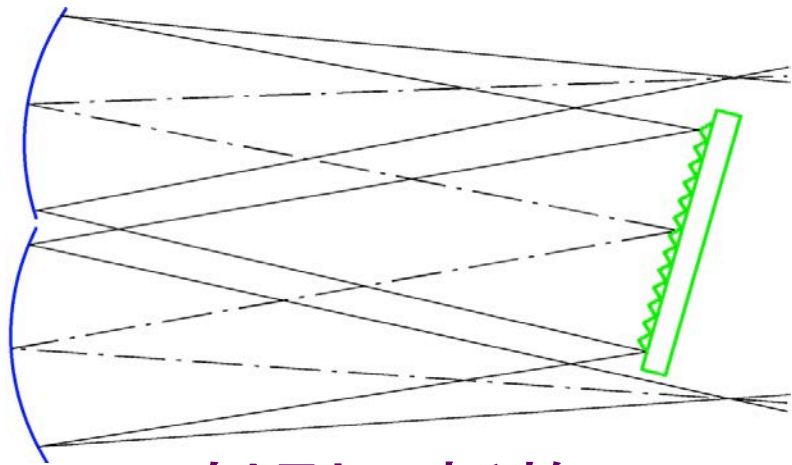


次世代観測装置用の新しい 回折格子の開発状況 IV

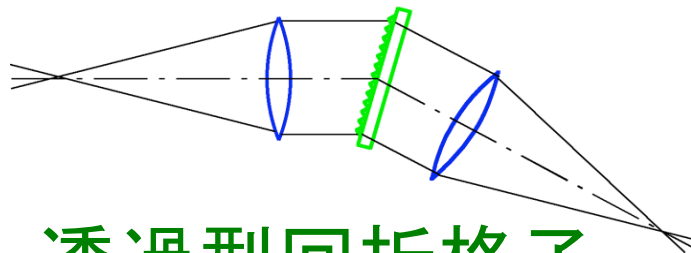
海老塚 昇¹, 岡本 隆之¹, 細畠 拓也¹, 山形 豊¹, 佐々木 実²,
魚本 幸³, 島津 武仁³, 佐藤 慎也⁴, 橋本 信幸⁴, 田中 壱⁵, 服部
堯⁵, 尾崎 忍夫⁵, 青木 和光⁵

¹理化学研究所, ²豊田工業大学, ³東北大学,
⁴シチズン時計, ⁵国立天文台

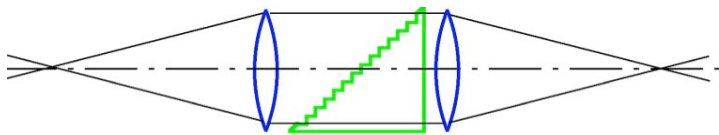
反射型と透過型の回折格子およびグリズム



反射型回折格子



透過型回折格子



グリズム

- X線からTHz波におよぶ電磁波に対して利用可能。
- 比較的安価。
- 明るい光学系ではリトロマウント*が困難。
- コリメータ等の光学素子を近接して置くことができる。
→分光観測装置を小型化できる。
- 完全なリトロマウント*に光学系を配置ができる。
- 光学系の直線的な配列が可能。

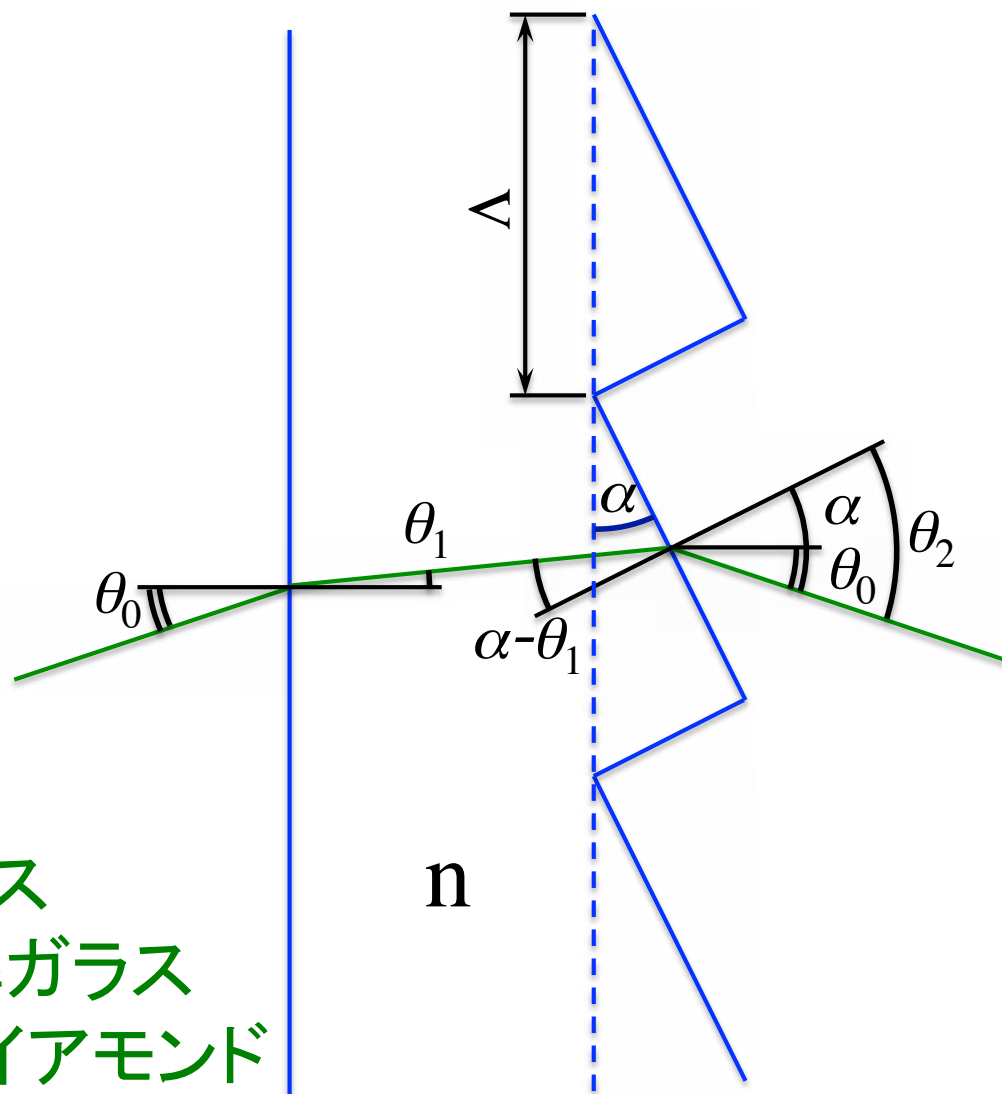
*リトロマウント: 入射角と回折角が等しく、入射と回折光束の断面形状が同一になる分光器の光学系配

表面刻線型回折格子の限界

$$\begin{aligned} \sin \theta_0 &= n \sin \theta_1 \\ n \sin(\alpha - \theta_1) &= \sin \theta_2 \\ \theta_2 &= \alpha + \theta_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n \sin(\alpha - \theta_1) &= \sin(\alpha + \theta_0) \\ n (\sin \alpha \cos \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \alpha) &= \sin \alpha \cos \theta_0 + \sin \theta_0 \cos \alpha \\ (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0) \sin \alpha &= (\sin \theta_0 + n \sin \theta_1) \cos \alpha \\ \tan \alpha &= 2 \sin \theta_0 / (n \cos \theta_1 - \cos \theta_0) \end{aligned}$$

$n = 1.5, \theta_0 \leq 29^\circ$ ($\theta_2 > 90^\circ$) 光学ガラス
 $n = 2.0, \theta_0 \leq 40^\circ$ (同上) 高屈折率ガラス
 $n = 2.5, \theta_0 \leq 48^\circ$ (同上) ZnSe, ダイヤモンド



