

令和4年

卒業論文

# 光集積回路測定速度向上に向けた計算 機生成ホログラムの検討

Computer generated holograms for easy and quick alignment of optical  
fibers to photonic integrated circuits

指導教員

福田 浩 教授

公立千歳科学技術大学

理工学部情報システム工学科

b2181220 佐々木 瑠斗

# 目次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究の動機	1
1.3	仮説	2
1.4	研究の目的	3
第 2 章	研究の方法	4
2.1	理論	4
2.1.1	グレーティングカプラ	5
2.1.2	クラッド/空気面での屈折	5
2.1.3	反射型グレーティング	6
2.1.4	フレネルレンズ	7
第 3 章	グレーティングカプラを用いた光結合における光の入射角についての検討	8
3.1	FDTD 法を用いた計算	8
3.2	入射角の算出	8
3.3	グレーティングカプラを用いた光結合のシミュレーション	9
第 4 章	ホログラム像の検討	13
4.1	通常の反射型グレーティング	13
4.1.1	横方向の反射型グレーティング	13
4.1.2	ピッチ 1000 nm の反射型グレーティング	14
4.1.3	縦方向の反射型グレーティング	15
4.1.4	45 度回転させたグレーティング	15
4.1.5	60 度回転させたグレーティング	15
4.2	格子状グレーティング	17
4.2.1	0 度と 90 度で交差させたグレーティング	17
4.2.2	45 度と 135 度で交差させたグレーティング	17
4.2.3	60 度と 120 度で交差させたグレーティング	17
4.2.4	10 度と 170 度で交差させたグレーティング	19
4.2.5	0 度と 60 と 120 度で交差させたグレーティング	19
4.3	フレネルレンズを用いたグレーティング	19
第 5 章	考察	21

# 第 1 章 緒言

## 1.1 研究背景

光集積回路の研究開発における、高速化、小型化、低コスト化、低消費電力化という課題の解決策として、シリコンフォトニクス (Silicon Photonics、以下、SiPh) 集積回路が期待されている。SiPh 集積回路はシリコン基板上に光導波路、光スイッチ、光変調器、受光器などの素子を集積したものであり、シリコン CMOS 集積回路の製造インフラストラクチャを利用して製造することが可能である。最先端の製造装置や長年にわたり蓄積した製造技術を活用することで、従来のシリカベースの光回路とは異なり、安価で高性能な光回路を大量生産することを期待されている。更に、SiPh はコアとクラッドの屈折率差が著しく大きいことから、導波路を導波する光をコアに強く閉じ込めることができ、光回路の小型化に大きく貢献できる。このことから、高集積密度、優れたエネルギー効率、経済性の高い光回路を提供するという点で優れた技術であるとされ、IoT や 5G 技術の発展に向けて応用が期待されている。

光集積回路の製造に際して、SiPh 集積回路と光ファイバの光結合方法として主に採用されている方法は、端面結合法と表面結合法である。特に、グレーティングカプラ (Grating Coupler、以下、GC) を用いた表面結合法は、ウェハー表面で結合が出来ることから、ウェハー段階でテストが可能であり、後工程の工数改善による大幅な経済化が期待できる。光集積回路の製造工程において、最もコストがかかる部分は光入力に必要な光ファイバと、光集積回路で入力部となる部分の位置決め (以下、アライメント) である。

図 1.1 は光ファイバと GC の典型的な表面結合の様子を示した図である。図上方から光ファイバを伝ってきた光は、光ファイバの端面から GC に向かって放出される。空間的周期構造を有する GC に対し、光が周期構造と並行する電場成分を持つ場合、光の波長に応じて GC のピッチを適切に設計すれば、GC を通じて光を基板内に導入することができる。しかし、GC を用いたアライメントは、初期の位置決めに加え、入射角度と偏波面の調整を必要とし、その自由度の多さから、アライメント工数の増大を招き、ひいてはコスト上昇の要因となっている。

## 1.2 研究の動機

前述の通り SiPh 集積回路を応用することで光通信の発展が期待されるが、その技術の利用には課題がある。その中で、光集積回路の製造におけるコスト面の改善を考え、最もコストがかかる部分である、アライメント工程に注目した。アライメントに費やされる時間の短縮を検討することで、時間的なコストを下げることができ、SiPh 集積回路の普及を促進することができるだろう。

本研究においては光ファイバと光集積回路の位置ズレの検知にホログラムを用いる手法を考

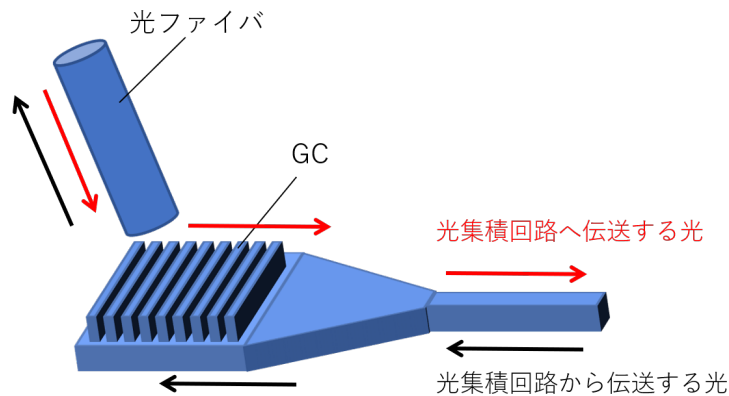


図 1.1 グレーティングカプラを用いた表面結合方式

案する。

ホログラムとは、光の干渉・回折を用い、物体からの光を記録・再生する技術である。ホログラムの記録には光の干渉が用いられ、再生には回折が用いられる。光源の光をハーフミラーによって、物体を照射する光である「物体光」と記録材料に対して照射する光である「参照光」とに分離する。このとき、記録材料面では物体光と参照光による干渉が起こり、干渉縞と呼ばれる非常に細かい模様ができる。この干渉縞が記録された媒体がホログラムである。再生の際には、記録時の参照光と同じ位置に光源を置き、ホログラムに対して再生照明光を照射する。このときホログラムを通過する光以外にも、ホログラムの細かい干渉縞によって回折が起こり、別方向に広がる光が生じる。このときの回折光が記録した物体光と同じ形になっており、観察者には実際に物体が存在しなくてもホログラムの奥に記録した物体があるように見ることができる。

アライメントを行う中でのズレの発生時に、ホログラムが再生できれば、その再生像の形状や大きさによってズレの方向や距離を測ることが可能になると考えた。

### 1.3 仮説

ホログラムには、実際の物体にレーザ光などを照射して得た回折像を写真技術を用いてフィルム等へ書き込む通常ホログラムと、計算によって生成した回折像を微細加工技術を用いて各種基板などへ書き込む計算機生成ホログラム (Computer Generated Hologram、以下 CGH) がある。本研究では CGH を用いる。

