

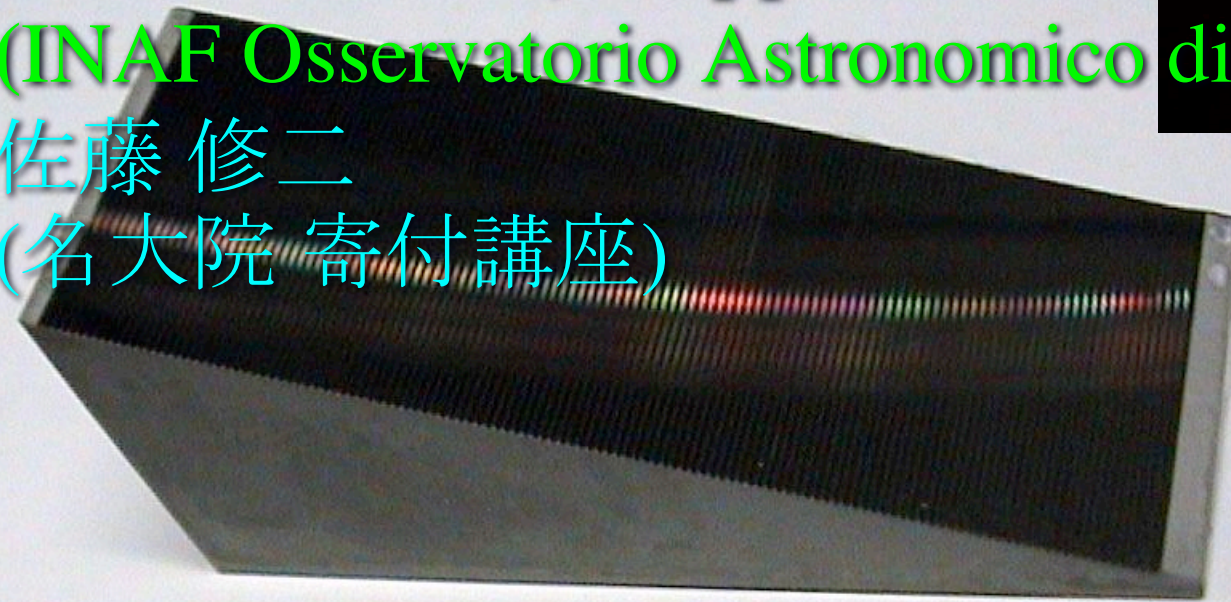
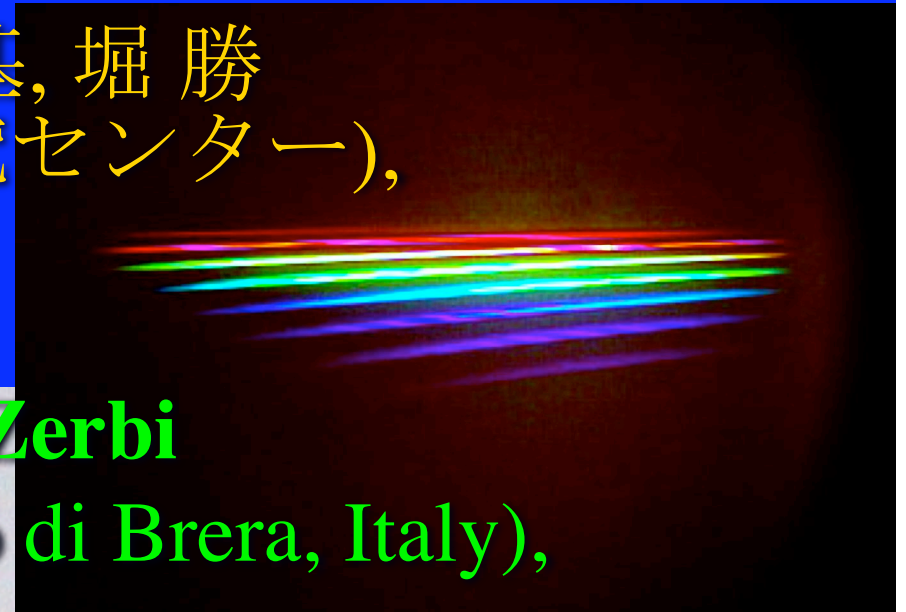
TMT, E-ELT用の分散素子開発状況

海老塚 昇, 石川 健治, 近藤 博基, 堀 勝
(名大院 プラズマナノ工学研究センター),

青木 和光
(国立天文台 光学赤外線部),

Andrea Bianco, Filippo Maria Zerbi
(INAF Osservatorio Astronomico di Brera, Italy),

佐藤 修二
(名大院 寄付講座)



可視赤外線観測装置ワークショップ

February 22-23, 2011

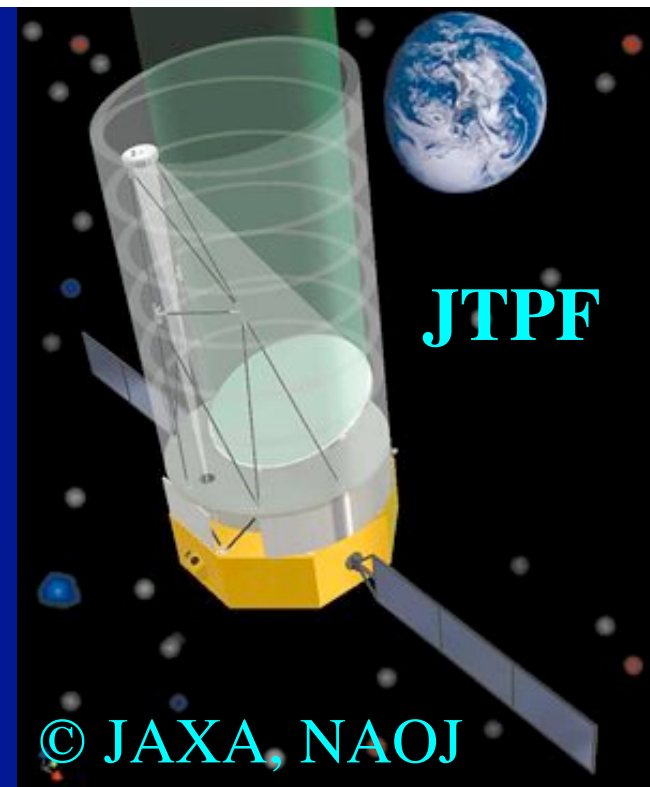
次世代超大型望遠鏡

地上

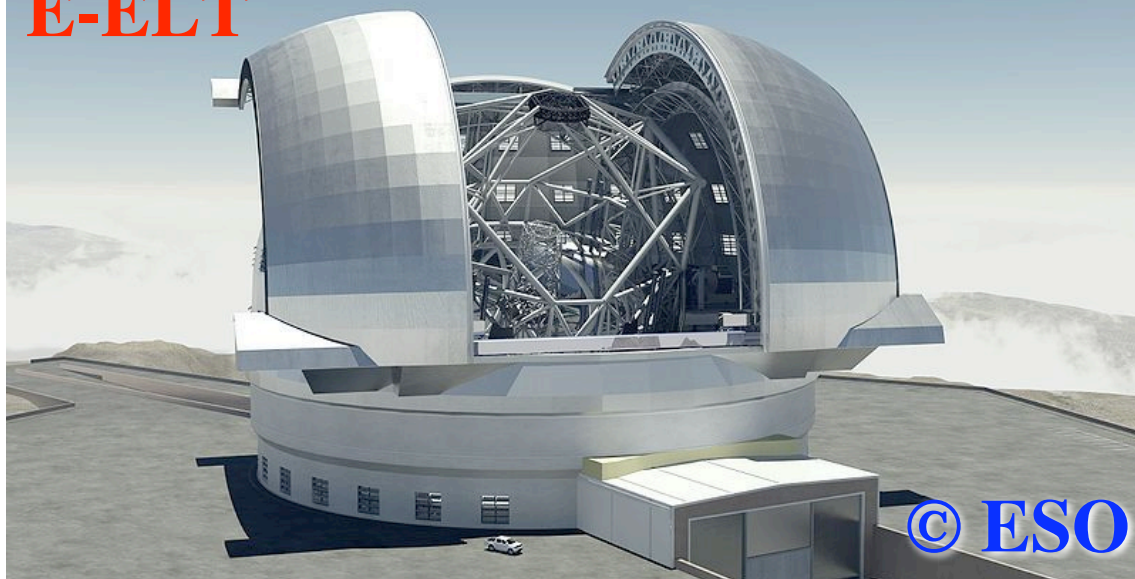
- TMT: 口径30m (米国, カナダ, 日本 他)
- E-ELT: 口径40m (欧州 他)

宇宙

- TPF: 口径10 m 単一鏡または4m複数台の干渉計 (NASA, CALTEC, ESA)
- SPICA, JTPF (日本 他)



E-ELT



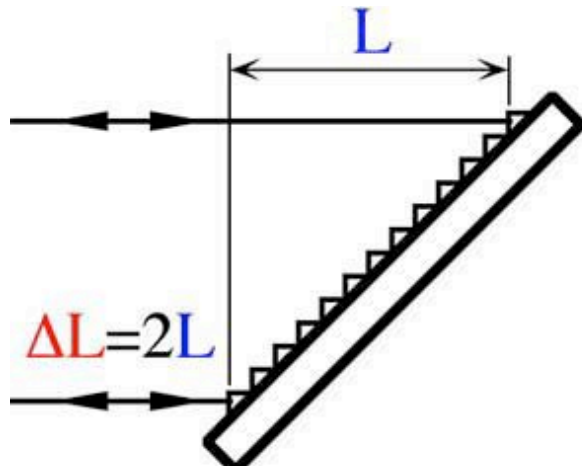
TMT



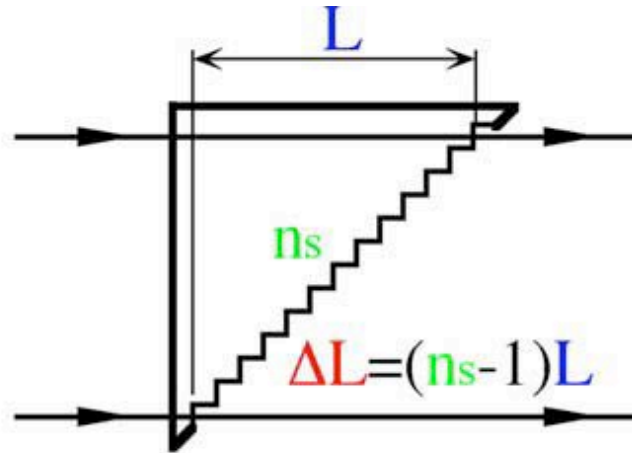
30m望遠鏡用R~ 5,000@1 μ mの分光器

	Natural Seeing: 0.5''	回折限界: 0.03''	備考
スリット幅	727 μ m	12.2 μ m	F/10
コリメータ直径	3 m	0.05 m	~ 900本/mmの 反射型回折格子
コリメータ f	30 m	0.5 m	F/10
分光器サイズ L x W x H [m]	36 x 9 x 4.5	0.6 x 0.15 x 0.075	ツェルニ・ ターナー分光器
カメラF値	F/0.62	F/37	15 μ m x 3 pix.
光学素子面精度	~ 3 λ	< λ /20	rms

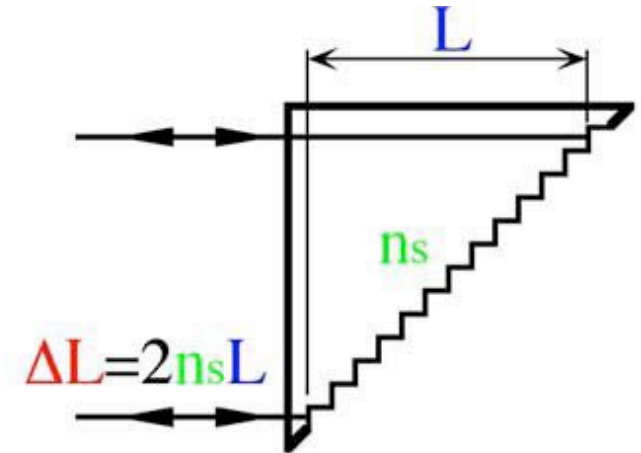
各種回折格子の光路差



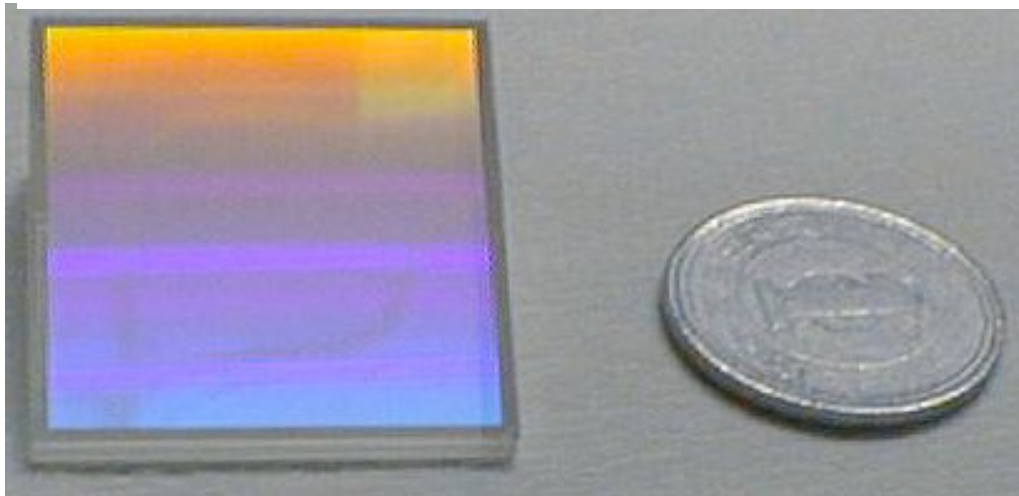
(a) 反射型回折格子



(b) グリズム

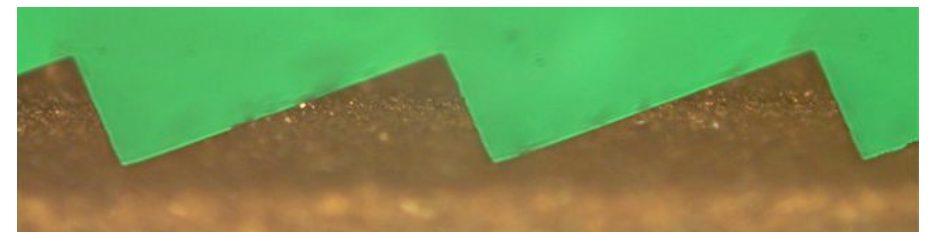
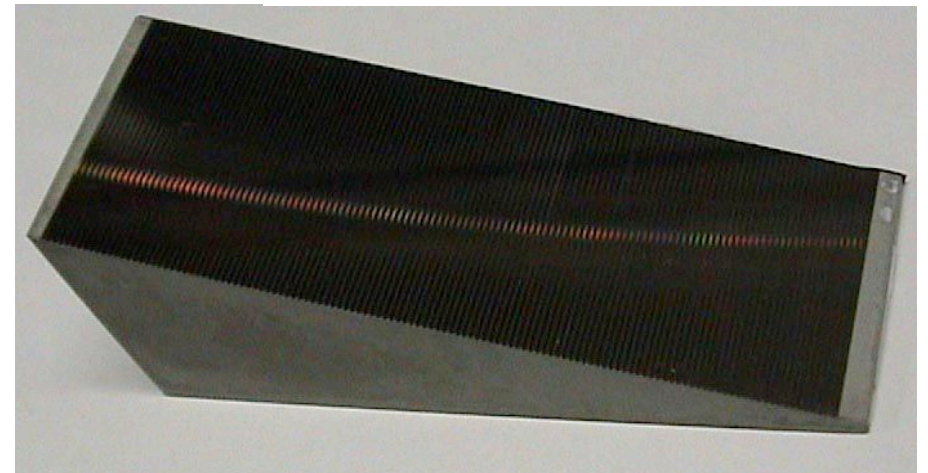


(c) Immersion grating

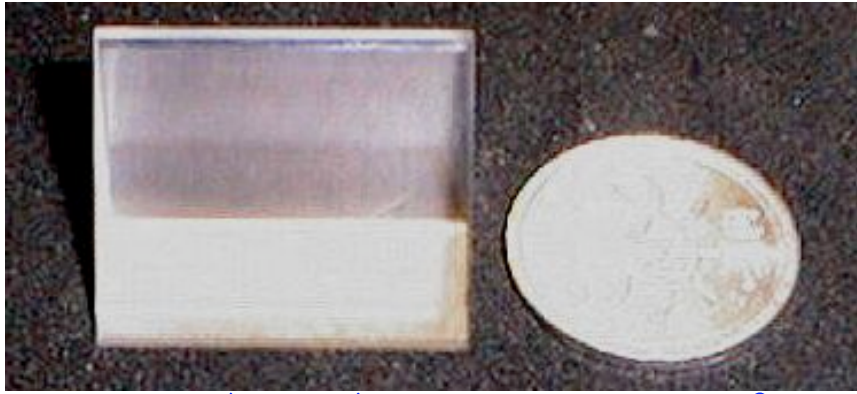


LiNbO_3 ($n = 2.3$) グリズム, 444 g/mm,
イオンエッチング(上)

