é o processo pelo qual os padrões desenhados pelos projetistas de circuitos integrados são transferidos para o wafer através de ondas de luz. Com a miniaturização dos componentes, aumenta cada vez mais a discrepância entre os padrões projetados e o que é realmente impresso. Tal fato ocorre porque as dimensões dos padrões são menores do que o comprimento de onda utilizado para imprimi-los.

Desta forma, é imprescindível que se saiba ou se tenha uma aproximação do que será impresso antes da fabricação dos circuitos para eliminar possíveis defeitos, através da utilização de técnicas de melhoramento de resolução. Essa aproximação é obtida através de simuladores de litografia óptica, que possuem o grande desafio de obter uma aproximação em um tempo viável.

Sendo assim, neste trabalho apresentamos o problema de litografia óptica e seu embasamento matemático, bem como técnicas para implementar um simulador litográfico de forma eficiente. Tais técnicas foram utilizadas para o desenvolvimento do simulador Lithux. E, também apresentamos brevemente, técnicas de melhoramento de resolução, onde muitas utilizam simuladores de litografia para reproduzir sua eficiência.

**Palavras-chave:** Litografia óptica, simulação litográfica, simulação de imagem aérea, microeletrônica.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Borramento (CHEN; LIAO; CHANG, 2010) . . . . .	19
Figura 1.2:	Visão Alto-Nível do Processo de Litografia . . . . .	21
Figura 1.3:	Tipos de foto-litografia . . . . .	21
Figura 1.4:	Difração da luz ao passar pela fissura e ângulos capturados . . . . .	22
Figura 1.5:	Profundidade de Foco (DOF) . . . . .	22
Figura 2.1:	Exemplo de Função de Transmitância da Máscara . . . . .	26
Figura 2.2:	Processo de Convolução . . . . .	26
Figura 2.3:	Convolução via Transformada de Fourier . . . . .	27
Figura 2.4:	Elemento da <i>look-up table</i> : LUT armazena o resultado da convolução entre o retângulo (0,0)-(2,3) e a kernel . . . . .	28
Figura 2.5:	A influência de um retângulo $(x_1, y_1) - (x_2, y_2)$ no pixel central (ZHANG et al., 2011) . . . . .	28
Figura 2.6:	Construção eficiente da <i>look-up table</i> . . . . .	29
Figura 2.7:	Zona de impacto de um retângulo (WU et al., 2013) . . . . .	29
Figura 2.8:	Processamento do impacto de um retângulo usando <i>look-up tables</i> . . . . .	31
Figura 3.1:	Propriedade de Transformada de Fourier das Lentes . . . . .	34
Figura 3.2:	Esquemático de um sistema de litografia óptica . . . . .	34
Figura 3.3:	A frequência espacial de (u,v): todos os pontos viajando que tem o mesmo ângulo são mapeados para o mesmo ponto no plano da pupila . . . . .	35
Figura 3.4:	Magnitude da Kernel . . . . .	36
Figura 3.5:	Deslocamento do Espectro da Máscara Causado pela Iluminação Fora-de-Eixo . . . . .	37
Figura 3.6:	Efeito de deslocamento do espectro na fase da função pupila no domínio espacial . . . . .	38
Figura 3.7:	Aumento da resolução através da captura de frequências de mais alta ordem . . . . .	38
Figura 3.8:	Formas de Iluminação Típicas em um Sistema de Litografia . . . . .	39
Figura 3.9:	Discretização da Fonte . . . . .	40
Figura 3.10:	O TCC é proporcional à sobreposição das pupilas deslocadas e à fonte de iluminação. . . . .	41
Figura 3.11:	Região de suporte da função TCC. . . . .	42
Figura 3.12:	Fluxo para a geração de kernels usando Matriz TCC . . . . .	44
Figura 3.13:	<i>Kernels</i> , em ordem decrescente de importância, gerados através da decomposição em valores singulares (SVD) da matriz TCC. . . . .	44
Figura 3.14:	Decaimento dos Autovalores da Matriz TCC . . . . .	45

Figura 4.1:	Exemplo de Simulação com a ferramenta Lithux: (a) é a máscara gerada através do <i>benchmark</i> , (b) é o mapa de intensidade e (c) é o padrão impresso no <i>wafer</i> . . . . .	49
Figura 4.2:	Formato de arquivo de entrada: a entrada contém o valor de escala, o ponto inicial e final do retângulo, e o seu tamanho . . . . .	50
Figura 4.3:	<i>Kernels</i> no domínio espacial, em ordem decrescente de importância, retirados do Contest do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013) para as simulações com o Lithux . . . . .	51
Figura 4.4:	<i>Kernels</i> no domínio espacial, retirados do Contest do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013) para as simulações com o Lithux . . . . .	52
Figura 4.5:	Máscara com 13 retângulos usada para os testes obtidos na Tabela 4.2	54
Figura 4.6:	Comparativo de tempo entre as técnicas FFT e LUT com as simulações realizadas com a máscara de 13 retângulos . . . . .	54
Figura 4.7:	Resultado da simulação do exemplo 1 da Tabela 4.1: Máscara 1 m1_pgon_rect_OPC . . . . .	55
Figura 4.8:	Resultado da simulação do exemplo 2 da Tabela 4.1: Máscara 2 m1_straightlines_OPC . . . . .	55
Figura 4.9:	Resultado da simulação do exemplo 3 da Tabela 4.1: Máscara 3 M1_test1 . . . . .	55
Figura 4.10:	Resultado da simulação do exemplo 4 da Tabela 4.1: Máscara 4 M1_test2 . . . . .	56
Figura 4.11:	Resultado da simulação do exemplo 5 da Tabela 4.1: Máscara 5 M1_test3 . . . . .	56
Figura 4.12:	Resultado da simulação do exemplo 6 da Tabela 4.1: Máscara 6 M1_test4 . . . . .	56
Figura 4.13:	Resultado da simulação do exemplo 7 da Tabela 4.1: Máscara 7 m1U2_OPC . . . . .	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1:	Parâmetros de um Sistema de Litografia Óptica . . . . .	22
Tabela 3.1:	Detalhes do esquemático de um sistema de litografia óptica da Figura 3.2 . . . . .	35
Tabela 4.1:	Tempo de execução dos método via FFT e via <i>look-up table</i> com 24 kernels . . . . .	53
Tabela 4.2:	Testes com a máscara . . . . .	54



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CI	Circuitos Integrados
DFT	Discrete Fourier transform (em português, Transformada de Fourier Discreta)
DPL	Double Patterning Lithography (em português, Dupla Exposição por Camada)
DOF	Depth of Field (em português, Profundidade de Foco)
NA	Numerical Aperture (em português, Abertura Numérica)
RET	Resolution Enhancement Techniques (em português, Técnicas de Melhoria de Resolução)
FFT	Fast Fourier Transform (em português, Transformada Rápida de Fourier)
LUT	Look-up Table
MPL	Multiple Patterning Lithography (em português, Múltipla Exposição por Camada)
PSM	Phase-Shifting Mask (em português, Máscara com Deslocamento de Fase)
OPC	Optical Proximity Correction (em português, Correção de Proximidade Óptica)
RDR	Regras de Design Restritivas
TCC	Transmission Cross Coefficient (em português, Coeficientes de transmissão cruzados)



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	19
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Litografia Óptica	20
1.3.1	Tipos de Sistemas de Exposição do <i>Wafer</i>	20
1.4	Parâmetros de um Sistema de Litografia Óptica	21
1.4.1	Comprimento de Onda ( $\lambda$ )	21
1.4.2	Abertura Numérica (NA)	22
1.4.3	Profundidade de Foco (DOF)	22
1.4.4	Resolução Mínima	23
<b>2</b>	<b>TÉCNICAS PARA SIMULAÇÃO LITOGRAFICA</b>	25
2.1	Intensidade de Luz no <i>Wafer</i>	25
2.1.1	Descrição da Máscara	26
2.1.2	Convolução por varredura pixel-a-pixel	26
2.2	Convolução via Transformada Rápida de Fourier (FFT)	26
2.3	Convolução via <i>look-up table</i> (LUT)	27
2.3.1	Construindo a <i>look-up table</i> (LUT)	28
2.3.2	Algoritmo para Convolução usando <i>Look-up Table</i> (LUT)	28
2.4	Escolha do Método de Convolução	29
<b>3</b>	<b>FORMAÇÃO DA IMAGEM AÉREA</b>	33
3.1	A Propriedade de Transformada de Fourier das Lentes	33
3.2	Sistema de Litografia Óptica	34
3.3	Etapas da Projeção	34
3.4	Iluminação Fora-de-Eixo	37
3.5	Iluminação com Fonte de Forma Arbitrária	38
3.5.1	Fonte de Iluminação Efetiva	38
3.6	Métodos de Integração para a Formação da Imagem	39
3.6.1	Método de Abbé (Discretização da Fonte)	39
3.6.2	Método de Hopkin (Coeficientes de Transmissão Cruzados, TCC, do inglês, <i>Transmission Cross Coefficient</i> )	40
3.6.3	Construção da Matriz TCC via Operador da Pupila Empilhado	44
3.6.4	Método de Abbe vs Método de Hopkins	46
3.7	Redução de Escala	46
3.8	Aberrações na Lente	47

<b>4</b>	<b>LITHUX: UM SIMULADOR DE LITOGRAFIA ÓPTICA</b>	49
4.1	Descrição da Ferramenta	49
4.2	Simulações	50
4.2.1	Análise das Simulações Obtidas com Lithux	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	59
5.1	Trabalhos Futuros	59
	<b>REFERÊNCIAS</b>	61
	<b>APÊNDICE A DESLOCAMENTO DA PUPILA</b>	65
	<b>APÊNDICE B MÉTODO DE HOPKIN</b>	67
	<b>APÊNDICE C OPERADOR DE EMPILHAMENTO</b>	69
C.1	Funções de Dois Argumentos	69
C.2	Funções de Quatro Argumentos	69
C.3	Inverso	70
	<b>APÊNDICE D APRIMORAMENTO DE RESOLUÇÃO</b>	71
D.1	Introdução	71
D.2	Máscara com Deslocalamento de Fase (PSM)	71
D.3	Correção de Proximidade Óptica (OPC)	72
D.3.1	<i>Edge Placement Error</i> (EPE)	73
D.4	Dupla (DPL) ou Múltipla Exposição por Camada (MPL)	73
D.5	Regras de Design Restritivas (em inglês, <i>Restricted Design Rules</i> , RDR)	74
D.5.1	Leiaute Regular	74

# 1 INTRODUÇÃO

A palavra litografia vem do grego, *lithos*, que significa pedra e *graphia*, que significa escrever (MACK, 2007). A litografia foi inventada por Alois Senefelder em 1796 (MUMFORD, 1972) e, na época, era o processo de transferir um padrão para um objeto. A litografia é basicamente o processo de escrever sobre a pedra. Em CIs, litografia é o processo de passar padrões de uma máscara para um *wafer*. Existem vários tipos de sistemas de exposição do wafer, como serão mostrados na Subseção 1.3.1.

## 1.1 Motivação

Na indústria de semicondutores, a litografia óptica é a maneira mais comum de transferir os padrões do leiaute de um circuito para o wafer. Entretanto, conforme a tecnologia avança e os padrões ficam menores, a resolução do processo de litografia piora na medida que o comprimento dos padrões se compara ou fica até menor do que o tamanho de onda utilizado para imprimi-los. O efeito da diminuição da resolução pode ser observado na Figura 1.1.

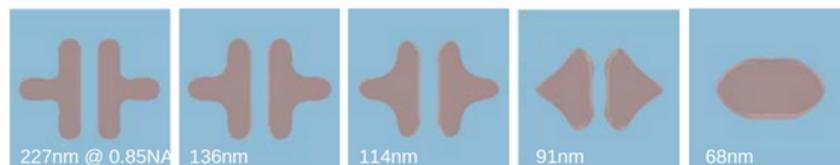


Figura 1.1: Borramento (CHEN; LIAO; CHANG, 2010)

Para lidar com esse problema de resolução, diversas técnicas de melhoria de resolução (RET, do inglês, *Resolution Enhancement Techniques*) (MACK, 2007), (LIEBMANN, 2003) foram propostas: máscaras com deslocamento de fase (PSM, do inglês, *phase-shifting mask*) (KIM et al., 2014), (LEVENSON; VISWANATHAN; SIMPSON, 1982); correção de proximidade (OPC, do inglês, *optical proximity correction*) (YU; SHI; PAN, 2007), (HUANG; WONG, 2004); dupla ou múltipla exposição por camada (MPL, do inglês, *double/multiple patterning*) (MA et al., 2011), (LIEBMANN; PIETROMONACO; GRAF, 2011); regras de projeto restritivas (MEINHARDT, 2006), (CAPODIECI et al., 2004) entre outras.

A maioria das RETs utiliza simulação de litografia óptica para definir se uma modificação no leiaute do circuito leva ou não a melhorias na resolução. Desta forma, simuladores precisam estar disponíveis para prover estimativas dos efeitos litográficos.

Entretanto simulação litográfica é um processo computacionalmente custoso. Por exemplo, dado um leiaute de  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  com uma resolução de  $1\text{nm}$ ,  $10^{14}$  pontos preci-

sam ser computados (MACK, 2007). Desta forma, usar diretamente os teoremas de óptica é impraticável, e técnicas de simulação cada vez mais eficientes são necessárias.

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho, foi estudado principalmente a simulação de litografia óptica para circuitos integrados. Foram propostos seguintes objetivos principais:

1. apresentação didática de simulação da litografia óptica para circuitos integrados;
2. implementação de uma ferramenta de simulação baseada nos conhecimentos adquiridos.

Além disso, um breve levantamento de técnicas de aprimoramento de resolução também é apresentado.

## 1.3 Litografia Óptica

Fotolitografia ou litografia óptica é uma técnica de litografia que utiliza luz para transferir padrões desenhados numa máscara para uma resina fotossensível. Atualmente é a técnica mais usada em semicondutores para a impressão do leiaute de circuitos integrados sobre o *wafer* (a lâmina de silício). Neste trabalho, é usado o termo litografia para referir-se à fotolitografia salvo quando dito o contrário.

Basicamente, o processo de litografia pode ser resumido em alguns passos (SCHELLENBERG, 2003) exemplificados na Figura 1.2:

- primeiro o *wafer* é revestido por uma camada de resina fotossensível;
- a luz é projetada através da máscara que possui o padrão a ser criado no *wafer*. Em geral, os padrões de luz que passam através da máscara são reduzidos por lentes antes de serem projetados no *wafer*;
- a resina fotossensível é exposta à luz, é corroída e removida, deixando uma imagem em miniatura do padrão da máscara no *wafer* <sup>1</sup>;
- as regiões não protegidas pela resina fotossensível são corroídas ou depositadas na trilha metálica;
- finalmente o restante da resina fotossensível é removida.

### 1.3.1 Tipos de Sistemas de Exposição do *Wafer*

Existem 3 tipos de sistema de exposição do *wafer* usados na litografia óptica (REIS, 2000): contato, proximidade e projeção. Veja a Figura 1.3.

As exposições por contato e por proximidade são as mais simples de serem aplicadas. A exposição por contato apresenta boa resolução mais ou menos comparável ao comprimento de onda utilizado. Entretanto o contato entre a máscara e o *wafer* causa danos na máscara que precisa ser substituída frequentemente (REIS, 2000).

---

<sup>1</sup>O que define se a resina fotossensível é positiva ou negativa não é se ela vai ficar solúvel com a luz ou vai ficar não solúvel com a luz.

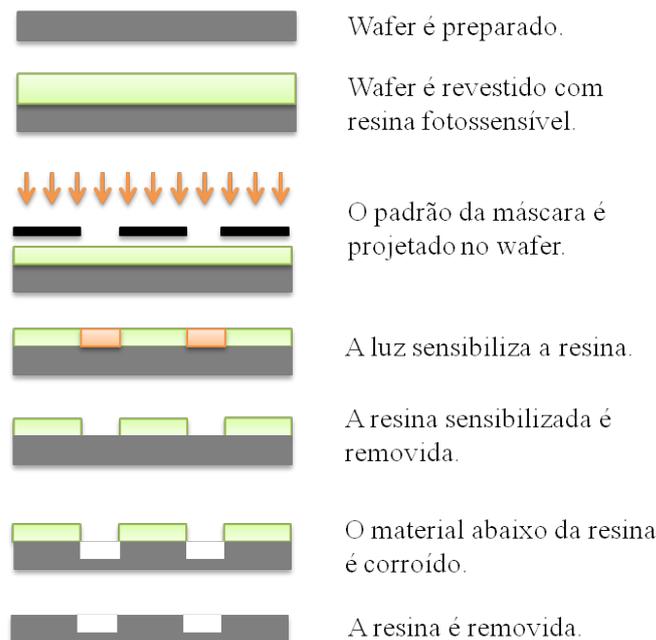


Figura 1.2: Visão Alto-Nível do Processo de Litografia

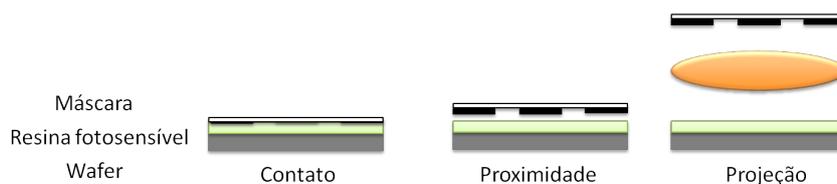


Figura 1.3: Tipos de foto-litografia

Uma solução para evitar os danos causados pelo contato é afastar a máscara do *wafer*, na chamada exposição por proximidade (REIS, 2000). Contudo a resolução é significativamente piorada à medida em que a máscara é afastada.

Devido aos danos causados à máscara na exposição por contato e a baixa resolução na exposição por proximidade, o método mais comum de exposição em microeletrônica, atualmente, é a exposição por projeção (MACK, 2007). Neste método, a luz difratada pela máscara é capturada por lentes que projetam a imagem, muitas vezes reduzindo-a no *wafer*. Este método é o utilizado neste trabalho.

## 1.4 Parâmetros de um Sistema de Litografia Óptica

Nesta seção são apresentados os parâmetros que caracterizam um sistema litográfico, para melhor entendimento do que será explicado no decorrer deste trabalho. Os parâmetros são sumarizados na Tabela 1.1. As siglas dos parâmetros em inglês foram utilizadas para facilitar a referência cruzada com demais trabalhos.

### 1.4.1 Comprimento de Onda ( $\lambda$ )

É o comprimento da onda utilizado no processo de litografia. Nos processos de litografia recentes, o comprimento de onda utilizado é  $193nm$  (MACK, 2007).