CGH は通常のホログラムと違い、物体や光源、記録材料、ハーフミラーなどの位置や光の入射角度などの設計が必要ない。作成手順としては、まず、作成したい物体の 3 次元データ (本研究では原理確認のため 2 次元データを用いる) を用意する。次に、光線の伝搬距離を設定し、その位置に記録平面を仮定して、物体の光波伝搬を計算する。記録平面で得られた複素振幅分布が CGH となる。計算によって得られた CGH は、SiPh 光回路では GC と同一面上に形成する。パターン設計データの作成工程でも、実際の CGH 製造工程でも、CGH は GC と同時に作られるため、製造コストを増加させることはない。

評価方法としては、光ファイバ位置が GC に対し上下左右前後方向にズレた場合に、結像パターンが変化するように設定された計算機生成ホログラムを、GC 周辺に配置する。そのパター

ンの変化によってズレの方向、大きさ等を判断し、光ファイバの位置合わせを行う。これにより、GC を用いた表面結合の際のアライメントの高速化が期待できる。

ホログラム像の画像認識にはカメラを用いる。カメラを用いた画像認識において有用な像のパターンを検討する必要がある。カメラは人間の目と違い、複雑な形状を認識することが困難である。円形なども向きが分からなくなるため採用できない。また、SiPh 集積回路内の部品に存在する形状はカメラが誤認識してしまう可能性があるため、避けなければならない。これらの制限がある中で、有用である形状は、五角形以上の多角形であると考えられる。

画像認識の効率を考えると、特徴的な形状を持つ結像を得ることが理想であるが、本研究は初期検討であるため、検討対象として、幾何学図形を結像するホログラムを取り上げることとする。

## 1.4 研究の目的

本研究の目的は、光集積回路の研究開発における、高速化、小型化、低コスト化、低消費電力化という課題の解決策として期待されている、SiPh 集積回路の普及を進めるために、光集積回路の製造におけるコストを下げるための方法を検討することである。本研究では、グレーティングカップラを用いた表面結合による光ファイバ実装時のアライメントの工程に注目し、アライメントに費やされる時間の短縮を検討することで、時間的なコストを大幅に下げることの可能性を示す。

本研究では前述のアライメント工程における、画像認識に有用なホログラムの結像パターンの検討を行う。

## 第 2 章 研究の方法

前述の通り本研究では、アライメント工程においてホログラムを活用した際の、画像認識に向けた適切な結像パターンを検討する。

まずそのために必要な工程は、GC に入射可能な角度を計算することである。導波路の垂直から光の進む方向が何度傾いているかを計算し、算出された角度を光結合可能な入射角度とし、アライメントの際に目指す角度とする。

以上の工程の結果を踏まえ、本研究の目的であるホログラム像の検討を行う。ここで用いるホログラムは複雑なものではなく、グレーティングの理論を応用したものである。波長  $630\text{nm}$  の光を入射角  $10(\text{度})$  で入射し、反射光と回折光を観察する。ここで入射角を  $10(\text{度})$  としたのは、アライメントの際の角度ズレを想定している。OpenFDTD を用いて物体と光源を準備してシミュレーションを行った。メッシュサイズは  $x$  方向  $800\text{ nm}$ 、 $y$  方向  $800\text{ nm}$ 、 $z$  方向  $200\text{ nm}$  である。図 2.1 は OpenFDTD 波長  $630\text{nm}$  の光源とピッチ  $500\text{nm}$  のグレーティングを設置した様子を示した。ここでの、グレーティングのピッチとは、図 2.2 の  $\Lambda$  である。

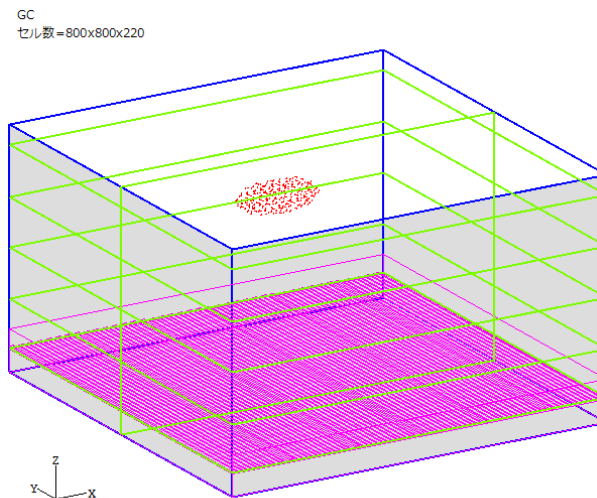


図 2.1 波長  $630\text{nm}$  の光源とピッチ  $500\text{nm}$  のグレーティング

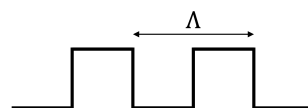


図 2.2 ピッチ

### 2.1 理論

### 2.1.1 グレーティングカプラ

図 2.3 の光路 A と光路 B の位相差が  $2\pi$  の整数倍のとき、光路 B の光は光路 A に結合できる。

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} \Lambda - \frac{2\pi}{\lambda} n_{clad} \Lambda \sin \theta = 2\pi m \quad (2.1)$$

$$n_{eff} \Lambda - n_{clad} \Lambda \sin \theta = m\lambda$$

$$\sin \theta = \frac{n_{eff} - \frac{m\lambda}{\Lambda}}{n_{clad}}$$

$m = 1$  で、 $\lambda = 1.55(\mu m)$ 、 $n_{eff} = 2.56$ 、 $n_{clad} = 1.445$ 、 $\Lambda = 0.66(\mu m)$  のとき

$$\sin \theta = \frac{2.56 - \frac{1.55}{0.66}}{1.445} \quad (2.2)$$

$$\theta = 0.144$$

( $0.144 rad = 8.3$  度)

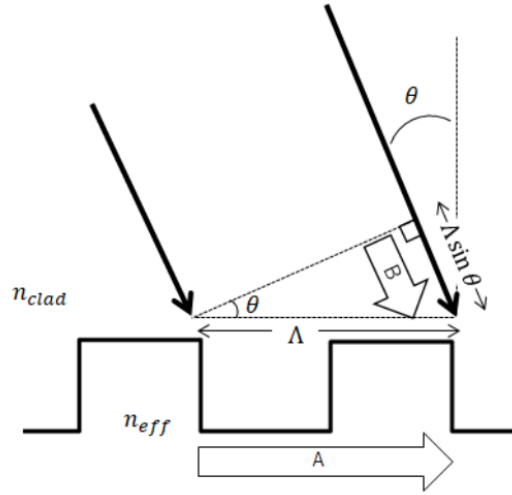


図 2.3 グレーティングカプラ

### 2.1.2 クラッド/空気面での屈折

図 2.4 の  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  の関係は Snell の法則で記述できる。

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.3)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \sin \theta_2$$

$n_1 = 1.000$ 、 $n_2 = 1.445$ 、 $\theta_2 = 0.144$  のとき

$$\sin \theta_1 = \frac{1.445}{1.000} \sin(0.144) \quad (2.4)$$

$$\theta_1 = 0.208$$

( $0.208\text{rad} = 11.9\text{度}$ )