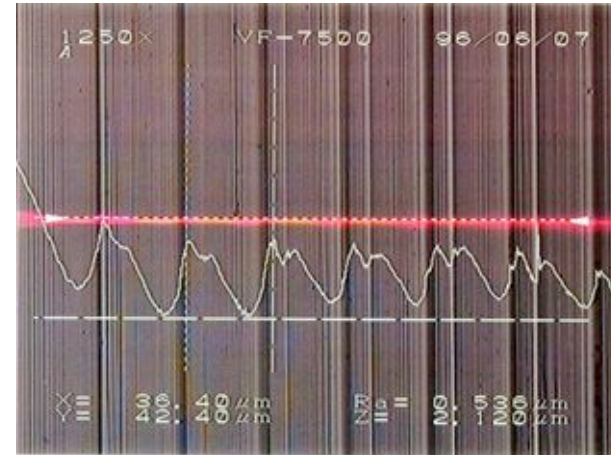
Ge ($n=4.0$) Immersion grating (右)



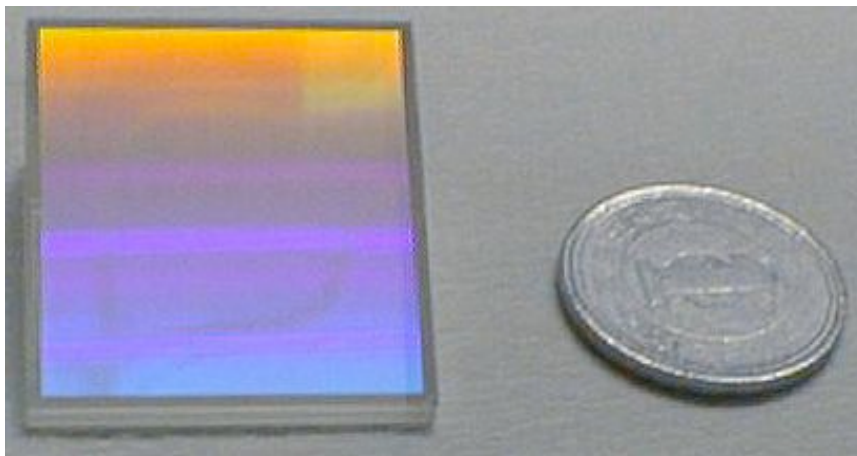
各種回折格子の試作



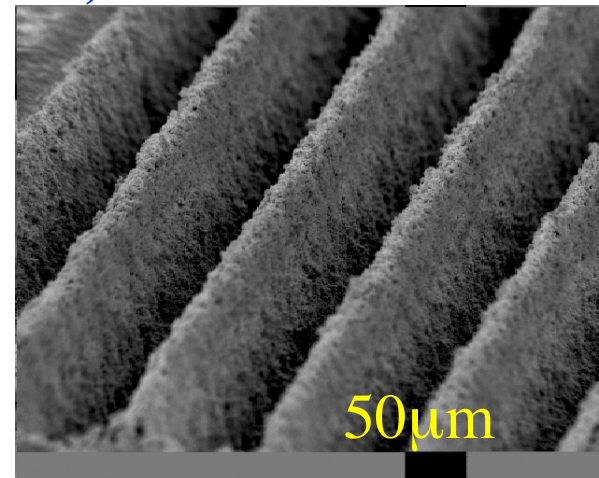
CIAO用グリズム, サイトップ™
(フッ素樹脂, $n = 1.35$) 製ダイヤモンド
切削, 47.2 g/mm



LiNbO_3 ($n = 2.3$) 回折格子, 30
g/mm, ダイシングソー



LiNbO_3 ($n = 2.3$) グリズム,
444 g/mm, イオンエッチング



Ge ($n = 4.0$) 回折格子, エキシマ・
レーザアブレーション

(N. Ebizuka et al., SPIE 3355, 1998)

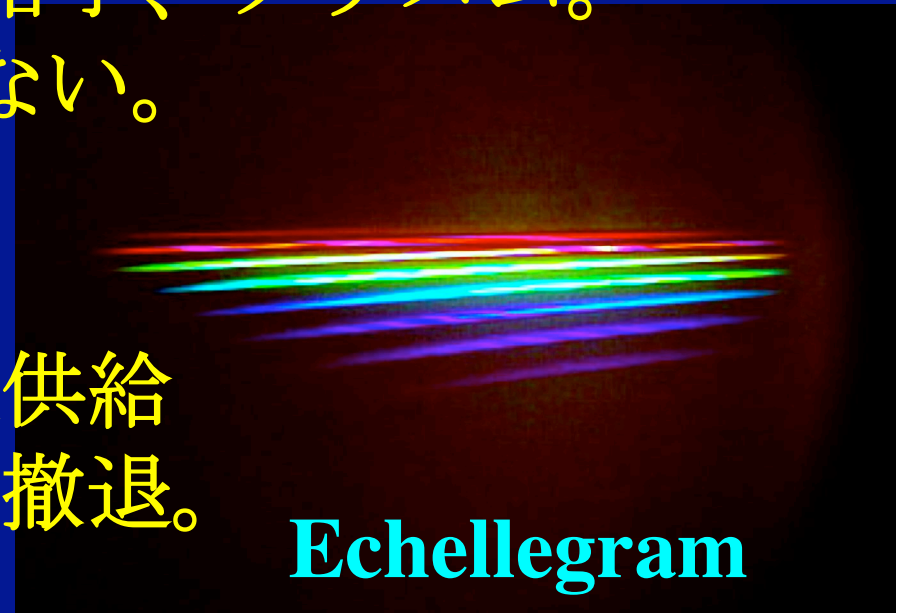
TMT, E-ELTの分散素子開発状況

TMT: Herzberg天体物理研究所 (カナダ)

- Echelleタイプの透過型回折格子、グリズム。
2006年以降の進展が見られない。

E-ELT: Brera天文台 (カナダ)

- VPH gratingの大型化、安定供給
欧州のVPH gratingメーカーが撤退。
日本の技術を習得したい。
- Echelleタイプの透過型回折格子、グリズム。



Echellegram

イタリアとの回折格子に関する共同研究

2010年11月上旬にイタリアの Brera天文台から Filippo Maria Zerbi博士と Andrea Bianco博士が来日して、TMTやE-ELT, VLT, すばる望遠鏡用の新しい回折格子について共同開発研究の提案があった。



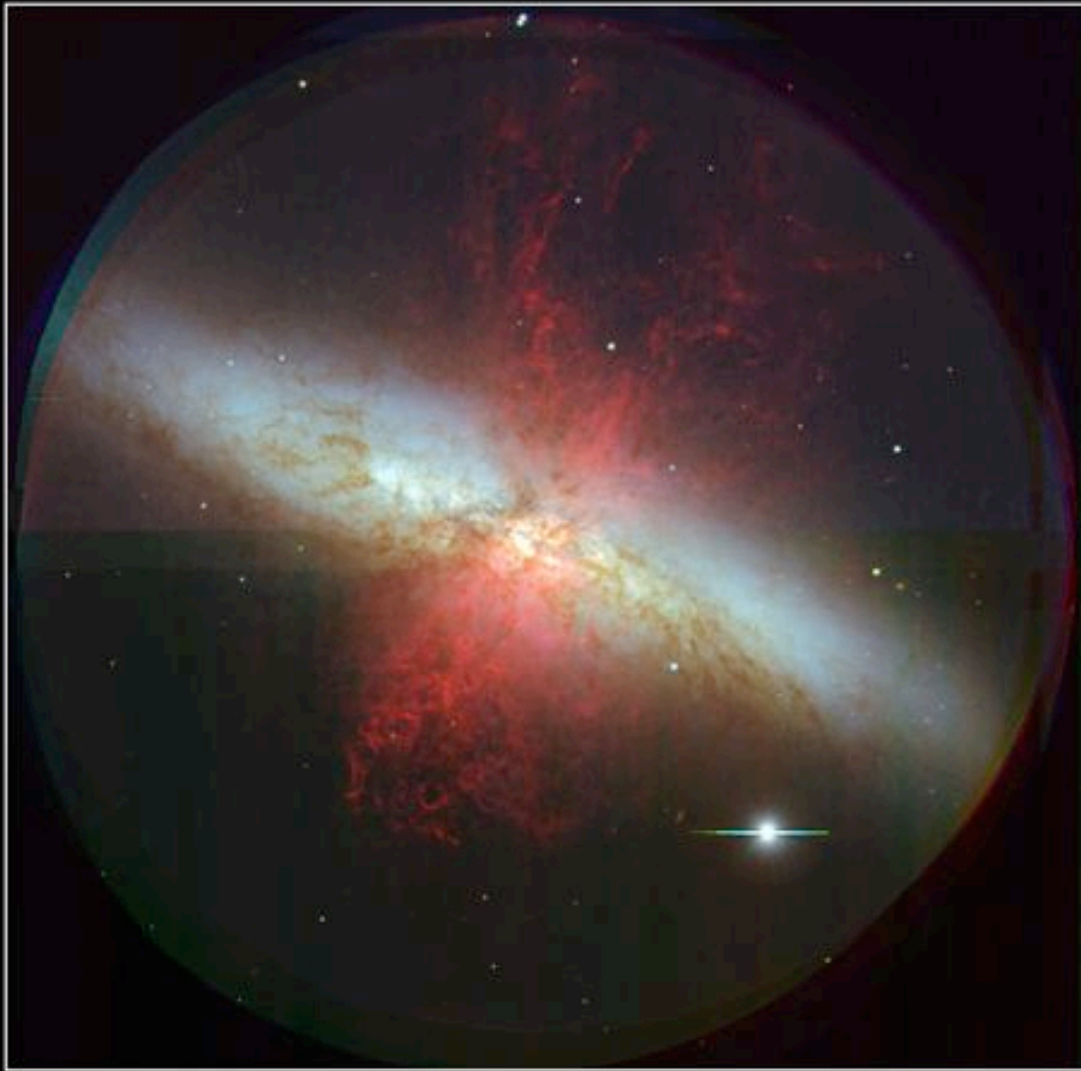
Istituto Nazionale di Astrofisica

Osservatorio Astronomico di Brera

彼らはE-ELT用光学系の開発のための予算の一部をESOから5年間獲得している。

非公式にBrera天文台と名古屋大学との共同研究を開始した。

Volume Grating



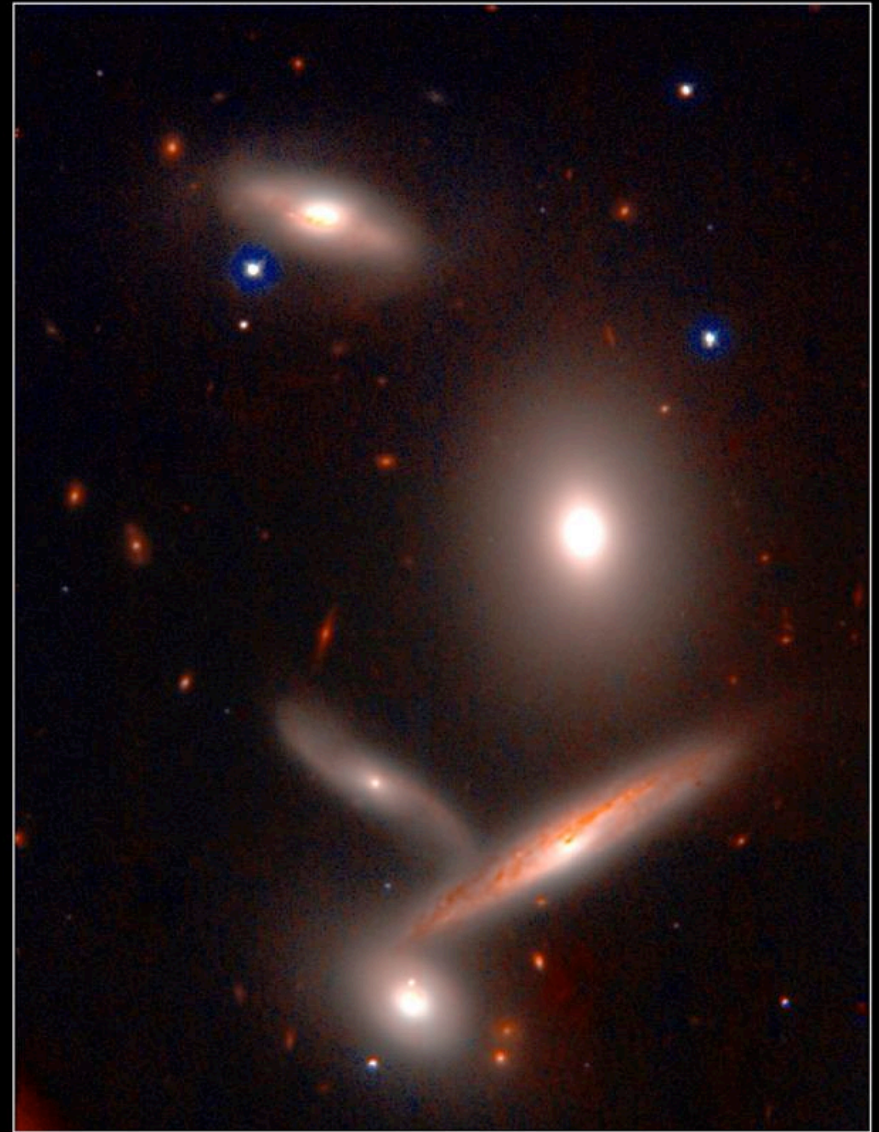
M 82 (NGC 3034)

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Copyright© 2000 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

FOCAS (B, V, H α)

March 24, 2000



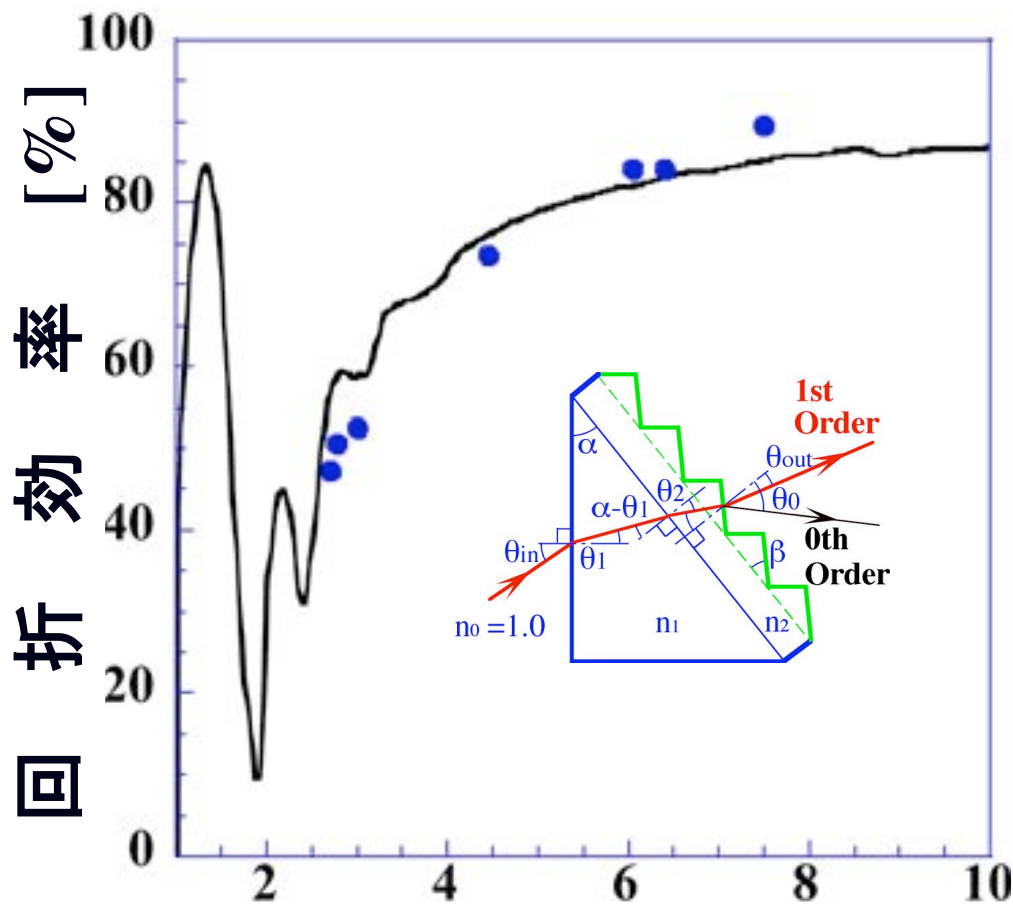
Hickson Compact Group 40

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J & K')

