

回折限界観測装置用の 偏光・分散光学素子

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),

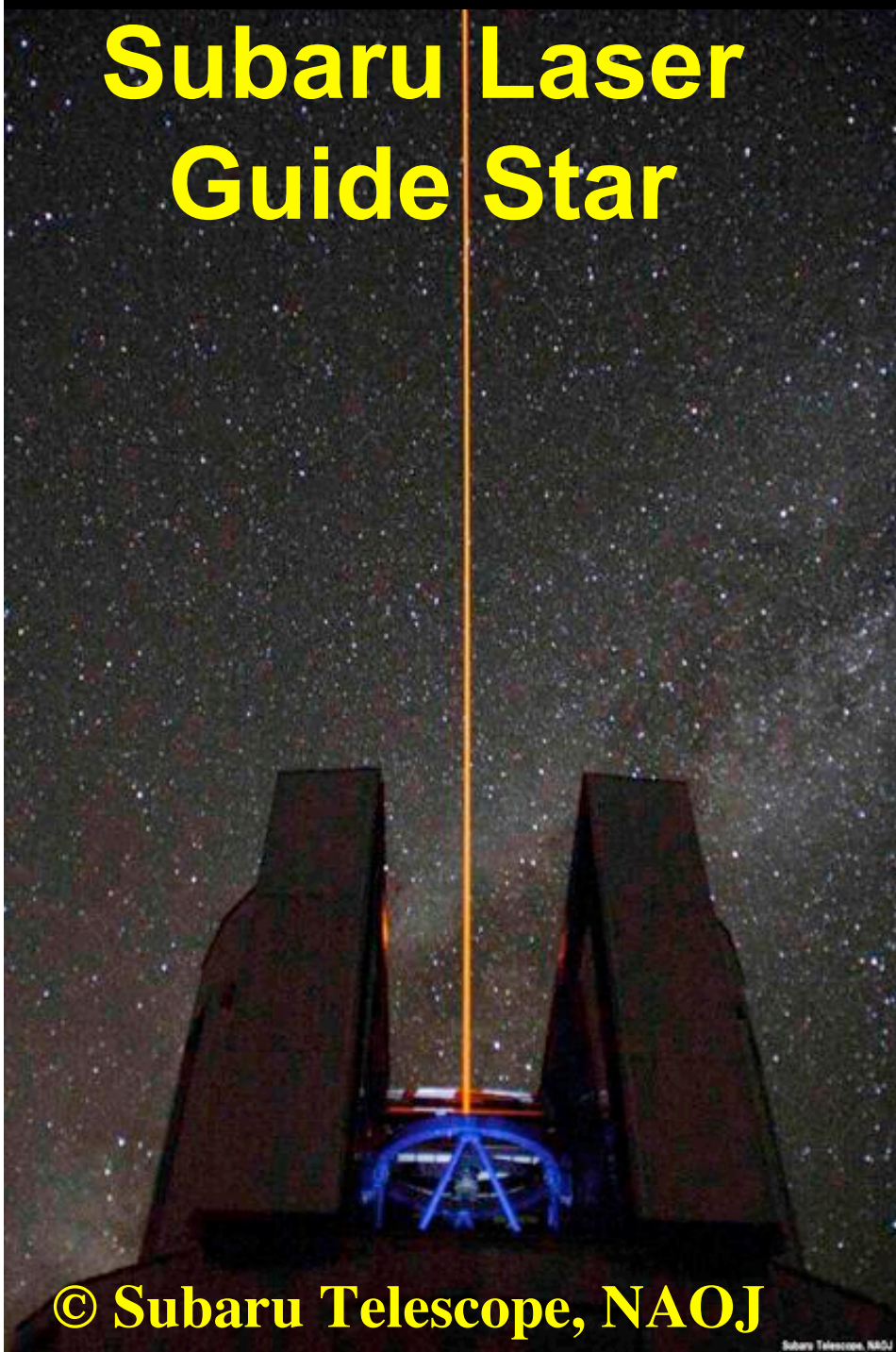
Andrea Bianco, Filippo Maria Zerbi
(INAF Osservatorio Astronomico di Brera, Italy),

青木 和光
(国立天文台 光学赤外線部),

佐藤 修二
(名大院 寄付講座)

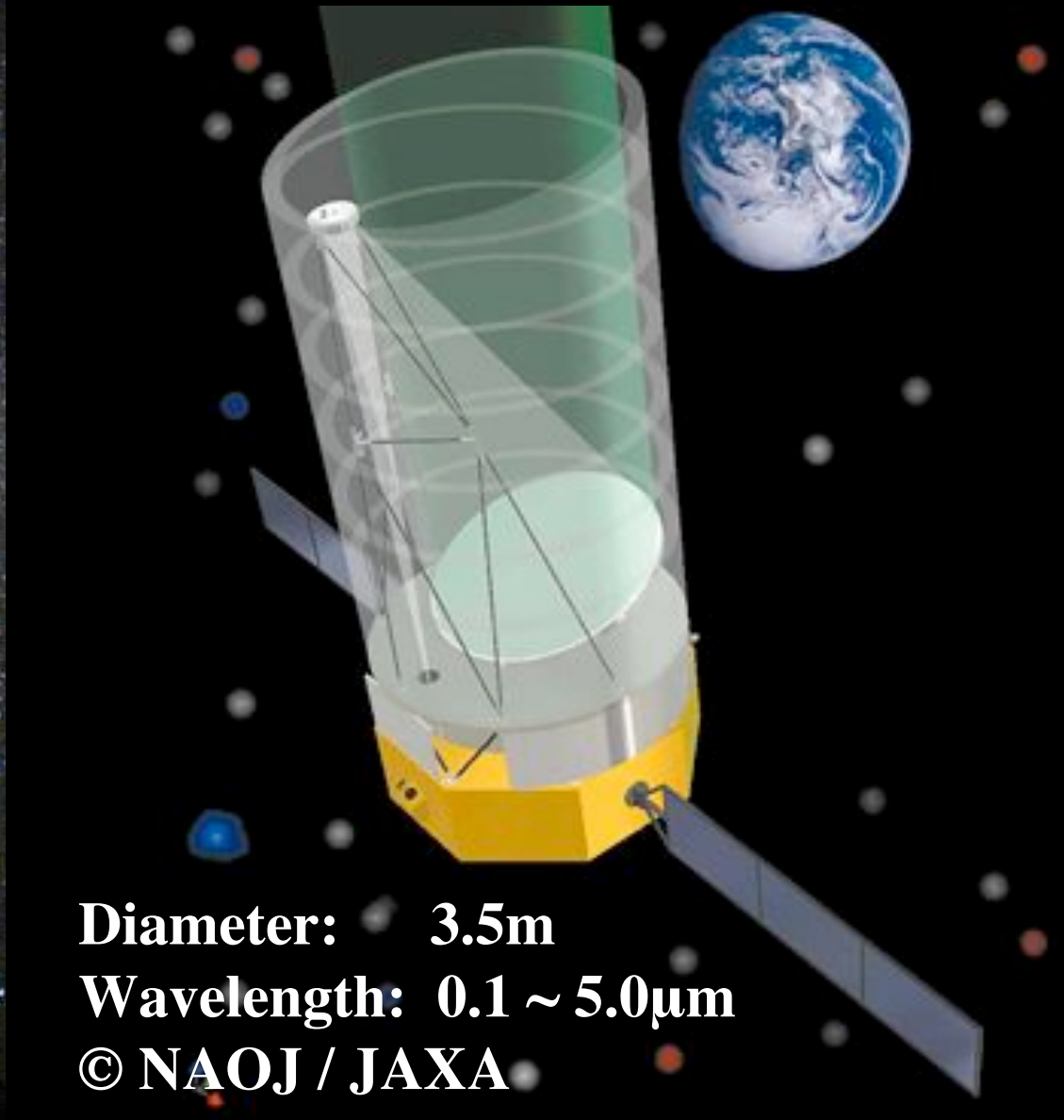


Subaru Laser Guide Star



© Subaru Telescope, NAOJ

JTPF : Japan Terrestrial Planet Finder

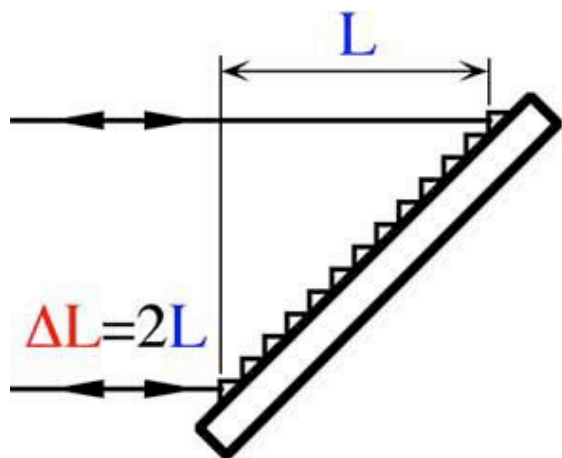


Diameter: 3.5m
Wavelength: 0.1 ~ 5.0 μ m
© NAOJ / JAXA

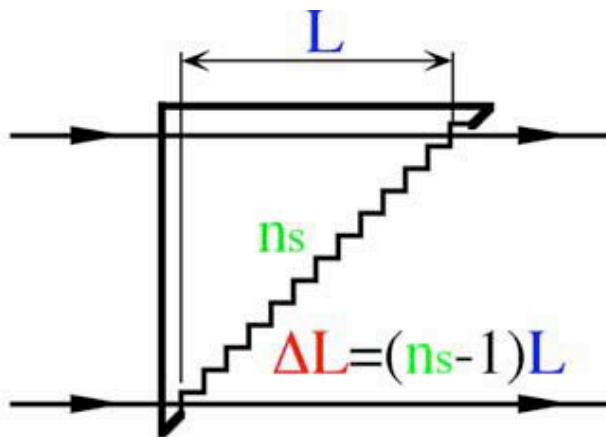
8.2m望遠鏡用R~ 100,000@1 μ m の分光器

	Natural seeing: 0.5''	回折限界: 0.03''	備考
スリット幅	240 μ m	15 μ m	F/12.2
コリメータ直径	0.54 m	0.033 m	$\theta = 70^\circ$ の 反射型回折格子
コリメータ f	6.5 m	0.41 m	F/12.2
分光器サイズ L \times W \times H [m]	7.5 \times 1.6 \times 0.8	0.5 \times 0.1 \times 0.05	ツェルニ・ ターナー分光器
カメラF値	F/2.3	F/37	15 μ m \times 3 pix.
光学素子面精度	$\sim 3\lambda$	$< \lambda/20$	rms