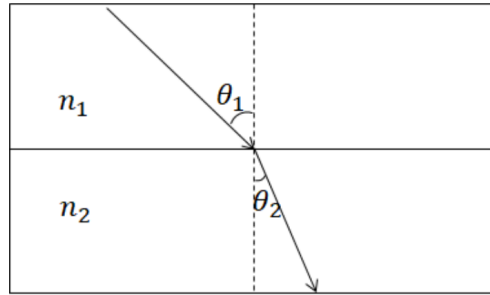


図 2.4 界面での屈折

GC への入射角が  $0.144\text{ rad}$  を満たす場合、空気 ( $n_1 = 1.000$ ) からの入射角度は、 $0.208\text{ rad}$ (凡そ  $12\text{度}$ ) である。

### 2.1.3 反射型グレーティング

空気からクラッド層への入射角を  $\theta'$ 、クラッド層から空気への出射角を  $\phi'$  とすると、

$$\sin \theta' = n_{clad} \sin \theta \quad (2.5)$$

$$\sin \phi' = n_{clad} \sin \phi$$

である。

グレーティングへの入射角を  $\theta$ 、グレーティングからの出射角を  $\phi$  とすると、

$$n_{clad} \Lambda \sin \phi - n_{clad} \Lambda \sin \theta = m\lambda \quad (2.6)$$

$$\sin \phi = \frac{m\lambda}{n_{clad} \Lambda} + \sin \theta$$

から、 $\phi$  を求めることが出来る。

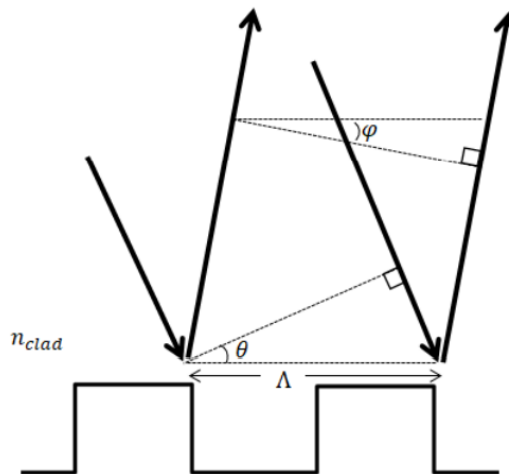


図 2.5 反射型グレーティング



### 2.1.4 フレネルレンズ

図 2.6 の  $R_m$  は、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $\dots$  と  $m$  が 1 つ増えるごとに、半波長 ( $\lambda/2$ ) だけ増加すれば焦点距離  $f$  の点に結像する。

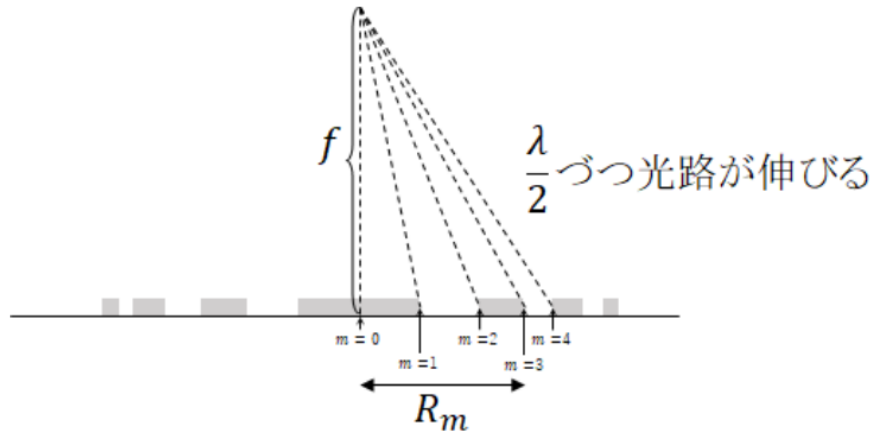


図 2.6 フレネルレンズ

$$\begin{aligned}
 R_m &= \sqrt{\left(f + \frac{m\lambda}{2}\right)^2 - f^2} \\
 &= \sqrt{mf\lambda + \frac{m^2\lambda^2}{4}}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

## 第3章 グレーティングカップラを用いた光結合における光の入射角についての検討

本章ではグレーティングカップラを用いた光結合において、適切な光の入射角の計算結果について報告する。

### 3.1 FDTD 法を用いた計算

シリコンフォトニクス集積回路と光ファイバーの光結合における、結合可能な入射角度を調べるために FDTD 法を用いてシミュレーションを行った。ここで計算した入射角を光結合可能な入射角度とし、アライメントの際の目標の角度とする。

しかし、計算を行うにあたって問題点が生じた。図 3.1 のように光結合する場合と同じ手順で、光ファイバーからグレーティングカップラに入射する光の角度を計算するためにはシミュレーション上での細かい角度調整が必要になり、困難な点である。そこで、図 3.2 のように、本来グレーティングカップラで受けた光を伝送する導波路から、反対方向に光を発生させ、グレーティングカップラから出射する光の角度を求めた。

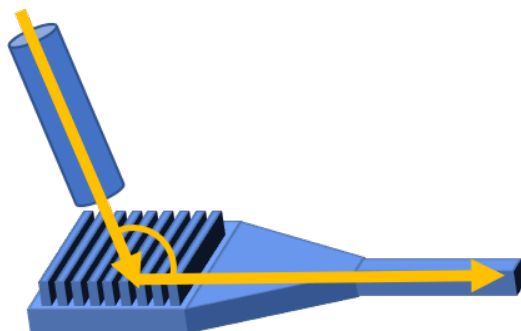


図 3.1 光ファイバーからグレーティングカップラに入射する光

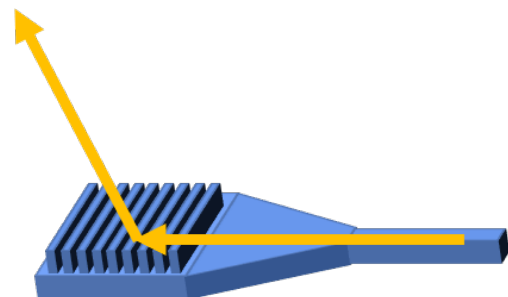


図 3.2 グレーティングカップラから出ていく光

OpenFDTD を使用して、グレーティングカップラと導波路の形状を再現した。波長を  $1550\text{nm}$  に設定した光源を導波路に設置し、グレーティングカップラの方へ光が伝送するように設定した。

### 3.2 入射角の算出

シミュレーション結果を図 3.3 に示す。これはグレーティングカップラから出る光の様子の断面図である。グレーティングカップラから出た光は図の左斜め上方向に進んでいることが分かる。

まず、3.3 はアスペクト比が 1:1 になるように調整しているため、このまま計算を行っても正確な角度は算出できない。角度を適切に測定するため正しいアスペクト比に直すために画像の

加工を行ったものを図 3.4 に示す。次に、画像は PNG ファイルであるため、ビットマップ画像に変換を行なった。こうすることで、ピクセルの色情報を 0 から 16,777,215 の数字で表現することが可能になる。ビットマップの色情報を 24bit 量子化し、表計算アプリケーションでフィルタリング処理して電場強度がしきい値以上になる領域を切り出して、その空間座標を  $x, y$  の組として特定した。 $x, y$  の散布図の傾きを最小自乗近似して、傾きを算出した。傾きを求めた結果を図 3.5 に示した。縦軸と横軸ともにピクセル数を表している。

