

成果報告書

研究テーマ名：高効率高分散回折格子の開発

1. 業務の実績

(1)業務の実施日程

| 業務項目 | 実 施 日 程 | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|---------|----|-----|----|-----|--------|-----|--------|-----|--------|----|--------|----|
| | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | |
| 液晶回折格子の試作 | | | | | | ← 試作 → | | ← 評価 → | | | | | |
| フォトレジスト回折格子の試作 | | | | | ← | 試作 | および | 評価 | | | | → | |
| Si, Ge切削加工実験 | | | ウエハ | ← | および | 工具調 | 達 | | | | 実験 | および | 評価 |
| Quasi-Bragg immersion gratingの試作 | | | | | | | | | | ← 試作 → | | ← 評価 → | |

(2)業務の成果の説明

a) Birefringence Bragg Binary (3B) gratingの機能実証

液晶の複屈折性を利用した3B gratingをシチズンホールディングスとの共同研究によって試作した。液晶を充填する Volume binary grating は市販されている格子周期： $2\mu\text{m}$ 、格子の溝の幅と深さが $1\mu\text{m}$ のナノインプリント製品（JST A-Step 探索タイプ予算で購入）を使用した。試作した液晶回折格子は格子ベクトル方向に配向処理を施したにも関わらず、格子ベクトル方向から $\pm 20\sim 30^\circ$ 方向に液晶が大きなモザイク状に配向した（図1）。国立天文台先端技術センターの分光光度計を用いて回折効率を測定したところ、図2のように液晶の配向方向とほぼ垂直方向の効率が高いことが分った。なお、設計通り格子ベクトル方向に液晶が配向した場合に、S偏光の効率が0%、P偏光の効率が450nmにおいて20~30%になると見積もられている。また、透明電極に電圧を印可することにより、液晶と矩形格子の樹脂の屈折率がほぼ一致するために素通しの窓になることを確認した。

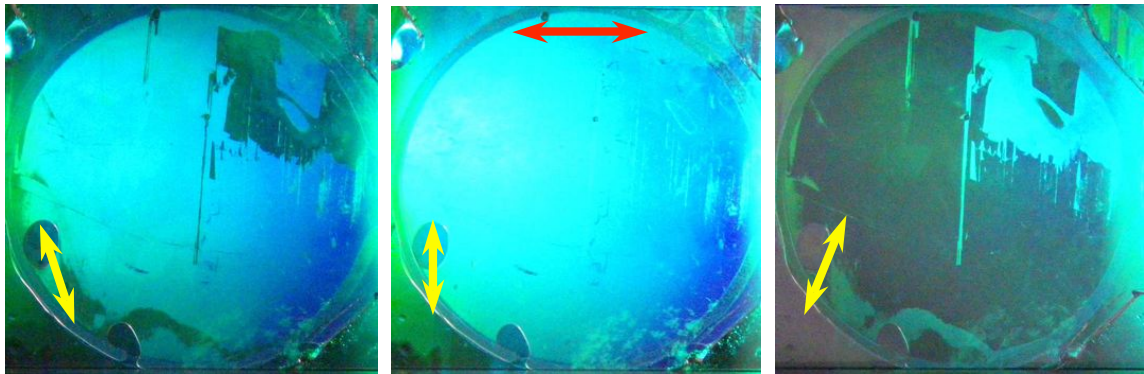


図1 液晶回折格子（Birefringence Bragg Binary (3B) grating）の1次回折光の偏光イメージ。
赤い矢印は格子ベクトル（溝の長手方向と垂直、基板表面に水平）、黄色い矢印は偏光方位。

