

# イマージョンゲーティング開発の現状と将来

---

2012年2月22日

池田優二

(京都産業大学／フォトコーディング)

# 目次

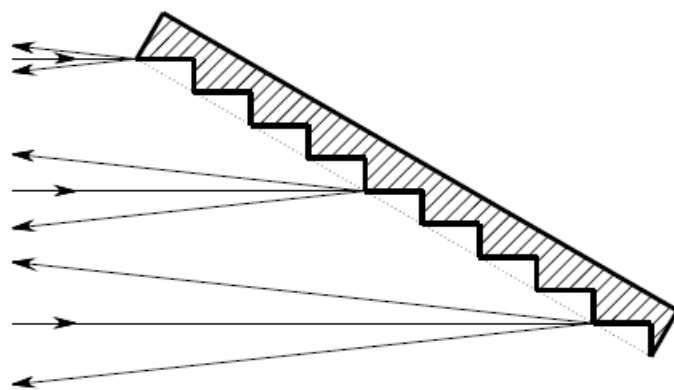
1. イマージョングレーティングとは？
2. イマージョングレーティングの歴史
3. イマージョングレーティングの開発の動向
4. イマージョングレーティングのこれから
5. まとめ

# 目次

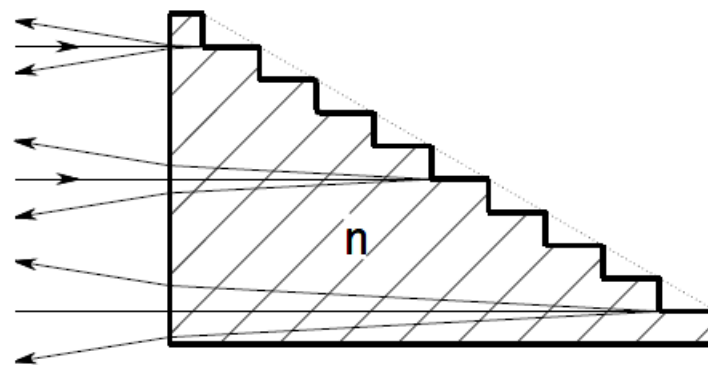
1. **イメージングレーティングとは？**
2. イメージングレーティングの歴史
3. イメージングレーティングの開発の動向
4. イメージングレーティングのこれから
5. まとめ

# イマージョングレーティングとは？

- 回折面が屈折率 $n$ の媒質に埋もれている
- 媒質内では波長が $1/n$ になるのでコンパクトながら光路差を稼ぐことができる。
  - 分光器の「高波長分解能化」と「コンパクト化」



classical grating



Immersion grating

# イマージョングレーティングの波長分解能

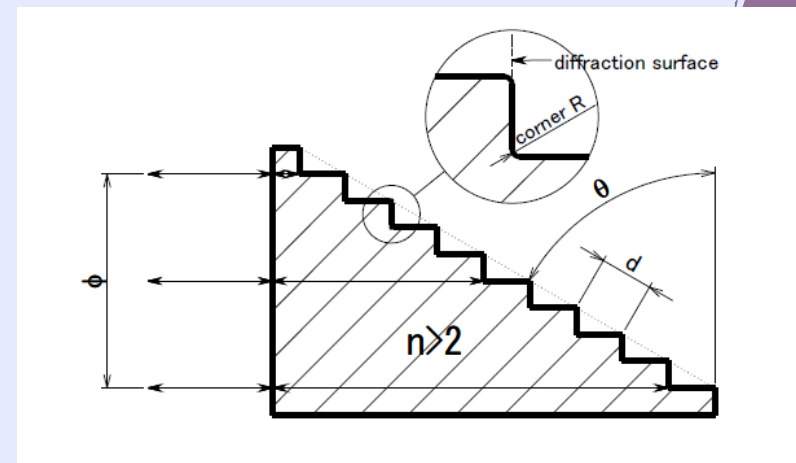
シーイングリミットの場合(可視～近赤外)

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\Phi\tan\theta}{Ds}$$

回折限界の場合(中間赤外～)

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\Phi\tan\theta}{\lambda}$$

$\Phi$ : コリメータビーム径、 $\theta$ : ブレーズ角  
 $D$ : 望遠鏡の口径、 $s$ : スリット幅



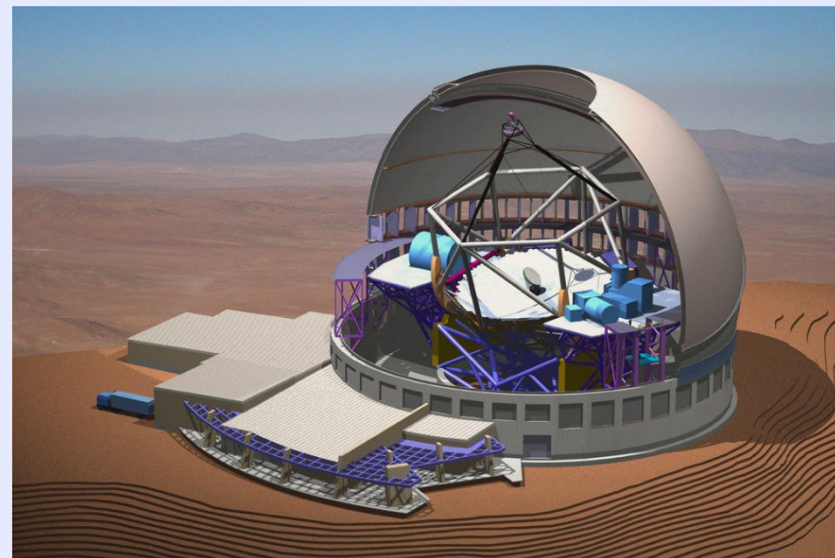
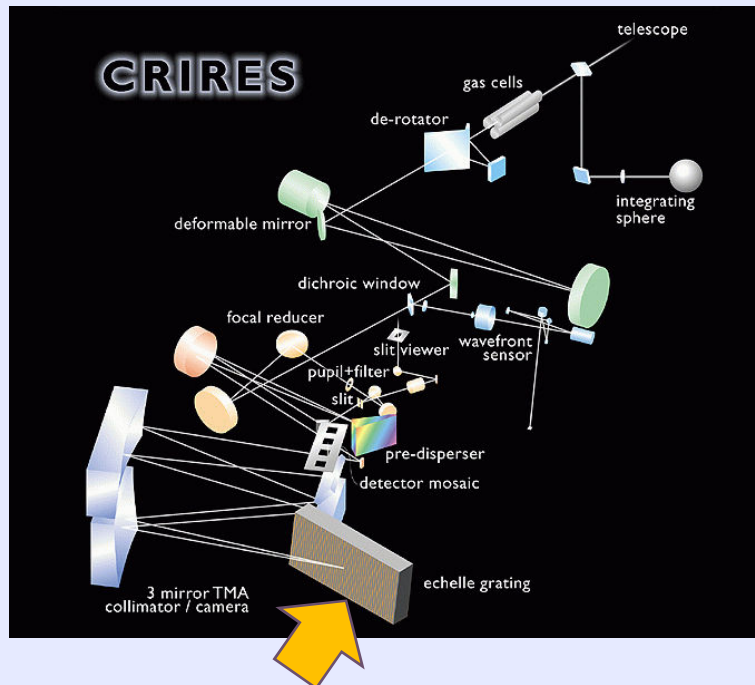
# イマージンググレーティングの有用性

シーイングリミットの場合 (可視～近赤外)

- 大口径化に伴う装置サイズの限界緩和

CRIRES/VLT ( $R_{\max}=100,000$ ) の grating ~ 400mm  
これが、TMT ( $D=30\text{m}$ ) になると ~ 1500mm !!

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\Phi\tan\theta}{Ds}$$

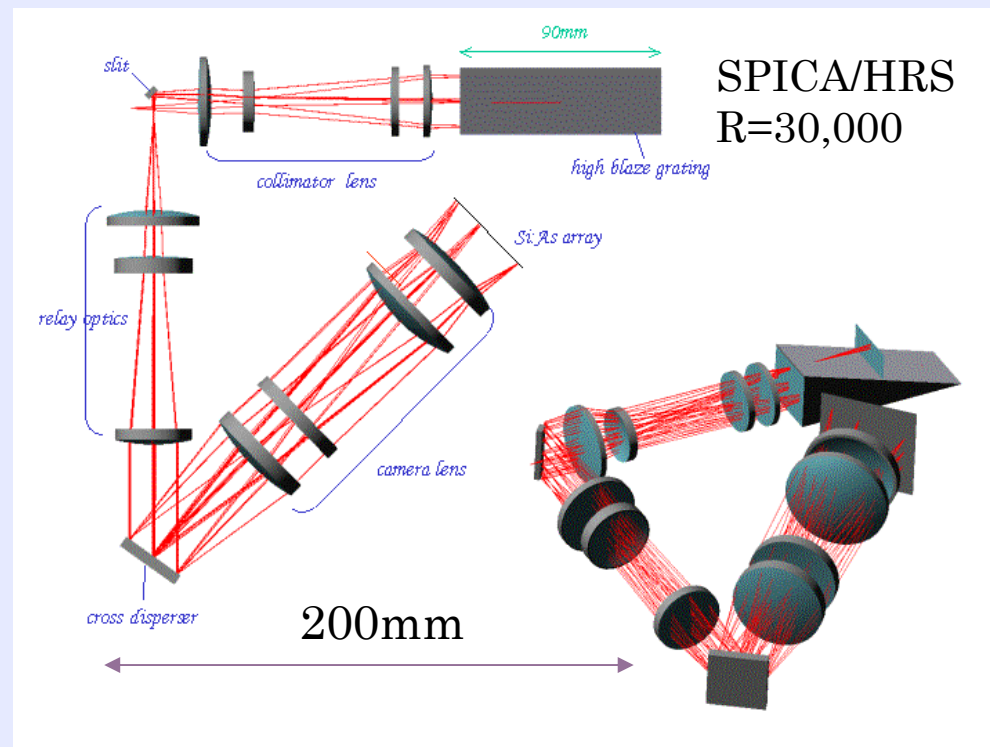
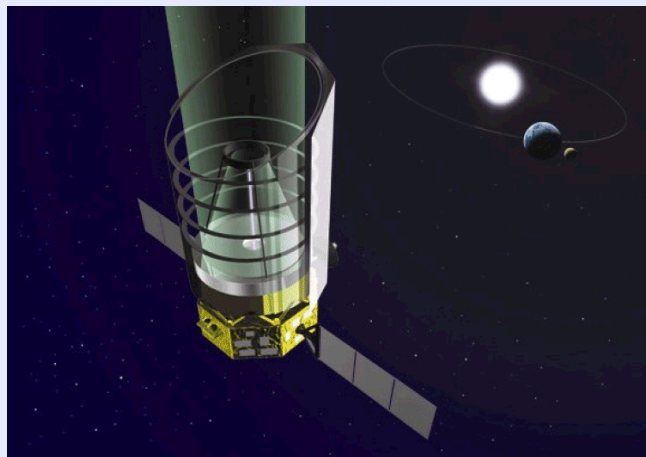