傾き 0.233、切片 -0.159 で角度は 13.1(度) と求められた。

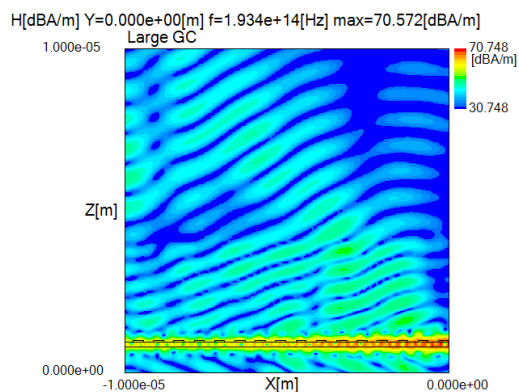


図 3.3 OpenFDTD の出力画像

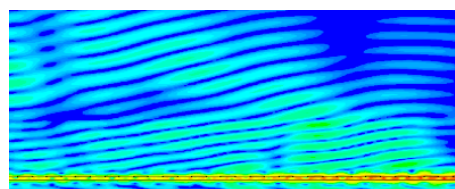


図 3.4 正しいアスペクト比に直した OpenFDTD の出力画像

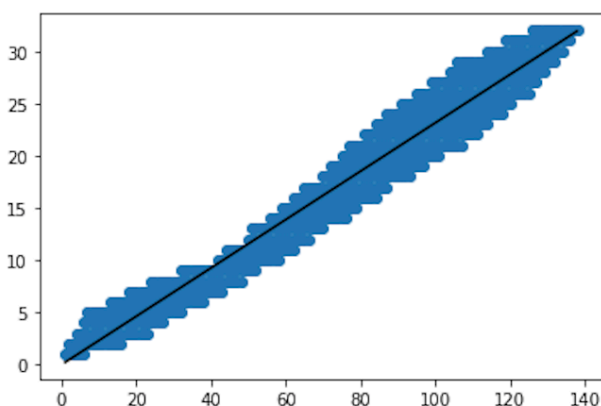


図 3.5 python を用いて回帰直線を求めた結果

### 3.3 グレーティングカプラを用いた光結合のシミュレーション

??で計算したグレーティングカプラから出射する光の角度を、光結合可能な入射角として、グレーティングカプラを用いた光結合のシミュレーションを行なった。波長  $1550\mu\text{m}$  の光を入射角 13 度でグレーティングに受光させ、光結合の有無を計算した。計算結果の出力画像の切断面を三次元画像で図 3.6 と図 3.7 に示す。グレーティングカプラのピッチは  $660\text{nm}$ 、グレーティングカプラ部分の寸法は縦横ともに  $10\mu\text{m}$  で高さは  $220\text{nm}$  である。

計算結果を図 3.9 と 3.8 に示す。平面図が図 3.8 で側面図が図 3.9 である。グレーティングカプラで受光した光は導波路を伝送しており、光結合が行われていると考えられる。

2.1.1 で述べた理論では波長  $\lambda = 1550\mu\text{m}$ 、 $\Lambda = 660\mu\text{m}$  の時、入射角は 11.9 度であった。このシミュレーションでは 13 度の入射角で光結合を試みているが、概ね結合できていることから、誤差があっても光結合は可能であると考えられる。

Ey[dBV/m] Y=0.000e+00[m] f=1.934e+14[Hz] max=130.267[dBV/m]  
GC

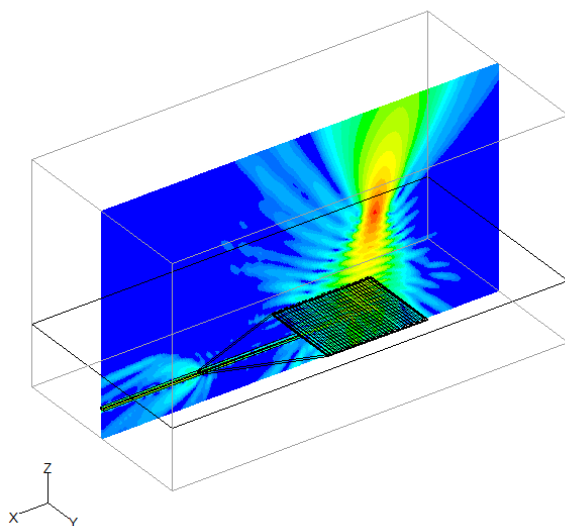


図 3.6 側面図の切断面

Ey[dBV/m] Z=8.800e-07[m] f=1.934e+14[Hz] max=121.671[dBV/m]  
GC

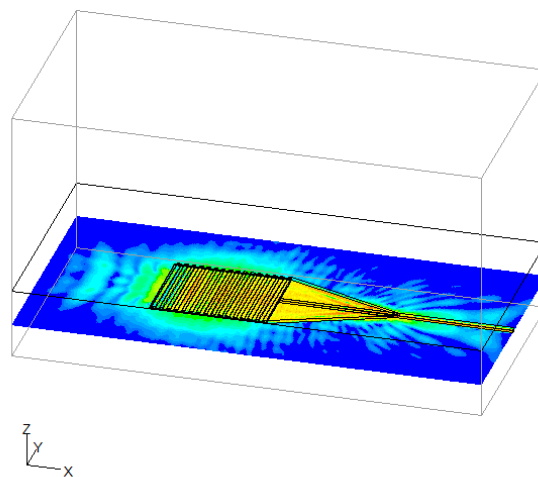


図 3.7 平面図の切断面

Ey[dBV/m] Z=8.800e-07[m] f=1.934e+14[Hz] max=120.750[dBV/m]  
GC

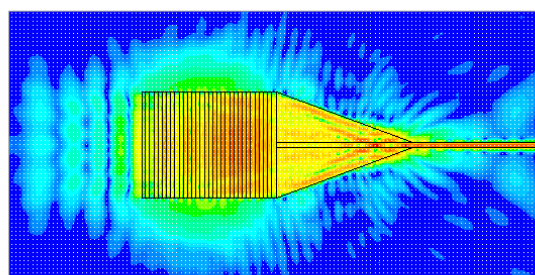


図 3.8 グレーティングカプラを用いた光結合のシミュレーション結果 (平面図)

次に光の波長を  $630\text{nm}$  に変更してシミュレーションを行なった。出力画像の切断面は、波長  $1550\mu\text{m}$  で計算した際と同様に、図 3.6 と図 3.7 に示す。計算結果を図 3.10 と 3.11 に示した。上