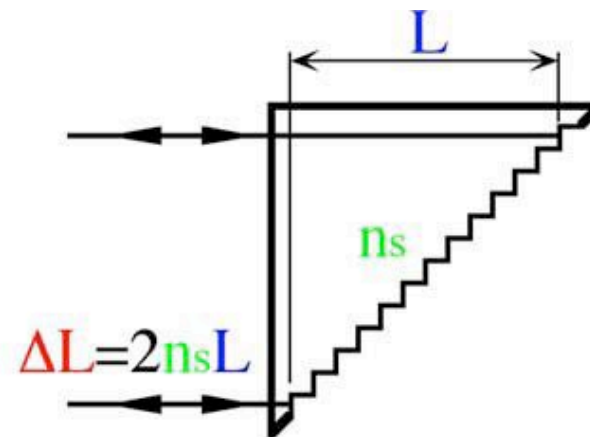
各種回折格子



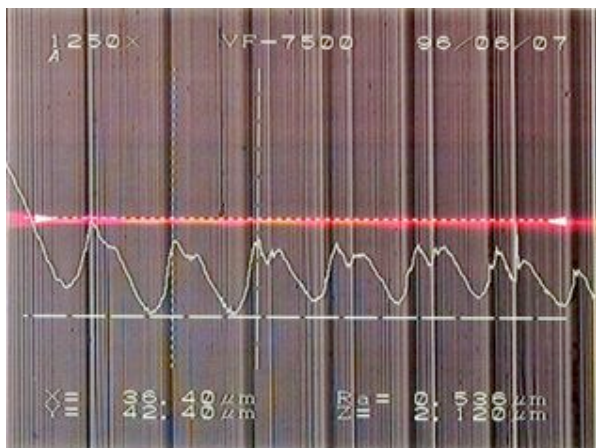
(a) Reflection grating



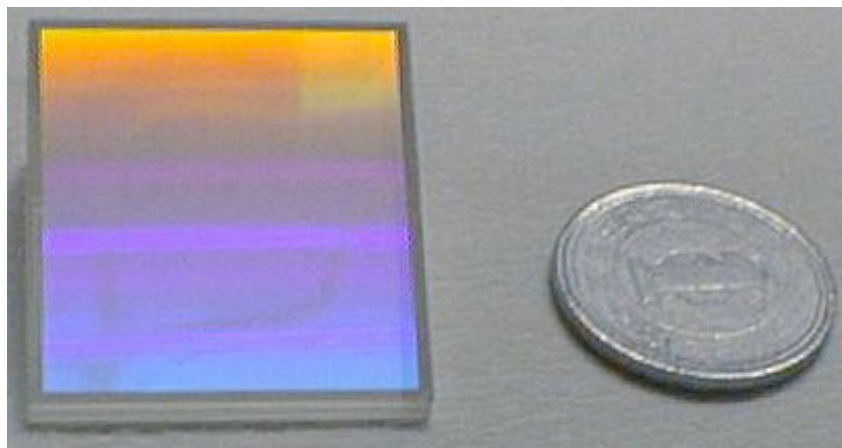
(b) Grism



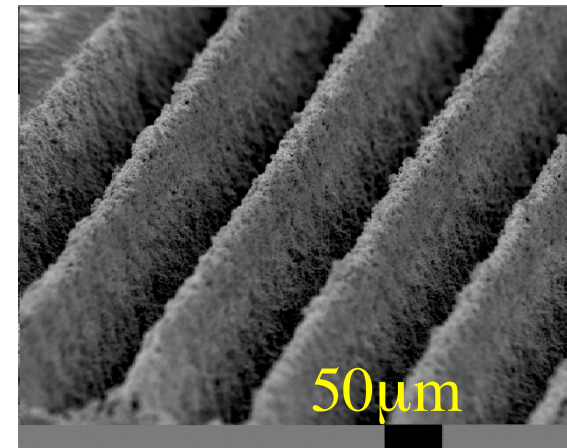
(c) Immersion grating



LiNbO₃ (n = 2.3) grating, 30 g/mm, ダイニングソー

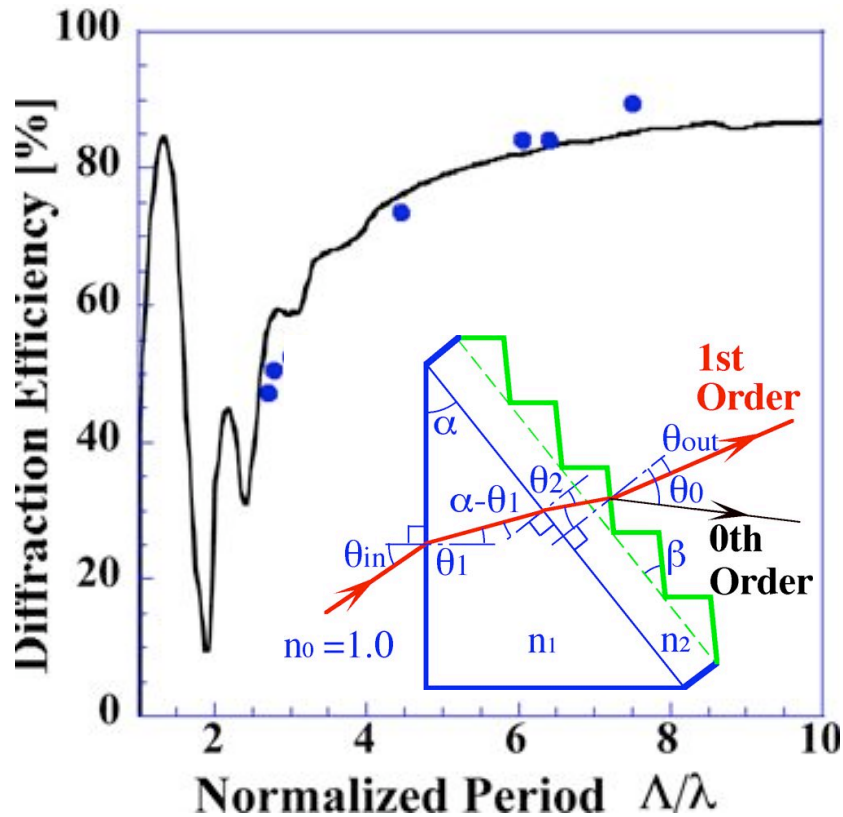


LiNbO₃ (n = 2.3) グリズム, 444 g/mm, イオンエッチング (Ebizuka et al., SPIE 3355, 1998)

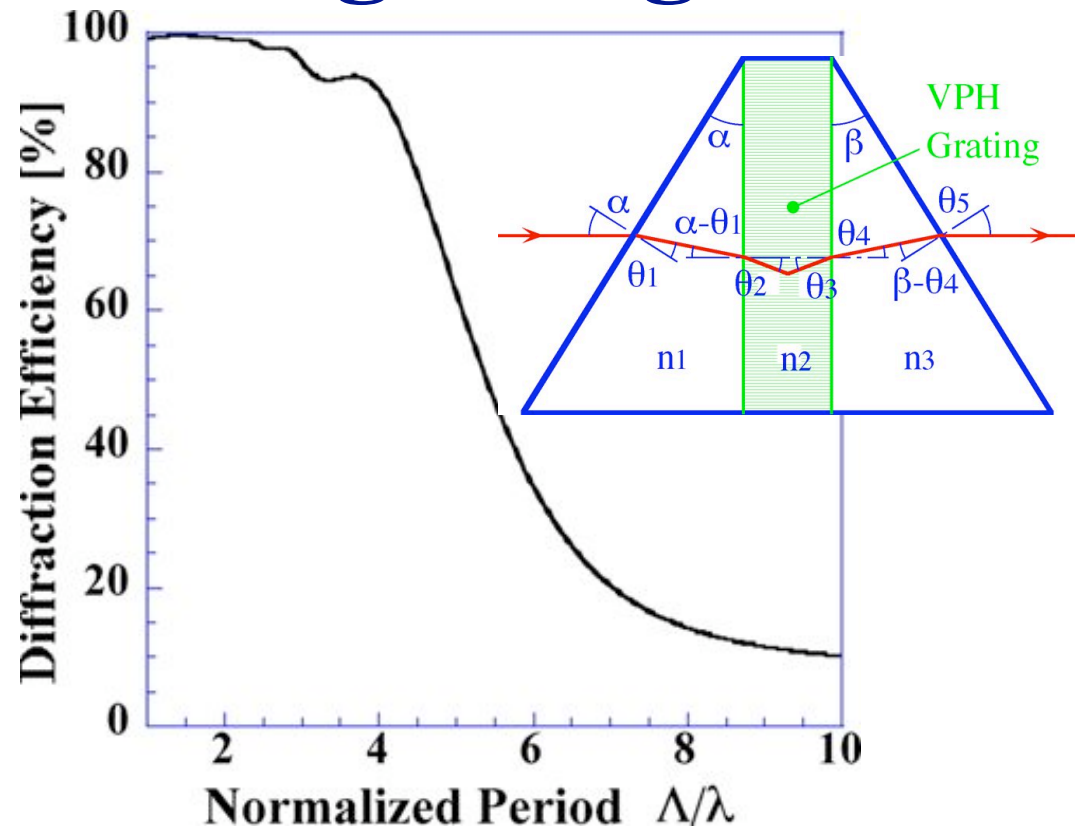


Ge (n=4.0) grating, エキシマレーザ アブレーション

表面刻線型とVPH grating



表面刻線透過型grating：
 格子間隔が波長の4倍以下
 で効率が急激に低下。
 透過波面精度が問題。

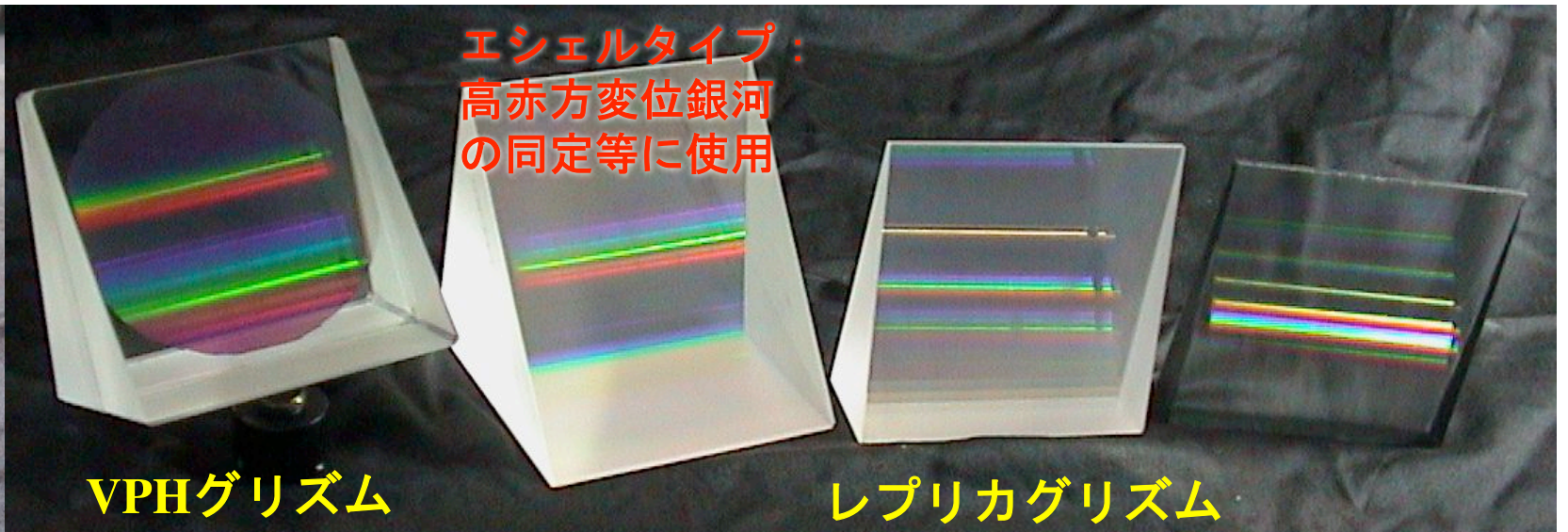


透過型VPH grating：
 格子間隔が波長の4倍以下で
 高効率 ($\Delta n \sim 0.02$)。
 透過波面精度が比較的良い。

(Oka et al., SPIE 5005, 2003)



