



НИИМЭ
НИИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

**Моделирование технологического
процесса фотолитографии в
микроэлектронике с применением
алгоритмов машинного обучения**

**Авторы: к.ф.-м.н. Теплов Г.С.,
член-корр. РАН Горнев Е.С.,
Иванов В.В.,
Кузовков А.В.**

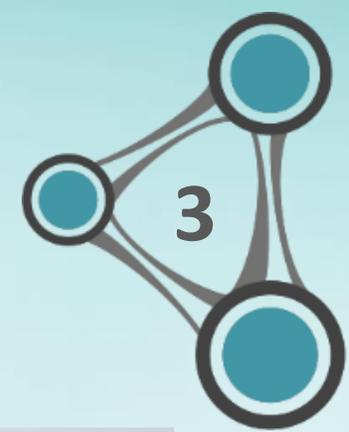
Москва, 2020

План доклада

1. Технологический процесс. Краткое описание
2. Задачи проекционной фотолитографии в микроэлектронике
3. Основные подходы к решению задач фотолитографии
4. Машинное обучение в решении задач фотолитографии
5. Калибровка моделей
6. Выводы



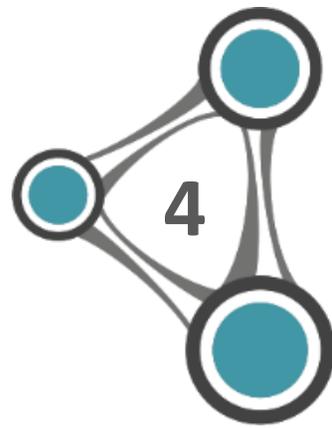
Раздел 1



Технологический процесс.
Краткое описание



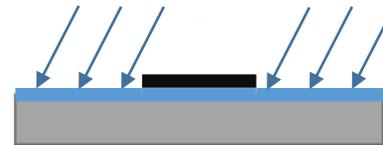
Технологический процесс. Основные операции



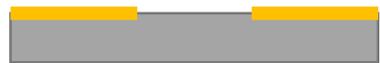
1) Подготовка поверхности



2) Нанесение фоторезиста



3) Экспонирование изображения



4) Проявление фоторезиста



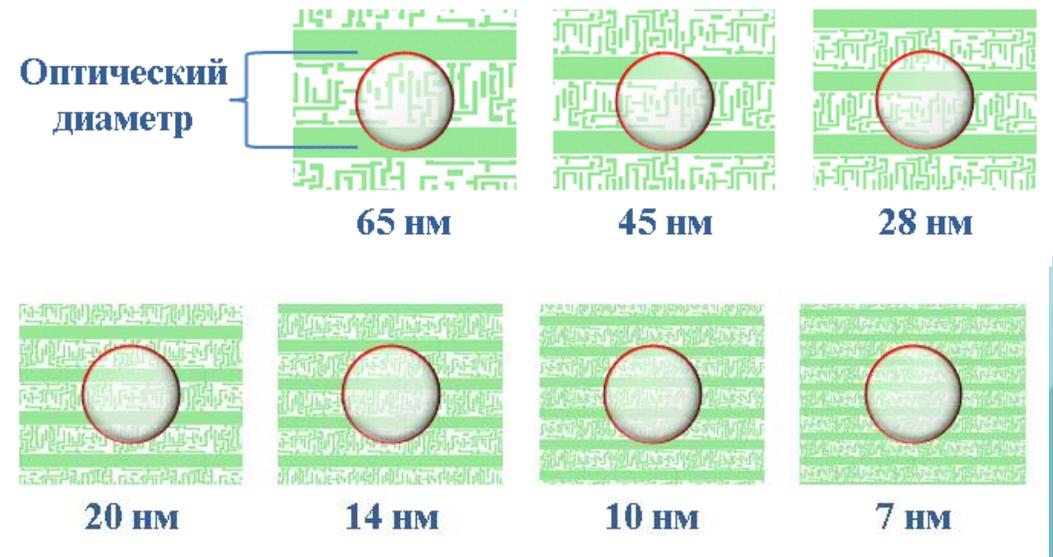
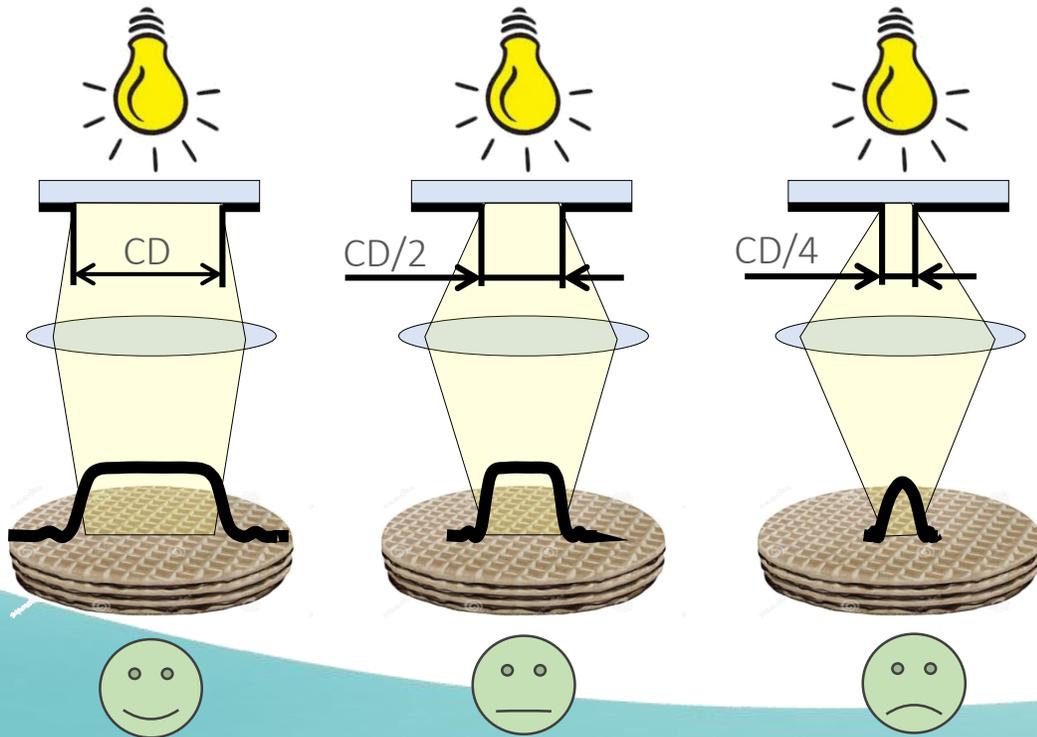
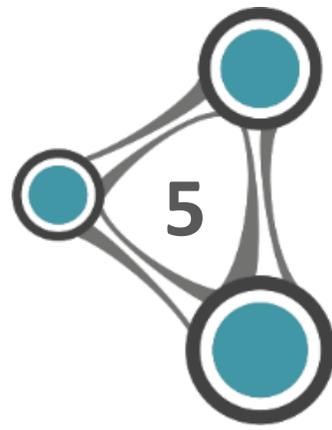
5) Обработка поверхности



6) Удаление фоторезиста

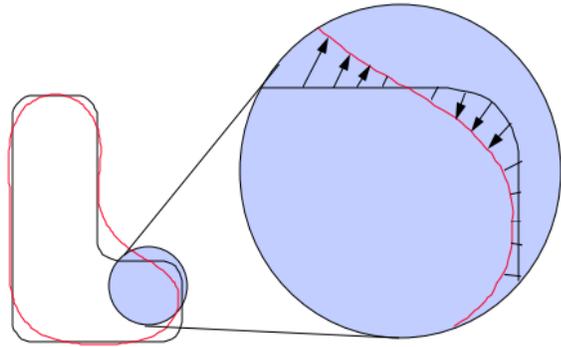
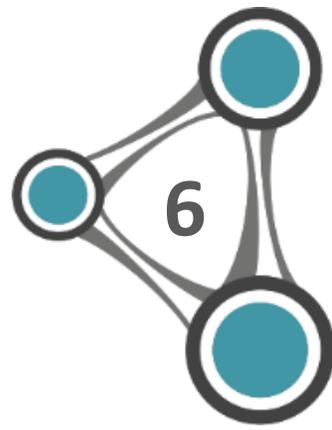
Процесс фотолитографии позволяет формировать структуры размерами в десятки нанометров

Технологический процесс. Переход к новым нормам

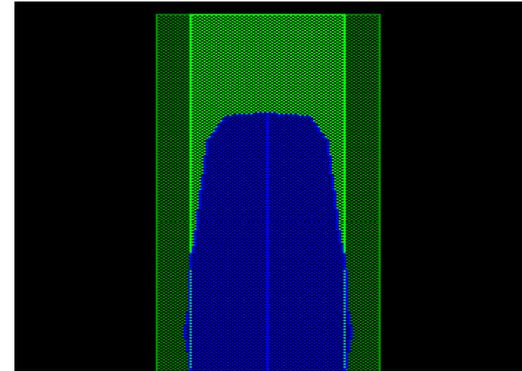


$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

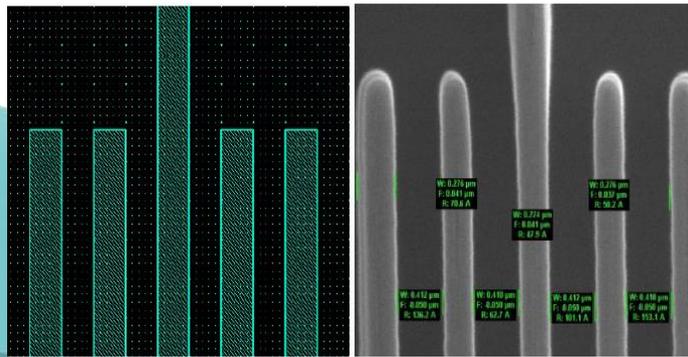
Технологический процесс. Ошибки в моделировании.



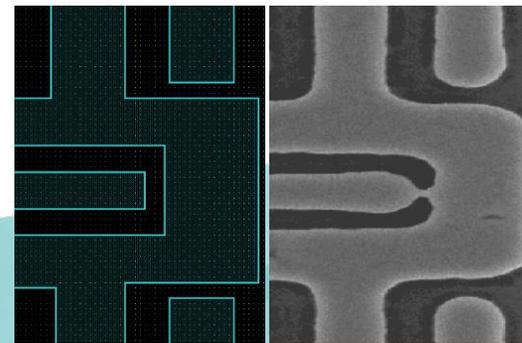
Скругление
углов



Укорачивание
концов линий

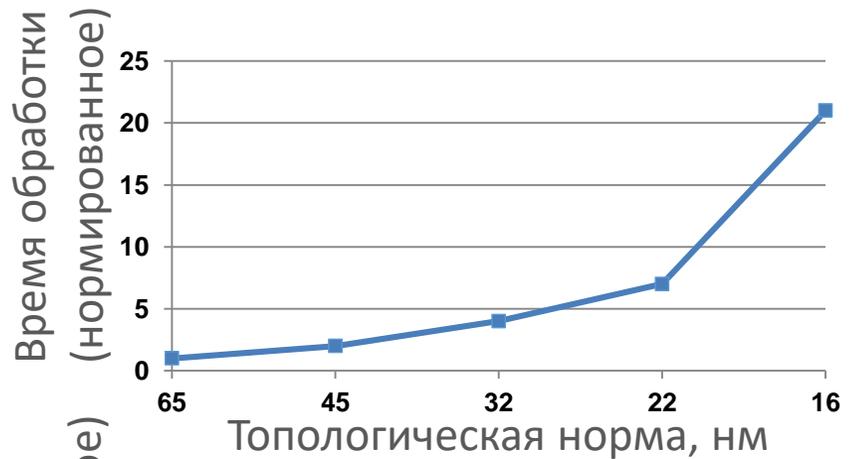
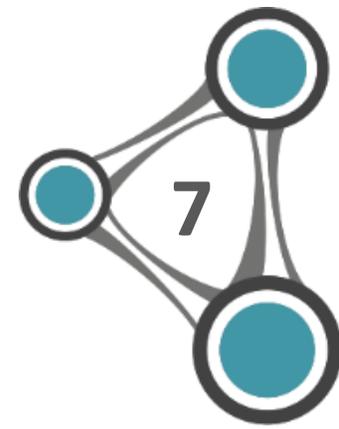


Зависимость
ширины от шага



Образование
перемычек

Технологический процесс. Рост времени вычислений



14 нм
более ~50+



12 нм
более ~50+

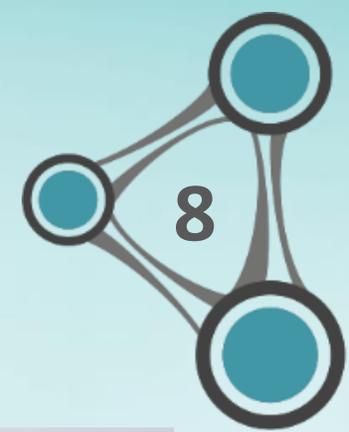


90 нм: расчёт до 3 дней на слой при 48 CPU
(10 сл./ 3 крит.)



28 нм: расчёт до 3 дней на слой при 1048 CPU
(30 сл./ 10 крит.)