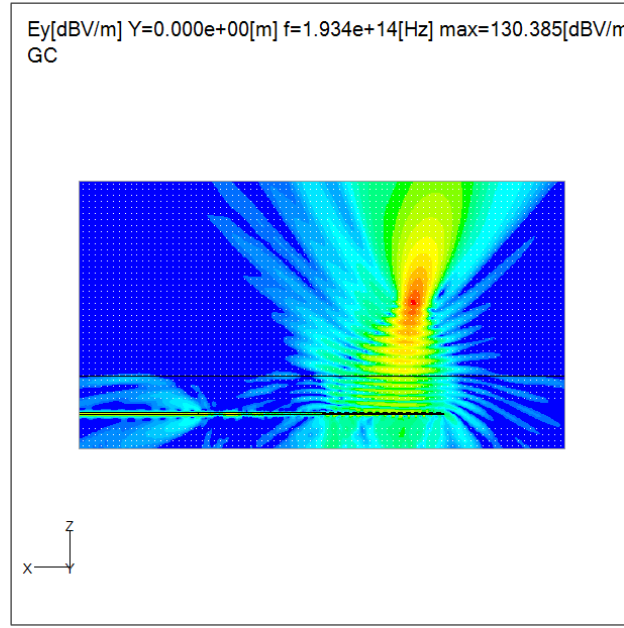


図 3.9 グレーティングカプラを用いた光結合のシミュレーション結果 (側面図)

から見た断面図が図 3.10 で横から見た断面図が図 3.11 である。波長  $630\mu m$  の光は導波路に伝送されず、グレーティングカプラに当たり、反射する。グレーティングからの出射角は以下のように求められる。2.1.3 の 2.5 式より、入射角  $\theta' = 13$  度、のとき

(13 度= $0.227rad$ )

$$n_{clad} \sin \theta = \sin(0.225) \quad (3.1)$$

2.6 式より、 $m = 1$  で、 $\theta = 0.227$ 、 $\lambda = 0.630(\mu m)$ 、 $n_{clad} = 1.445$ 、 $\Lambda = 0.66(\mu m)$  のとき

$$n_{clad} \Lambda \sin \varphi - 0.66 \sin(0.227) = 0.630 \quad (3.2)$$

$$\sin \varphi = \frac{0.63 + 0.66 \cdot \sin(0.227)}{1.445 \cdot 0.66}$$

$$\sin \varphi = 0.81626056$$

$$\varphi = 0.955$$

( $0.955rad = 54.7$  度) 空気から GC への入射角が  $0.225 rad$  を満たす場合、グレーティングカプラからの入射角度は、 $0.955 rad$ (凡そ  $55$  度)。

$$\sin \varphi = 1.445 \cdot 0.81626056 \quad (3.3)$$

$$\varphi = 1.18$$

( $1.18rad = 67.6$  度)

空気から GC への入射角が  $0.225 rad$  を満たす場合、グレーティングから空気への出射角度は、 $1.18 rad$ (凡そ  $68$  度) である。

本研究では、波長  $630nm$  の光を用いて、グレーティングに反射させた光を観察し、ホログラム像の検討を行う。

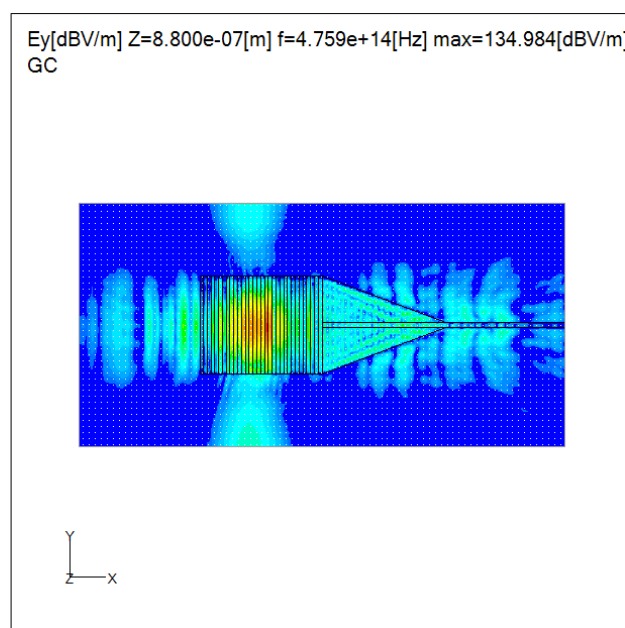


図 3.10 グレーティングカプラに  $630\text{nm}$  の光を当てたシミュレーション結果 (横断面)

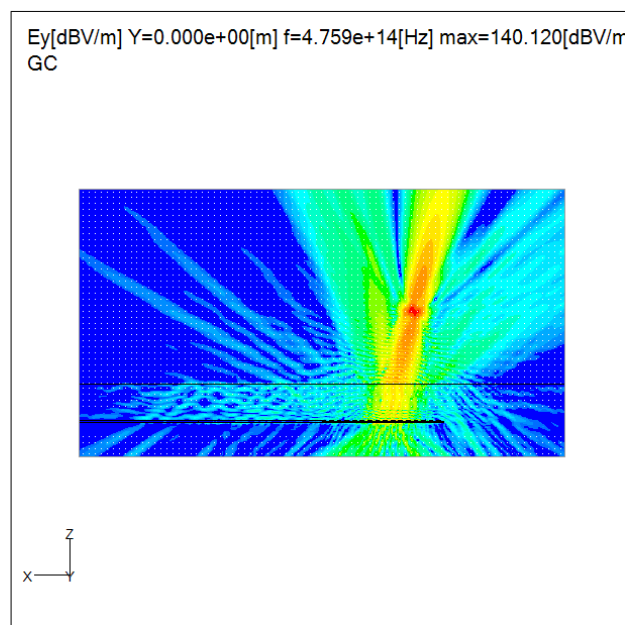


図 3.11 グレーティングカプラに  $630\text{nm}$  の光を当てたシミュレーション結果 (縦断面)

## 第 4 章 ホログラム像の検討

本章では、アライメントに用いるホログラム像の結像パターンとして適当なものを検討した結果を報告する。

ホログラムとして採用した構造物を以下に示す

- ① 光の向きに対して垂直方向に並べた反射型グレーティング
- ② 光の向きに対して平行に並べた反射型グレーティング
- ③ ①を 45 度回転させたグレーティング
- ④ ①を 60 度回転させたグレーティング
- ⑤ ①と②を交差させたもの
- ⑥ ③と①を 135 度回転させたグレーティングを交差させたもの
- ⑦ ④と①を 120 度回転させたグレーティングを交差させたもの
- ⑧ ①を 10 度回転させたグレーティングと 170 度回転させたグレーティングを交差させたもの
- ⑨ ①と⑦を組み合わせたもの
- ⑩ フレネルレンズの理論を応用したグレーティング

①、②は、ピッチ  $500\text{nm}$  でグレーティングを並べ、出力画像は反射面から  $20\mu\text{m}$  の回折像を表示している。③以降はピッチ  $700\text{nm}$  でグレーティングを並べ、出力画像は反射面から  $15\mu\text{m}$  の回折像を表示している。③からピッチと出力画像の切断面を変更しているのは、ホログラム像が複雑化するにあたって、見やすくするためである。

### 4.1 通常の反射型グレーティング

#### 4.1.1 横方向の反射型グレーティング

光源からの光の進行方向に対して垂直に並べたグレーティングを横方向のグレーティングとした。横方向のグレーティングは、GC と構造が相似しており、反射構造物の最初の例として適切と考えたためである。