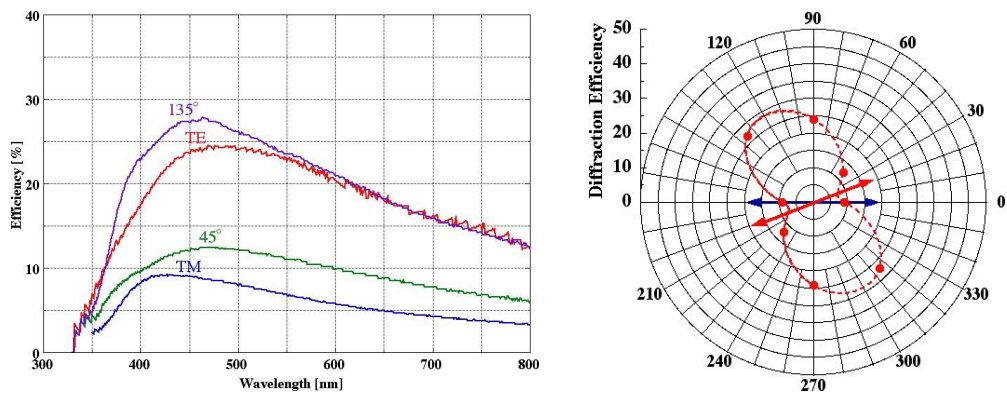


図2 液晶回折格子の偏光回折効率。右は最大効率の曲座標表示。青い矢印は格子ベクトル方位、赤い矢印は液晶の配向方位、赤い破線は測定値を補完した曲線。

また、液晶を注入する深い溝の矩形回折格子や異方性結晶材料の異方性エッチング用レジストとして、豊田工業大学ナノテクプラットホームの設備を利用してフォトレジストの矩形回折格子を試作した。当初、格子周期2, 3, 4 μm の3種類、ラインアンドスペース (L&S) 1:1の格子が1枚に描画されたマスクを借りて溝の深さが5~10 μm 程度の矩形格子の試作を行った。しかし、溝が基板まで到達しない場合 (図3左) や基板との密着性が悪くて格子が倒れてしまい、最適条件な加工を見出すことが困難であった。そこで、レジストのカタログの製作例と比較するために格子周期20 μm 、L&S 1:1のマスクを用いて溝の深さが100 μm 程度の矩形格子を試作した。図3右はマスクの一部を遮光して試作した格子周期20 μm の矩形回折格子の走査型電子顕微鏡写真である。基板を30°傾けて撮影したため、投影された溝の距離46.7mmから溝の深さは $46.7/\sin 30^\circ = 93 \mu\text{m}$ であることが分った。カタログの製作例と比較すると溝の側面に多少のうねりが生じていることがわかった。現在、格子周期やうねりの影響、レジストの吸収や散乱等を評価するための光学計測用に10×10~20×20 [mm]程度のサイズの格子周期20 μm の矩形回折格子を試作中である。

b) 階段状格子の Immersion grating

最近10年の単結晶ダイヤモンド工具の進歩が目覚ましく、高精度で摩耗の少ないエンドミルやバイトが比較的安価で入手できるようになった。単結晶ダイヤモンド工具による階段状格子の Immersion grating の形状精度や加工時間を評価するために理化学研究所 先端光学素子開発チームとの共同研究により最新の単結晶ダイヤモンドエンドミル (図4左) やVバイト (図4中央、図4右のように負のすくい角=刃先に微小な面取りが施されている) をナノメートル精度の超精密加工機に取付けて、ゲルマニウムやシリコン基板にV溝の切削加工を行った。

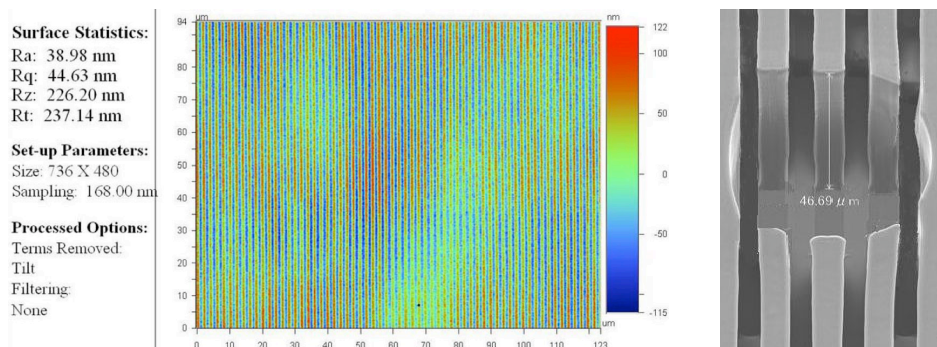


図3 フォトレジストの高アスペクト矩形格子の顕微干涉計測定 (左) と電子顕微鏡写真 (右)。左: 格子周期2 μm 、L&S 1:1。溝が深いために正確な深さの測定は困難。右: 格子周期20 μm 、L&S 1:1、溝の深さ93 μm 。中央の穴はレジストの厚さ (溝の深さ) を測定するためのマスク遮蔽部。