Tabela 1.1: Parâmetros de um Sistema de Litografia Óptica

$\lambda$	comprimento de onda
$NA$	abertura numérica
$DOF$	profundidade de focus
$R_{min}$	resolução mínima

### 1.4.2 Abertura Numérica (NA)

A abertura numérica (NA) caracteriza o intervalo de ângulos das ondas de luz as quais são capturadas pelo sistema litográfico, como mostrado na Figura 1.4.

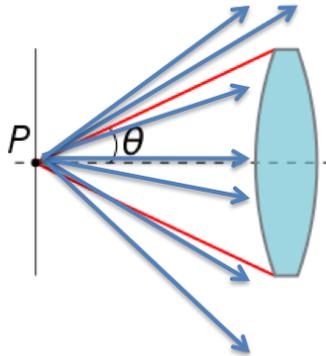


Figura 1.4: Difração da luz ao passar pela fatura e ângulos capturados

Formalmente o NA é definido pela Equação 1.1 onde  $n$  é o índice de refração do meio e  $\theta_{max}$  é ângulo do raio de luz mais inclinado capturado (MACK, 2007).

$$NA = n \sin \theta_{max} \quad (1.1)$$

### 1.4.3 Profundidade de Foco (DOF)

Quando a imagem é projetada por uma lente, a formação da imagem ocorre no plano focal da lente. A profundidade de foco mede o quanto pode-se afastar do plano focal da lente sem perder resolução na imagem projetada, como é demonstrado na Figura 1.5.

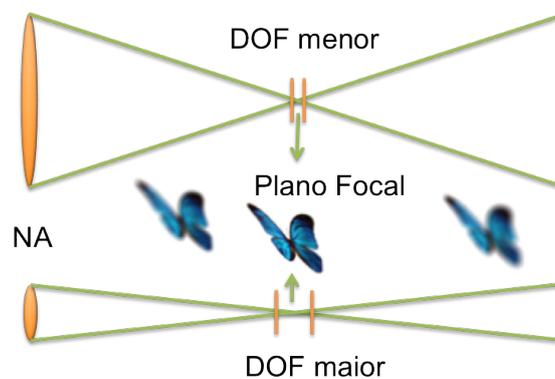


Figura 1.5: Profundidade de Foco (DOF)

No sistema litográfico a profundidade de foco é uma propriedade importante, já que é

difícil posicionar o wafer precisamente no plano de foco. Caso houver uma desfocalização muito grande, a luz é dispersa, e a resina fotossensível pode não ser sensibilizada de forma adequada.

Esse intervalo está relacionado (LIEBMANN, 2003) com a abertura numérica (NA) do sistema litográfico como mostra a Equação (1.2)

$$DOF = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (1.2)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz utilizada e  $k_2$  é uma constante que depende das condições de processo e da técnica litográfica empregada. Embora o aumento do  $NA$  melhore a resolução, ele piora o intervalo de foco (DOF). Sendo assim, a escolha do  $NA$  é um balanceamento entre a resolução e o intervalo de foco desejado.

#### 1.4.4 Resolução Mínima

A resolução se refere à nitidez dos detalhes da imagem, suavidade da linha e a reprodução exata da imagem projetada pelo sistema litográfico. A resolução mínima (MACK, 2007),  $R_{min}$ , é dada pela Equação (1.3).

$$R_{min} = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda usado no processo,  $NA$  é a abertura numérica e  $k_1$  é uma constante que depende das condições de processo e da técnica litográfica empregada.

Segundo a Equação (1.3), tem-se as seguintes abordagens para aumentar a resolução (diminuir o valor de  $R_{min}$  do sistema litográfico):

- diminuir o comprimento de onda ( $\lambda$ );
- aumentar a abertura numérica (NA);
- diminuir  $k_1$ .

A diminuição do comprimento de onda ( $\lambda$ ) está limitada por fatores físicos, incluindo melhorias nos materiais das lentes e dos revestimentos, além do desenvolvimento de novas resinas fotossensíveis mais sensíveis e resistentes à corrosão (ROTHSCHILD et al., 2003).

Embora o aumento do  $NA$  melhore a resolução, ele piora o DOF, que é a variação máxima permitida no foco do processo, pois tem uma dependência inversa  $NA$  ao quadrado (LIEBMANN, 2003). Assim, o DOF reduz muito mais rápido com  $NA$  do que o  $R_{min}$  melhora.

O fator  $k_1$  encapsula alguns detalhes de um determinado processo de litografia, mas pode ser diminuído através da aplicação de técnicas computacionais de melhoria de resolução (RETs).



## 2 TÉCNICAS PARA SIMULAÇÃO LITOGRAFICA

Neste capítulo, é abordado as duas principais técnicas utilizadas para simulação litográfica: através da convolução via Transformada Rápida de Fourier (FFT) e através de convolução usando *look-up tables* (LUT). O objetivo em comum é obter a intensidade de luz atingindo cada ponto do *wafer* eficientemente. Quando a intensidade de luz num ponto ultrapassa um determinado limiar, ocorre a sensibilização da resina fotossensível, o que leva, então, à transferência do padrão da máscara para o *wafer*.

### 2.1 Intensidade de Luz no Wafer

A intensidade de luz,  $I_{total}(x, y)$ , num determinado ponto do *wafer* é dada pela Equação (2.1)

$$I_{total}(x, y) = \sum_{k=1}^K \sigma_k |\phi_k(x, y) \otimes m(x, y)|^2 \quad (2.1)$$

onde  $m(x, y)$  representa a transcondutância da máscara;  $\phi_k(x, y)$  é a  $k$ -ésima função complexa que descreve o sistema litográfico e  $\sigma_k$  é o  $k$ -ésimo fator de escala associado à  $\phi_k(x, y)$ .  $\otimes$  denota a convolução e  $|\cdot|$  indica o módulo de um número complexo. Detalhes de como a Equação (2.1) é derivada podem ser encontrados no Capítulo 3.

Note que a intensidade de luz total pode ser vista como o somatório ponderado de intensidades parciais

$$I_{total}(x, y) = \sum_{k=1}^K \sigma_k I_k(x, y) \quad (2.2)$$

onde cada imagem parcial é definida pelo módulo ao quadrado da convolução entre a função que descreve a máscara do circuito e uma *kernel*, que é uma função que descreve o sistema litográfico parcialmente.

$$I_k(x, y) = |\phi_k(x, y) \otimes m(x, y)|^2 \quad (2.3)$$

Normalmente, para fabricação de circuitos integrados, o sistema litográfico é mantido fixo para um mesmo processo de forma que  $\phi_i(x, y)$  e  $\lambda_i$  se mantêm constantes.

O grande desafio de um simulador litográfico é calcular a Equação (2.1) de forma eficiente. Como tanto a máscara quanto as *kernels* têm dimensões grandes, calcular a convolução diretamente é computacionalmente muito custoso e impraticável em circuitos reais (MACK, 2007), como será explicado na Seção 2.1.2. Desta forma, técnicas computacionais são necessárias para executar a simulação litográfica.

### 2.1.1 Descrição da Máscara

A função de transmitância da máscara assume apenas os valores 1 para pontos transparentes e 0 para pontos opacos. Em alguns casos, pode assumir o valor  $-1$ , indicando um ponto transparente, mas com mudança de fase da onda de luz em  $180^\circ$ . Um exemplo de função de transmitância da máscara para o caso unidimensional é mostrado na Figura 2.1.

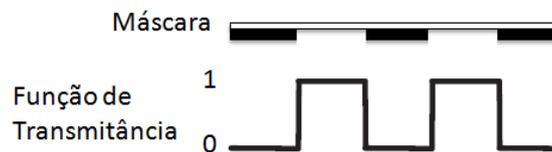


Figura 2.1: Exemplo de Função de Transmitância da Máscara

### 2.1.2 Convolução por varredura pixel-a-pixel

A convolução entre duas funções discretas, como os pixels de uma imagem, pode ser calculada deslizando-se uma função, geralmente chamada de *kernel*, sobre a outra, como mostrado na Figura 2.2. O resultado da convolução em cada ponto é dado pelo somatório dos produtos elemento-a-elemento da *kernel* e da segunda função.

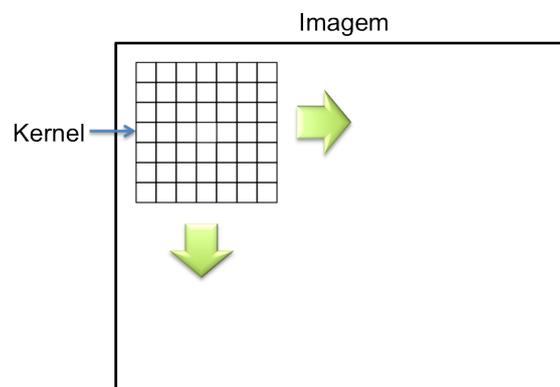


Figura 2.2: Processo de Convolução

O processo de convolução pode ser extremamente lento quando uma ou ambas as funções têm muitos elementos, como no caso de simulação litográfica. Sendo o tamanho da *kernel*  $n_1 \times m_1$  e o tamanho da segunda função  $n_2 \times m_2$ , a complexidade da implementação direta da convolução é  $O(n_1 m_1 n_2 m_2)$  já que para cada um dos  $n_2 \times m_2$  elementos da função são necessários  $n_1 \times m_1$  multiplicações. Desta forma, é necessário o uso de outras técnicas para calcular o resultado da convolução.

## 2.2 Convolução via Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A convolução de duas funções pode ser computada utilizando-se a Transformada Rápida de Fourier (SMITH, 1997). Isso se deve a uma propriedade, descrita no Teorema da Convolução, que diz que a transformada da convolução num domínio é equivalente ao produto das duas funções no outro domínio, como apresentado na Equação (2.4).

$$\mathcal{F}\{f \otimes g\} = \mathcal{F}\{f\} \cdot \mathcal{F}\{g\} \quad (2.4)$$

Através do uso de métodos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) é possível, então, computar a convolução eficientemente com complexidade  $O(N \log N)$ . (UZUN; BOURIDANE, 2003)

Como o sistema de litografia geralmente é mantido constante, a transformada das *kernels* pode ser previamente computada, o que agiliza o processo. A transformada da máscara só precisa ser feita uma vez, já que é igual para todas as convoluções.

Sendo assim, a Equação (2.3) pode ser reescrita como

$$I_k(x, y) = |\mathcal{F}^{-1}\{\Phi(u, v) \cdot M(u, v)\}|^2 \quad (2.5)$$

onde  $\Phi(u, v)$  e  $M(u, v)$  são as transformadas de Fourier da *kernel* e da máscara respectivamente. Esse processo é esquematizado na Figura 2.3.

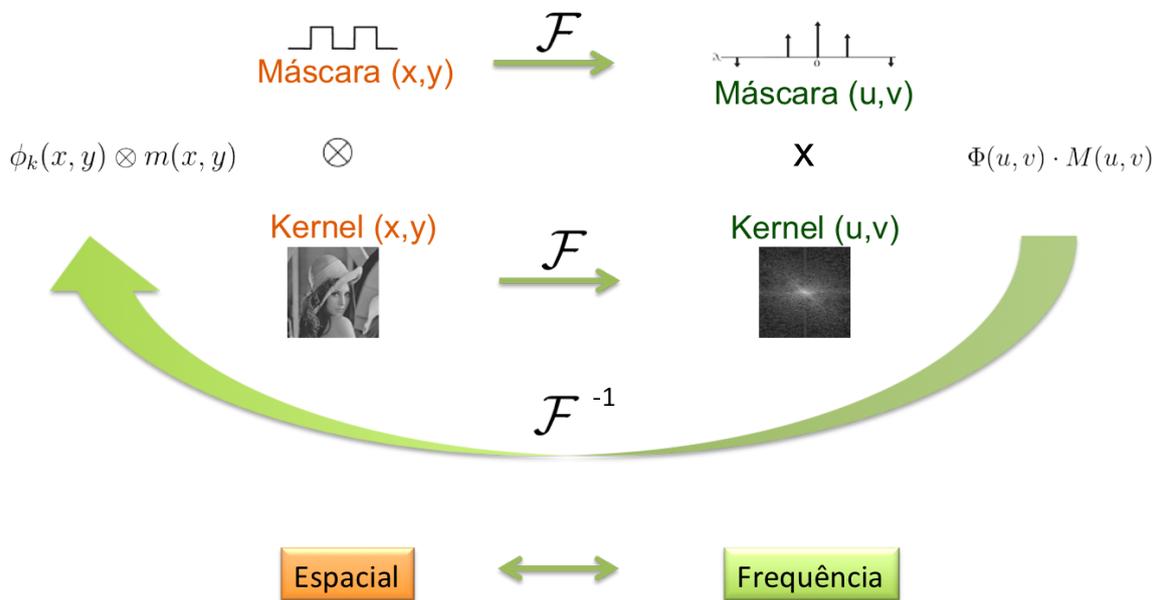


Figura 2.3: Convolução via Transformada de Fourier

### 2.3 Convolução via *look-up table* (LUT)

O leiaute de circuitos integrados é, em geral, composto por retângulos. Isso permite pré-computar o resultado da convolução e armazená-los em *look-up tables* para acelerar o cálculo da convolução (COBB, 1998). Para cada *kernel*, uma *look-up table* é criada. A *look-up table*,  $T(x, y)$  é uma matriz 2D na qual cada elemento  $(x, y)$  armazena a influência (resultado da convolução) do retângulo  $(0, 0) - (x, y)$  no pixel central, como mostrado na Figura 2.4.

A influência de um retângulo qualquer no pixel pode ser obtida decompondo tal retângulo em retângulos iniciados em  $(0, 0)$  como mostra a Figura 2.5.

A operação de computar o impacto de um retângulo  $(x_1, y_1) - (x_2, y_2)$  no pixel da imagem pode ser descrita como:

$$impacto(R) = T(x_2, y_2) + T(x_1, y_1) - T(x_2, y_1) - T(x_1, y_2). \quad (2.6)$$

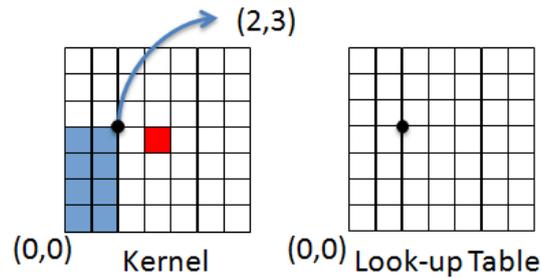


Figura 2.4: Elemento da *look-up table*: LUT armazena o resultado da convolução entre o retângulo (0,0)-(2,3) e a kernel

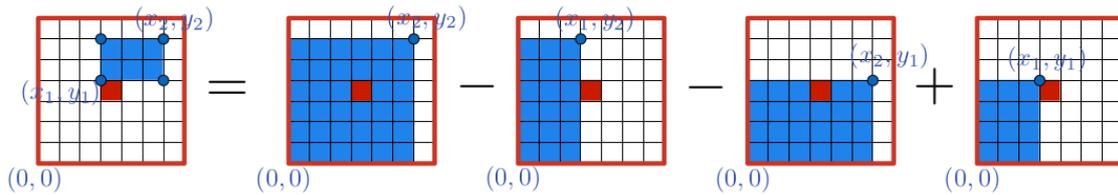


Figura 2.5: A influência de um retângulo  $(x_1, y_1) - (x_2, y_2)$  no pixel central (ZHANG et al., 2011)

Note que um pixel pode ser impactado por mais de um retângulo. Desta forma, a intensidade do pixel é dada por

$$I(x, y) = \sum \text{impacto}(R) \quad (2.7)$$

### 2.3.1 Construindo a *look-up table* (LUT)

Para calcular cada entrada da *look-up table* é possível usar o valor da convolução computada anteriormente de forma recursiva, de maneira que não seja necessário executar uma varredura completa da *kernel* para cada entrada.

A *look-up table* pode ser contruída eficientemente através da função recursiva apresentada na Equação (2.8), onde  $T(x, 0) = T(0, y) = 0$ .

$$T(x, y) = K(x - 1, y - 1) + T(x - 1, y) - T(x - 1, y - 1) + T(x, y - 1) \quad (2.8)$$

Esste processo é demonstrado na Figura 2.6.

### 2.3.2 Algoritmo para Convolução usando *Look-up Table* (LUT)

Ao usar *look-up tables* o foco sai da varredura dos pixels, como na convolução direta, para varredura dos retângulos. Cada *kernel* gera uma *look-up table*, de forma que teremos o mesmo número de *look-up tables* do que de *kernels*.

Cada retângulo que compõem a máscara impacta nos pixels em seu interior e em alguns em sua volta. Note que um pixel pode ser, e em geral é, impactado por mais de um retângulo.

A zona de impacto de um retângulo pode ser definida como a extensão do retângulo em metade do comprimento da kernel,  $W_T$ , para ambos os lados, como mostra a Figura 2.7. Isso porque pixels fora dessa região não são alcançáveis mais pela kernel que tem um tamanho limitado e, desta forma não são afetados pelo retângulo em questão.

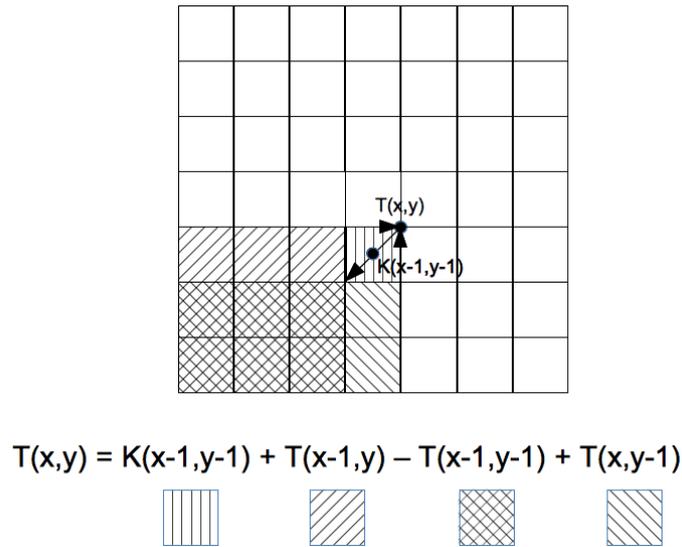


Figura 2.6: Construção eficiente da *look-up table*

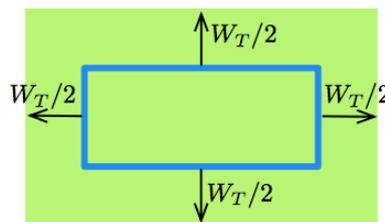


Figura 2.7: Zona de impacto de um retângulo (WU et al., 2013)

O Algoritmo 1 apresenta o método de convolução via *look-up tables*. Para cada *kernel*, todos os retângulos são visitados. Primeiramente a região de impacto do retângulo é calculada. Então para cada pixel na região de impacto, é aplicada a Equação (2.7). Contudo, antes da aplicação da fórmula, o retângulo deve ser truncado em relação ao kernel, como apresentado na Figura 2.8.