ZnSeプリズムの
VPHグリズム



エッセルタイプ：
高赤方変位銀河
の同定等に使用

VPHグリズム

レプリカグリズム



FOCAS用 各種グリズム

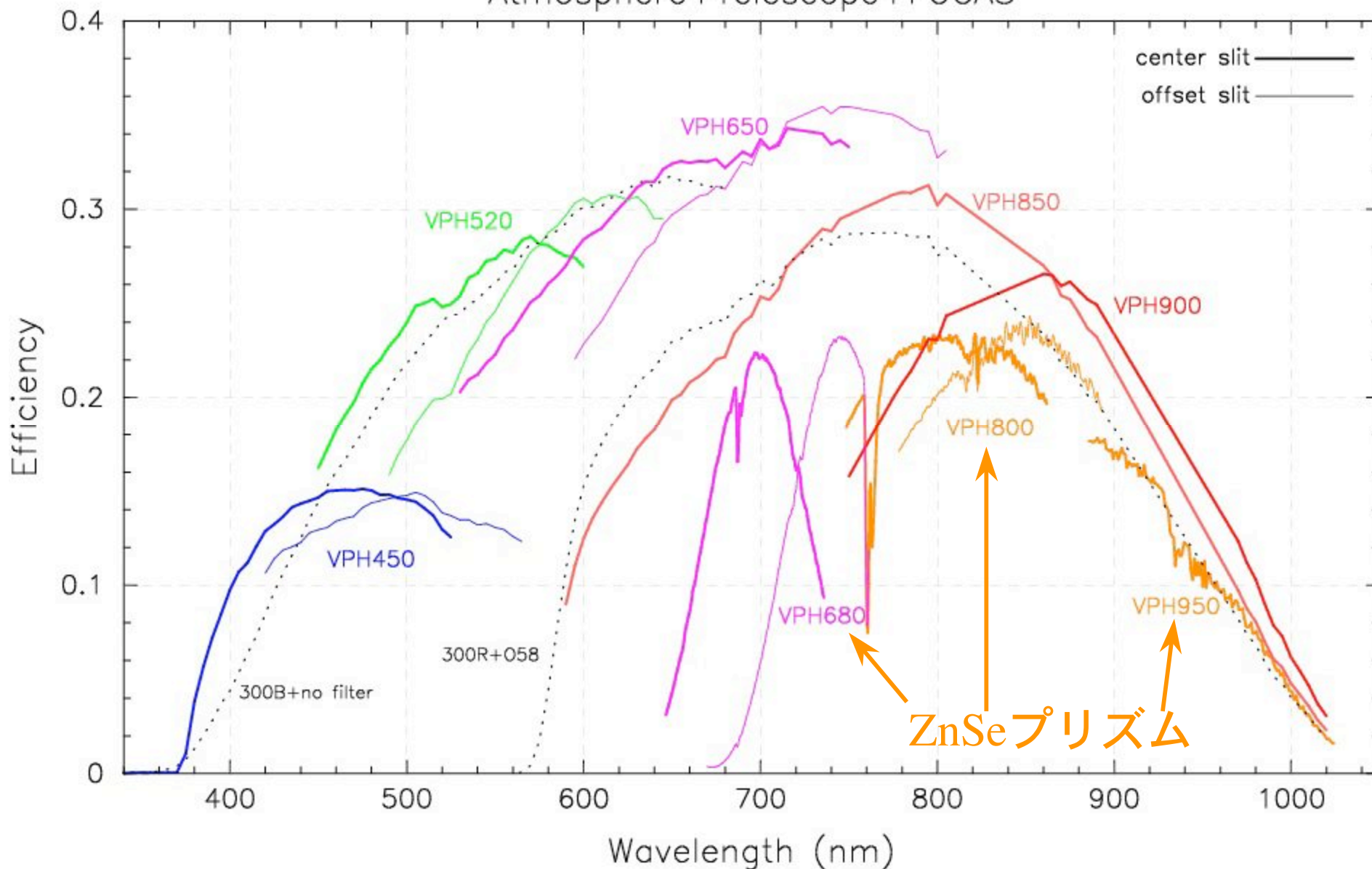
$300 < R < 8,000$

サイズ: $110 \times 106 \times 106$ (max)
VPHグリズムは主に日本女子
大学、理研、甲南大学、国立
天文台との共同開発。

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

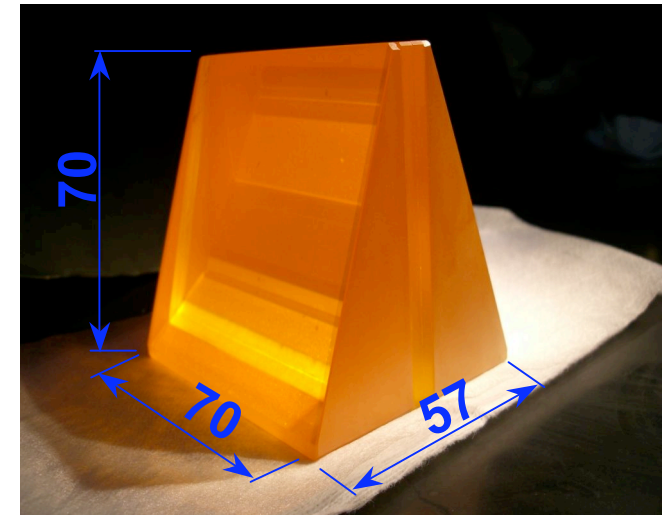
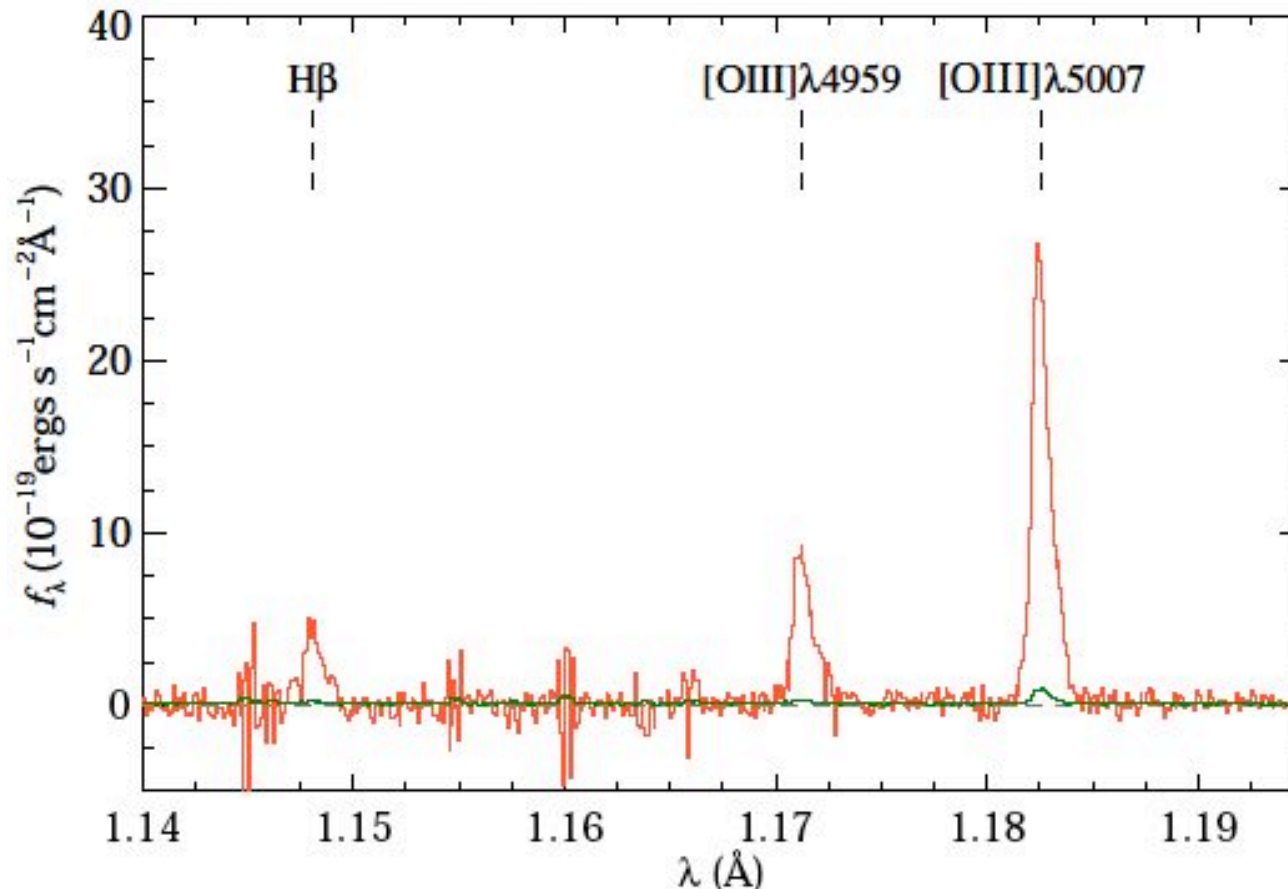
FOCAS用グリズムの効率

Atmosphere+Telescope+FOCAS

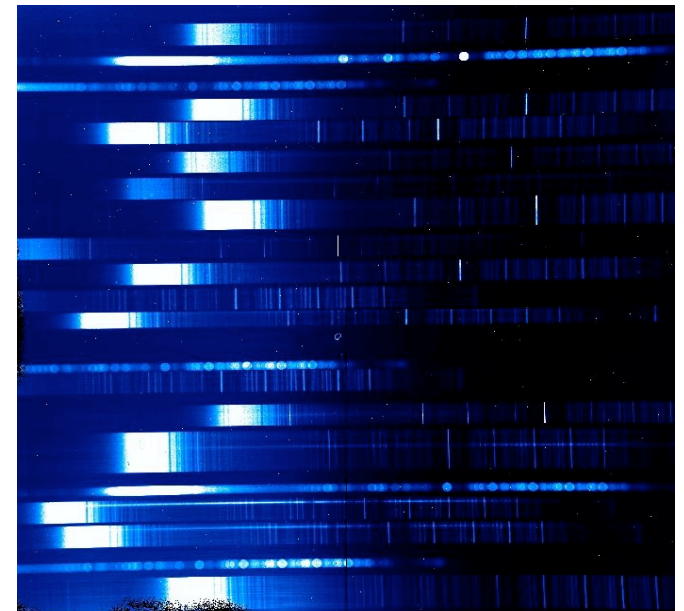


<http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/FOCAS/spec/efficiency.html#vph>

遠方銀河のスペクトル ($z = 1.618$)



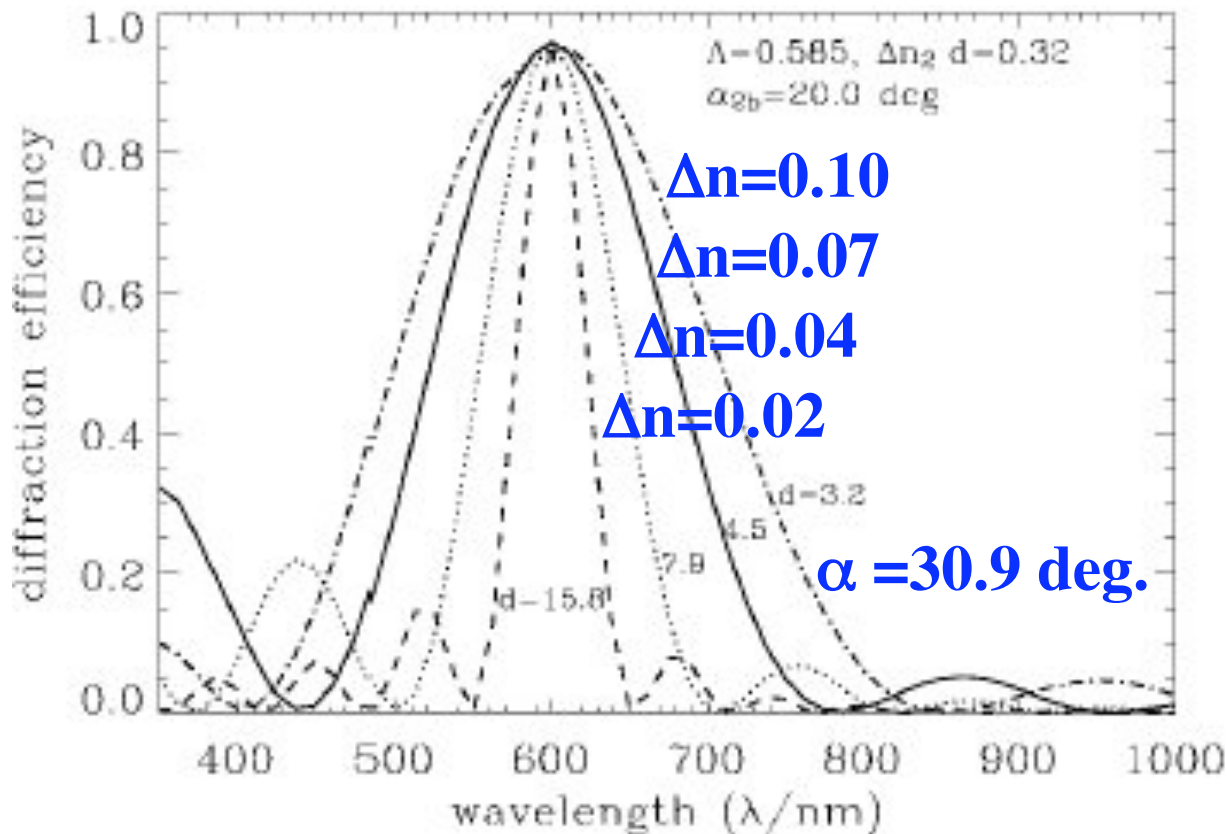
Size: 70 x 70 x 57 (max) mm.