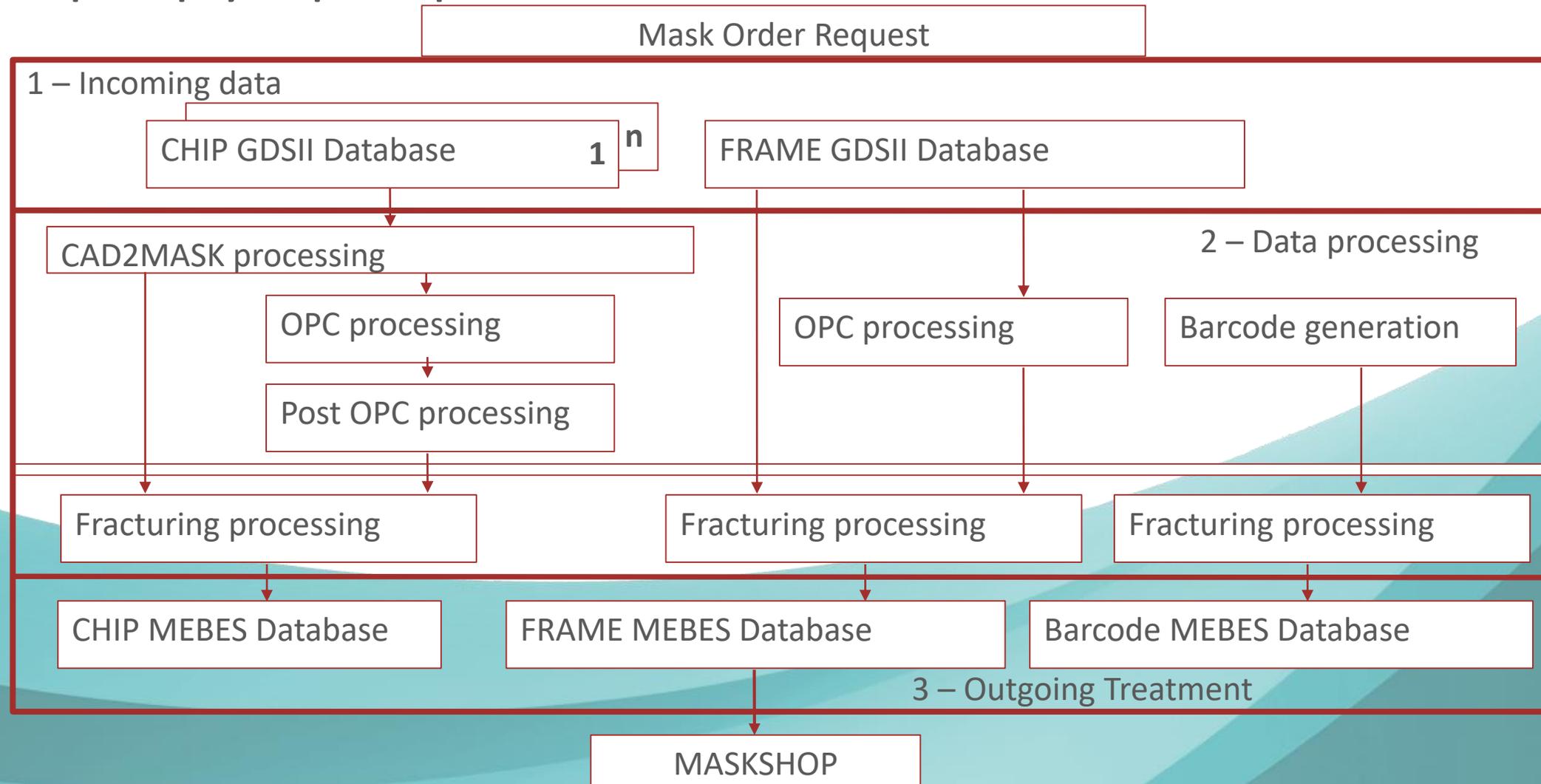
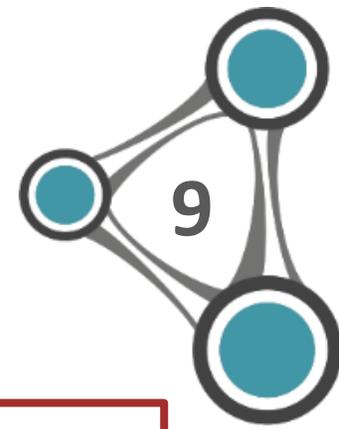
Раздел 2



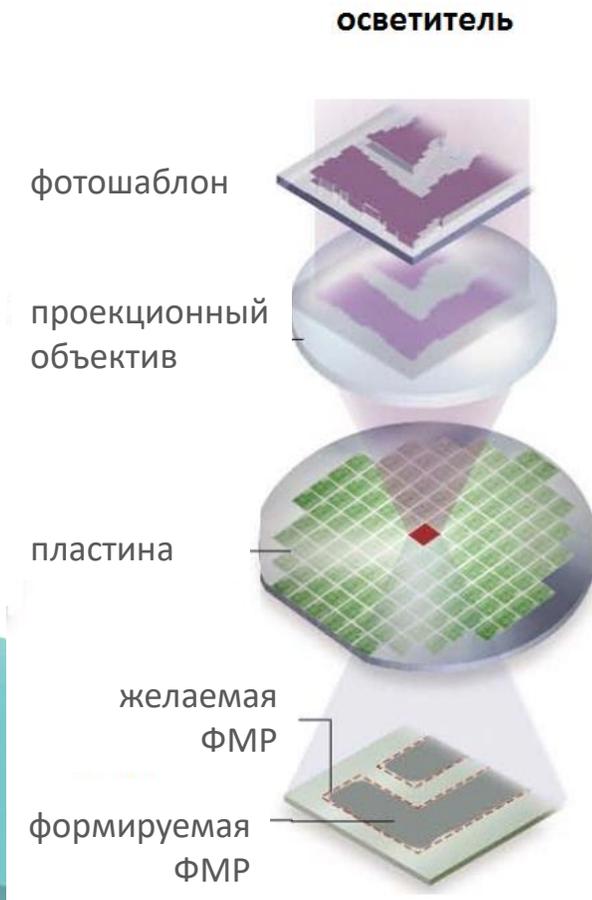
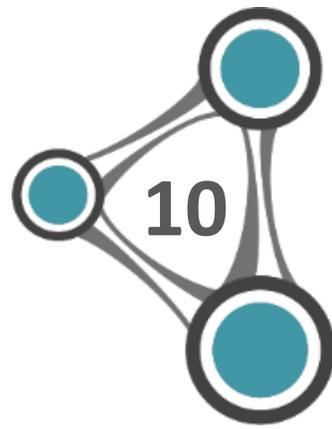
Задачи проекционной
фотолитографии в
микроэлектронике



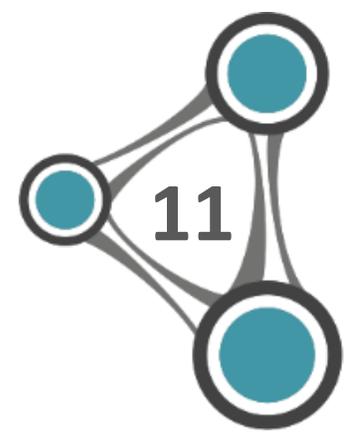
Задачи фотолитографии. Маршрут разработки



Задачи фотолитографии



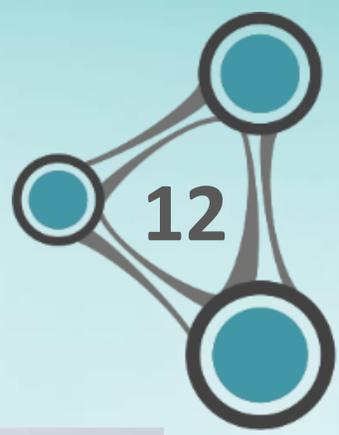
1. Выбор методов повышения разрешения (RET)
2. Формирование кадра
3. Подбор параметров литографического стека
4. Коррекция маски
5. Поиск ошибок моделирования



Основные задачи

1. Создание оптической модели
2. Создание резистивной модели
3. Создание OPC моделей коррекции (RB-OPC, MB-OPC, ILT)
4. Расчет экспонирования
5. Расчет фотошаблона и его коррекция
6. Поиск горячих точек
7. Оптимизация изготовления маски
8. Анализ результатов фотолитографических операций
9. Моделирование профиля фоторезиста

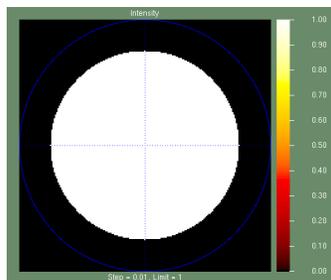
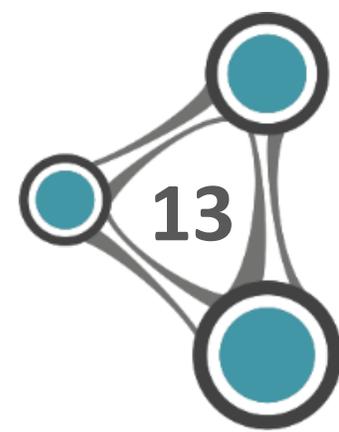
Раздел 3



Основные подходы к
решению задач
фотолитографии

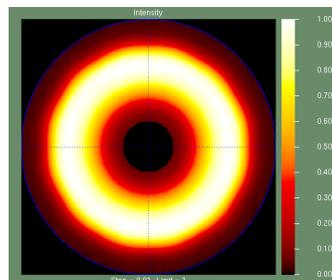
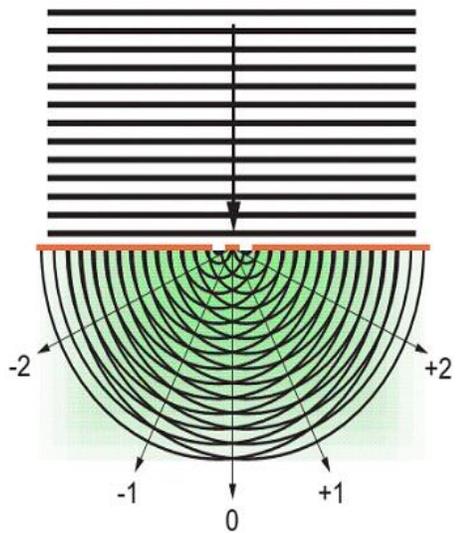


Задача РЕТ. Управление источником



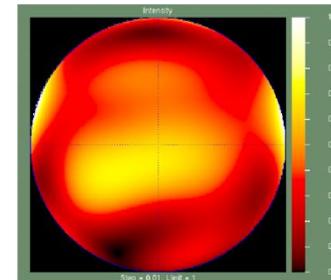
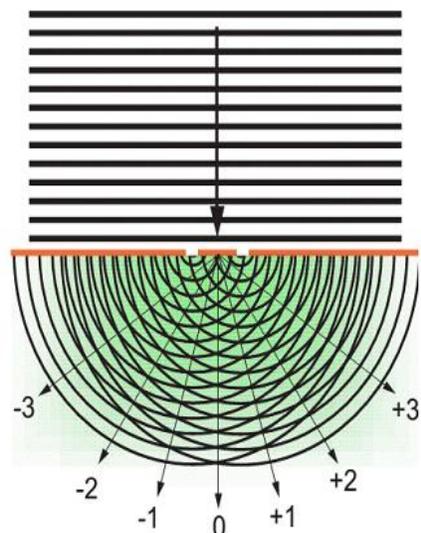
Стандартный источник

Период D

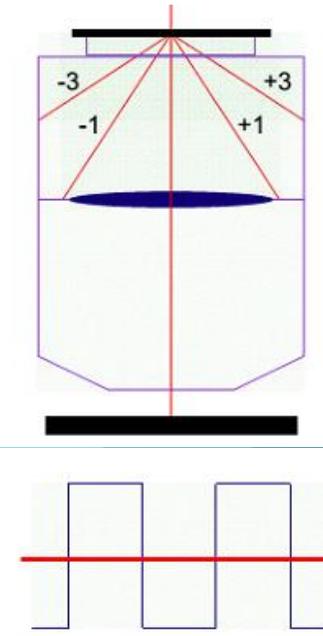
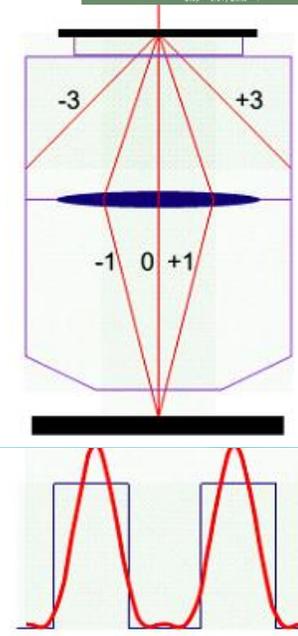
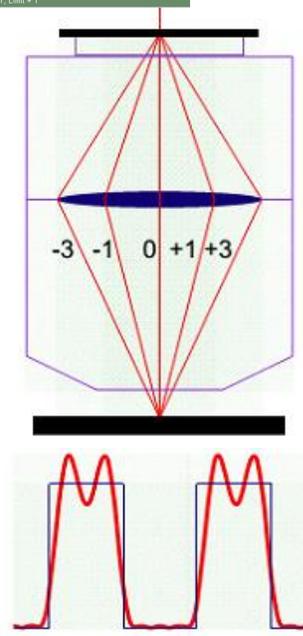


