

自由電子レーザー光源により 可能になるEUVスキナーの 設計オプションの検討

Thomas V. Pistor
Panoramic Technology Inc.

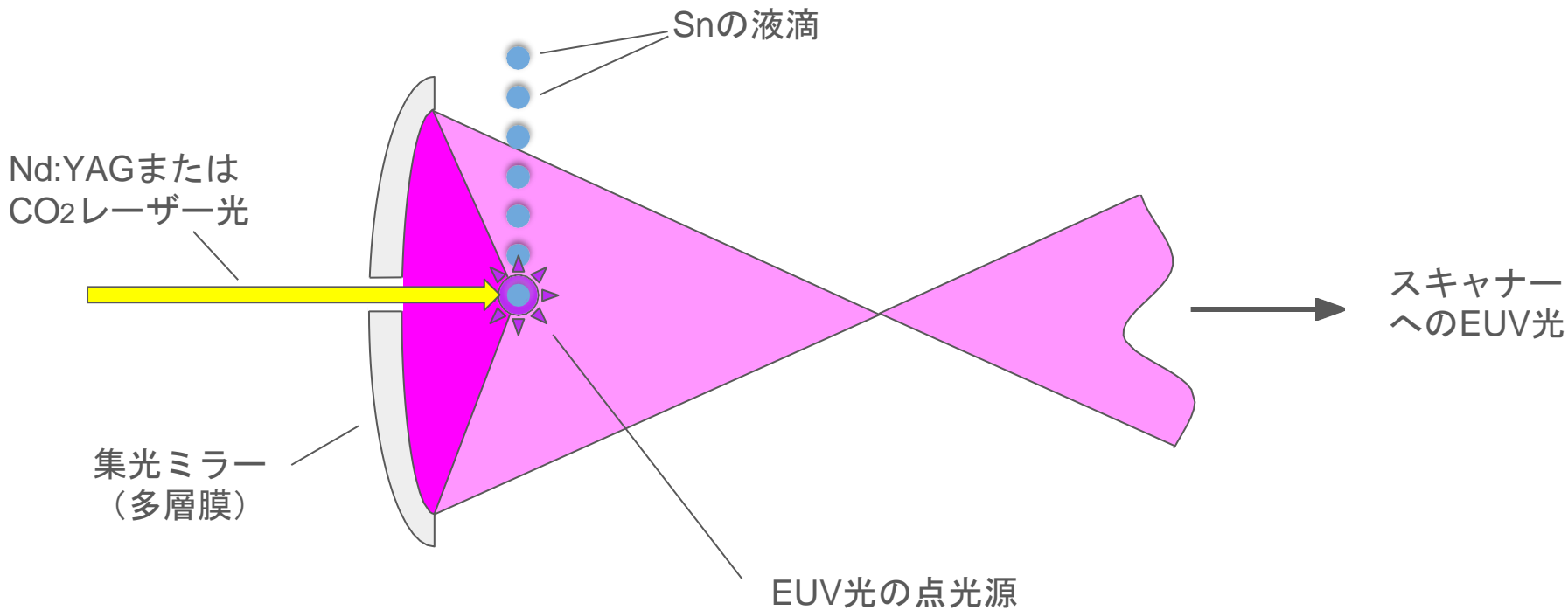
発表の概要

- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討:プロジェクト“i.55”
- まとめ

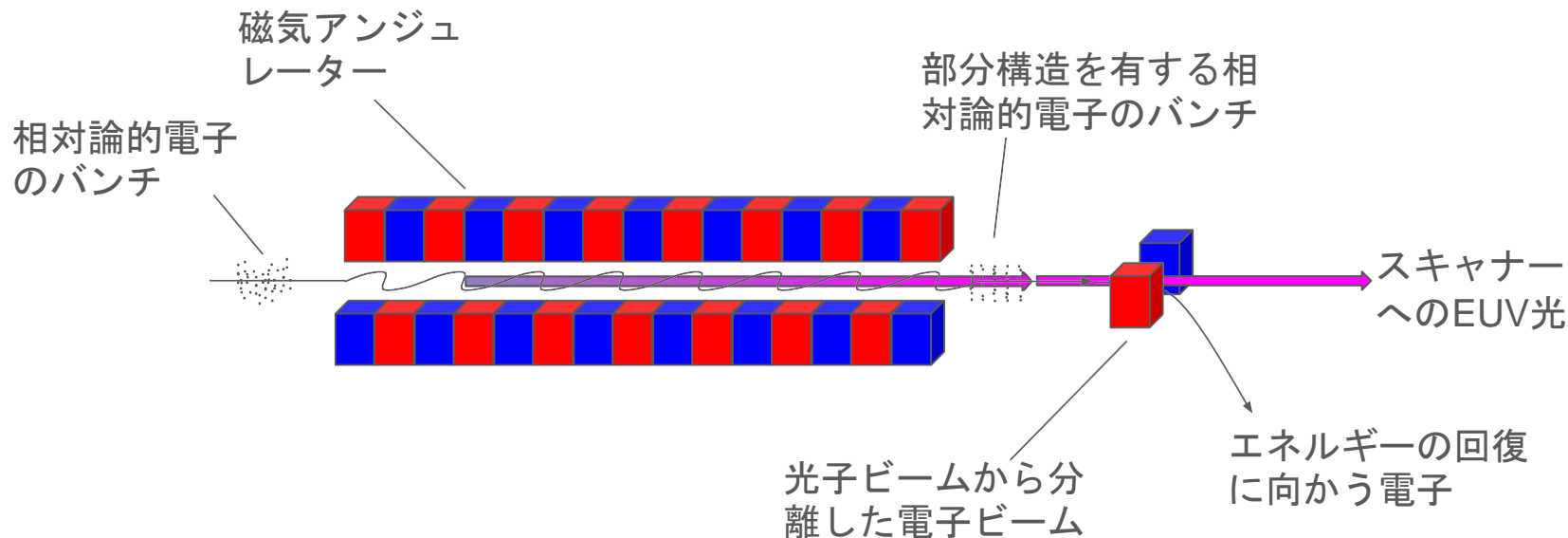
発表の概要

- **自由電子レーザー(FEL)の紹介**
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討: プロジェクト“i.55”
- まとめ

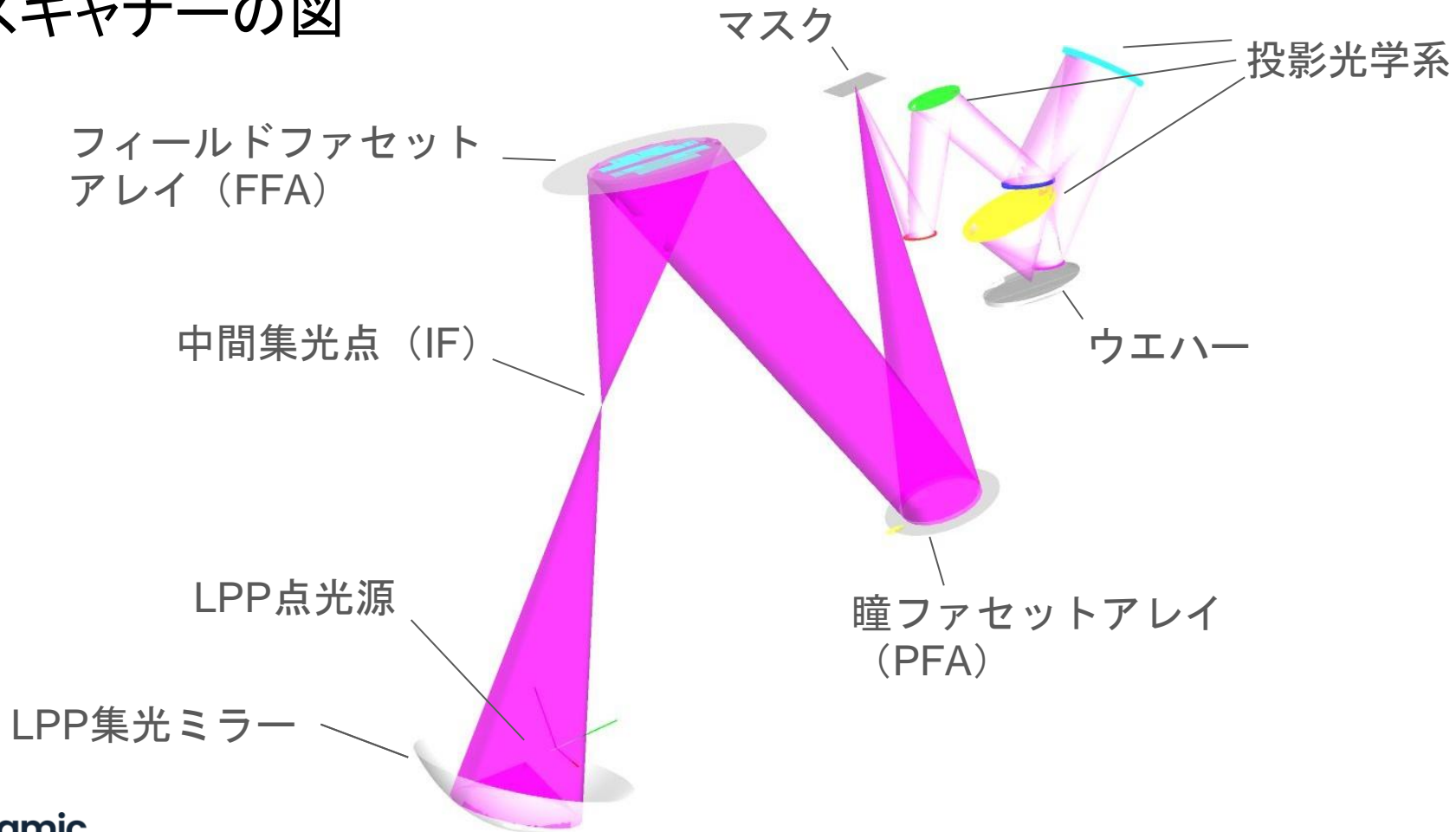
レーザー生成プラズマ (LPP)



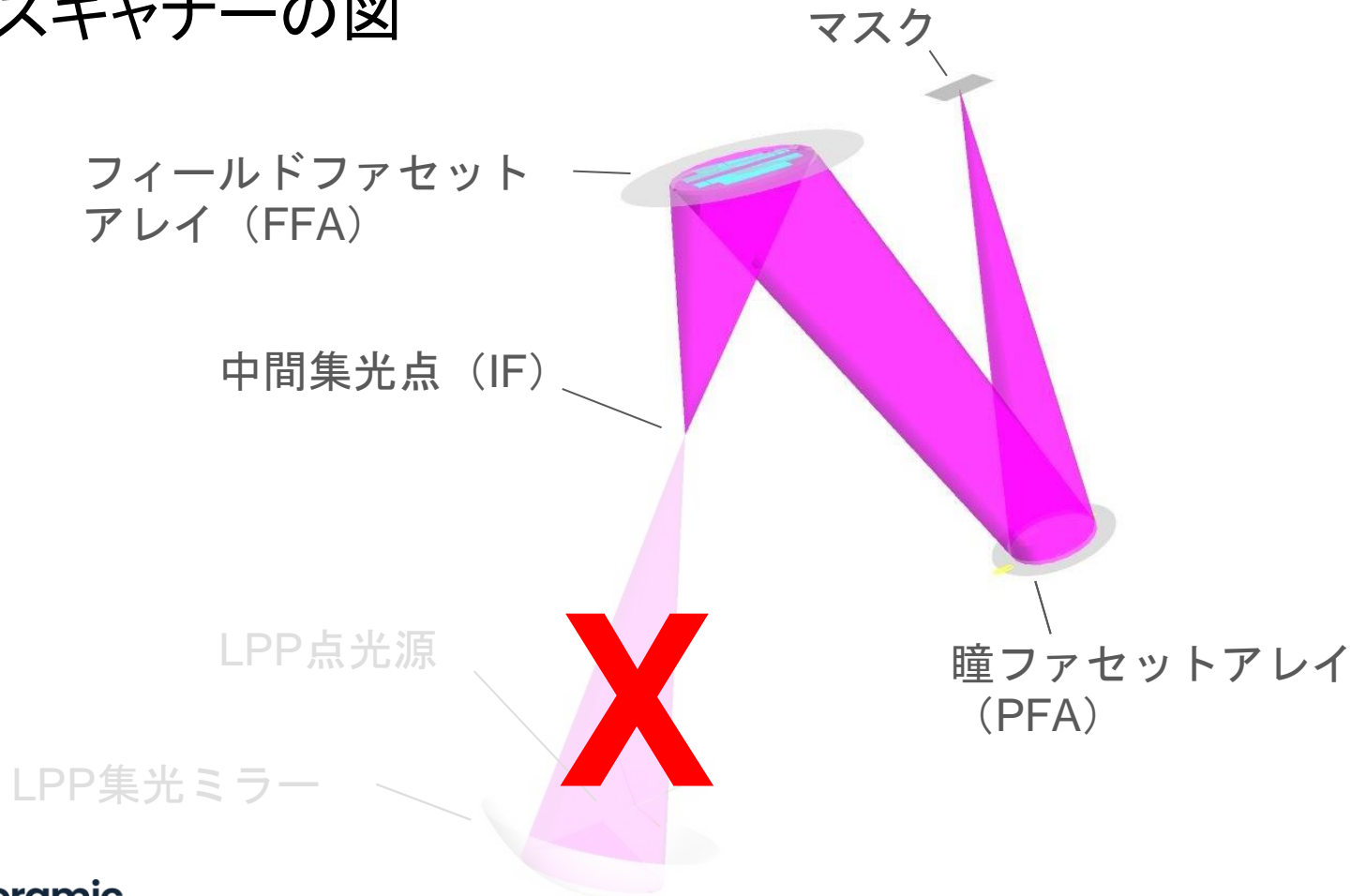
自由電子レーザー (FEL)