従来のノコギリ歯形状の表面刻線型回折格子は大きな回折角 (α 角度分散) 用には使用できない。

Reflector Facet Transmission (RFT) Grating

$$\theta_1 = \alpha - \theta_0 \quad \dots (1)$$

$$\sin \theta_1 = n \sin \theta_2 \quad \dots (2)$$

$$R + \theta_2 + R - \theta_3 + \gamma = 2R$$

$$\theta_2 = \theta_3 - \gamma \quad \dots (3)$$

$$\theta_3 + \theta_4 + 2R - \beta = 2R$$

$$\theta_3 = \beta - \theta_4 \quad \dots (4)$$

$$n \sin \theta_4 = \sin \theta_0 \quad \dots (5)$$

格子内で反射した光束が入射した面と角度 ϕ で伝播する場合に θ_4 は

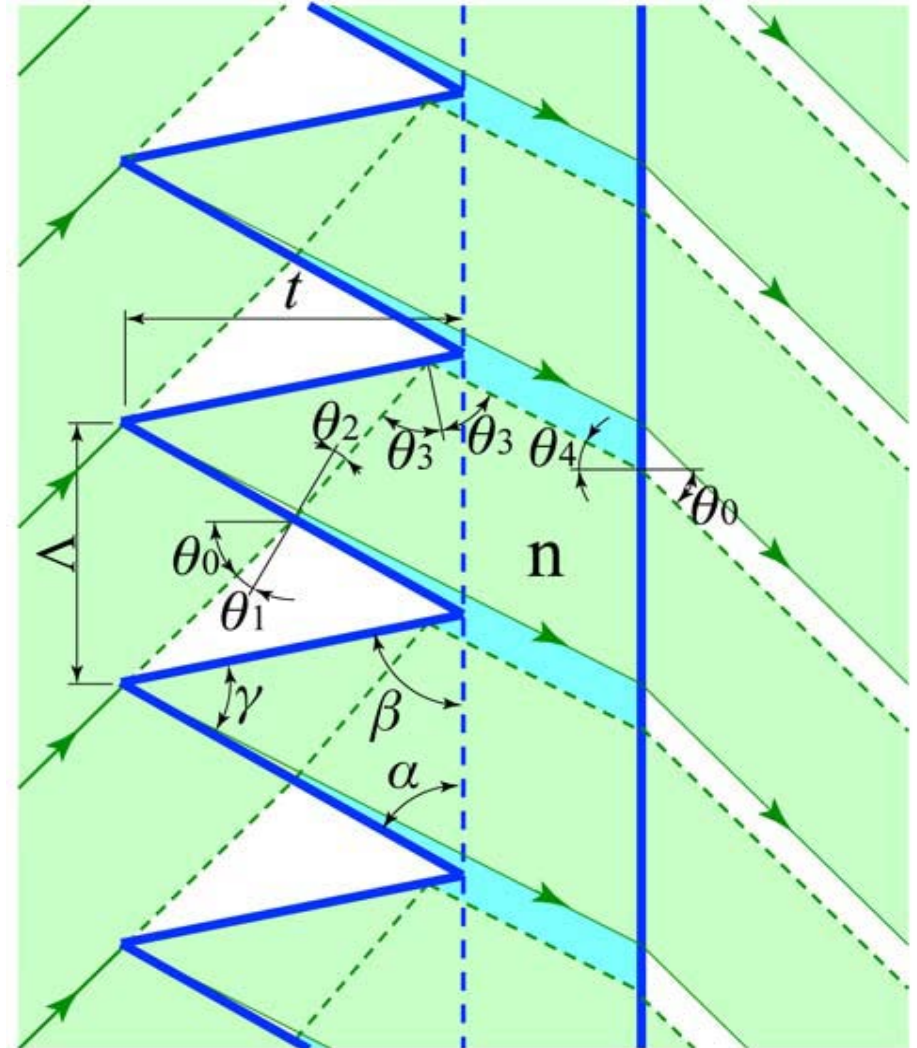
$$\theta_4 = R - \alpha - \phi,$$

$$\alpha = R - \theta_4 - \phi \quad \dots (7)$$

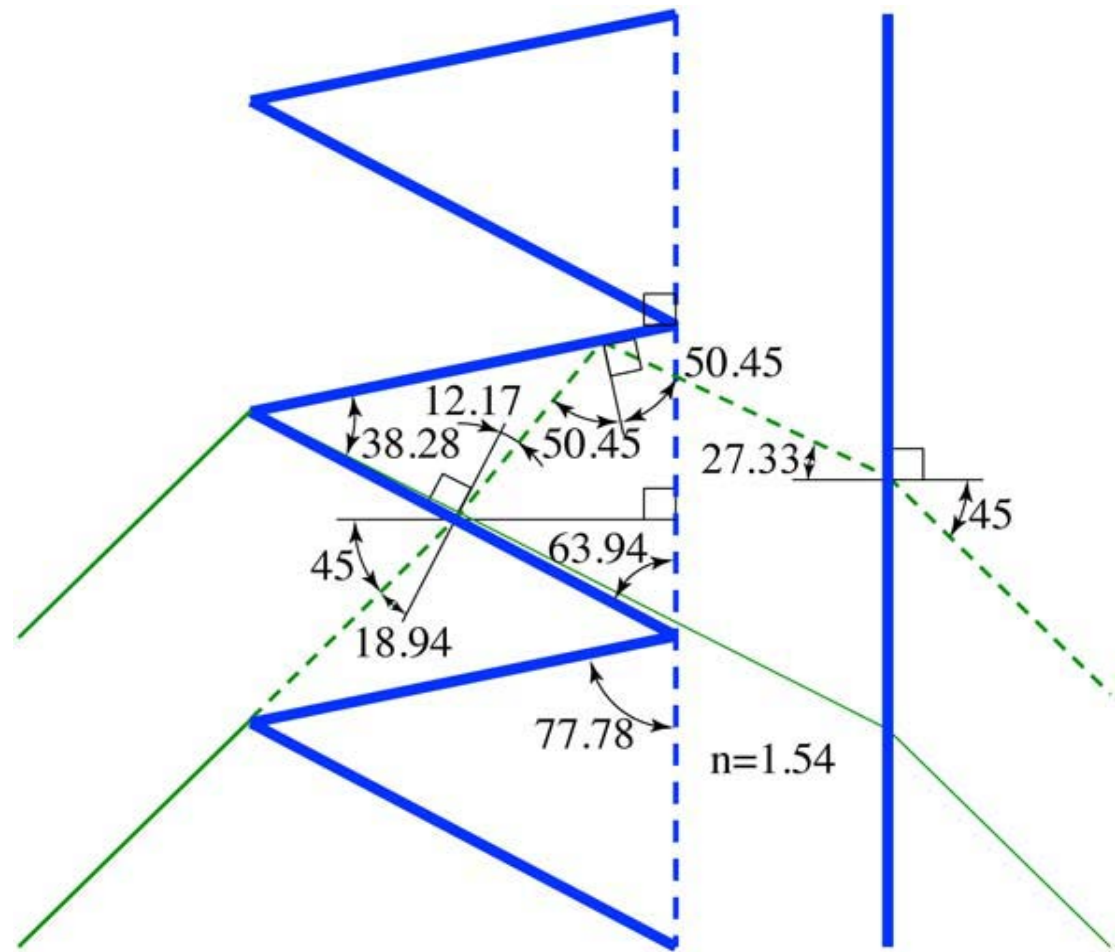
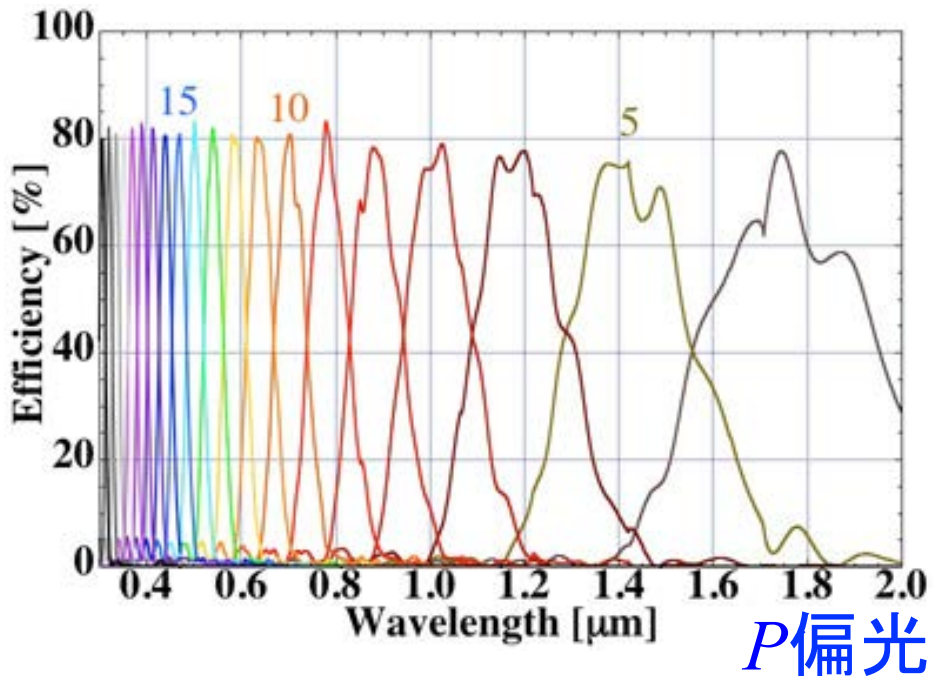
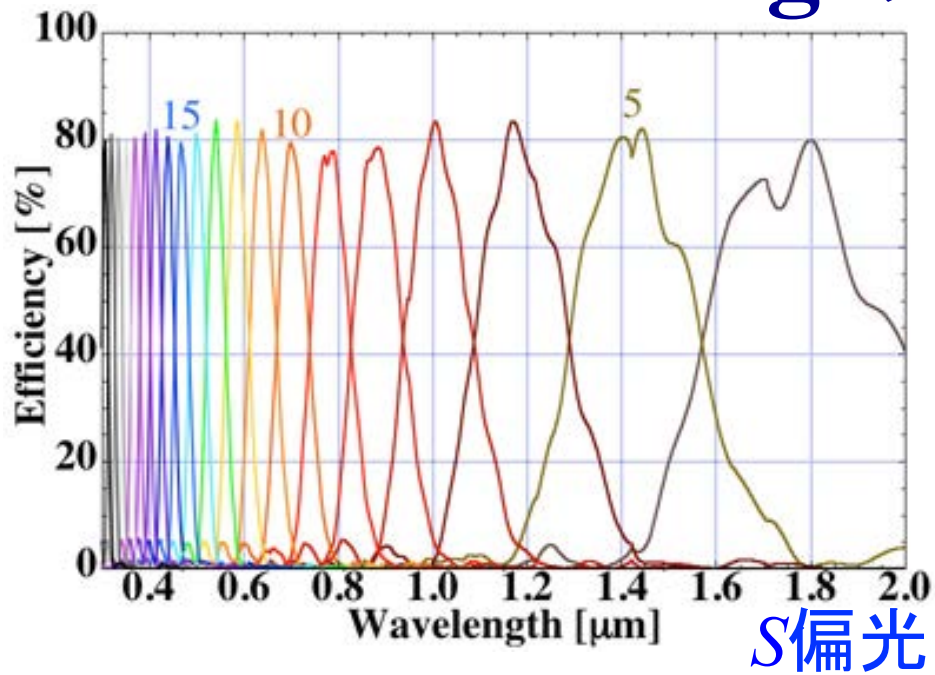
式3に式4および $\alpha + \gamma + \beta = 2R$ を代入すると

$$\theta_2 = \alpha + 2\beta - \theta_4 - 2R,$$

$$\beta = (\theta_2 + \theta_4 - \alpha) / 2 + R \quad \dots (6)$$

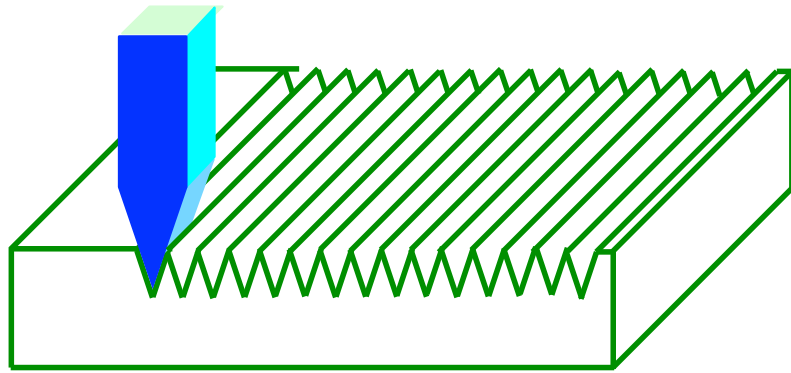


RFT Gratingの回折効率 (RCWA)



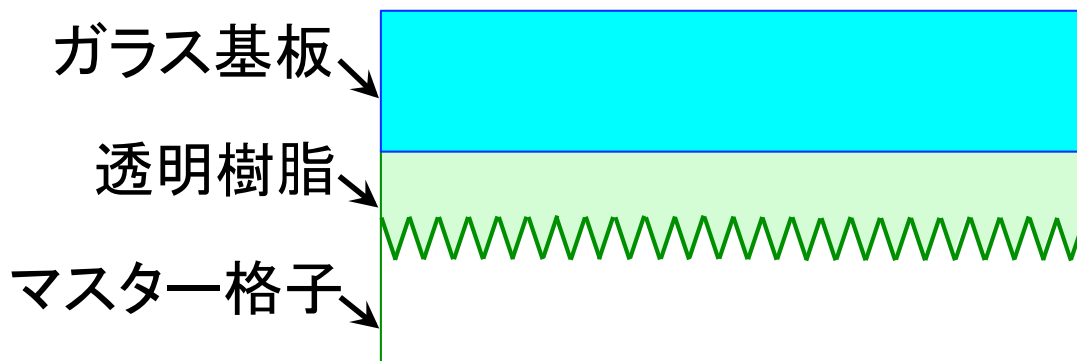
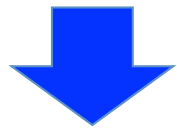
$\Lambda=5\mu\text{m}, \theta_0=45^\circ, n=1.54$

RFT Gratingの製作方法

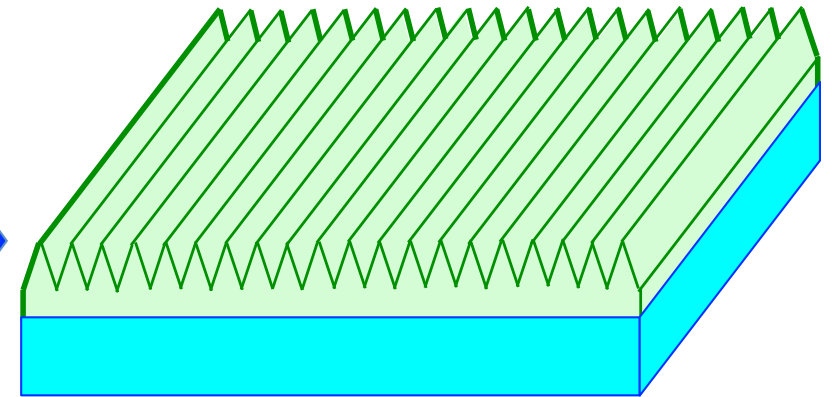
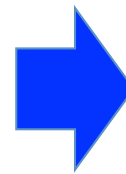