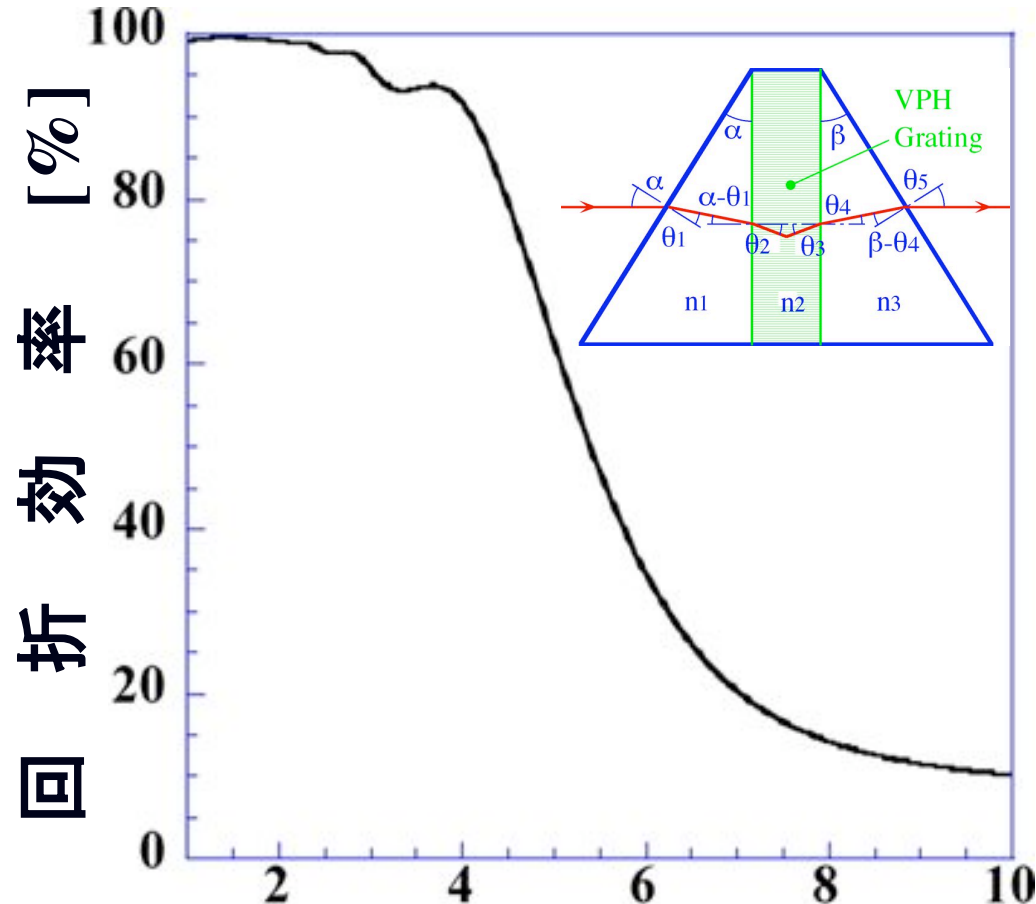
January 28, 1999

回折格子の効率



波長で規格化された格子周期 Δ/λ

表面刻線型回折格子

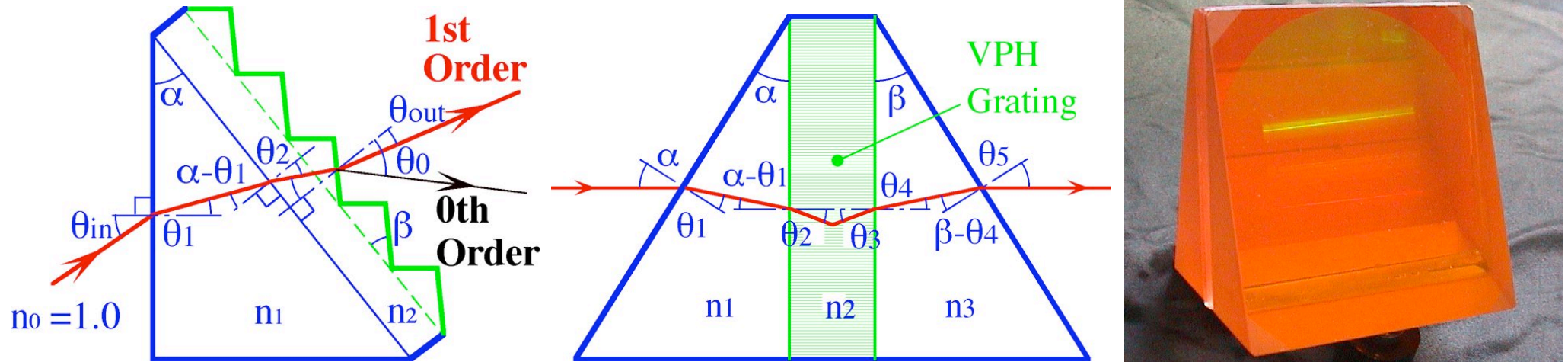


波長で規格化された格子周期 Δ/λ

VPH (Volume Phase Holographic) 回折格子

[Oka et. al., SPIE 5005, 2003]

高分散グリズム



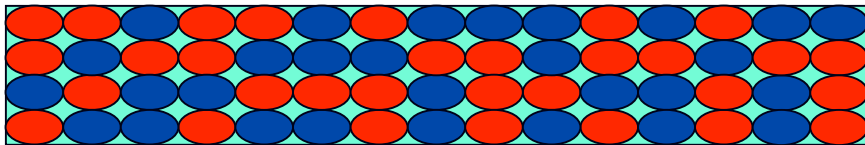
左図にて屈折率が2.6と1.5の界面における臨界角は 35.2° ($\theta_{in} = 0, \alpha < 35.2$)。

中央の図においてプリズムとVPH格子の屈折率がそれぞれ2.6と1.5の場合、 $\alpha > 63.6$ 。

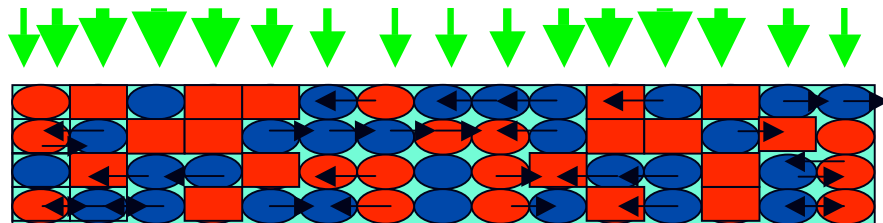
Volume Hologram用樹脂

- RPM: ラジカル硬化型モノマー, 紫外線 (< 400nm) と可視光 (460 - 600 nm) で硬化。
- CPM: カチオン (陽イオン) 硬化型モノマー, 紫外線 (< 400nm) で硬化。
- RPP: RPMのポリマー。
- CPP: CPMのポリマー。

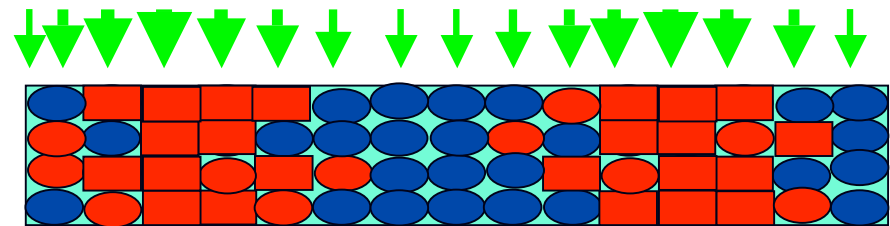
①



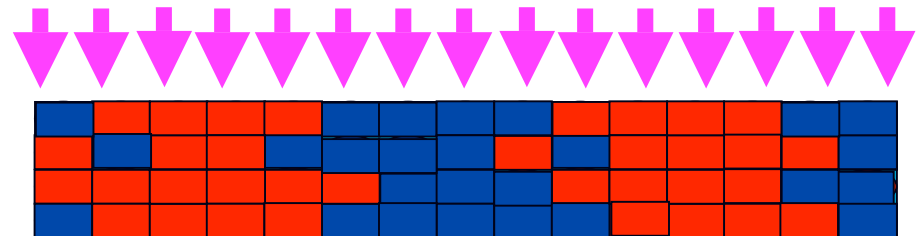
② レーザ (532 nm) 露光



③ レーザ (532 nm) 露光



④ 紫外線露光 (定着)



日本ペイント製

Volume Hologram乾板の作製

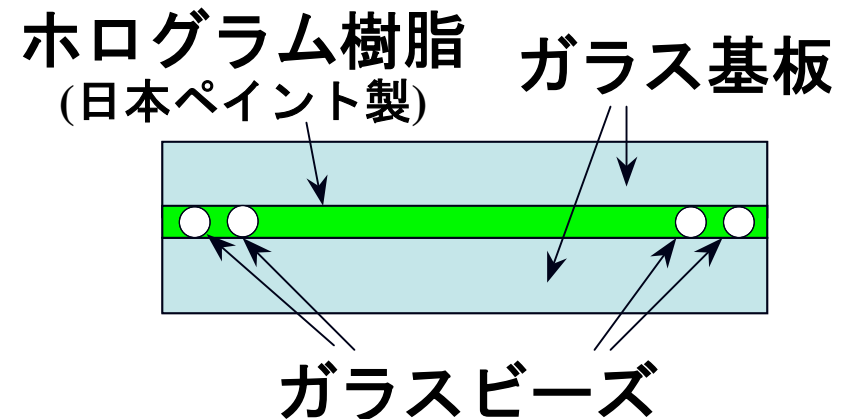
基板の洗浄(手拭き)



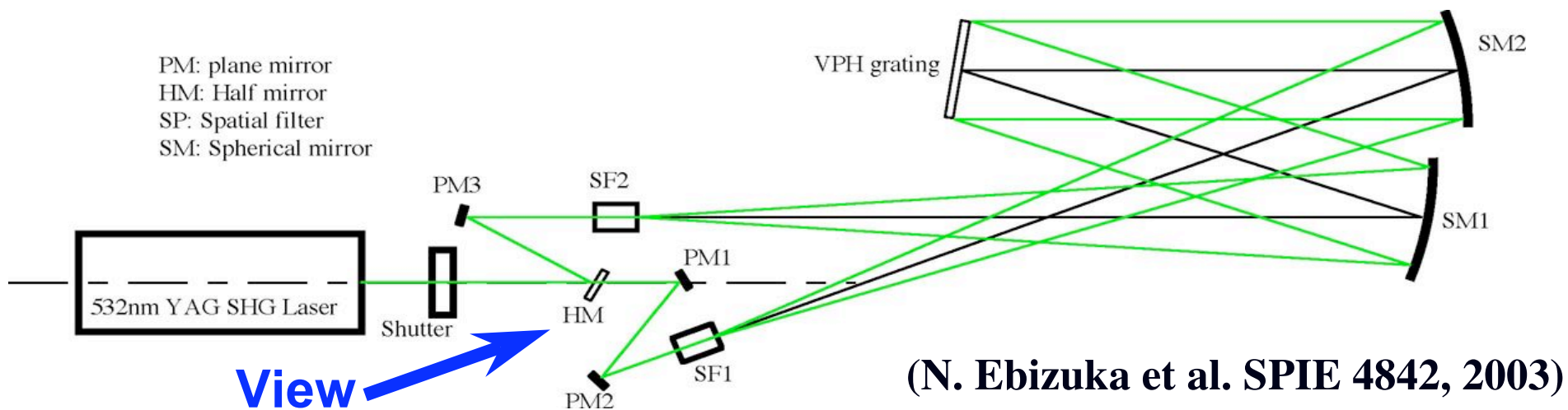
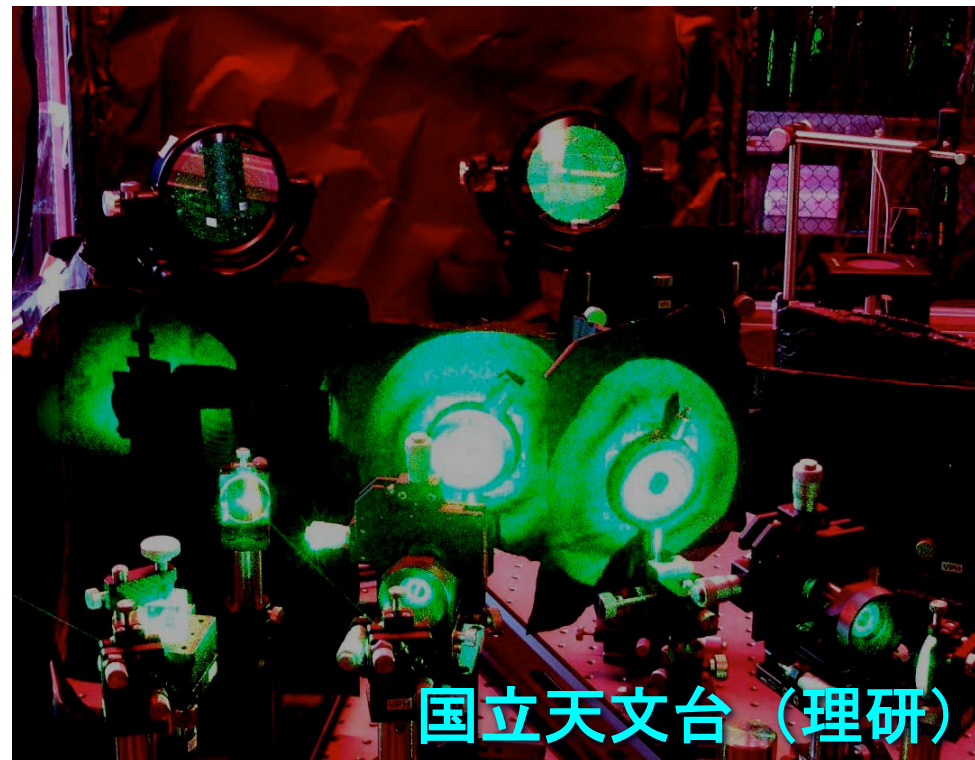
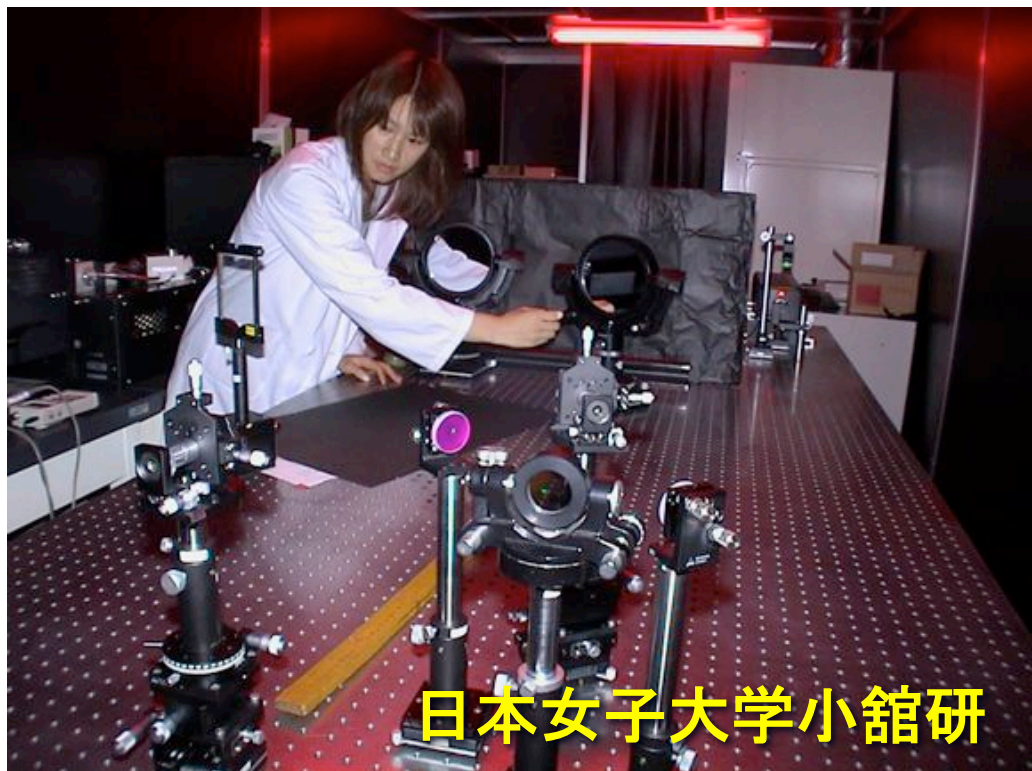
液状のホログラム樹脂を滴下し、 80°C 以上に加熱(エタノールを蒸発)。