Ao final, o módulo dos valores computados para cada pixel são elevados ao quadrado e então ponderados por  $\sigma_k$  antes de serem somados.

## 2.4 Escolha do Método de Convolução

Como visto, aplicar o método de convolução por varredura pixel-a-pixel diretamente é extremamente ineficiente e impraticável. Neste Capítulo foram apresentados dois métodos para aplicar a convolução de forma mais eficiente: via LUT e via FFT. Cada um deles possui vantagens e desvantagens que devem ser analisadas ao se definir o método de convolução.

O método via LUT limita-se a máscaras compostas por retângulos, enquanto o método via FFT pode tratar qualquer tipo de imagem. Entretanto isso não chega a ser uma desvantagem para o método usando LUT, já que as máscaras de circuitos são, em geral, projetadas usando apenas retângulos.

O tempo de execução do método usando LUT varia conforme o número de retângulos na máscara e suas dimensões. Por outro lado, a FFT depende basicamente do número

---

**Algoritmo 1:** Algoritmo base do método via *look-up tables* (WU et al., 2013)

---

```

for  $k = 0$  to  $K - 1$  do
  for each rectangle  $R$  do
    Impact region  $G \leftarrow$  extend  $R$  by  $W_T/2$ 
    for each pixel  $(x, y)$  inside the impact region do
       $x_{ori} = x - W_T/2$ 
       $y_{ori} = y - W_T/2$ 
       $R' \leftarrow$  compute the relative positions of  $R$  to  $(x_{ori}, y_{ori})$ 
       $R_t \leftarrow$  truncate  $R'$  at four sides of the lookup table
       $E[k][y][x] += T_k[R_t \cdot top][R_t \cdot right]$ 
       $E[k][y][x] - T_k[R_t \cdot top][R_t \cdot left]$ 
       $E[k][y][x] - T_k[R_t \cdot bottom][R_t \cdot right]$ 
       $E[k][y][x] + T_k[R_t \cdot bottom][R_t \cdot left]$ 
    end
  end
  for each pixel  $(x, y)$  in the image do
     $I[y][x] += \sigma_k \cdot (E[k][y][x])^2$ 
  end
end

```

---

de pixels da máscara. Ou seja, para um conjunto de máscaras com o mesmo tamanho de máscara, mas com diferentes números de retângulos, o tempo da FFT se manterá constante, já o tempo da LUT variará.

O tamanho da kernel no domínio espacial afeta diretamente o método via LUT, pois a área de impacto de um retângulo é determinada pelo tamanho da kernel. Mas o tamanho da kernel tem menor influência no método via FFT, onde apenas uma multiplicação pixel-a-pixel entre máscara e kernel é necessária.

Uma facilidade para o desenvolvimento do método via FFT é que diversas bibliotecas de FFT extremamente eficientes já estão disponíveis, inclusive com versões para placas gráficas.

Um dos benefícios do método via look-up table é que o mesmo é incremental, ou seja, se for necessário pode-se aproveitar o resultado parcial da simulação e recomputar somente a parte que sofreu alterações na máscara, diferentemente do método via FFT onde é necessário refazer toda a simulação (ou seja, fazer a FFT de toda a imagem levando-a para o domínio frequência).

Desta forma, o método de FFT é preferível quando apenas uma ou poucas simulações são necessárias. Por outro lado, métodos incrementais que acionam diversas simulações para convergir para uma solução vão preferir usar o método via LUT.

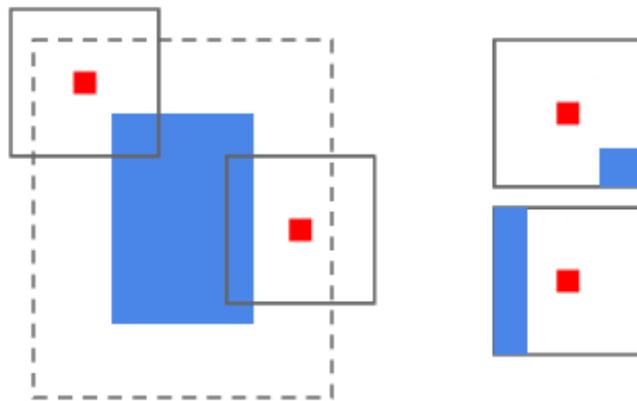


Figura 2.8: Processamento do impacto de um retângulo usando *look-up tables*.



### 3 FORMAÇÃO DA IMAGEM AÉREA

No Capítulo 2, vimos que um sistema litográfico, matematicamente, pode ser aproximado por uma série de convoluções entre a função que descreve a máscara do circuito e funções que descrevem o sistema litográfico em si. Neste capítulo, apresentamos os conceitos básicos da formação da imagem aérea na litografia óptica e como a Equação (3.1) (WU et al., 2013) é derivada.

$$I_{total}(x, y) = \sum_{k=1}^K \sigma_k |\phi_k(x, y) \otimes m(x, y)|^2 \quad (3.1)$$

Note que a intensidade de luz total pode ser vista como o somatório ponderado de intensidades parciais

$$I_{total}(x, y) = \sum_{k=1}^K \sigma_k I_k(x, y) \quad (3.2)$$

onde a intensidade do campo elétrico do wafer é definida por

$$I_k(x, y) = |E(x, y)|^2 \quad (3.3)$$

Inicialmente será descrita a propriedade da transformada de Fourier das lentes que dá o plano de fundo matemático para as discussões que seguem. Para exemplificar será usado um exemplo de um sistema litográfico sem redução<sup>1</sup>, e com apenas uma fonte de iluminação pontual alinhada ao eixo do sistema. A seguir, descreveremos o efeito da iluminação fora de eixo. Então será discutido a formação da imagem aérea incluindo fontes de iluminação não pontuais de formatos arbitrários. Isso dará o conhecimento necessário para entender como a Equação (3.1) é derivada. Depois será falado de como o fator de escala afeta a imagem projetada e, por fim, serão introduzidas brevemente as aberrações que afetam um sistema litográfico.

#### 3.1 A Propriedade de Transformada de Fourier das Lentes

Um dos principais componentes de um sistema litográfico são as lentes. A transformada de Fourier das lentes é usada para entender o sistema litográfico e derivar a Equação (3.1).

Quando um objeto é colocado em frente a uma lente no seu plano focal, a transformada de Fourier do objeto é gerado no plano focal por trás da lente (MACK, 2007), como ilustrado pela Figura 3.1.

<sup>1</sup>A máscara e a imagem projetada têm as mesmas dimensões.

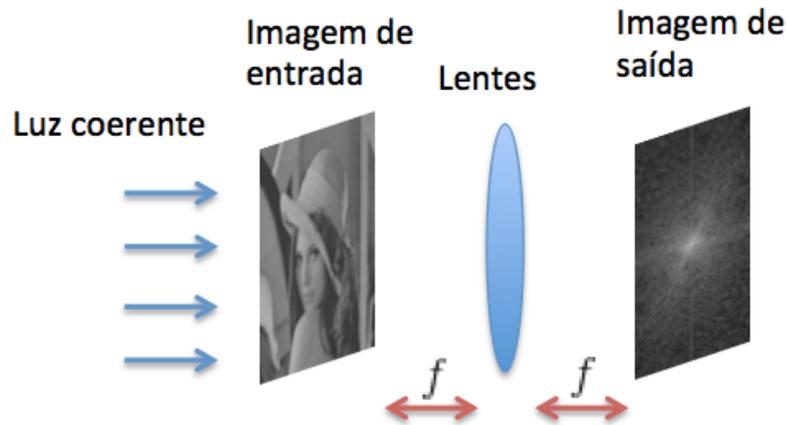


Figura 3.1: Propriedade de Transformada de Fourier das Lentes

### 3.2 Sistema de Litografia Óptica

A Figura 3.2 mostra um diagrama esquemático de alto nível de um sistema de litografia.

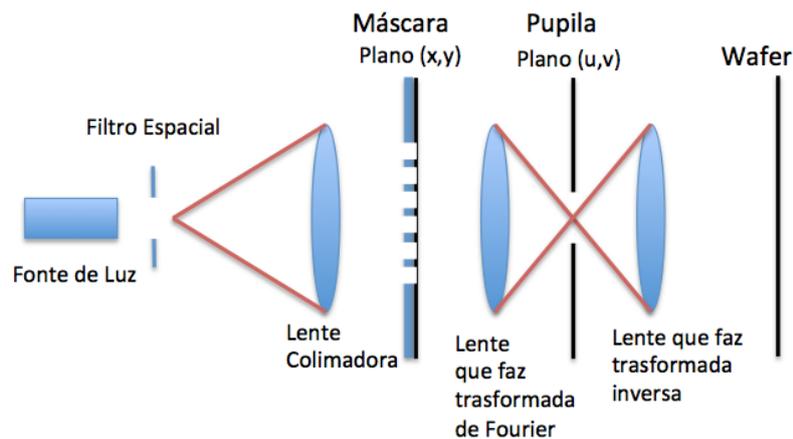


Figura 3.2: Esquemático de um sistema de litografia óptica

O sistema de litografia tem três lentes ideais: (1) lente colimadora; (2) lente que faz a transformada de Fourier e (3) a lente que faz a transformada inversa. Mas em um sistema real, existem várias lentes e cada lente ideal no esquemático é de fato implementada por um conjunto de lentes. São definidos três planos: (1) plano da máscara, (2) plano da pupila e (3) plano do *wafer*. As etapas de projeção são resumidas na Tabela 3.1. Mais detalhes são apresentados a seguir.

### 3.3 Etapas da Projeção

Inicialmente assume-se uma única fonte de luz pontual alinhada ao eixo horizontal do sistema litográfico.

A fonte de luz pontual gera raios divergentes, os quais são capturados pela primeira lente e colimados. Desta forma, os raios passam a propagarem paralelamente a partir da primeira lente do sistema até atingirem a máscara.

Ao alcançarem a máscara, as ondas são difratadas ao passarem pelas fissuras (padrão).

Tabela 3.1: Detalhes do esquemático de um sistema de litografia óptica da Figura 3.2

Lente Colimadora	Colima <sup>2</sup> os raios oriundos da fonte de luz.
Plano da Máscara	Difrata os planos de ondas vindos do colimador.
Lente Transformadora	Gera a transformada do padrão da máscara.
Plano da Pupila	Filtra altas frequências.
Lente Transformadora Inversa	Gera a transformada inversa das ondas filtradas
Plano do <i>Wafer</i>	Padrão projetado.

Os raios difratados são então capturados pela segunda lente e projetados no plano da pupila. O resultado dessa projeção é a transformada de Fourier da máscara, como mostrado na Equação (3.4).

$$M(u, v) = \mathcal{F} \{m(x, y)\} \quad (3.4)$$

A frequência espacial dos raios é definida pela Equação (3.5) onde  $\theta_x$  e  $\theta_y$  são os ângulos de propagação do raio em relação ao eixo horizontal do sistema litográfico e  $n$  é o índice de refração do meio, como exemplificado na Figura 3.3.

$$(u, v) = \left( \frac{n \sin \theta_x}{\lambda}, \frac{n \sin \theta_y}{\lambda} \right) \quad (3.5)$$

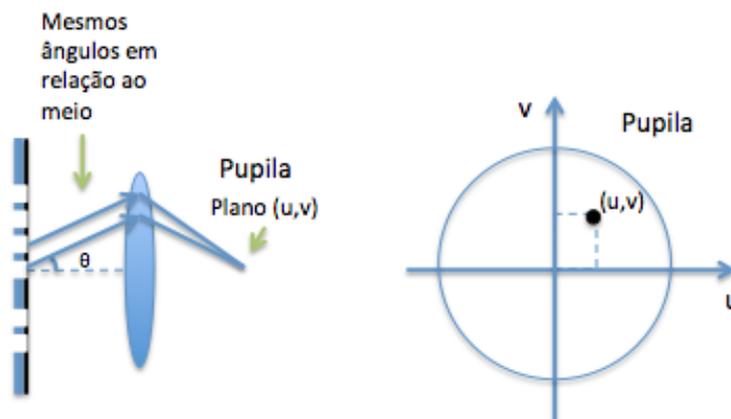


Figura 3.3: A frequência espacial de  $(u,v)$ : todos os pontos viajando que tem o mesmo ângulo são mapeados para o mesmo ponto no plano da pupila

No plano da pupila, os raios de maior ordem, i.e. os mais inclinados em relação ao eixo do sistema, são filtrados. A quantidade de raios filtrados está relacionada com a abertura numérica (NA) do sistema que é definida pela Equação (3.6) (MACK, 2007).

$$NA = n \sin \theta_{max} \quad (3.6)$$

Abertura numérica (NA)<sup>3</sup> define o cone máximo de luz que entra na lente, de forma que as mais altas frequências são sempre perdidas. Este efeito causa a perda de resolução, mas por outro lado, melhora a profundidade de foco (*DOF*). De fato, sistemas litográficos

<sup>3</sup>Pode-se aumentar o NA através da litografia por imersão (MACK, 2007).

contam com filtros de altas frequências, chamado pupila, que é escolhido para balancear a perda de resolução com a profundidade de foco (*DOF*). A filtragem pode ser descrita pela multiplicação da transformada de Fourier da máscara  $M(u, v)$  pela função  $P(u, v)$  que descreve a pupila como indica a Equação (3.7).

$$M(u, v)P(u, v) \quad (3.7)$$

A função  $P(u, v)$  retorna 1 para as frequências não filtradas e 0 para frequências filtradas. Supondo uma pupila com abertura circular, a função  $P(u, v)$  pode ser definida como na Equação (3.8).

$$P(u, v) = \begin{cases} 1, & \sqrt{u^2 + v^2} \leq NA/\lambda \\ 0, & \sqrt{u^2 + v^2} > NA/\lambda \end{cases} \quad (3.8)$$

Os raios restantes se propagam até a terceira lente que executa sua transformada de Fourier como descrito na Equação (3.9)<sup>4</sup>.

$$E(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \{M(u, v)P(u, v)\} \quad (3.9)$$

Usando o Teorema da Convolução, pode-se reescrever  $E(x, y)$  como na Equação (3.10). Note que  $\mathcal{F}^{-1} \{M(u, v)\} = m(x, y)$ . Já é possível perceber que a Equação (3.10) lembra a Equação (2.1).

$$\begin{aligned} E(x, y) &= \mathcal{F}^{-1} \{M(u, v)\} \otimes \mathcal{F}^{-1} \{P(u, v)\} \\ &= m(x, y) \otimes \mathcal{F}^{-1} \{P(u, v)\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Considerando a abertura circular apresentada na Equação (3.8), pode-se reescrever  $P(u, v)$  no domínio espacial como indica a Equação (3.11) (MACK, 2007)

$$\mathcal{F}^{-1} \{P(u, v)\} = \frac{J_1(2\pi\rho)}{\pi\rho} \quad (3.11)$$

onde  $J_1$  é a função Bessel do primeiro tipo e  $\rho$  é a distância Euclidiana de  $(0, 0)$  a  $(x, y)$ , ou seja,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ . Note que  $\lim_{\rho \rightarrow 0} \frac{J_1(2\pi\rho)}{\pi\rho} = 1$ . A Figura 3.4 apresenta a magnitude da Equação (3.11).

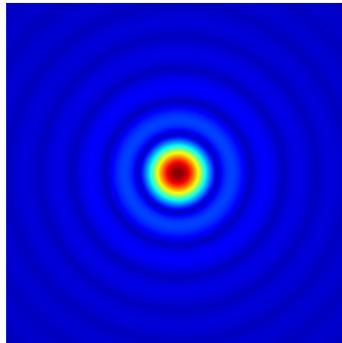


Figura 3.4: Magnitude da Kernel

<sup>4</sup>A lente executará a transformada de Fourier o que, na prática, resultará no padrão de cabeça para baixo. Como, para fins de simulação litográfica, essa inversão não é relevante, usamos a transformada de Fourier inversa.

### 3.4 Iluminação Fora-de-Eixo

Até agora, considerou-se uma fonte de luz pontual alinhada ao eixo do sistema. Essa proposição levou a derivação da Equação (3.10). Aqui serão mantidas as mesmas premissas da seção anterior, exceto a de alinhamento da fonte de luz, onde a iluminação fora-de-eixo causa um deslocamento do espectro da máscara

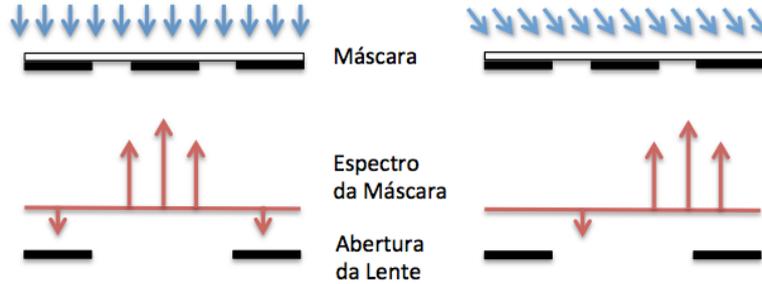


Figura 3.5: Deslocamento do Espectro da Máscara Causado pela Iluminação Fora-de-Eixo

O deslocamento da fonte de luz pontual em relação ao eixo causa o deslocamento do espectro da máscara<sup>5</sup>, como ilustrado na Figura 3.5. Desta forma, aplicando a filtragem pela pupila obtém-se a Equação (3.12)

$$M(u - d_u, v - d_v)P(u, v) \quad (3.12)$$

Como é mostrado no Apêndice A, a intensidade de luz dado um deslocamento no espectro da máscara, pode ser visto como o mesmo deslocamento, em direção oposta, da função pupila. Sendo assim, a Equação (3.12) pode ser reescrita como na Equação (3.13).

$$M(u, v)P(u + d_u, v + d_v) \quad (3.13)$$

Desta forma, o campo elétrico no *wafers* é descrito pela Equação (3.14)

$$E(x, y, d_u, d_v) = \mathcal{F}^{-1} \{M(u, v)P(u + d_u, v + d_v)\} \quad (3.14)$$

sendo que ao aplicar o Teorema de Deslocamento em  $P(u + d_u, v + d_v)$  obtém-se

$$P(u + d_u, v + d_v) = P(u, v)e^{-2\pi i(d_u + d_v)} \quad (3.15)$$

Por fim, se usar o Teorema da Convolução, a Equação (3.14) pode ser reescrita no domínio espacial, como na Equação (3.16).

$$E(x, y, d_u, d_v) = m(x, y) \otimes \mathcal{F}^{-1} \{P(u, v)e^{-2\pi i(d_u + d_v)}\} \quad (3.16)$$

Considerando a abertura circular apresentada na Equação (3.8), pode-se reescrever a função da pupila deslocada, no domínio espacial, como indica a Equação (3.17). Observe que, se  $d_u = d_v = 0$ , a Equação (3.17) é equivalente à Equação (3.11).

$$\mathcal{F}^{-1} \{P(u, v)e^{-2\pi i(d_u + d_v)}\} = \frac{J_1(2\pi\rho)}{\pi\rho} e^{2\pi i(xd_u + yd_v)} \quad (3.17)$$

<sup>5</sup>Sob a condição de Kirchhoff.