# イマージョングレーティングの有用性

回折限界の場合(中間赤外～)

- 宇宙望遠鏡における高分散分光器の実現  
ISO/SWS  $R_{\max}=2,000$  (FPモードは除く)  
MIRI/JWST  $R_{\max}=3,000$   
スペースで  $R>20,000$  の世界へ

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\Phi\tan\theta}{\lambda}$$



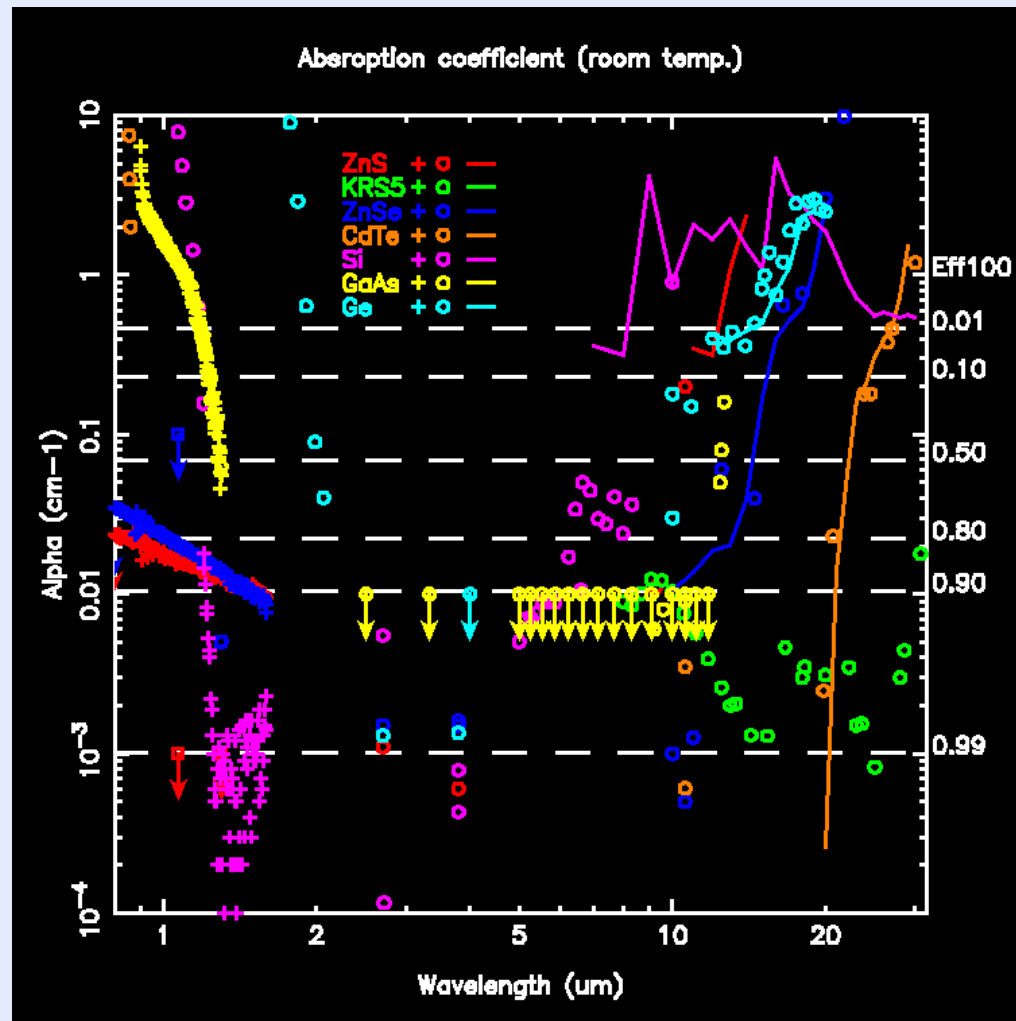
# イメージングレーティングの材料

- 屈折率が高いこと ( $n > 2$ )  
赤外線領域においては多くの半導体材料がある
- 透過性が高いこと ( $\alpha < 1e-2 \text{ cm}^{-1}$ )  
半導体材料の多くが赤外線に対して透明  
効率、波長分解能に影響
- 大型のインゴットが製作可能なこと ( $L > 100\text{mm}, \Phi > 50\text{mm}$ )  
民生品への展開の有無
- ホモジニティ ( $\Delta n/n < 1e-4$ )  
波長分解能、散乱ロスに影響  
一般には単結晶材料で優れている

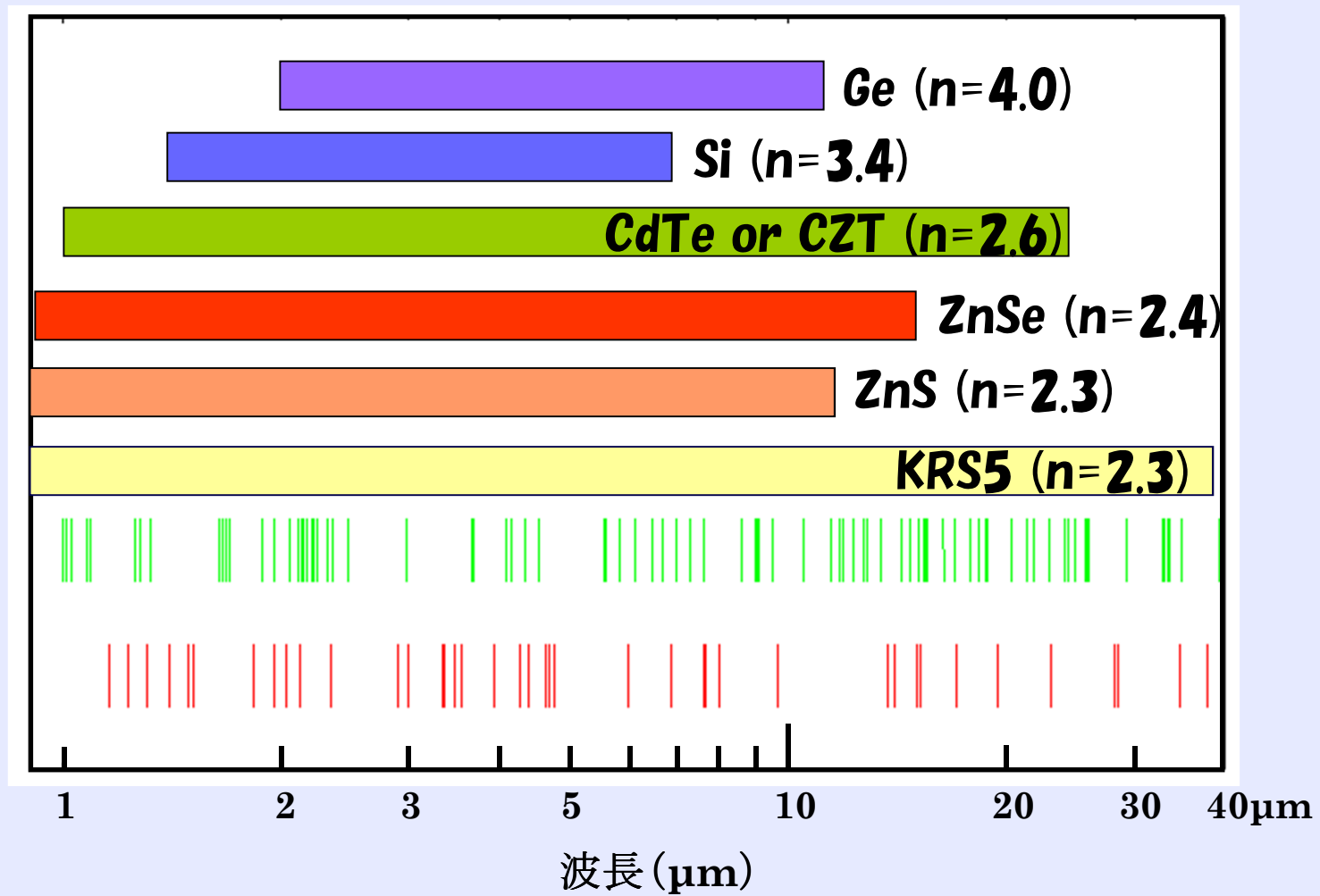


# イメージングレーティングの材料

## 赤外線材料の吸収係数



# イメージンググレーティングの材料



# 目次

1. イマージョングレーティングとは？
2. **イマージョングレーティングの歴史**
3. イマージョングレーティングの開発の動向
4. イマージョングレーティングのこれから
5. まとめ

# イマージョングレーティングの事始め

- 1800年代: Fraunhoferが言及...
- 1950年代: Hulthen & Heuhaus  
— immersion gratingのアイデア  
(ZnS製 immersion)



## letters to nature

*Nature* 173, 442 - 443 (06 March 1954); doi:10.1038/173442b0

## Diffraction Gratings in Immersion

E. HULTHÉN & H. NEUHAUS

Physics Department, University of Stockholm. Dec. 14.