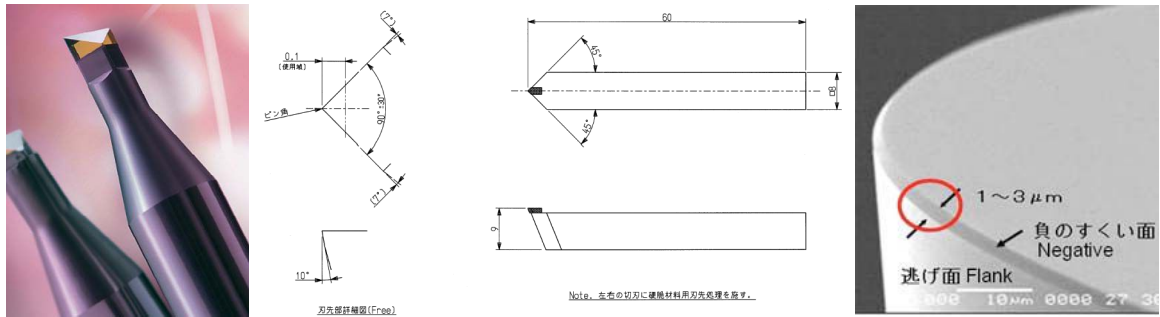


図4 単結晶ダイヤモンドのエンドミル (左) とバイト (中央、右)。中央の図面は今回の加工実験に用いたダイヤモンドバイト。右の電子顕微鏡写真はRバイトの先端部分。

試験加工の結果、先行研究において塑性加工モードの上限値とされている切り込み量 $0.2\mu\text{m}$ において単結晶ダイヤモンドのエンドミル (単刃、図5左) とVバイトのいずれの場合においてもゲルマニウムとシリコンのいずれも良好な表面粗さが得られることが分った。さらに切り込み量 0.5 、 1.0 、 $2.0\mu\text{m}$ においてはゲルマニウム (図5中央) とシリコン (図5右) のいずれも脆性加工モードになり、切り込み量が大きいくほど表面粗さが大きくなるが、意外なことに硬度が大きいシリコンよりゲルマニウムの表面粗さの方が大きく、チッピングも多い傾向が見られた。ただし、シリコンとゲルマニウム基板表面の結晶面が異なるためにその影響を調査する必要がある。近日中にレーザ顕微鏡や電子顕微鏡による表面粗さや断面形状の測定を行う予定である。

単結晶ダイヤモンド工具はダイヤモンド砥石等と比較した場合に切り込み量が小さいために大面積にサブミリオダの構造を加工するには不向きである。そのため、階段形状のImmersion gratingの製作方法として切削により大まかな溝形状を加工して、単結晶ダイヤモンド工具を溝の底面および側面の仕上げ加工に利用すると有効であることが分った。

c) Quasi-Bragg immersion grating

Quasi-Bragg immersion gratingとはプリズムの斜面に傾いた深い溝の格子を配置し、溝の側面において全反射によって光束を斜面に垂直に導き、斜面において正反射して、溝の側面で再び全反射する新しい回折格子である。Quasi-Bragg immersion gratingの製作方法として当初の計画では超精密加工機にダイシングソーを取付けて傾いた深い溝の格子の加工を行う方法を検討していた。しかし、NTT-AT社との打合せによって、金属を両面に蒸着したガラス等の基板を積層した後に加熱して融着する方法が有望であることが分ったため、まずは透過型のQuasi-Bragg gratingを試作することになった。今回試作した2個のQuasi-Bragg gratingについてレーザ光を用いて回折光を観察したところ、1個は不完全ながら高次の回折格子として機能することが分った (図6 左)。

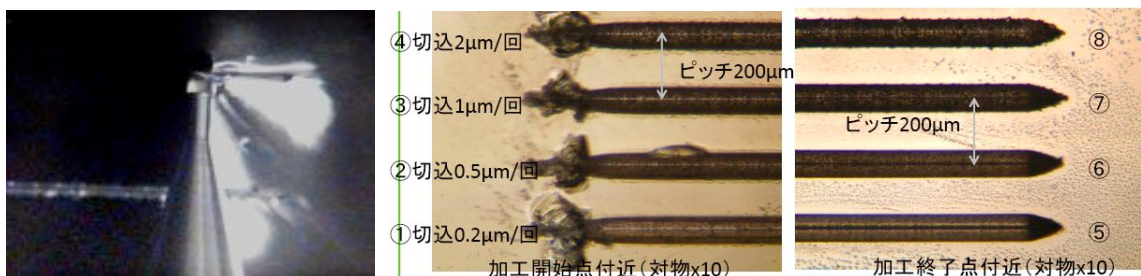


図5 単結晶ダイヤモンド エンドミルによるシリコン基板の切削 (フライカット) 加工 (左)。中央上部が加工部分、その右と下方の直線部分が加工済みの溝。単結晶ダイヤモンド Vバイトによって切削 (シェーブ) 加工されたゲルマニウム (中央) とシリコン (右) 基板。