MOIRCS用JバンドVPHグリズム, 0.8" スリット、
小野寺氏 (Institute for Astronomy, ETH Zurich) 提供。

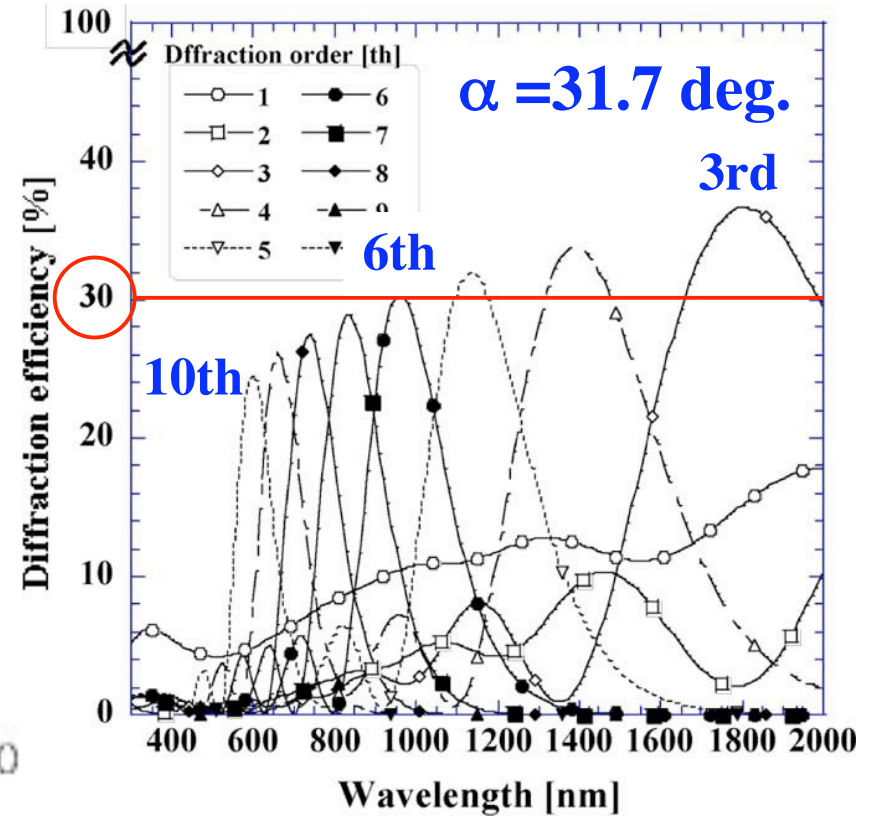
(Ichikawa et al., SPIE 7014, 2008. Ebizuka et al., PASJ 63, 2011b)

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： $\Delta n = (n_{\max} - n_{\min}) / 2 < 0.15$ 。

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



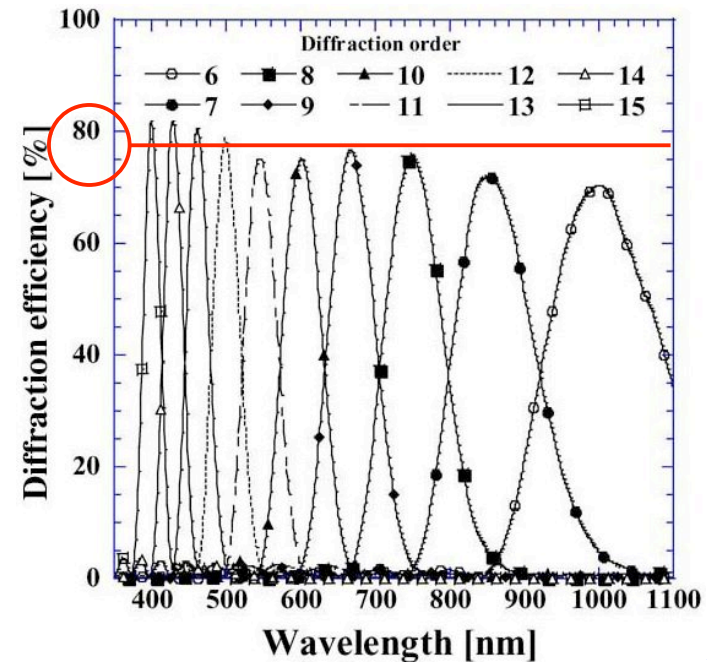
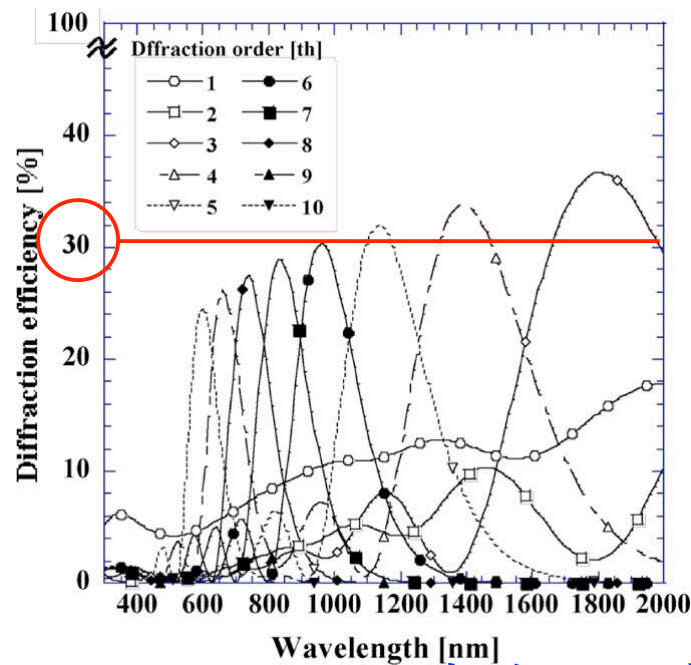
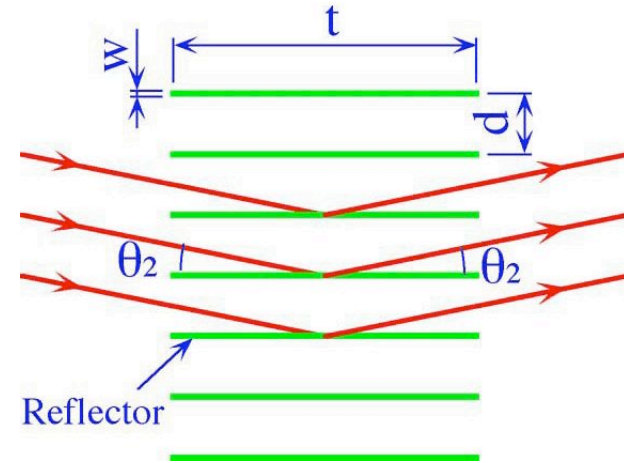
VPH gratingは回折次数が高いほど、回折効率が低下する。

(Oka et al., SPIE 5290, 2004)



Quasi-Bragg grating

- 高次gratingと垂直分散素子を組合わせたEchelle分光器は2次元検出器を有効に利用できる。
- SR gratingの波長特性は変えられない。
- VPH gratingの回折効率は高次で低下。

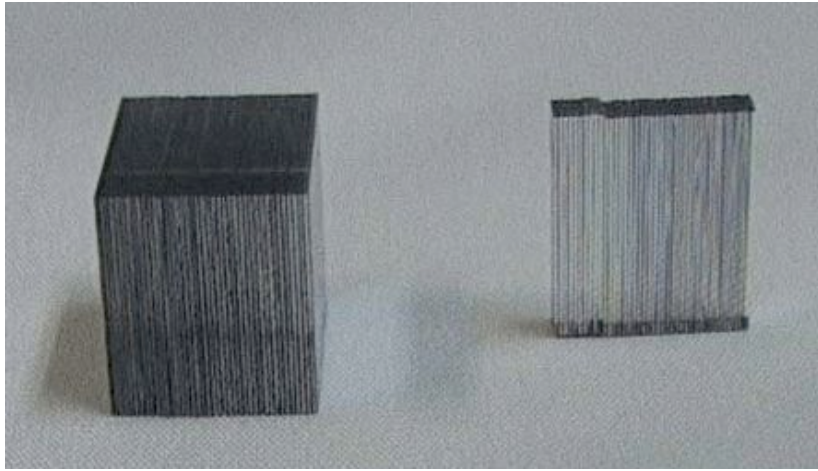


VPH gratingの高次の回折効率

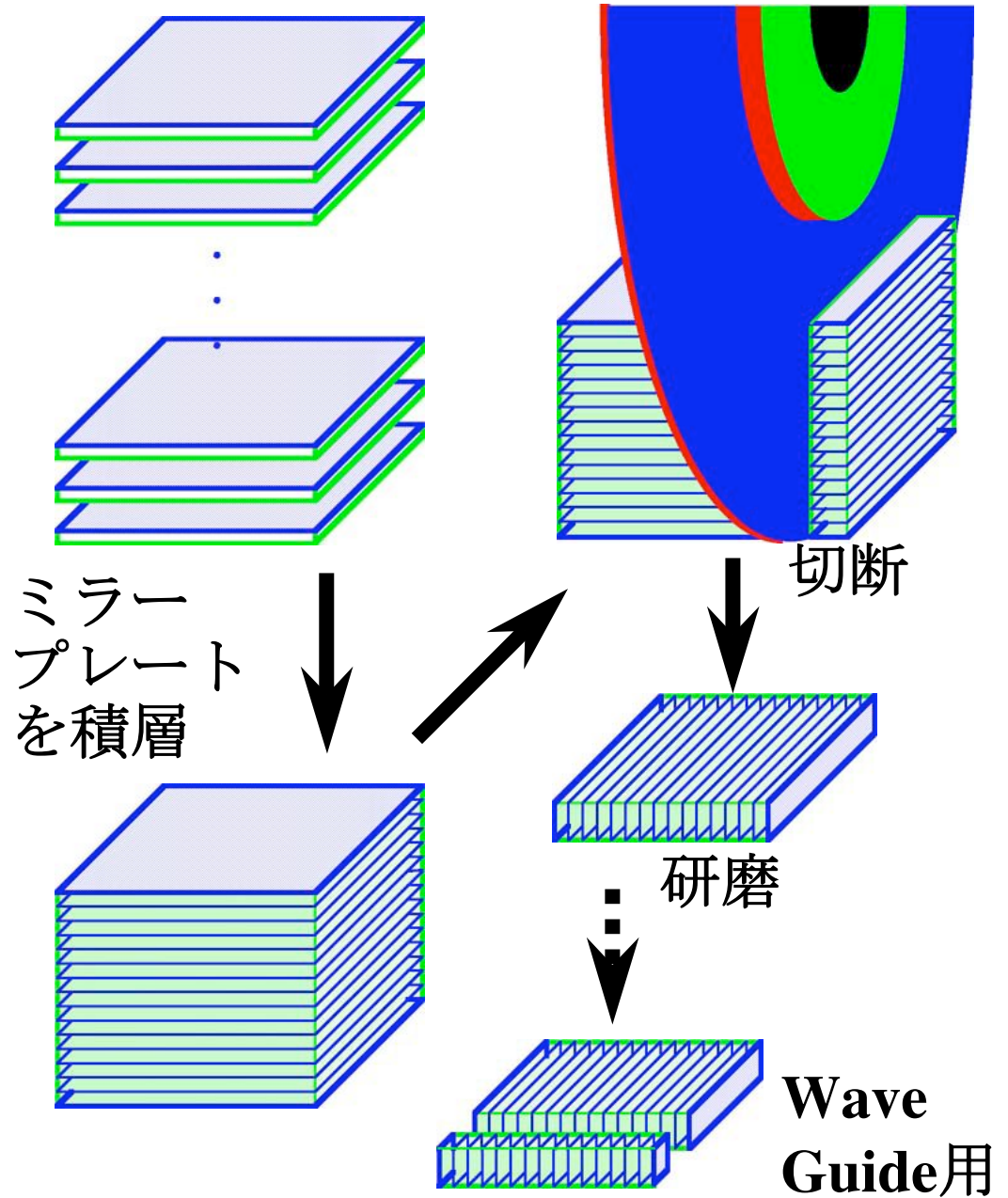
Quasi-Bragg gratingの回折効率

(Oka et al., SPIE 5290, 2004)