AT the London Optical Conference in 1950, it was suggested<sup>1</sup> that the resolving power  $R$  of diffraction gratings might be increased by immersion in a medium of refractive index  $\mu_i$ . Thus: 
$$R = \frac{2 W \sin \alpha}{\lambda} \cdot \mu_i, \quad (1)$$
 where  $W$  is the ruled width of the grating and where  $\alpha$  applies for the case of autocollimation parallel to that of the immersion microscope, was further developed<sup>2</sup> in accordance with Figs. 1a and b.

1. Hulthén, E. Proc. London Opt. Conference 1950 p. 111.
2. Hulthén, E., *Ark. Fys.*, 2, 439 (1950).

# 1980年代～2000年頃(天文学への応用)

- 1989年: H. Dekker — 赤外線天文学への適用の可能性
- 1993年: G. Wiedermann et al  
— 単結晶Si、Ge immersionのエッチングによる製法
- 1994年: P. Kuzmenko et al.  
2002年: J. Ge et al., D. Jaffe et al.  
— Si製 immersion gratingの実験、検討
- 2003年: N.Ebizuka et al. — 研削によるGe製 immersion grating

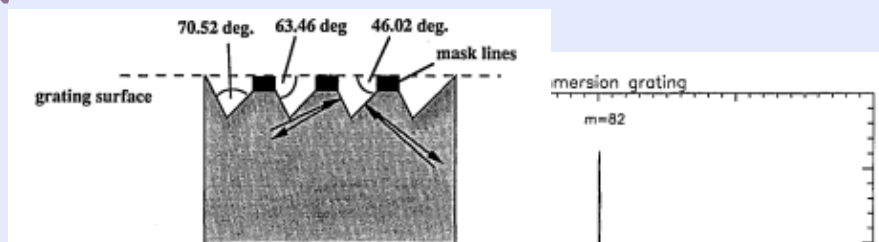


Fig. 2. Groove geometry of the Si IG.

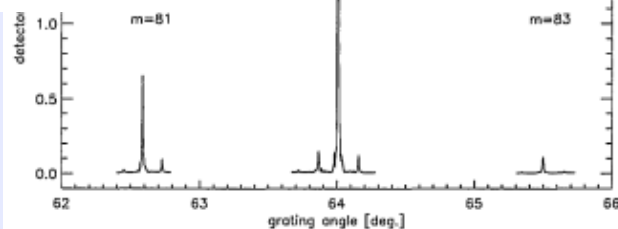
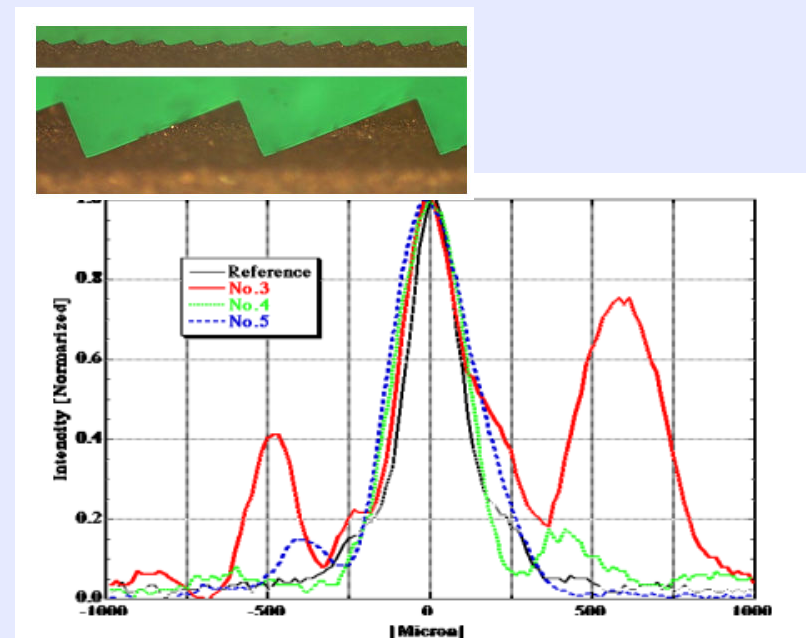


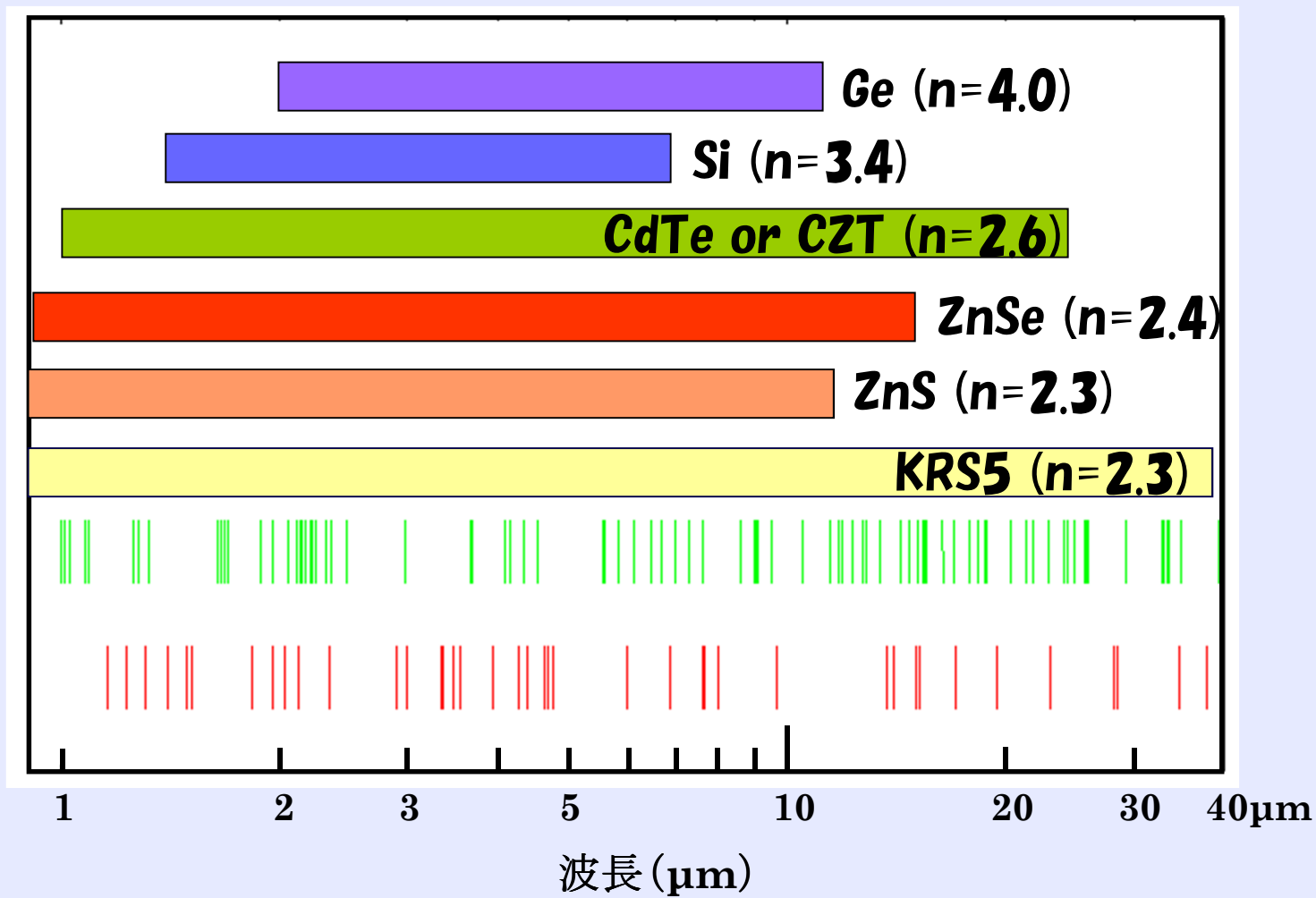
Fig. 3. Immersion grating scan of a 1.523- $\mu\text{m}$  laser line over interference orders near the 63° blaze angle.