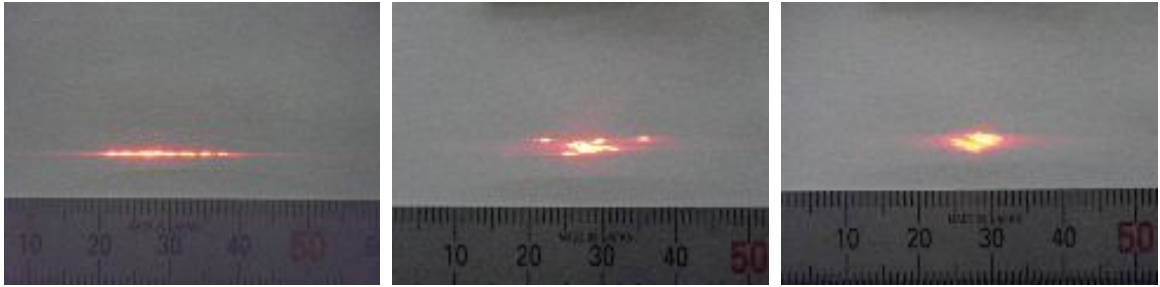


図6 試作したQuasi-Bragg gratingの回折光 (Far-field image)。左と中央は金属を両面に蒸着した $t0.3\text{mm}$ のガラス基板の積層、右は片面に金属を蒸着した $t0.2$ の基板を直径 $10\mu\text{m}$ のガラスビーズを混入した接着剤により積層。いずれも入射および回折角 (准ブラッグ角) は 45° 。

他の1個は多少の周期性は見られるが、可視光の回折格子としては機能しない精度であった (図6中央)。なお、以前に試作した片面に金属を蒸着した基板をスペーサとしてガラスビーズを混入した接着剤により積層したQuasi-Bragg gratingには周期性が見られず可視光の回折格子としては全く機能しない精度であった (図6右)。

d) その他、矩形回折格子の偏光回折効率の分光測定、VPH gratingのゴースト観察

2回目の液晶回折格子 (3B grating) の試作用に購入した格子周期： $2\mu\text{m}$ 、L&S 1:1、格子の深さが $2\mu\text{m}$ のVolume binary gratingのナノインプリント製品の偏光回折効率の分光特性を測定した。その結果、S偏光、P偏光ともに $1,550\text{nm}$ (ブラッグ角= 22.8°) において回折効率が90%程度、半値幅が約 $1,000\text{nm}$ (半値波長： $1150, 2150\text{nm}$) であることが分った。このことは先行研究において指摘されているように矩形回折格子がVPH gratingと同様に従来の階段形状の表面刻線型回折格子 ($1,550\text{nm}$ において160本/mm、入射角+回折角 $\sim 14^\circ$ より高分散では効率が低下) より高分散においても効率が高く、VPH gratingの数倍の帯域幅を達成できることを確認した。

3B gratingとの比較および、すばる望遠鏡の観測装置等に新規製作するグリズムの評価用として3種類のVPH (volume phase holographic) grating (Wasatch Photonics製) を購入した。これらのVPH gratingをQuasi-Bragg gratingと同様にレーザ光を用いて回折光を観察した結果、いずれも我々がFOCASやMOIRCS用に製作したVPH gratingと比べてゴーストが多いことが分った。特にHDタイプと称するブラッグ角 45° のVPH gratingは分散とは垂直の方向に明瞭で明るいコーストが上下に2個現れ、分散方向に少し離れて垂直に等間隔に4個のゴーストが確認できる。なお、これらのVPH gratingの偏光回折効率等の測定を近日中に行う予定である。

使用実績報告書

1. 総括表

| 区分 | 費目 | 予算額(円) | 決算額(円) | 委託費の 充当額(円) | 備考 |
|----|--------|--------|--------|----------------|----|
| 支出 | 設備備品費 | 0 | 0 | 0 | |
| | 消耗品費 | 800千 | 650千 | 0 | |
| | 人件費 | 0 | 0 | 0 | |
| | その他の経費 | 1,200千 | 1,380千 | 0 | |
| | 合計 | 2,000千 | 2,030千 | 0 | |
| 収入 | 委託費の額 | 2,000千 | 2,030千 | | |
| | 自己調達額 | 0 | 0 | | |
| | その他 | 0 | 0 | | |
| | 合計 | 2,000千 | 2,030千 | | |