A Figura 3.6 mostra o efeito de deslocamento do espectro na fase da função pupila no domínio espacial. A magnitude não se altera com o deslocamento do espectro, desta forma, a magnitude é exatamente como a mostrada anteriormente na Figura 3.4.

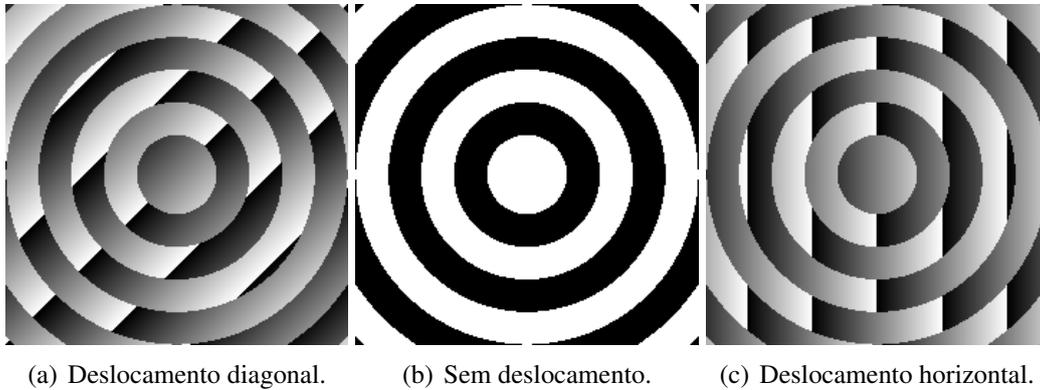


Figura 3.6: Efeito de deslocamento do espectro na fase da função pupila no domínio espacial

### 3.5 Iluminação com Fonte de Forma Arbitrária

É considerado até aqui apenas uma fonte de luz pontual de cada vez, entretanto, sistemas de litografia óptica usam fontes de luz não-pontuais. Esse tipo de fonte dá origem a diversos planos de onda que atingem a máscara em diferentes ângulos. O objetivo é aumentar a resolução do sistema através da captura de altas frequências devido ao deslocamento do espectro, como ilustrado na Figura 3.7.

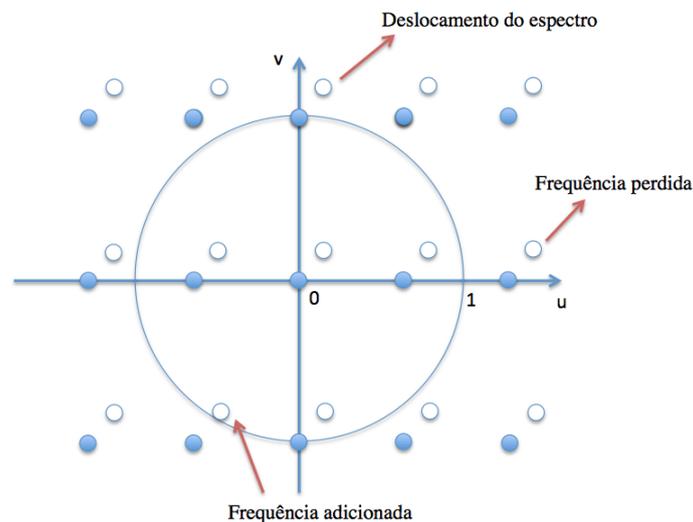


Figura 3.7: Aumento da resolução através da captura de frequências de mais alta ordem

#### 3.5.1 Fonte de Iluminação Efetiva

A maneira comumente utilizada para descrever a fonte de iluminação de um sistema óptico é através da fonte de iluminação efetiva, a qual descreve a fonte de iluminação como vista no plano da pupila caso a máscara não estivesse posicionada. Exemplos de formas de fonte de iluminação comumente utilizados são mostrados na Figura 3.8.

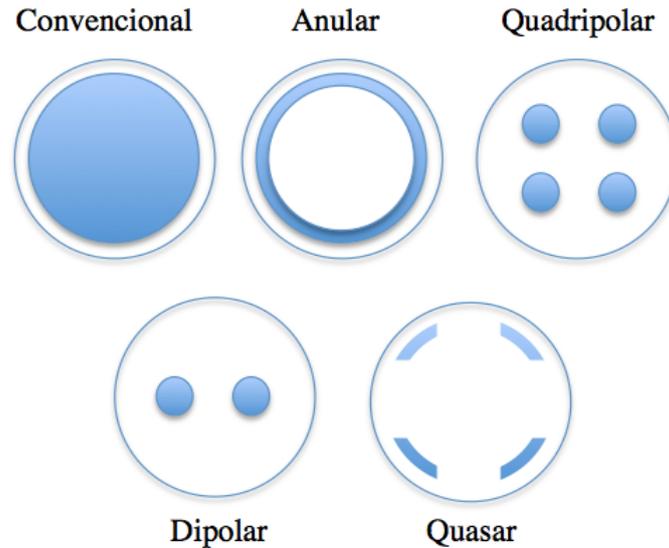


Figura 3.8: Formas de Iluminação Típicas em um Sistema de Litografia

Cada ponto na fonte de iluminação efetiva dá origem a um plano de ondas cujas ondas são coerentes entre si. Entretanto, ondas pertencentes a planos de ondas gerados por pontos espacialmente separados são incoerentes, de forma que não interferem um com o outro, mantendo a iluminação uniformemente distribuída no *wafers*. Os sistemas de litografia são cuidadosamente projetados para terem essa propriedade (MACK, 2007).

A distribuição de intensidade de uma fonte efetiva é dada pela função  $S(u, v)$ . A função de distribuição de intensidade pode ser normalizada de forma que  $\iint S(u, v) du dv = 1$ . Neste trabalho, optou-se por não usar tal normalização, evitando mais termos nas fórmulas.

### 3.6 Métodos de Integração para a Formação da Imagem

Usando a definição de fonte efetiva pode-se definir a intensidade de luz, atingindo cada ponto do *wafers* através da Equação (3.18).

$$I_{total}(x, y) = \iint I_s(x, y) S(u_s, v_s) du_s dv_s \quad (3.18)$$

Dois métodos para calcular a integral na Equação (3.18) são encontrados na literatura: Abbé e Hopkins. Eles diferem na ordem com que as diversas integrais (algumas escondidas na transformada de Fourier) são calculadas (ADAM, 2001).

#### 3.6.1 Método de Abbé (Discretização da Fonte)

O método de Abbé, também conhecido como método de discretização da fonte ou método de integração de fontes pontuais, discretiza diretamente a fonte de iluminação em fontes pontuais como ilustrado na Figura 3.9. Cada fonte pontual gera uma imagem parcial que então são somadas para gerar a imagem final (ADAM, 2001).

Cada fonte pontual dá origem a um plano de ondas coerentes, mas que é considerada mutuamente incoerente com as outras fontes pontuais. Desta forma, após a discretização, a Equação (3.18) é diretamente transformada no somatório apresentado na Equação (3.19).

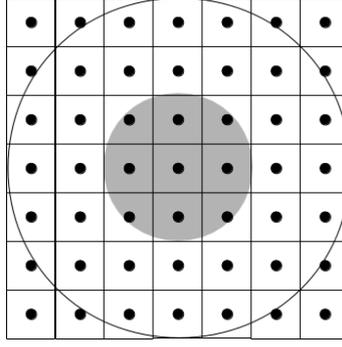


Figura 3.9: Discretização da Fonte

$$I_{total}(x, y) = \sum_s \sigma_s I_s(x, y) \quad (3.19)$$

Aplicando a Equação (3.16) na Equação (3.19) recupera-se a Equação (2.1), conforme a Equação (3.20). Note que cada fonte pontual dá origem a um *kernel*.

$$I_s(x, y) = |\phi_k(x, y) \otimes m(x, y)|^2 \quad (3.20)$$

então

$$I_{total}(x, y) = \sum_s \sigma_s |\phi_k(x, y) \otimes m(x, y)|^2 \quad (3.21)$$

### 3.6.2 Método de Hopkin (Coeficientes de Transmissão Cruzados, TCC, do inglês, *Transmission Cross Coefficient*)

No método de Hopkin, a Equação (3.18) é reformulada em termos de uma quantidade chamada de Coeficientes de Transmissão Cruzados (TCC, do inglês, *Transmission Cross Coefficient*). Essa quantidade caracteriza completamente o fenômeno de formação da imagem do sistema litográfico, exceto pelo efeito de difração causado pela máscara, o que é levado em conta posteriormente (ADAM, 2001).

Usando a propriedade de que um deslocamento no espectro da máscara, causado pela iluminação fora de eixo, é matematicamente equivalente a um deslocamento da pupila em direção oposta, mantendo-se o espectro da máscara fixo, a Equação (3.18) pode ser reescrita como (mais detalhes dessa derivação são apresentados no Apêndice B):

$$I_{total}(x, y) = \iiint TCC(u_1, v_1; u_2, v_2) M(u_1, v_1) M^*(u_2, v_2) e^{2\pi i[(u_1 - u_2)x + (v_1 - v_2)y]} du_1 dv_1 du_2 dv_2 \quad (3.22)$$

onde

$$TCC(u_1, v_1; u_2, v_2) = \iint P(u_1 + u_s, v_1 + v_s) P^*(u_2 + u_s, v_2 + v_s) S(u_s, v_s) du_s dv_s. \quad (3.23)$$

Fisicamente, o TCC pode ser visto como a descrição da intensidade de como dois pontos distintos na pupila contribuem para a formação da imagem (MACK, 2007). Outra maneira de enxergar o TCC é como o somatório total de intensidade da fonte de iluminação efetiva que se situa dentro da interseção dos dois círculos definidos pelas funções da pupila com centro em  $(u_1, v_1)$  e  $(u_2, v_2)$  como ilustrado na Figura 3.10 para uma fonte de iluminação em formato convencional (WONG, 2001)

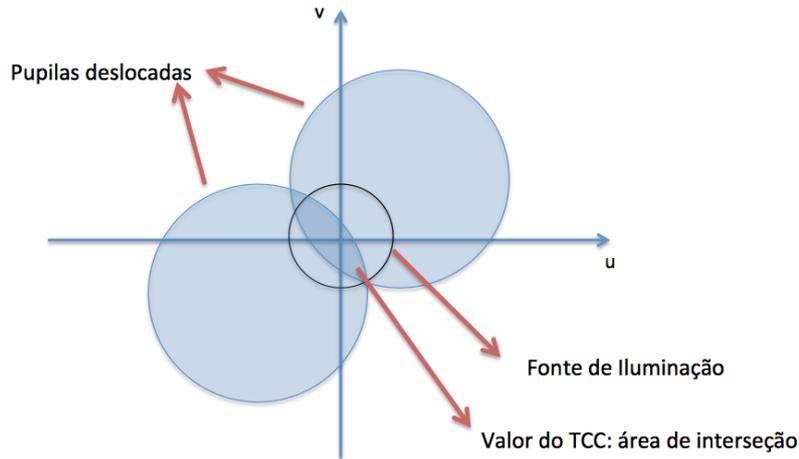


Figura 3.10: O TCC é proporcional à sobreposição das pupilas deslocadas e à fonte de iluminação.

A Equação (3.22) é zero sempre que o suporte das três funções não se sobrepõem e, desta forma, pode ser discretizada em um número finito de pontos. Supondo que o número de pontos de amostragem no plano da pupila seja  $(n, n)$ , a Equação (3.22) pode ser escrita em uma forma discretizada como

$$I_{total}(x, y) = \sum_{i_1=1}^n \sum_{j_1=1}^n \sum_{i_2=1}^n \sum_{j_2=1}^n TCC(u_{i_1}, v_{j_1}; u_{i_2}, v_{j_2}) M(u_{i_1}, v_{j_1}) M^*(u_{i_2}, v_{j_2}) e^{2\pi i [(u_{i_1} - u_{i_2})x + (v_{j_1} - v_{j_2})y]} \quad (3.24)$$

sendo que, para um mesmo intervalo de amostragem, os pontos discretizados podem ser definidos como

$$u_i = v_i = -uv_{max} + \frac{2uv_{max}}{n-1}(i-1) \quad (3.25)$$

onde  $u_{max}$  e  $v_{max}$  são definidos como na Figura 3.11 e  $uv_{max} = \max\{u_{max}, v_{max}\}$ .

A Equação (3.24) pode ser escrita em forma matricial, usando o operador de empilhamento definido no Apêndice C, como

$$I_{total}(x, y) = \hat{M} \hat{T} \hat{M}^* \quad (3.26)$$

onde  $*$  indica a transposta conjugada, sendo

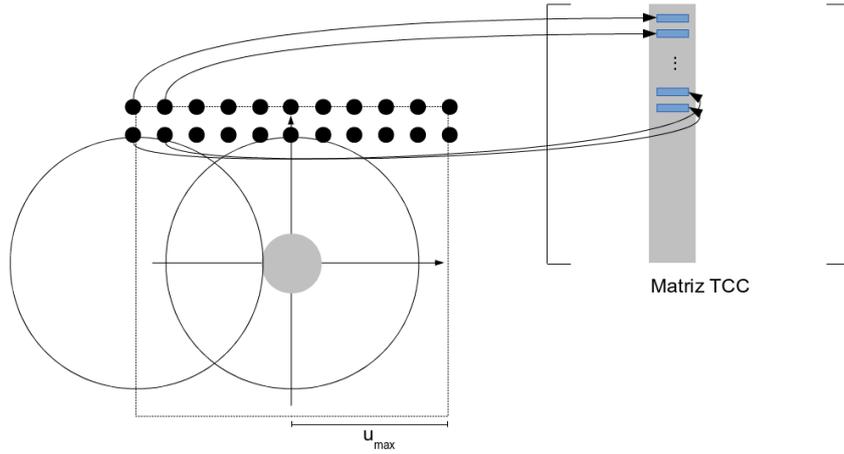


Figura 3.11: Região de suporte da função TCC.

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{Y}[TCC(u_{i_1}, v_{j_1}; u_{i_2}, v_{j_2})] = \begin{bmatrix} T_{1,1;1,1} & T_{1,1;2,1} & \cdots & T_{1,1;n,1} & T_{1,1;1,2} & \cdots & T_{1,1;n,2} \\ T_{2,1;1,1} & \ddots & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ T_{n,1;1,1} & & & & & & \\ T_{1,2;1,1} & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ T_{n,n;1,1} & & & & & & \\ & & & & & & T_{n,n;n,n} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

onde  $T_{i_1, j_1; i_2, j_2} = TCC(u_{i_1}, v_{j_1}; u_{i_2}, v_{j_2})$  por simplicidade e

$$\hat{\mathbf{M}} = \mathbf{Y}[M(u_i, v_j)e^{2\pi i(u_i x + v_j y)}]^\top = \begin{bmatrix} M(u_1, v_1)e^{2\pi i(u_1 x + v_1 y)} \\ M(u_2, v_1)e^{2\pi i(u_2 x + v_1 y)} \\ \vdots \\ M(u_n, v_1)e^{2\pi i(u_n x + v_1 y)} \\ M(u_1, v_2)e^{2\pi i(u_1 x + v_2 y)} \\ \vdots \\ M(u_n, v_n)e^{2\pi i(u_n x + v_n y)} \end{bmatrix}^\top \quad (3.28)$$

Note que cada coluna de  $\hat{\mathbf{T}}$  representa a interseção dos dois círculos da pupila e a fonte efetiva de iluminação sendo que o primeiro círculo varia em cada posição discretizada  $(u_{i_1}, v_{j_1})$  e o segundo fixo em  $(u_{i_2}, v_{j_2})$ .

### 3.6.2.1 Aproximação por Decomposição em Valores Singulares

O método de Decomposição em Valores Singulares (SVD, do inglês, *Singular Value Decomposition*) permite reescrever uma matriz, de forma que seja possível separar dados mais importantes de menos importantes, possibilitando assim, descartar os componentes menos importantes e obter uma boa aproximação da matriz usando menos componentes.

A matriz  $\hat{\mathbf{T}}$  pode ser reescrita usando SVD (COBB, 1998) tal que

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^* \quad (3.29)$$

onde  $U$  é uma matriz unitária  $n^2 \times n^2$  real ou complexa,  $\Sigma$  é uma matriz diagonal  $n^2 \times n^2$  com números reais não-negativos na diagonal, e  $V^*$  é uma matriz unitária  $n^2 \times n^2$  real ou complexa.

Sendo a matriz  $\hat{T}$  simétrica e positiva-semi-definida (GONG et al., 2012), tem-se  $U = V^*$ , de forma que a SVD é, neste caso, equivalente à decomposição em autovetores

$$\hat{T} = U\Sigma V^* = V\Sigma V^* = \sum_{k=1}^{N^2} \sigma_k V_k V_k^* \quad (3.30)$$

onde  $\sigma_k$  é o enésimo autovalor de  $\hat{T}$  sendo que  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{n^2}$  e  $V_k$  é o enésimo autovetor associado a  $\sigma_k$ . Desta forma

$$\begin{aligned} I_{total}(x, y) &= \hat{M}\hat{T}\hat{M}^* \\ &= \hat{M} \left( \sum_{k=1}^{N^2} \sigma_k V_k V_k^* \right) \hat{M}^* \\ &= \sum_{k=1}^{N^2} \sigma_k \hat{M} V_k V_k^* \hat{M}^* \\ &= \sum_{k=1}^{N^2} \sigma_k (\hat{M} V_k) (\hat{M} V_k)^* \\ &= \sum_{k=1}^{N^2} \sigma_k \left| \hat{M} V_k \right|^2. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Note que, na Equação (3.31),  $I_{total}(x, y)$  é descrito como o somatório ponderado do produto escalar entre o vetor  $\hat{M}$  e os vetores  $V_k$ . Usando o operador de empilhamento inverso, pode-se rescrever o produto escalar  $\hat{M} V_k$  usando funções discretas como

$$\hat{M} V_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M(u_i, v_j) \Phi_k(u_i, v_j) e^{2\pi i(u_i x + v_j y)} \quad (3.32)$$

onde  $\Phi_k = \mathbf{Y}^{-1}[V_k]$  tal que  $\Phi_k(u_i, v_j) = V_k[i + n(j - 1)]$ .