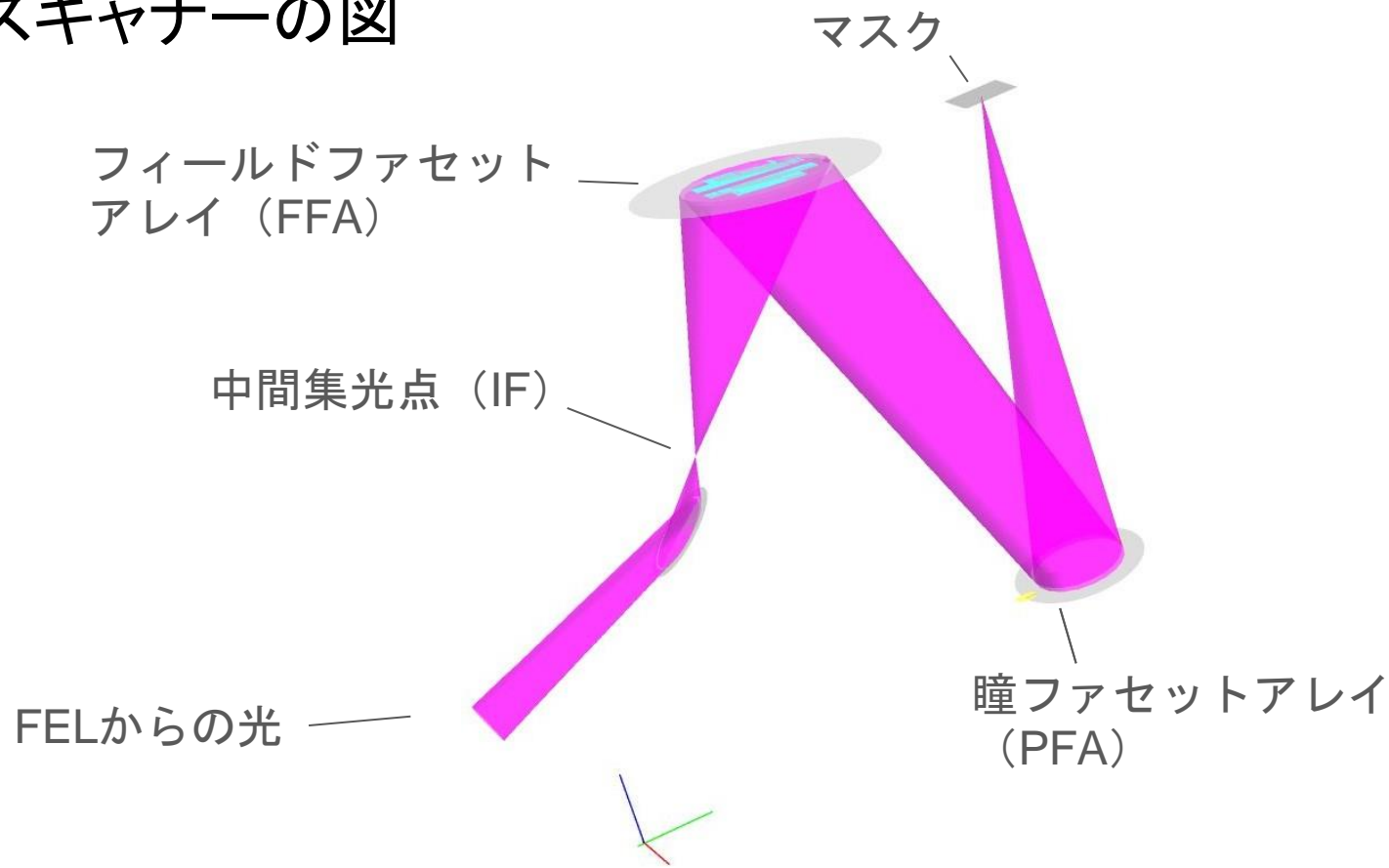
EUVスキャナーの図



EUVスキャナーの図



EUVスキャナーの図



発表の概要

- 自由電子レーザー（FEL）の紹介
- **リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー（FEL）はレーザー生成プラズマ（LPP）とどう異なるか**
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討：プロジェクト“i.55”
- まとめ

自由電子レーザー(FEL)とレーザー生成プラズマ(LPP)の違い

1. 強いパワー
2. 狭いスペクトル帯域幅
3. 偏光
4. 高い横方向の空間コヒーレンス
5. 強度分布が異なる可能性
6. Snの汚染がない -> IFを移動可能
7. 別の波長の可能性

発表の概要

- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討: プロジェクト“i.55”
- まとめ

強いパワー

LPP方式のEUV光源のパワーは現在300~500Wの範囲であり、800W（？）まで達する可能性がある。

FELは数十kWのパワーが可能！複数のスキャナーに出力できる。

強いパワーにより何が可能になるか？

強いパワー #1: 高速化(自明)

スキャナーを高速で動かし、短時間で同じドーズ量をレジストに照射できる。直接的にスループットが増加する。

高速化で起こりうる問題点：

- ステージの機械的な制約
- 光学素子の熱的な制約

強いパワー #2:ドーズ量の増加(自明)

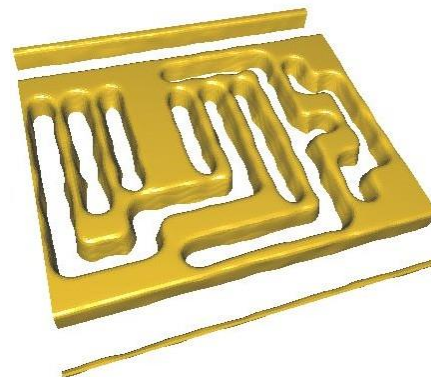
同じ時間に大きいドーズ量をレジストに照射できる。

利点：

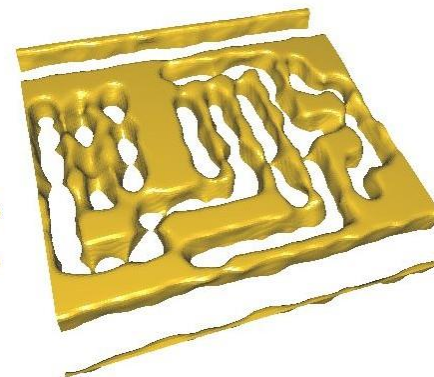
- 光ショットノイズが減るため、LERが小さくなる
- レジスト材料の選択肢が増える

問題点：

- 熱的な問題ーレンズ/マスクの加熱



ドーズ量大きい
(光子が多い、レジストの感度が低い、粗さが小さい)



ドーズ量小さい
(光子が少ない、レジストの感度が高い、粗さが大きい)

強いパワー #3: 光子が貴重だった時に作成された設計の選択肢を見直す

「XXXは良いアイデアだが、光を無駄にし過ぎる」

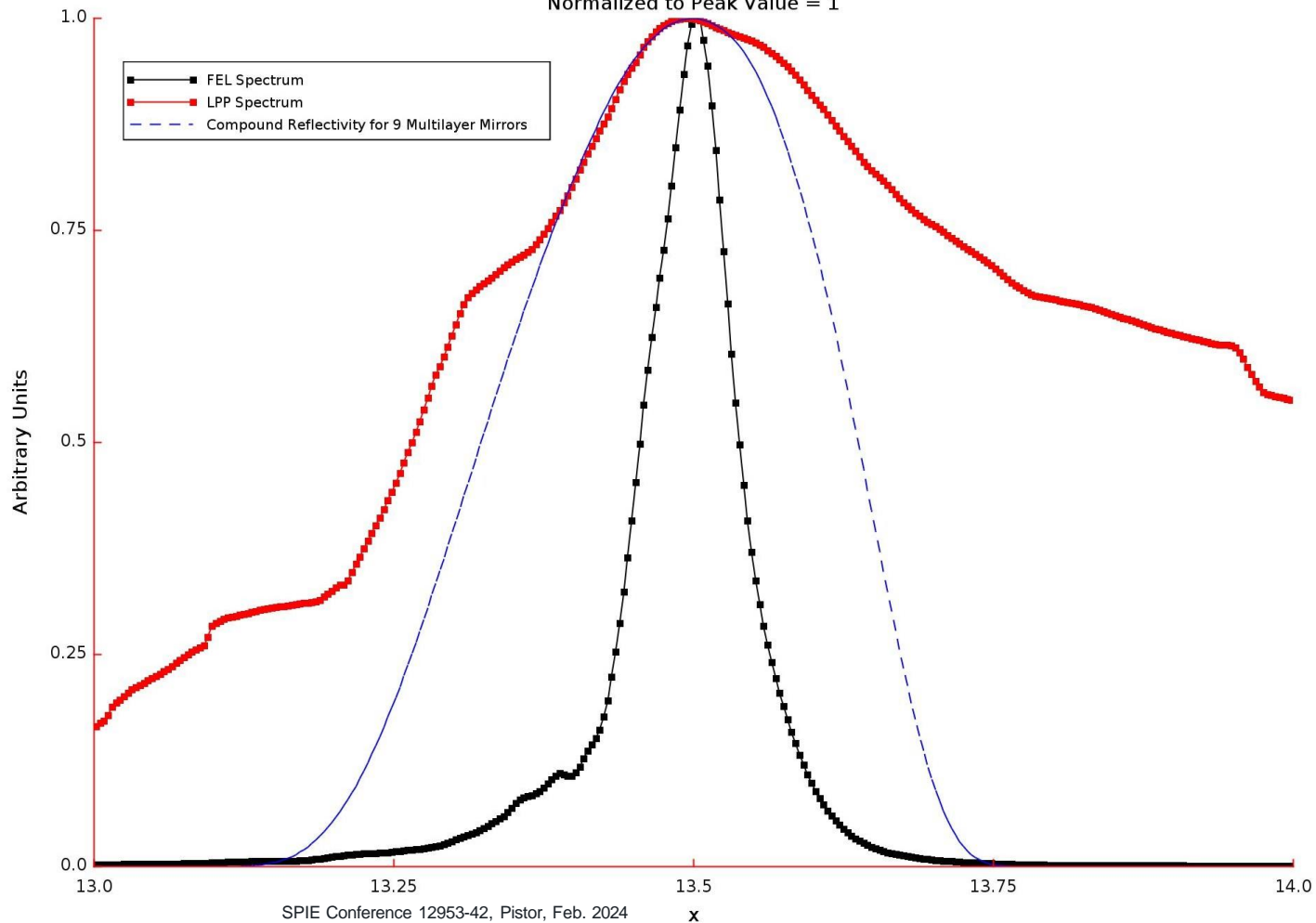
1. スリットをより均一に照明する？強力なホモジナイザー？
2. 焦点深度を改善するためにNAを絞る？
3. 瞳フィル比を小さくする、あるいは瞳フィル比の範囲を広げる？
4. 光学系を小型または安価にする？
5. 中心遮光を取り除く？
6. 偏光子を入れる？（偏光については後述）
7. その他の設計の選択肢 **（これは後述）**

発表の概要

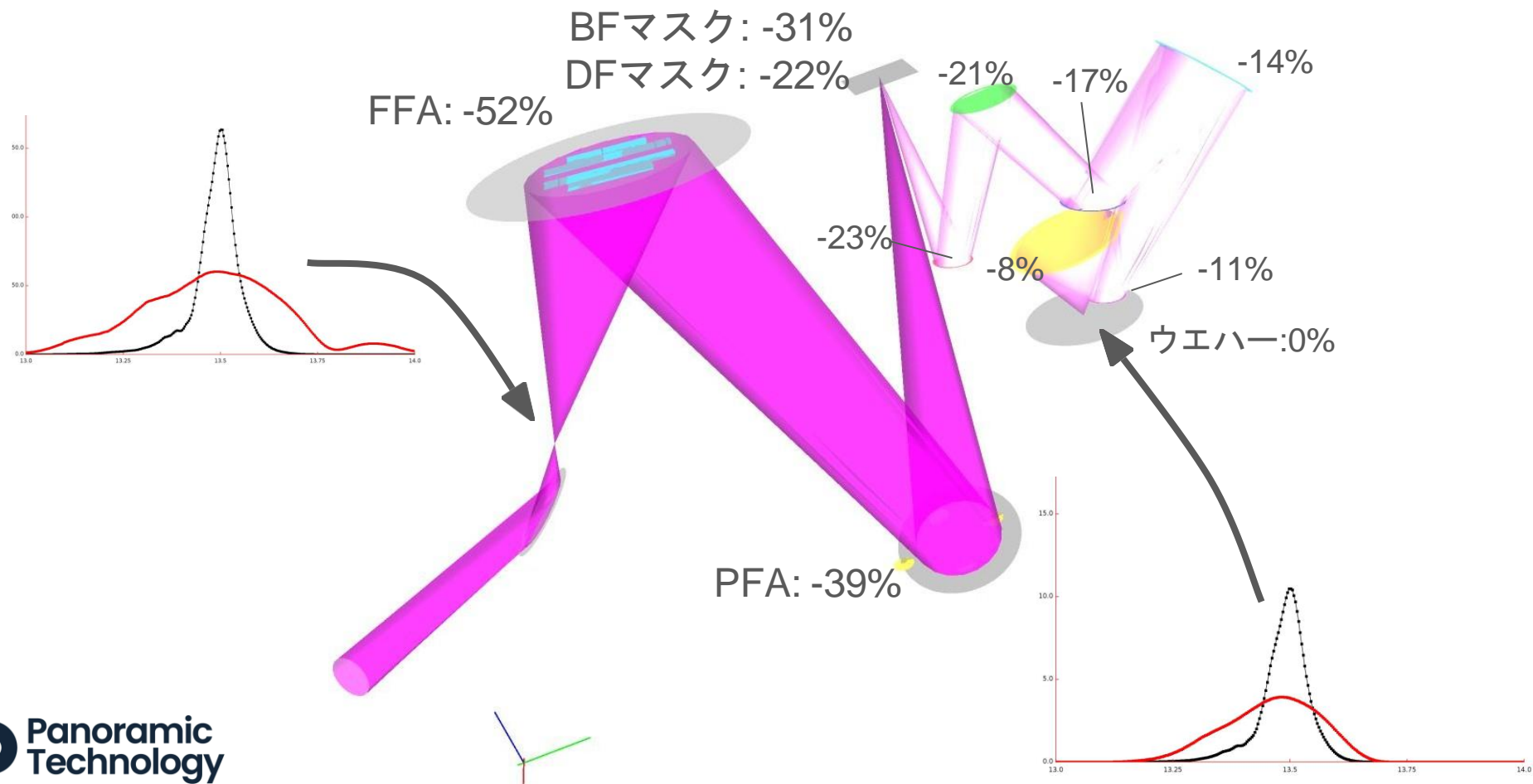
- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討: プロジェクト“i.55”
- まとめ