マスター格子(金型)の
シェーパー切削加工

ワークピース: 無電解Ni-P合金
ブレード角 : $\beta = 77\sim 79^\circ$
格子の頂角 : $\gamma = 35\sim 45^\circ$
格子周期 : $\Lambda = 2\sim 5 \mu\text{m}$

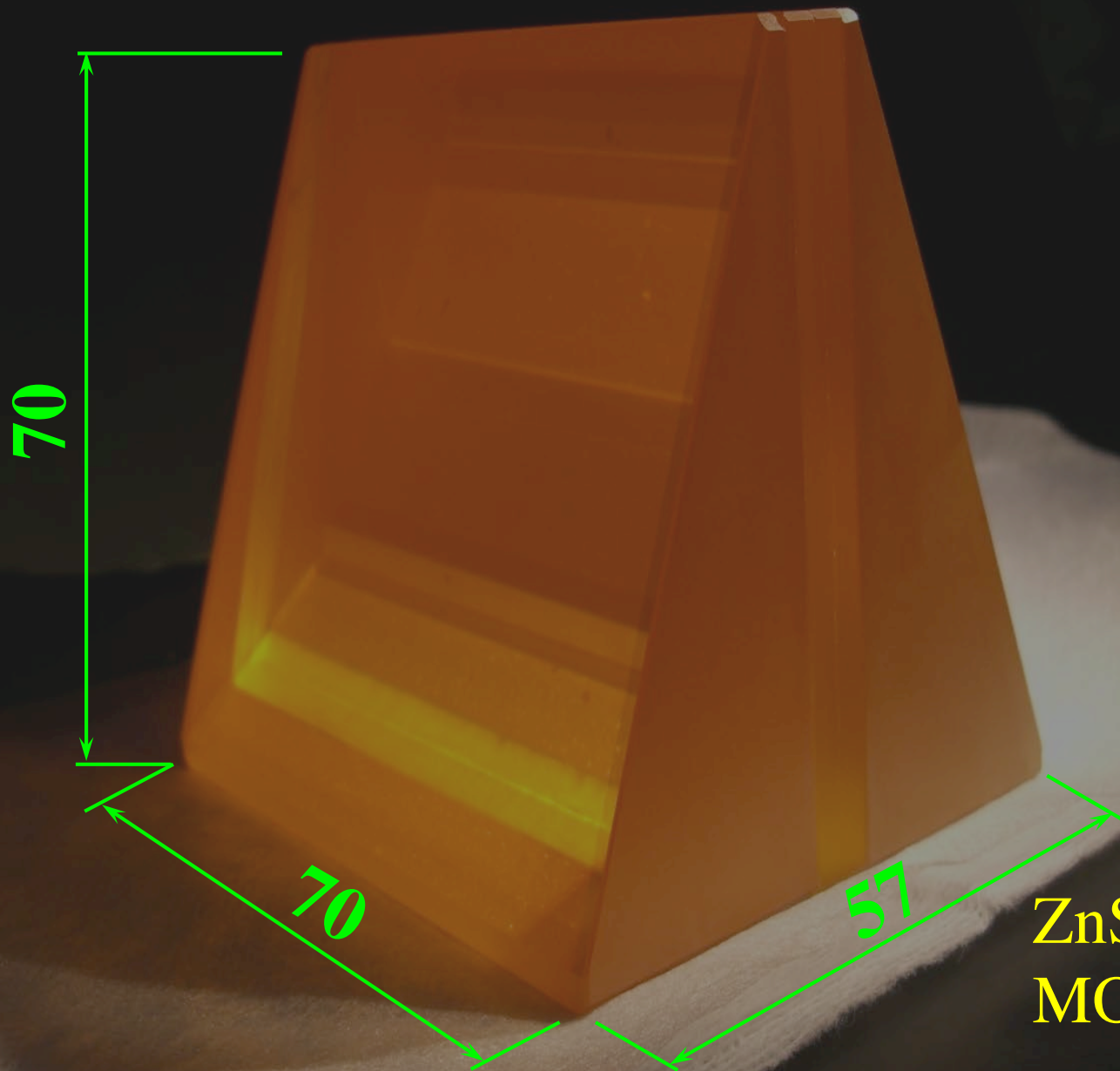


レプリカ加工



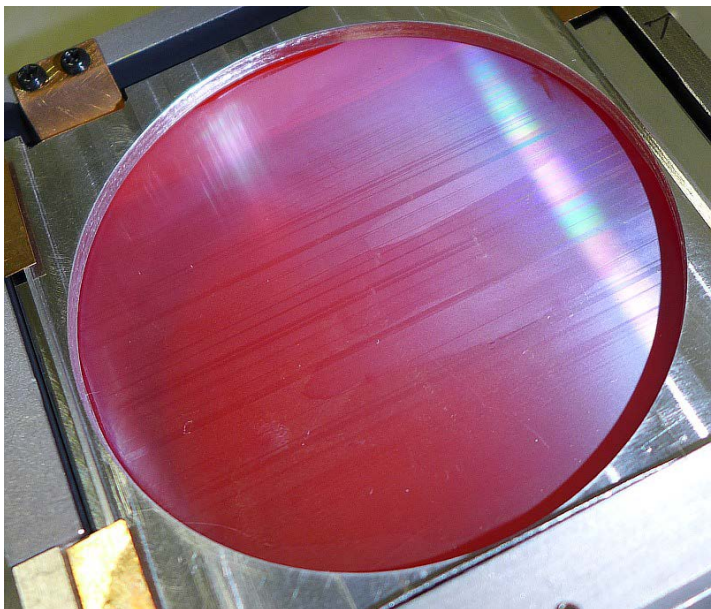
完成

MOIRCS用の新しいグリズム

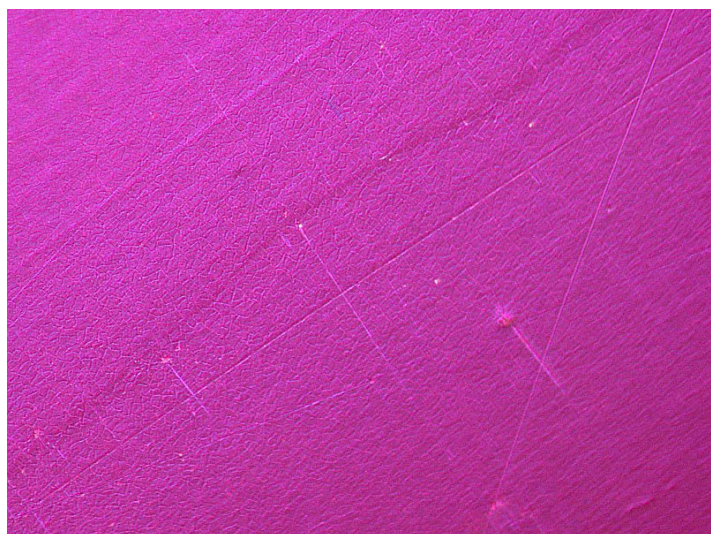


ZnSeプリズムの
MOIRS VPHグリズム

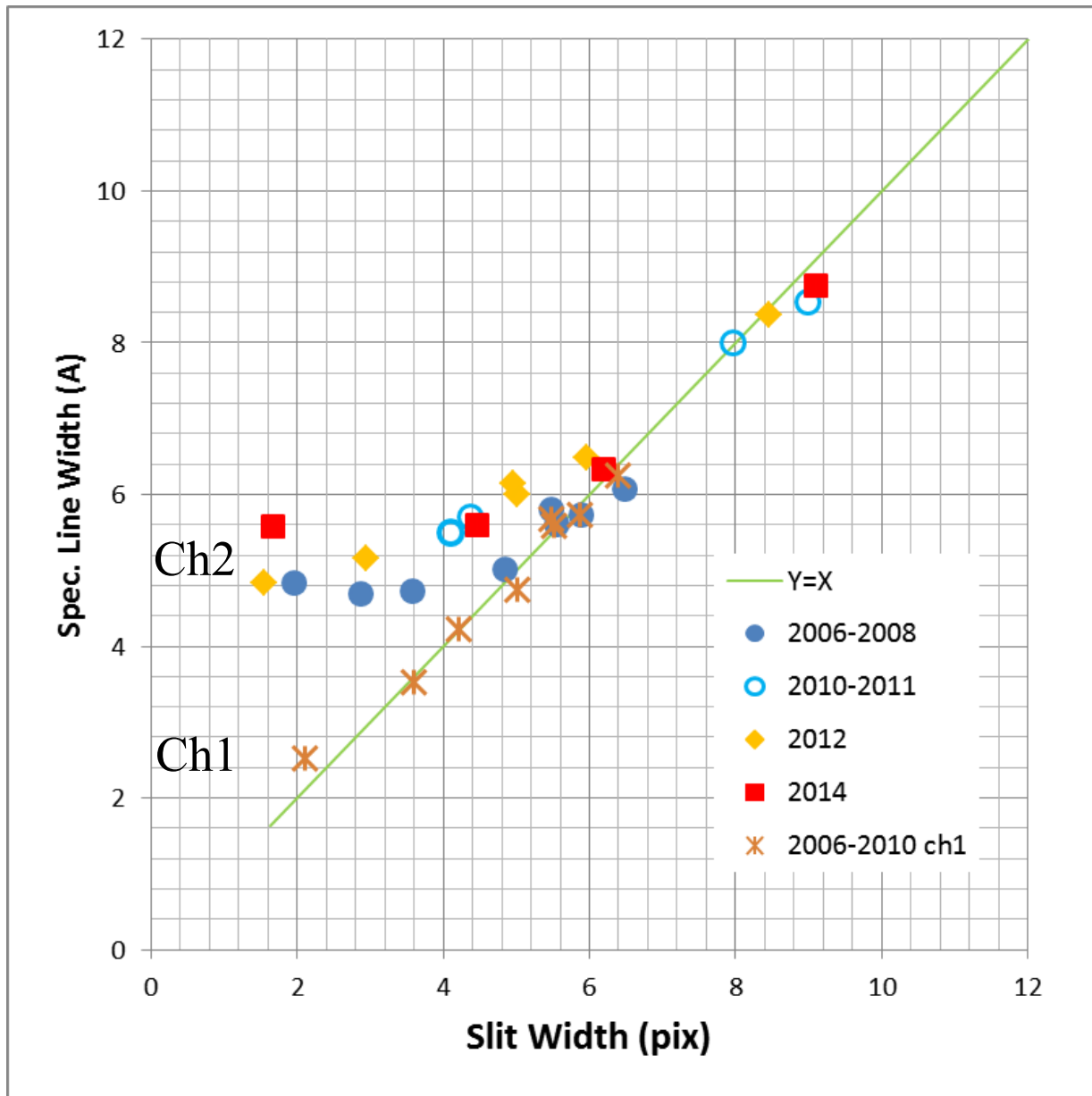
R1300 (KRS-5) グリズムの性能低下



Ch2のルーリング面



Ch2の裏面 (×200)