Reconhecendo que a Equação (3.32) descreve uma transformada discreta de Fourier inversa tem-se que

$$\hat{M} V_k = \mathcal{F}^{-1} \{M(u_i, v_j) \Phi_k(u_i, v_j)\} \quad (3.33)$$

a qual, usando o Teorema da Convolução, pode ser reescrita, no domínio espacial, como

$$\hat{M} V_k = m(x, y) \otimes \phi_k(x, y). \quad (3.34)$$

Finalmente, aplicando a Equação (3.34) na Equação (3.31), obtém-se

$$\sum_{k=1}^{n^2} \sigma_k |m(x, y) \otimes \phi_k(x, y)|^2. \quad (3.35)$$

A Equação (3.35) indica que os *kernels* são dados pela transformada inversa de Fourier dos vetores  $V_k$  desempilhados. A grande vantagem do método SVD é que os valores de  $\sigma_k$  tendem a decair rapidamente (como pode-se observar na Figura 3.14), de forma

que uma boa aproximação para  $I_{total}(x, y)$  pode ser obtida levando em conta apenas *kernels* associadas aos primeiros  $\sigma_k$ . A Figura 3.13 mostra os *Kernels*, gerados através da decomposição em valores singulares (SVD) da matriz TCC, em ordem decrescente de importância.

O fluxo para a geração de kernels a partir da matriz TCC pode ser exemplificado como na Figura 3.12.

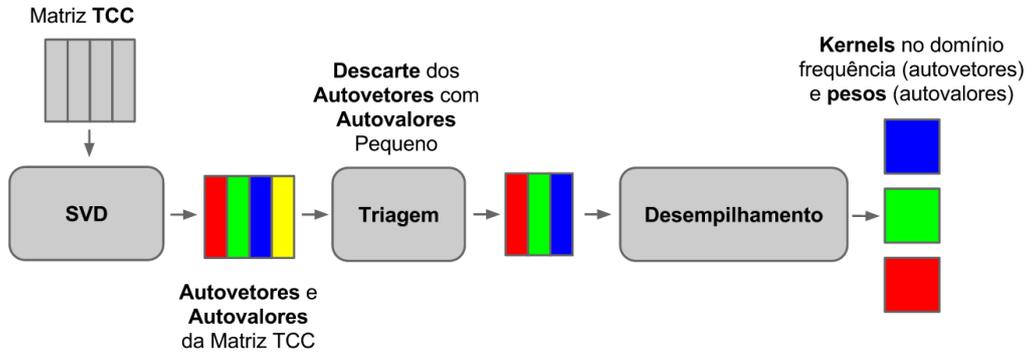


Figura 3.12: Fluxo para a geração de kernels usando Matriz TCC

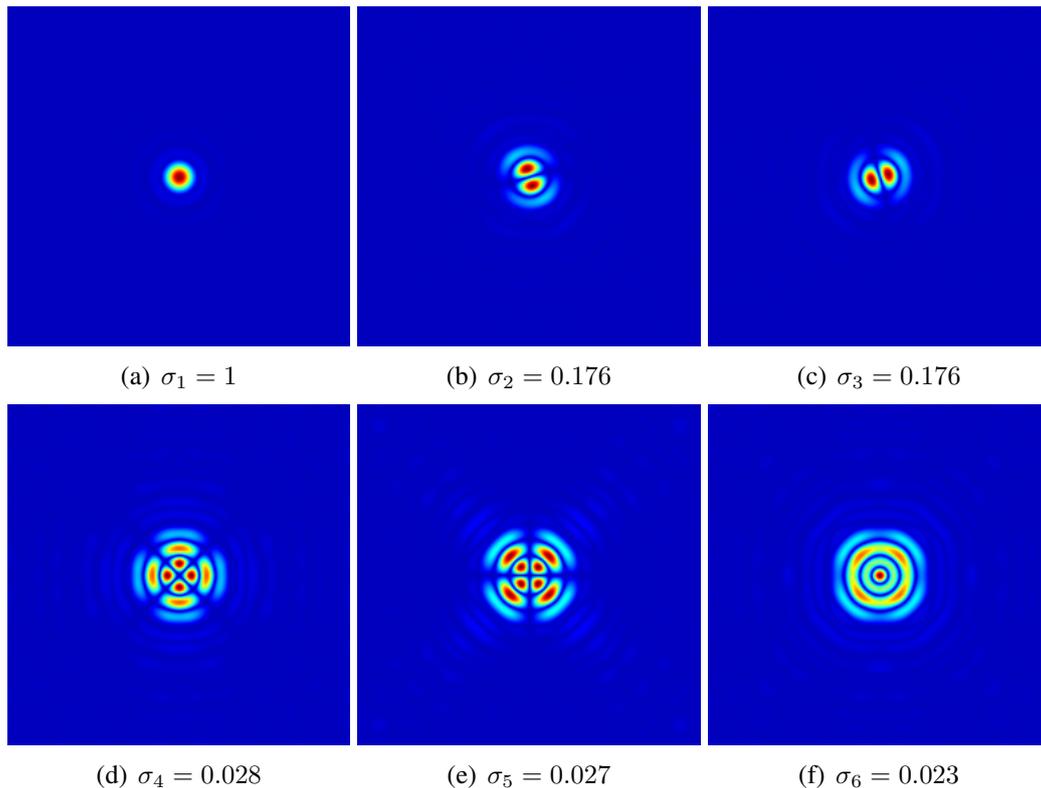


Figura 3.13: *Kernels*, em ordem decrescente de importância, gerados através da decomposição em valores singulares (SVD) da matriz TCC.

### 3.6.3 Construção da Matriz TCC via Operador da Pupila Empilhado

Yamazoe (YAMAZOE, 2008) apresentou um método elegante para construção da matriz  $\hat{T}$  sem necessidade de calcular a dupla integral na Equação (3.23).

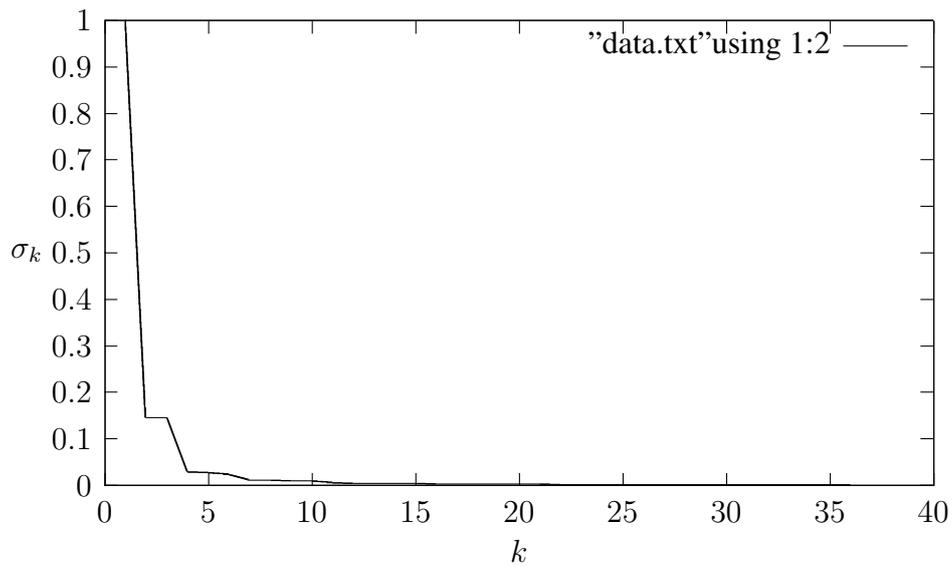


Figura 3.14: Decaimento dos Autovalores da Matriz TCC

Para formas de fonte efetivas tradicionais, como as mostradas na Figura 3.8, e assumindo que a intensidade da fonte é igual em cada um dos pontos, existem fórmulas fechadas para calcular a dupla integral. Entretanto, quando se leva em conta formas de fontes arbitrárias ou, principalmente, quando se usa mapa de intensidades para descrever a intensidade de cada ponto da fonte, pode ser interessante evitar computar a dupla integral.

Como mostrado na Equação (3.19), o sistema litográfico pode ser descrito como um somatório de imagens parciais formadas por fontes de luz pontuais. Pode-se reescrever  $I_s(x, y)$  em forma matricial

$$I_s(x, y) = \hat{\mathbf{M}}\hat{\mathbf{P}}_s \quad (3.36)$$

onde

$$\hat{\mathbf{P}}_s = \mathbf{Y}[P(u_i + u_s, v_j + v_s)] = \begin{bmatrix} P(u_1 + u_s, v_1 + v_s) \\ P(u_2 + u_s, v_1 + v_s) \\ \vdots \\ P(u_n + u_s, v_1 + v_s) \\ P(u_1 + u_s, v_2 + v_s) \\ \vdots \\ P(u_n + u_s, v_n + v_s) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Supondo que temos  $n^2$  imagens parciais (ou  $n^2$  fontes de luz pontuais), pode-se reescrever  $I_{total}(x, y)$  como a seguir

$$\begin{aligned}
I_{total}(x, y) &= \sum_{s=1}^{n^2} \sigma_s I_s(x, y) \\
&= \sum_{s=1}^{n^2} \sigma_s \left| \hat{M} \hat{P}_s \right|^2 \\
&= \sum_{s=1}^{n^2} \sigma_s \hat{M} \hat{P}_s (\hat{M} \hat{P}_s)^* \\
&= \sum_{s=1}^{n^2} \sigma_s \hat{M} (\hat{P}_s \hat{P}_s^*) \hat{M}^* \\
&= \hat{M} \left( \sum_{s=1}^{n^2} J_s \hat{P}_s \hat{P}_s^* \right) \hat{M}^* \\
&= \hat{M} (\hat{P} \hat{P}^*) \hat{M}^*
\end{aligned} \tag{3.38}$$

onde

$$\hat{P} = [\sqrt{\sigma_1} \hat{P}_1 \quad \sqrt{\sigma_2} \hat{P}_2 \quad \cdots \quad \sqrt{\sigma_{n^2}} \hat{P}_{n^2}] \tag{3.39}$$

As colunas de  $\hat{P}$  são definidas por vetores  $n^2 \times 1$  obtidos pelo empilhamento da respectiva função da pupila deslocada multiplicado pela intensidade da fonte de iluminação naquele ponto. Desta forma a matriz  $\hat{P}$  é uma matriz  $n^2 \times n^2$ .

Analisando a Equação (3.26) e a Equação (3.38) fica evidente a relação entre a matriz TCC e o vetor de pupila empilhado

$$\hat{T} = \hat{P} \hat{P}^* \tag{3.40}$$

Em seu trabalho, Yamazoe sugere aplicar SVD diretamente a matriz  $P$  o que levaria a um menor número de kernels em relação a aplicar SVD na matriz TCC também. Isso também evitaria o cálculo da dupla integral do TCC. Calcular o produto de matrizes na Equação (3.40) é equivalente a computar a integral na Equação (3.22) por amostragem.

### 3.6.4 Método de Abbe vs Método de Hopkins

Geralmente o método de Hopkins vai exigir menos kernels (entre 10x a 50x (ADAM et al., 2009)) do que o método de Abbe para obter a mesma precisão, mas à custa de maior poder computacional para gerar cada kernel. Como cada kernel depende apenas da configuração do sistema óptico, e não do objeto (máscara) que será simulado, para um sistema com a iluminação fixa, o método de Hopkins seria preferível. Por outro lado, se a configuração do sistema de iluminação é variável, método de Abbe seria a melhor escolha.

## 3.7 Redução de Escala

Em geral, os sistemas de litografia são projetados para aplicarem redução de escala onde valores típicos são entre 4 – 10x, sendo 4x o mais comum. Um sistema litográfico

sem fator de escala, i.e,  $1\times$ , por ser simétrico, é muito mais fácil de projetar. Entretanto, o uso de redução de escala facilita a criação das máscaras.

Note que não há necessidade, para um simulador baseado em convoluções como apresentado no Capítulo 2, de levar em conta o fator de escala. Isso se mistura aos valores contidos no *kernel*. Ou seja, o simulador não precisará escalar a máscara ou a imagem final simulada.

### 3.8 Aberrações na Lente

Uma aberração na lente é qualquer defeito na lente que que a faça produzir resultados diferentes de uma lente ideal, prejudicando a imagem projetada pelo sistema litográfico. As aberrações podem ser classificadas como (MACK, 2007):

1. Projeto: são aberrações causadas pela própria natureza das lentes que as fazem divergir do comportamento ideal. Como esse tipo de aberração é parte fundamental das lentes, aqui uma aberração causada por projeto significa qualquer aberração que não foi possível se eliminar usando técnicas de projeto. A combinação de mais de uma lente é bastante utilizada para eliminar ou reduzir o efeito das aberrações de uma só lente, de forma que uma lente compense a aberração causada por outra, e assim, o efeito se anule. Isso leva à diferença entre o número de lentes usados num sistema litográfico real e o sistema litográfico ideal, composto por apenas 3 lentes;
2. Construção: São causados por imperfeições na fabricação das lentes ou montagem do sistema litográfico como formas incorretas ou espessura variável, vidro não-homogêneo, montagem inapropriada, espaçamento e inclinação das lentes;
3. Uso: É qualquer problema causado por uso impróprio das lentes que degradem sua performance como inclinação do plano da máscara ou do plano do wafer em relação as lentes ou condições ambientais (temperatura, umidade, pressão).

As aberrações são levadas em conta na função Pupila  $P(u, v)$ , mas isso está fora do escopo do trabalho.



## 4 LITHUX: UM SIMULADOR DE LITOGRAFIA ÓPTICA

Neste trabalho, foi implementado um simulador de litografia óptica, chamado Lithux. A ferramenta incorpora os dois métodos – Convolução via Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Convolução via *look-up table* (LUT) – explicados no Capítulo 2.

A Figura 4.1 é um exemplo de simulação feita no Lithux utilizando o método via *look-up table* (LUT). A primeira imagem (a) é a máscara, a segunda imagem (b) é o mapa de intensidade e a terceira imagem (c) é o padrão impresso no *wafer* depois de passar pela simulação do sistema litográfico.

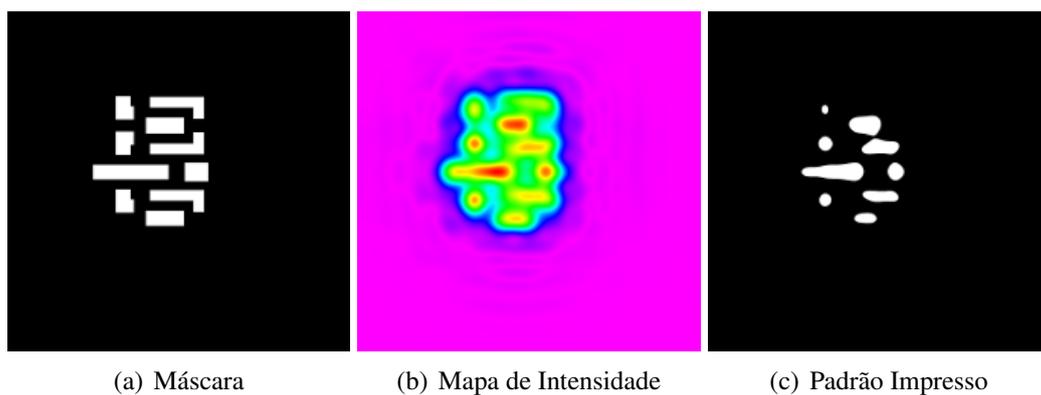


Figura 4.1: Exemplo de Simulação com a ferramenta Lithux: (a) é a máscara gerada através do *benchmark*, (b) é o mapa de intensidade e (c) é o padrão impresso no *wafer*

### 4.1 Descrição da Ferramenta

A ferramenta foi implementada em C++ utilizando a biblioteca Armadillo (SANDERSON, 2010) para a decomposição em valores singulares (SVD), a biblioteca Kiss FFT (FFT, 2013) para a Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a biblioteca LodePNG (VANDEVENNE, 2013) para salvar as imagens.

O arquivo de entrada do Lithux é bem simples e contém apenas descrição dos retângulos que compõem a máscara, suas dimensões e um fator de escala. Um exemplo de arquivo de entrada do Lithux é mostrado na Figura 4.6.

O Lithux incorpora os dois métodos – Convolução via Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Convolução via *look-up table* (LUT) – explicados no Capítulo 2, e as simulações foram realizadas com dados retirados da competição do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013).

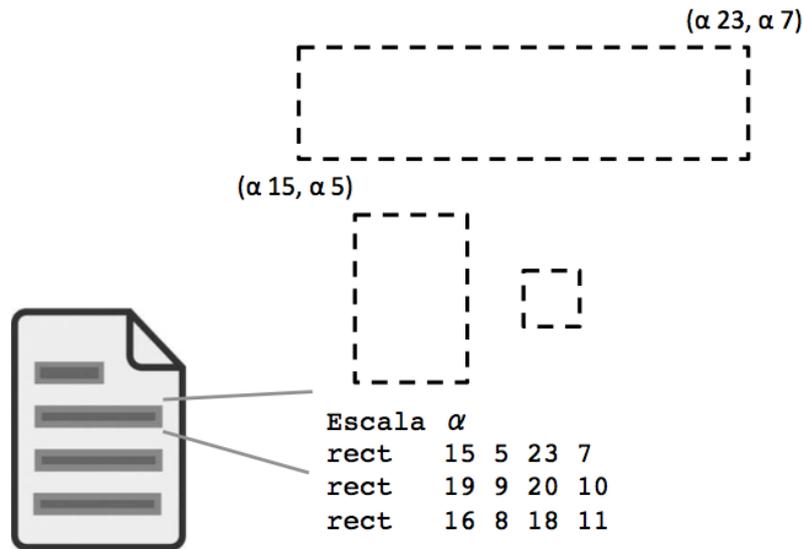


Figura 4.2: Formato de arquivo de entrada: a entrada contém o valor de escala, o ponto inicial e final do retângulo, e o seu tamanho

O ICCAD propõe competições para interessados em resolver problemas encontrados pela indústria da microeletrônica e em 2013 o ICCAD propôs o tema sobre litografia óptica, e para tal foram definidos dados para testes, como por exemplo os kernels, máscaras e sensibilização da resina.

As simulações foram realizadas com os kernels retirados da competição do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013). Mas o Lithux também é capaz de gerar kernels através do método de Hopkins. Para tal, a matriz TCC é computada através do método de estacamento de pupilas, apresentado na Seção 3.6.3.

Apesar da carga matemática, após entender como é o funcionamento do simulador e do que ele necessita, um simulador litográfico como o Lithux pode ser implementado com poucas linhas de código, considerando que uma biblioteca de Transformada Rápida de Fourier (FFT) esteja disponível. Nenhuma estrutura de dados complexa é necessária, sendo as matrizes a principal delas utilizadas no simulador.