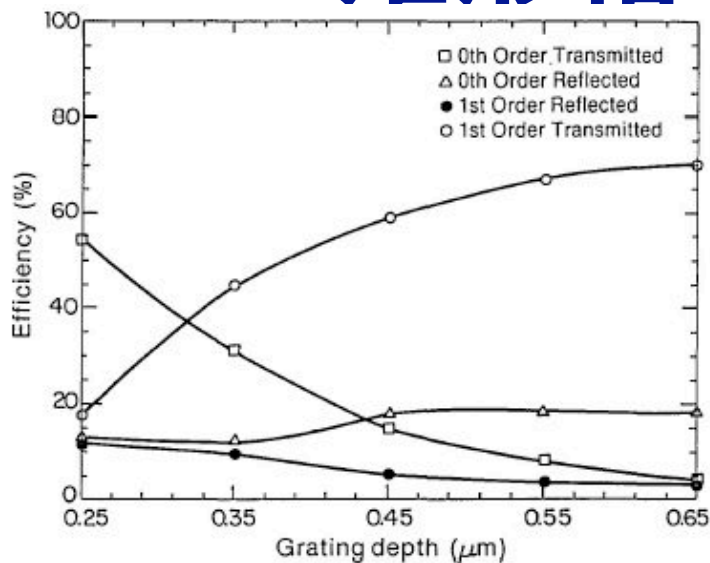
Quasi-Bragg gratingの試作



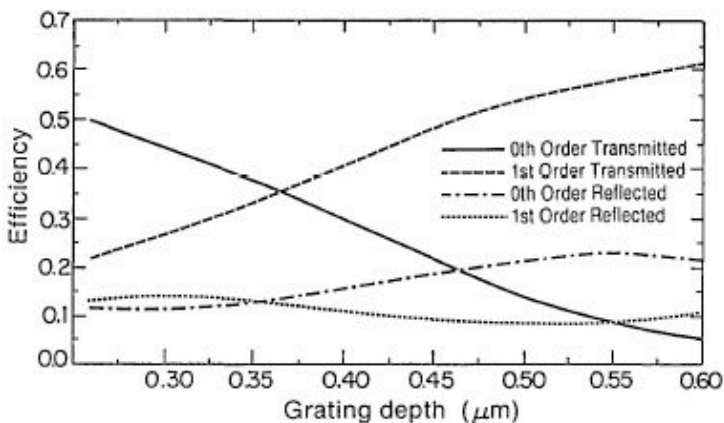
A: 10 x 10 x 0.2 x 40 枚 (左),
B: 1.5 x 10 x 0.2 x 40 枚 (右)



矩形格子のVolume Grating



(a)



(b)

Fig. 6. Variation of diffraction efficiency versus grating depth for TE incidence. Grating period $d = 0.36$ and $\theta = 65^\circ$: (a) experimental results, (b) theoretical results.

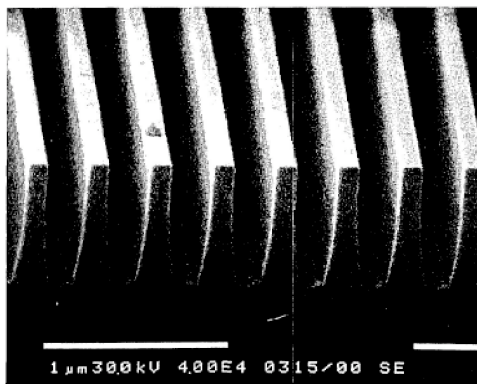


Fig. 1. Scanning electron micrograph of grating lines etched into quartz substrate ($n_s = 1.46$).

矩形Volume grating。シリコンの深溝エッチング。

$\Delta n = (n_{\max} - n_{\min})/2$
を比較的大きくできる。 $\Delta n \sim 0.3$

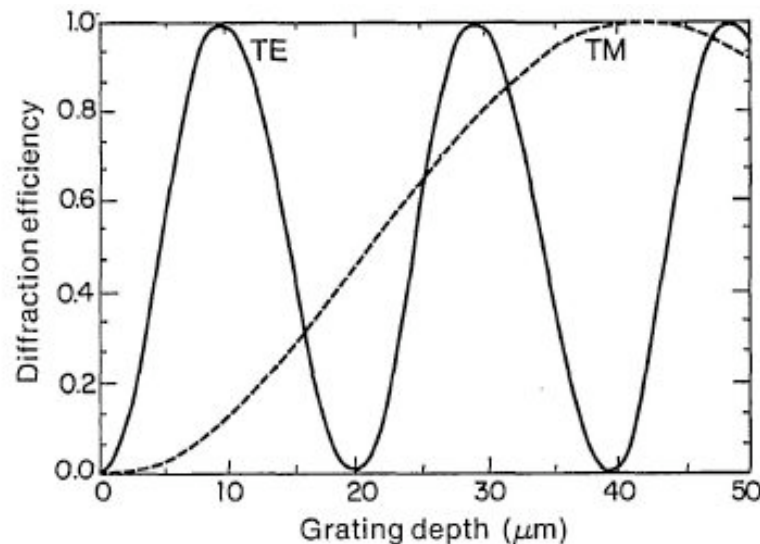
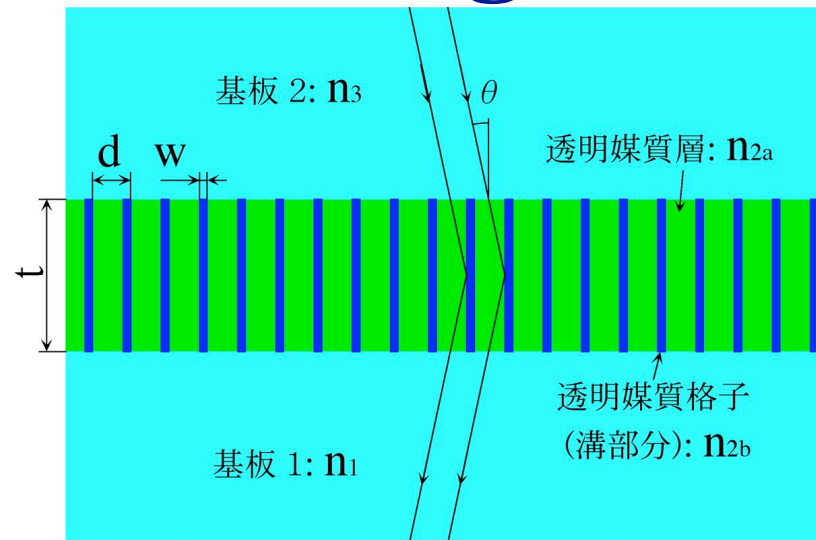
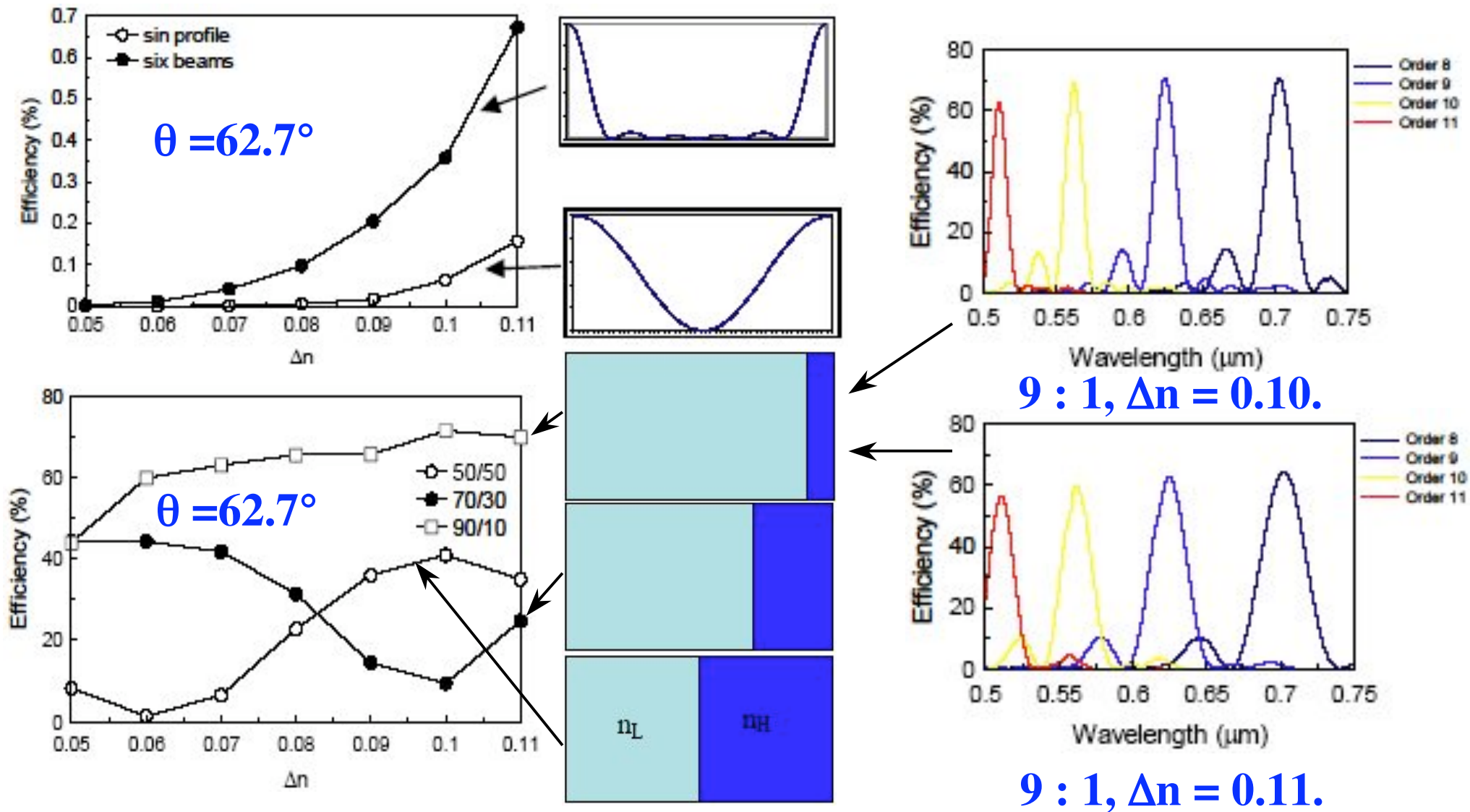


Fig. 13. Diffraction efficiency versus grating depth for TE and TM polarizations: $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $\theta = 39.25^\circ$, $d = 0.5 \mu\text{m}$, $n_1 = 1.04$, and $n_2 = 1.0$.