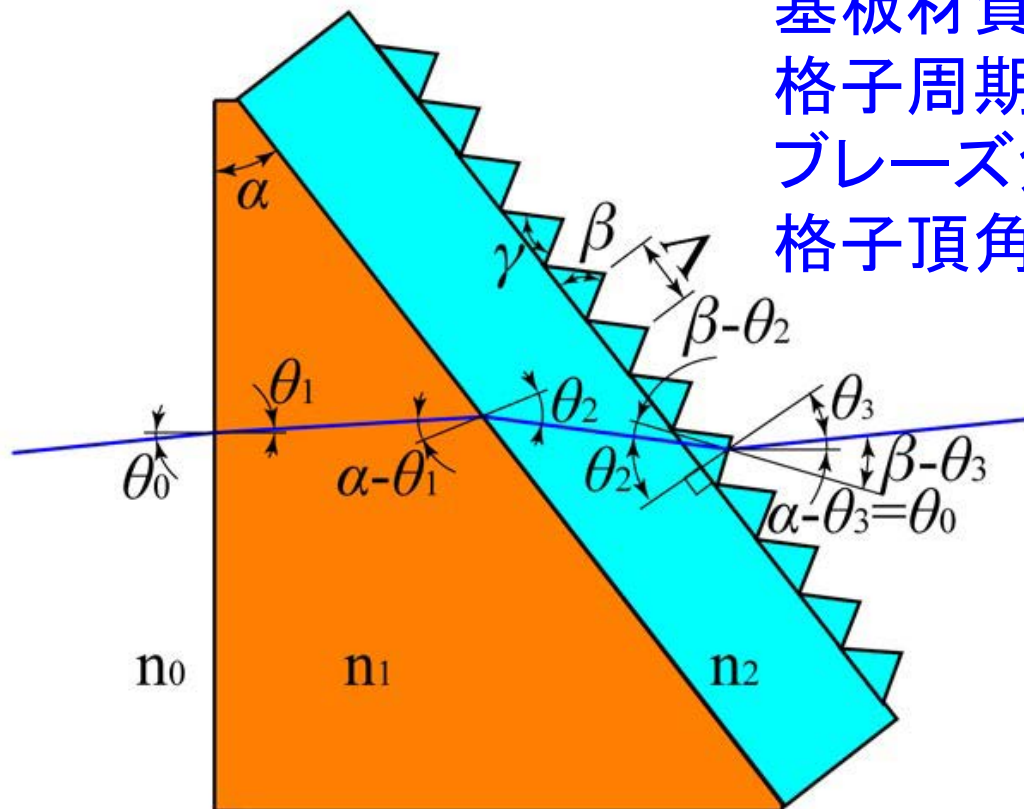


スペクトル幅の広がり

MOIRCS用ハイブリッド・グリズム

R1300グリズムは光学ガラス ($n < 1.8$) のプリズムでは分散が足りない。

外形寸法	: 70×70×54 [mm]
プリズム材質	: ZnSe ($n_1 = 2.4529 @ 1.65 \mu\text{m}$)
プリズム頂角	: $\alpha = 23.8^\circ$
入射角	: $\theta_0 = 5^\circ$
基板材質	: S-FPM3 ($n_2 = 1.5240 @ 1.65 \mu\text{m}$)
格子周期	: $\Lambda = 10.79 \mu\text{m}$ (92.68 grooves/mm)
ブレース角	: $\beta = 64.8^\circ$
格子頂角	: $\gamma = 61.8^\circ$



スリット幅: 0.585" → 0.3"

R = 1,487 → 2,900 @ 0.88 μm (z band)

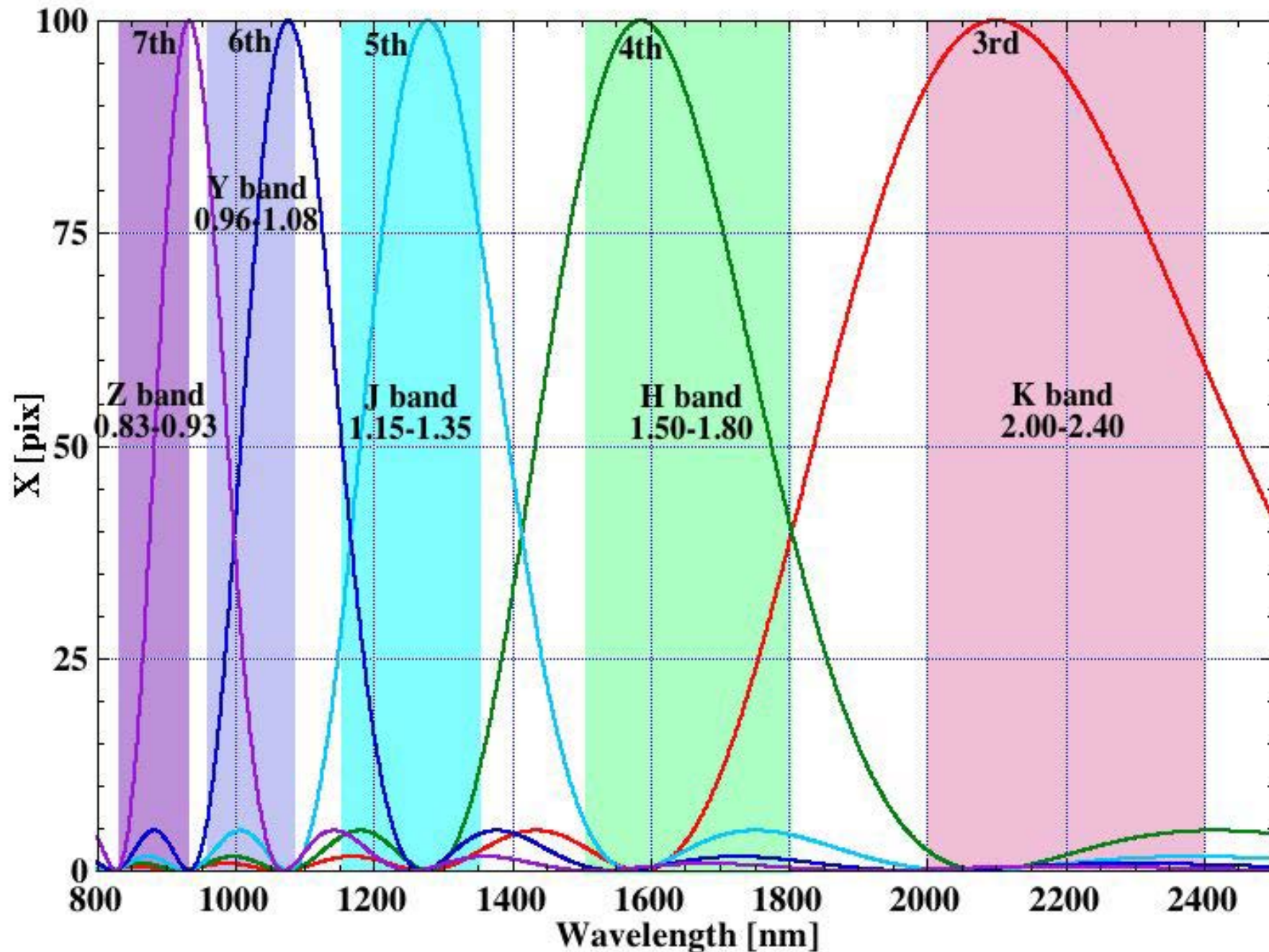
R = 1,431 → 2,790 @ 1.02 μm (Y band)

R = 1,408 → 2,750 @ 1.25 μm (J band)

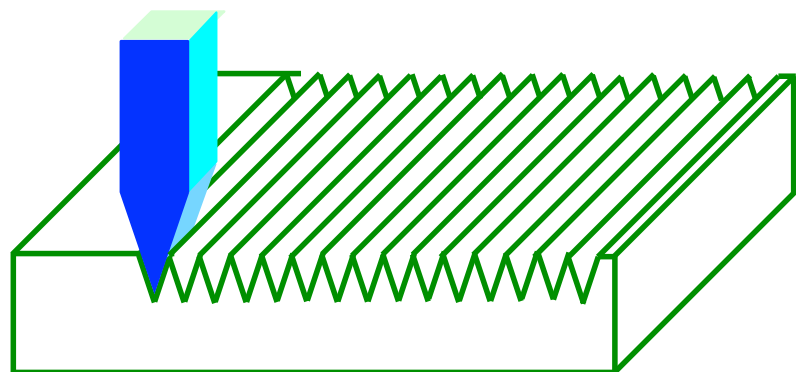
R = 1,434 → 2,800 @ 1.65 μm (H band)

R = 1,419 → 2,770 @ 2.20 μm (K band)

ハイブリッド・グリズムの回折効率(スカラー計算)

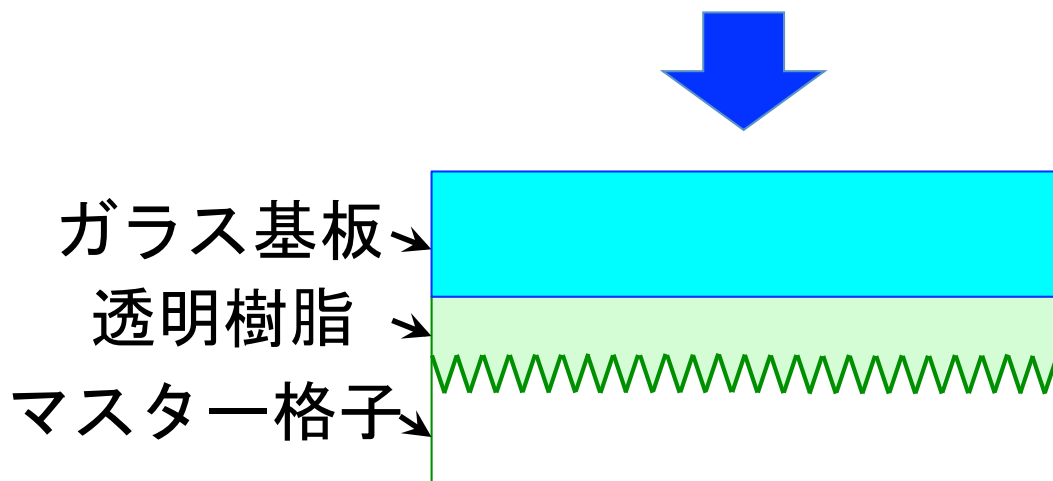


ハイブリッド・グリズム用回折格子の製作方法

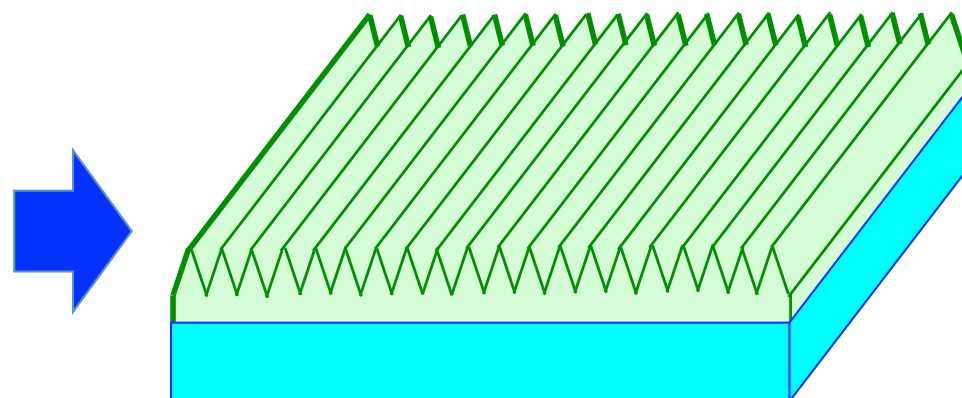


マスター格子(金型)の
シェーパー切削加工

ワークピース: 無電解Ni-P合金
ブレード角 : $\beta = 64.8^\circ$
格子の頂角 : $\gamma = 61.8^\circ$
格子周期 : $\Lambda = 10.79\mu\text{m}$