別の基板を被せる。厚さはガラスビーズで調節。



VPH回折格子の露光光学系

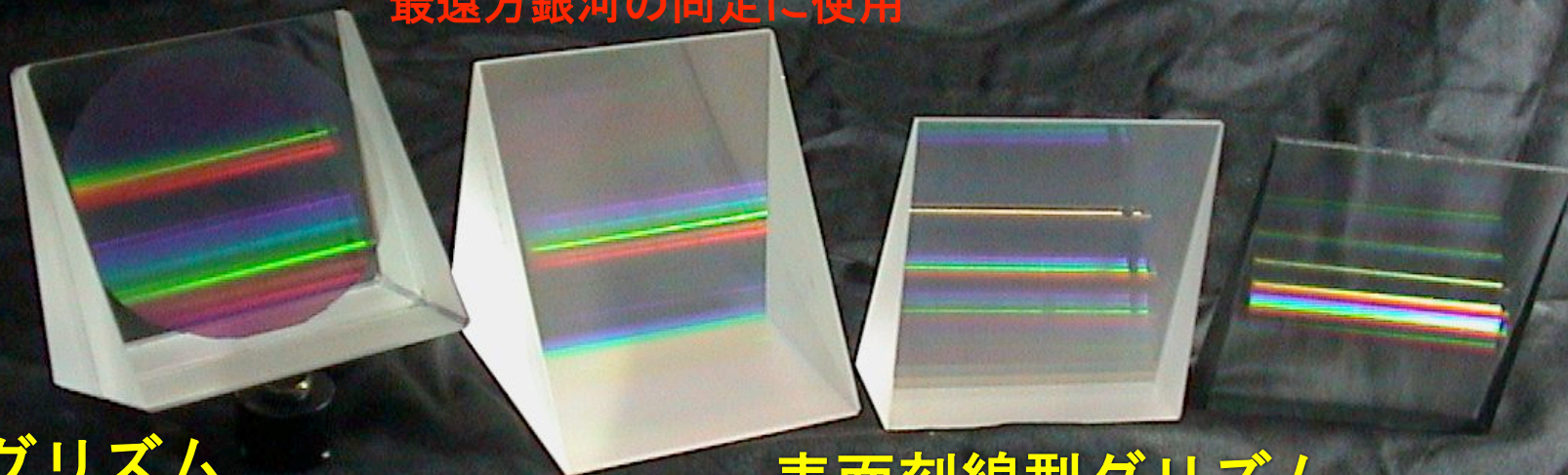


ZnSeプリズム使用



VPHグリズム

最遠方銀河の同定に使用



表面刻線型グリズム



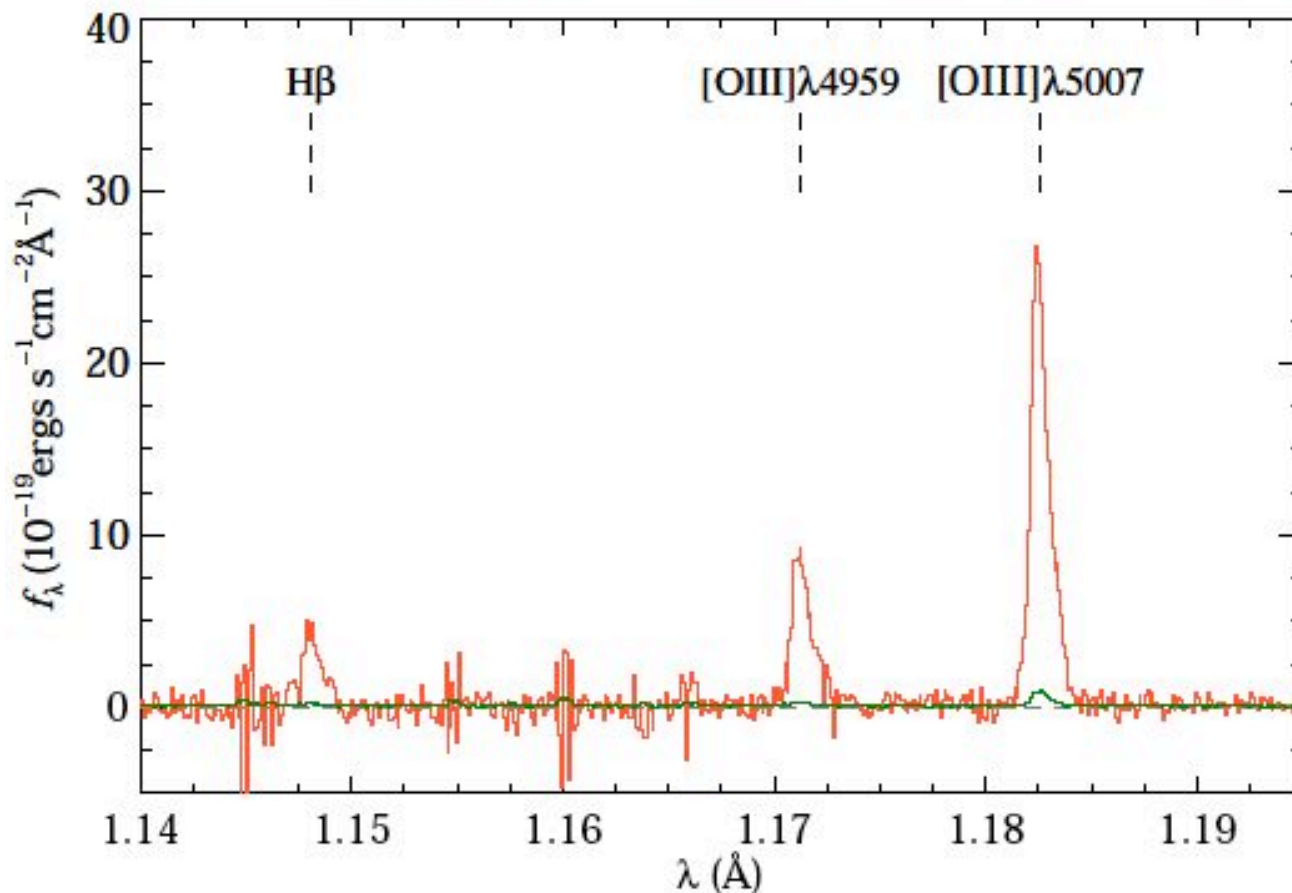
**FOCAS (可視光 :
350~1000 nm) 用
各種グリズム**

サイズ: $110 \times 106 \times t106$ (max)

日本女子大学の学生とすばる
望遠鏡で初観測 (2003年7月)。

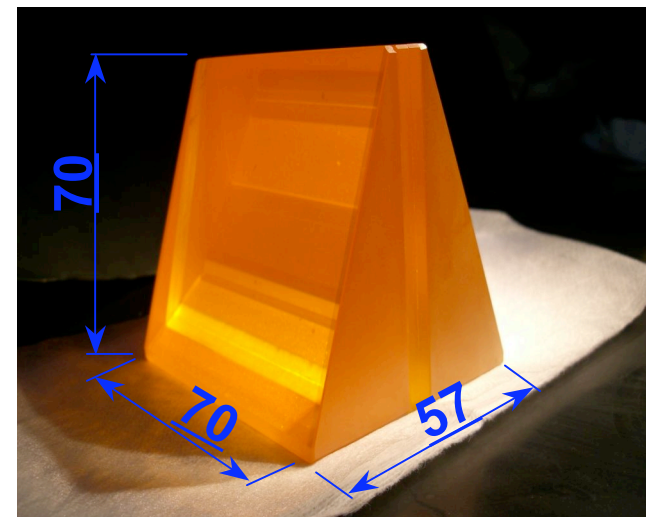
[Ebizuka et. al., PASJ, 2011a]

遠方銀河のスペクトル ($z = 1.618$)

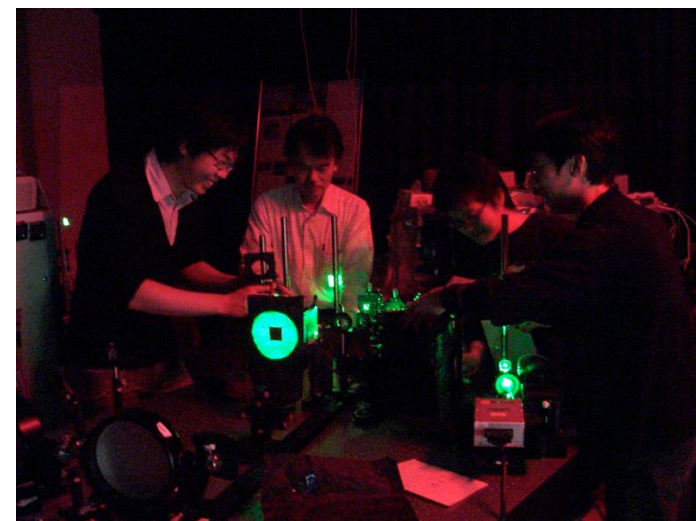


MOIRCS用Jバンド (1.1~1.4 μm) VPH
グリズムを使用, 0.8" スリット.

[Ebizuka et. al., PASJ, 2011b]

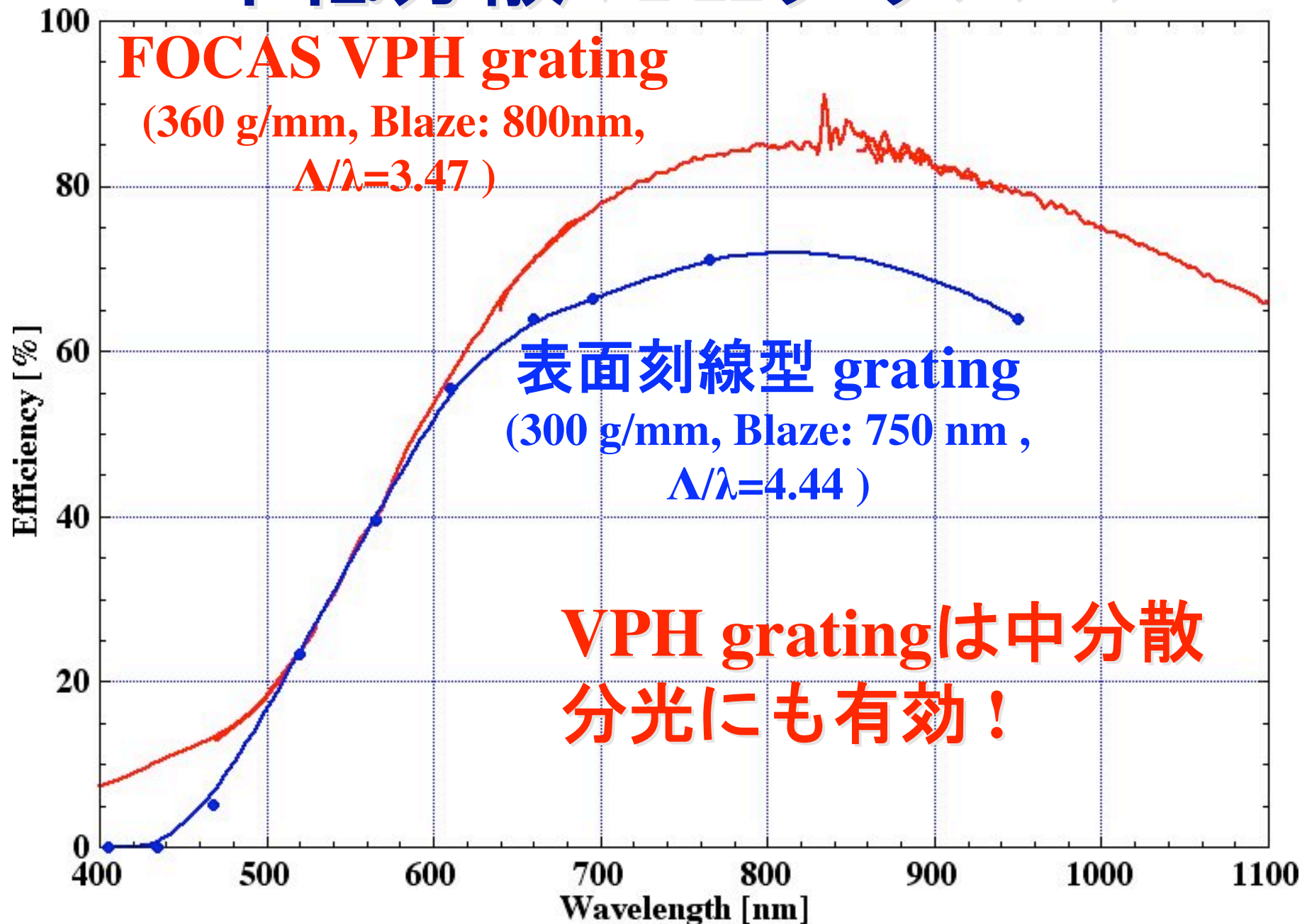


MOIRCS (近赤外線 : 0.8
~2.5 μm) 用VPHグリズム.



東北大学市川研の皆さん.

中低分散VPHグリズム



VPH gratingの偏光分光特性

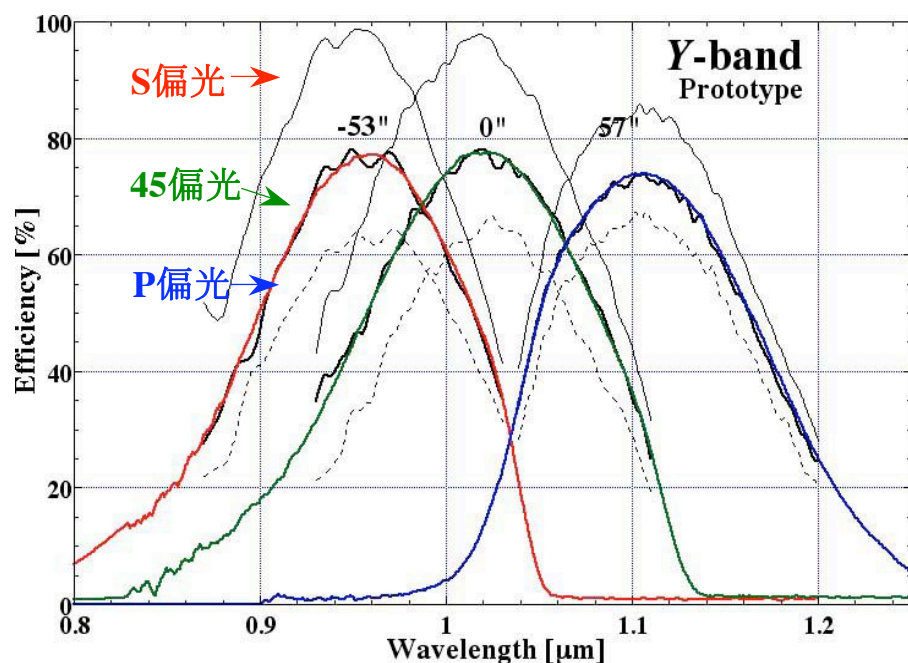
平均屈折率が n のVPH回折格子に入射した光束がグレースの回折条件を満足する場合にSおよびP偏光に対する1次回折光の回折効率 η_s および η_p の式はそれぞれ、

$$\eta_s = \sin^2\{\pi P / \sin(2\theta)\} \quad \dots (1)$$

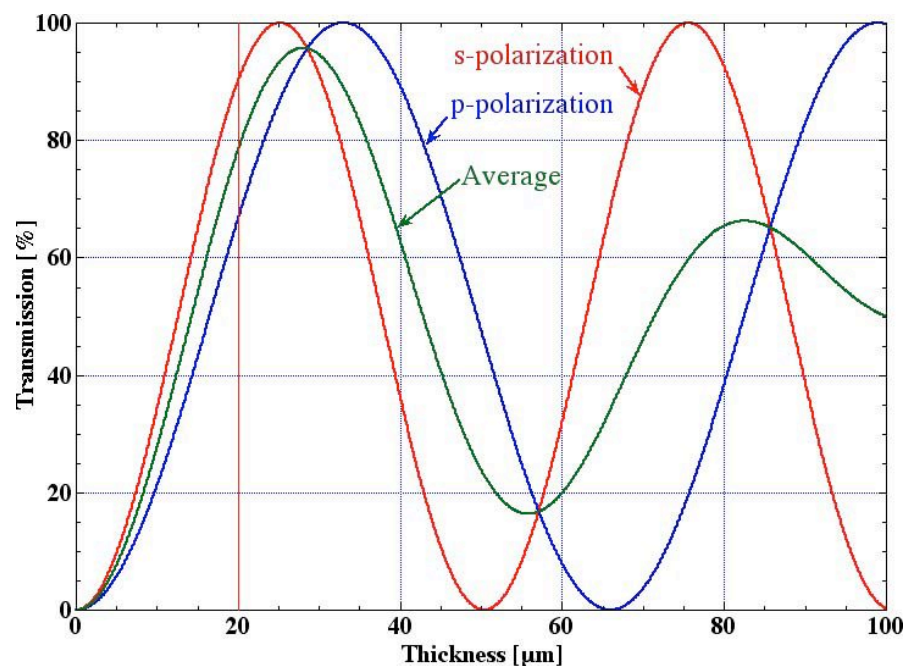
$$\eta_p = \sin^2\{\pi P \cos(2\theta) / \sin(2\theta)\} \quad \dots (2)$$

$$\therefore P = \Delta n t / (n \Lambda), \quad \Delta n = (n_{\max} - n_{\min}) / 2$$