Volume Grating

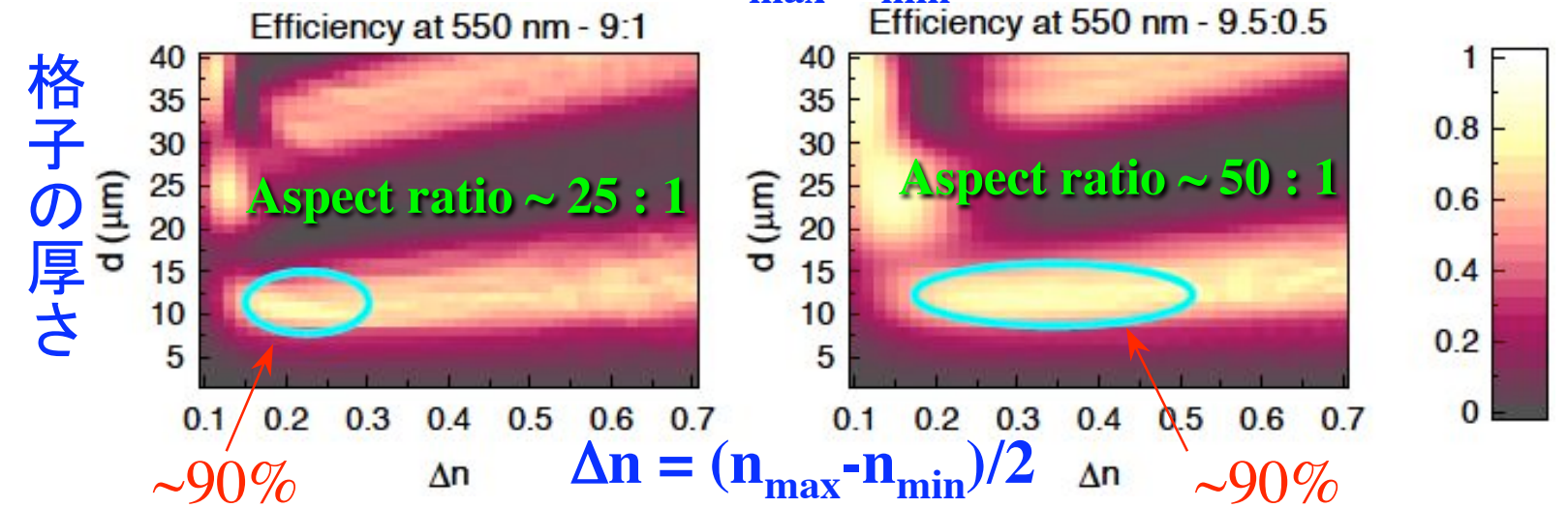
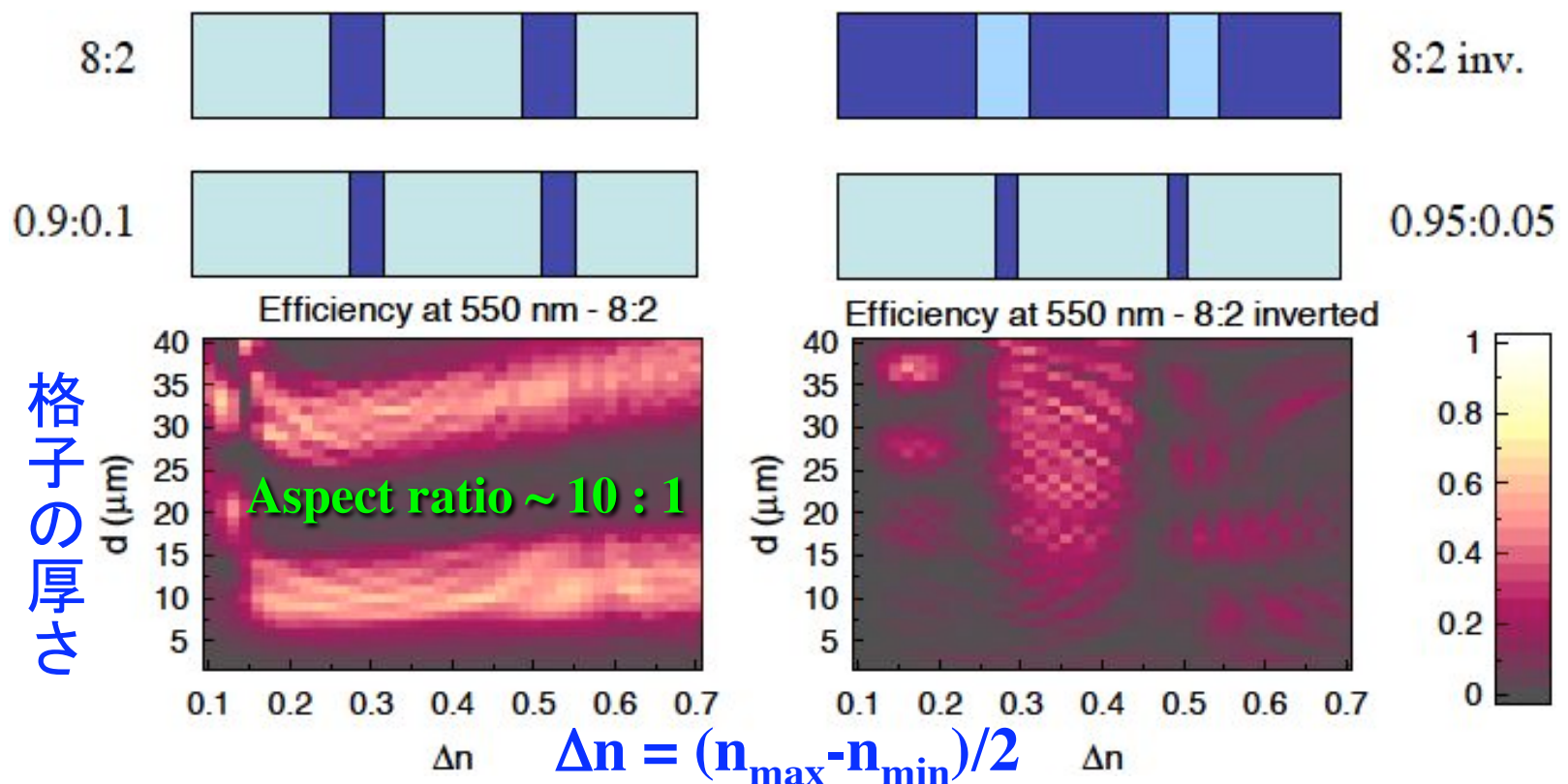
(Gupt & Peng, Appl. Opt., 32, 1993)

高次Volume Gratingの回折効率



VPH gratings (上) と矩形格子のVolume gratings (下)の9次回折光の効率。

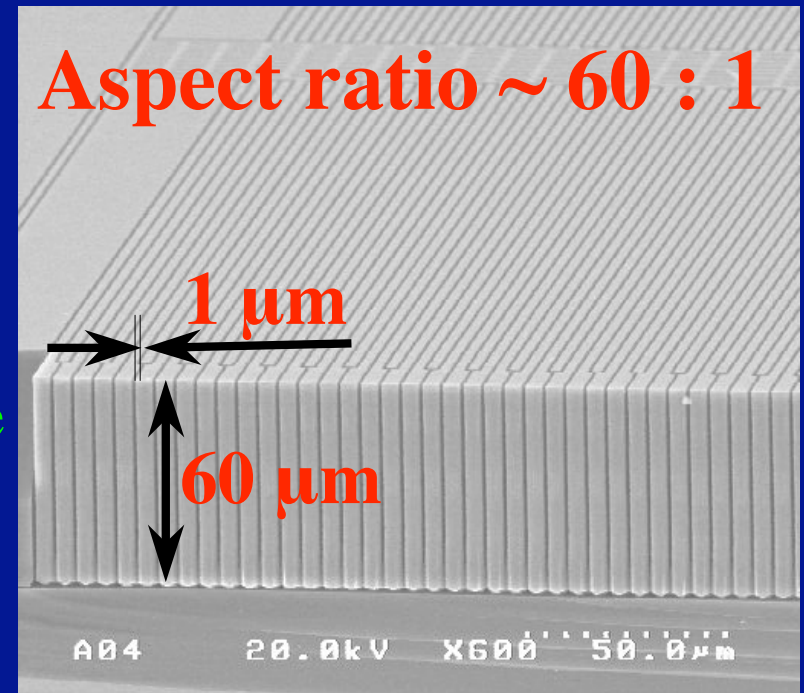
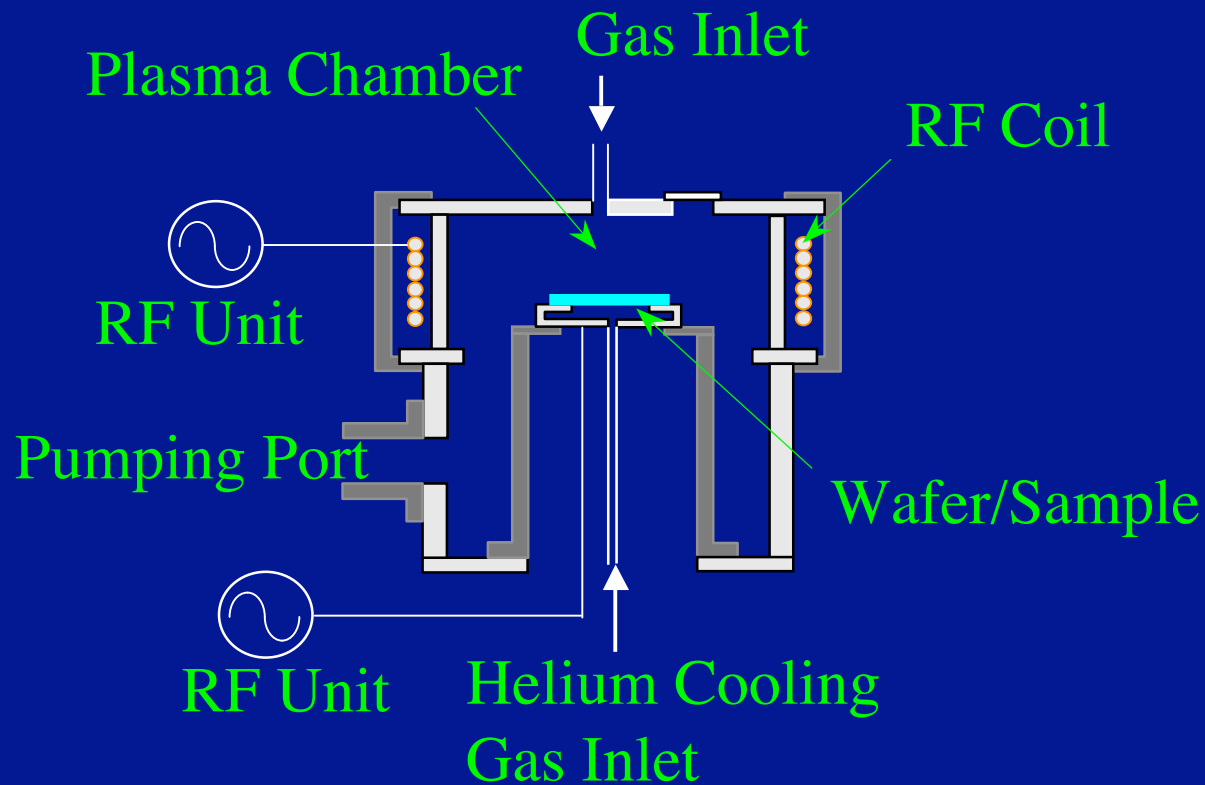
(Bianco et al., SPIE 7739, 2010)



$\Lambda = 5 \mu\text{m}, m = 12, \theta_0 = 41.3^\circ$ (A. Bianco私信)

D-RIE (Deep Reactive Ion Etching)