# 目次

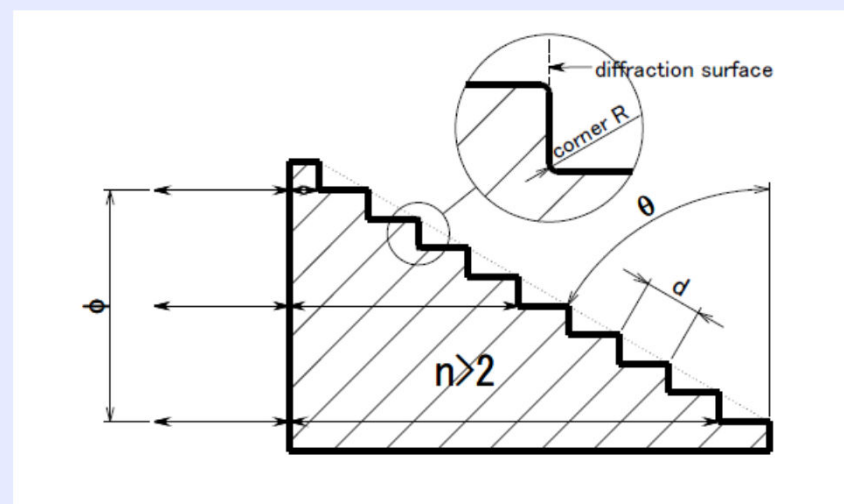
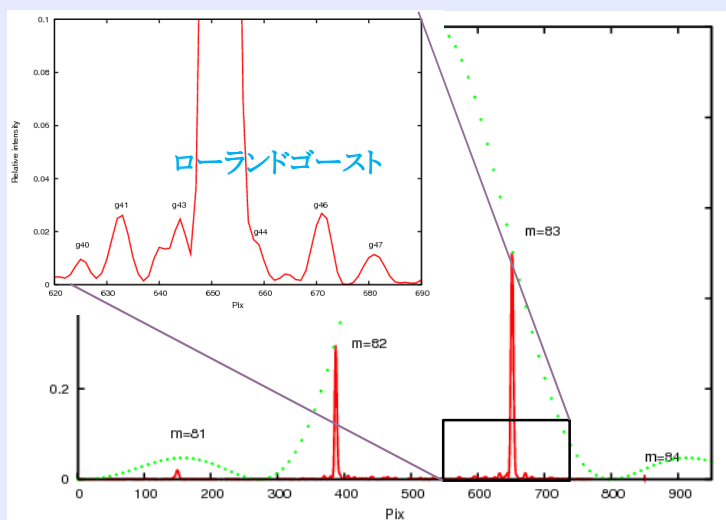
1. イマージョングレーティングとは？
2. イマージョングレーティングの歴史
3. **イマージョングレーティングの開発の動向**
4. イマージョングレーティングのこれから
5. まとめ

# 開発中のイメージングレーティング



# イマージョングレーティングの評価項目

	目標値	関連性能
面粗度	1~10 nm (rms)	回折効率
面精度	0.1 $\lambda$ @633nm	波長分解能
ランダムピッチ誤差	2~20 nm (rms)	回折効率
周期ピッチ誤差	2~20 nm	ローランドゴースト
回折効率	> 80%	

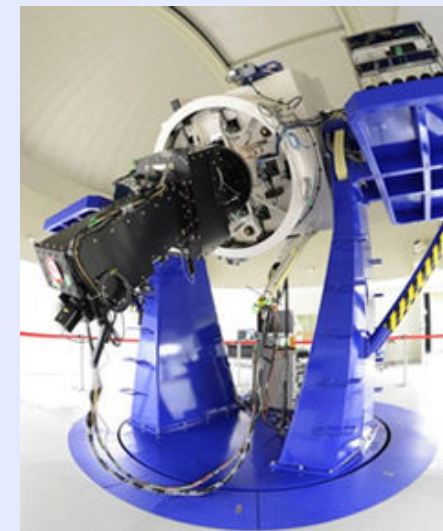
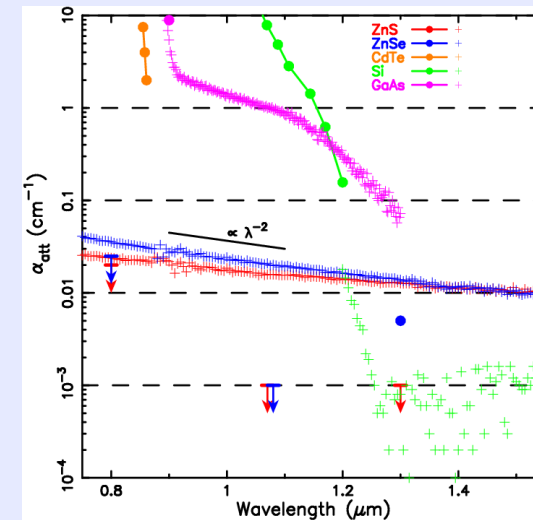
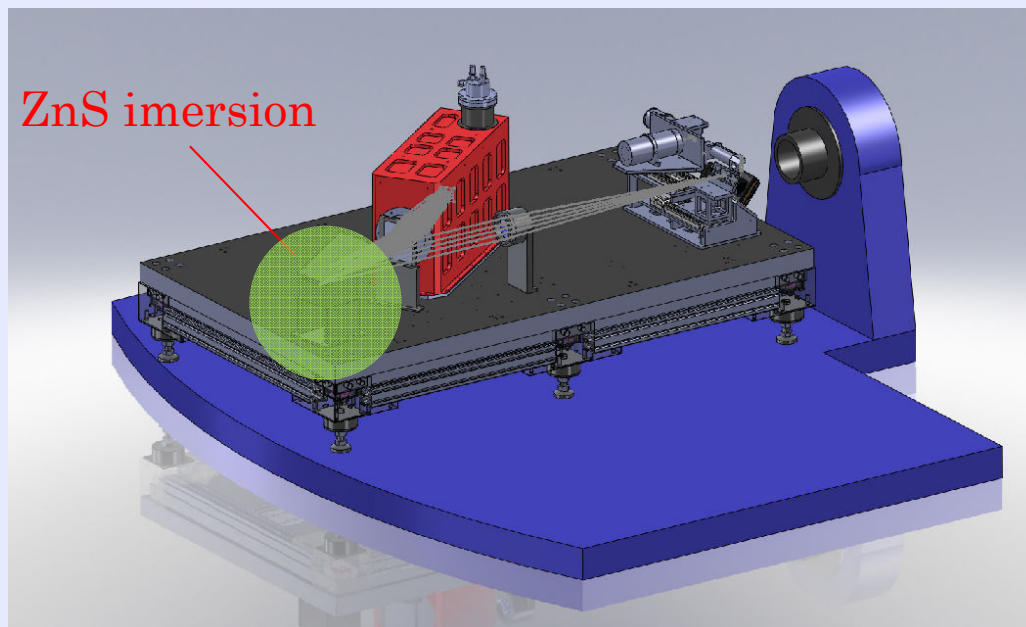




# ZnSe/ZnS immersion grating (0.8 ~ 10 $\mu\text{m}$ )

—概要—

- CVD-ZnSe (ZnS)を用いる
- 最も短波長側のimmersion grating (可視光への足掛かり)
- WINERED/KSU (2012~), HRS-S/SPICA用として開発中

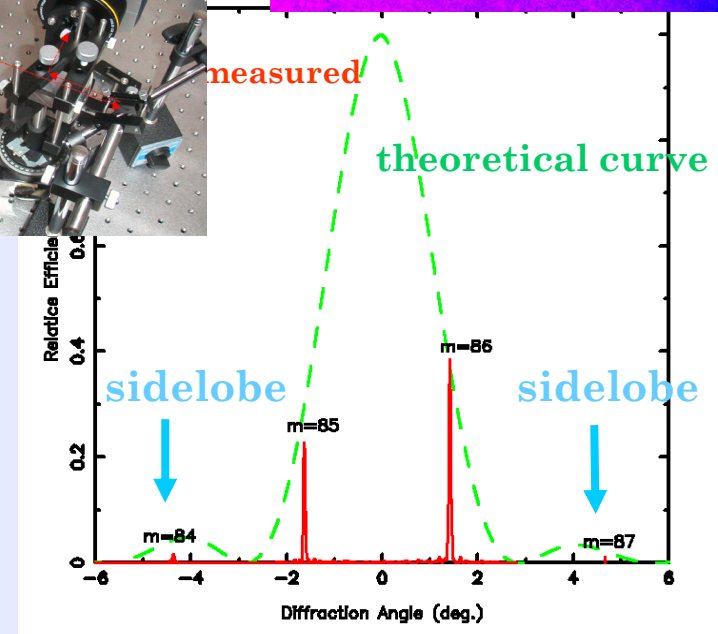
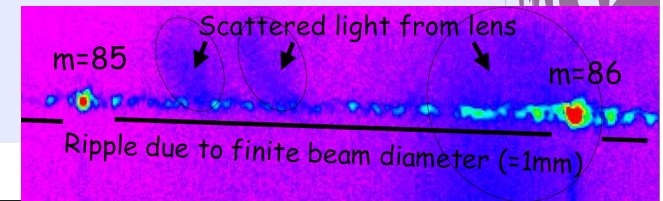
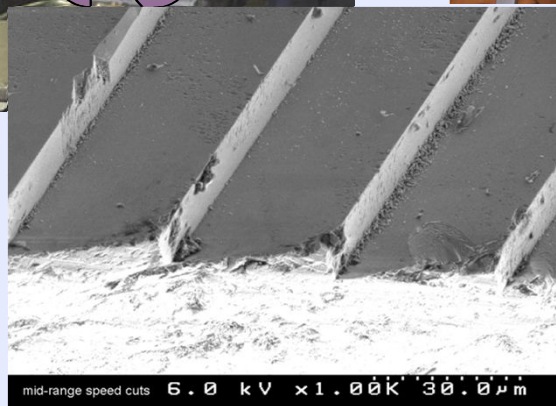
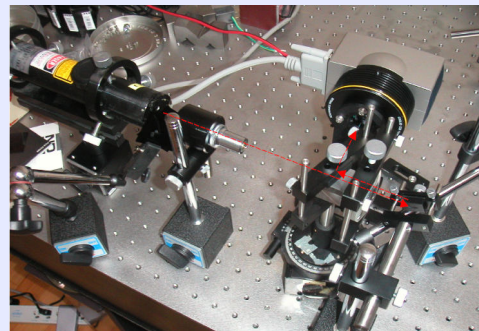
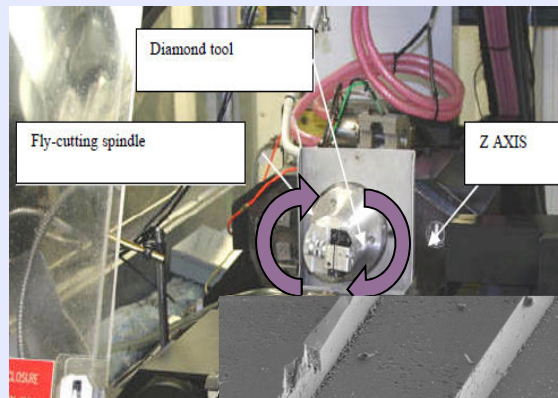