Параметрический источник

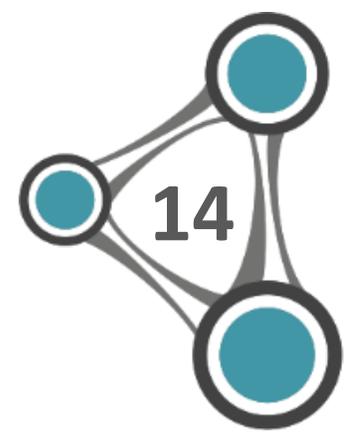
Период 2D



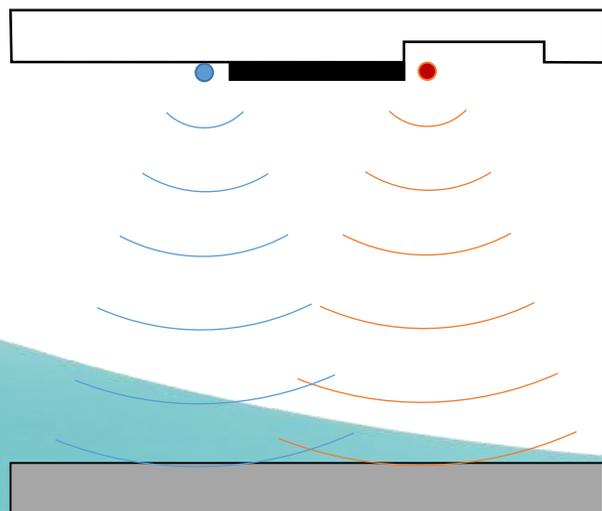
Источник произвольной формы



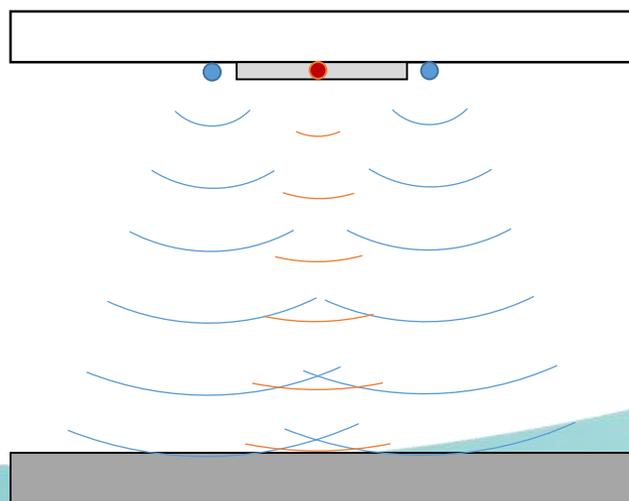
Задача RET. Фазосдвигающие шаблоны



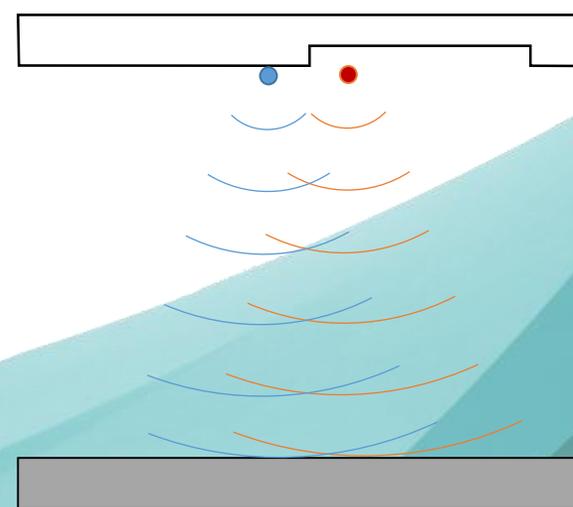
AAPSM
(Alternating Aperture Phase Shift Mask)



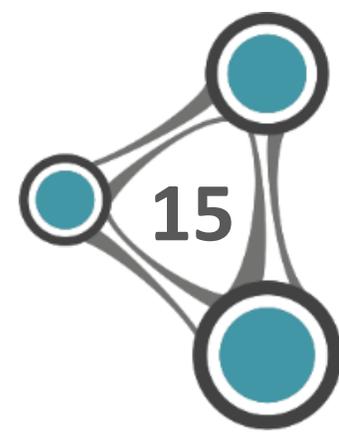
EAPSM
(Embedded Attenuated Phase Shift Mask)



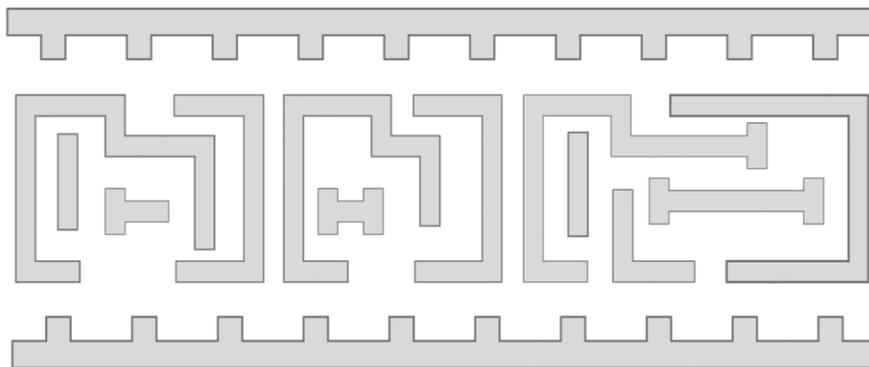
CPL
(Chromeless Phase Litho Phase Shift Mask)



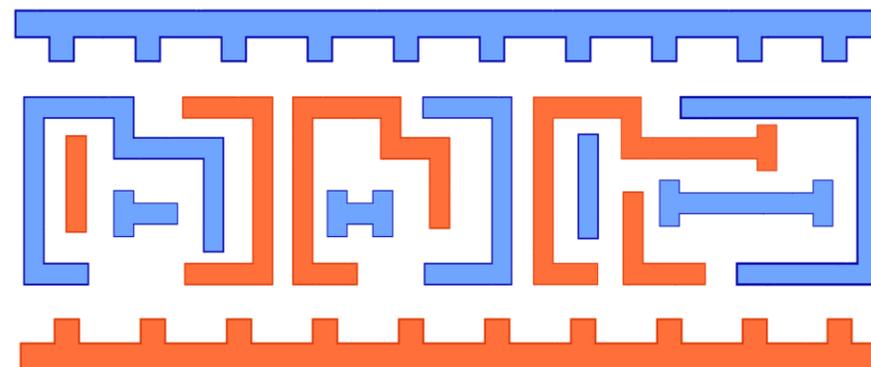
Задачи RET. Мультипаттернирование



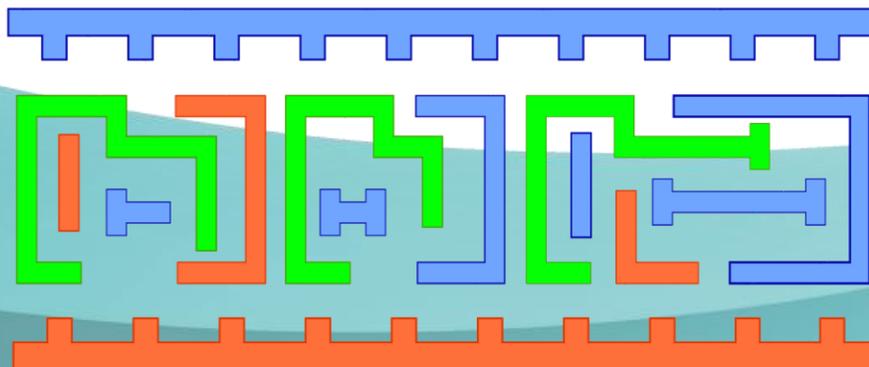
Исходная топология



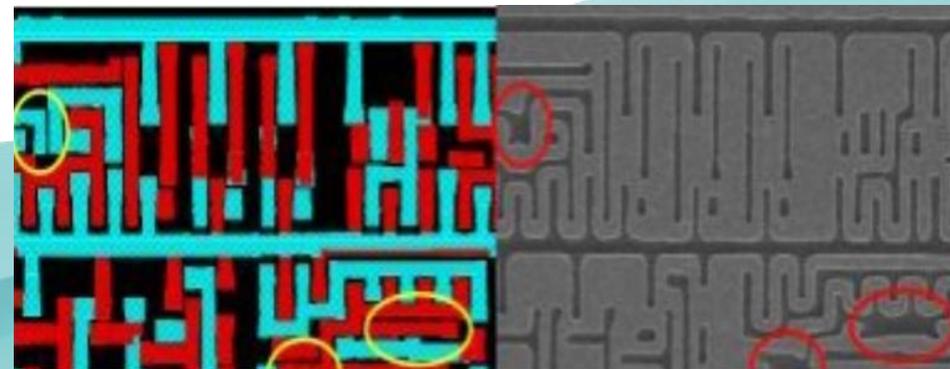
Двойное паттернирование



Тройное паттернирование

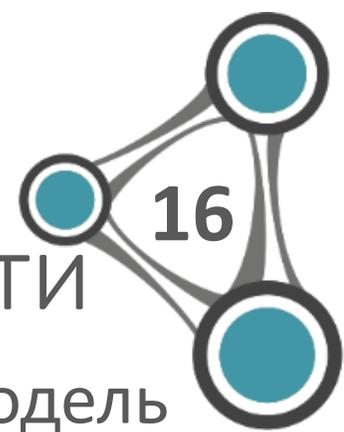


Ошибка разбиения

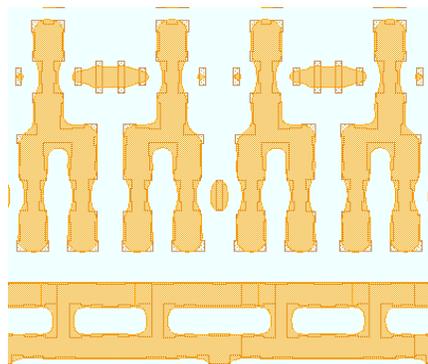


Задачи RET.

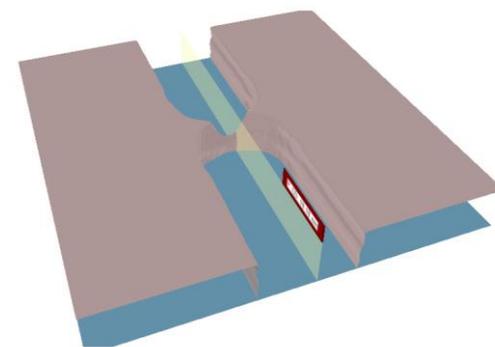
Коррекция эффектов оптической близости



Компактная модель



Физическая модель

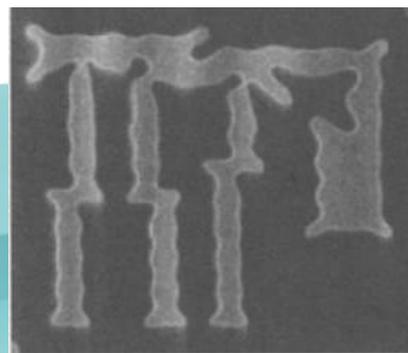


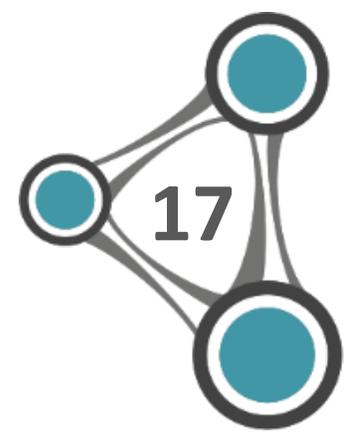
RB-OPC

MB-OPC

ILT

P, нм	W, нм
180	92
190	86
...	...
100	84





Компоновка кадра.

Полуавтоматически для SPW

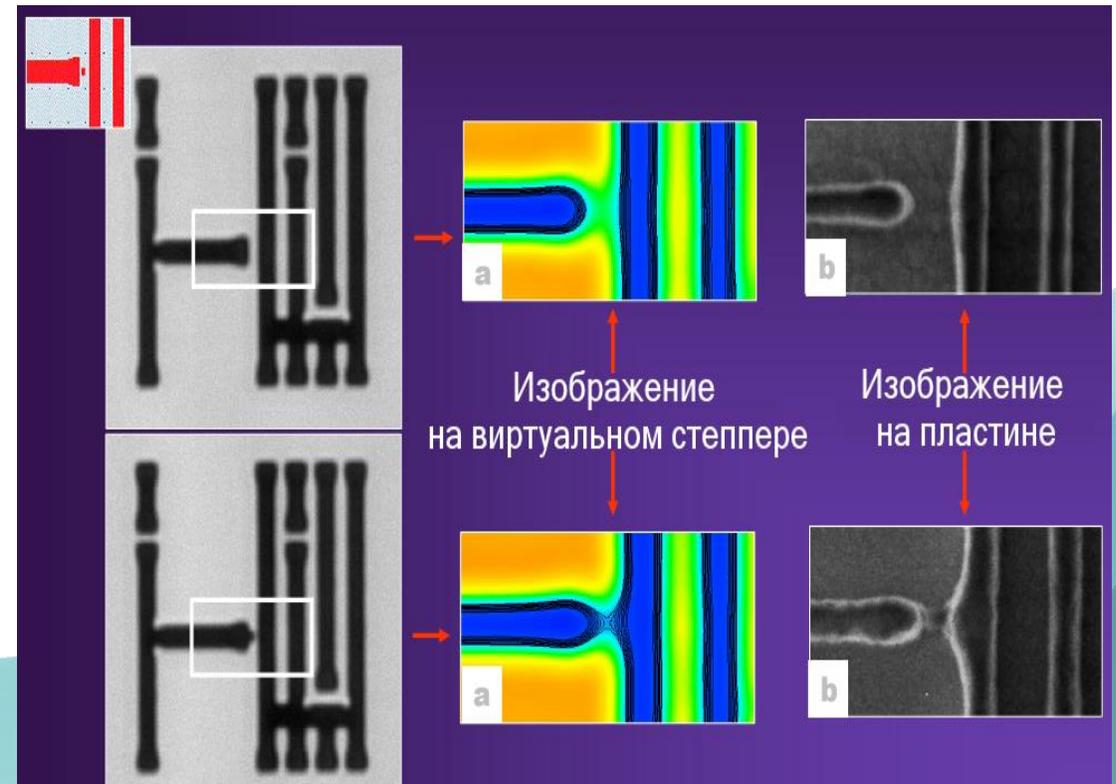
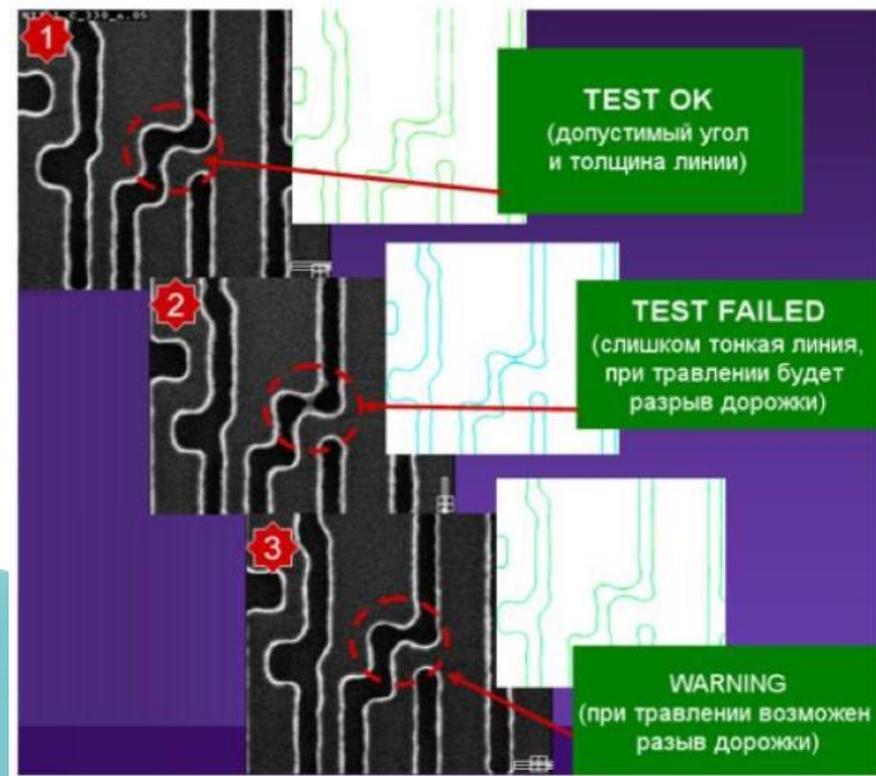
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1
1	1	Тех. монитор			1