2. 決算費目別内訳

(A)支出

a 設備備品費

| 種別 | 仕様 | 数量 | 単価 (円) | 金額 (円) | 発注年月日 | 引取年月日 | 支払年月日 | 備考 |
|------|----|----|-----------|-----------|-------|-------|-------|----|
| 該当なし | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| 計 | | | | | | | | |

b 消耗品費

| 種別 | 仕様 | 数量 | 金額(円) | 納品年月日 | 備考 |
|-----------------|---------------------|-----|---------|-------------|----|
| 平面鏡回転機構 | 回折格子分光計測ユニット用 | 1 式 | 98,070 | 2013年 6月20日 | |
| ゲルマニウムウエハー | φ76×t0.97→20×20カット | 2 式 | 49,350 | 2013年 7月20日 | |
| シリコンウエハー | φ100×t0.5→20×20カット | 2 式 | 27,300 | 2013年 7月20日 | |
| 単結晶ダイヤモンドエンドミル | 刃径:0.5, 刃長:0.25 | 1 個 | 105,840 | 2013年 8月 2日 | |
| 単結晶ダイヤモンドバイト | 刃先: V90°、□8×60 | 1 個 | 131,250 | 2013年 9月20日 | |
| レーザー防護メガネ、ホルダー類 | YAGレーザー用 | 1 式 | 81,738 | 2013年10月31日 | |
| VPH grating | φ25, 600, 1145 L/mm | 2 個 | 99,991 | 2013年11月20日 | |
| VPH grating | φ25, 1624 L/mm | 1 個 | 56,490 | 2014年 1月21日 | |
| 計 | | | 650,029 | | |

c 人件費

| 種 別 | 摘 要 | 金 額 (円) | 支払年月日 | 備 考 |
|------|-----|---------|-------|-----|
| 該当なし | | | | |
| | | | | |
| 計 | | | | |

d その他の経費

| 種 別 | 摘 要 | 数量 | 単 価 (円) | 金 額 (円) | 発注年月日 | 引取年月日 | 支払年月日 | 備 考 |
|--------|----------------------------|-----|------------|------------|-------------|--------------|-------|---------------------|
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹 | 1 | 36,500 | 36,500 | | 6/27, 28 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-和光市 | 1 | 25,140 | 25,140 | | 7/31 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹 | 1 | 53,500 | 53,500 | | 8/5-8 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、川口 | 1 | 34,200 | 34,200 | | 9/19-21 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-神田、三鷹 | 1 | 55,620 | 55,620 | | 10/15-18 | | TMTサイ エンス WS |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、和光市 | 1 | 53,940 | 53,940 | | 10/30-11/2 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、泉岳寺 | 1 | 33,690 | 33,690 | | 11/13-15 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-柴原 | 1 | 37,320 | 37,320 | | 11/18-20 | | 大阪大学 |
| 学会参加費 | | 1 | 7,000 | 7,000 | | | | 日本分光 学会 |
| 国内旅費 | 名古屋大学-浜松町、三鷹 | 1 | 34,200 | 34,200 | | 11/27-29 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、みなとみらい | 1 | 28,710 | 28,710 | | 12/4, 5 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、和光市 | 1 | 29,140 | 29,140 | | 12/11, 12 | | |
| 観測装置WS | 名古屋大学-出町柳 | 1 | 27,220 | 27,220 | | 12/17, 18 | | 観測装置 WS、京都 大学 |
| 国内旅費 | 名古屋大学-和光市、三鷹 | 1 | 39,580 | 39,580 | | 12/26-28, 30 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、和光市 | 1 | 20,890 | 20,890 | | 1/18, 20 | | 片道交通 費 |
| 国内旅費 | 和光市 | 1 | 2,620 | 2,620 | | 1/24 | | 交通費:す ばるWS |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、和光市 | 1 | 50,580 | 50,580 | | 2/3-7 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹 | 1 | 37,700 | 37,700 | | 2/18-21 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-三鷹、新所沢、和光市 | 1 | 38,690 | 38,690 | | 3/1, 3-5 | | |
| 国内旅費 | 名古屋大学-和光市、三鷹 | 1 | 34,340 | 34,340 | | 3/26-28 | | 概算 |
| | | | | | | | | |
| 外注費 | NTT-AT、Quasi-Bragg grating | 2 個 | 349,650 | 699,300 | 2013年12月 6日 | 2014年 2月10日 | | 消耗品と して処理 |
| 計 | | | | 1,380,150 | | | | |

(B)収入

| 種 別 | 摘 要 | 金 額 (円) | 備 考 |
|-----------|-----|---------|-----|
| 研 究 費 の 額 | | 2,030千 | |
| 自 己 調 達 額 | | 0 | |
| そ の 他 | | 0 | |
| 計 | | 2,030千 | |

(注) 委託業務の実施に際し、収入を得た場合や取引相手先からの納入遅延金が発生した場合には、収入の欄におけるその他に計上すること。