DENSO



ICP Etcher

Inductively Coupled Plasma

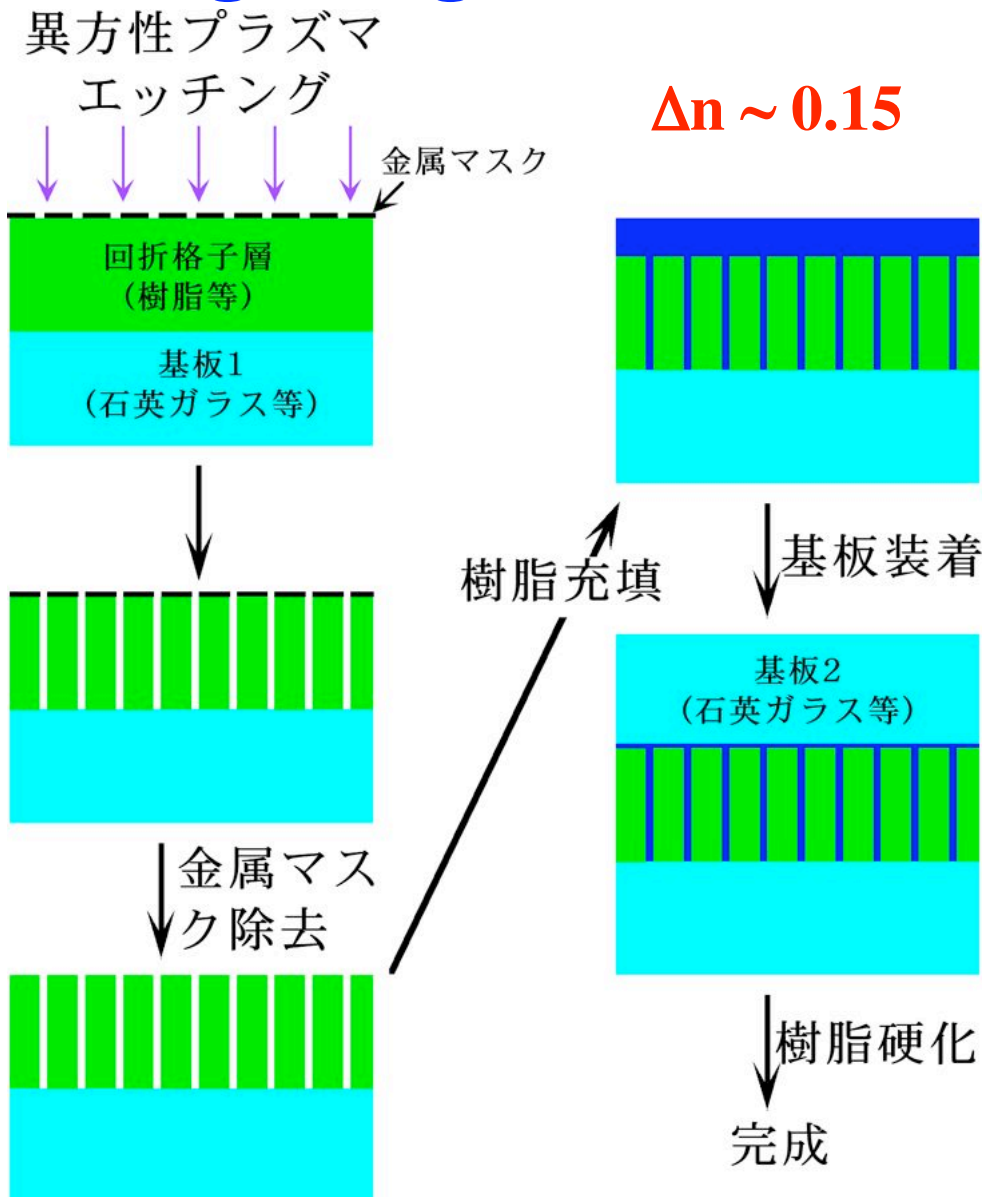
静電容量式加速度センサ

© DENSO CORPORATION All rights reserved.

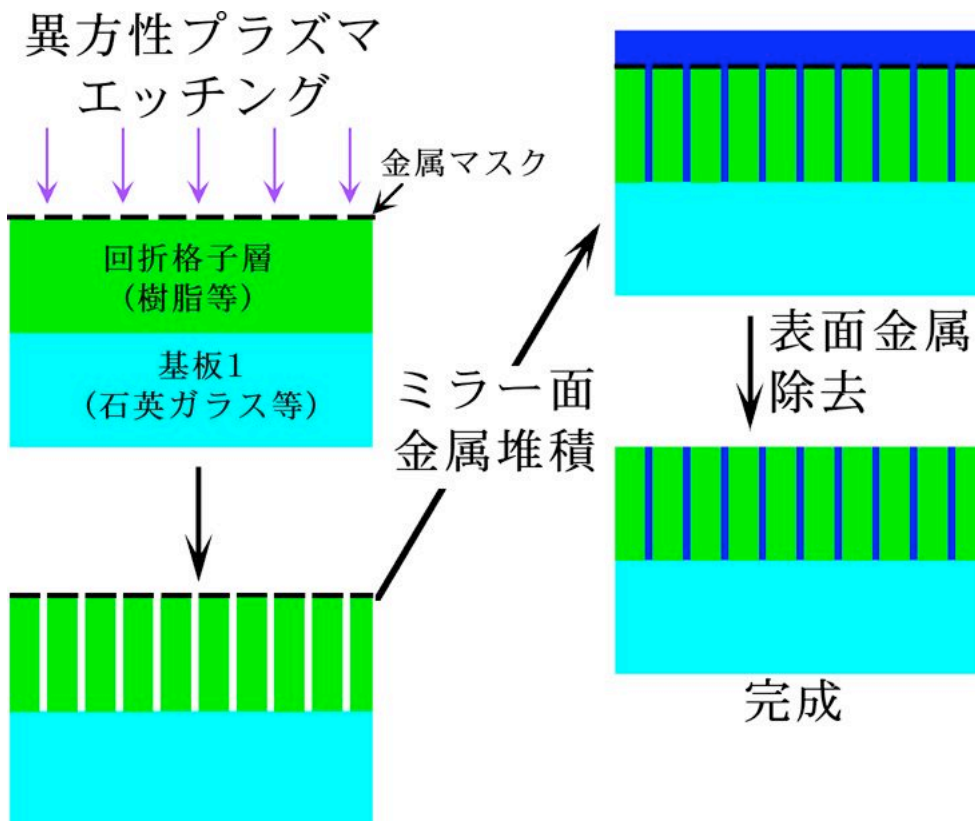
誘電体や金属を充填
金属を充填

→ **Volume grating,**
→ **Quasi-Bragg grating.**

矩形Volume gratingの製作法

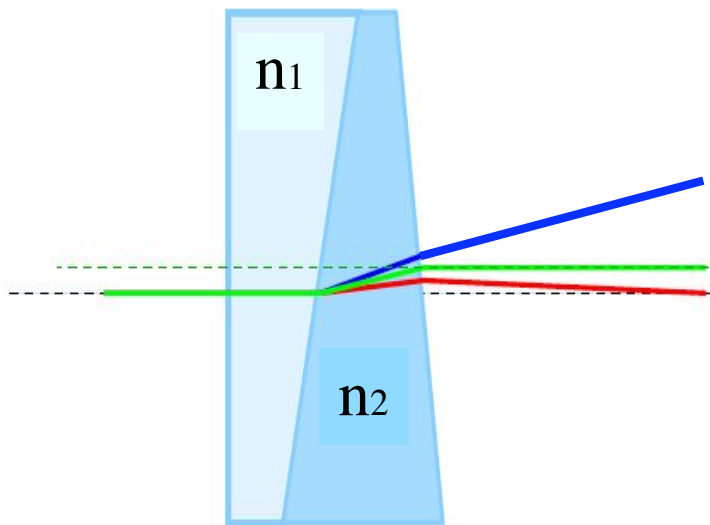


Quasi-Bragg gratingの製作法

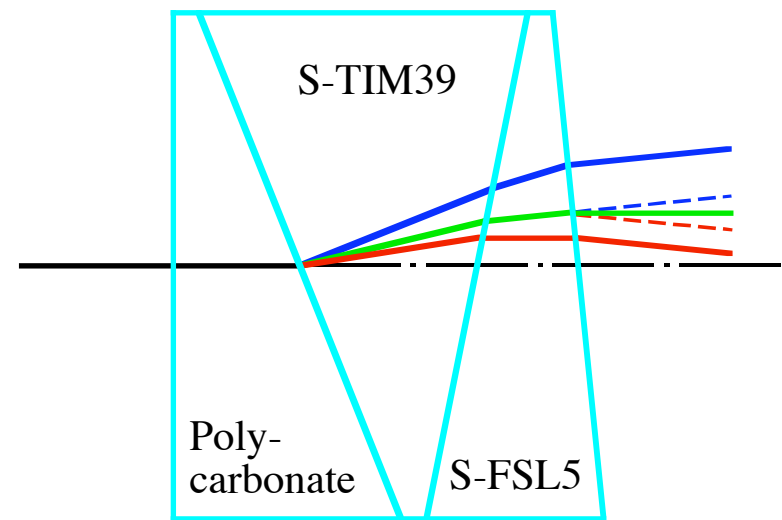


広波長帯域分光器

- 8.2m望遠鏡の回折限界 : $0.03''$ @ $1.0 \mu\text{m}$
→ 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

誘電体の屈折率分散と直視プリズム

誘電体の屈折率 $n(\lambda)$ は波長を λ とすると

$$n(\lambda) = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \dots, \quad (1)$$

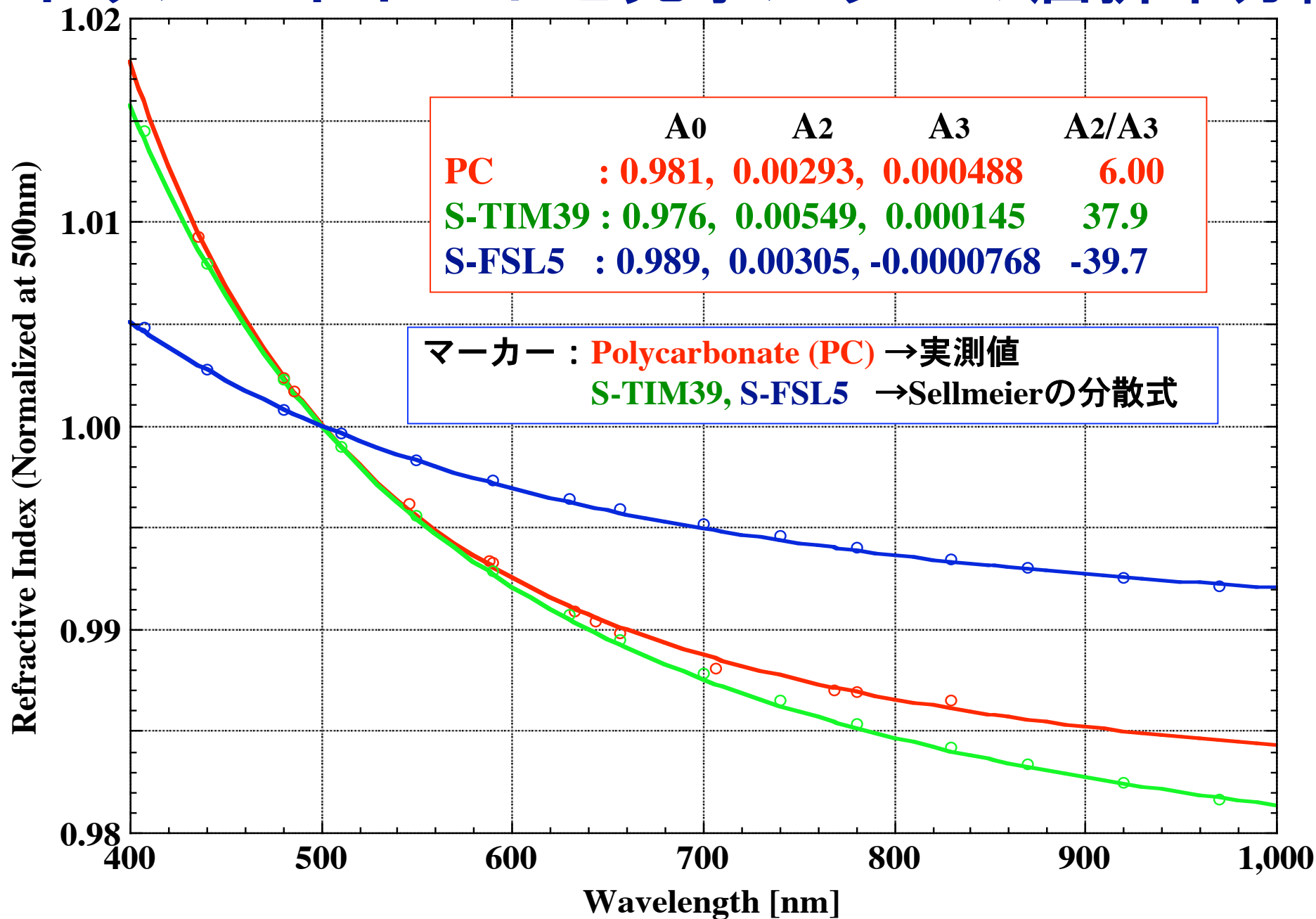
によって与えられる。実用的には

$$n(\lambda) = A_0 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4}. \quad (2)$$