Δn は屈折率変調量の振幅（半値）、 t は格子の厚さ、 Λ は格子周期。



実測値



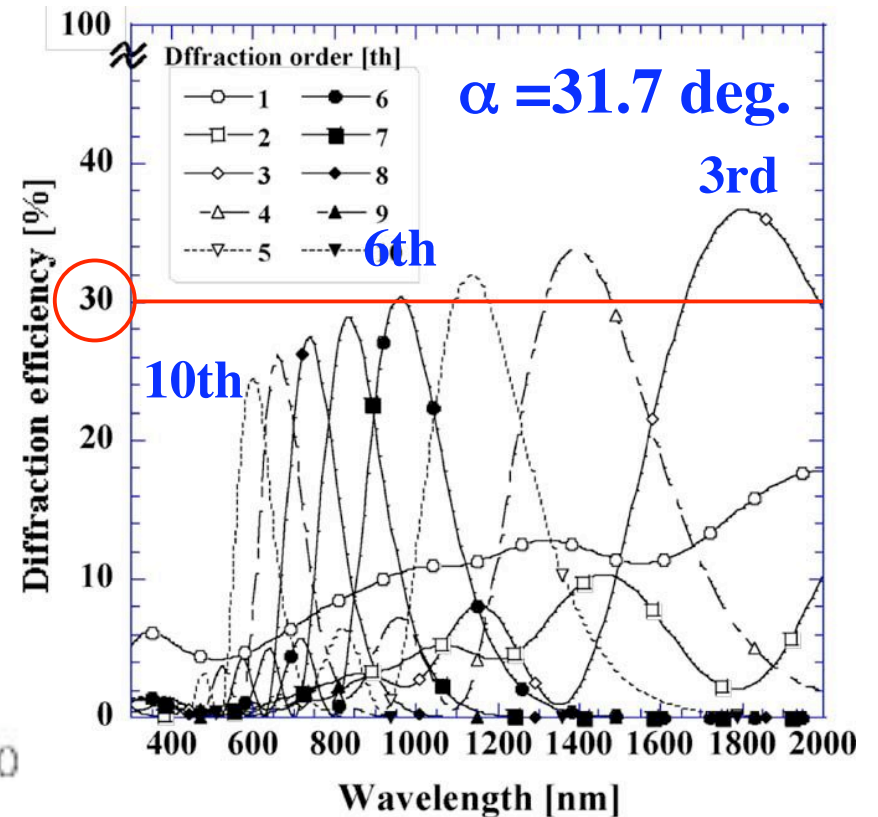
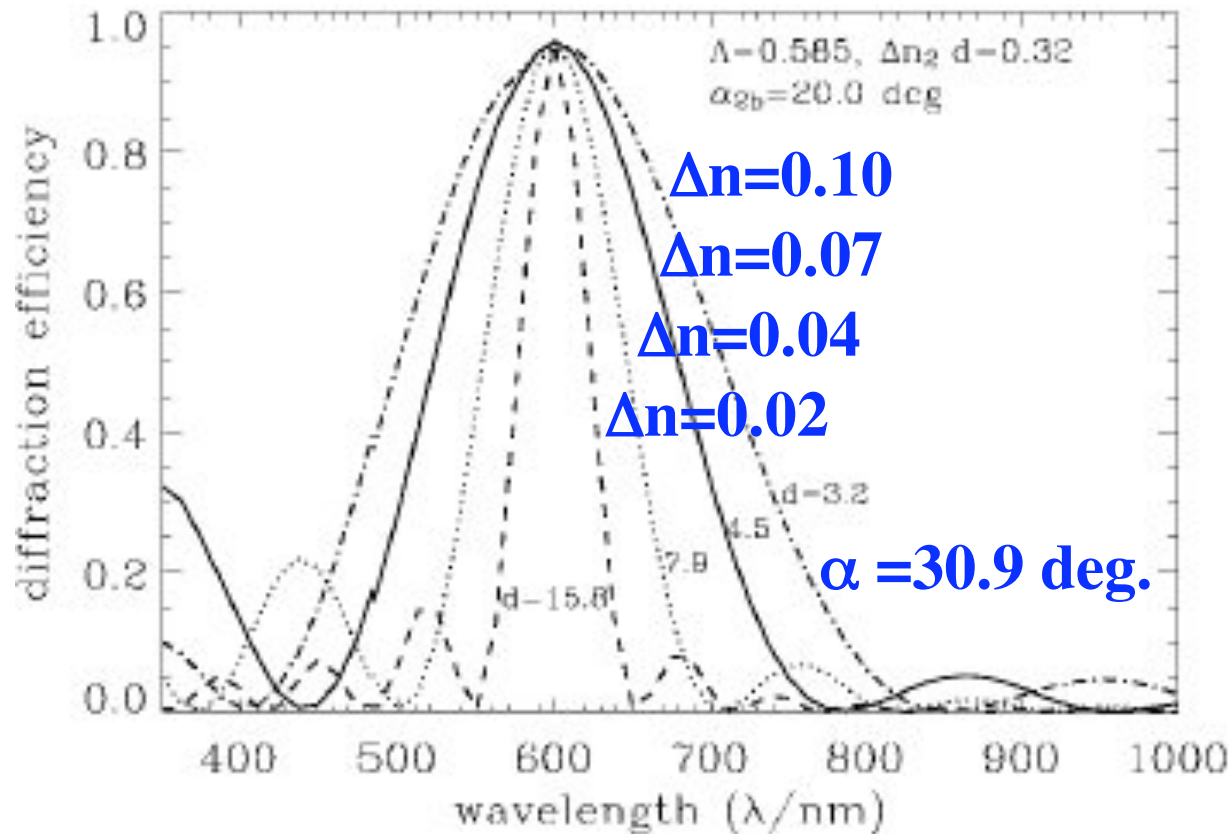
シミュレーション

MOIRCS用YバンドVPHグリズム: $\Lambda = 0.984 \mu\text{m}$, $n = 1.53$, $t = 20$, $\theta = 19.8^\circ @ \lambda = 1.02 \mu\text{m}$.

式1, 2より $\rightarrow \Delta n = 0.017$

(Ebizuka et al., PASJ 63, 2011b)

VPH gratingの限界



VPH gratingは回折角が大きくなると帯域幅が狭くなる（大気中で $\alpha < 45^\circ$ ）。重クロム酸ゼラチン (DCG) の屈折率変調 (Δn)は最大~0.2。

(I. K. Baldry et al., PASP, 116, 2004)

VPH gratingは回折次数が高いほど、回折効率が低下する。

(K. Oka et al., SPIE 5290, 2004)

透過型 Volume binary grating

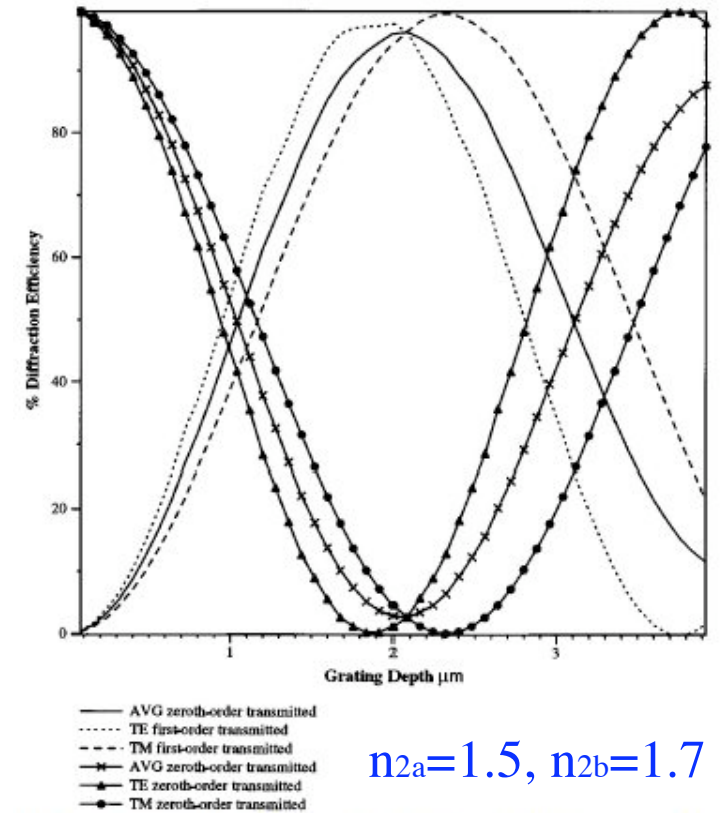
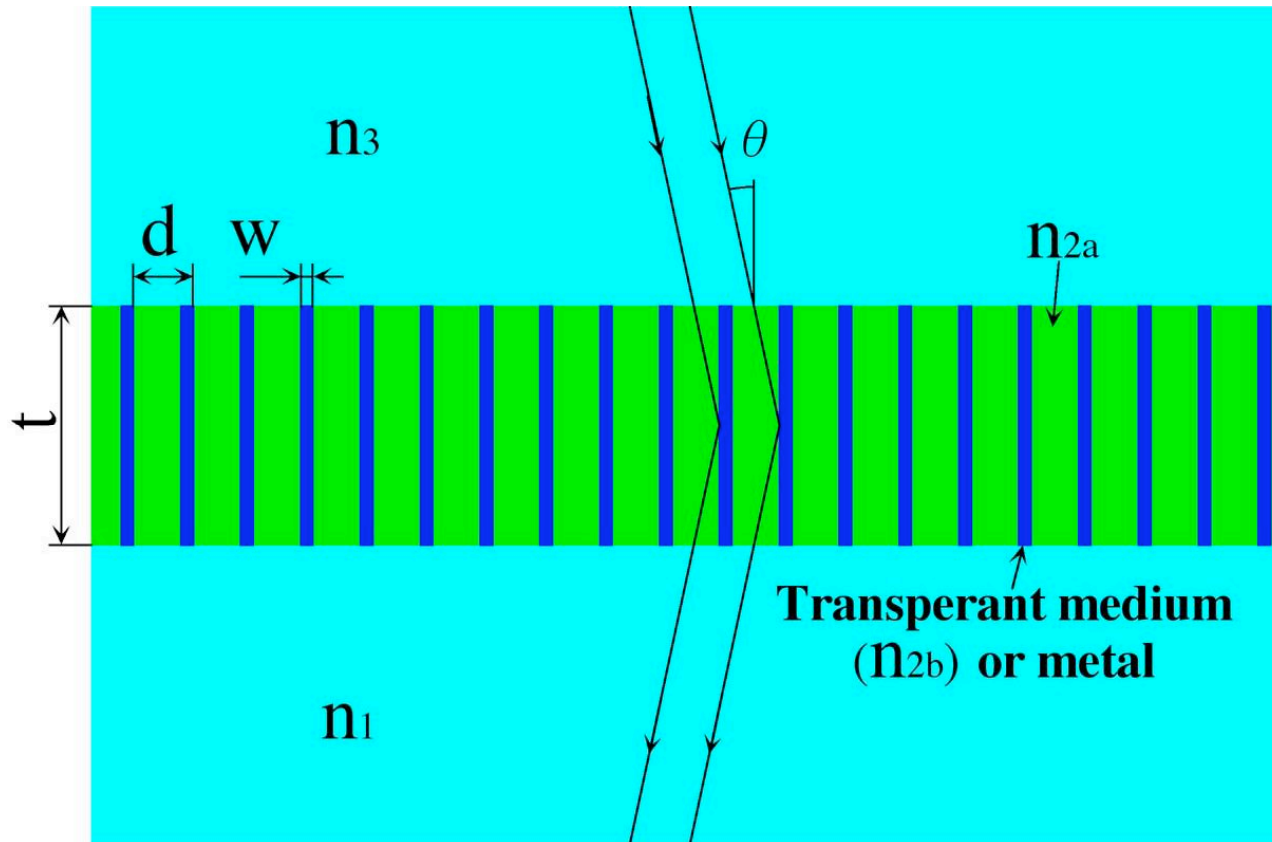
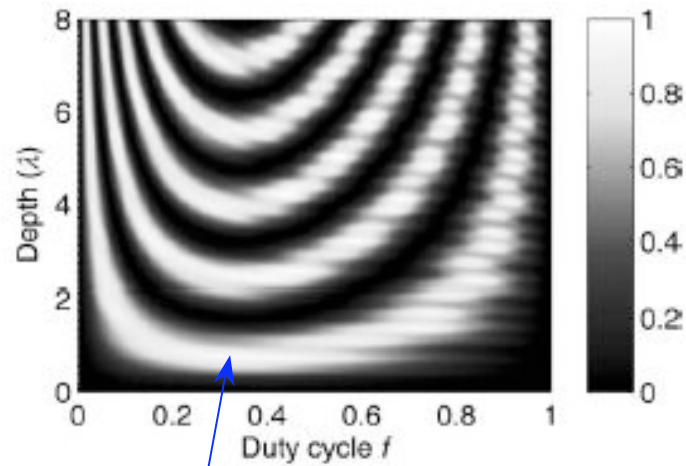


Fig. 2. Theoretical DE of a high-spatial-frequency LC-filled diffraction grating as a function of depth.

(Jepsen, Gerritsen,
Opt. L., 1996)

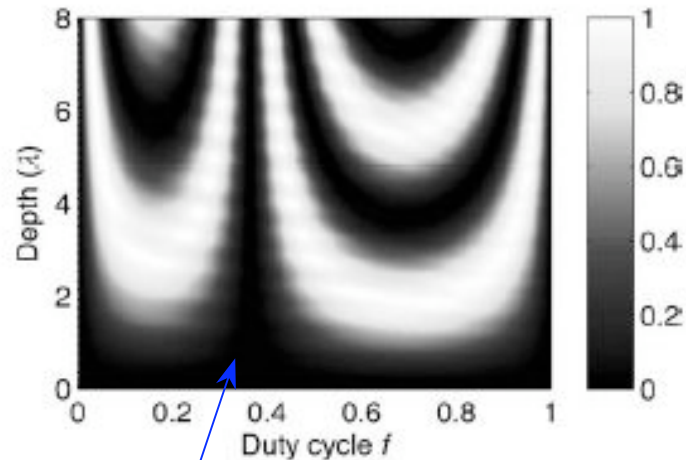
- $\Delta n = (n_{\max} - n_{\min})/2$ を大きくできる。 $\Delta n \sim 0.3$
- Fill factor ($f=w/d$)を調整することによってSとP偏光の特性を一致できる。ただし、アスペクト比が20~50。

透過型 Volume binary grating



効率 ~100%

(a)



効率 0%

(b)

Fig. 2. 1st-order diffraction efficiency versus the duty cycle f and the total grating depth h : (a) TE polarization and (b) TM polarization. The period d of the two-layer grating is 880 nm, the thicknesses ratio h_1/h_2 is 1, and the incident wavelength λ is 1550 nm.

大気中のブラッグ角 61.7°

(Zheng et al., Opt. Com. 282, 2009)

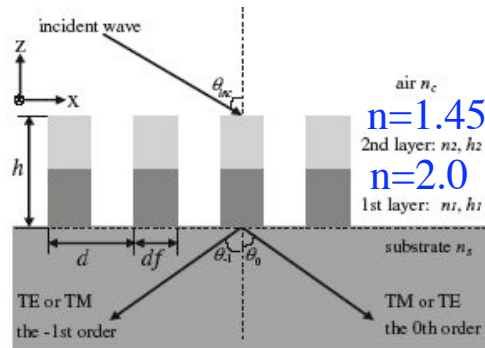


Fig. 1. Schematic of a two-layer dielectric transmission grating. n_c and n_s refractive indices of air and substrate, respectively; d , grating period; h , grating depth; f , grating duty cycle; h_1 and n_1 , thickness and refractive index of the grating ridge of the i th layer ($i=1, 2$), respectively; θ_{inc} , incident angle; θ_0 and θ_{-1} , diffraction angles of the 0th and -1st orders in substrate, respectively.

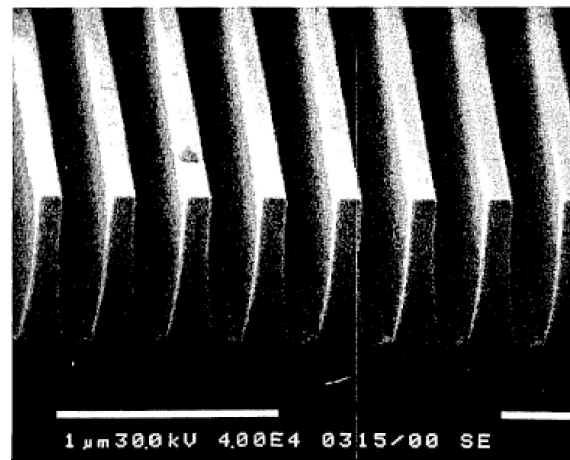
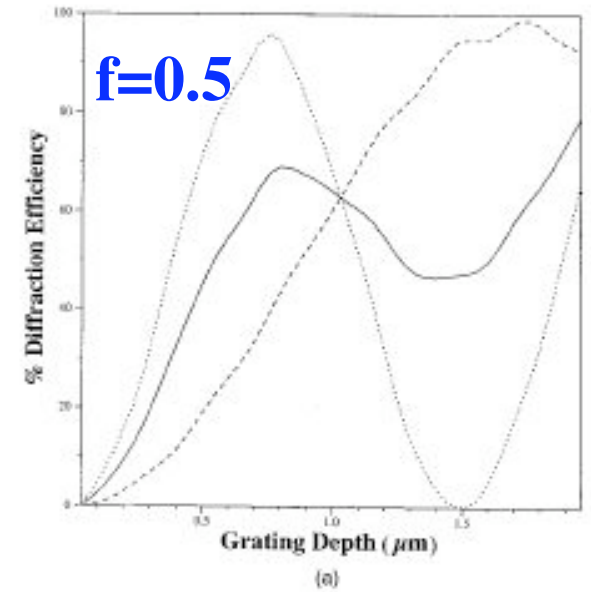


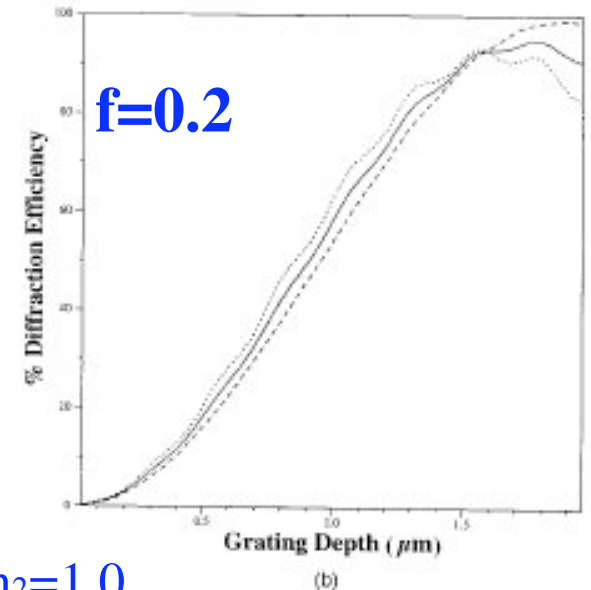
Fig. 1. Scanning electron micrograph of grating lines etched into quartz substrate ($n_s = 1.46$).