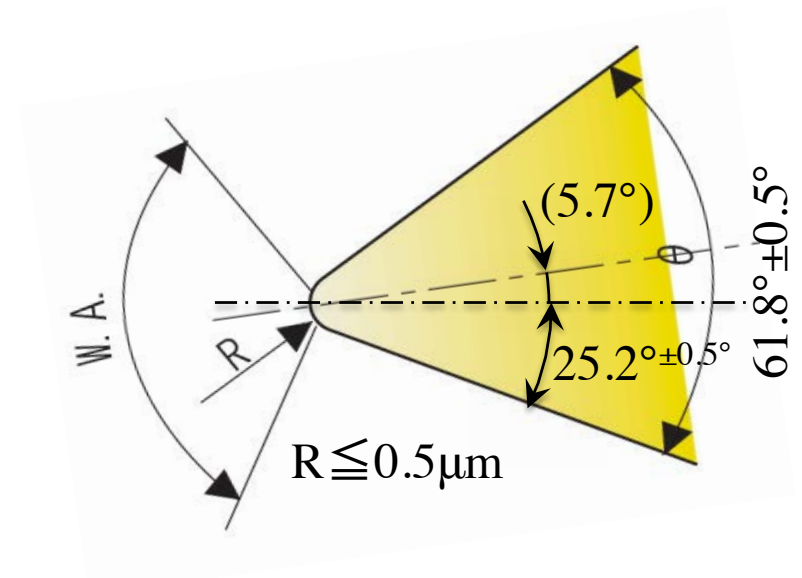
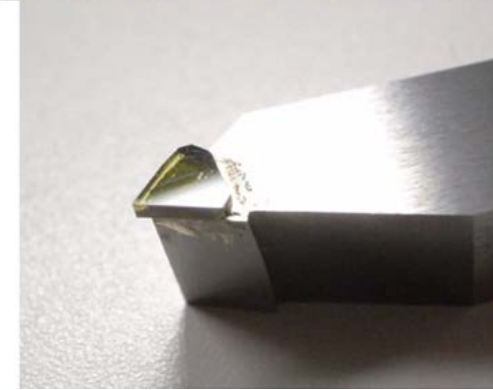


レプリカ加工

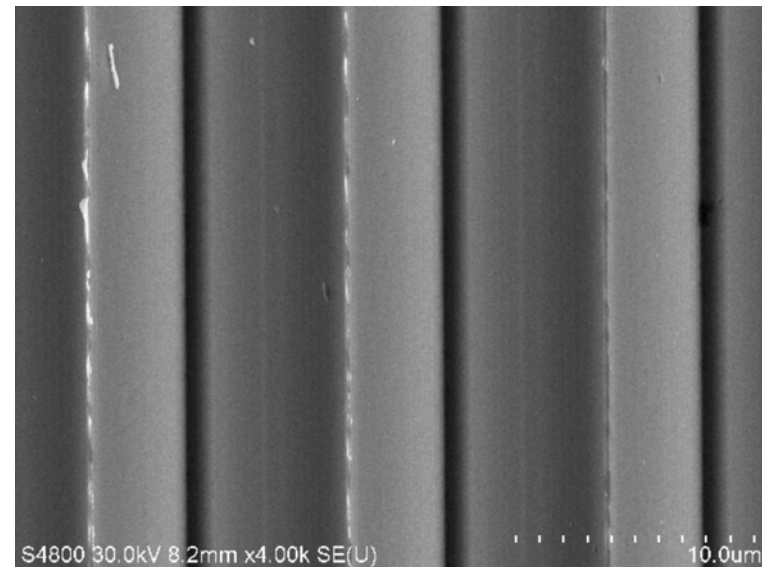
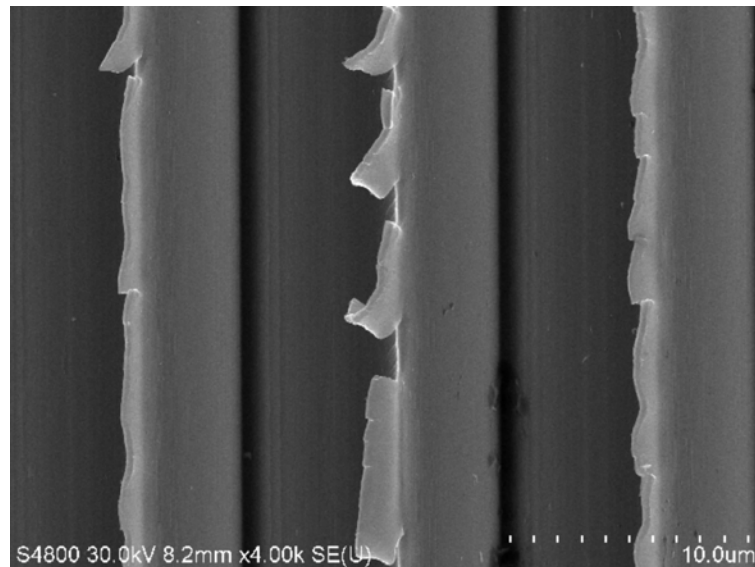
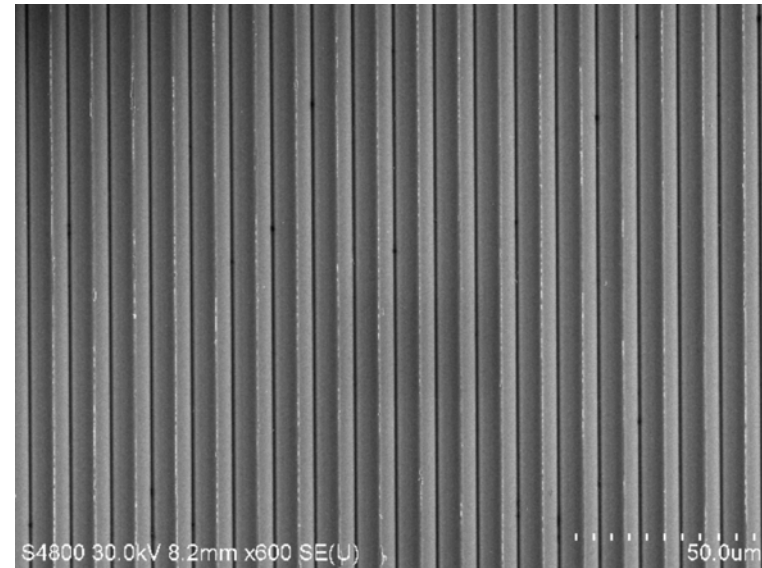
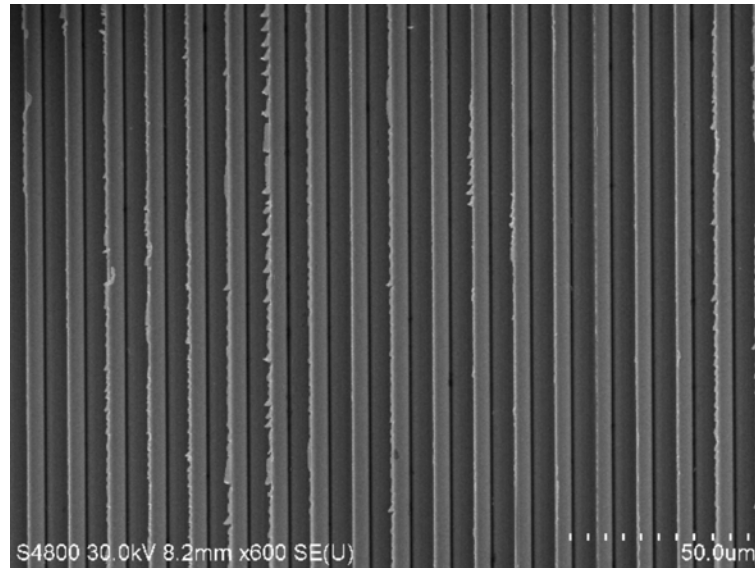