Raw Spectra

Normalized to Peak Value = 1



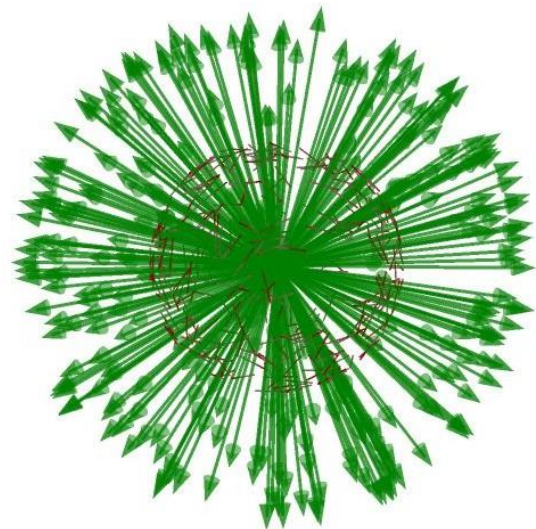
吸収されるエネルギーの減少 (FELをLPPと比較)



発表の概要

- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - **偏光**
- スキャナー設計の事例検討: プロジェクト“i.55”
- まとめ

FELは偏光を生成するが、LPPは非偏光



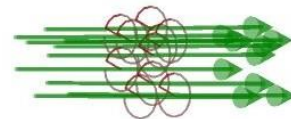
LPP光源



FEL光源
x偏光

— 電場の方向

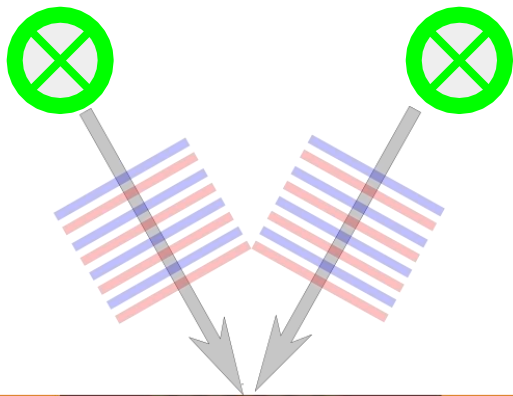
→ 光線の方向



FEL光源
円偏光

二つの波の干渉：偏光に依存する！！

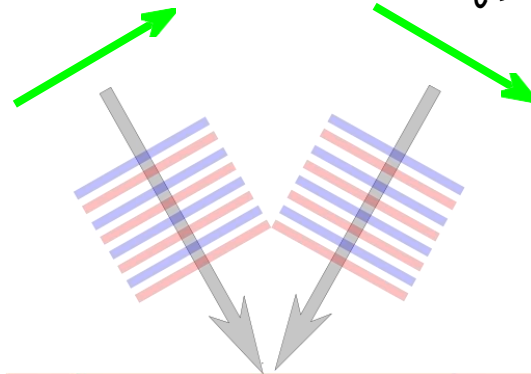
TE (“S”) 偏光は電場の方向がそろろう（紙面に垂直）



高コントラスト



TM (“P”) 偏光は電場の方向がそろわない（紙面に平行）



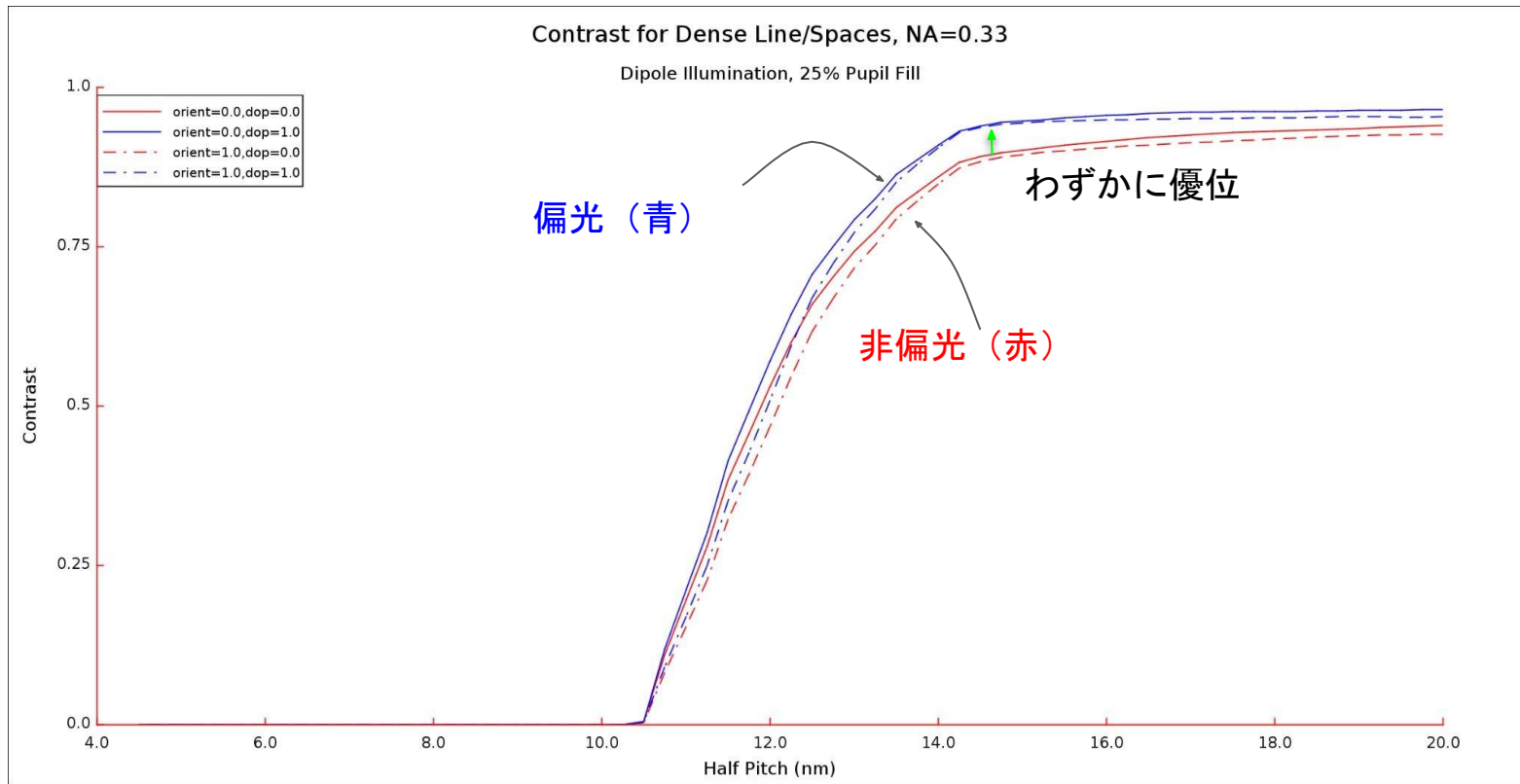
低コントラスト



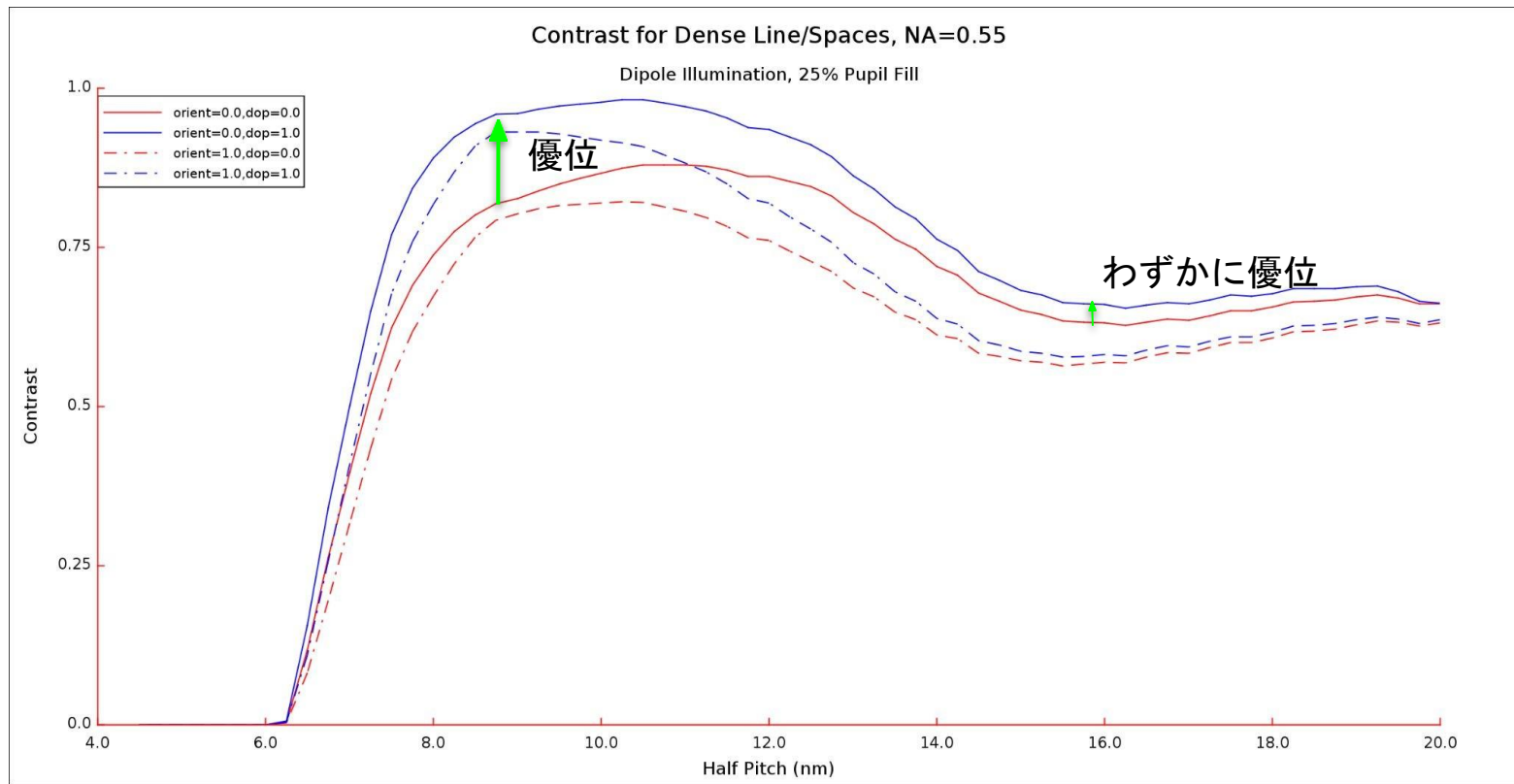
様々なシステムにおけるマスク/ウエハー(レジスト)の最大角度

NA	主光線(°)	最大マスク角度(°)	<u>レジストにおける*</u> 最大角度(°)
0.33 EUV	$\theta=6$	10.8	19.3
0.55 EUV	$\theta=5.4$	11.0	33.4
0.77 EUV(仮定)	$\theta=6.8$	13.7	50.4
0.93 ArF		13.4	33.2
1.20 ArF		17.5	44.9
1.35 ArF		19.7	52.6