Вручную для MPW

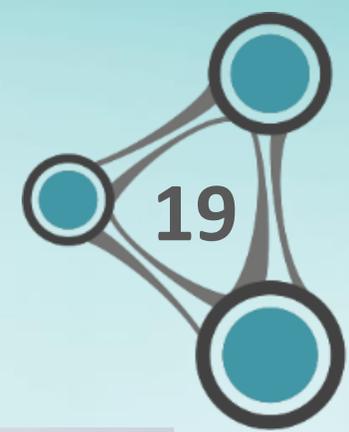
1	1	Тех. монитор		1	
1	1	1	1	1	1
1	1	3		3	
2	2	3		3	

Поиск ошибок моделирования

Модели MRC, ORC и LCC на основе



Раздел 4



Машинное обучение в
решении задач
фотолитографии

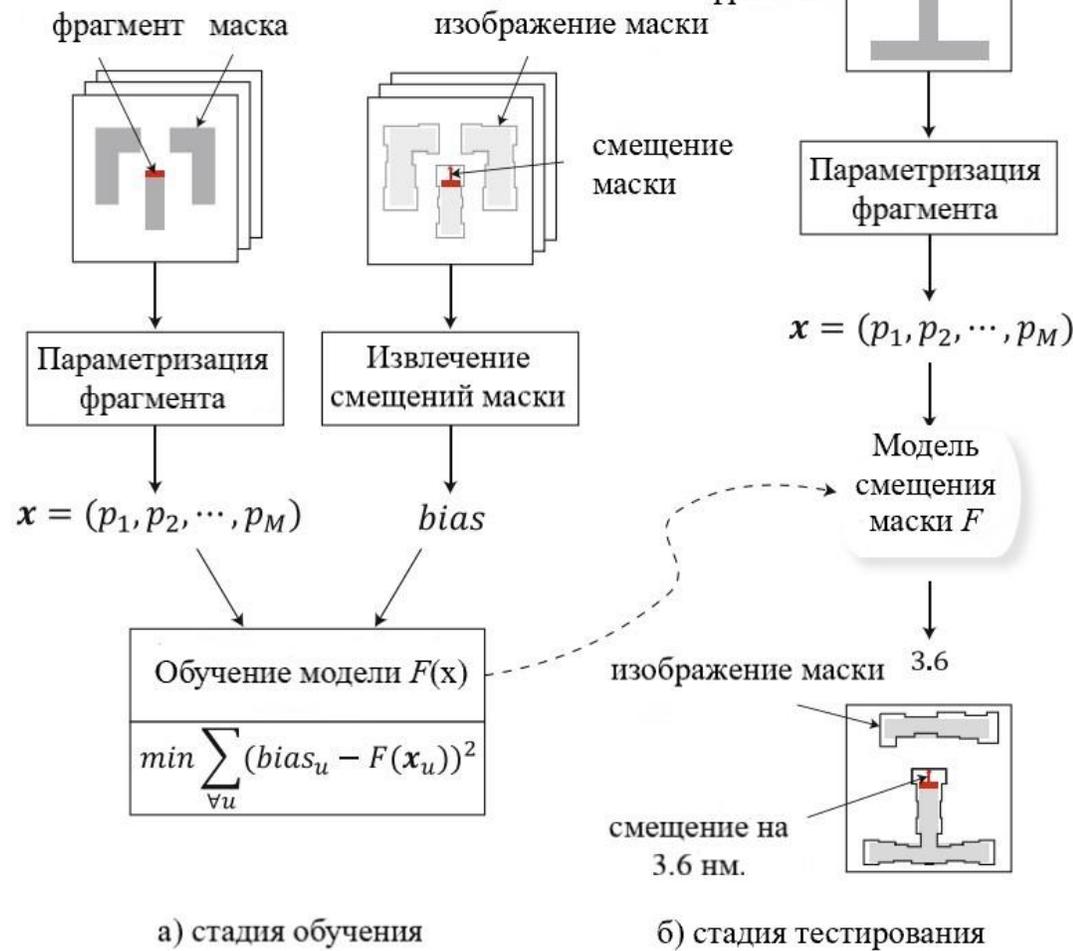
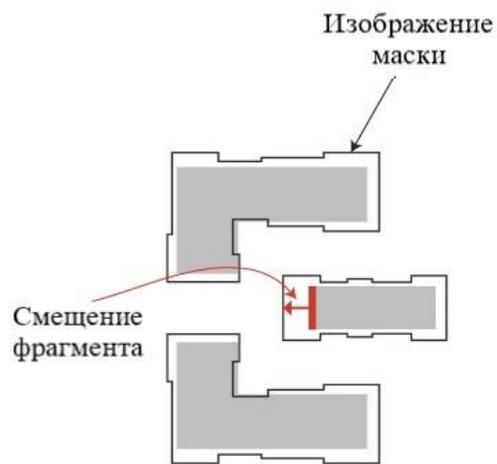


Постановка задачи. MV-ORC.

Объект - фрагмент

Входной вектор - параметры фрагмента

Целевая переменная - смещение фрагмента

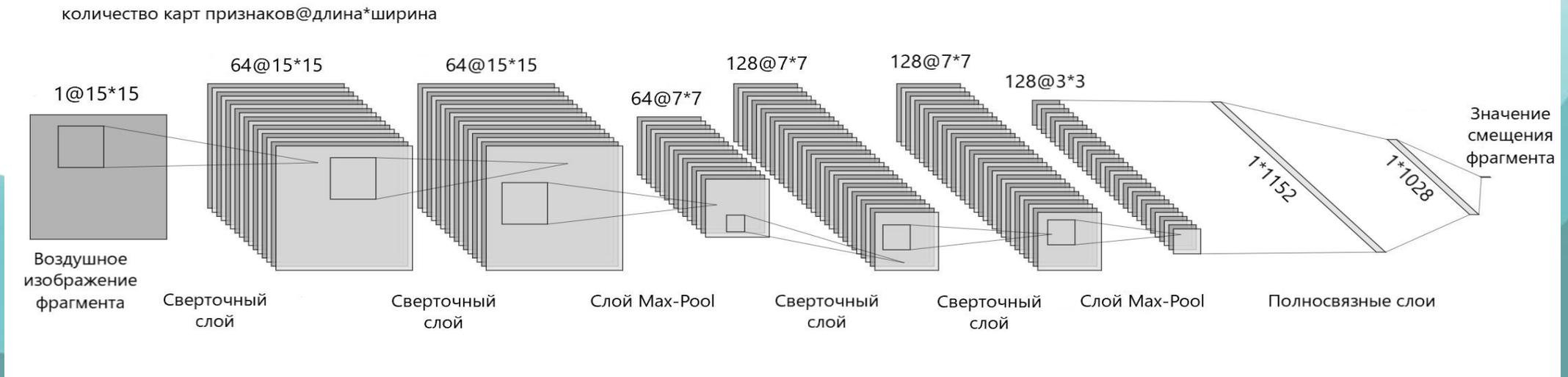


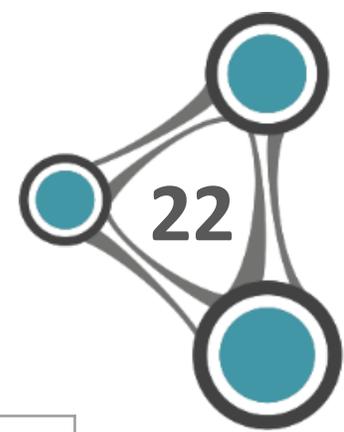
Протестированные модели

1. Линейная регрессия (linear regression)
2. Градиентный бустинг (gradient boosting)
3. Случайный лес (random forest)
4. Сверточная нейронная сеть (convolution neural network)

Средняя квадратическая ошибка
(root mean square error)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (y_i - \tilde{y}_i)^2}$$





МВ-ОРС. Результаты тестирования

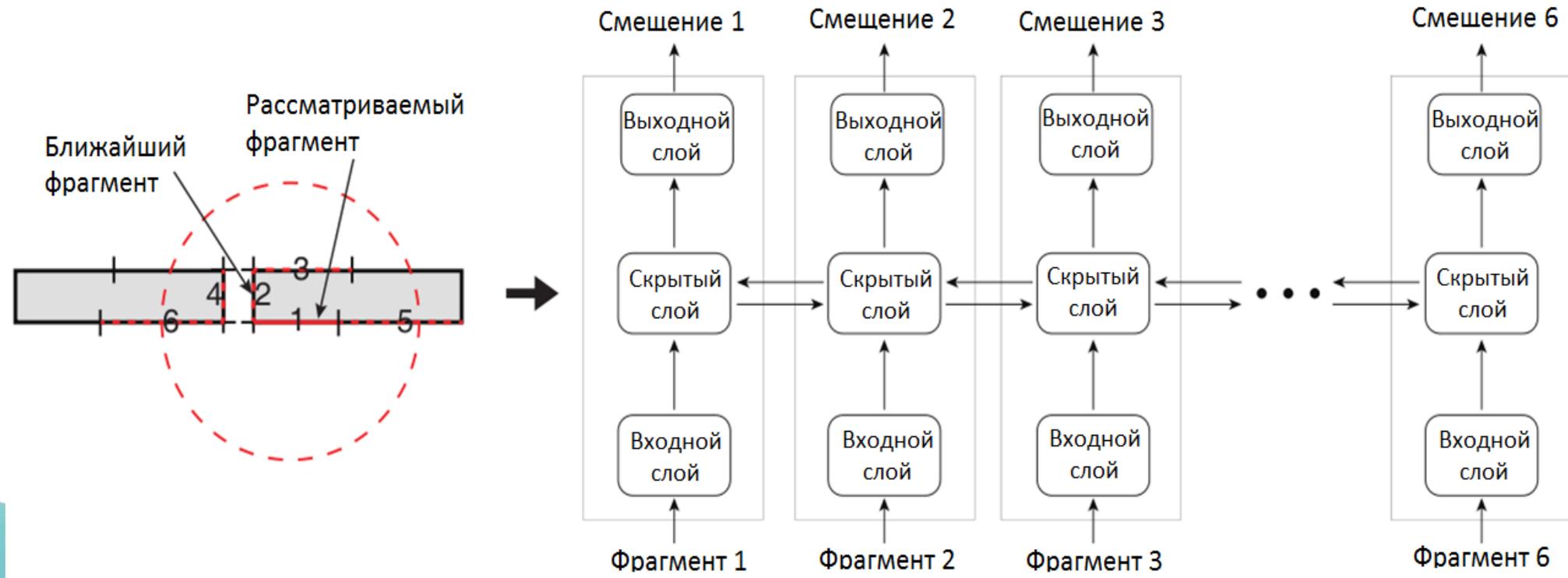
Сравнение ошибок моделей для 90нм

Модель	MAE, нм	RMSE, нм	Верно угаданные направления, %
Линейная регрессия	4,89±0,04	7,75±0.03	92,8
Градиентный бустинг	3,43±0.02	4,86±0.04	94,2
Случайный лес	2,00±0.01	3,51±0,04	97,9
Сверточная нейронная сеть	2,45±0.05	3,80±0.08	97,2