波長  $0.63\mu\text{m}$  の光を入射角 10 度で入射し、ピッチ  $5\text{nm}$  のグレーティングで反射させ、計算を行なった。出力した画像を図 4.1 と図 4.2 に示した。どちらの画像も反射面から  $20\mu\text{m}$  上の平面図である。図 4.1 はピッチ  $500\text{nm}$  の反射型グレーティングの計算結果をそのまま出力したものである。一方、図 4.2 はピッチ  $500\text{nm}$  の反射型グレーティングの計算結果から、光源のみでの計算結果を引いたものである

図 4.1 は光源の出力結果が含まれているため、光源の部分が強く出力されている。また、計算領域内全体に影響があり、出力画像に歪みが発生している。そのため、より精細な出力結果を得るために、光源のみで計算した結果を引き算し、図 4.2 を出力した。以降の研究過程では、そ

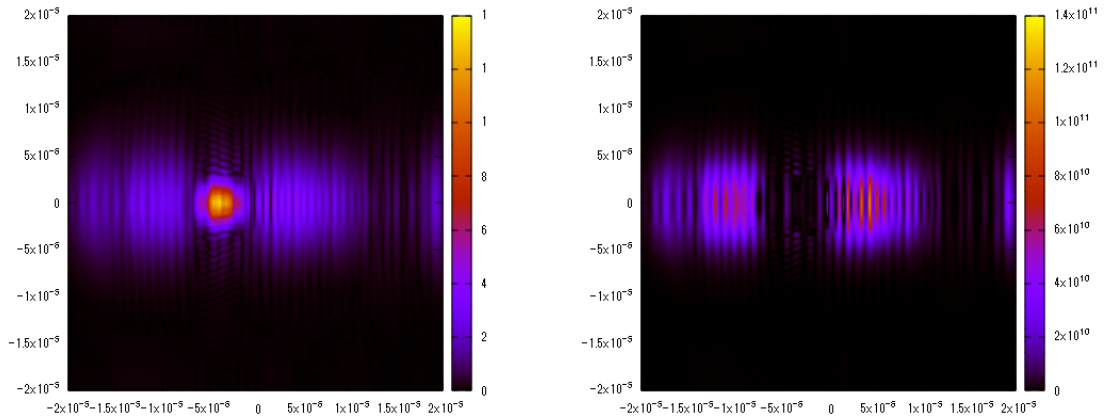


図 4.1 横方向のグレーティング (光源あり) 図 4.2 横方向の反射型グレーティング (光源なし)

それぞれのパターンでの計算結果から光源の計算結果を引いたものを出力し検討を行なった。

#### 4.1.2 ピッチ 1000 nm の反射型グレーティング

ピッチの異なるグレーティングによる回折像の違いを示すために、ピッチの大きいグレーティングの例として、ピッチ 1000 nm のグレーティングをシミュレーター上で用意した。

計算結果から出力された画像を図 4.3 に示した。図 4.3 は反射面から  $20\mu\text{m}$  上の横断面での回折像である。

ピッチ 500 nm で計算を行なった場合 (4.1.1) と比較すると、反射光の広がり狭くなっている。ピッチを大きくすることで、回折光の広がりを狭くすることができると考えられる。

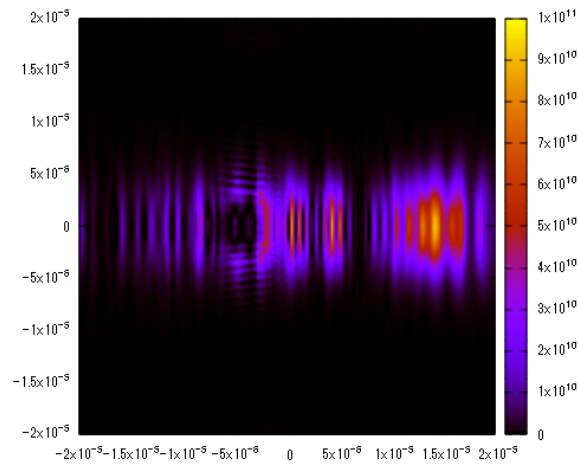


図 4.3 ピッチ 1000 nm の横方向グレーティング



### 4.1.3 縦方向の反射型グレーティング

4.1.1 では光の進行方向に対して垂直に縞を並べたグレーティングを用いて計算を行った。このグレーティングに対して、90 度回転させたものを、縦方向の反射型グレーティングとした。真に反射構造体からの回折光を観察できているとすれば純粋に回折像が回転することで確認でき、判断が明確であると考えられる。

計算結果から出力された画像を図 4.4 に示した。検討の前に予想していた通り、回折光は 90 度回転し、入射光に対して左右に横方向に広がることが確認できた。反射構造体からの回折光は適切に観察できていると言える。

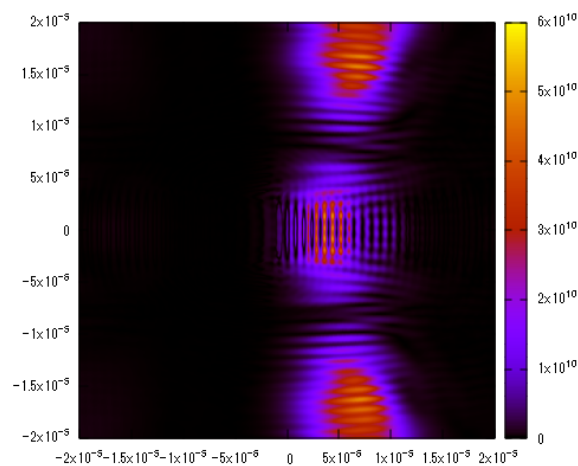


図 4.4 縦方向の反射型グレーティング

### 4.1.4 45 度回転させたグレーティング

4.1.1 で用いたグレーティングを 45 度回転させたものを設置し、計算を行った。任意方向に回転させたグレーティングを用いて検討する意図は、4.1.1 と 4.1.3 で確認した回折像のクロスチェックであり、より複雑な回折像形成に向けた基礎データの取得である。

回折光は 45 度傾いているように見え、前述の反射構造体からの回折光が適切に観察できているという結果がさらに明確になった。回転を加えたグレーティングを複数組み合わせることで、複雑な幾何学図形を結像できると考えた。

### 4.1.5 60 度回転させたグレーティング

4.1 で用いたグレーティングを 60 度回転させたものを設置し、計算を行った。回折光は 60 度回転しているように見える。4.1.4 の検討に加え、この検討を行ったことで、グレーティングを回転させた角度に応じて、同じだけ回折像が回転することが明確になった。