# ZnSe/ZnS immersion grating (0.8 ~ 10 $\mu\text{m}$ )

—現状—

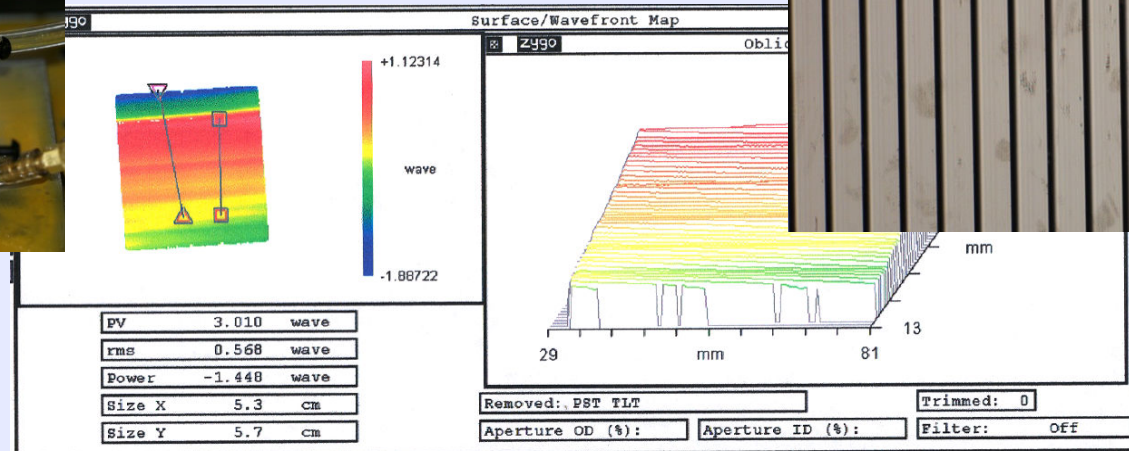
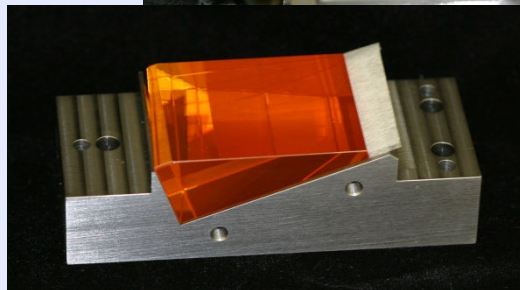
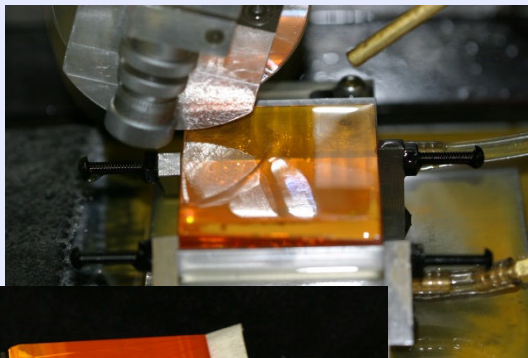
- 超精密旋盤を用いたフラックカット法で加工 (PERLII@LLNL)
- 干渉計を用いたclosed-loop 温度制御 $\Delta T < 0.01\text{K}$
- ディスクによるカッティングで1 $\mu\text{m}$ 用の仕様をみたす結果
- 現在プリズムグレーティングの製作中

## PERL II



# ZnSe/ZnS immersion grating (0.8 ~ 10 $\mu\text{m}$ )

	目標値	達成値
面粗度	< 3.2 nm (rms)	4.8 nm (rms)
面精度	< 0.08 $\lambda$ @633nm	0.1 $\lambda$
ピッチ誤差	< 3.6 nm (rms)	3.1 nm (rms)
ゴースト	< 1e-4	< 1e-3
回折効率	> 80% @1 $\mu\text{m}$	81%

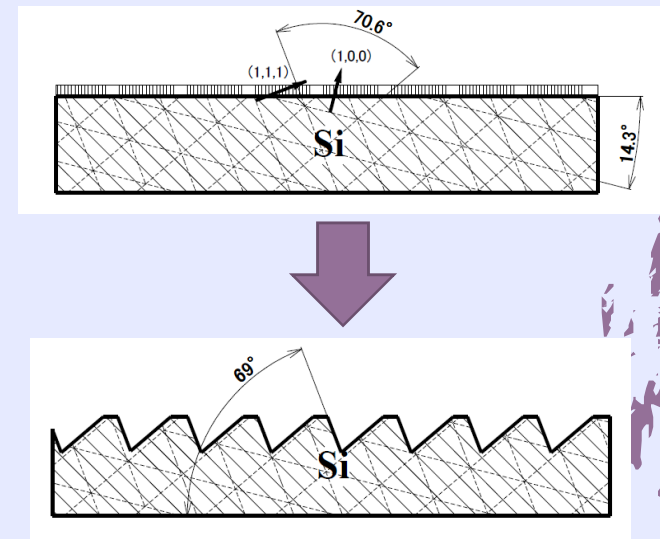
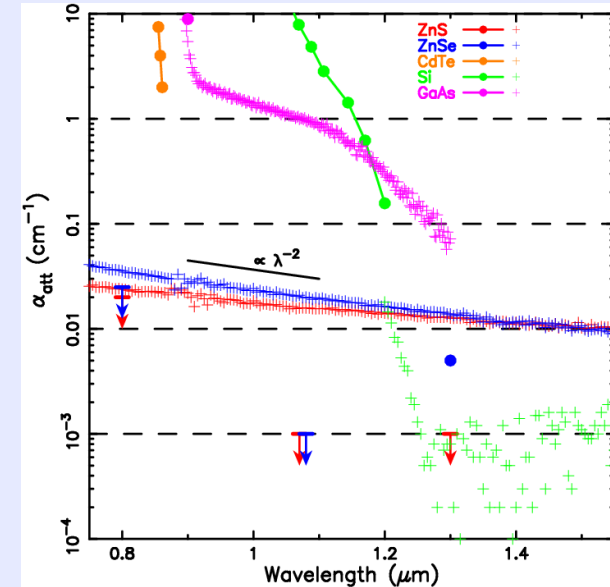
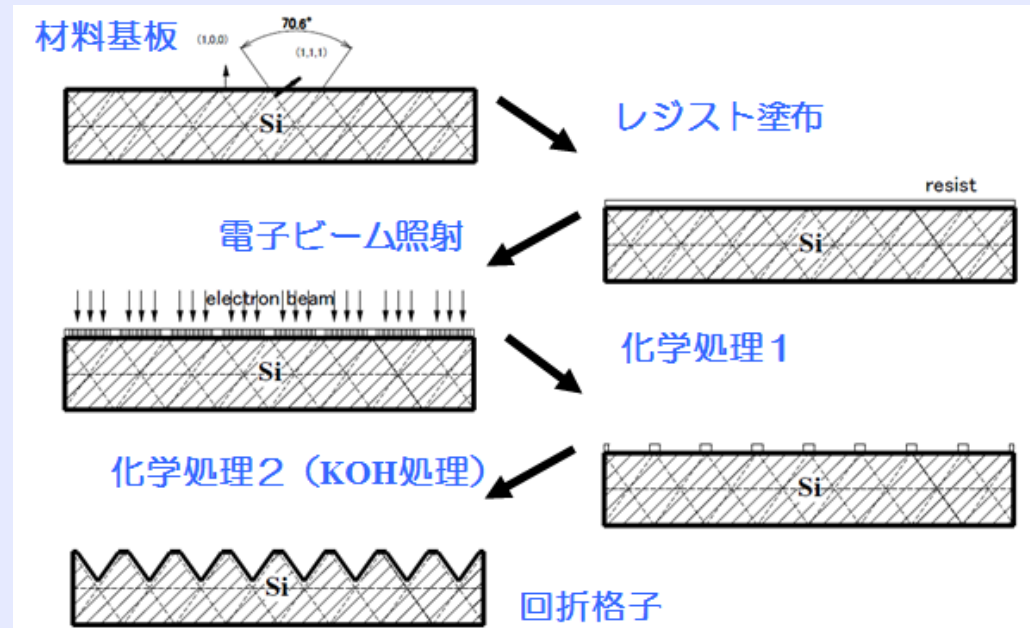