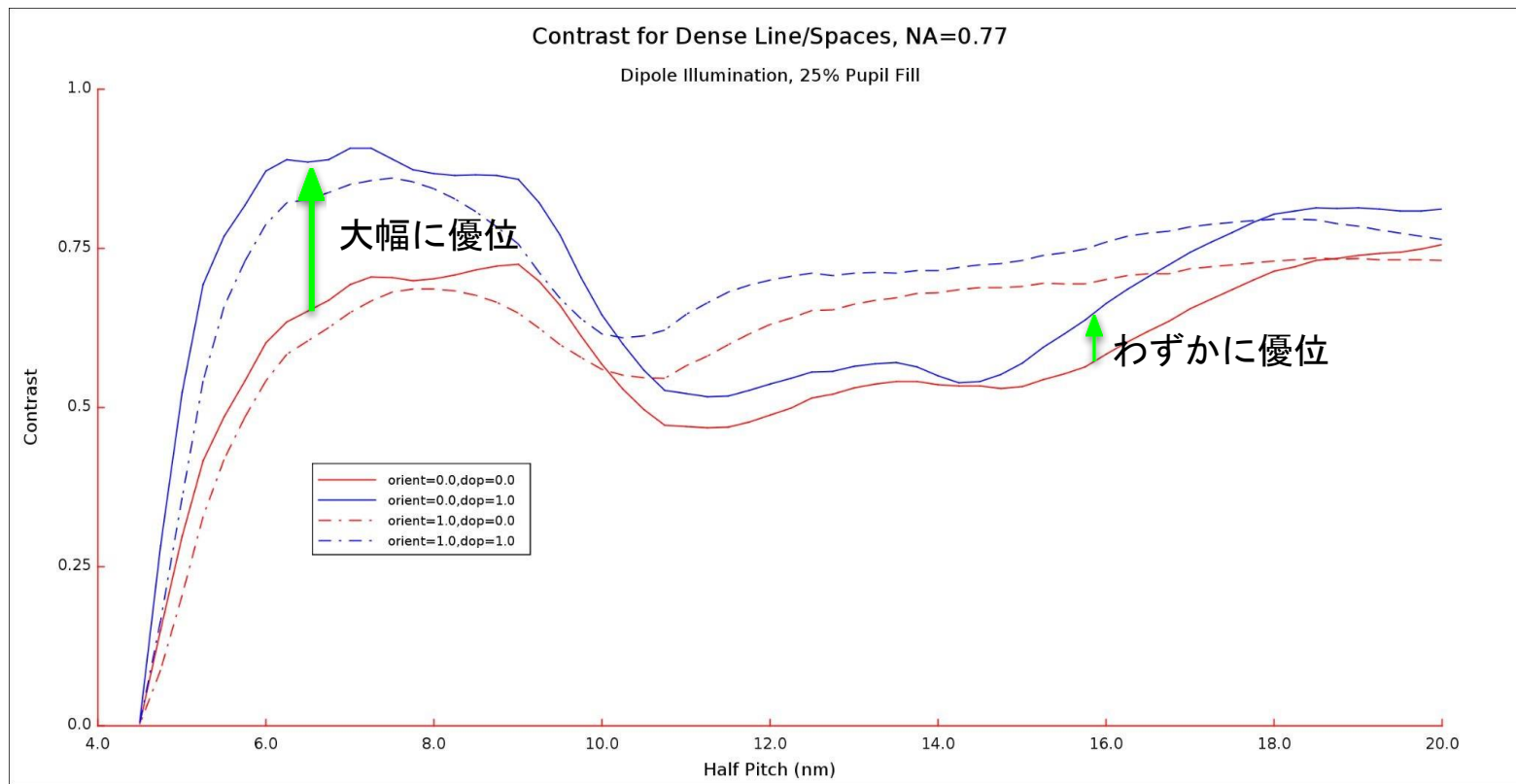
0.33NAにおけるL/Sコントラストとハーフピッチの関係



0.55NAにおけるL/Sコントラストとハーフピッチの関係



0.77NAにおけるL/Sコントラストとハーフピッチの関係



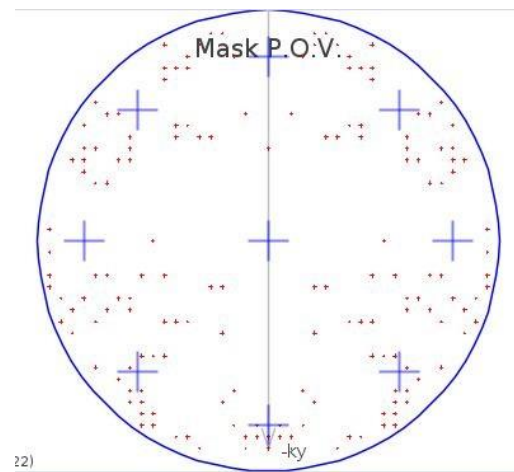
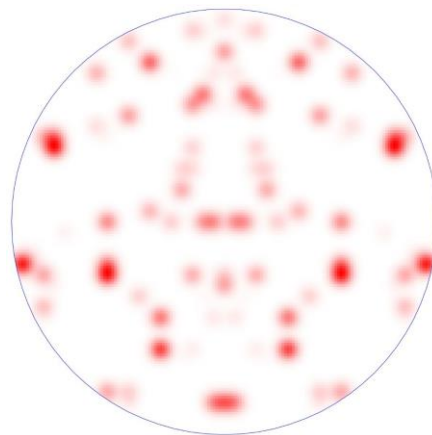
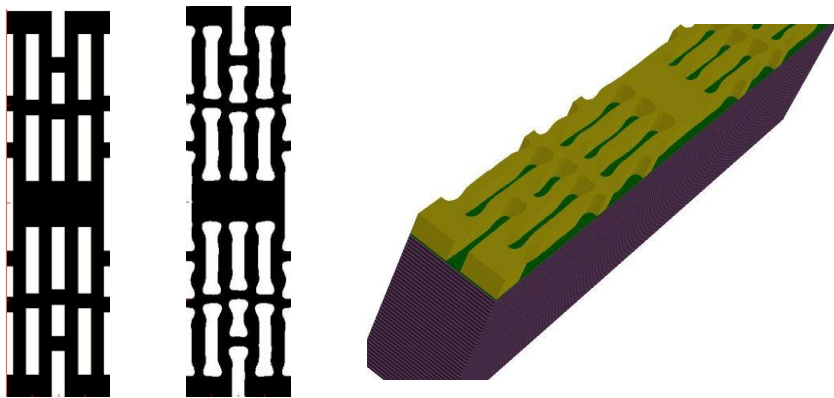
2Dパターンは1Dパターンよりも偏光の効果は小さい

L/Sシミュレーションでは、ダイポール照明が最適な偏光効果を与える。

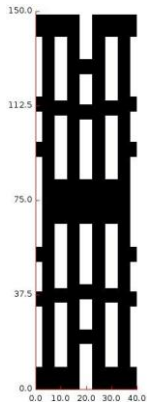
2Dパターンでは、レイアウトの異なる部分は異なる偏光が効果的かもしれない。

シミュレーション方法

- 各ケースについて、OPCと光源の最適化を行う
 - 厳密マスクモデル (TRIG)
 - 9つの厳密計算 (青い点)
- PVバンドを観察する
 - +/-5% ドーズ量
 - +/-45nm デフォーカス (0.33NA)
 - +/-15nm デフォーカス (0.55NA)
 - +/-7.5nm デフォーカス (0.77NA)



0.33NA, 14nmハーフピッチ

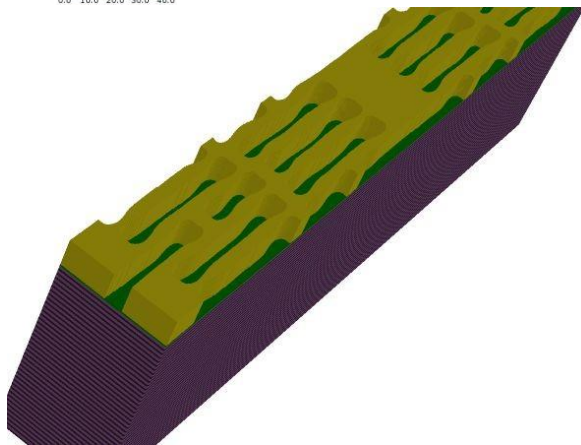


0.33NA, 14nmハーフピッチでは、偏光はあまり重要でない

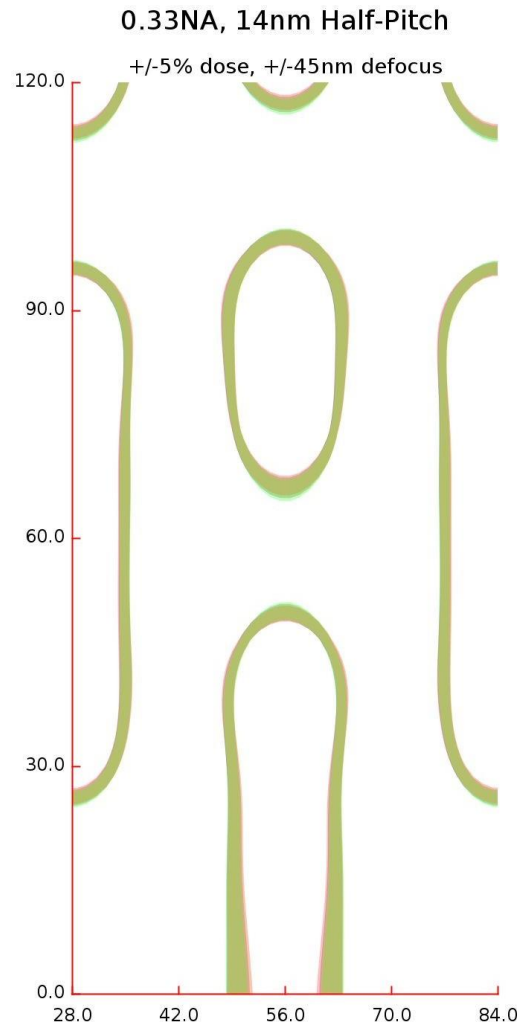
縦ラインはy偏光がよい

横ラインはx偏光がよい

円偏光は非偏光のように作用する



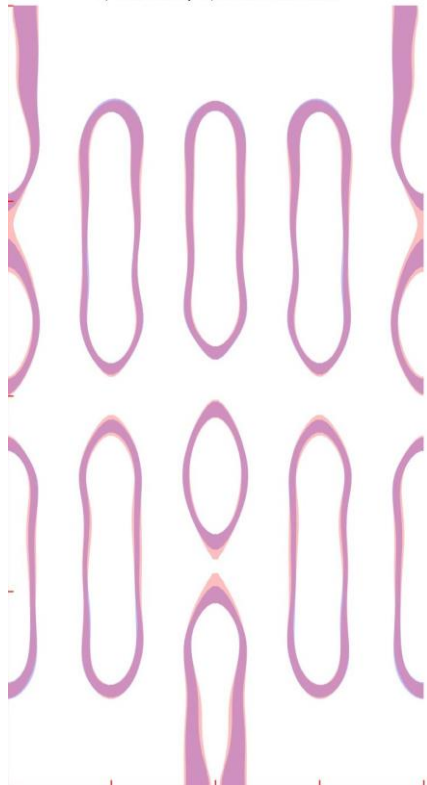
- 非偏光
- x偏光
- y偏光
- o偏光



0.55NA, SRAM

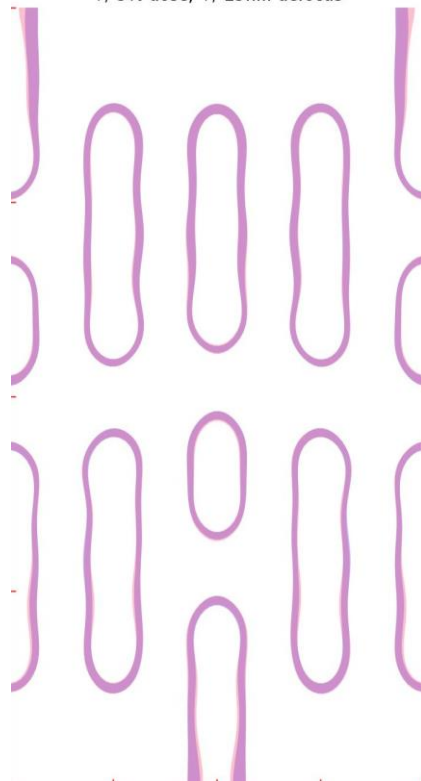
0.55NA, 7nm HP

+/-5% dose, +/-15nm defocus



0.55NA, 8nm HP

+/-5% dose, +/-15nm defocus



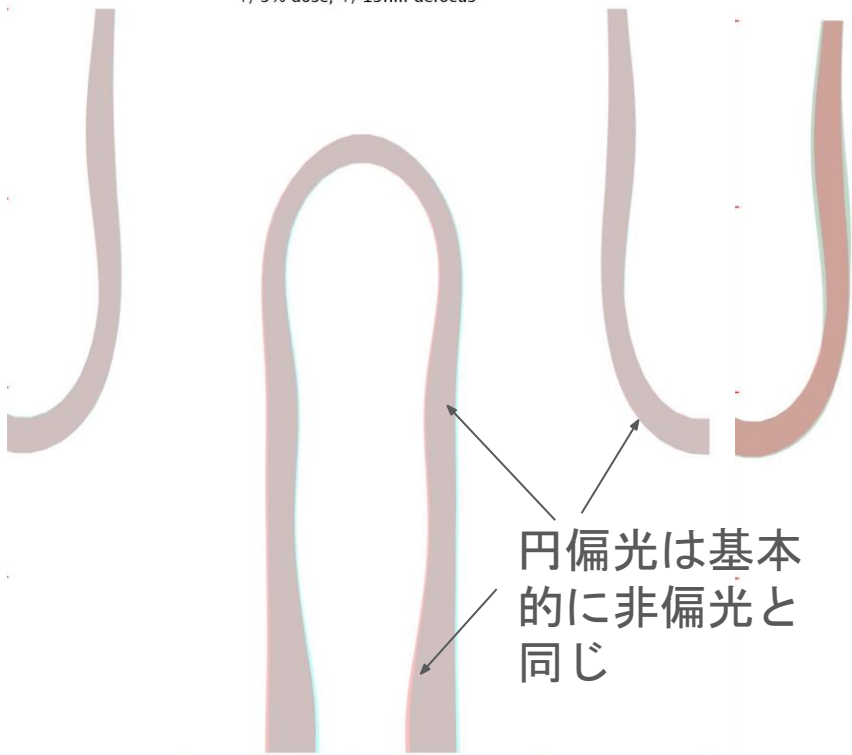
0.55NAの場合、xy偏光は7nm-halfピッチでいくらか効果があるが、8nm-halfピッチではあまり効果がない。