Лучший результат для технологии 28 нм – 1.45-0.86 нм

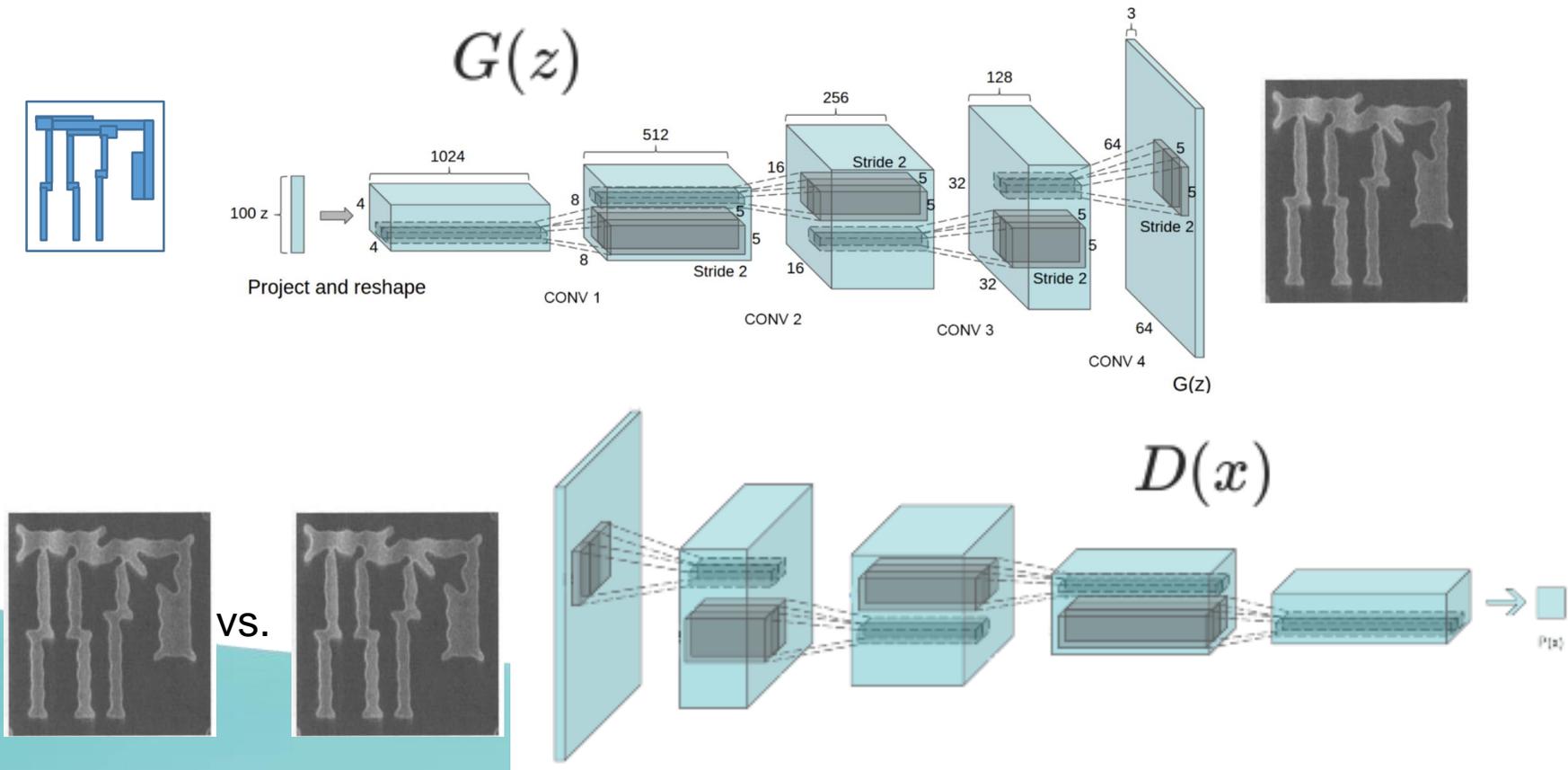
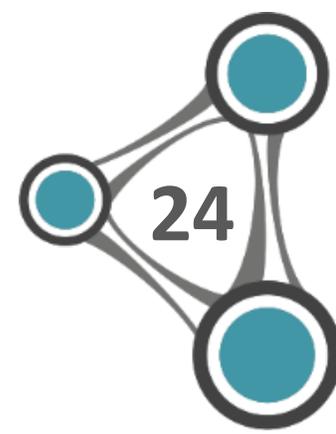
[Cho J., Cho G., Shin Y. Optimization of Machine Learning Guided Optical Proximity Correction //2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). – IEEE, 2018. – С. 921-924.]

МВ-ОРС. Двунаправленные нейронные сети



[Yonghwi Kwon Y.S. Youngsoo Song. Optical proximity correction using bidirectional recurrent neural network (BRNN) / Y.S. Youngsoo Song Yonghwi Kwon // Proc. SPIE 10962, Design-Process-Technology Co-optimization for Manufacturability XIII, 109620D. – 2019. – Vol. 10962.]

ИТ. Технология GAN v1. Прямое моделирование



ИЛТ. Технология GAN v2. Прямое моделирование

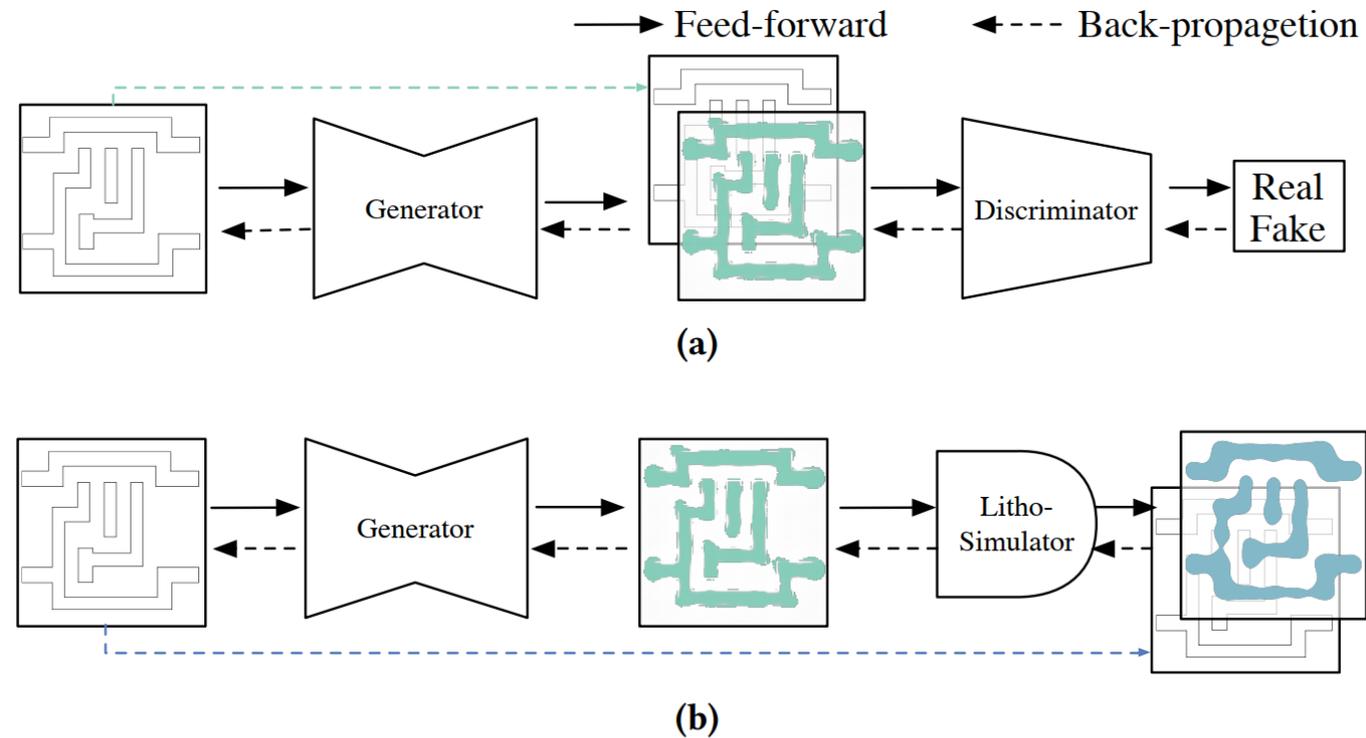
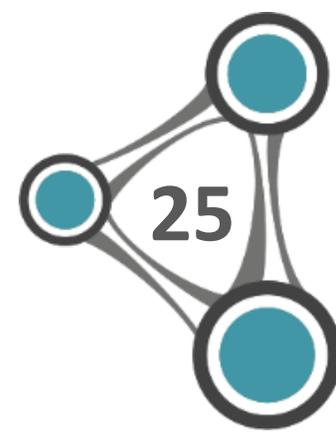


Figure 5: (a) GAN-OPC training and (b) ILT-guided pre-training.

[Yang H. et al. GAN-OPC: Mask optimization with lithography-guided generative adversarial nets //IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2019. – T. 39. – №. 10. – C. 2822-2834.]

Сравнение подходов GAN

Вариант 1

Table 3: Comparison of evaluation metrics among different lithography modeling methods.

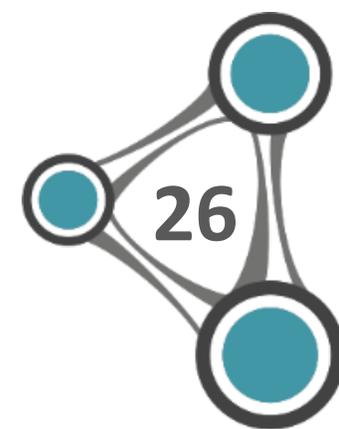
Dataset	Method	EDE (nm)		Pixel Acc.	Class Acc.	Mean IoU
		Mean	Std. dev.			
N10	Ref. [12]	0.67	0.55	0.98	0.99	0.98
	CGAN	1.52	0.95	0.96	0.97	0.94
	LithoGAN	1.08	0.88	0.97	0.98	0.96
N7	Ref. [12]	0.55	0.53	0.99	0.99	0.98
	CGAN	1.21	0.77	0.98	0.98	0.96
	LithoGAN	0.88	0.67	0.99	0.99	0.97

Table 4: Runtime comparison among different methods.

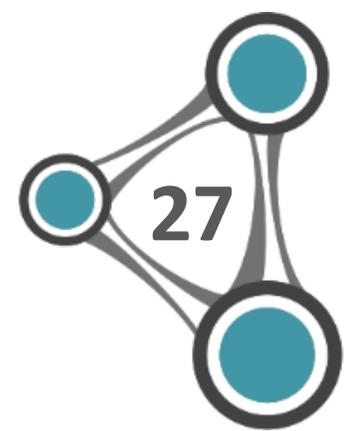
Method	Rigorous Sim	Ref. [12]			Ours (CGAN/LithoGAN)
		Optical Sim	ML	Contour	
Time	> 15h	80m	8s	15m	30s
Ratio	> 1800	190			1

Вариант 2

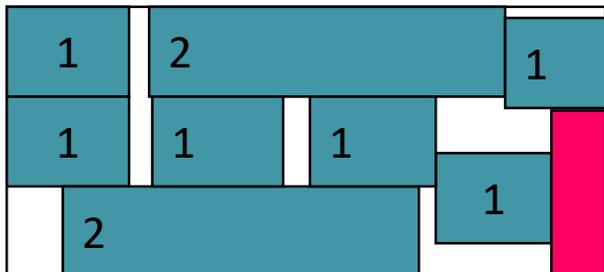
Технология	32 нм
Слой	M1
Pitch	140x140nm
Tip to Tip distance	60
Critical Dimension	80
LithoEngine	788.5 сек.
LE+CGAN	371.3 сек.



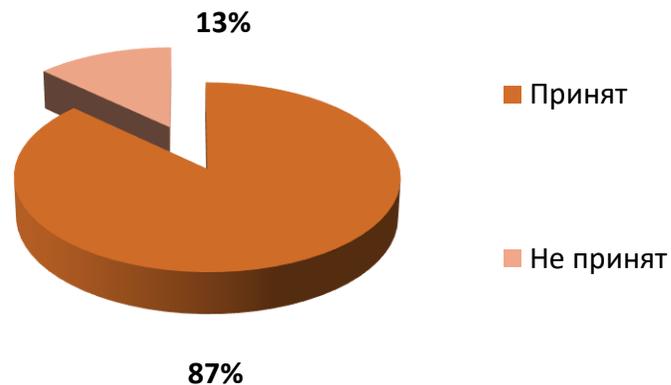
Компоновка кадра



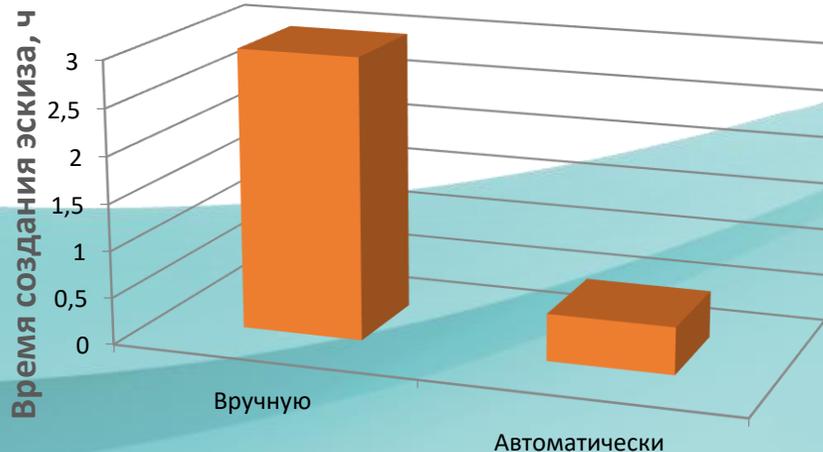
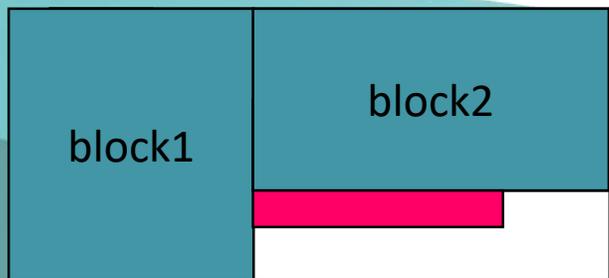
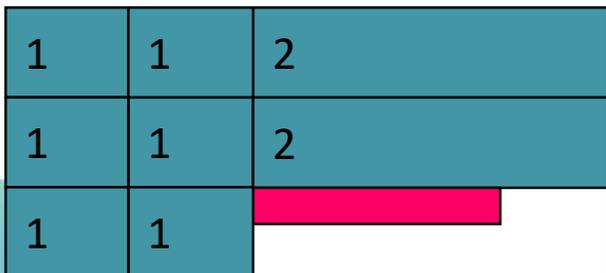
Неоптимальное размещение кристаллов