# Si immersion grating (1.3 ~ 6 μm)

—概要—

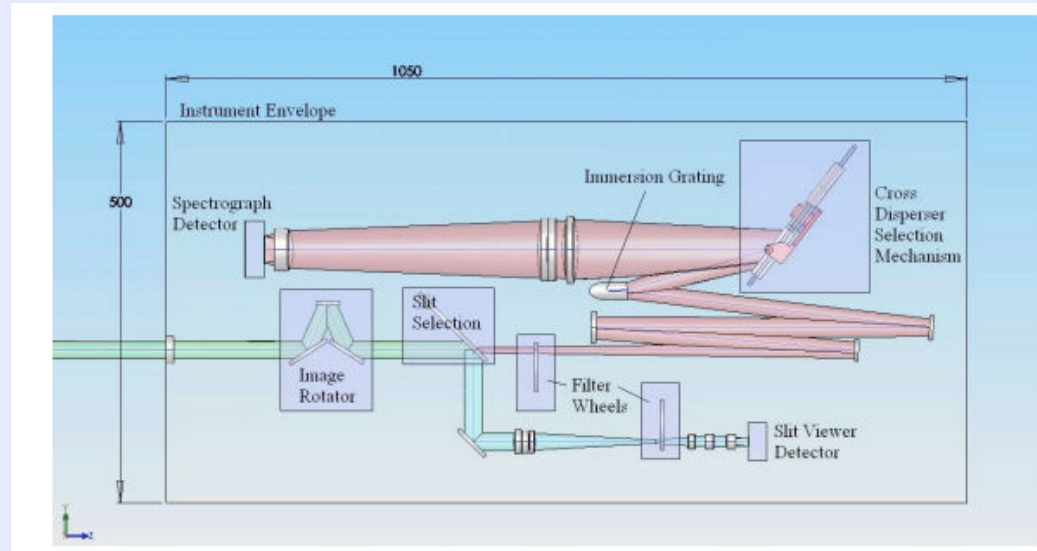
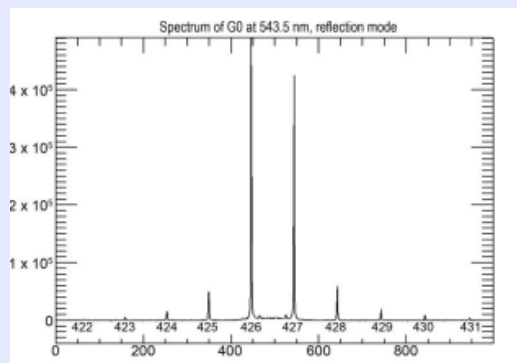
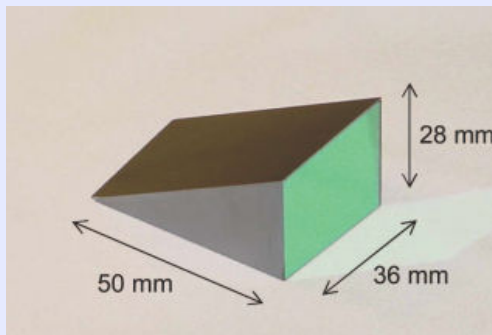
- 単結晶Siを用いる ( $\alpha \sim 1e-3 \text{ cm}^{-1}$ )
- フォトリソの技術(異方性エッチング)を用いた製法 → 頂角が一意に決まる
- J-band以外の近赤外線領域をカバー



# Si immersion grating (1.3 ~ 6 $\mu\text{m}$ )

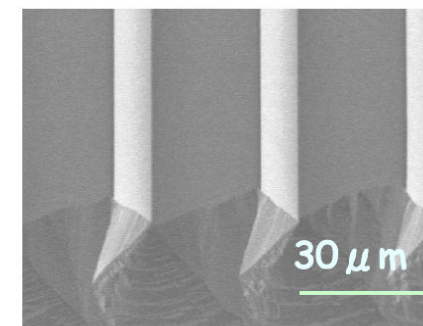
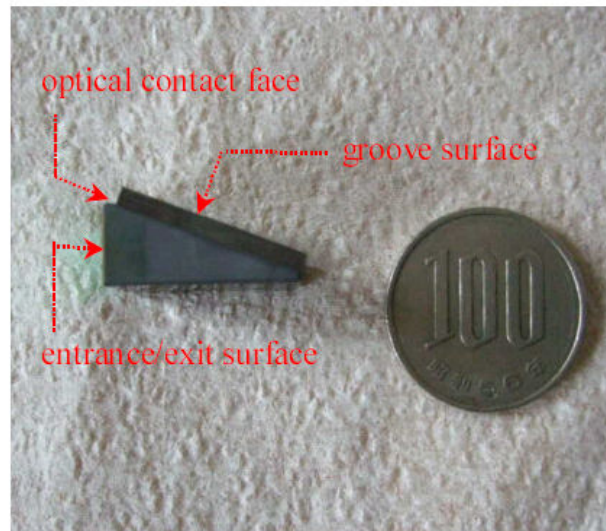
— 現状 —

- テキサス大のチームが**実用化** (Marsh et al. 2006)
- iSHELL/IRTFに搭載予定
- 今後はより効率を向上させる方向  
(軟X線リソグラフィ、電子ビームエッチング)



# Si immersion grating (1.3 ~ 6 $\mu\text{m}$ )

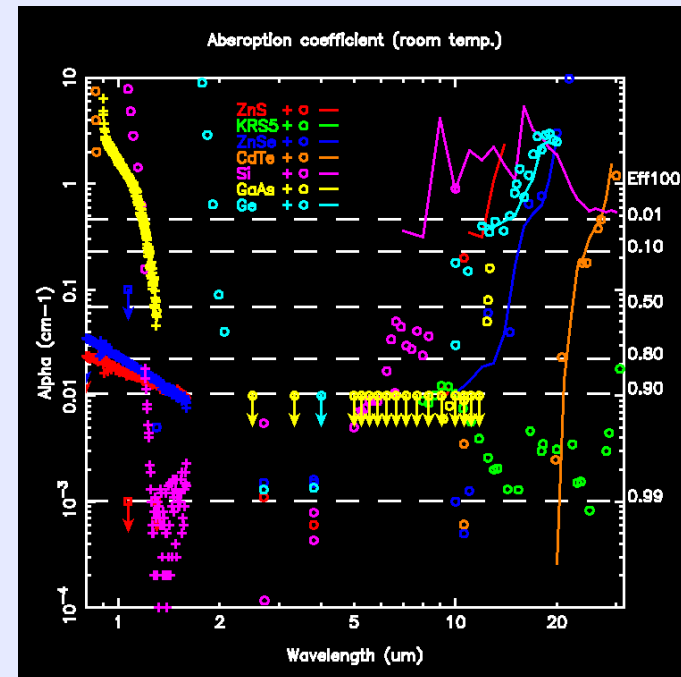
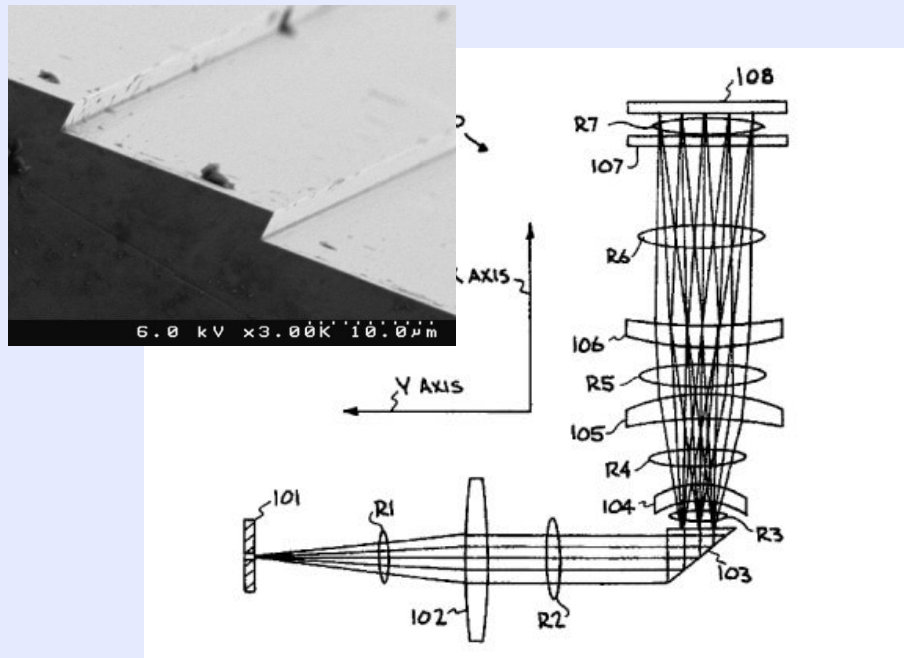
	目標値	Marsh+2006	Ikeda+2008
面粗度	< 3.5 nm (rms)	1.7 nm (rms)	1.7 nm (rms)
面精度	< 0.09 $\lambda$ @633nm	0.29 $\lambda$	0.26 $\lambda$
ピッチ誤差	< 4.0nm (rms)	12-17 nm (rms)	3.1nm
ゴースト	< 1e-4	0.01	< 1e-4
回折効率	> 80% @1.5 $\mu\text{m}$	74-82%	> 88%



# Ge immersion grating (2~12 μm)

—概要と現状—

- 単結晶Geを用いる (高屈折率  $n \sim 4.0$ )
- ELID研削を用いた方法 in RIKEN (Ebizuka et al. 2003)  
フライカットを用いた方法 in LLNL (Kuzmenko et al. 2006)
- LLNL Ge IGは軍事用途には既に実用化
- $> 5\mu\text{m}$ で透過率 $\alpha$ が大きいという欠点 → low blazeで用いる