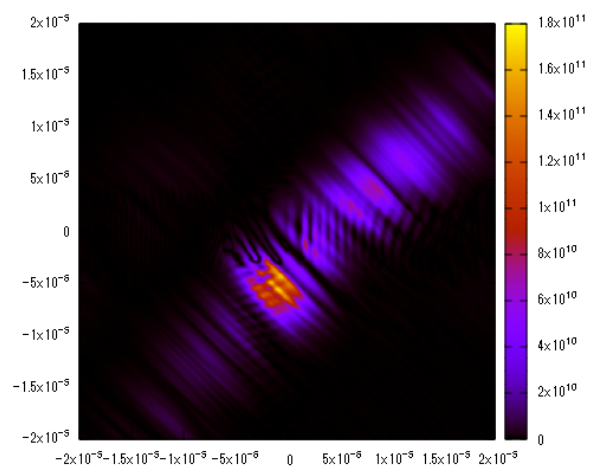


図 4.5 45 度回転させたグレーティング

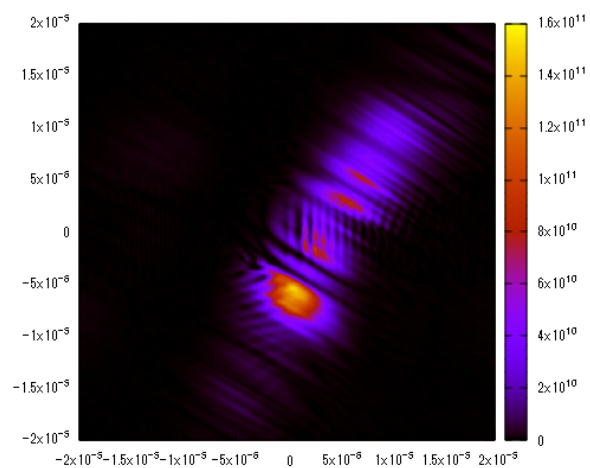


図 4.6 60 度回転させたグレーティング

## 4.2 格子状グレーティング

### 4.2.1 0度と90度で交差させたグレーティング

4.1 と 4.1.3 で用いたグレーティングを組み合わせて垂直に交差する、格子状のグレーティングを生成した。この反射構造体を用いて検討することで、正方形といったシンプルな幾何学図形を再現できると予想できる。

像の見やすさを考慮し、ピッチを 700 nm に変更し計算を行ない、出力画像は反射面から  $15(\mu\text{m})$  上の横断面での回折像を表示している。計算結果から出力された画像を図 4.7 に示した。反射光は正方形に近い形状の像を結像しており、検討の前に予想していた、正方形を結像できるという仮説は立証された。

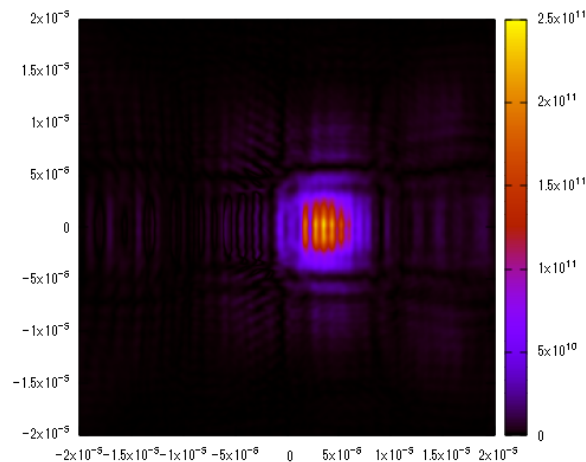


図 4.7 0度と90度で交差させたグレーティング

### 4.2.2 45度と135度で交差させたグレーティング

45度回転させたグレーティングと135度回転させたグレーティングを交差させた。この反射構造体を用いて検討することで、で結像した、正方形を45度回転させたような、幾何学図形を再現できると予想した。

計算結果から出力された画像を図 4.8 に示した。回折光は 4.7 で得られた像を45度回転させた形状に近い像を結像している。

### 4.2.3 60度と120度で交差させたグレーティング

60度回転させたグレーティングと120度回転させたグレーティングを交差させ、計算を行った。この検討では回折像はひし形を結像すると予想した。計算結果から出力された画像を図 4.9 に示した。回折光は六角形に近い形状を結像しており、検討前の予想とは異なる結果となった。

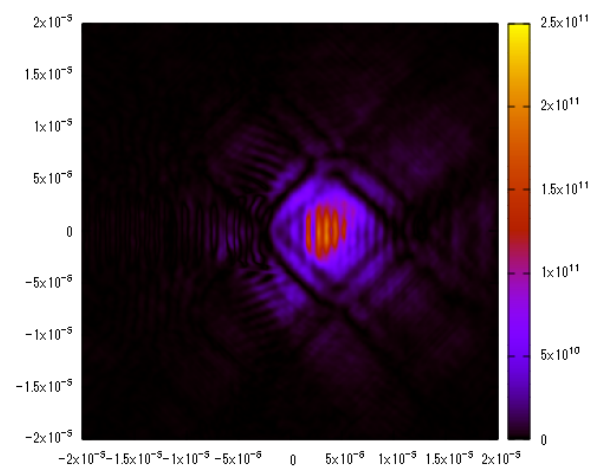


図 4.8 45 度と 135 度で交差させたグレーティング

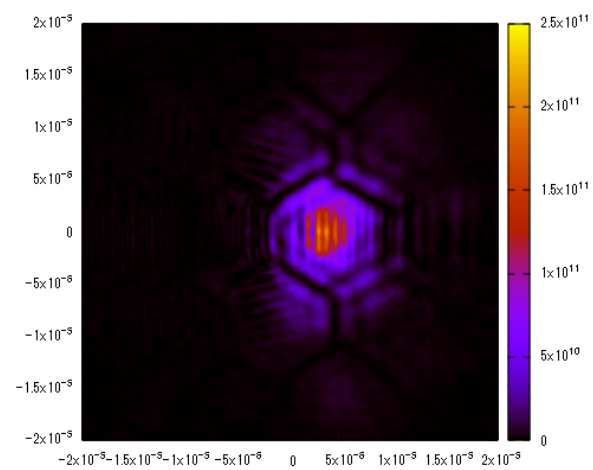


図 4.9 60 度と 120 度で交差させたグレーティング

#### 4.2.4 10 度と 170 度で交差させたグレーティング

10 度回転させたグレーティングと 170 度回転させたグレーティングを交差させた、計算を行った。この検討では 4.2.3 と同様に回折像はひし形を結像すると予想した。計算結果から出力された画像を図 4.10 に示した。回折光はあまり判然としないがひし形が結像しているように見える。

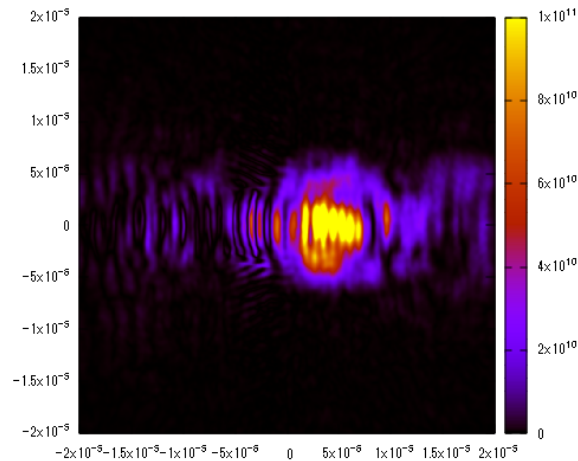


図 4.10 10 度と 170 度で交差させたグレーティング

#### 4.2.5 0 度と 60 と 120 度で交差させたグレーティング

回転させていないグレーティングと 60 度回転させたグレーティングと 120 度回転させたグレーティングを交差させた。この反射構造体を計算することで、六角形を再現できると予想した。計算結果から出力された画像を図 4.11 と 4.12 に示した。像の輪郭がはっきりせず、人によっては見づらいと判断する場合もあると考え、光源を含めた計算結果と、全体の計算結果から光源のみでの計算結果を引いたものを、どちらも示している。回折光は六角形に近い形状を結像しているようにみえるが、これを六角形と明確に判断するには、鮮明さが欠如していると考えた。