完成

マスター格子の試験加工 I

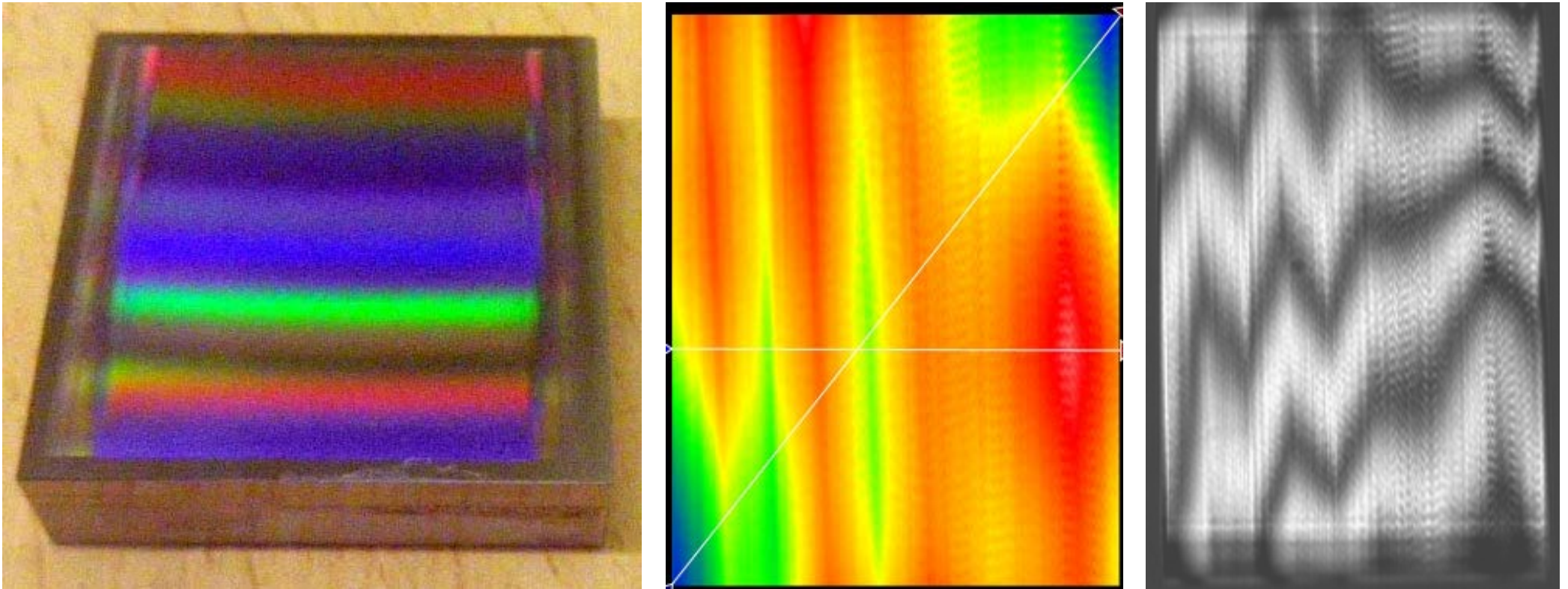


マスター格子 (Ni-P金型) 試験加工品のSEM写真



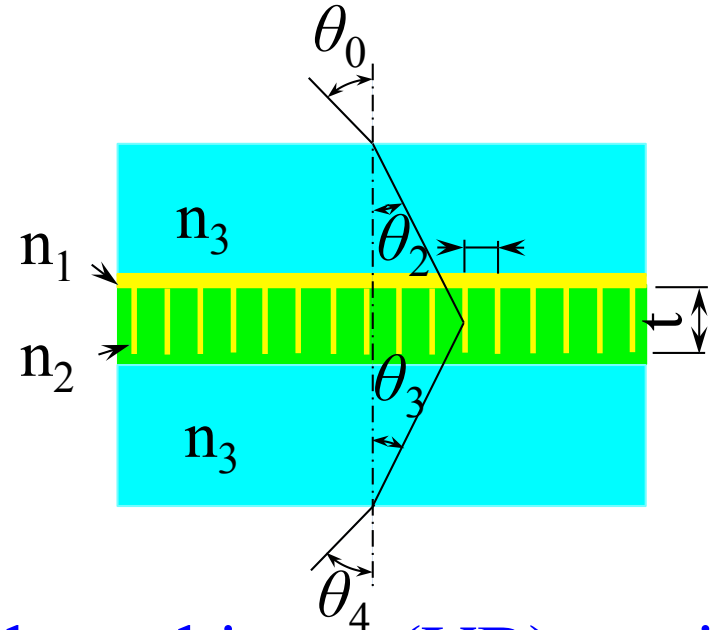
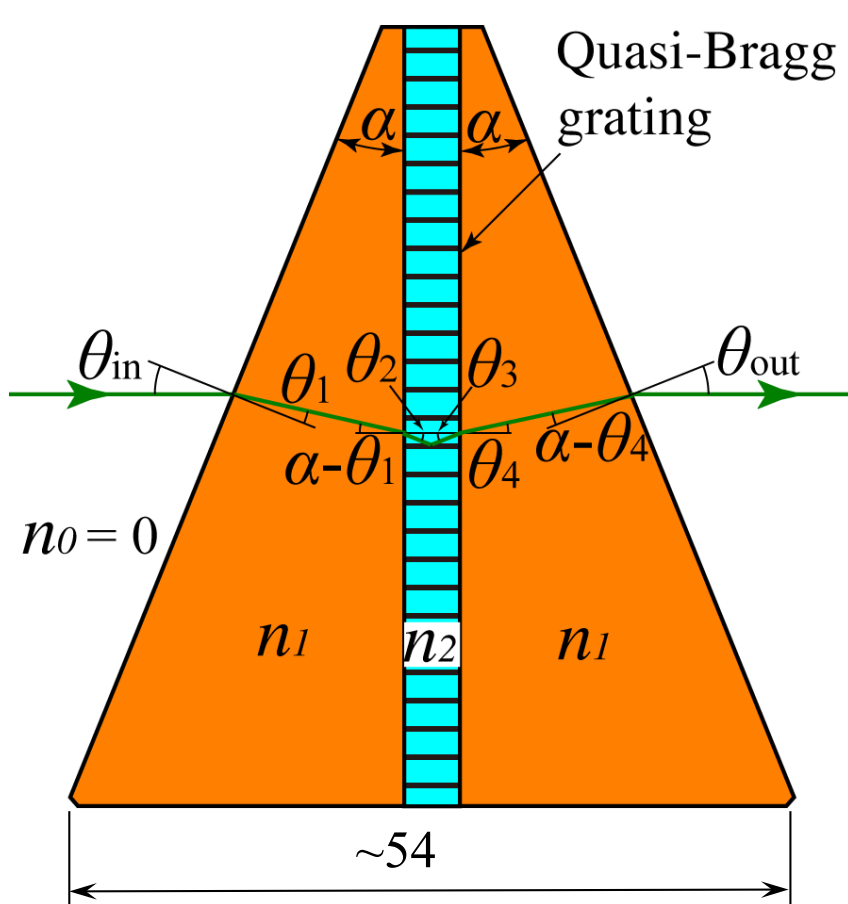
試験加工品のSEM写真。左:カエシ大。右:カエシ小、
50×50のレプリカ実験用サンプルの加工条件。

マスター格子の試験加工 II



レプリカ実験用金型50×50(左)。レプリカ実験用金型の波面、
PV:0.89 λ , RMS: 0.13 λ (中央、右)

MOIRCS用高分散エシェルグリズム



Volume binary (VB) grating
 $L \gg S$, $90 - \sin^{-1}(n_1 \sin \theta_0) > \sin^{-1}(n_0/n_1)$,
 Quasi-Bragg (QB) gratingとして機能する。

- 外形寸法 : 70×70×54 [mm]
- プリズム材質 : ZnSe
- プリズム頂角 : $\alpha = 18.5^\circ$
- 格子周期 : $\Lambda = 5.1 \mu\text{m}$ (196g/mm)

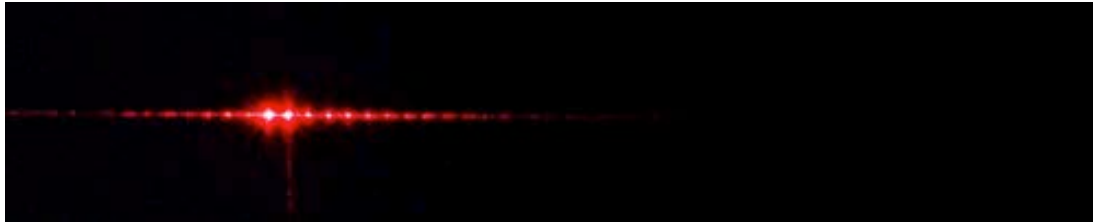
スリット幅: 0.3"

R= 4,630 @ 1.02 μm (Y band, 5次)

R= 4,420 @ 1.25 μm (J band, 4次)

R= 4,270 @ 1.65 μm (H band, 5次)

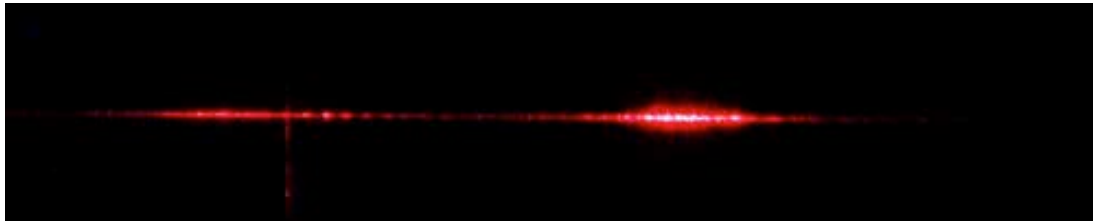
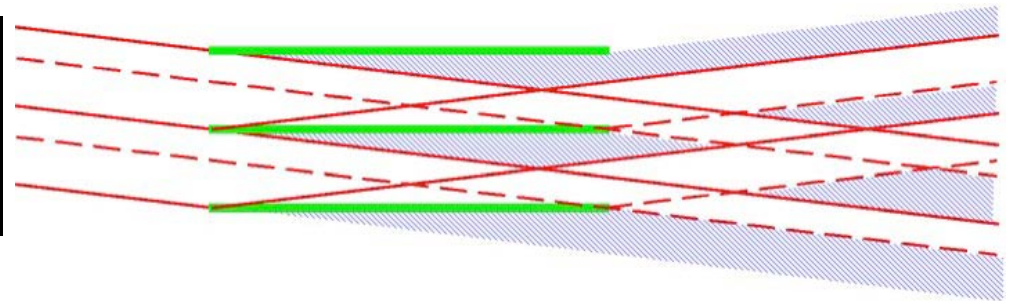
QB Gratingにおける光束の伝播



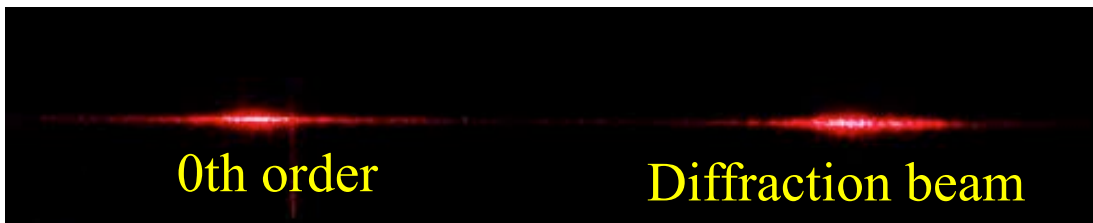
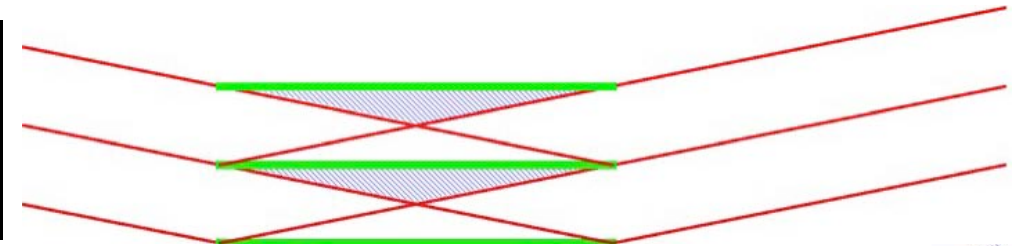
垂直入射