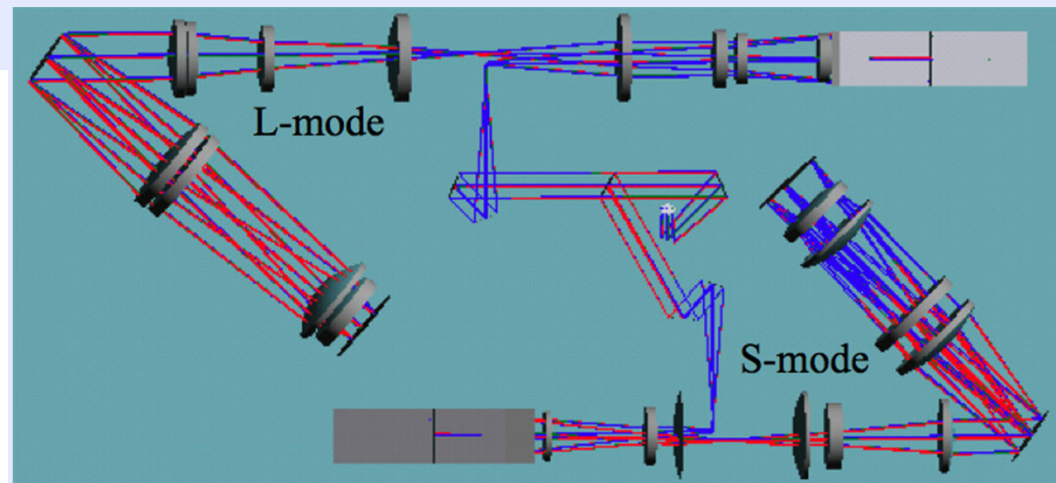
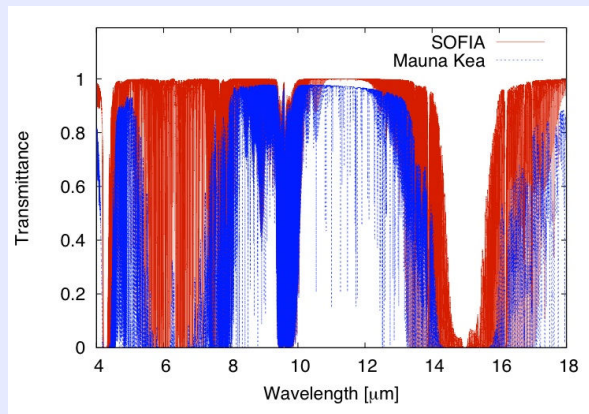




# CdTe/CZT immersion grating (1 ~ 23 $\mu\text{m}$ )

—概要—

- 単結晶**CdTe/CdZnTe (CZT)**を用いる
- 赤外線の高い波長域をカバー (理想的な immersion grating ?)
- 非常にもろく、加工が困難
- HRS/SPICA用として開発中  
(Kobayashi + 2008, Sarugaku+ 2010)





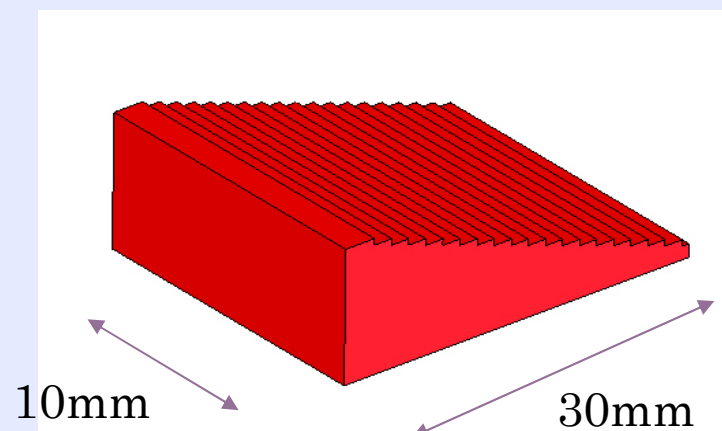
CdTe/CZT immersion grating ( $1 \sim 23 \mu\text{m}$ )

**CONFIDENTIAL**

# CdTe/CZT immersion grating (1~23 $\mu\text{m}$ )

	目標値	達成値(CdTe)	達成値(CZT)
面粗度	< 15 nm (rms)	3.8 nm (rms)	2.9 nm (rms)
面精度	< <u>0.5<math>\lambda</math>@633nm</u>	-	-
ピッチ誤差	< 14 nm (rms)	5 nm (rms)	5 nm(rms)
ゴースト	< 1e-4	-	-
回折効率	> 80%@8 $\mu\text{m}$	-	-

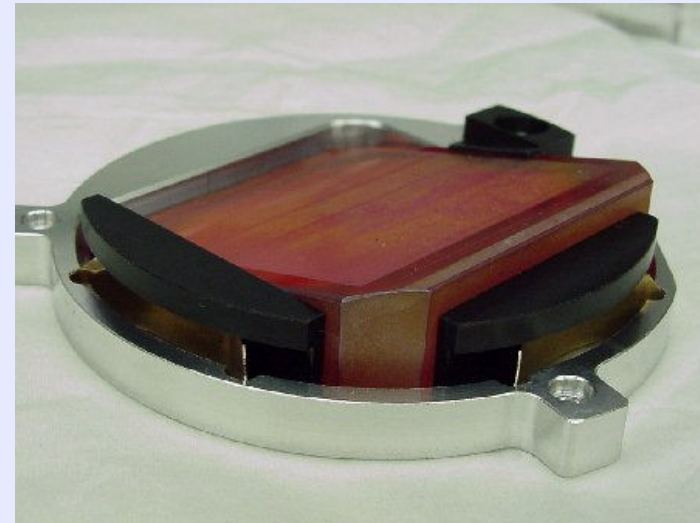
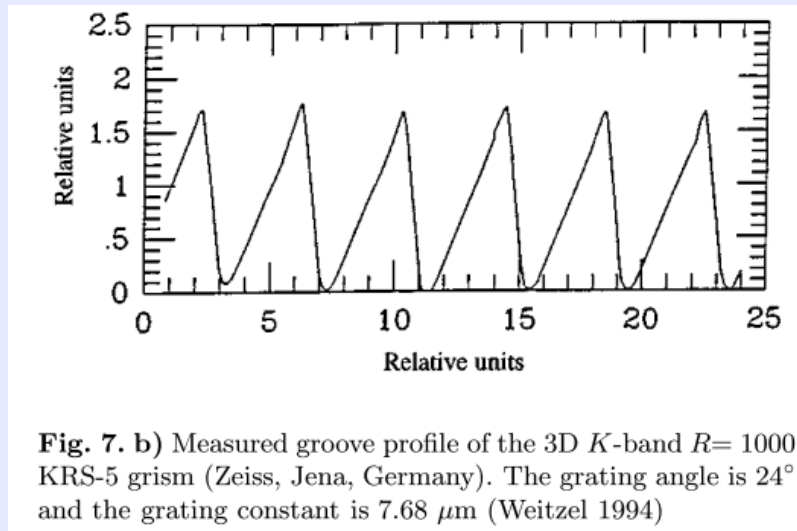
- 面粗度とピッチ精度において非常に有望な結果
- 透過率次第では非常に有望な材料
- 現在ミニ回折格子を製作中  
(2012.04に評価予定)



# KRS5 immersion grating (0.6 ~ 40 $\mu\text{m}$ )

## —概要—

- 可視から赤外線まで透過する材料  
     $> 10\mu\text{m}$ では  $\alpha \sim 1\text{e-}3 \text{ cm}^{-1}$
- 金属同様ルーリングによる加工が可能  
    赤外線用グリズムとして実績あり (by Carl Zeiss Jena)
- 非常に柔らかく研磨が困難
- TlBrとTlIの混晶であるため、ホモジニティが一般的に悪い



KRS5 immersion grating (0.6 ~ 40  $\mu\text{m}$ )

**CONFIDENTIAL**

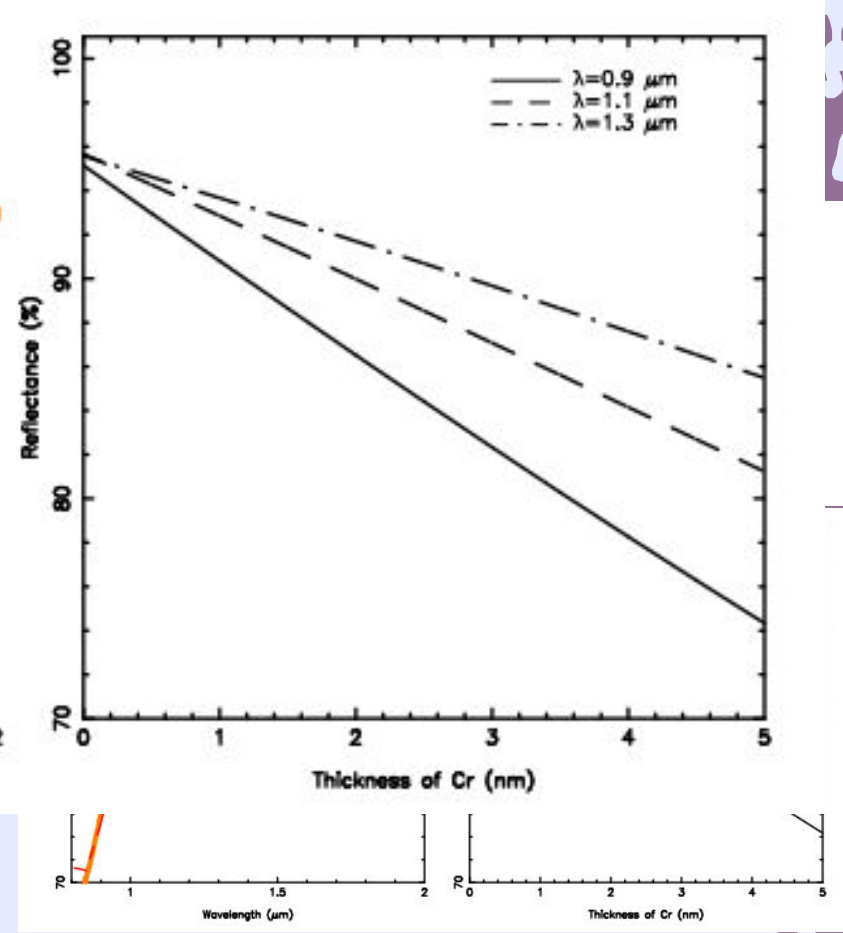
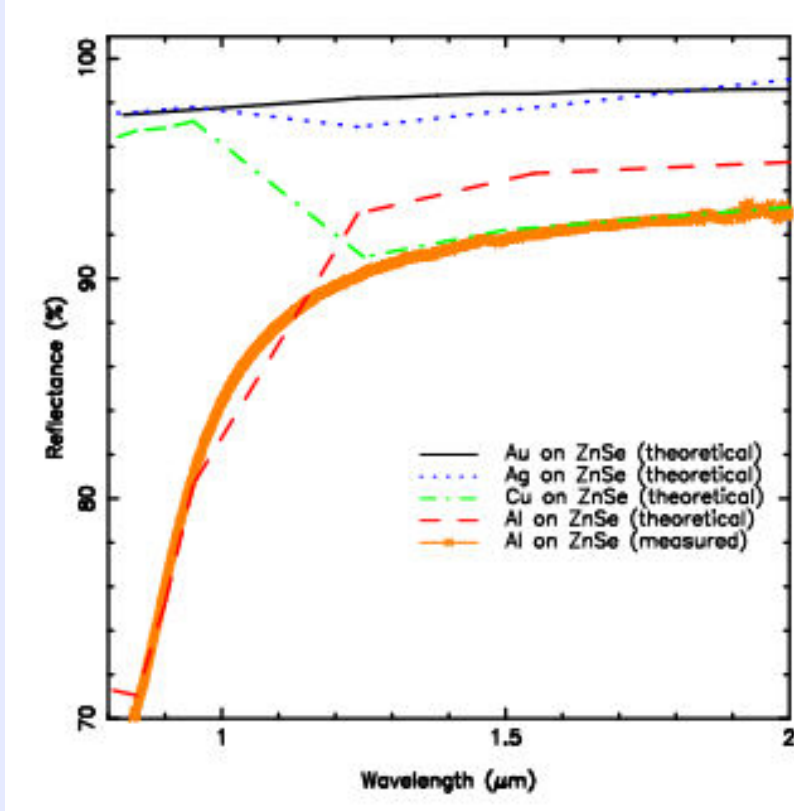
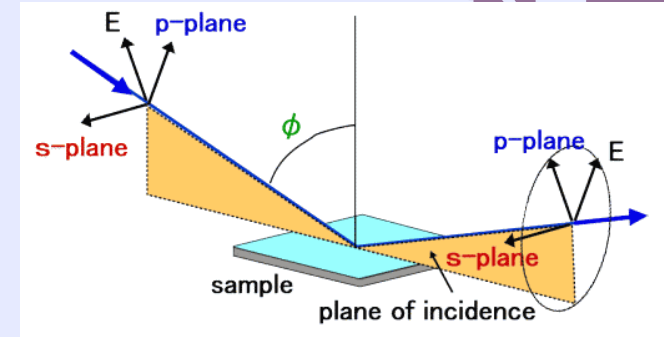
# 目次