Согласование эскиза главным конструктором



Кристаллы с одинаковыми габаритами формируются в блоки



Поиск горячих точек. Подготовка данных

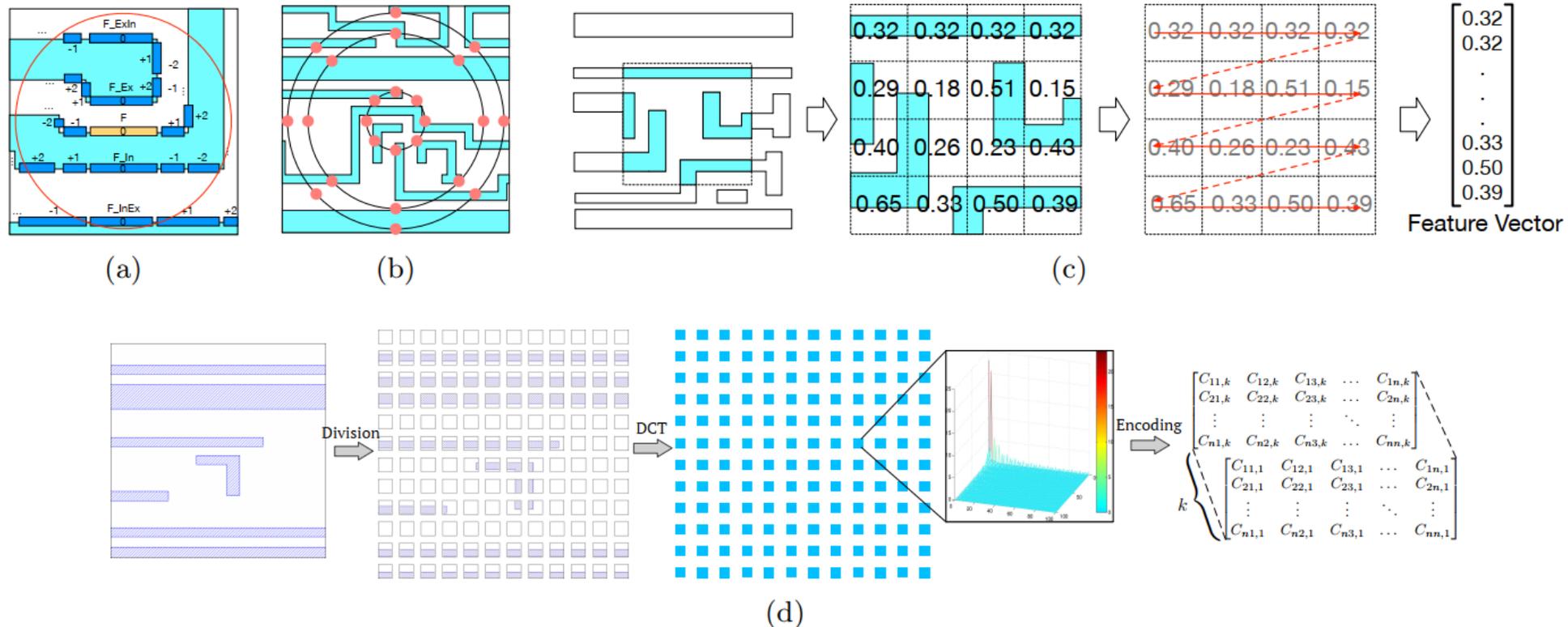
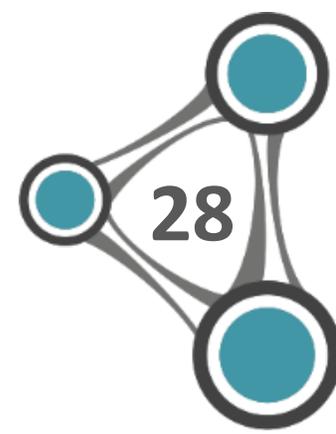


Figure 6: 6a Fragmentation based hotspot signature extraction.²⁴ 6b CCAS feature extraction.²⁵ 6c Density-based pattern representation.²⁶ 6d Feature tensor generation.²⁰

Поиск горячих точек. Результаты моделирования.

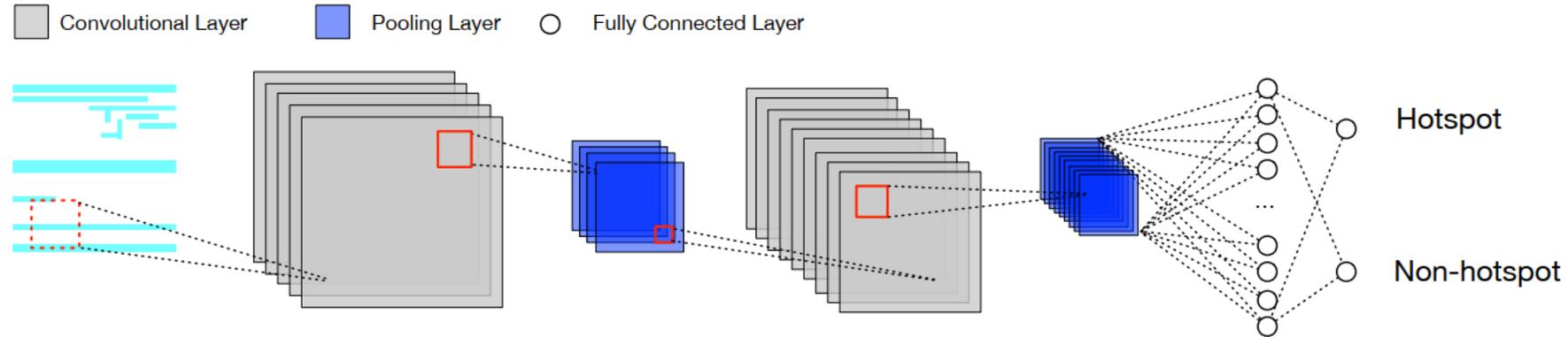
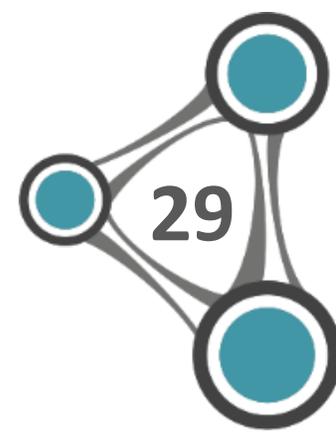


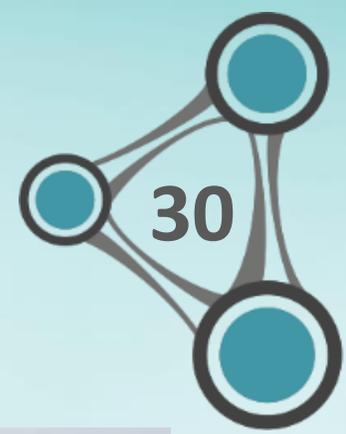
Figure 8: Example illustration of conventional neural network architecture for hotspot detection.²⁰

Table 1: Comparison between the state-of-the-art hotspot detectors^{20, 37}

Bench	Train		Test		SPIE'15 AdaBoost ²⁸		ICCAD'16 Online ³⁰		DAC'17 Deep ²⁰		SOCC'17 Deep ³⁷	
	HS#	NHS#	HS#	NHS#	FA#	Accu (%)	FA#	Accu (%)	FA#	Accu (%)	FA#	Accu (%)
ICCAD	1204	17096	2524	13503	2919	84.2	4497	97.7	3413	98.2	1776	97.36
Industry1	34281	15635	17157	7801	557	93.2	1136	89.9	680	98.9	307	98.41
Industry2	15197	48758	7520	24457	1320	44.8	7402	88.4	2165	93.6	793	90.56
Industry3	24776	49315	12228	24817	3144	44.0	8609	82.3	4196	91.3	1723	83.63
Avg.	-	-	-	-	2397	66.6	5411	89.6	2613	95.5	1150	92.49
Ratio	-	-	-	-	0.92	0.70	2.07	0.94	1.0	1.0	0.44	0.97

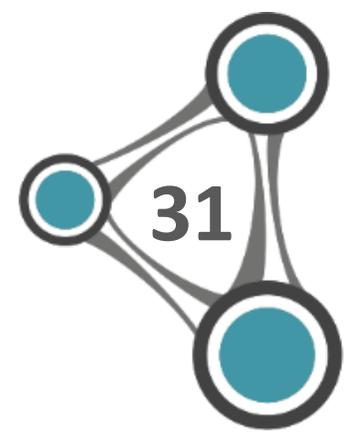
[Lin Y. et al. Machine learning for mask/wafer hotspot detection and mask synthesis //Photomask Technology 2017. – International Society for Optics and Photonics, 2017. – T. 10451. – C. 104510A.]

Раздел 5



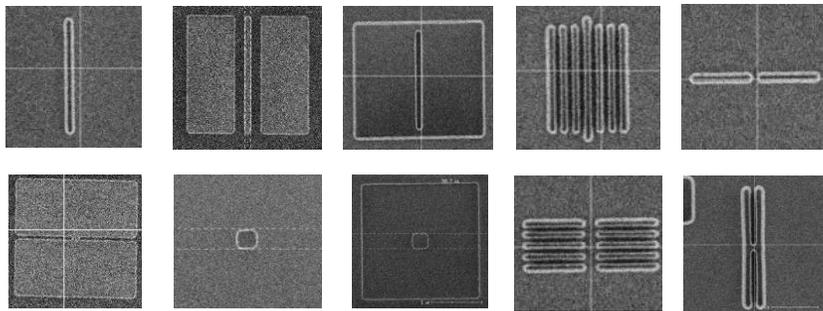
Коррекция моделей





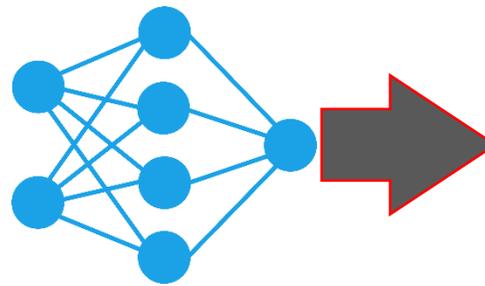
Калибровка модели фоторезиста

Изготовление образцов

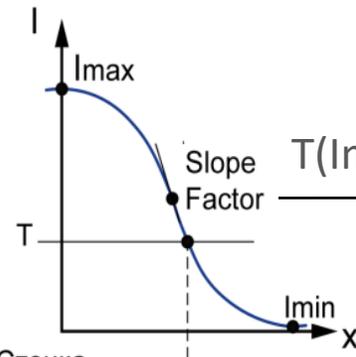


Проведение измерений

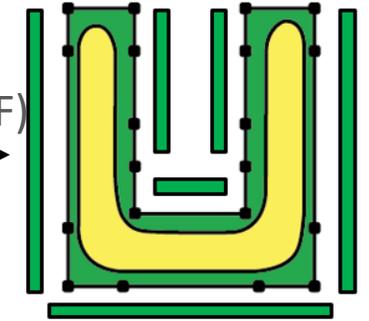
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
8900	891	5,4	15934	18,10219	30	AbuLine_42	349	349									
8906	892	5,4	15974	18,10191	30	AbuLine_43_A	350	350									
8907	893	5,4	15981	18,10191	30	AbuLine_43_B	351	351									
8908	894	5,4	15989	18,10191	30	AbuLine_43_C	352	352									
8909	895	5,4	15995	18,10191	30	AbuLine_43_D	353	353									
8910	896	5,4	15994	18,10219	30	AbuLine_43_E	354	354									
8911	897	5,4	16011	18,10191	30	AbuLine_43_F	355	355									
8912	898	5,4	16019	18,10191	30	AbuLine_43_G	356	356									
8913	899	5,4	16026	18,10191	30	AbuLine_43_H	357	357									
8914	900	5,4	16034	18,10219	30	AbuLine_43_I	358	358									
8915	901	5,4	15974	18,10219	30	A	359	359									
8916	902	5,4	15981	18,10219	30	B	360	360									
8917	903	5,4	15989	18,10219	30	C	361	361									
8918	904	5,4	15996	18,10219	30	D	362	362									
8919	905	5,4	15999	18,10219	30	E	363	363									
8920	906	5,4	16011	18,10219	30	F	364	364									
8921	907	5,4	16019	18,10219	30	G	365	365									
8922	908	5,4	16026	18,10219	30	H	366	366									
8923	909	5,4	16034	18,10219	30	I	367	367									
8924	910	5,4	15974	18,10219	30	J	368	368									
8925	911	5,4	15981	18,10219	30	K	369	369									
8926	912	5,4	15989	18,10219	30	L	370	370									
8927	913	5,4	15996	18,10219	30	M	371	371									
8928	914	5,4	15999	18,10219	30	N	372	372									
8929	915	5,4	16011	18,10219	30	O	373	373									
8930	916	5,4	16019	18,10219	30	P	374	374									
8931	917	5,4	16026	18,10219	30	Q	375	375									
8932	918	5,4	16034	18,10219	30	R	376	376									
8933	919	5,4	15974	18,10239	30	S	377	377									
8934	920	5,4	15981	18,10239	30	T	378	378									
8935	921	5,4	15989	18,10239	30	U	379	379									
8936	922	5,4	15996	18,10239	30	V	380	380									
8937	923	5,4	15999	18,10239	30	W	381	381									
8938	924	5,4	16011	18,10239	30	X	382	382									
8939	925	5,4	16019	18,10239	30	Y	383	383									
8940	926	5,4	16026	18,10239	30	Z	384	384									
8941	927	5,4	16034	18,10239	30	AbuLine_48_A	385	385									
8942	928	5,4	15974	18,10251	30	AbuLine_48_B	386	386									
8943	929	5,4	15981	18,10251	30	AbuLine_48_C	387	387									