入射角小



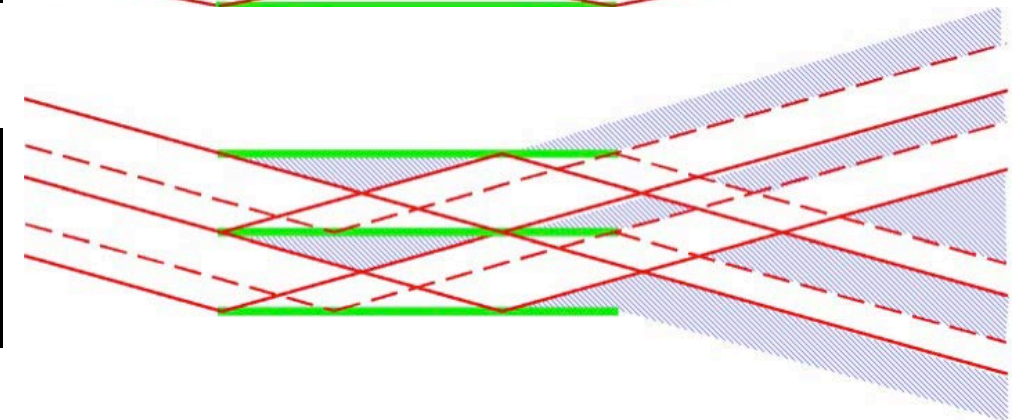
理想的な入射角



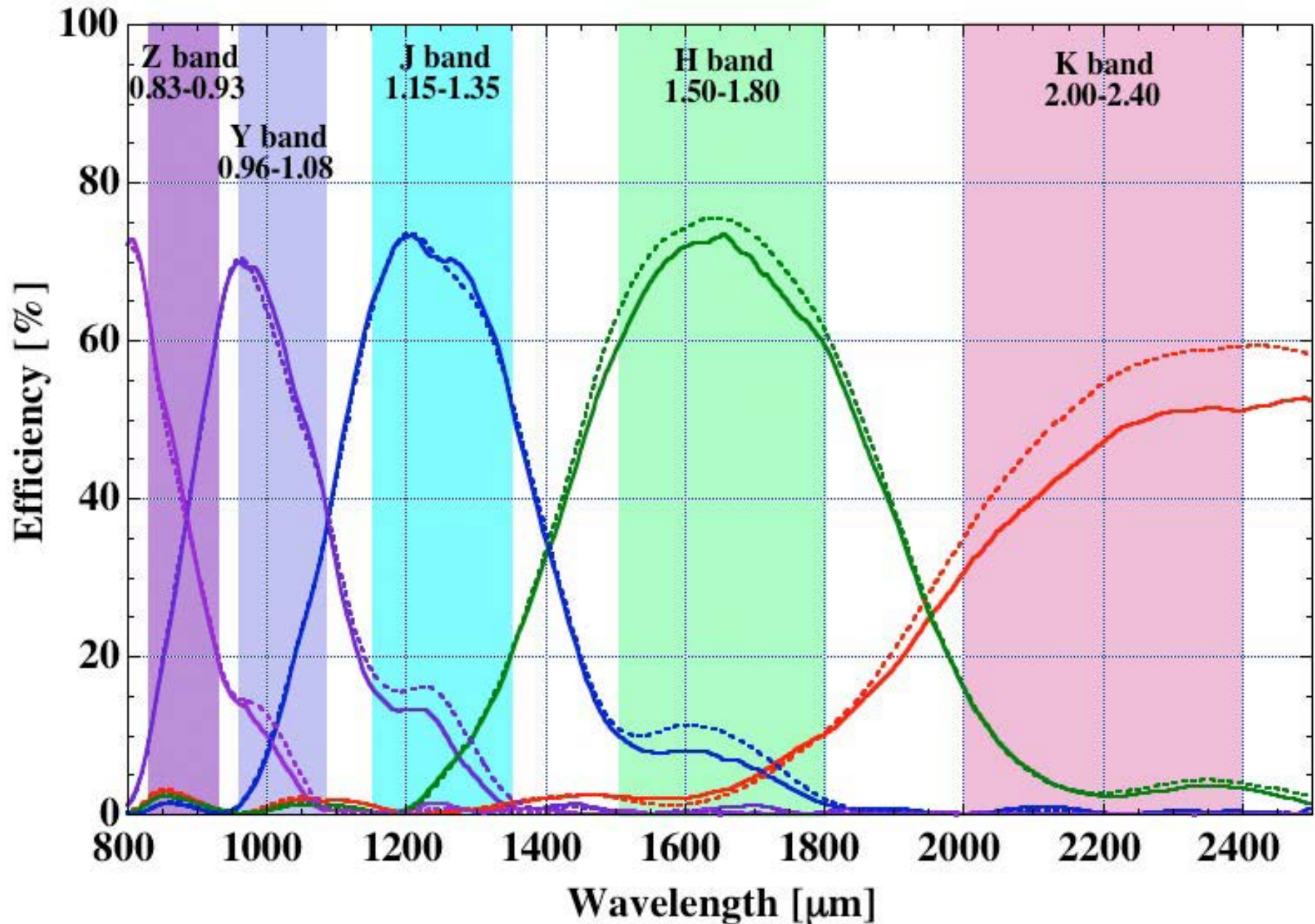
0th order

Diffraction beam

入射角大

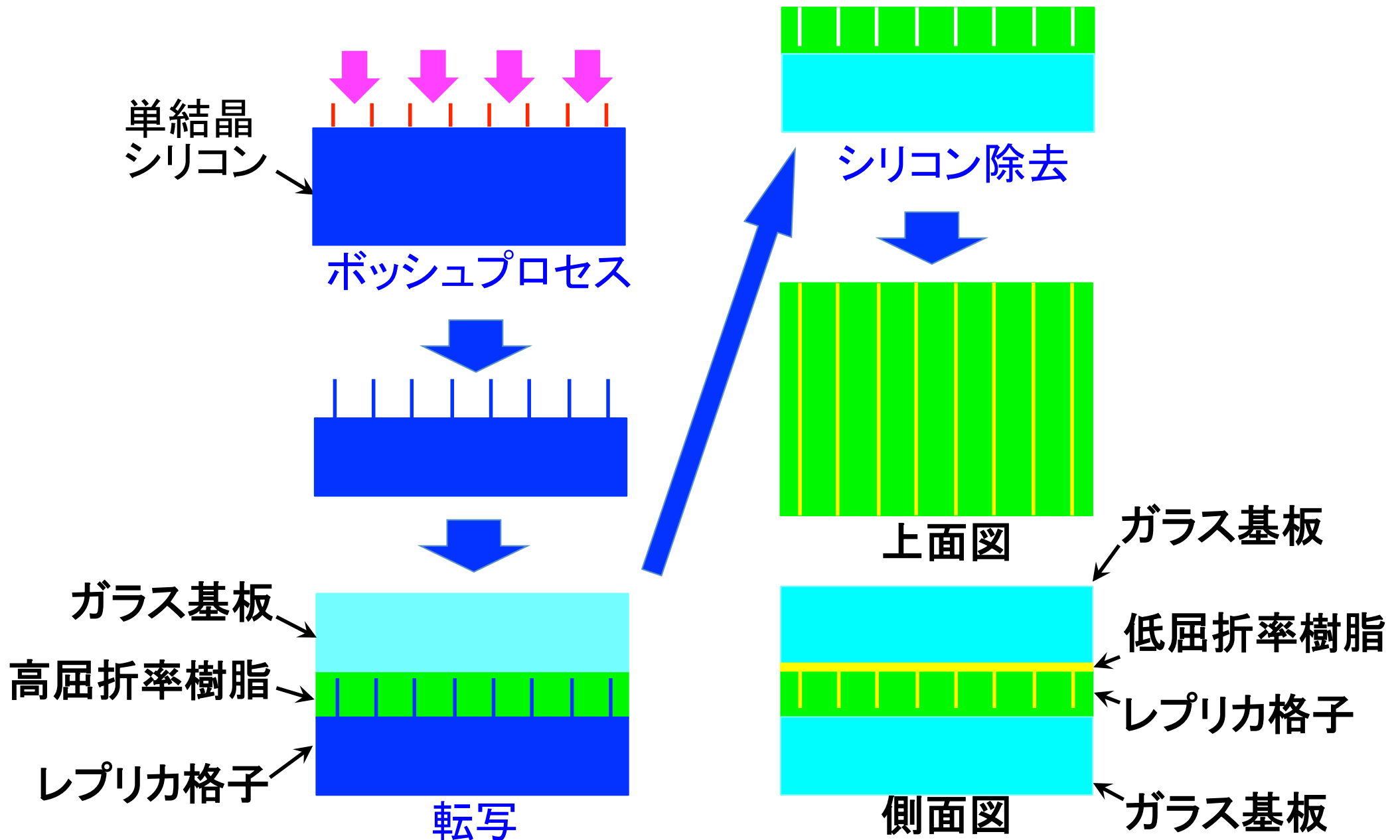


高分散エシエルグリズムの回折効率 (RCWA)

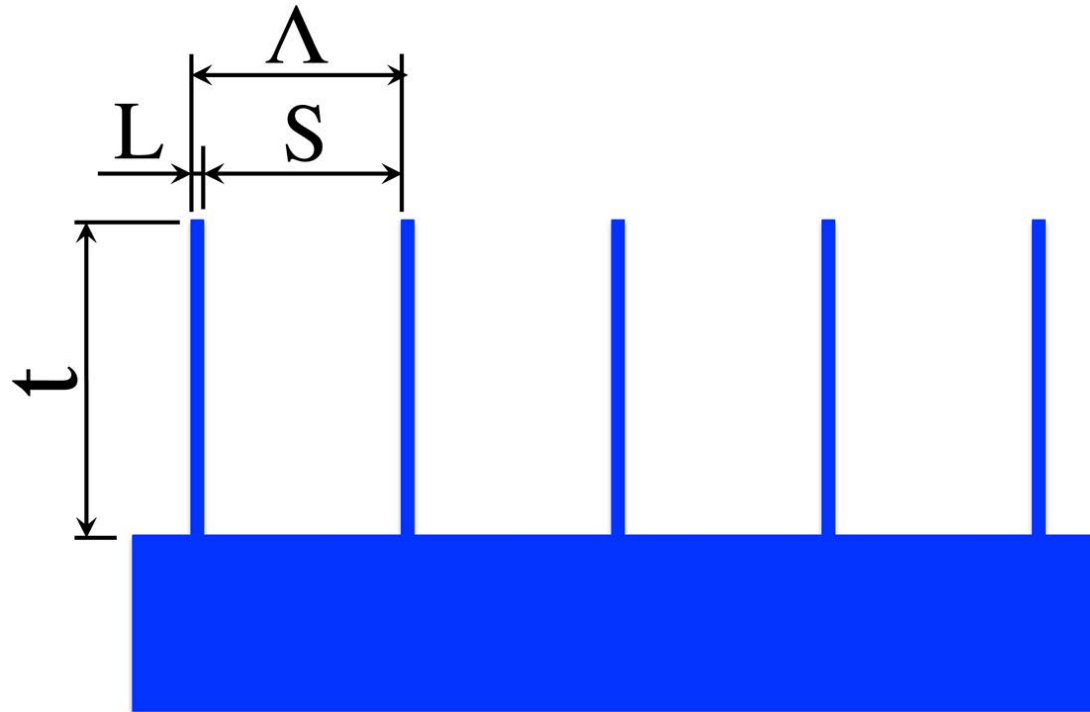


$L\&S=4.6:0.5$ [μm], $\theta_0=28.4^\circ$, $n_1=1.33$, $n_2=1.6$, $n_3=1.6$, $t = 16$ μm

VB Gratingの製作方法



シリコン鋳型の仕様



サイズ: 70×70 [mm]

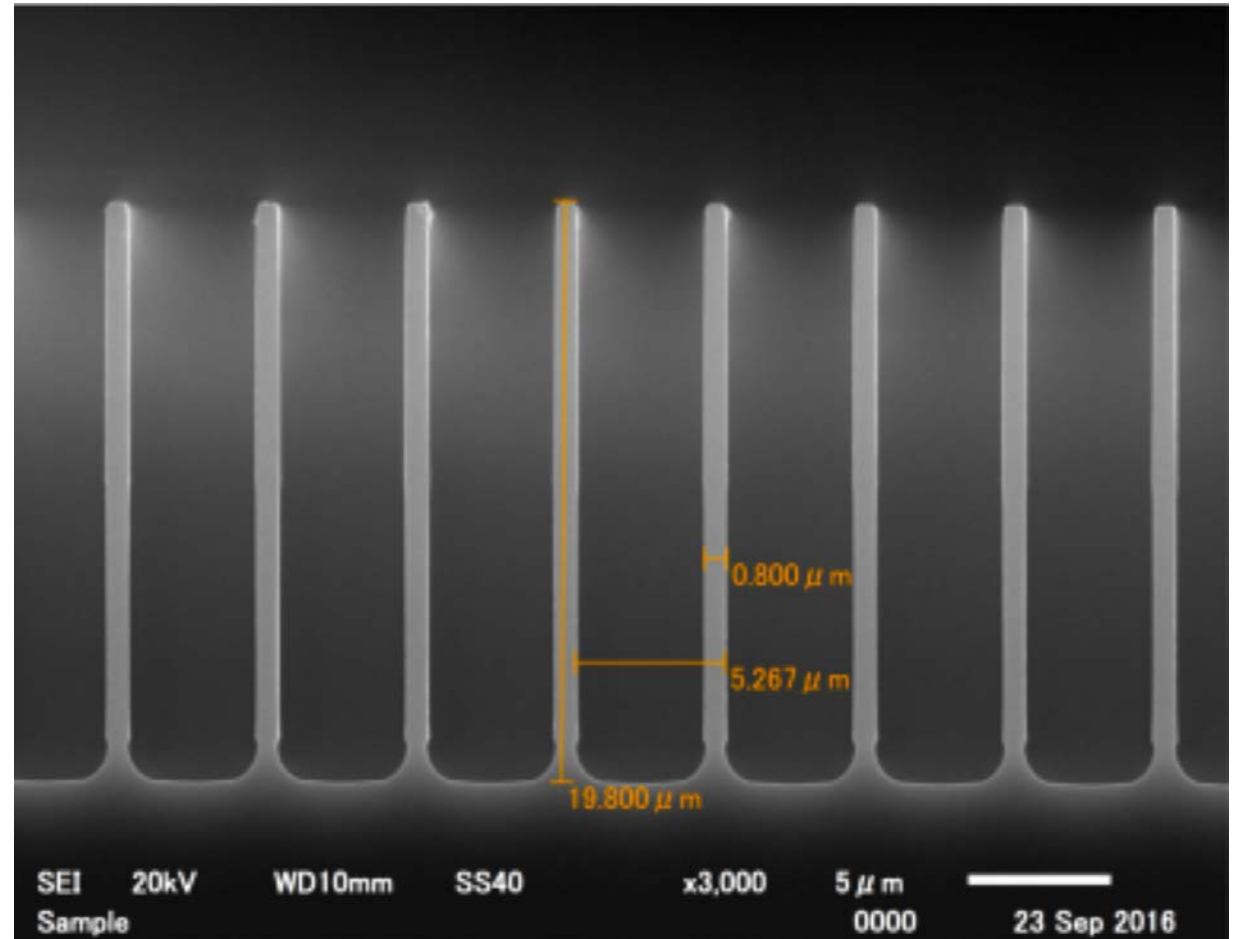
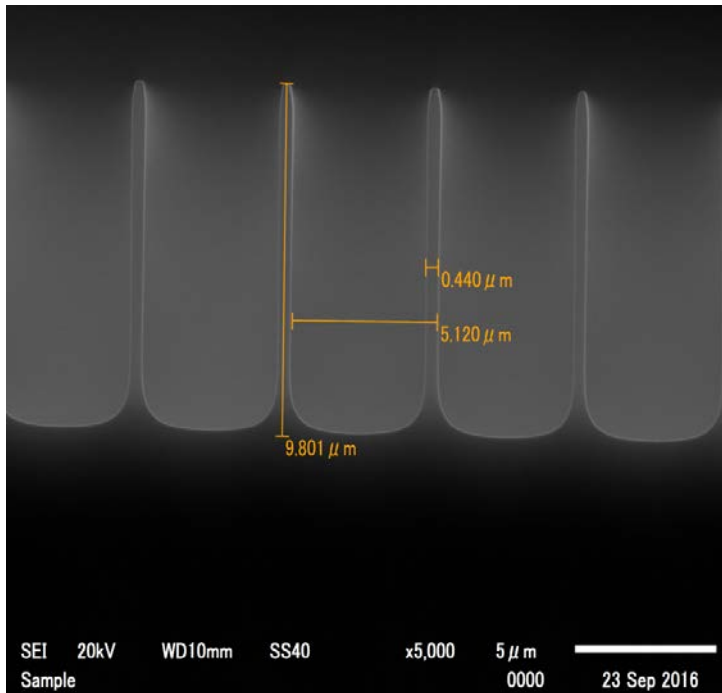
材質: シリコン