$n_1=1.46, n_2=1.0$

(Gerritsen, Jepsen: Appl. Opt., 37,1998)



(a)



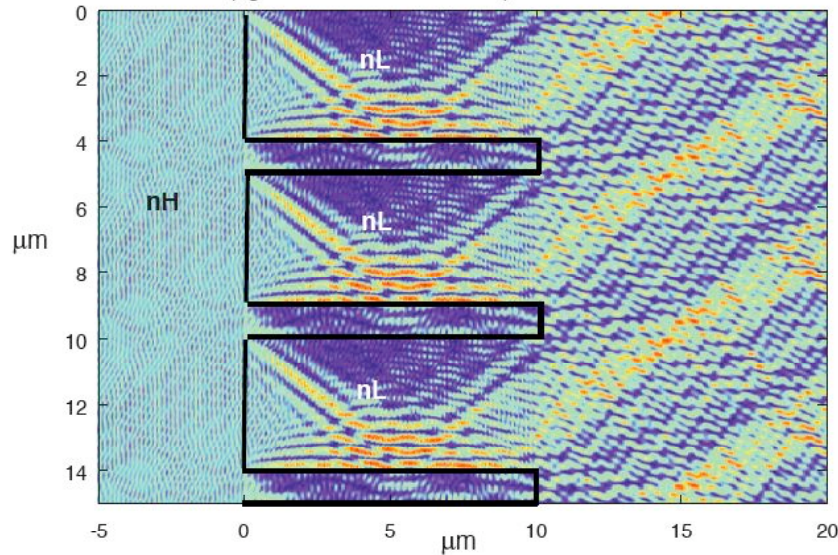
(b)

Fig. 5. (a) First-order diffraction efficiencies for a grating with $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.3889 \mu\text{m}$, $\theta_D = 45^\circ$, $n = 1.50$, and $f = 0.50$. (b) First-order diffraction efficiencies for a grating with $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, $\Lambda = 0.3889 \mu\text{m}$, $\theta_D = 45^\circ$, $n = 1.50$, and $f = 0.80$.

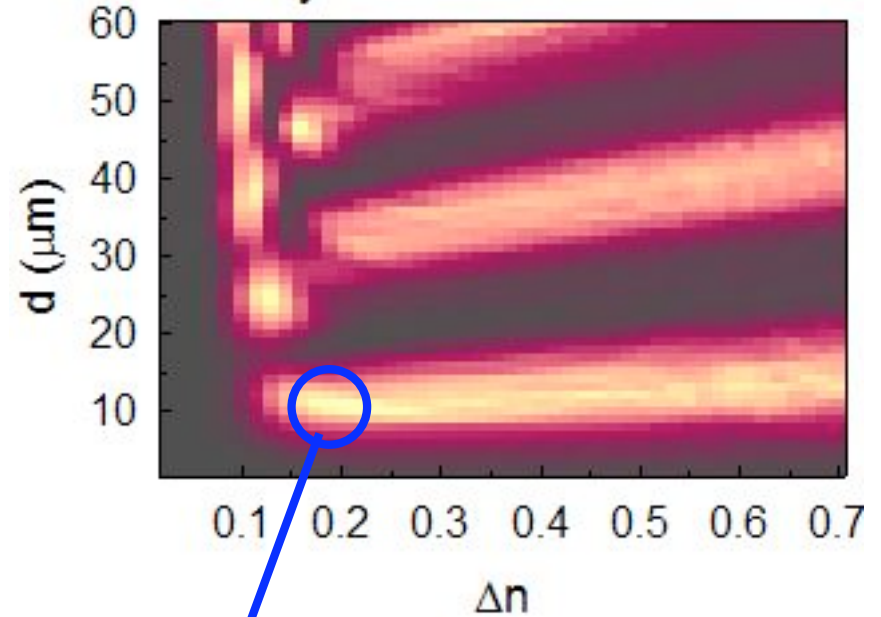
(Gupt & Peng, Appl. Opt., 32, 1993)

高次Volume binary grating

Electric Field distribution over 3 periods
(light comes from the left)



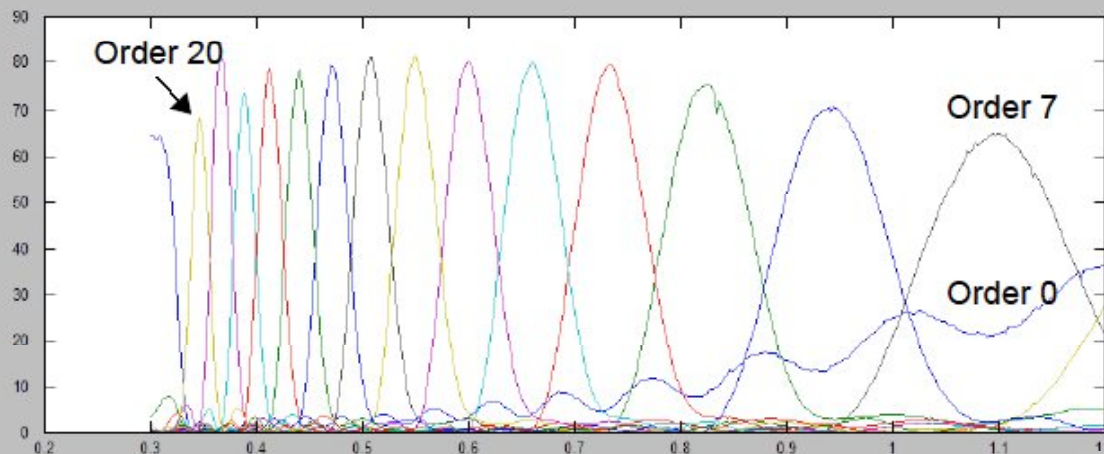
Efficiency at 550 nm - 9:1 extention



$\lambda = 0.55 \mu\text{m}$, $\alpha = 20.44^\circ (= 41.3^\circ \text{in air})$, $nH = 1.89$, $nL = 1.46$, $d = 10 \mu\text{m}$

Configuration 1: ratio 9:1, $d = 11 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.19$

TE efficiency

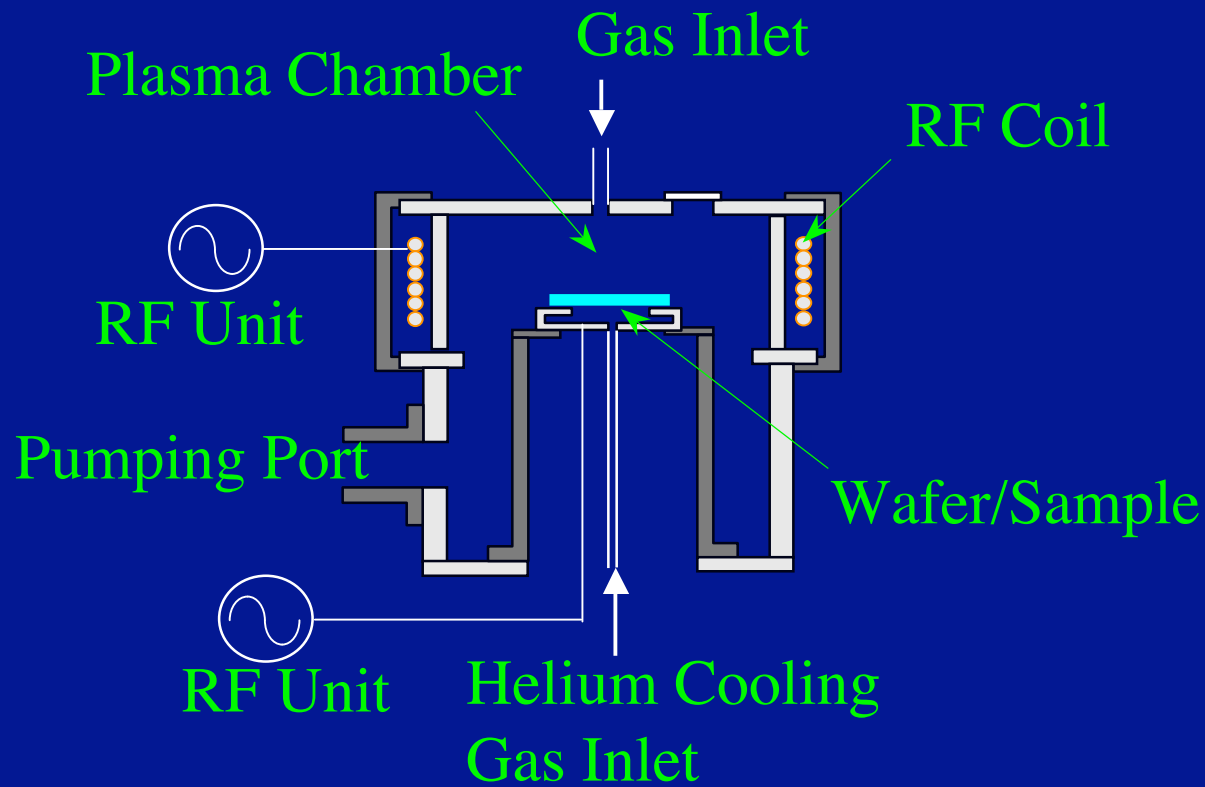


アスペクト比が
20~50。

(Bianco, private communication, 2011)

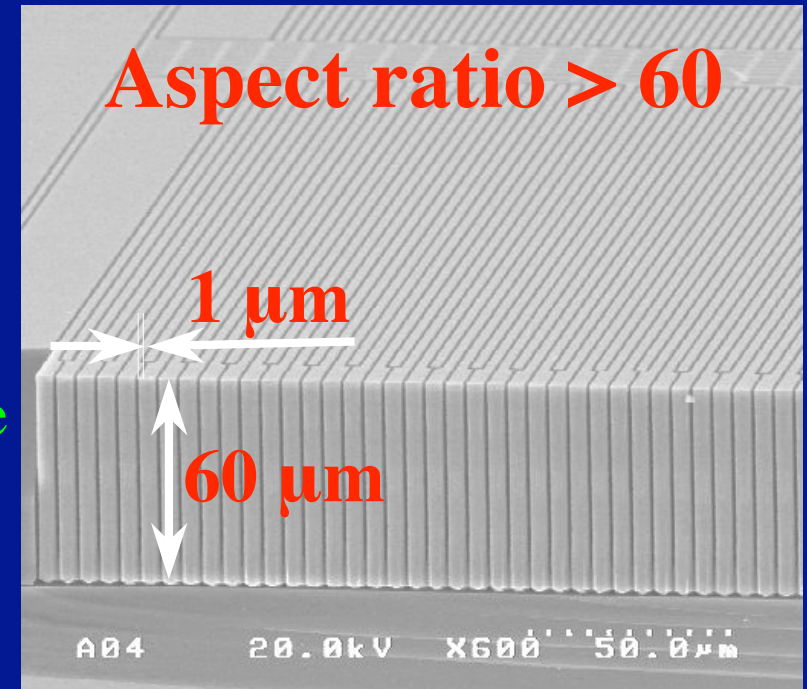
D-RIE (Deep Reactive Ion Etching)

DENSO



ICP Etcher

Inductively Coupled Plasma

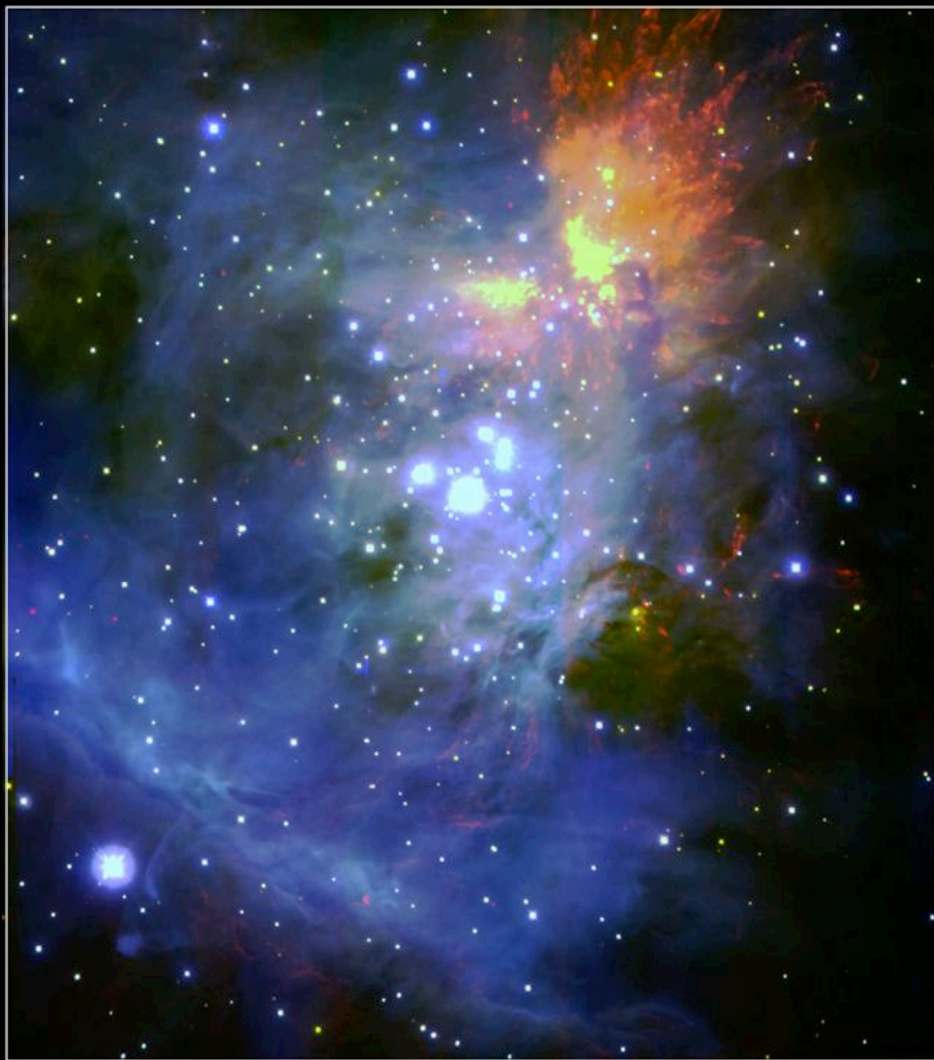


静電容量式加速度センサ

© DENSO CORPORATION All rights reserved.

ナノインプリント、面積 (~ $\phi 400$)、コストが難点。
大口徑フラットディスプレイの製造技術が有望!?

Immersion Grating



Orion Nebula

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, K' & H₂ (v=1-0 S(1)))

January 28, 1999



Star-forming Region S106 IRS4

Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

CISCO (J, H, K')

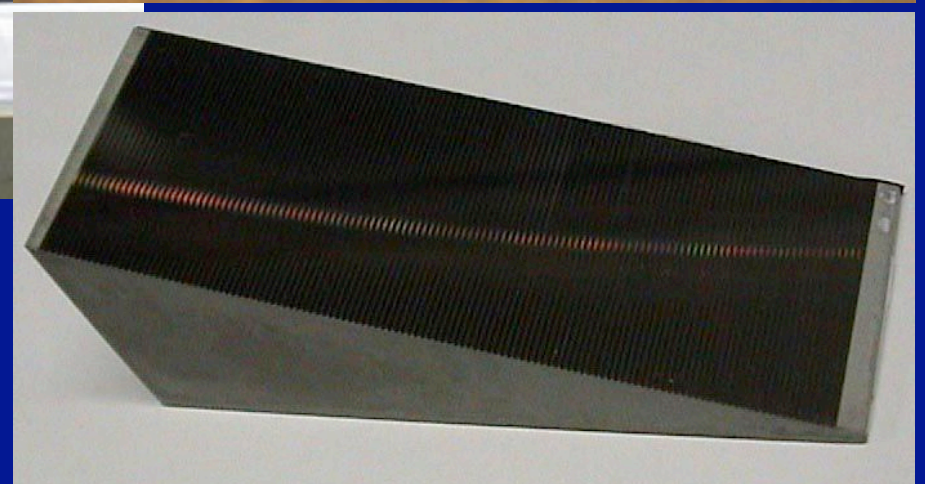
February 13, 2001

Copyright© 2001 National Astronomical Observatory of Japan, all rights reserved

GIGMICS用 Immersion gratingの開発



超精密加工装置
およびELID研削
加工法、
30 x 30 x 72 [mm],
 $\alpha = 68.75^\circ$



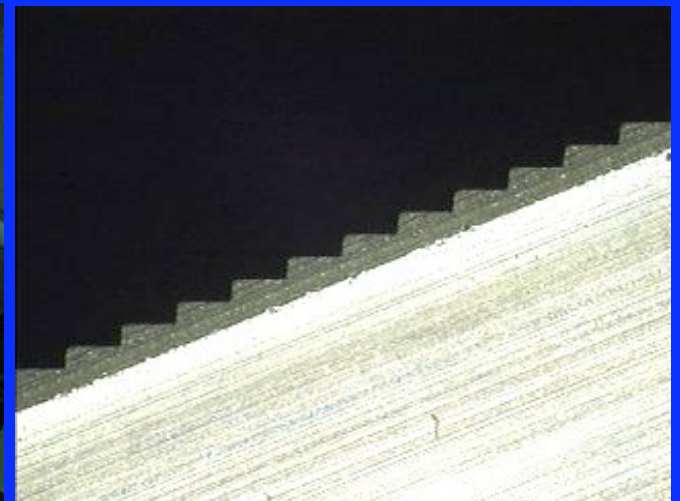
加工時間約400時間

[Ebizuka et al., Proc. SPIE 2003, 2006]