### 4.3 フレネルレンズを用いたグレーティング

2.1.4 で説明した理論を用いて、焦点距離  $5\mu\text{m}$  のグレーティングを生成した。この検討では、通常のグレーティングと比較して、回折光はどのような広がりが見られるかを確認する。計算結果から出力された画像を図 4.13 に示す。回折光は通常のグレーティングと比べて、広がりが少なく集中しているように見える。

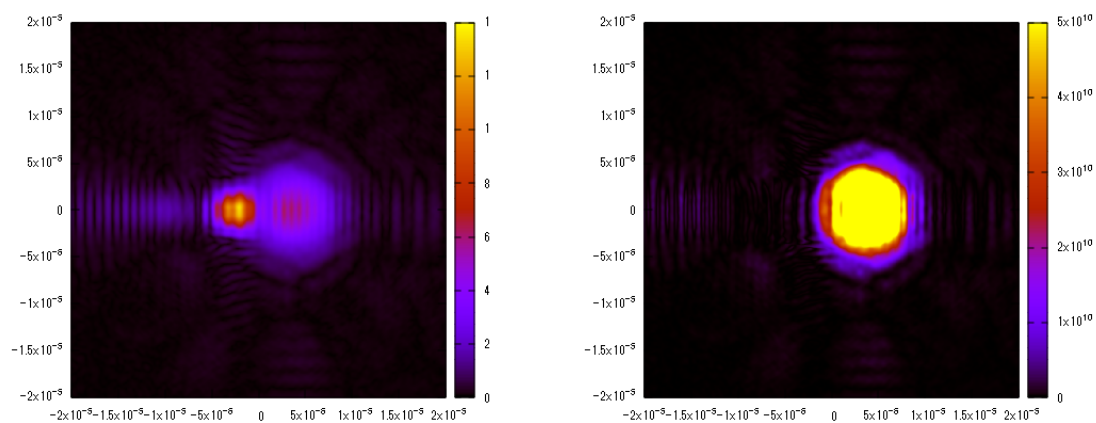


図 4.11 0 度と 60 と 120 度で交差させたグレーティ 図 4.12 0 度と 60 と 120 度で交差させたグレーティ  
ング (光源あり) ング (光源なし)

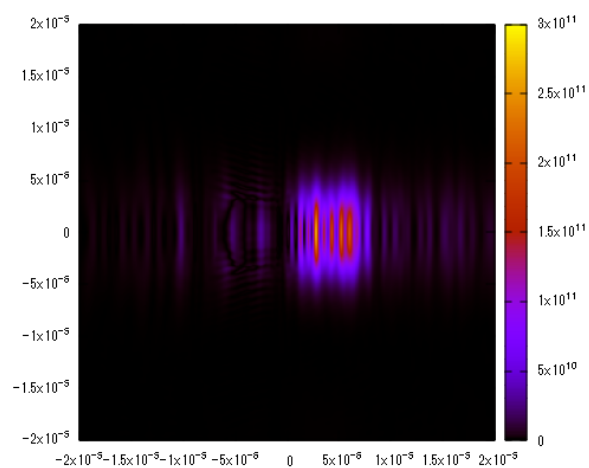


図 4.13 フレネルレンズを用いたグレーティング

## 第5章 考察

ホログラムの例として、グレーティングを用いて結像パターンを生成した。グレーティングを用いたホログラムでは複雑な形状を生成するのは困難である。しかし、アライメントにおけるホログラム活用については、複雑な結像パターンは必要ではなく、本研究では、画像認識がしやすい結像パターンを検討した。FDTD法のシミュレーション上で計算を行った。

まず、通常のグレーティングでは反射光に図形としての幾何学性はなく画像認識には不向きであると考えられる。しかし、ピッチを大きくすることで、反射角を小さくし、広がりを抑えることができた。グレーティングのピッチを変化させることで、結像位置を調整することが可能であると考えられる。

次に、縦方向のグレーティングについても、図形としての幾何学性がなく、画像認識に不向きであると考えられる。縦方向のグレーティングは、ピッチを変化させると光の進行方向に対して横方向に結像位置を変化させることが可能であると考えられる。

以上の横方向のグレーティングと縦方向のグレーティングを垂直に交差させて、格子状のグレーティングを生成した。格子状のグレーティングに反射した光は、正方形に近い形状で結像した。この結像パターンは図形として成立しており、画像認識に向いていると考えた。しかし、正方形などの四角形は光集積回路の部品に数多く含まれており、画像認識を行う際に誤認識してしまう可能性があるため、画像認識用の結像パターンとしては、扱いづらいと考えられる。

斜め方向に回転させたグレーティングについても計算を行った。45度回転させたグレーティングで計算を行った場合は像も45度回転していた。60度回転させたグレーティングで計算を行った場合は像は60度回転していた。グレーティングを回転させた場合は、回転させた角度に応じて、同じ角度で像も回転すると考えられる。

斜め方向に回転させたグレーティングを交差させて、格子状のグレーティングを生成し、計算を行った結果、45度と135度を組み合わせた場合は、正方形を45度回転させたような形状になった。これは、画像認識を行う際に通常の正方形と別物として認識ができれば、有用であると考えられる。60度と120度を組み合わせた場合は、六角形のような形状になった。ひし形を結像すると予想して計算を行っていたため予想とはかけ離れた結果となった。これは、斜め方向の回折光の中に、光源に平行方向の回折光が混ざったためであると考えられる。しかし、計算結果に平行方向の回折光が含まれてしまった理由については解明ができなかった。10度と170度を組み合わせた場合もひし形を結像すると予想していたが、図形を結像しなかった。画像認識には利用できないと考えられる。0度と60度と120度を組み合わせた場合は、六角形を結像した。60度と120度を組み合わせた場合に結像した六角形と比較して、像の輪郭が不明瞭であった。しかし、通常のグレーティングの検討でピッチを変更することで結像位置を変更することがわかったため、ピッチの変更や観察位置の変更を行うことで像を明瞭にすることは可能であると考えられる。六角形の像は光集積回路内の部品とは形状が似ていないため、明瞭にした場合、画像認識に適していると考えられる。

フレネルレンズを応用したグレーティングで計算を行った際、通常のグレーティングと比較して、回折像の広がりが小さくなり、像がまとまっているように見えた。これを前述の45度回転の正方形や六角形に応用することで、回折光の広がりを抑え、より明瞭な図形を結像することが出来ると考えられる。