## 4.2 Simulações

As máscaras e as kernels utilizadas nas simulações com o Lithux foram obtidas da competição do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013). Tais máscaras têm dimensão de  $2048 \times 2048$  pixels, onde a amostragem (i.e. distância entre dois pixels consecutivos) é de  $1nm$ . Na competição as kernels foram disponibilizadas em domínio frequência e foram convertidas para o domínio espacial para as simulações usando o método LUT.

O limiar de sensibilização da resina utilizado para a simulação é de 0.225 (CONTEST ICCAD, 2013). Quando a intensidade de luz num ponto ultrapassa esse limiar, ocorre a sensibilização da resina fotossensível o que leva então à transferência do padrão da máscara para o *wafers*.

Nas Figuras 4.3 e 4.4, estão listadas as kernels, em domínio espacial, utilizadas nos testes e seus respectivos pesos. Ao todo são 24 kernels e não foi citado na documentação da competição o método utilizado para gerá-las.

O computador utilizado nas simulações contém as seguintes configurações:

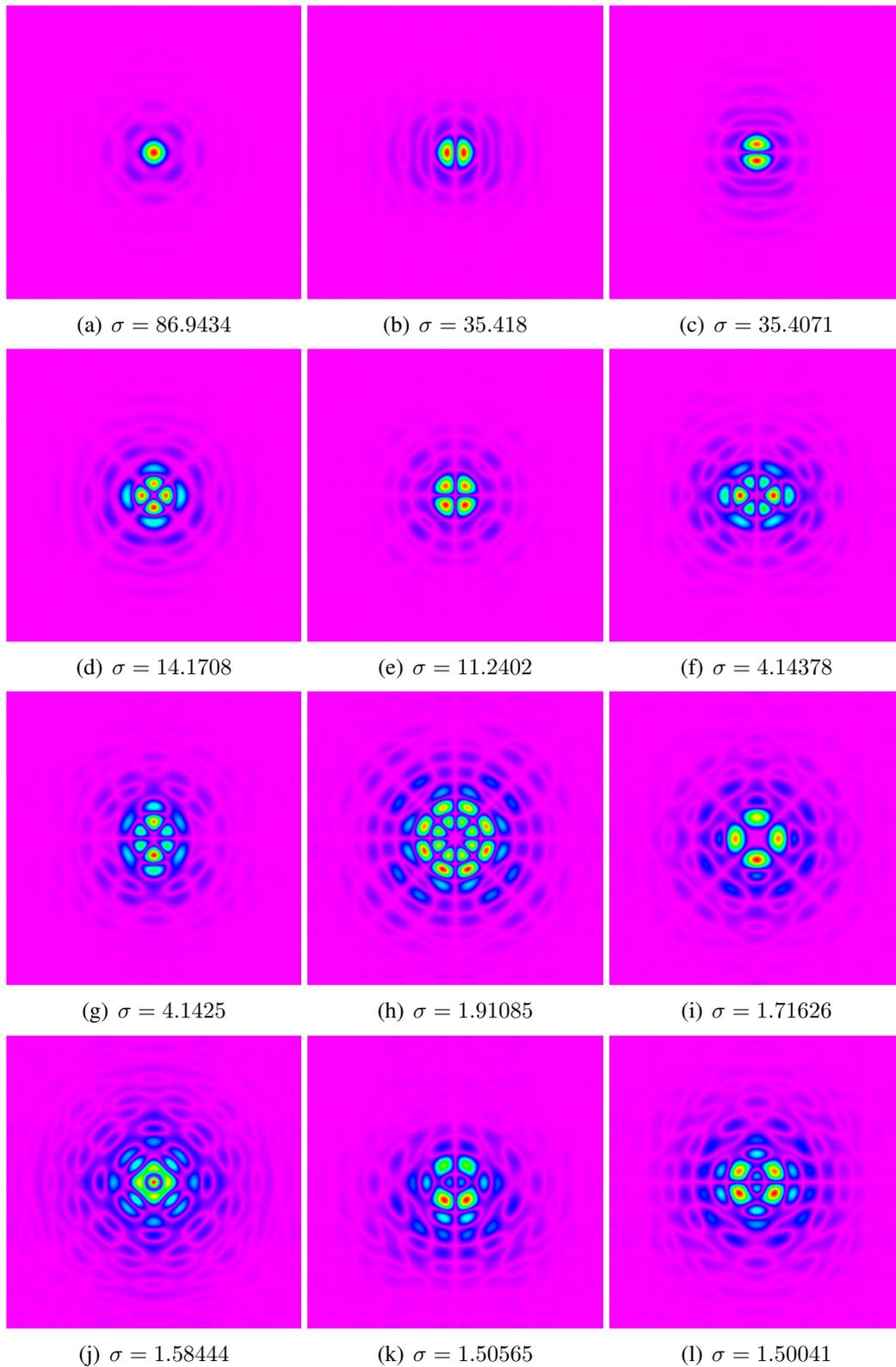


Figura 4.3: *Kernels* no domínio espacial, em ordem decrescente de importância, retirados do Contest do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013) para as simulações com o Lithux

- Sistema Operacional: Mac OS versão 10.7.5
- Processador 2.66 GHz Intel Core i5

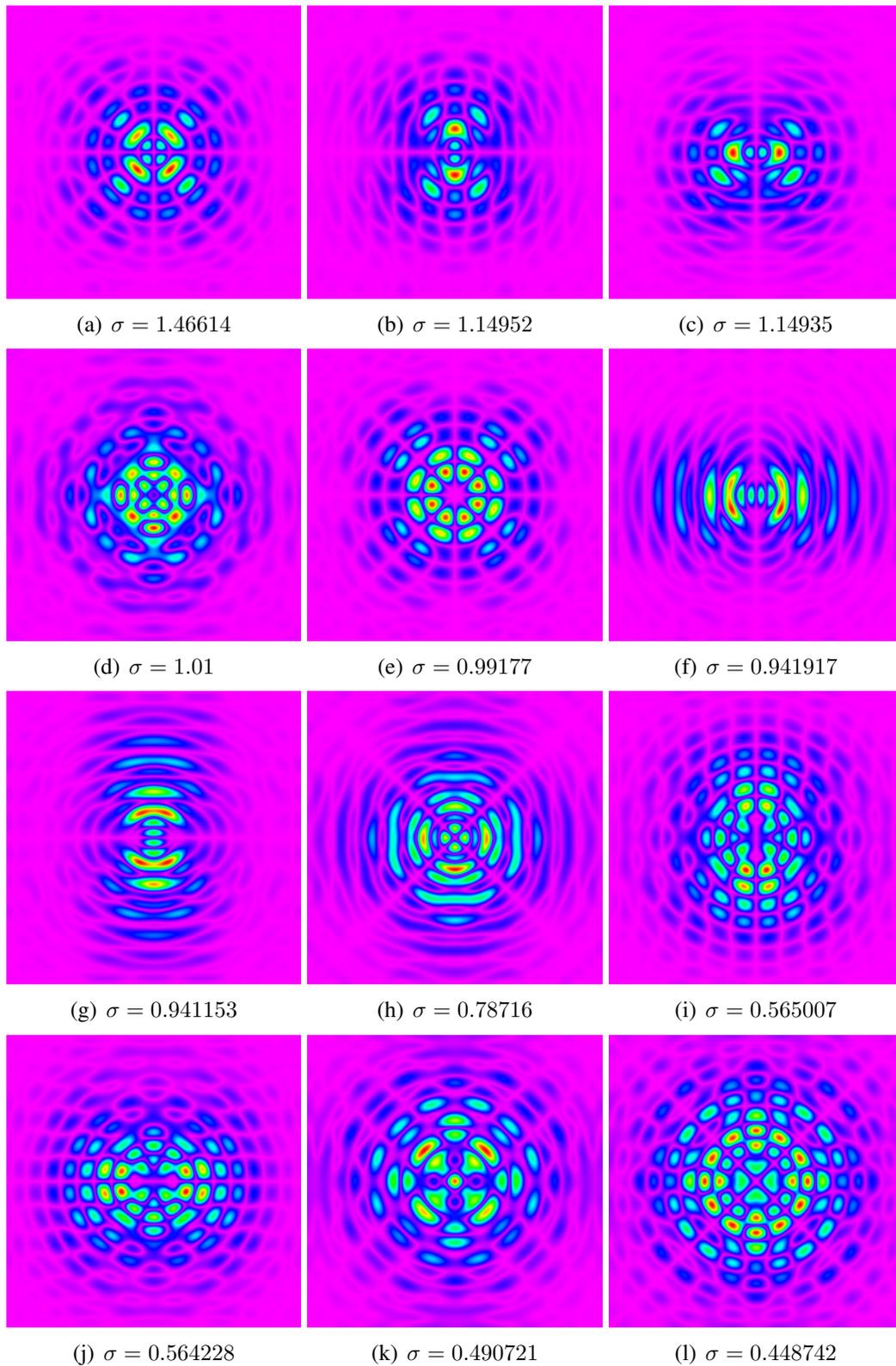


Figura 4.4: *Kernels* no domínio espacial, retirados do Contest do ICCAD (CONTEST ICCAD, 2013) para as simulações com o Lithux

- Memória 4 GB 1067 MHz DDR3

#### 4.2.1 Análise das Simulações Obtidas com Lithux

A Tabela 4.1, contém as simulações realizadas com os dois métodos: via Transformada Rápida de Fourier (FFT) e via *look-up table* (LUT). Nas simulações 6 e 7, referentes as Figuras 4.12, e 4.13, respectivamente, não houve sensibilização de nenhum pixel, ou seja, a intensidade de luz em todos os pixels ficou abaixo do limiar utilizado.

Nas simulações (Tabela 4.1) pode-se observar que para as máscaras 1, 2 e 6, o método via LUT é mais rápido em relação ao método via FFT. Sabendo que esses testes correspondem às máscaras das Figuras 4.7, 4.8, e 4.12 respectivamente, pode-se concluir que nos testes em que as máscaras têm menos retângulos, o método via *look-up table* tem maior ganho em tempo de execução.

Já nas outras simulações, 3, 4, 5 e 7, referente as Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.13, respectivamente, houve um ganho por parte do método via FFT. Por haver mais retângulos nas máscaras, o método via LUT levou mais tempo para executar.

Com base nessas simulações, também pode-se observar, que o tempo de execução do método via FFT se mantém relativamente constante, já que ele depende do número de pixels e o tamanho da máscara não varia. Enquanto no método via LUT, o tempo varia conforme a máscara, pois depende da quantidade de retângulos e dimensões que a máscara contém.

Para demonstrar melhor a variação de tempo entre os dois métodos, via FFT e via LUT, foram realizados alguns testes acrescentando retângulos em uma máscara. Os resultados do tempo de simulação foram mostrados na Tabela 4.2. Para realizar estas simulações foram acrescentados de 1 até 13 retângulos em uma máscara, e testados os tempos de simulação da máscara ao acrescentar cada retângulo na mesma. A máscara completa com os 13 retângulos, pode ser observada na Figura 4.5.

Os resultados dos testes com a máscara da Figura 4.5 demonstram mais claramente que o número de retângulos interfere no tempo de execução usando o método via LUT. A Tabela 4.5, mostra que o tempo de execução, usando o método via FFT tem pouca variação entre as simulações, ou seja, ele se mantém praticamente constante ao variar o número de retângulos na máscara, enquanto o tempo de execução do método via LUT aumenta gradativamente conforme aumenta o número de retângulos na máscara.

Tabela 4.1: Tempo de execução dos método via FFT e via *look-up table* com 24 kernels

Máscara	Tempo de Execução (s)	
	FFT	LUT
m1_pgon_rect_OPC.lithux	27.92	5.05
m1_straightlines_OPC.lithux	27.65	11.05
M1_test1.lithux	27.60	55.92
M1_test2.lithux	28.52	36.56
M1_test3.lithux	27.56	71.75
M1_test4.lithux	27.89	9.45
m1U2_OPC.lithux	27.83	29.48

Tabela 4.2: Testes com a máscara

Retângulos na Máscara de 13 retângulos	FFT (s)	LUT (s)
1	27.43	1.11
2	27.36	2.73
3	27.10	4.63
4	27.83	6.74
5	27.40	9.00
6	27.44	11.67
7	27.25	14.47
8	28.27	17.47
9	27.83	20.19
10	28.36	22.75
11	27.53	25.07
12	27.52	27.48
13	27.60	29.19

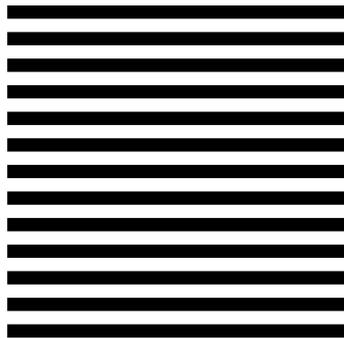


Figura 4.5: Máscara com 13 retângulos usada para os testes obtidos na Tabela 4.2

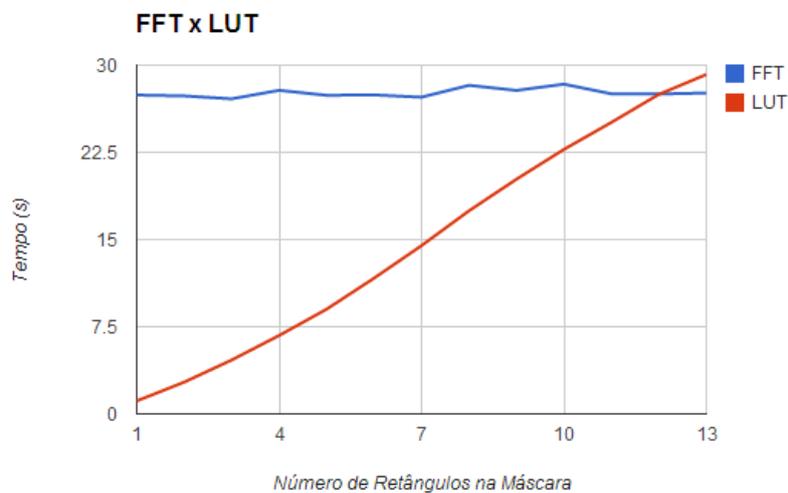


Figura 4.6: Comparativo de tempo entre as técnicas FFT e LUT com as simulações realizadas com a máscara de 13 retângulos

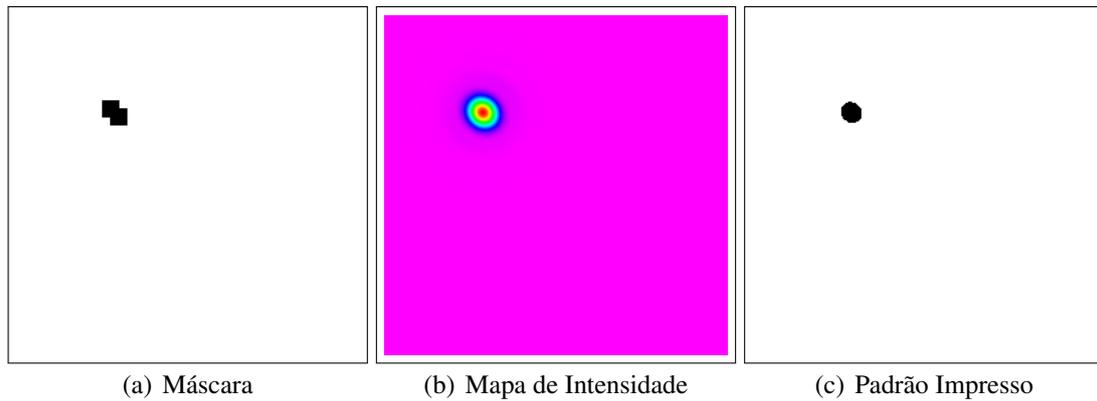


Figura 4.7: Resultado da simulação do exemplo 1 da Tabela 4.1: Máscara 1 m1\_pgon\_rect OPC

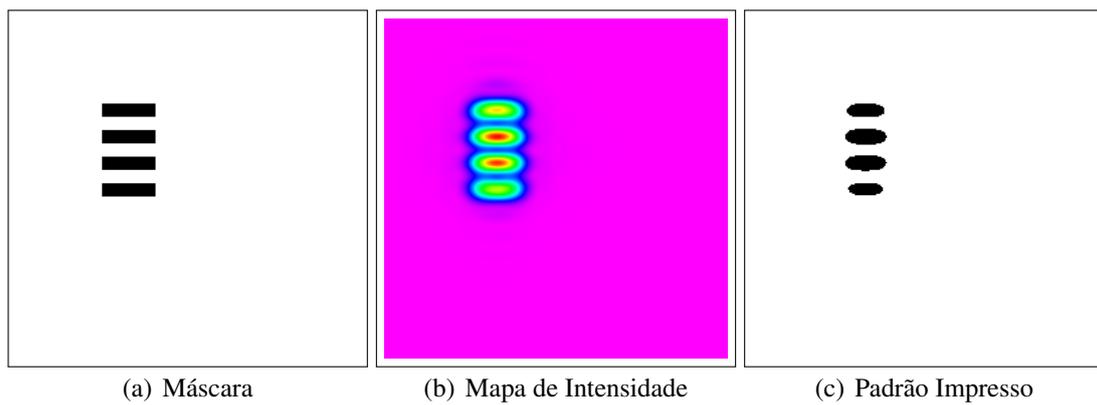


Figura 4.8: Resultado da simulação do exemplo 2 da Tabela 4.1: Máscara 2 m1\_straightlines OPC

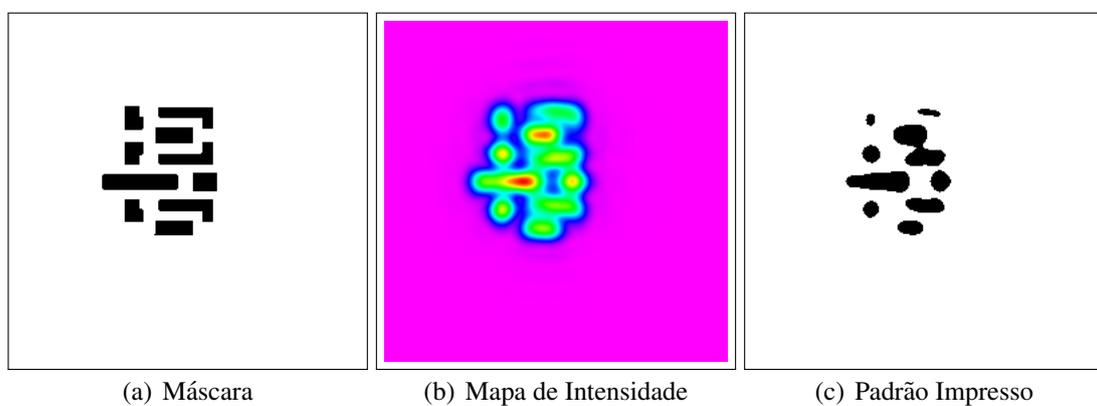


Figura 4.9: Resultado da simulação do exemplo 3 da Tabela 4.1: Máscara 3 M1\_test1