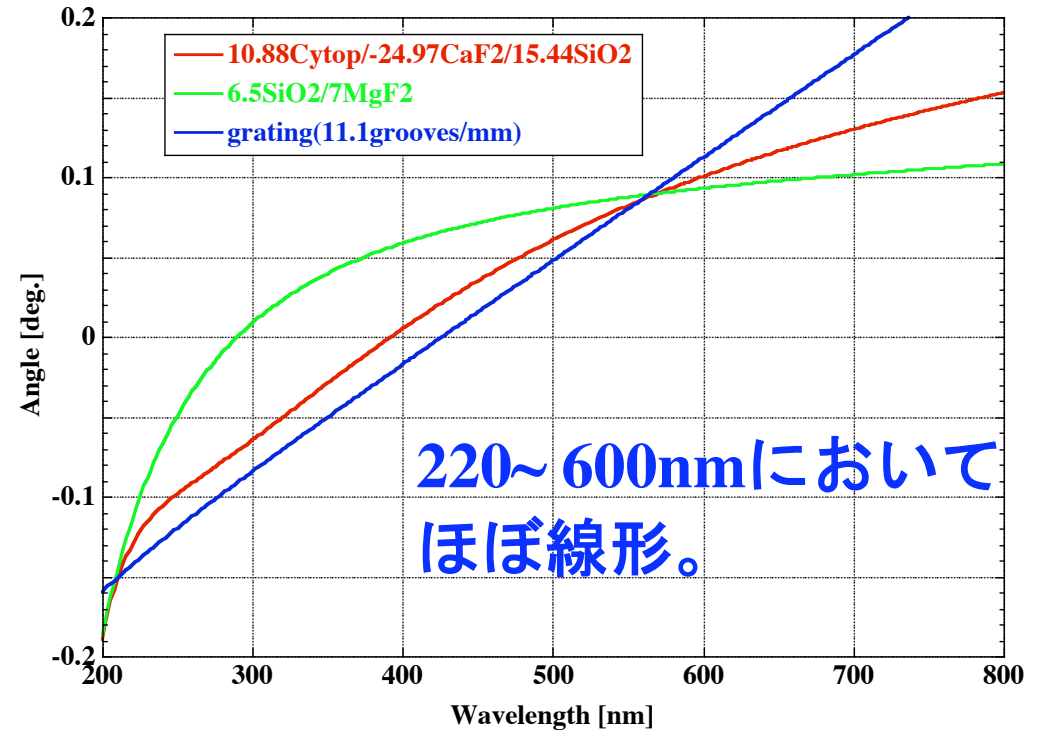
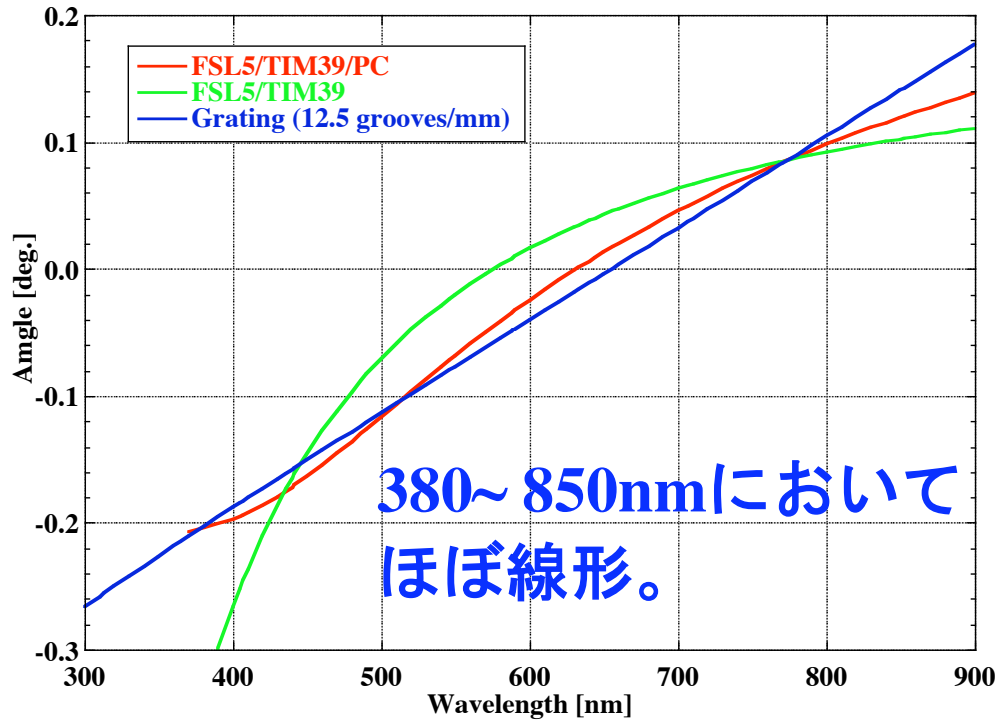
で充分ある。ここで、 A_2 と A_3 の比が異なる誘電体のプリズムの組み合わせるによって波長や波数に対して線形な直視プリズムを構築できる。

ポリカーボネート等の樹脂材は光学ガラスや結晶と比べて A_2/A_3 が小さいために、直視プリズムの厚さを薄くできる。

ポリカーボネートと光学ガラスの屈折率分散



線形角度分散の直視プリズム

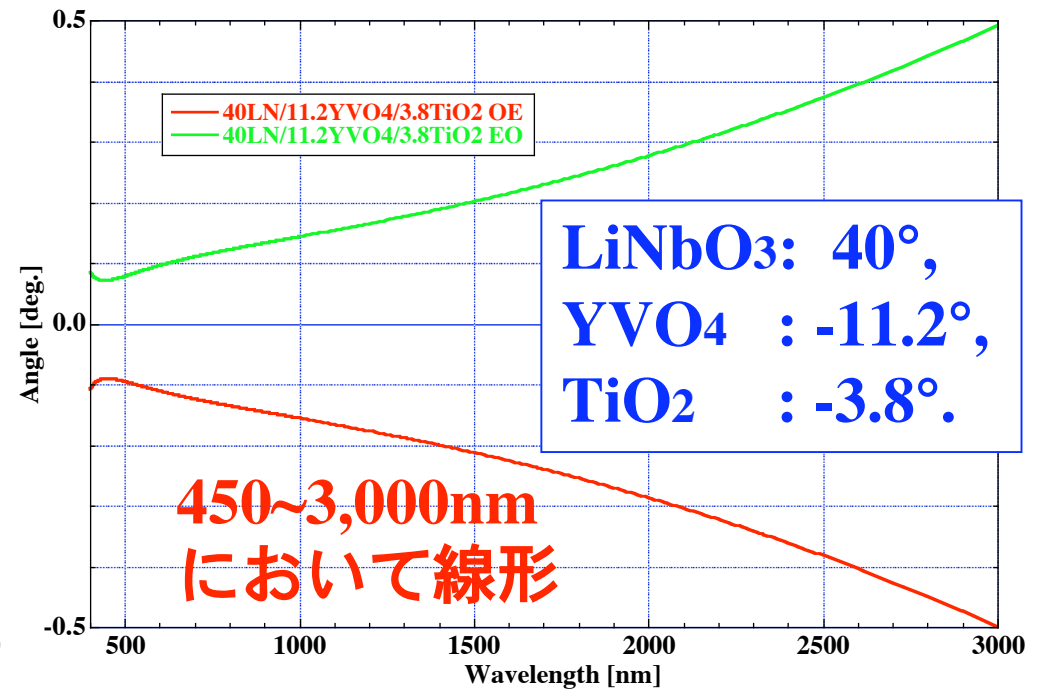
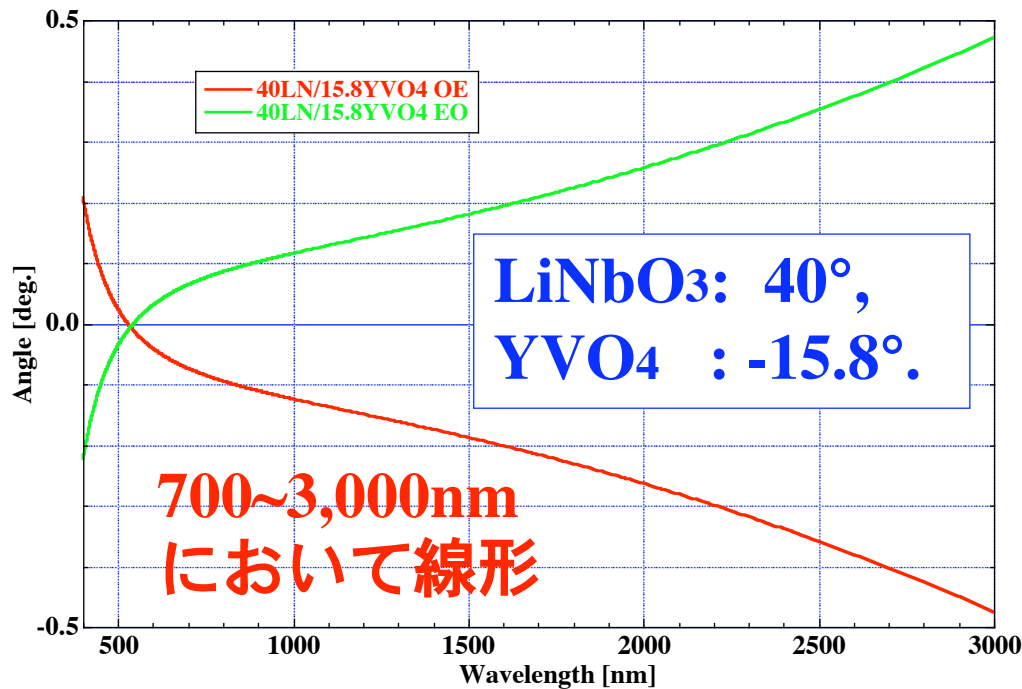
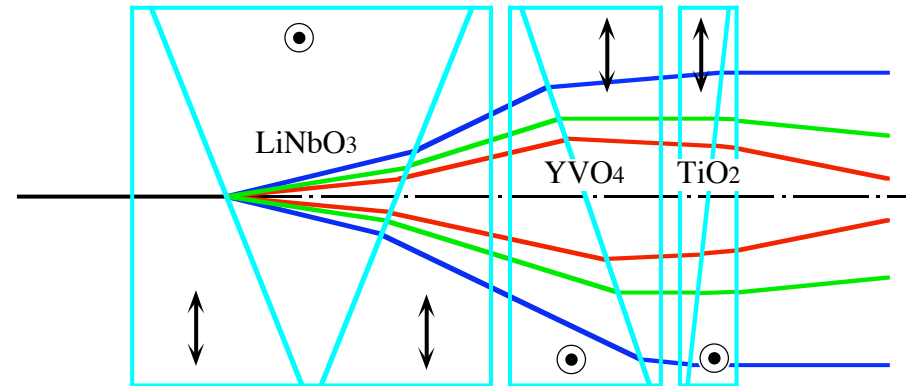
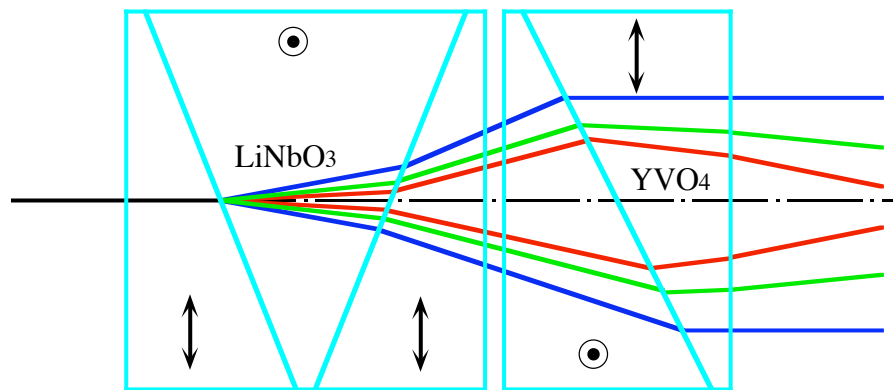


Visible		A2/A3
S-FSL5 (オハラ)	: 7.8°	6.0
S-TIM39 (オハラ)	: -27.3°	37.9
PC	: 22.7°	-39.7
S-FSL5	: 12.0°	(Fitted in 350~1000nm)
S-TIM39	: -10.7°	
透過型回折格子	: 12.5本/mm	

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YVO₄, TiO₂の Wollastonプリズム



まとめ

- **VPH grating**は表面刻線型gratingと比べて高分散、高効率、高い波面精度を達成。
- **Qusai-Bragg grating**と**矩形Volume grating**は高次において高効率。
- プラズマナノ工学によって**矩形Volume grating**の開発を計画中。
- 回折限界の光学系において**直視プリズム**は広帯域分光観測に有効。
- **Wollastonプリズム**は広帯域偏光分光観測に有効。