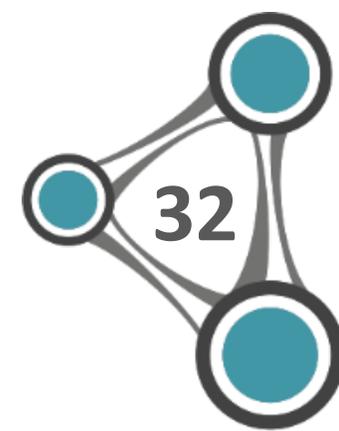
Калибровка модели фоторезиста



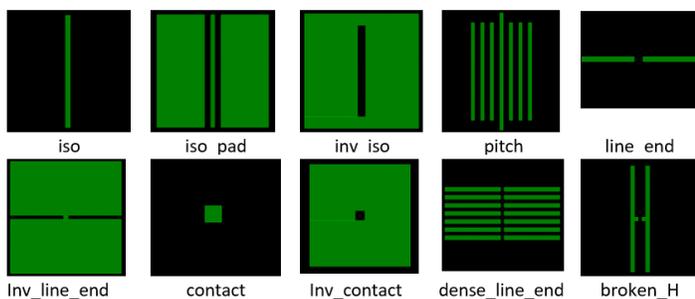
Стенка фоторезиста



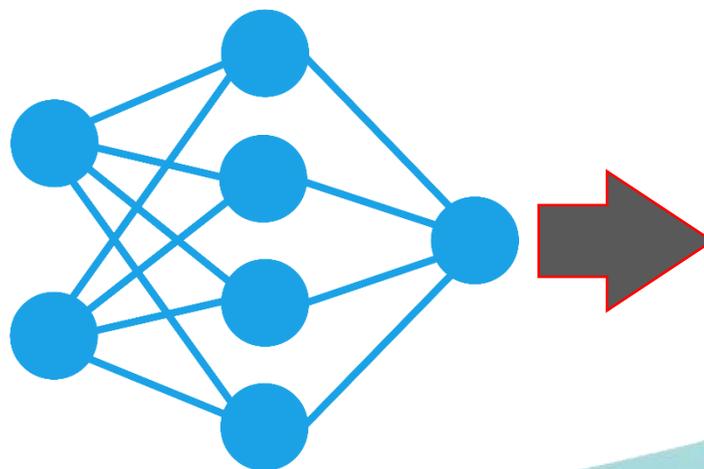
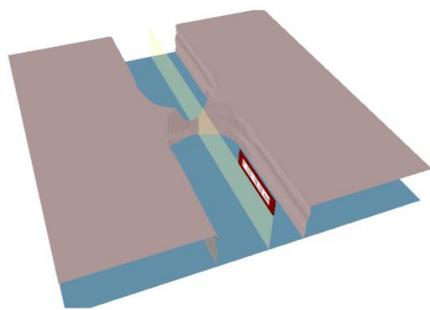
Настройка оптической модели



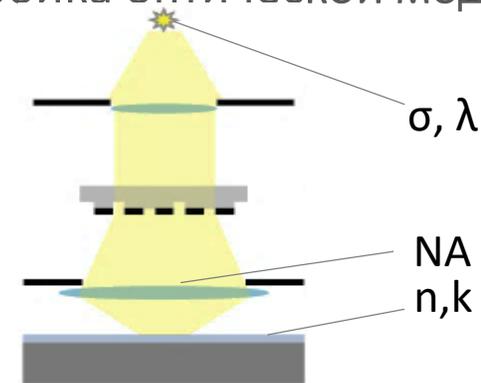
Разработка калибровочной ячейки



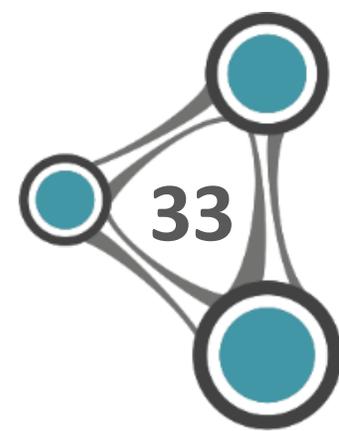
Физическая модель



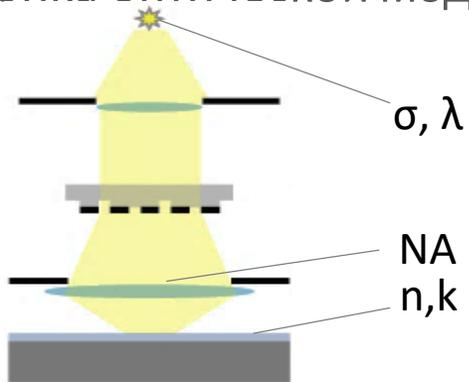
Настройка оптической модели



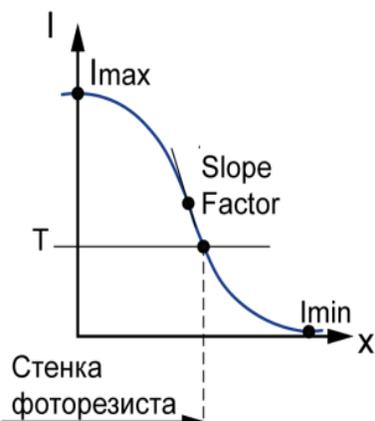
Калибровка моделей



Настройка оптической модели

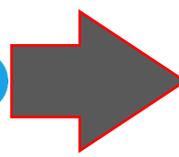
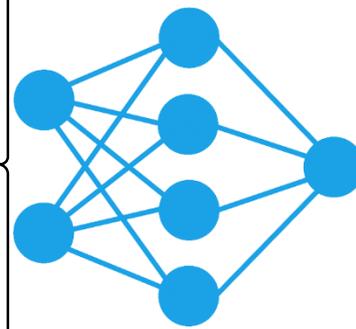


Модели фоторезиста

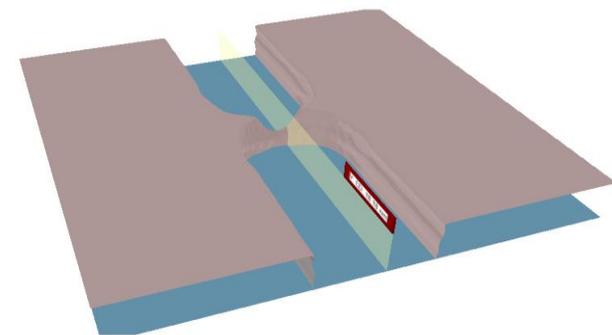


Проведение измерений

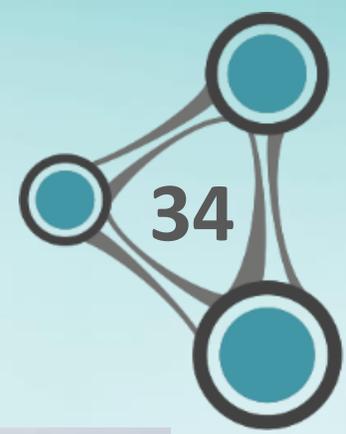
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
0605	051	5.4					18034.18.10182.30			AbutLine_42	340							
0606	052	5.4					15974.18.10191.30			AbutLine_43_A	350							
0607	053	5.4					15981.68.10191.80			AbutLine_43_B	351							
0608	054	5.4					15989.18.10191.30			AbutLine_43_C	352							
0609	055	5.4					15988.68.10191.80			AbutLine_43_D	353							
0610	056	5.4					18034.18.10181.30			AbutLine_43_E	354							
0611	057	5.4					18011.68.10191.30			AbutLine_43_F	355							
0612	058	5.4					18019.18.10191.30			AbutLine_43_G	356							
0613	059	5.4					18028.68.10191.30			AbutLine_43_H	357							
0614	060	5.4					18034.18.10181.30			AbutLine_43_I	358							
0615	061	5.4					15974.18.10218.80			AbutLine_43_J	359							
0616	062	5.4					15981.68.10218.80			AbutLine_43_K	360							
0617	063	5.4					15989.18.10218.80			AbutLine_43_L	361							
0618	064	5.4					15988.68.10218.80			AbutLine_43_M	362							
0619	065	5.4					18034.18.10182.30			AbutLine_43_N	363							
0620	066	5.4					18011.68.10218.80			AbutLine_43_O	364							
0621	067	5.4					18019.18.10218.80			AbutLine_43_P	365							
0622	068	5.4					18028.68.10218.80			AbutLine_43_Q	366							
0623	069	5.4					18034.18.10218.80			AbutLine_43_R	367							
0624	070	5.4					15974.18.10218.80			AbutLine_43_S	368							
0625	071	5.4					15981.68.10218.80			AbutLine_43_T	369							
0626	072	5.4					15989.18.10218.80			AbutLine_43_U	370							
0627	073	5.4					15988.68.10218.80			AbutLine_43_V	371							
0628	074	5.4					18034.18.10182.30			AbutLine_43_W	372							
0629	075	5.4					18011.68.10218.80			AbutLine_43_X	373							
0630	076	5.4					18019.18.10218.80			AbutLine_43_Y	374							
0631	077	5.4					18028.68.10218.80			AbutLine_43_Z	375							
0632	078	5.4					18034.18.10218.80			AbutLine_43_AA	376							
0633	079	5.4					15974.18.10228.30			AbutLine_43_AB	377							
0634	080	5.4					15981.68.10228.30			AbutLine_43_AC	378							
0635	081	5.4					15989.18.10228.30			AbutLine_43_AD	379							
0636	082	5.4					15988.68.10228.30			AbutLine_43_AE	380							
0637	083	5.4					18034.18.10228.30			AbutLine_43_AE	381							
0638	084	5.4					18011.68.10228.30			AbutLine_43_AE	382							
0639	085	5.4					18019.18.10228.30			AbutLine_43_AE	383							
0640	086	5.4					18028.68.10228.30			AbutLine_43_AE	384							
0641	087	5.4					18034.18.10228.30			AbutLine_43_AE	385							
0642	088	5.4					15974.18.10281.80			SPCross_48_A	386							
0643	089	5.4					15981.68.10281.80			SPCross_48_B	387							



Быстрое моделирование 3D профиля в фоторезисте



Раздел 6

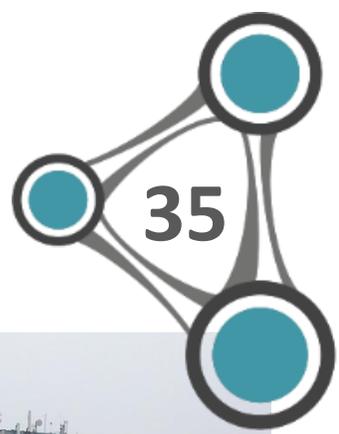


Выводы

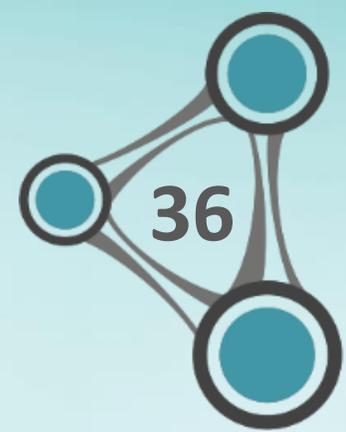


Выводы:

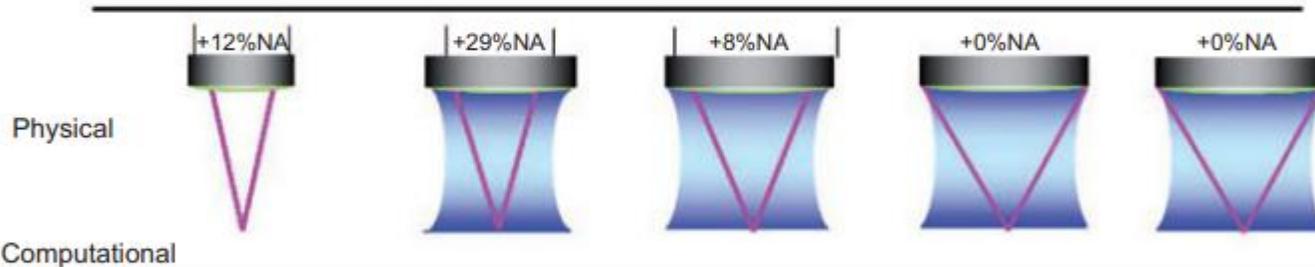
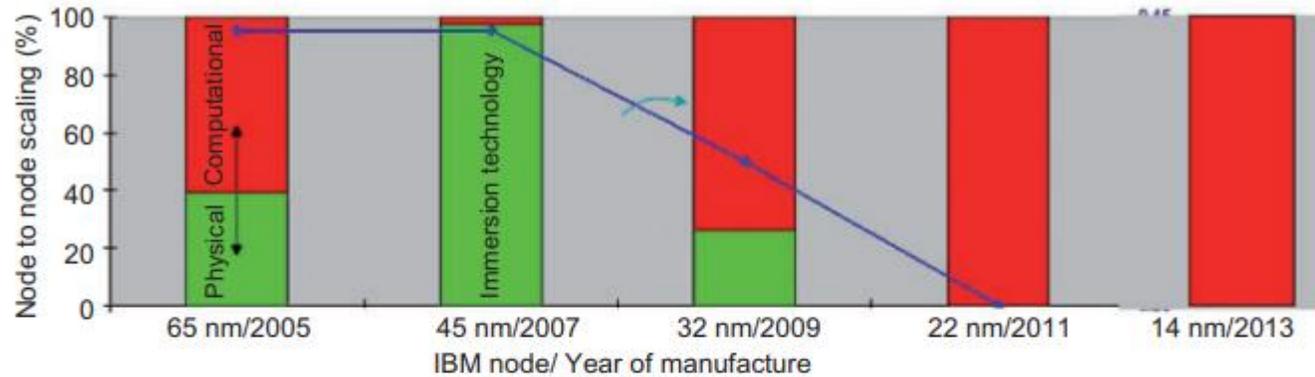
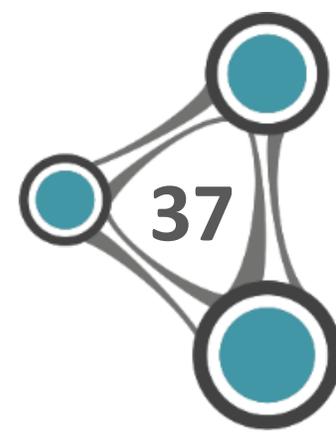
1. Применение машинного обучения позволяет ускорить моделирование технологического процесса фотолитографии
2. Применение машинного обучения позволяет автоматизировать компоновку кадра
3. Применение машинного обучения позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам для моделирования