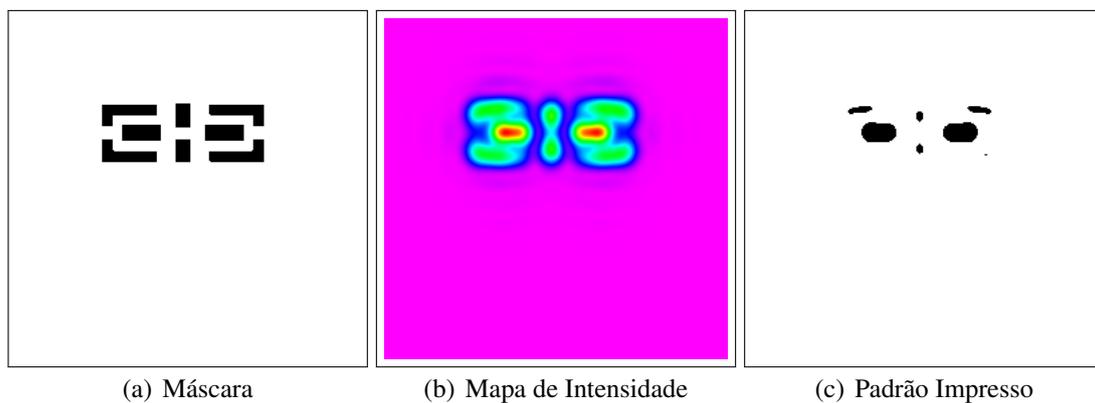


Figura 4.10: Resultado da simulação do exemplo 4 da Tabela 4.1: Máscara 4 M1\_test2

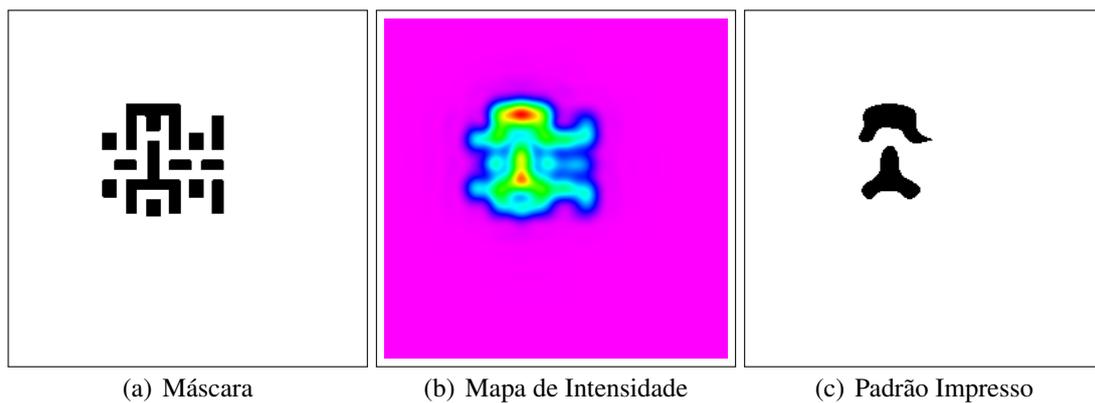


Figura 4.11: Resultado da simulação do exemplo 5 da Tabela 4.1: Máscara 5 M1\_test3

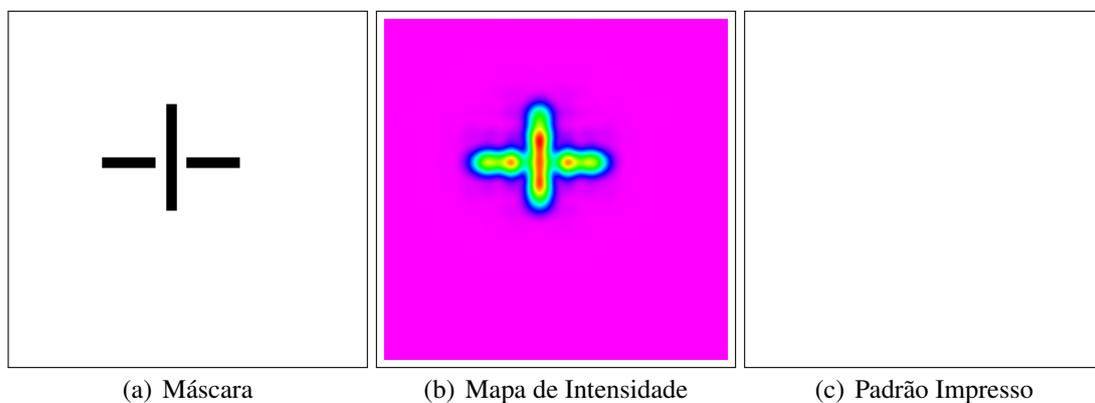


Figura 4.12: Resultado da simulação do exemplo 6 da Tabela 4.1: Máscara 6 M1\_test4

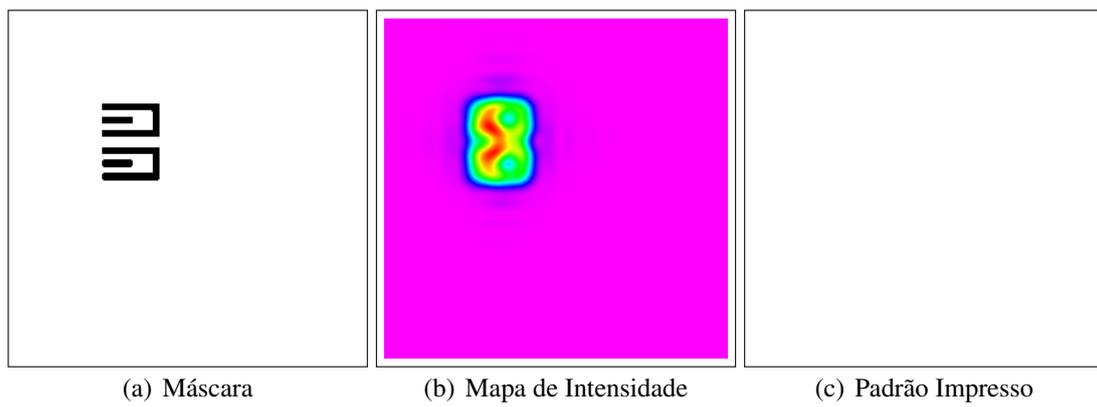


Figura 4.13: Resultado da simulação do exemplo 7 da Tabela 4.1: Máscara 7 m1U2\_OPC



## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentamos a litografia óptica usada na fabricação dos circuitos integrados e os problemas inerentes causados pela miniaturização. Mostramos a matemática envolvida nesse processo e desenvolvemos um simulador baseado em tais conceitos. O simulador é essencial para a utilização e criação de técnicas de melhoramento de resolução.

A simulação de litografia óptica pode ser descrita através de convoluções entre o padrão que descreve a máscara e as kernels que representam o sistema litográfico. A convolução quando aplicada de forma direta é extremamente ineficiente, para tanto, técnicas para calcular a convolução de forma eficiente foram apresentadas.

A primeira técnica se baseia no Teorema da Convolução da transformada de Fourier no qual o problema é levado para o domínio de frequência onde pode ser eficientemente resolvido através de uma simples multiplicação elemento-a-elemento.

A outra técnica usa look-up tables, já que, em geral, os padrões utilizados na fabricação de circuitos integrados são apenas retângulos. Nessa técnica, a convolução entre um retângulo qualquer e a kernel é armazenada para ser acessada posteriormente.

As duas técnicas foram implementadas separadamente num simulador para verificar o desempenho de cada uma delas. A técnica via look-up tables se mostrou mais rápida do que a baseada em transformada de Fourier em alguns casos. Entretanto a técnica via look-up tables vai perdendo desempenho a medida que mais padrões precisam ser processados, enquanto a técnica via transformada de Fourier se mantém constante. Isso ocorre porque a técnica via look-up tables depende do número de retângulos a serem processados bem como suas dimensões, enquanto a transformada de Fourier depende apenas do número de pixels a serem processados.

Percebeu-se ao testar as duas técnicas que um dos benefícios do método via look-up table é que o mesmo é incremental, ou seja, se for necessário pode-se aproveitar o resultado parcial da simulação e recomputar somente a parte que sofreu alterações na máscara, diferentemente do método via transformada de Fourier, onde é necessário refazer toda a simulação (ou seja, fazer a transformada de Fourier de toda a imagem levando-a para o domínio frequência).

Desta forma, o método via transformada de Fourier é preferível quando apenas uma ou poucas simulações são necessárias. Por outro lado, métodos incrementais que acionam diversas vezes simulações para convergir para uma solução vão preferir usar o método via look-up tables.

### 5.1 Trabalhos Futuros

A descrição matemática da litografia óptica apresentada nesse trabalho descreve os detalhes básicos do processo litográfico, o que permite entender melhor o processo de li-

tografia óptico. Entretanto, alguns fatores devem ainda ser estudados, como as aberrações nas lentes, intensidade de luz não uniforme, entre outros. Note que isso não necessariamente afeta o simulador, já que tais detalhes são capturados pelas kernels.

Neste trabalho foram realizadas simulações comparativas entre duas técnicas de convolução, entretanto alguns fatores podem ser ainda estudados e simulados como por exemplo o limiar de sensibilização da resina, e também, realizar mais simulações e estudos com o Lithux para precisar até que momento a técnica via look-up tables tem um ganho de desempenho sobre a técnica que se baseia no Teorema da Convolução da transformada de Fourier.

A simulação litográfica pode ser otimizada ainda mais utilizando-se paralelismo tanto em nível de tarefas quando em nível de dados. No primeiro caso, um grande padrão pode ser quebrado em regiões menores, já que o alcance das kernels é limitado. Mas também o paralelismo de dados pode ser utilizado uma vez que vários pixels podem ser processados simultaneamente utilizando plataformas como placas gráficas. A paralelização ainda não foi explorada neste trabalho.

Um dos grandes objetivos de se desenvolver um simulador litográfico foi permitir o desenvolvimento de técnicas de melhoramento de resolução como a OPC. Com um simulador novas técnicas poderão ser desenvolvidas e testadas.

Por fim, o simulador pode ser integrado à ferramenta de geração de leiautes Astran, desenvolvida no grupo de microeletrônica da UFRGS (ADRIEL ZIESEMER JR. RICARDO REIS; CALAZANS, 2014). A ferramenta já é capaz de gerar circuitos em tecnologia 65nm, os quais já sofrem significativamente com problemas litográficos.

## REFERÊNCIAS

ADAM, K. **Domain Decomposition Methods for the Electromagnetic Simulation of Scattering from Three-Dimensional Structures with Applications in Lithography**. 2001. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — EECS Department, University of California, Berkeley. (UCB/ERL M01/42).

ADAM, K. et al. Application of the Hybrid Hopkins-Abbe Method in Full-chip OPC. **Microelectron. Eng.**, Oxford, UK, UK, v.86, n.4-6, p.492–496, Apr. 2009.

ADRIEL ZIESEMER JR. RICARDO REIS, M. T. M. M. E. A.; CALAZANS, N. L. V. Automatic Layout Synthesis with Astran Applied to Asynchronous Cells. In: IEEE LATIN AMERICAN SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS : LASCAS 2014, 5. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2014.

CAPODIECI, L. et al. **Toward a Methodology for Manufacturability-Driven Design Rule Exploration**. 2004. 311–316p.

CHEN, T.-C.; LIAO, G.-W.; CHANG, Y.-W. Predictive Formulae for OPC With Applications to Lithography-Friendly Routing. **Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.29, n.1, p.40–50, Jan 2010.

COBB, N. B. **Fast Optical and Process Proximity Correction Algorithms for Integrated Circuit Manufacturing**. 1998. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) — University of California at Berkeley.

CONTEST ICCAD. Link: [http://cad\\_contest.cs.nctu.edu.tw/CAD-contest-at-ICCAD2013/problem\\_c/#benchmarkk](http://cad_contest.cs.nctu.edu.tw/CAD-contest-at-ICCAD2013/problem_c/#benchmarkk). Acessado em: jan, 2014.

FFT, K. **Kiss FFT**. Link: <http://sourceforge.net/projects/kissfft/>. Acessado em: dez, 2013.

GONG, P. et al. Fast aerial image simulations for partially coherent systems by transmission cross coefficient decomposition with analytical kernels. **Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures**, [S.l.], v.30, n.6, p.060000, 2012.

HUANG, L.-D.; WONG, M. D. F. Optical proximity correction (OPC): friendly maze routing. In: DESIGN AUTOMATION CONFERENCE, DAC 2004, SAN DIEGO, CA, USA, JUNE 7-11, 2004, 41. **Proceedings...** ACM, 2004. p.186–191.

ITRS. **The International Technology Roadmap for Semiconductors**. Link: [/http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm](http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/Home2011.htm). Acessado em: jan, 2013.

KHAN, A. **Resolution enhancement techniques**. Link: <http://www.southalabama.edu/engineering/ece/faculty/akhan/Courses/EE539-Fall105/Lecture-slides/Lecture%2010-photolithography-chapter5.pdf>. Acessado em: jan, 2014.

KIM, Y. et al. **Design of the phase-shifting algorithm for flatness measurement of a mask blank glass**. 2014. 90501W-90501W-7p. v.9050.

LEVENSON, M.; VISWANATHAN, N. S.; SIMPSON, R. Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask. **Electron Devices, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.29, n.12, p.1828–1836, Dec 1982.

LI, M.-C. et al. Standard Cell Like Via-Configurable Logic Block for Structured ASICs. In: SYMPOSIUM ON VLSI, 2008. ISVLSI '08. IEEE COMPUTER SOCIETY ANNUAL. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2008. p.381–386.

LIEBMANN, L.; PIETROMONACO, D.; GRAF, M. **Decomposition-aware standard cell design flows to enable double-patterning technology**. 2011. 79740K-79740K-12p. v.7974.

LIEBMANN, L. W. Layout impact of resolution enhancement techniques: impediment or opportunity? In: PHYSICAL DESIGN, 2003. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2003. p.110–117. (ISPD '03).

MA, Y. et al. **Double patterning compliant logic design**. 2011. 79740D-79740D-12p. v.7974.

MACK, C. **Fundamental Principles of Optical Lithography: the science of microfabrication**. illustrated edition.ed. [S.l.]: Wiley, 2007.

MEINHARDT, C. **Geração de Leiautes Regulares Baseados em Matrizes de Células**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Instituto de Informática, UFRGS, Porto Alegre, RS.

MUMFORD, I. Lithography, Photography and Photozincography in English Map Production before 1870. **The Cartographic Journal**, [S.l.], v.9, n.1, p.30–36, 1972.

PONS, M. et al. VCTA: a via-configurable transistor array regular fabric. In: VLSI SYSTEM ON CHIP CONFERENCE (VLSI-SOC), 2010 18TH IEEE/IFIP. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2010. p.335–340.

RAN, Y.; MAREK-SADOWSKA, M. Designing via-configurable logic blocks for regular fabric. **Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on**, [S.l.], v.14, n.1, p.1–14, Jan 2006.

REIS, R. **Concepção de Circuitos Integrados**. Porto Alegre, RS - Brasil: Instituto de Informática da UFRGS: Editora Sagra Luzzatto, 2000.

ROTHSCHILD, M. et al. Recent trends in optical lithography. **Lincoln Laboratory Journal**, [S.l.], v.14, n.2, p.221–236, 2003.

SANDERSON, C. **Armadillo**: an open source c++ linear algebra library for fast prototyping and computationally intensive experiments. [S.l.]: NICTA, 2010.

SCHELLENBERG, F. Semiconductors: a little light magic. **IEEE Spectr.**, Piscataway, NJ, USA, v.40, n.9, p.34–39, Sept. 2003.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing**. San Diego, CA, USA: California Technical Publishing, 1997.

UZUN, I.; BOURIDANE, A. FPGA implementations of fast fourier transforms for real-time signal and image processing. In: FIELD-PROGRAMMABLE TECHNOLOGY (FPT), 2003. PROCEEDINGS. 2003 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p.102–109.

VANDEVENNE, L. **LodePNG**. Link: <http://lodev.org/lodepng/>. Acessado em: jan, 2014.

WONG, A. K.-K. **Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography**. illustrated edition.ed. [S.l.]: SPIE Publications, 2001.

WU, P.-C. et al. Efficient Aerial Image Simulation on Multi-core SIMD CPU. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED DESIGN, Piscataway, NJ, USA. **Proceedings...** IEEE Press, 2013. p.24–31. (ICCAD '13).

YAMAZOE, K. Computation theory of partially coherent imaging by stacked pupil shift matrix. **J. Opt. Soc. Am. A**, [S.l.], v.25, n.12, p.3111–3119, Dec 2008.

YANG, J.-S.; PAN, D. Z. Overlay aware interconnect and timing variation modeling for double patterning technology. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED DESIGN, 2008. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2008. p.488–493. (ICCAD '08).

YU, P.; SHI, S. X.; PAN, D. Z. True process variation aware optical proximity correction with variational lithography modeling and model calibration. **Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS**, [S.l.], v.6, n.3, p.031004–031004–16, 2007.

ZHANG, H. et al. Accelerating Aerial Image Simulation with GPU. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED DESIGN, Piscataway, NJ, USA. **Proceedings...** IEEE Press, 2011. p.178–184. (ICCAD '11).



## APÊNDICE A DESLOCAMENTO DA PUPILA

O efeito da inclinação na fonte de iluminação, matematicamente, causa apenas o deslocamento do padrão de difração da máscara em relação a abertura da lente. Uma mudança de variáveis irá mostrar que isso é equivalente a manter a fonte de iluminação não inclinada, mas deslocar a pupila pela mesma quantidade na direção oposta (MACK, 2007).