0.55NA, 直線偏光と円偏光と非偏光の比較

unpolarized vs. circularly polarized

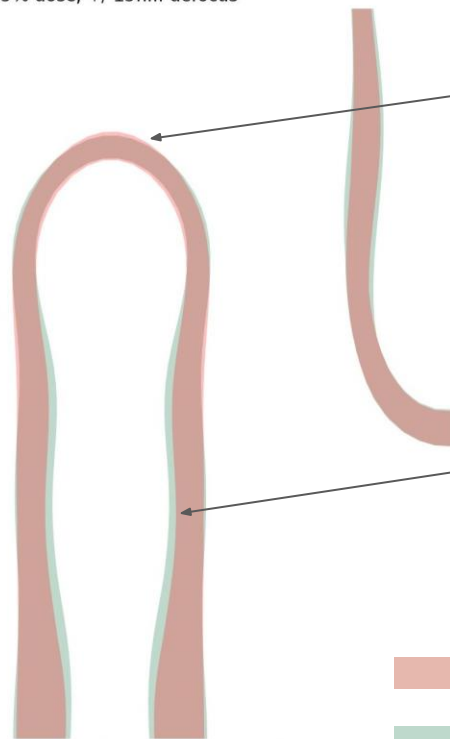
+/-5% dose, +/-15nm defocus



円偏光は基本的に非偏光と同じ

unpolarized vs. x-polarized

+/-5% dose, +/-15nm defocus

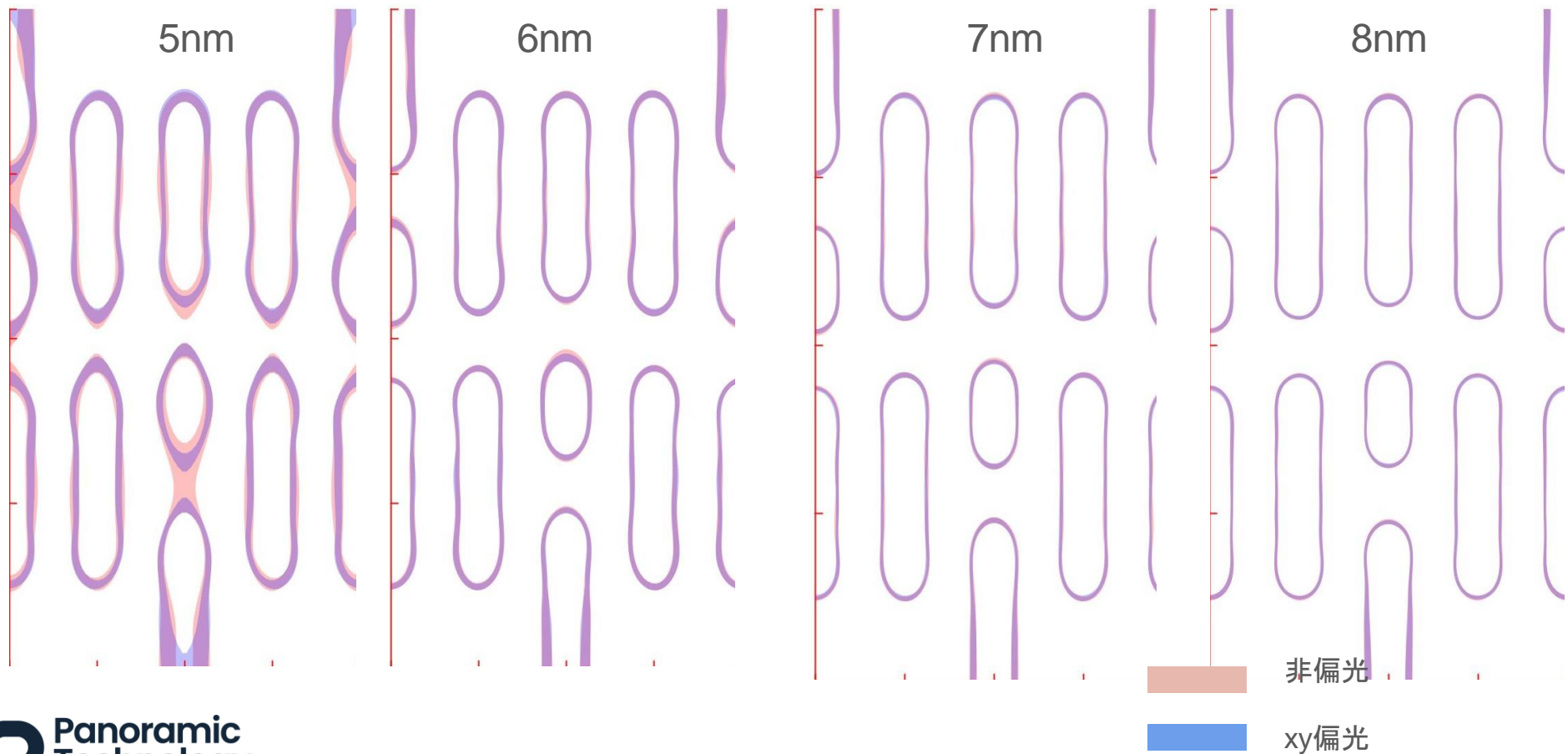


x偏光が非偏光よりもよい

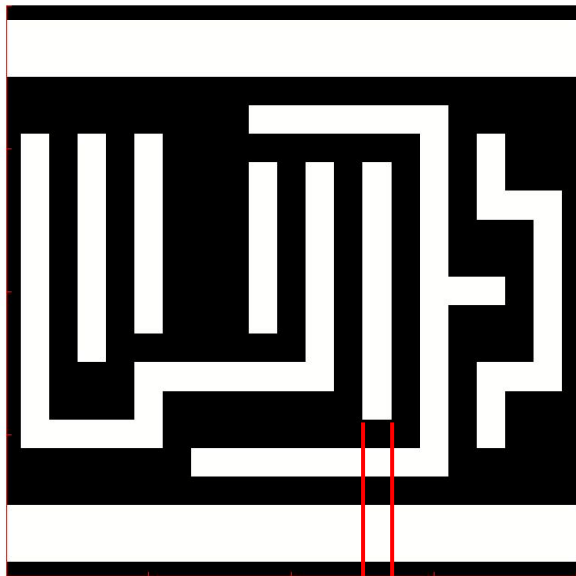
非偏光がx偏光よりもよい

- 非偏光
- x偏光
- o偏光

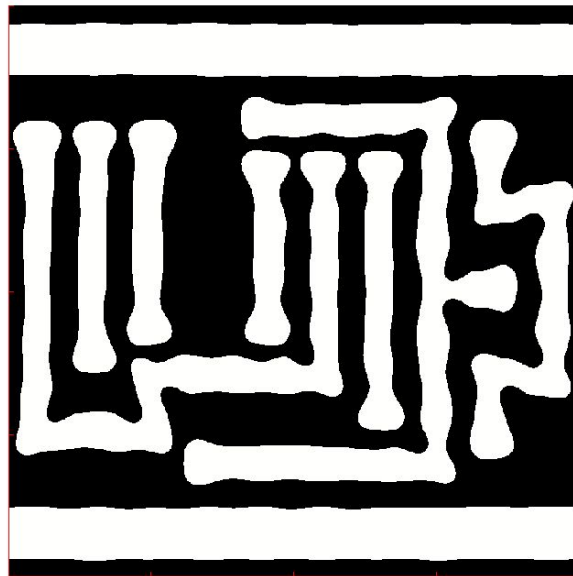
0.77NA, 様々なハーフピッチのSRAM



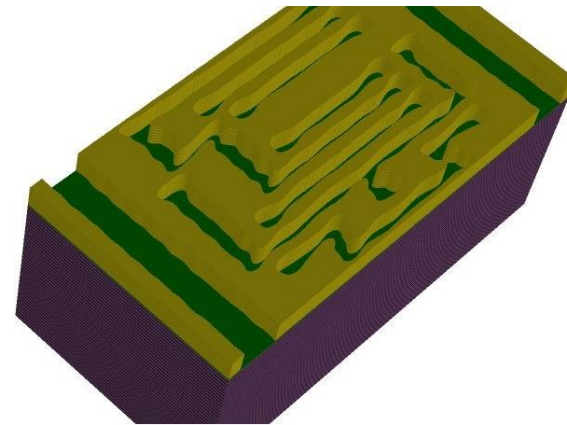
2方向パターン



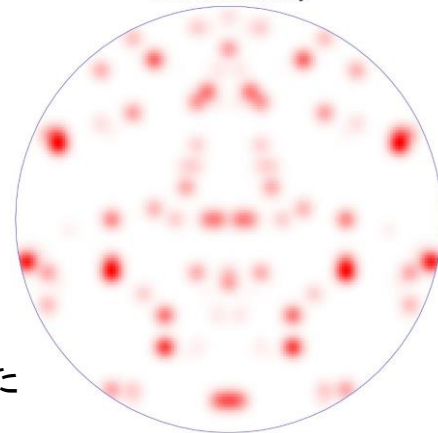
ハーフピッチ



厳密3Dマスクモデルを用いた
モデルベースOPC



Source Intensity



最適化された
光源

0.77NA, 6nmハーフピッチ, メタルパターン



非偏光

xy偏光

偏光シミュレーションのまとめ

- 0.33NA
 - 任意の偏光で問題ない
- 0.55NA
 - 円偏光が望ましい（非偏光と同じように作用する）
 - 純粋なx偏光または純粋なy偏光でもよいが、円偏光や非偏光に比べると、一部のパターンで少し効果が下がる可能性がある
 - xyゾーン偏光は8nmハーフピッチでほとんど効果がない - おそらく労力に見合わない
- 0.77NA
 - xyゾーン偏光は6nmハーフピッチで効果がある - おそらく労力に見合う
- 主にウエハーへの影響 - このまま発表の後半をご覧ください！