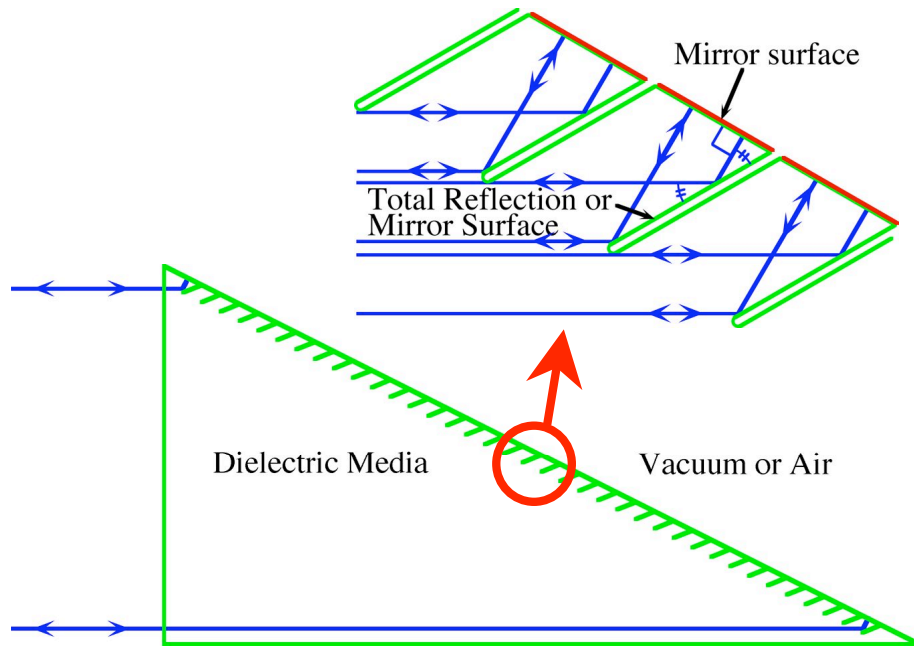
IRHS用Immersion gratingの試作



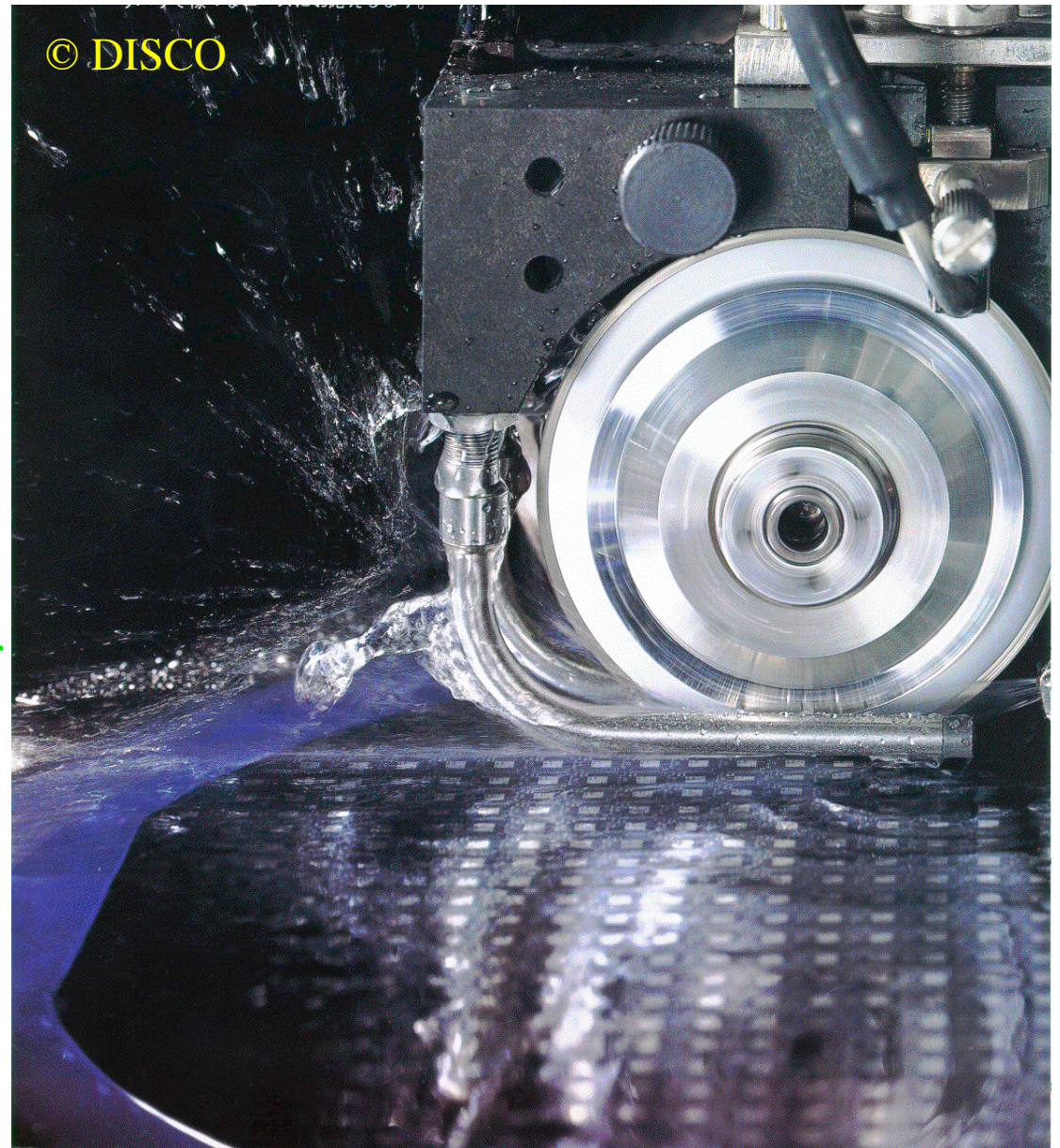
R \sim 200,000@10 μ m → サイズ: 120 x 120 x 270 mm
→ 加工時間: 数 1000 時間?



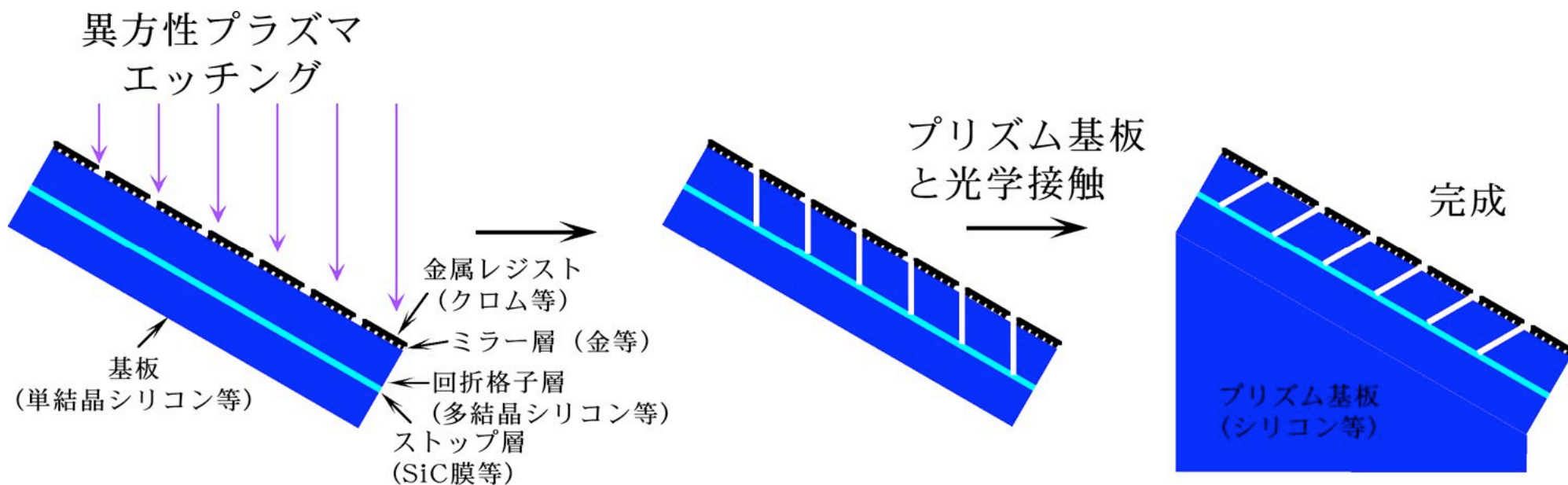
スリット状格子の新しいImmersion grating



- ダイシングソーは表面仕上が滑らか。
- ツルーイングが容易。
- 実機: 120 x 120 x 270 mm の加工 → 数100 時間?

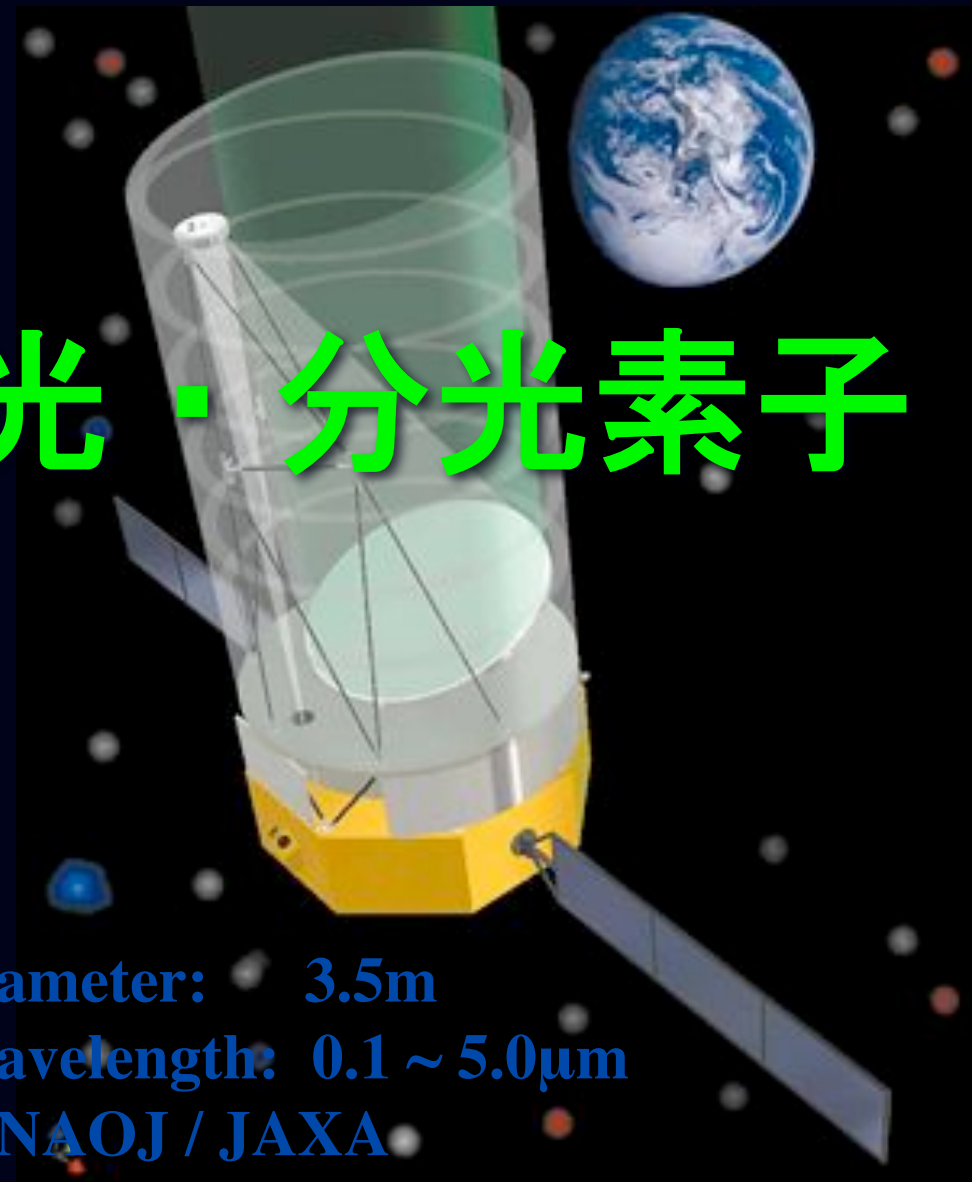


可視近赤外線用Immersion gratingの製作法



JTPF : Japan Terrestrial
Planet Finder

広波長帯域偏光・分光素子



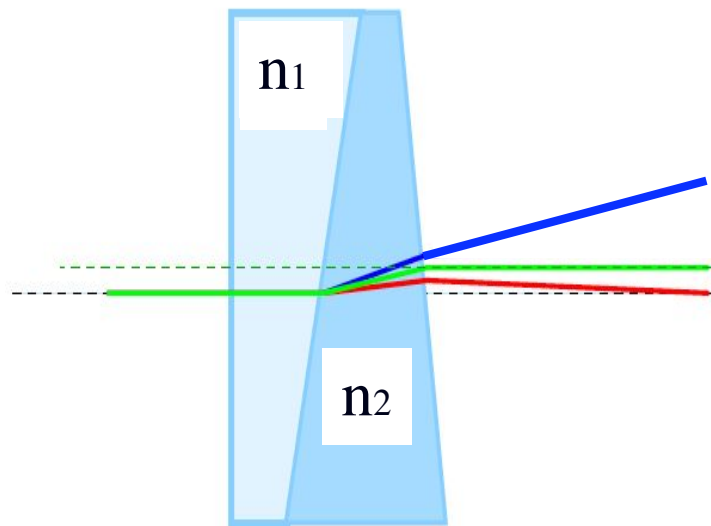
Diameter: 3.5m
Wavelength: 0.1 ~ 5.0 μ m
© NAOJ / JAXA

Subaru Laser Guide Star
© Subaru Telescope, NAOJ

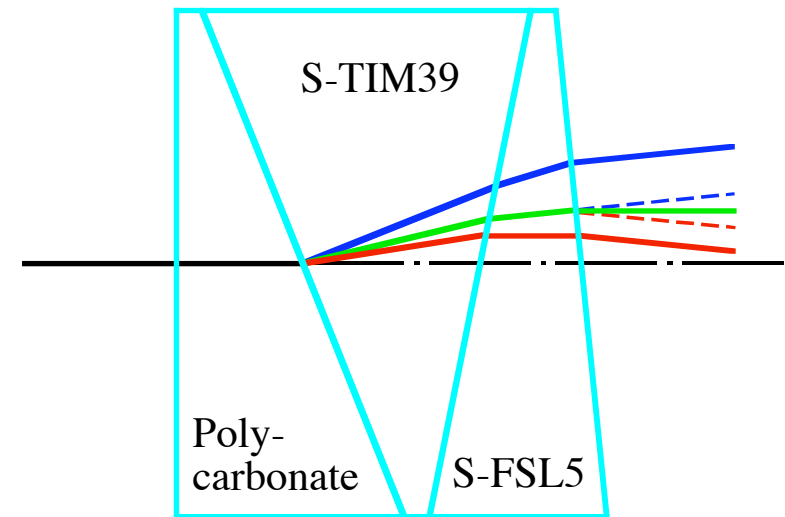
Subaru Telescope, NAOJ

広波長帯域低分散分光器

- 8.2m望遠鏡の回折限界 : 0.03" @ 1.0 μm
→ スリット幅 : 1/33 (vs. 1.0" seeing)
→ 分解能 : $\times 33$
300本/mm@1.0"スリット → 9本/mm@回折限界
→ プリズム分光器が利用できる。