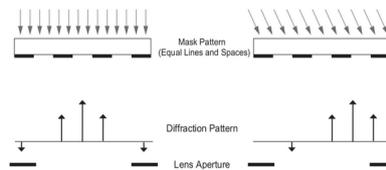


Figura A.1: Deslocamento do Espectro da Mascara Causado pela Iluminação Fora-de-Eixo

Matematicamente podemos mostrar esse efeito. A intensidade é dada pelo quadrado da magnitude do campo elétrico:

$$I(x, y) = |E(x, y)|^2 = \left| \iint P(u, v) M(u - u_s, v - v_s) e^{i2\pi(ux+vy)} du dv \right|^2 \quad (\text{A.1})$$

Aplicando uma mudança de variáveis, sendo

$$u' = u - u_s \rightarrow u = u' + u_s, v' = v - v_s \rightarrow v = v' + v_s \quad (\text{A.2})$$

temos

$$E(x, y) = \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi[(u'+u_s)x+(v'+v_s)y]} du' dv' \quad (\text{A.3})$$

separando a exponencial em duas uma com os termos constantes e outra com os termos variáveis, chegamos em

$$E(x, y) = \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi(u'x+v'y)} e^{i2\pi(u_sx+v_sy)} du' dv' \quad (\text{A.4})$$

Removendo o termo constante para fora das integrais

$$E(x, y) = e^{i2\pi(u_s x + v_s y)} \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi(u' x + v' y)} du' dv' \quad (\text{A.5})$$

Lembrando que

$$I(x, y) = |E(x, y)|^2 \quad (\text{A.6})$$

$$I(x, y) = \left| e^{i2\pi(u_s x + v_s y)} \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi(u' x + v' y)} du' dv' \right|^2 \quad (\text{A.7})$$

$$I(x, y) = |e^{i2\pi(u_s x + v_s y)}|^2 \left| \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi(u' x + v' y)} du' dv' \right|^2 \quad (\text{A.8})$$

Notando que

$$|e^{i2\pi(u_s x + v_s y)}|^2 = 1 \quad (\text{A.9})$$

temos que a intensidade é dada por

$$I(x, y) = \left| \iint P(u' + u_s, v' + v_s) M(u', v') e^{i2\pi(u' x + v' y)} du' dv' \right|^2 \quad (\text{A.10})$$

Desta forma, a intensidade no wafer causada pelo deslocamento no espectro da máscara quando a pupila se mantém fixa pode ser tratado como um deslocamento no espectro da pupila na direção oposta da máscara mantendo-se o espectro da máscara fixa.

## APÊNDICE B MÉTODO DE HOPKIN

Aqui mostramos como o modelo de Hopkin é derivado. Nos restringimos a num sistema 1D por questões de legibilidade, entretanto a derivação para um ambiente 2D segue a mesma linha.

H.H. Hopkin usou a propriedade de deslocamento da pupila descrita no Apêndice A

$$E(x, u_s) = \int M(u - u_s)P(u)e^{i2\pi ux} du = \int M(u)P(u + u_s)e^{i2\pi ux} du \quad (\text{B.1})$$

para reescrever a fórmula

$$I_{total}(x) = \int I(x, u_s)S(u_s)du_s. \quad (\text{B.2})$$

Usando tal propriedade, podemos rescrever  $I(x, u_s)$  tal que

$$\begin{aligned} I(x, u_s) &= |E(x, u_s)|^2 \\ &= E(x, u_s)E^*(x, u_s) \\ &= \left[ \int M(u)P(u + u_s)e^{i2\pi ux} du \right] \left[ \int M^*(u)P^*(u + u_s)e^{-i2\pi ux} du \right] \\ &= \iint M(u_1)M^*(u_2)P(u_1 + u_s)P^*(u_2 + u_s)e^{2\pi i(u_1 - u_2)x} du_1 du_2. \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

Substituindo a Equação (B.3) na Equação (B.2) temos

$$\int \left[ \iint M(u_1)M^*(u_2)P(u_1 + u_s)P^*(u_2 + u_s)e^{2\pi i(u_1 - u_2)x} du_1 du_2 \right] S(u_s)du_s \quad (\text{B.4})$$

$$\iint \left[ \int P(u_1 + u_s)P^*(u_2 + u_s)S(u_s, v_s)dv_s \right] M(u_1)M^*(u_2)e^{2\pi i(u_1 - u_2)x} du_1 du_2 \quad (\text{B.5})$$

$$TCC(u_1, u_2) = \iint P(u_1 + u_s)P^*(u_2 + u_s)S(u_s, v_s)du_s dv_s \quad (\text{B.6})$$

$$\iint TCC(u_1, u_2)M(u_1)M^*(u_2)e^{2\pi i(u_1 - u_2)x} du_1 du_2 \quad (\text{B.7})$$



## APÊNDICE C OPERADOR DE EMPILHAMENTO

O operador de empilhamento,  $\mathbf{Y}$ , é definido para mapear uma função discreta de dois argumentos em um vetor e, similarmente, uma função de quatro argumentos, em uma matriz.

### C.1 Funções de Dois Argumentos

Seja a função discreta de dois argumentos,  $f(x_i, y_j)$ , onde  $i = 1, 2, \dots, n$  e  $j = 1, 2, \dots, m$ , o operador de empilhamento resulta em um vetor  $\mathbf{v}$ ,  $nm \times 1$ , tal que o  $k$ -ésimo elemento de  $\mathbf{v}$  é dado por

$$\mathbf{v}_k = f(x_i, y_j)$$

onde  $i = ((k - 1) \bmod n) + 1$  e  $j = \lceil \frac{k}{n} \rceil$ . Desta forma

$$\mathbf{Y} f(x_i, y_j) = \begin{bmatrix} f_{1,1} \\ f_{2,1} \\ \vdots \\ f_{n,1} \\ f_{1,2} \\ \vdots \\ f_{n,m} \end{bmatrix}$$

onde  $f_{i,j} = f(x_i, y_j)$  por simplicidade.

### C.2 Funções de Quatro Argumentos

Seja a função discreta de dois argumentos,  $f_{i,j;k,l} = f(x_i, y_j; x'_k, y'_l)$ , onde  $i, k = 1, 2, \dots, n$  e  $j, l = 1, 2, \dots, m$ , o operador de empilhamento é definido como

$$\mathbf{Y} f(x_i, y_j; x'_k, y'_l) = \begin{bmatrix} f_{1,1;1,1} & f_{1,1;2,1} & \cdots & f_{1,1;n,1} & f_{1,1;1,2} & \cdots & f_{1,1;n,m} \\ f_{2,1;1,1} & & \ddots & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ f_{n,1;1,1} & & & & & & \\ f_{1,2;1,1} & & & & & & \\ \vdots & & & & & & \\ f_{n,m;1,1} & & & & & & f_{n,m;n,m} \end{bmatrix}$$

onde  $f_{i,j;k,l} = f(x_i, y_j; x'_k, y'_l)$  por simplicidade. Note que  $\mathbf{Y}f(x_i, y_j; x'_k, y'_l)$  é uma matriz  $nm \times nm$ .

### C.3 Inverso

O operador de empilhamento inverso ou operador de desempilhamento recupera a função discreta original tal que

$$\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{Y}f(x_i, y_j) = f(x_i, y_j)$$

e

$$\mathbf{Y}^{-1}\mathbf{Y}f(x_i, y_j; x'_k, y'_l) = f(x_i, y_j; x'_k, y'_l).$$

## APÊNDICE D APRIMORAMENTO DE RESOLUÇÃO

### D.1 Introdução

Atualmente, a litografia óptica está estagnada em termos de diminuição do comprimento de ondas que vem se mantendo em  $193nm$  (MACK, 2007). Comprimentos de ondas menores apresentam dificuldades e ainda não vem sendo utilizados em larga escala, já que causam borramento excessivo e dificuldades na sensibilização da resina fotossensível, pois são absorvidos pelas lentes de quartzo que direcionam a luz para o wafer (SCHELLENBERG, 2003). Entretanto, mesmo com o comprimento de onda atual ( $193nm$ ) o borramento é bastante significativo. Para diminuir esse borramento, foram desenvolvidas algumas técnicas para modificar o leiaute do circuito, de tal forma que a imagem projetada se assemelhe mais ao leiaute original, as chamadas Técnicas de Melhoramento de Resolução (RET, do inglês, *Resolution Enhancement Techniques*).

A aplicação de RET implica na necessidade de ferramentas de simulação litográfica, já que muitos dos métodos se baseiam na retroalimentação do resultado obtido através de simulação. Dessa forma, para se executar as simulações diversas vezes em tempo viável, os simuladores também precisam ser bastante eficientes. As principais RETs são

- máscaras com deslocamento de fase (PSM, do inglês, *phase-shifting mask*),
- correção de proximidade (OPC, do inglês, *optical proximity correction*),
- dupla ou múltipla exposição por camada (*double/multiple patterning*),
- regras de projeto restritivas.

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução sobre estes métodos.

### D.2 Máscara com Deslocamento de Fase (PSM)

A ideia básica da máscara com deslocamento de fase (PSM) é alterar a fase da luz para diminuir a interferência entre as ondas de luz e assim diminuir o borramento (KIM et al., 2014), (LEVENSON; VISWANATHAN; SIMPSON, 1982).

Uma máscara tradicional é transparente e tem a mesma espessura em todas as regiões. Desta forma as ondas, atravessando-a sofrem a mesma atenuação e atraso. Numa máscara com deslocamento de fase, regiões da máscara são modificadas ficando mais finas ou mais grossas, de forma que a fase das ondas de luz passando por tais regiões sejam modificadas em relação as demais.

A máscara é então construída de forma que se aumente a resolução da imagem a ser projetada. Esse efeito é mostrado na Figura D.1 onde se percebe que o deslocamento de fase ajudou no melhor contraste entre as duas fendas sendo projetadas.

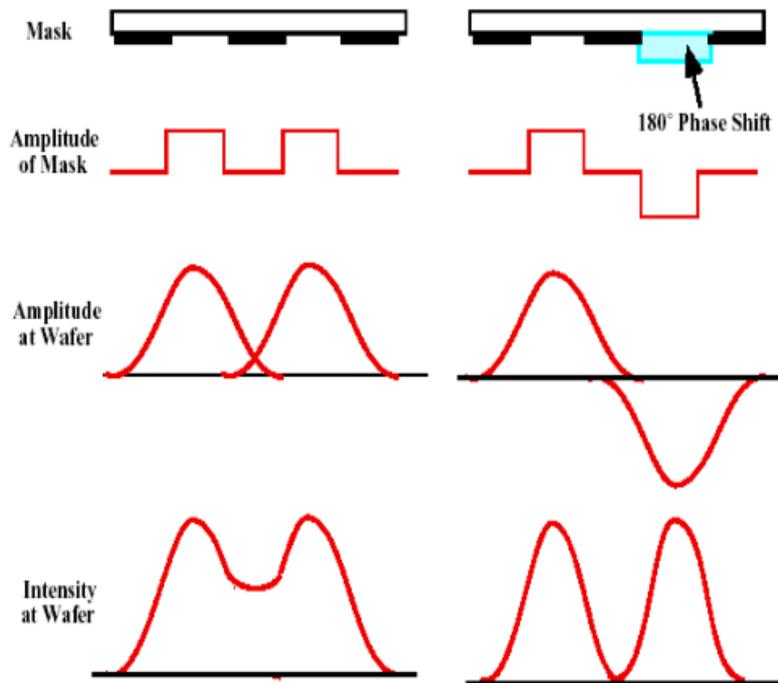


Figura D.1: Mudança de fase da máscara (KHAN, 2014)

### D.3 Correção de Proximidade Óptica (OPC)

A técnica de correção de proximidade óptica tenta modificar a máscara adicionando novos elementos nas proximidade dos elementos originais da máscara tal que a resolução da imagem projetada seja melhorada. Os novos elementos, em geral retângulos, são normalmente adicionados em cantos e também onde dois polígonos se aproximam muito um do outro (YU; SHI; PAN, 2007), (HUANG; WONG, 2004). A aplicação da técnica OPC pode ser observado na Figura D.2.

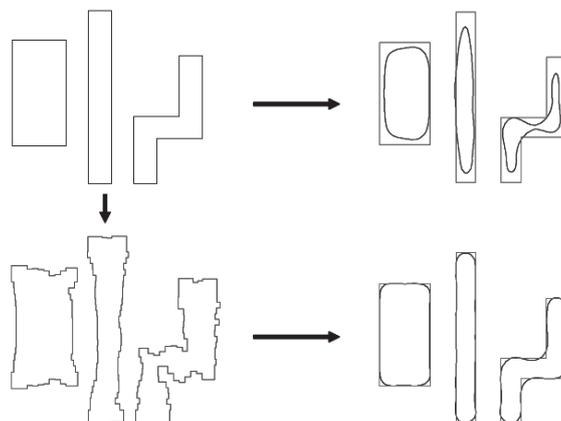


Figura D.2: Correção de Proximidade (MACK, 2007)

No entanto, a eficiência do OPC também depende da qualidade do leiaute. Um leiaute com caminhos críticos e regiões críticas (HUANG; WONG, 2004) não pode ser melhorado através de OPC. Nesses casos, o OPC pode até mesmo prejudicar a impressão do circuito.

### D.3.1 *Edge Placement Error (EPE)*

EPE pode ser usado como métrica de custo para o OPC. O EPE demonstra a diferença entre o desenho original e o desenho impresso. Veja um exemplo na Figura D.3.

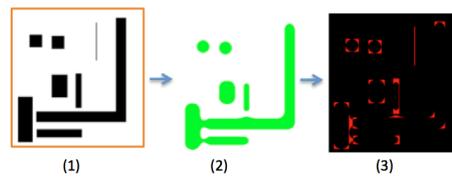


Figura D.3: Máscara projetada (1), máscara impressa (2) e as diferenças entre as duas (3).

## D.4 Dupla (DPL) ou Múltipla Exposição por Camada (MPL)

O DPL é uma solução para diminuir a dimensão crítica (CD), enquanto mantém constante a abertura numérica (NA) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) (ITRS, 2011).

Para a litografia óptica convencional, a camada fotossensível é exposta apenas uma vez, enquanto utilizando *multiple patterning* são necessárias duas ou mais exposições por camada (MA et al., 2011), (LIEBMANN; PIETROMONACO; GRAF, 2011). Neste caso, o padrão desenhado numa máscara é dividido em duas ou mais máscaras. Ao fazer isso, pode-se intercalar as regiões densas nas duas camadas, criando regiões menos densas. O processo de divisão da máscara é exposto na Figura D.4.

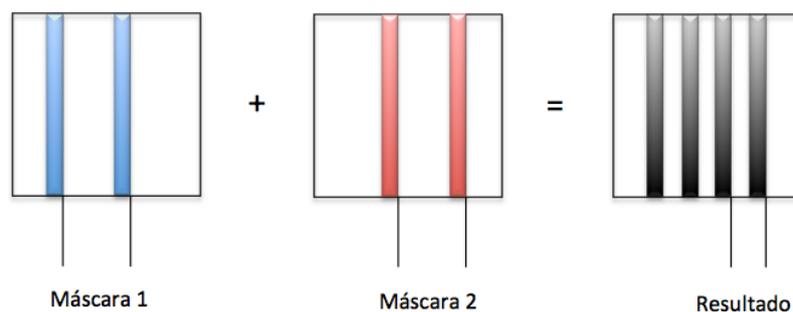


Figura D.4: Processo de divisão da máscara: *Double Patterning*

No entanto a DPL cria alguns problemas para os projetistas, como por exemplo *overlay* (YANG; PAN, 2008). *Overlay* é uma distorção no alinhamento das camadas que pode vir a causar alterações nas características dos circuitos, como sincronismo, ruído e aumento de energia (YANG; PAN, 2008). Existem vários tipos de DPL, como por exemplo: *litho-etch litho-etch* (LELE), *litho-freeze*, *self-aligned double patterning* (SADP), *dual tone development* (DTD), *double exposure* (DE).

## D.5 Regras de Design Restritivas (em inglês, *Restricted Design Rules, RDR*)

Outra forma de melhorar a qualidade de impressão é usando Regras de Design Restritivas RDR (MEINHARDT, 2006), (CAPODIECI et al., 2004). As RDRs são criadas para evitar áreas críticas no projeto de um circuito. Um exemplo de RDR é superestimar a distância entre dois polígonos. A Figura D.5 apresenta algumas RDRs definidas e analisadas por (CAPODIECI et al., 2004).

Regras de design restritivas é uma troca entre custos de fabricação e desempenho (performance), onde o desempenho pode ser medido como a densidade do leiaute, atraso, energia, etc (CAPODIECI et al., 2004).

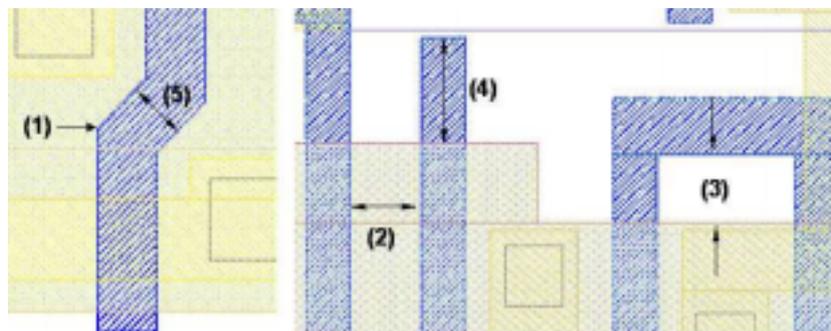


Figura D.5: RDRs definidas e analisadas por (CAPODIECI et al., 2004): as regras são definidas para amenizar/diminuir áreas críticas do leiaute

### D.5.1 Leiaute Regular

Outra possibilidade é restringir o leiaute do circuito, criando padrões regulares na máscara e evitando que os fios façam muitas curvas. A Figura D.6 contém um exemplo de uma arquitetura regular desenvolvida por (PONS et al., 2010).

Alguns exemplos de arquiteturas regulares que foram propostas são: *Via-Configurable Transistor Array (VCTA)* (PONS et al., 2010), *via-congurable functional cell (ViaCC)* (RAN; MAREK-SADOWSKA, 2006) e *via-configurable logic block (VCLB)* (LI et al., 2008). Também é possível usar ferramentas que possibilitam a geração de leiautes regulares de forma automática, como por exemplo, o R-CAT desenvolvido por (MEINHARDT, 2006).

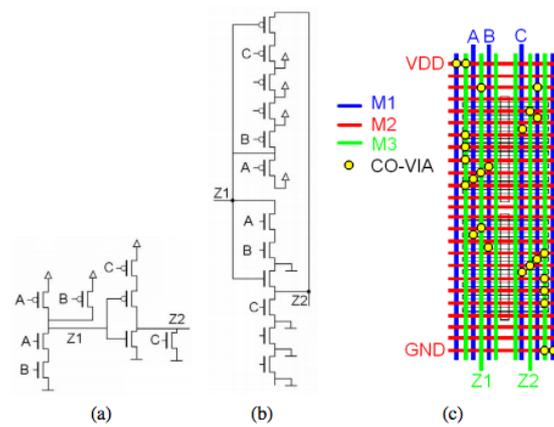


Figura D.6: Exemplo de Leiaute Regular gerado usando VCTA para uma porta NAND-NOR: (a) Esquemático; (b) Esquemático do VCTA; (c) Leiaute (PONS et al., 2010)