単一偏光
光源

XYゾーン
偏光光源

y-FFA →

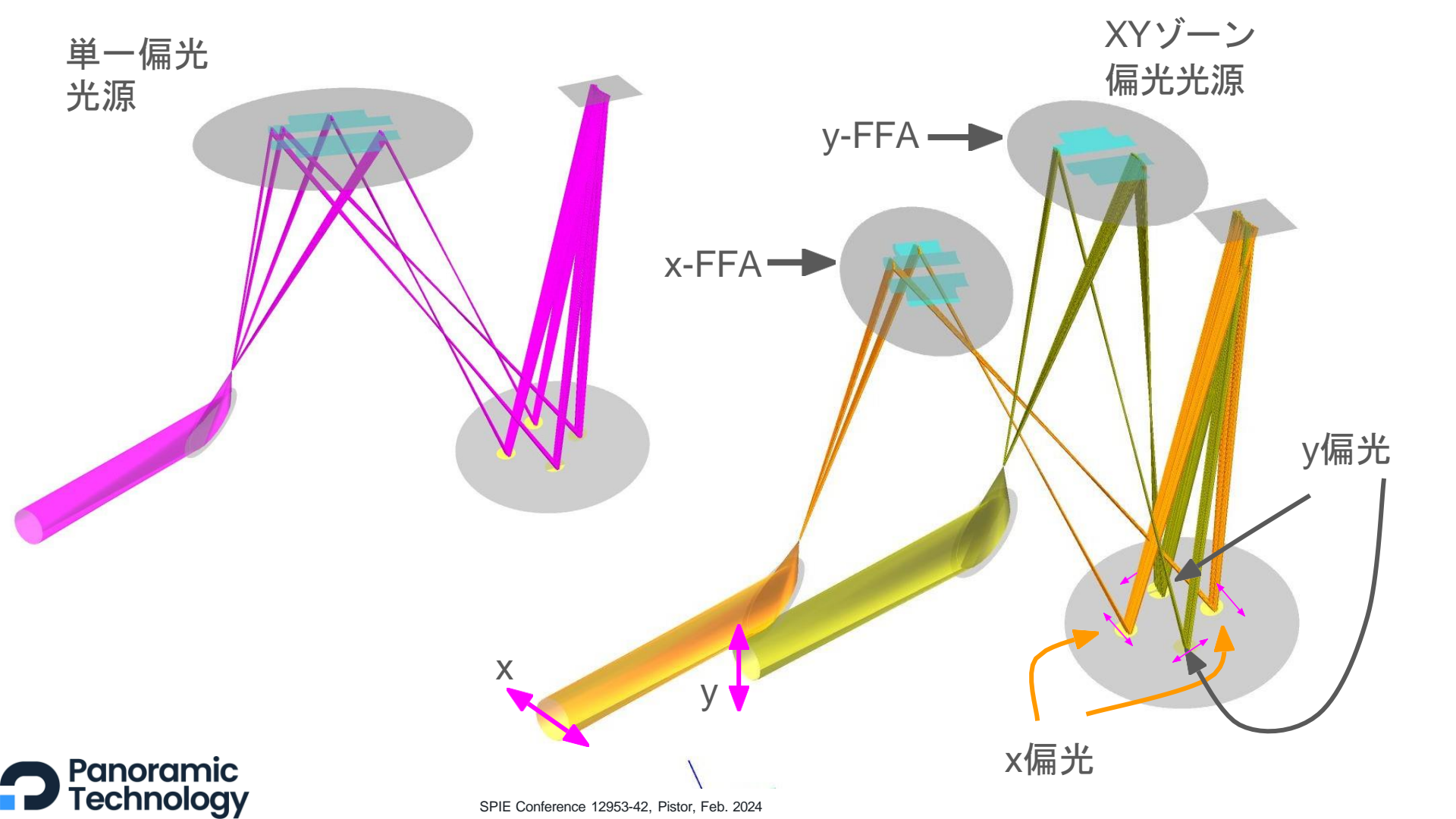
x-FFA →

y偏光

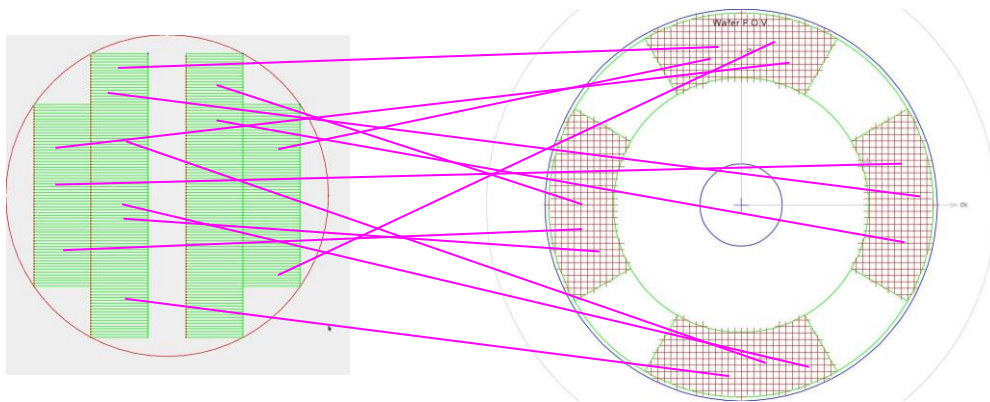
x偏光

x

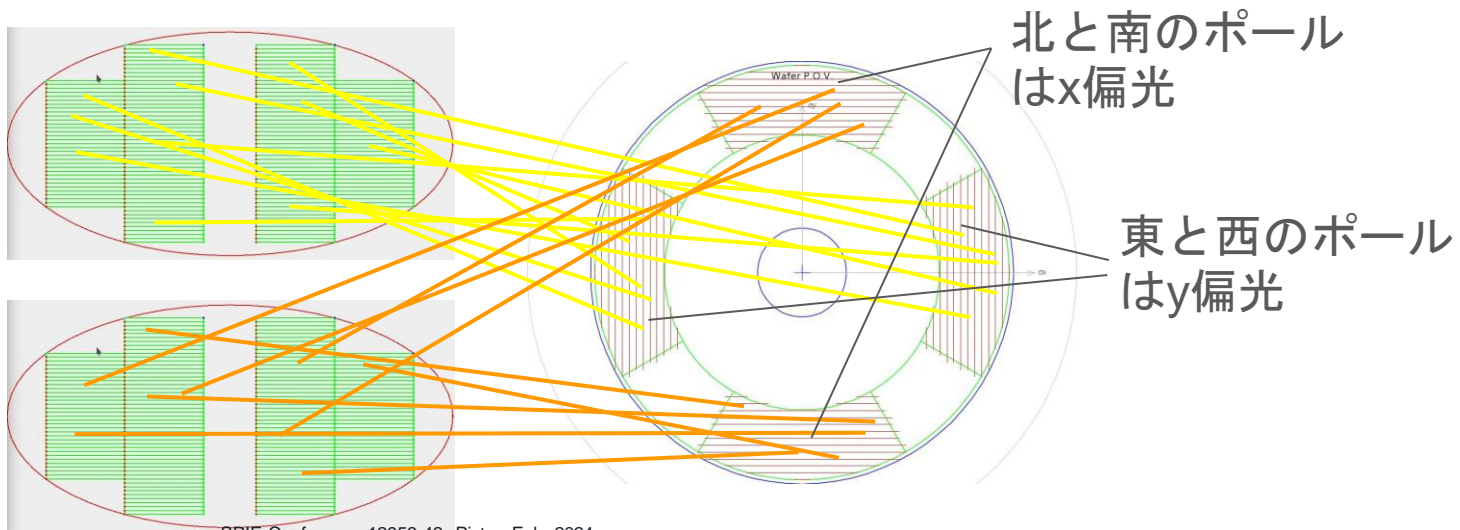
y



単一偏光
光源



XYゾーン
偏光光源



発表の概要

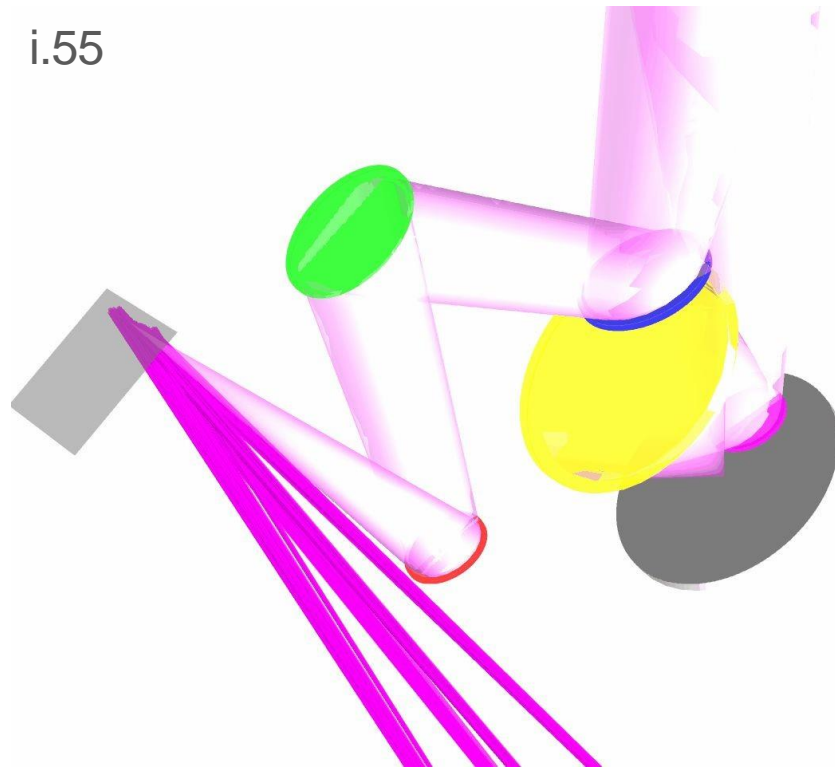
- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- **スキャナー設計の事例検討:プロジェクト“i.55”**
- まとめ

スキャナー設計の事例検討：“i.55”

高NAスキャナー



i.55



スキャナー設計の事例検討:プロジェクト“i55”

光子が非常に貴重だった時には、0.55NAにおいてハーフフィールド、アナモルフィックは賢く創造的な判断だった。

一方、将来のFELでは

- 光子が豊富にあり
- 偏光が可能で
- 帯域外の放射がない

ので、アイソモルフィック、フルフィールドが可能かもしれない？

プロジェクト“i.55”

FELベースの光源の利点を生かすことで、
フルフィールド、アイソモルフィック、高NA (0.55) のスキャナー
を実現できるか？



- ステッチングなし！
- 12” x 6”マスクは不要！
- マスク描画機の解像度をフル活用！
- 少ないマスク枚数！
- 高いスループット！（2倍？）



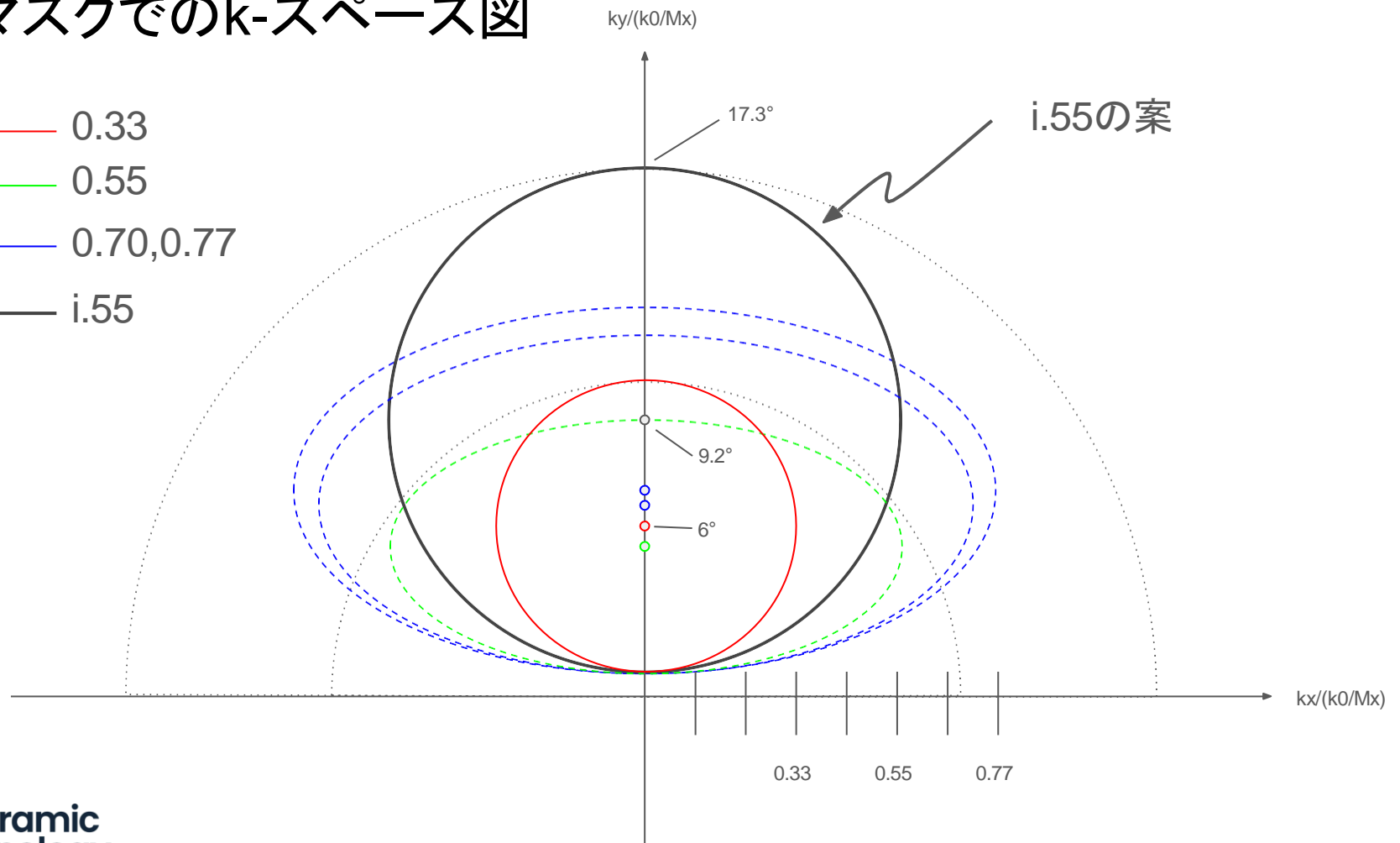
アイソモルフィック 0.55NAが引き起こす影響

マスクにおける平面波の傾きが大きい

- 主光線：9.2度
- マスクにおける角度帯域幅：1.3度～17.3度
 - マスクの反射率が低い
 - 強いパワーが必要
 - 熱として吸収されるパワーが増える
 - シャドーイング効果が強い
 - コントラストの減少