格子周期: $\Lambda = 5.1 \mu\text{m}$ (196 g/mm)

畝の幅 : $L = 0.5 \mu\text{m}$

畝の高さ: $t = 16 \mu\text{m}$

シリコン鋳型の試作

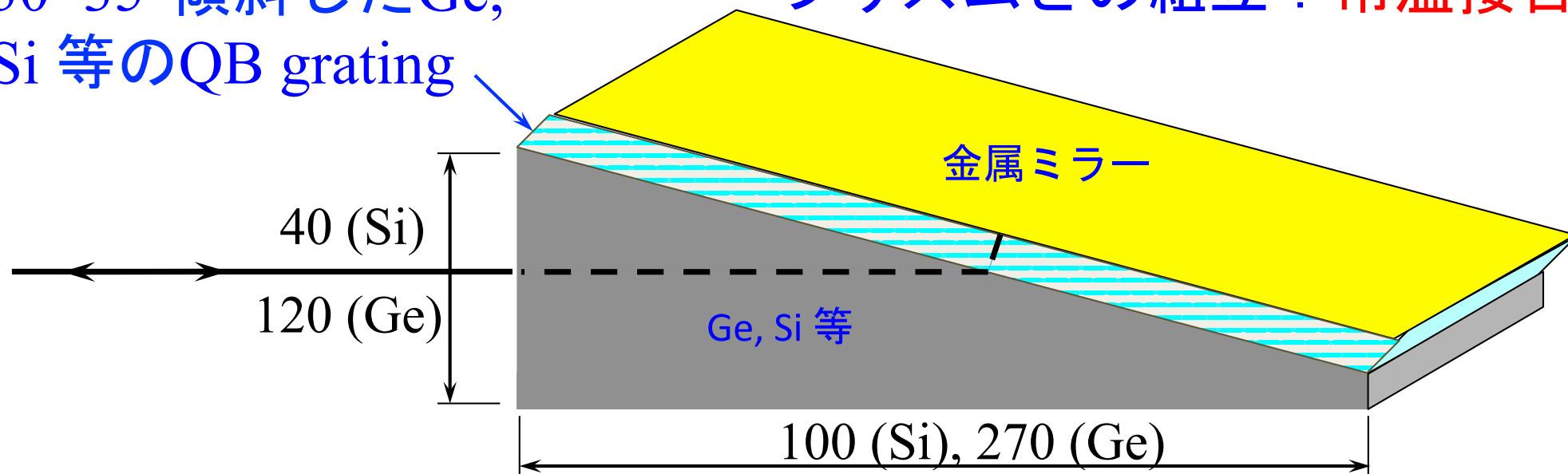


サイクルエッチング (Boschプロセス) → シリコン酸化 ↔ 酸化膜除去により加工された高アスペクト比のVB grating用のシリコン金型 (格子周期 $\Lambda = 5.1\mu\text{m}$)。左: 高さ $t = 10\mu\text{m}$ 、幅 $s = 0.44\mu\text{m}$ 。右: $t = 20\mu\text{m}$ 、 $s = 0.80\mu\text{m}$ 。豊田工業大学ナノテクノロジープラットフォームにて加工。

Quasi-Bragg Immersion Gratingの仕様

30~35°傾斜したGe,
Si等のQB grating

プリズムとの組立：常温接合?



1. 近赤外線用
(1~5 μm)

材 質 : ZnSe, Si等

サイズ, 層数 : 30 \times 0.20 \times t0.15 \times 400枚

周期誤差 : 30nm (P-V), 8nm (rms)

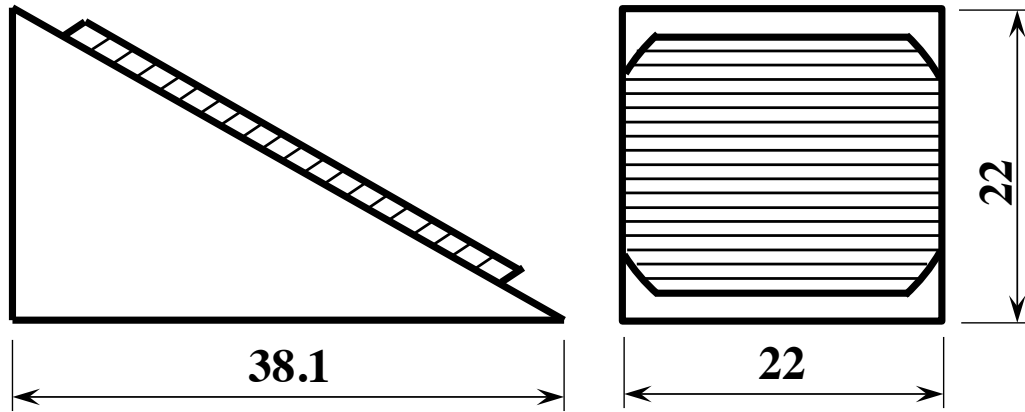
2. 中間赤外線用
(5~30 μm)

材 質 : Ge, CdTe等

サイズ, 層数 : 120 \times 0.8 \times t0.6 \times 400枚

周期誤差 : 100nm (P-V), 30nm (rms)

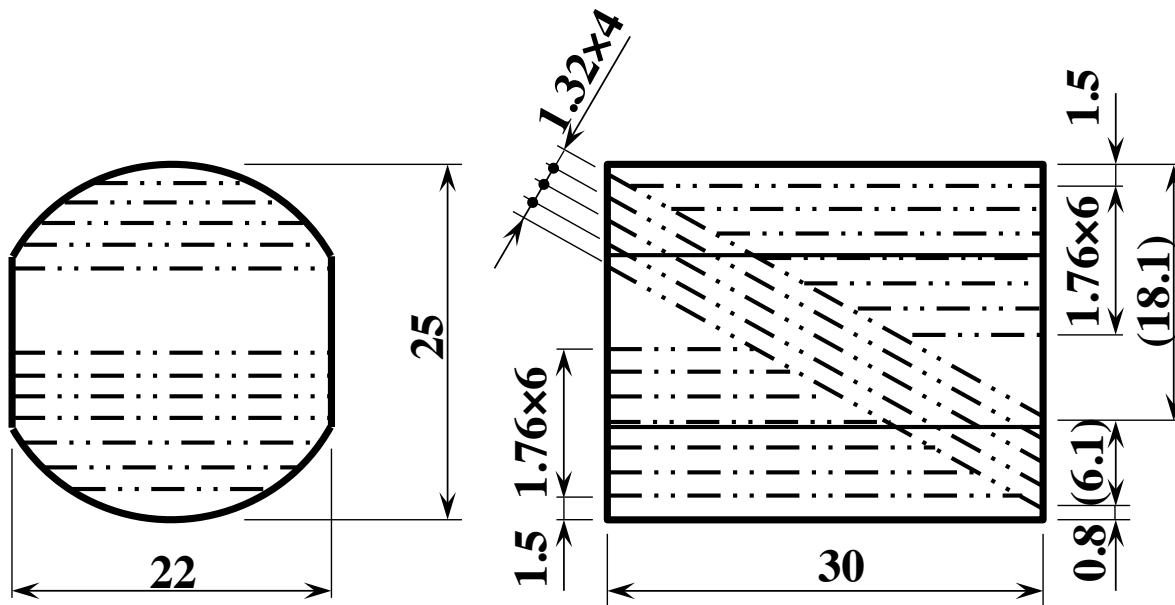
Quasi-Bragg Immersion Gratingの試作



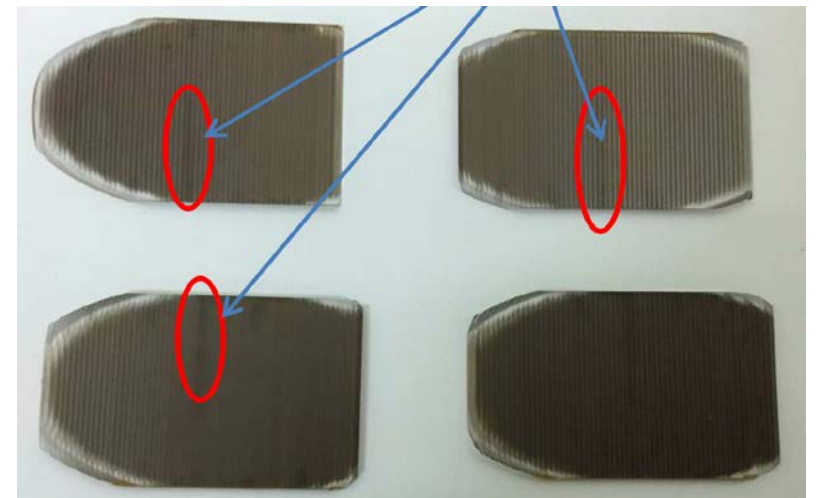
Quasi-Bragg immersion grating



金の常温接合により積層されたミラー基板ブロック



ワイヤーソーの切り込み位置



格子が傾いたQuasi-Bragg grating

まとめ

- Reflector facet transmission (RFT) gratingは高次回折光に対して高い回折効率(~80%)を達成可能。
- RFT gratingのプロトタイプとして頂角が鋭角なノコギリ歯形状のレプリカ回折格子を用いたMOIRCSハイブリッド・グリズムを開発中。
- MOIRCSエシェルグリズム用にQB gratingとして機能するVB gratingのシリコンのマスター格子をサイクルエッチング+酸化膜形成・除去により高アスペクト比の鋳型を試作。樹脂充填後のシリコン除去法を開発。
- 常温接合による積層加工法によりQB immersion grating(石英、可視光近赤外線用)を試作中。