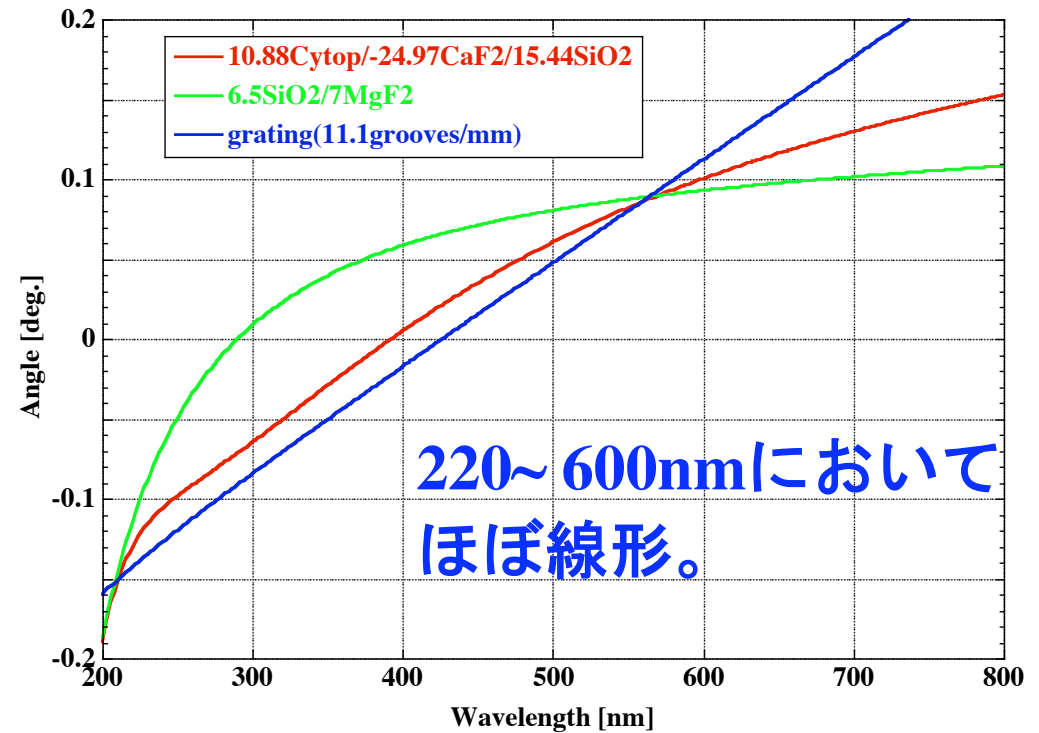
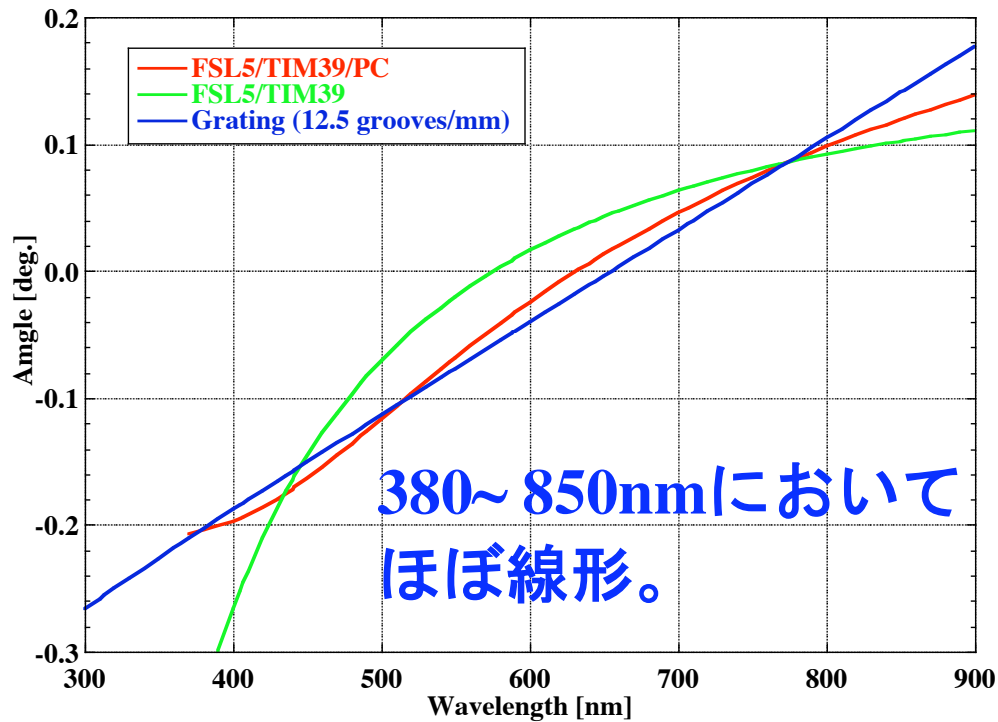


従来の直視プリズム



新しい直視プリズム

線形角度分散の直視プリズム

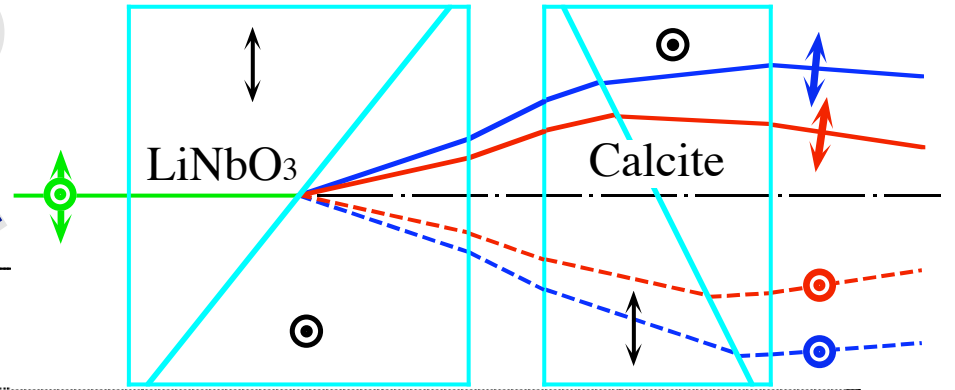


Visible		A2/A3
S-FSL5 (オハラ)	: 7.8°	
S-TIM39 (オハラ)	: -27.3°	
PC	: 22.7°	
S-FSL5	: 12.0°	(Fitted in 350~1000nm)
S-TIM39	: -10.7°	
透過型回折格子	: 12.5本/mm	

UV-Visible		A2/A3
Cytop (旭硝子)	: 10.9°	-50
CaF2	: -25.0°	112
Silica	: 15.4°	125
CaF2	: 7.0°	(Fitted in 200~1000nm)
Silica	: -6.5°	
透過型回折格子	: 11.1本/mm	

波数に線形、分解能一定も可能。

LiNbO₃と方解石の Wollastonプリズム

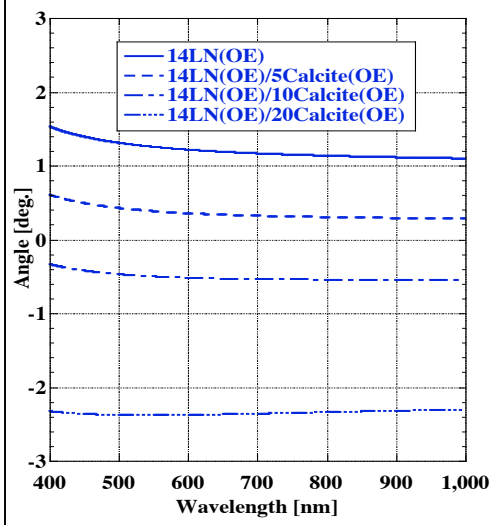
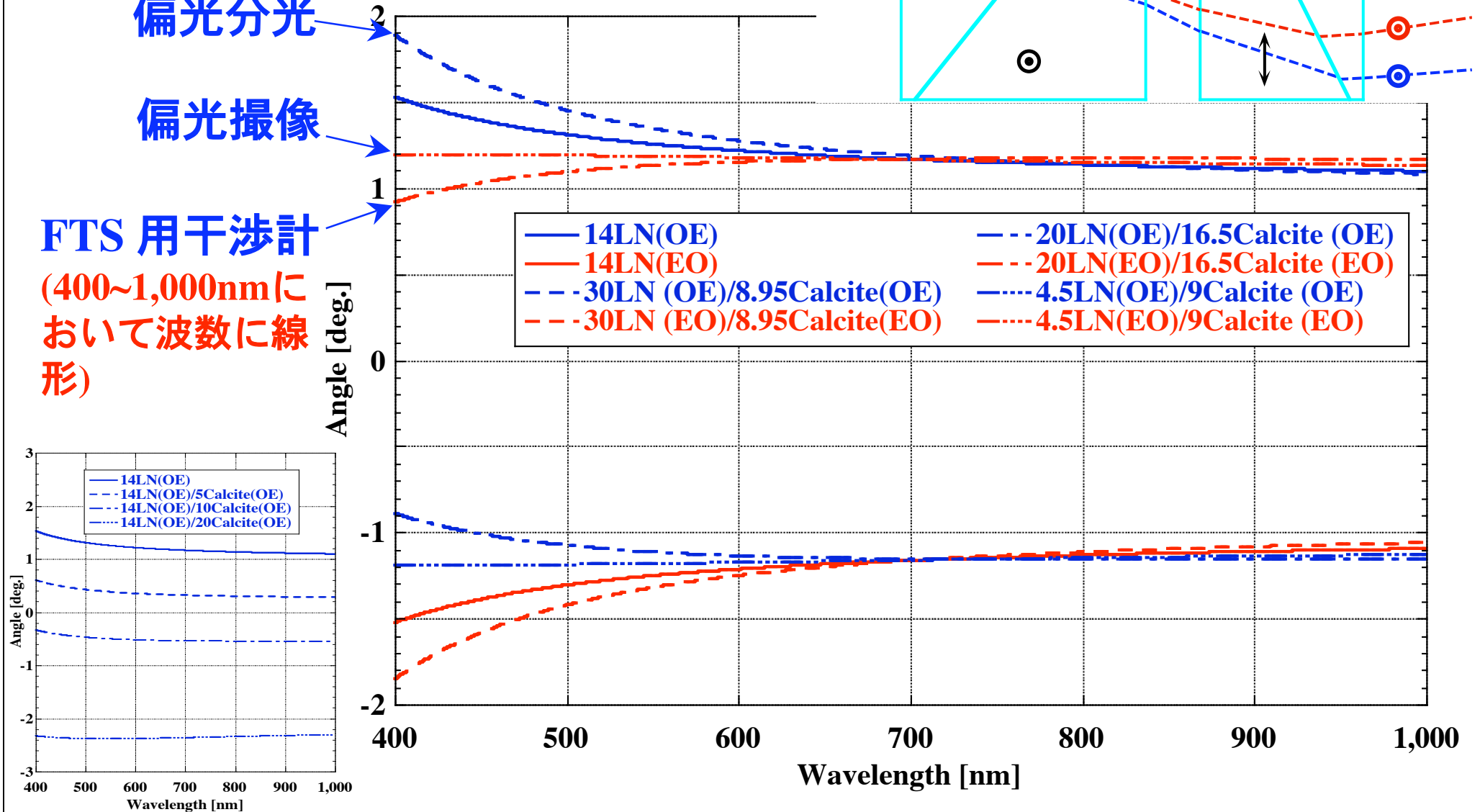


偏光分光

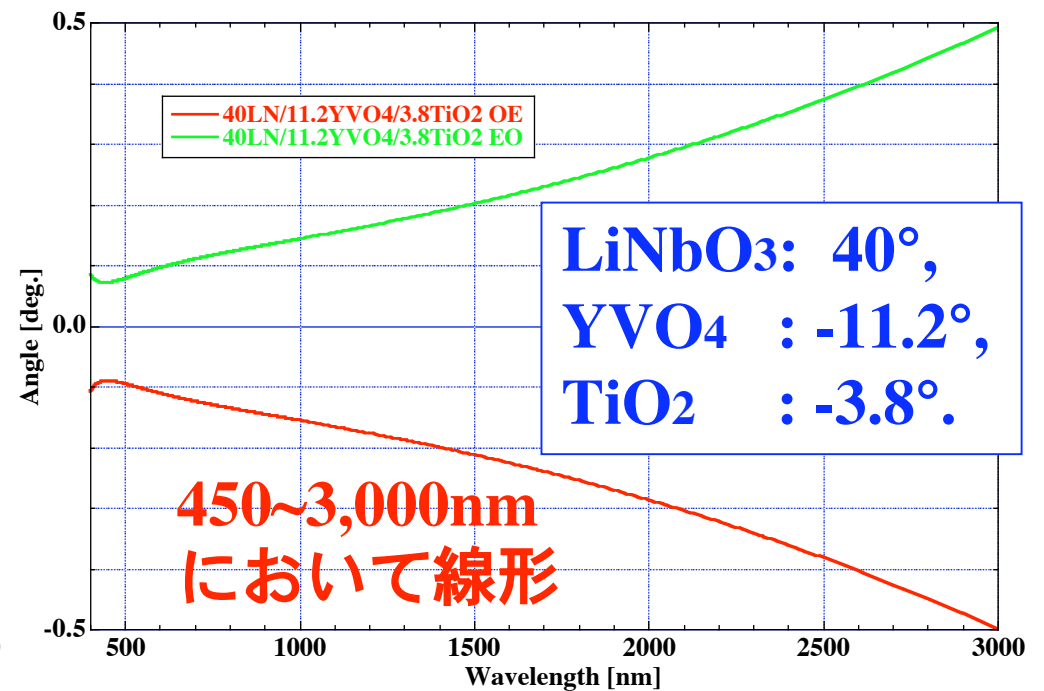
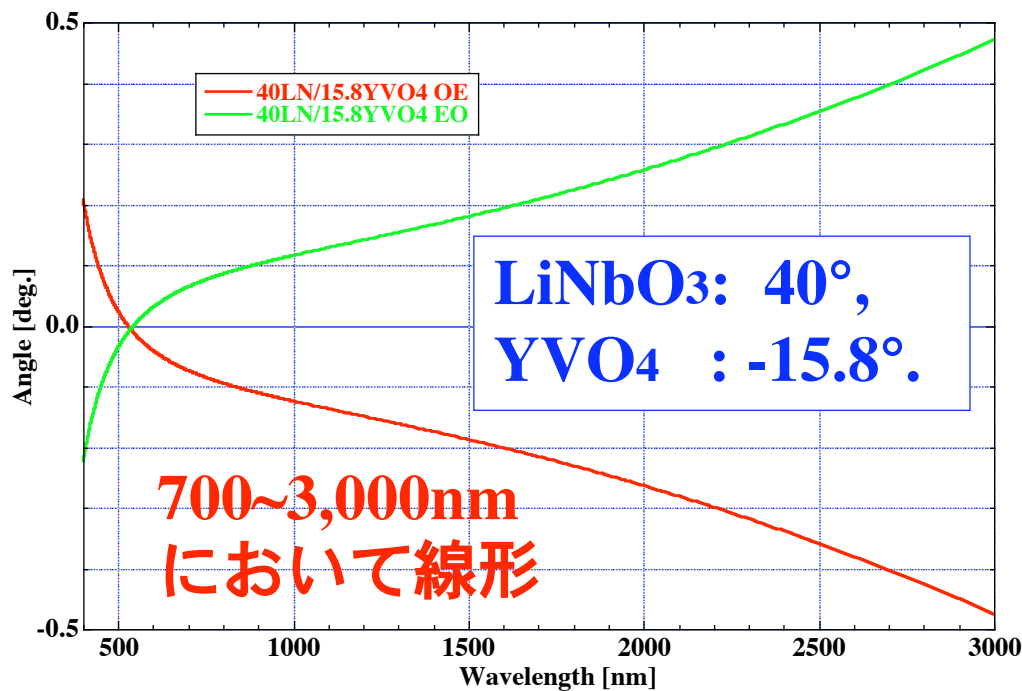
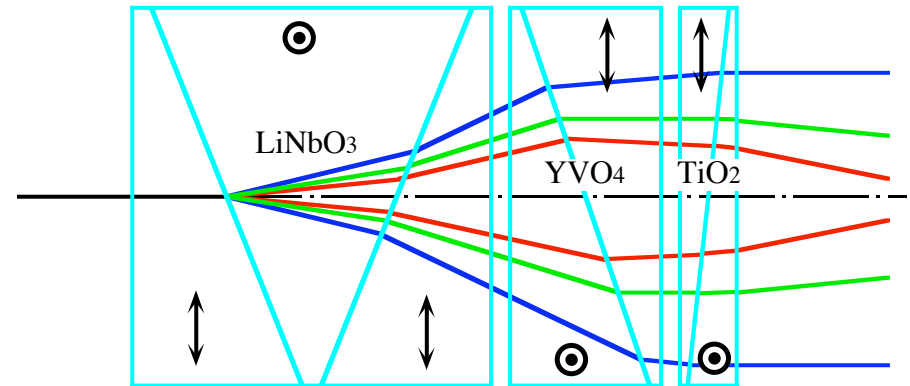
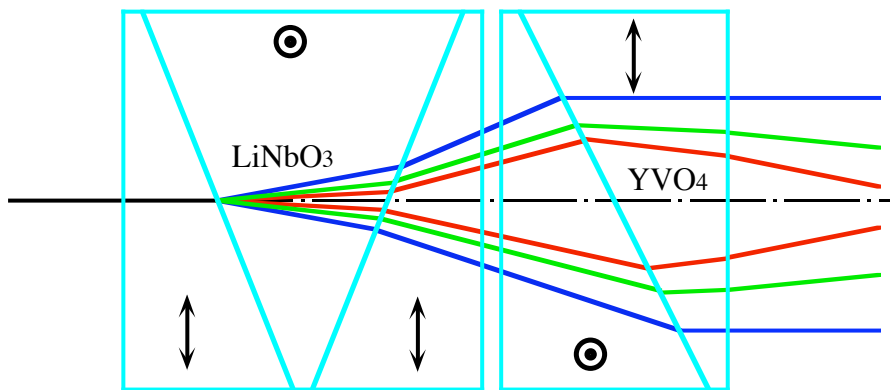
偏光撮像

FTS 用干渉計

(400~1,000nmに
おいて波数に線
形)



LiNbO₃とYVO₄, TiO₂の Wollastonプリズム



まとめ

- VPH gratingは表面刻線型回折格子と比べて高分散、高効率、高い波面精度を達成。
中低分散もOK。
- Volume binary gratingは高次回折光でも高効率。
- プラズマナノ工学によってVolume binary gratingや可視近赤外線用Immersion gratingの開発を計画中。
→大型フラットパネルディスプレイの製造技術。
- 回折限界の光学系において直視プリズムは広帯域分光観測、Wollastonプリズムは広帯域偏光分光観測に有効。