Спасибо за внимание



Основные методы технологий

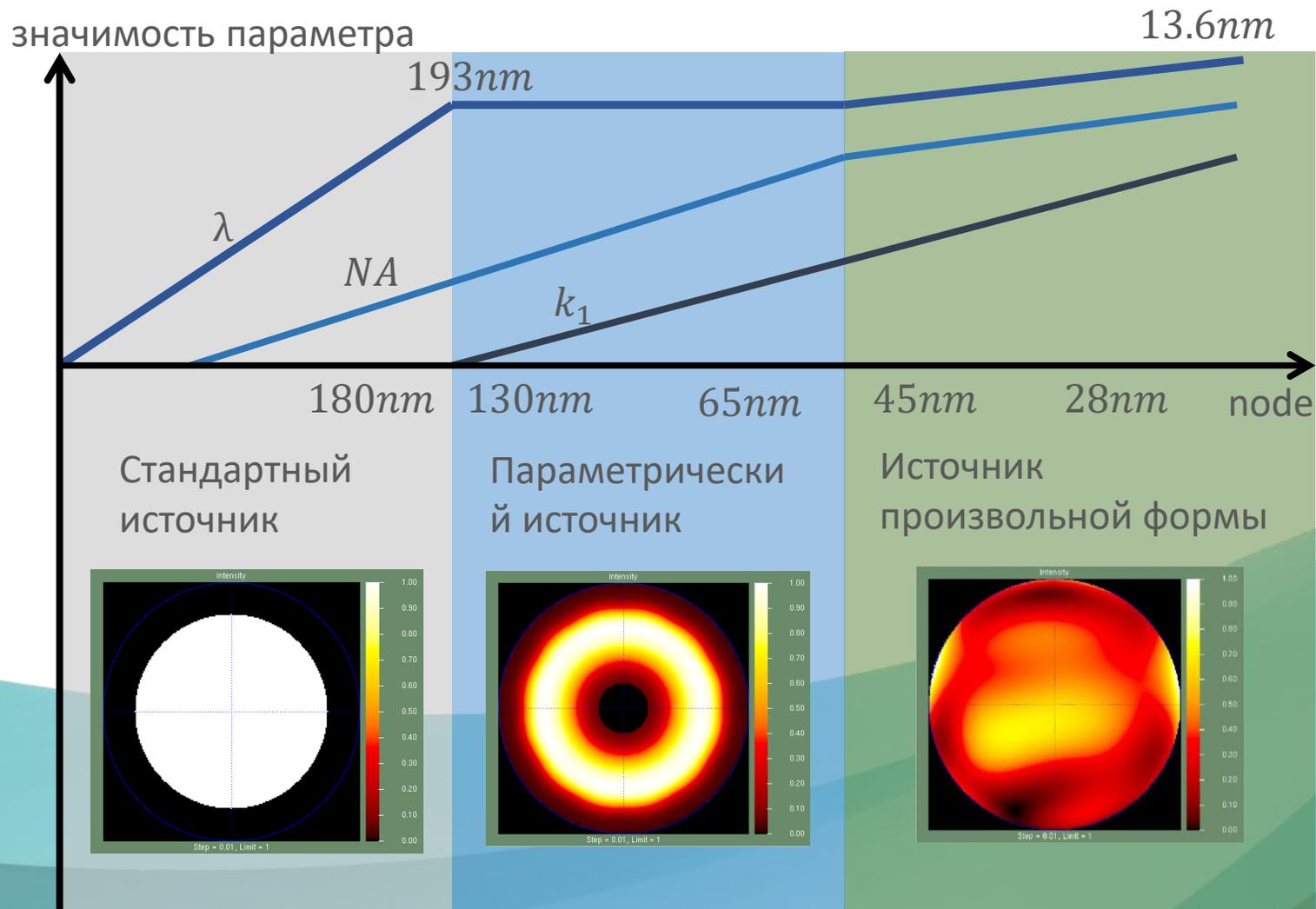


	65 nm	45 nm	32 nm	22 nm	14 nm
$k_1 < 0.6$	OPC	OPC	OPC	OPC	
$K_1 < 0.5$	OAI	OAI	OAI		
$k_1 < 0.35$				SMO	SMO
$k_1 < 0.25$					Double patterning

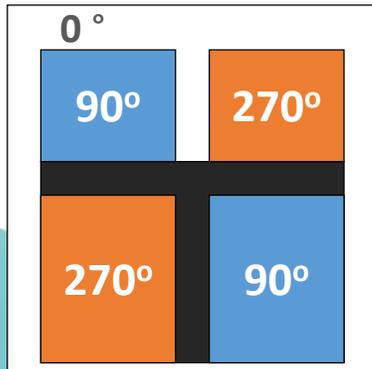
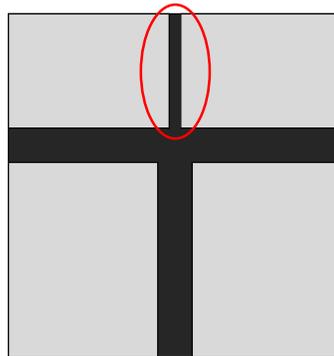
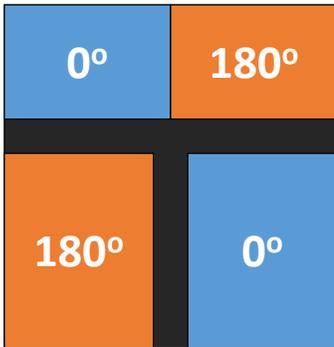
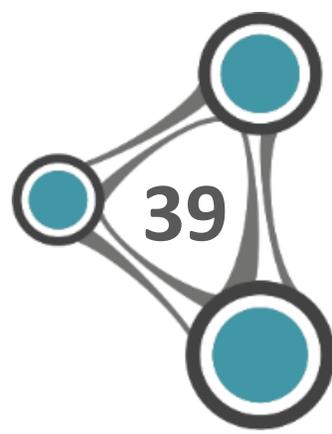
Lai, K. (2012). Review of computational lithography modeling: focusing on extending optical lithography and design-technology co-optimization.

RET для различных технологий

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$



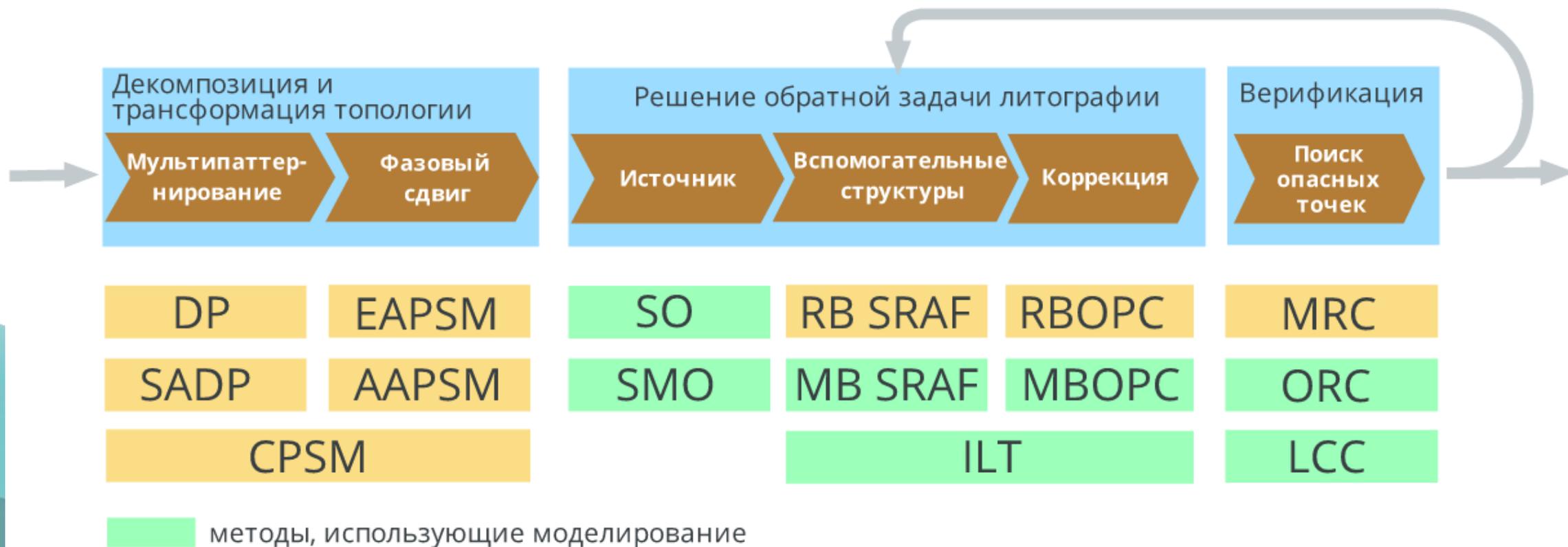
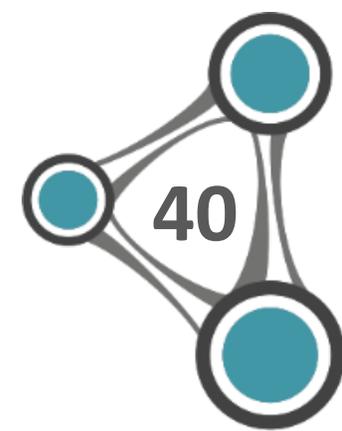
Фазосдвигающие фотошаблоны

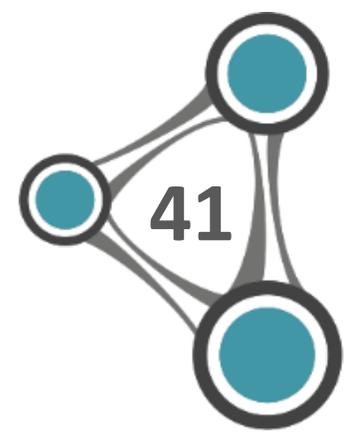


Границы раздела противоположных фаз формируют тонкие линии в фоторезисте. Проблему решают тремя способами:

- 1) Используют отделочный ФШ (trim mask) для удаления линий
- 2) Переход $180^\circ/0^\circ$ на фотошаблоне делают ступенчатым $180^\circ/120^\circ/60^\circ/0^\circ$
- 3) Используют фазы 270° и 90° :

Методы вычислительной литографии



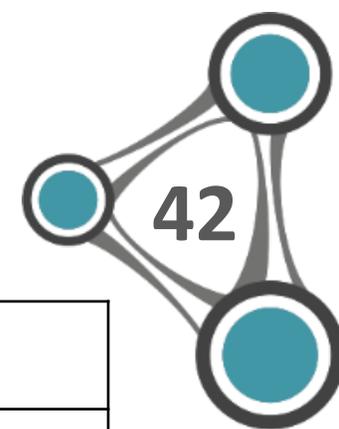


Методы генерации данных

Technology Node Name		130	90	65	45	32	22	14	10	7		
'Year of production'		'01	'03	'05	'07	'09	'11	'13	'15	'17		
Minimum pitch (nm)		350	250	200	140	100	80	64	48	~40		
Wavelength, λ (nm)		193nm										
NA		0.5	0.75	0.85	1.2	1.35						
		Rayleigh Factor (k_1)										
Physical Lithography Barrier	Conventional litho $k_1 > \sim 0.6$	0.6									Computational Litho Solution	
	Challenging Litho $0.6 > k_1 > 0.5$		0.5									Optical Proximity Correction (OPC)
	Freq. Doubled Litho $0.5 > k_1 > 0.35$			0.44	0.44	0.35						Off-Axis Illumination (OAI)
	Asymmetric RET $0.35 > k_1 > 0.25$						0.28					Source Mask Opt., Double Exposure
	Sub-Resolution $0.25 > k_1 > 0.125$							0.22	0.16	.13		Double & Triple Patterning
		Design Impact										
		Litho Friendly Design (LFD)										
		Pitch & orientation restrictions, compound rules										
		Construct-based design										
		DP-aware design										

Jacob, Ajey at all (2017). Scaling Challenges for Advanced CMOS Devices. International Journal of High Speed Electronics and Systems. 26. 1740001

ПО для генерации данных



	Название	Разработчик	Страна
Физические модели	Prolith	KLA	США
	Hyperlith	Panoramic Technology	США
	Optolith	Silvaco	США
	LAB	Genlsys	Германия
	Optolithium	МГТУ им. Н.Э.Баумана	РФ
	Sentaurus Lithography	Synopsys	США
Компактные модели	Proteus WorkBench	Synopsys	США
	Litho physical analyzer	Cadence	США
	Calibre WORKbench	Mentor Graphics	США