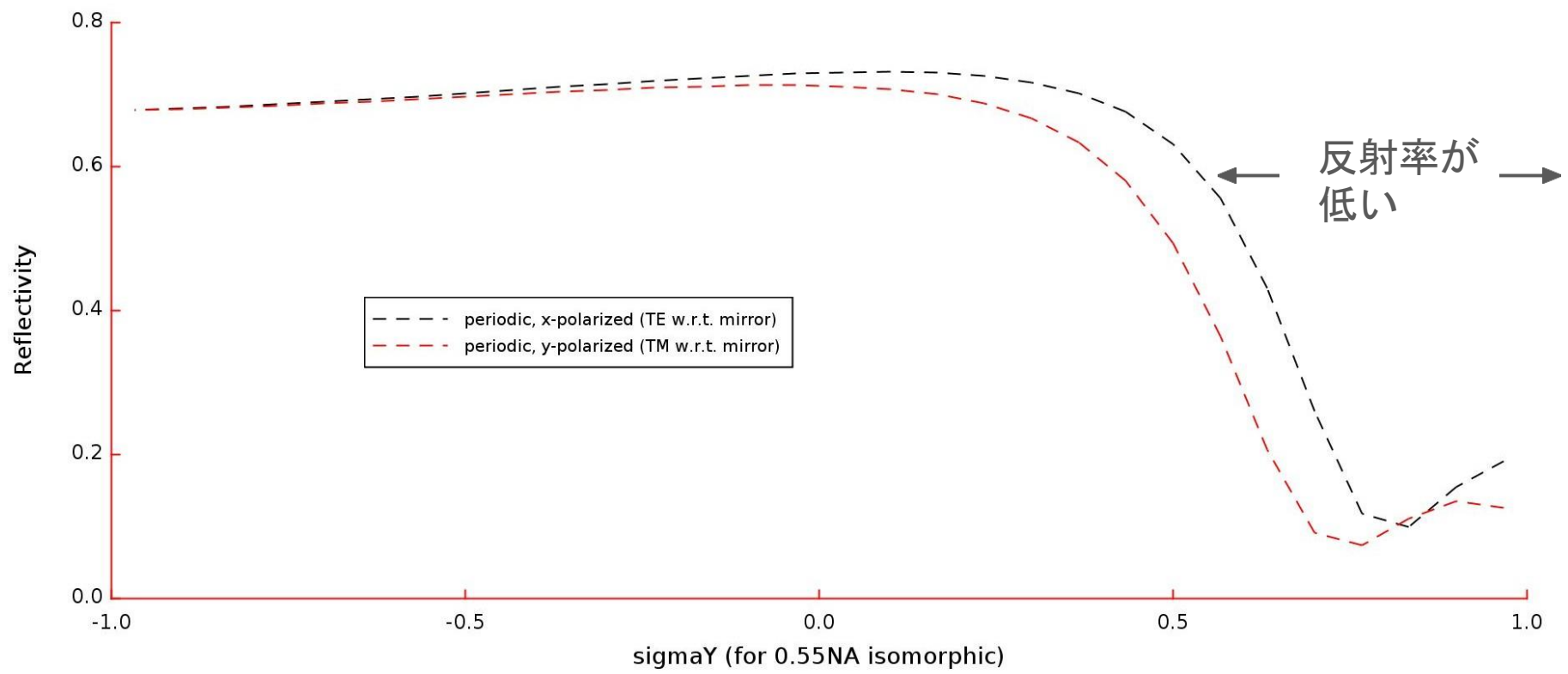
i.55: マスクでのk-スペース図

- 0.33
- 0.55
- 0.70, 0.77
- i.55



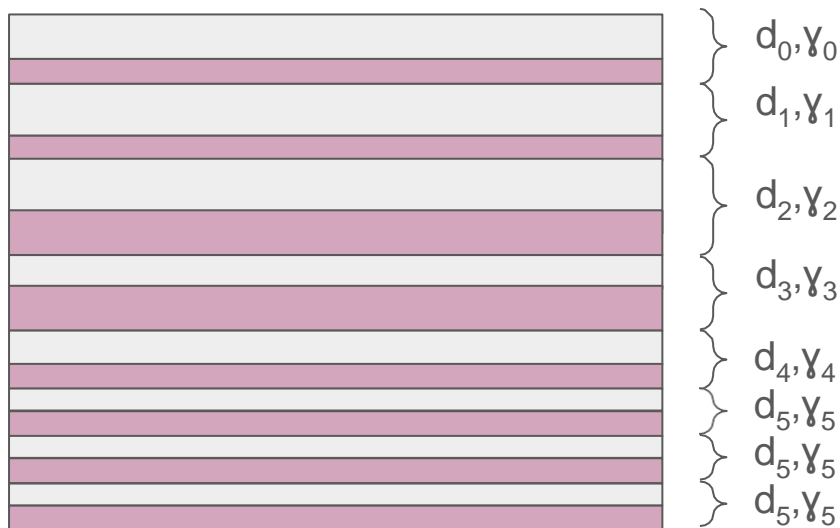
現在の多層膜ミラーは角度帯域幅が広くない

Today's Periodic Multilayer Mirror Reflectivity



角度帯域幅が広い多層膜ミラー

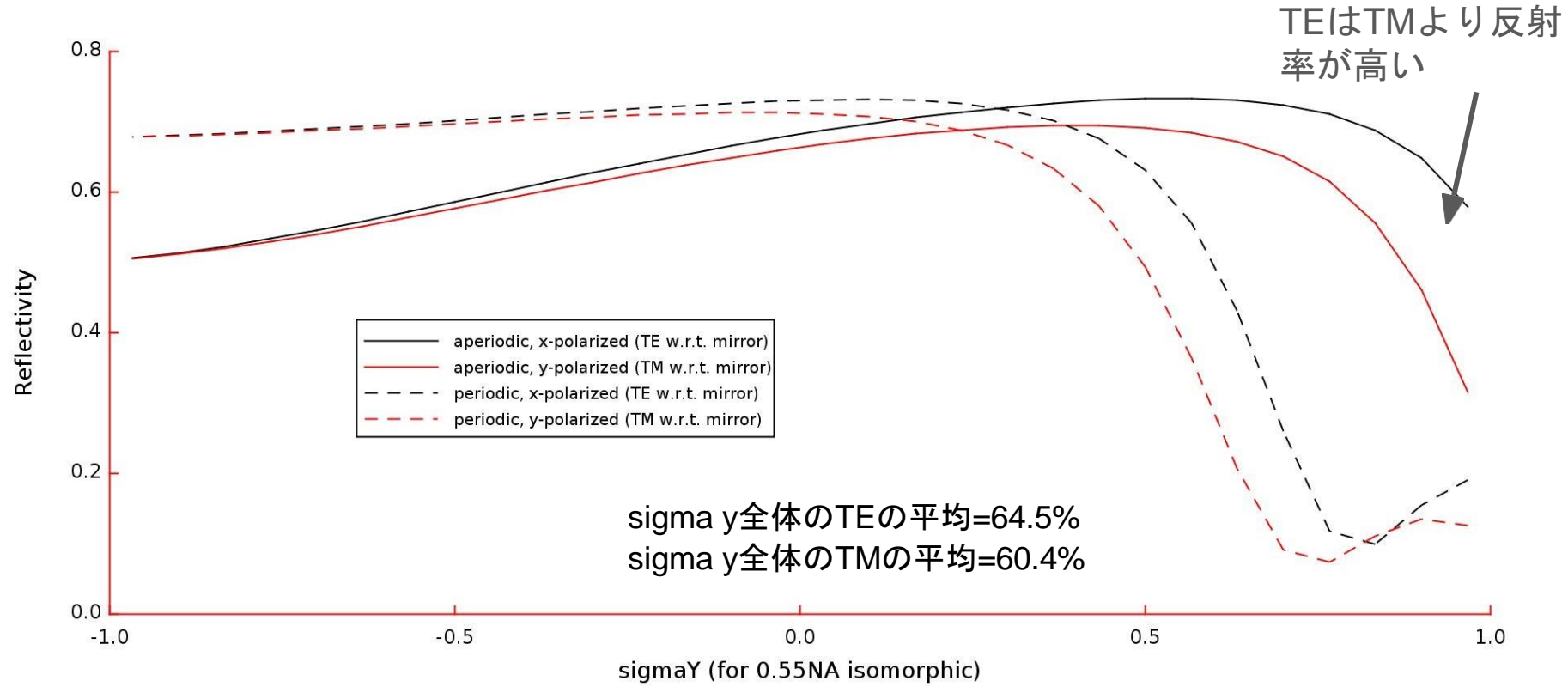
角度帯域幅を広くするために、多層膜ミラーを”デチューン”できる（全体の反射率を犠牲にして）。角度帯域幅全体の反射率を最適化するために、表面の6層対を調整した。



d0	Free	<input type="checkbox"/>	6.85
d1	Free	<input type="checkbox"/>	7.094
d2	Free	<input type="checkbox"/>	7.108
d3	Free	<input type="checkbox"/>	7.1588
d4	Free	<input type="checkbox"/>	7.0075
d5	Free	<input type="checkbox"/>	7.17055
gamma	Free	<input type="checkbox"/>	0.472
gamma0	Free	<input type="checkbox"/>	0.46818
gamma1	Free	<input type="checkbox"/>	0.468
gamma2	Free	<input type="checkbox"/>	0.4733
gamma3	Free	<input type="checkbox"/>	0.4721
gamma4	Free	<input type="checkbox"/>	0.47375
gamma5	Free	<input type="checkbox"/>	0.472008

角度帯域幅が広い多層膜ミラー

High Angular Bandwidth Mirror Reflectivity



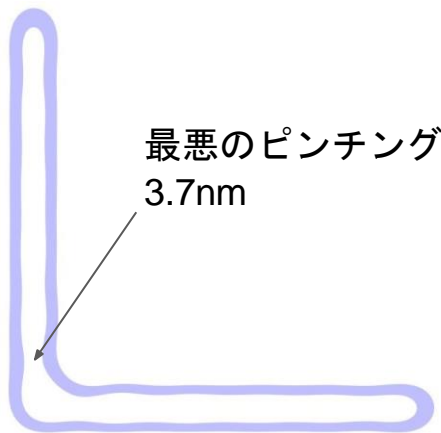
sigma y全体のTEの平均=64.5%
sigma y全体のTMの平均=60.4%

シミュレーションにおける違い

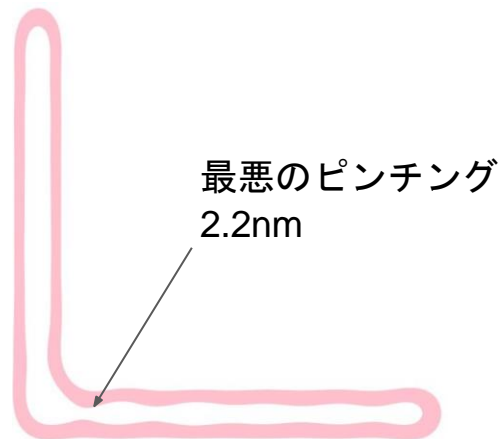
パラメーター	アナモルフィック 0.55	アイソモルフィック 0.55 (i.55)
主光線	5.4°	9.2°
マスク多層膜	d=7.0nm, $\gamma=0.4$ 反射率: ~70%	デチューン 反射率: ~60%-65%
光源の偏光	非偏光	xyゾーン偏光
マスク吸収体	41nm Pd、 垂直側壁	41nm Pd、 傾斜側壁
縮小率	4X, 8X	4X, 4X

8nmエルボー PVバンド, 0.55NA (デフォーカス \pm 15nm, ドーズ量 \pm 5%)

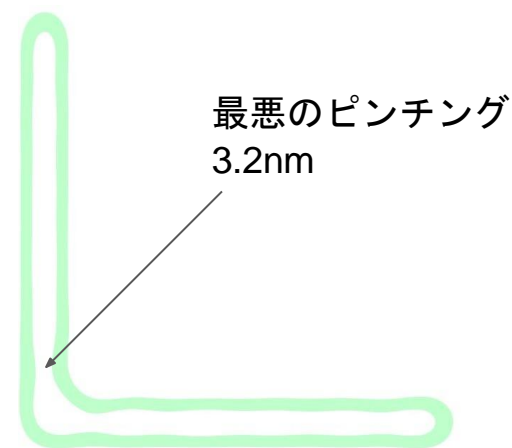
アナモルフィック
非偏光



アイソモルフィック
非偏光



アイソモルフィック
x偏光

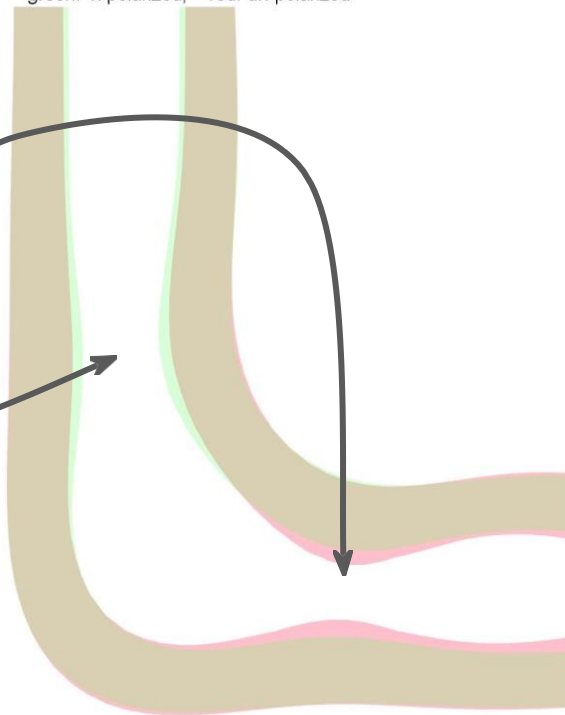


x偏光は最悪のピンチングを低減
(間隙が2.2nmから3.2nmに変化)

x偏光の効果：8nmサイズ

Aerial Image PV Band

green: x-polarized, red: un-polarized

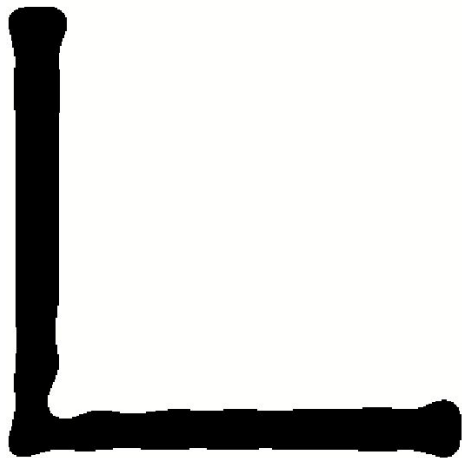


x偏光は、ここで大幅に改善し、ここで少し悪化する

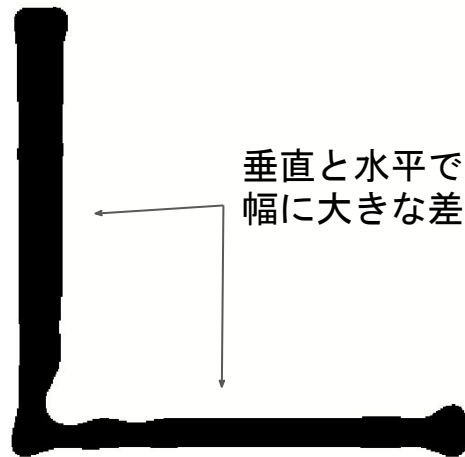
x偏光により、“ピンチング”は垂直部分では少し悪化するが、水平部分では大幅に改善する（水平ラインは軸外の主光線による強いシャドーイングを受ける）

強いシャドーイングによりi.55では強力なOPCが必要

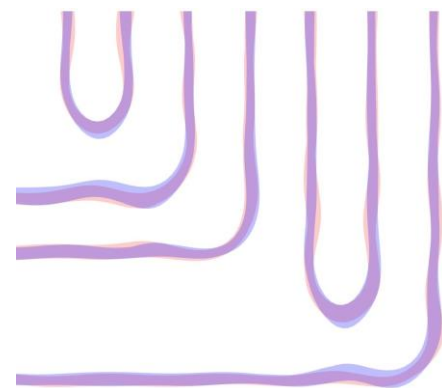
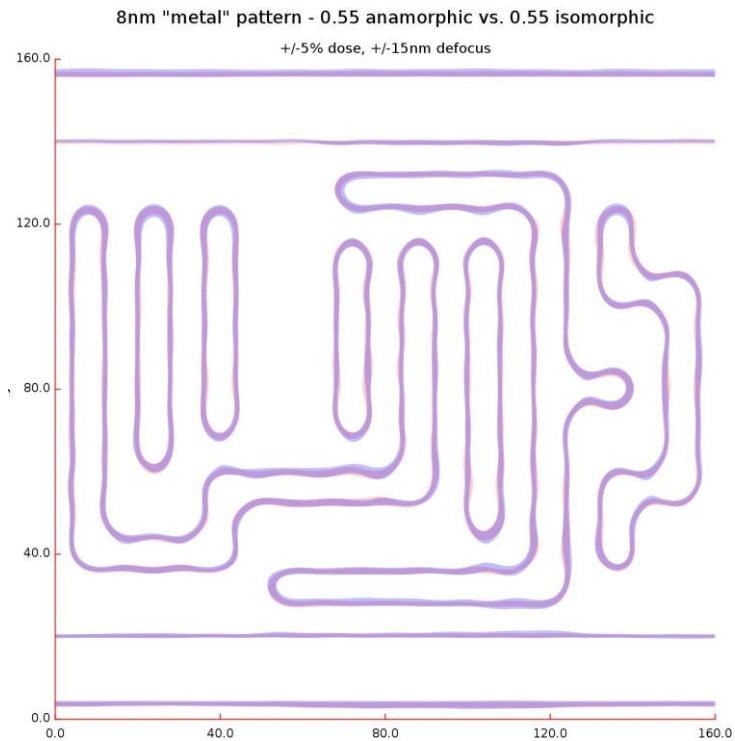
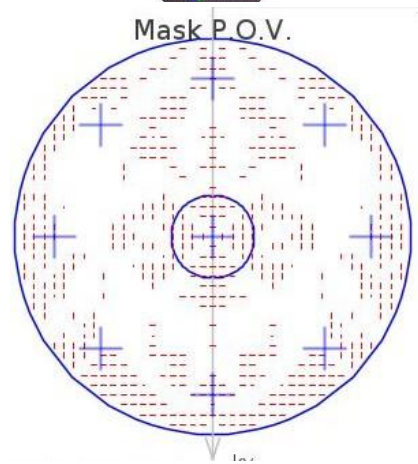
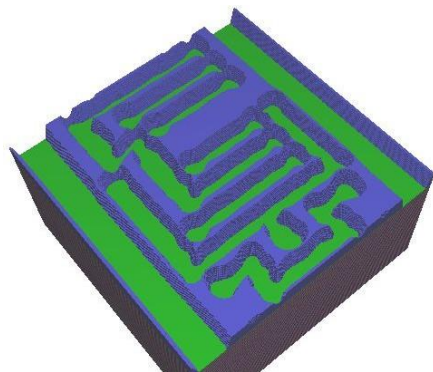
アナモルフィック、ハーフ
フィールドのOPC補正マスク
パターン



アイソモルフィック、フル
フィールドのOPC補正マスク
パターン

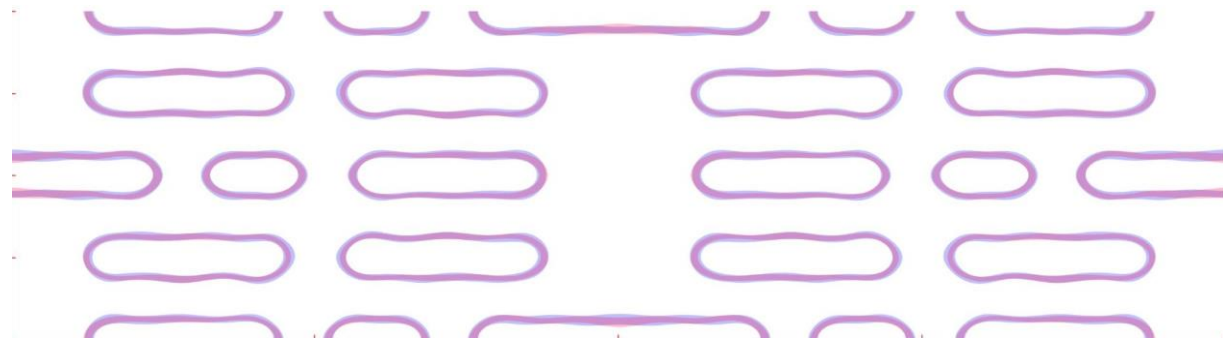
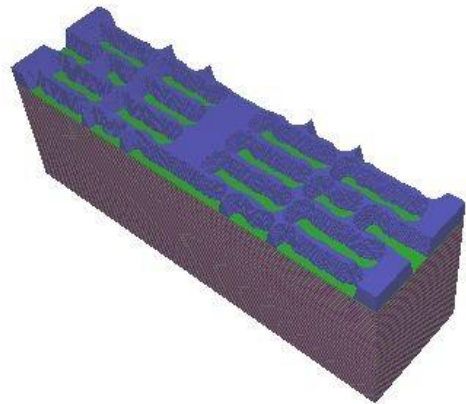
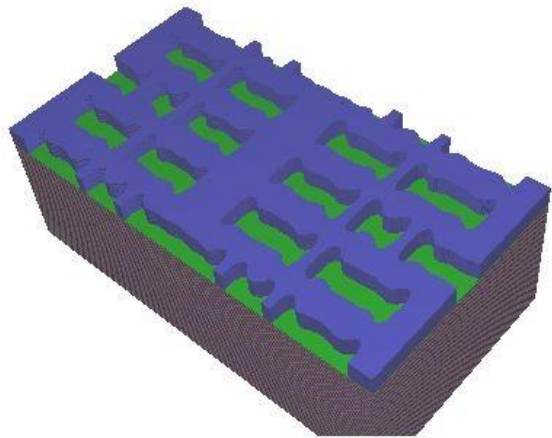


i.55, 8nm “メタル”パターン

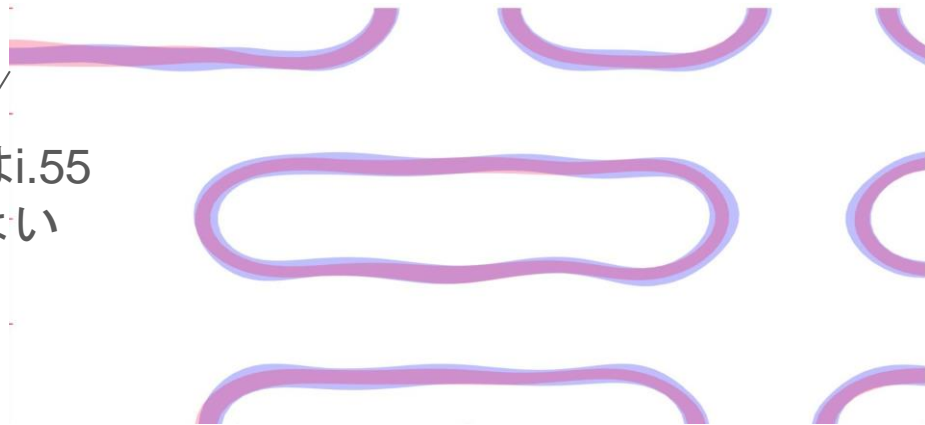




- 0.55NA、アナモルフィック、非偏光
- 0.55NA、アイソモルフフィック、xy偏光

8nm SRAMパターン

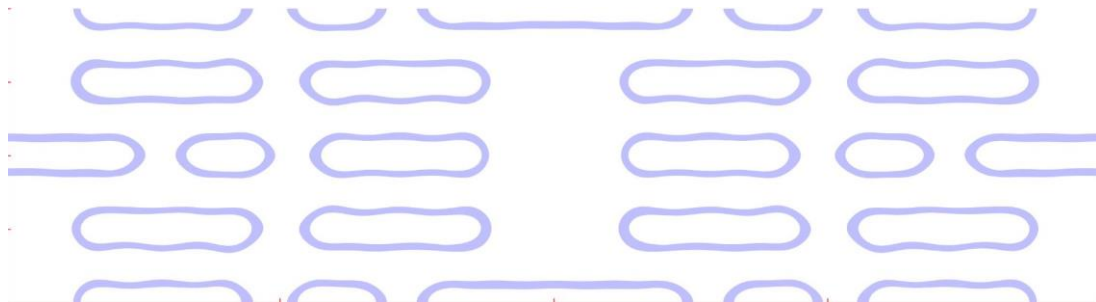


ここではi.55の方がよい

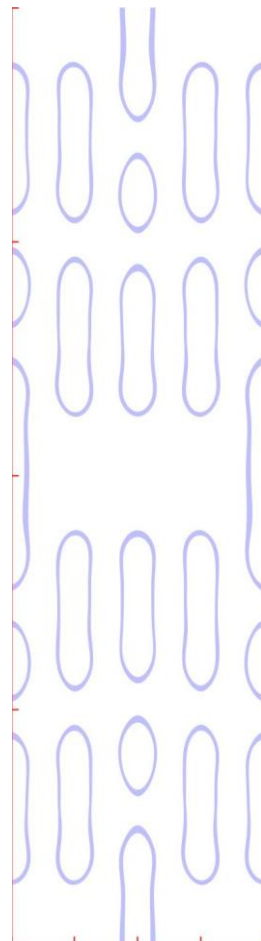


-  0.55NA、アナモルフィック、非偏光
-  0.55NA、アイソモルフィック、xy偏光

8nm SRAM - H+V, 最適化した光源

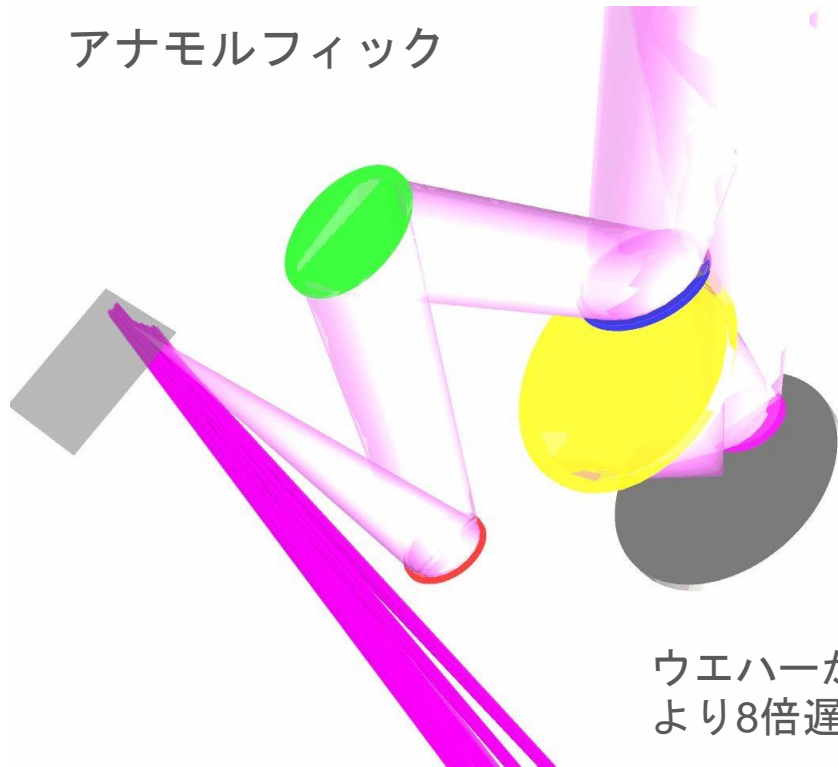


i.55では垂直ラインの方が水平ラインよりも良好に転写される（y方向のシャドーイングが強いため）



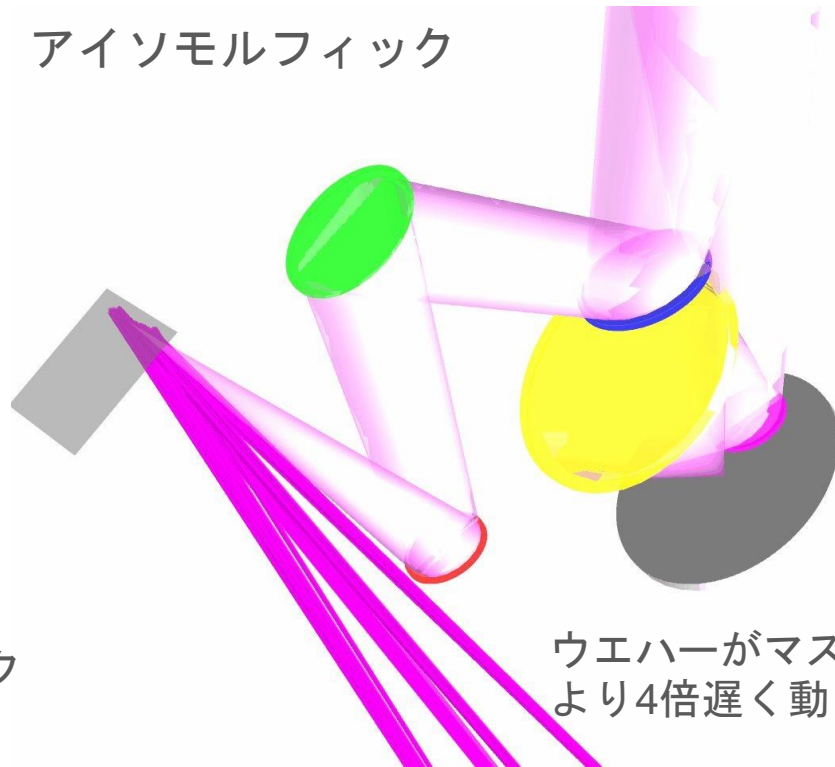
i.55のスループット

アナモルフィック



ウエハーがマスク
より8倍遅く動く

アイソモルフィック



ウエハーがマスク
より4倍遅く動く

i.55のスルーputを現行の0.55NA装置と比較

ステージのスピード :

- マスクステージのスピード : 1倍
- ウエハーステージのスピード : 2倍

IFでのエネルギー : $2倍 \times (70\% \div 64.5\%) = 2.17倍$

光学系の加熱 : 2.17倍、ただし狭いスペクトル帯域幅により低減される

FEL光源の方がスペクトル帯域幅が狭いことで、加熱は低減される。FFA: -52%、PFA: -39%、暗視野マスク : -22%

- FFA : $2.17 \times (1-0.52) = 1.04倍$
- PFA : $2.17 \times (1-0.39) = 1.32倍$
- 暗視野マスク : $2.17 \times (1-0.22) = 1.69倍$

スループットのまとめ:2倍にするための必要条件

- マスクの枚数 1倍
- 露光の回数 1倍
- マスクステージの速度 1倍
- ウエハーステージの速度 2倍
- FFAで吸収される熱 1.04倍
- PFAで吸収される熱 1.32倍
- 暗視野マスクで吸収される熱 1.69倍
- IFでのパワー 2.17倍 (FELは供給できる！)

FELはi.55の妥当性を高める

- 傾きが大きい -> デチューンしたミラー -> 効率が低い -> 損失の増加
 - FELの余裕のあるパワーにより相殺
- 損失が大きい -> ミラーの加熱が増加
 - FELの狭いスペクトル帯域幅により相殺
- シャドーイングの増大 -> コントラストの低下
 - XYゾーン偏光により相殺 (FELは生成しやすい)

発表の概要

- 自由電子レーザー(FEL)の紹介
- リソグラフィーの観点から、自由電子レーザー(FEL)はレーザー生成プラズマ(LPP)とどう異なるか
 - 強いパワー
 - 狭いスペクトル帯域幅
 - 偏光
- スキャナー設計の事例検討:プロジェクト“i.55”
- **まとめ**

まとめ

- FELベースの光源により、スキャナー設計の選択肢が柔軟になる
 - 余裕のあるパワー
 - 偏光
 - 狭いスペクトル帯域幅
- 例えば、FELはi.55の妥当性を高める
 - 2倍のスループット(?), フルフィールド、ステッチングなし
 - もちろん、さらなる検討が必要である

謝辞

本研究はxLight Inc.との共同で行いました。