1. イマージョングレーティングとは？
2. イマージョングレーティングの歴史
3. イマージョングレーティングの開発の動向
4. イマージョングレーティングのこれから
5. まとめ

# コーティング技術の開発

$$\text{フレネル反射率: } R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}$$

- 入出射面のARコーティング



# 可視光線用イメージングレーティングへ

- 材料の候補

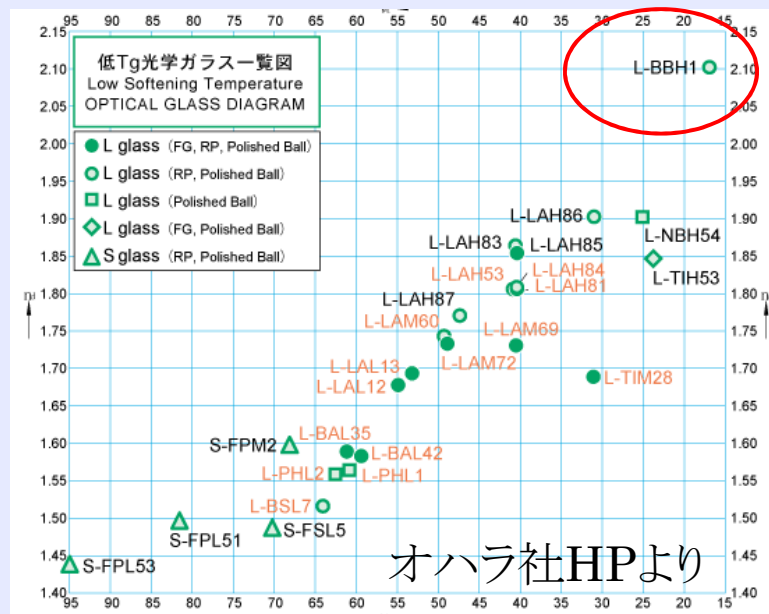
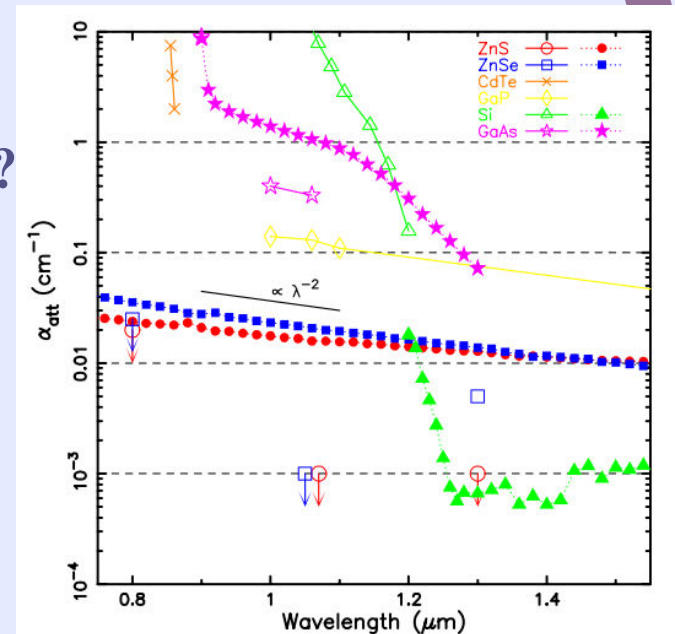
結晶材: ZnS (multispec) > 0.4 $\mu$ m ??

GaP > 0.5 $\mu$ m ??

→ 質の高い結晶開発が必要...

ガラス: L-BBH1 (n $\sim$ 2.1)

→ ブロック化が課題...



オハラ社HPより

- 加工

加工要求 (ピッチエラー、面粗さ)  
は $\lambda^2$ に比例して厳しくなる...  
(サブnmの精度が必要...)

道のりは遠い...

# そもそもイマージョンが良いのか？

- 高ブレーズエシェルグレーティング

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\Phi \tan\theta}{Ds}$$

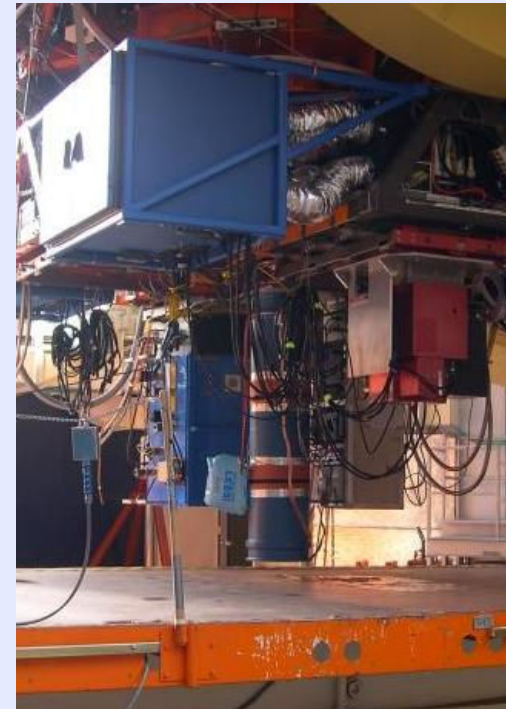
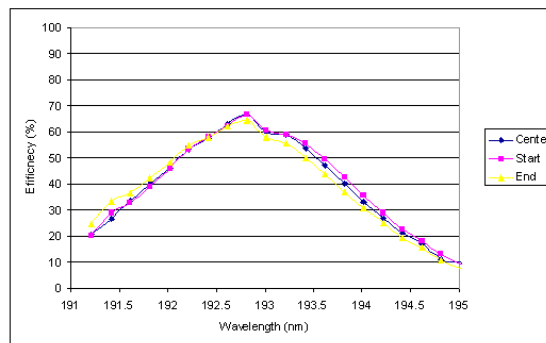
ブレーズ角で光路差を稼ぐ

$\theta=70.3\text{deg}$ (HDS/Subaru)...  $\tan\theta=2.8$

$\theta=82\text{deg}$ とすると ...  $\tan\theta=7.1$  ← **Rが2.5倍に!!**

TEXES/Gemini ( $\theta=84.3\text{deg}$ ) の例  
エキシマレーザー用 ( $\theta=79\text{deg}$ ) の例

Catalog no.	53-084E		
Grating Description	117.94 g/mm echelle grating with 79° nominal blaze angle		
Master no.	MR228	Coating:	aluminum
Maximum Ruled Area:	128 x 258 mm	groove length:	128 mm
		ruled width:	258 mm
Efficiency Curve	spectral order:	m = 86	polarization(s): S & P Average
Remarks	MgF <sub>2</sub> Unpolarized Measured under Quasi-Littrow conditions. Wavelength data corrected for over-under geometry		





# そもそもイメージョンが良いのか？

- 高ブレイク

ブレイク

$\theta =$

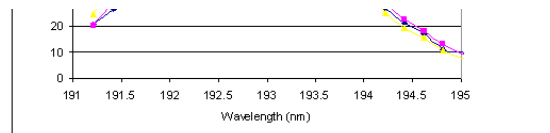
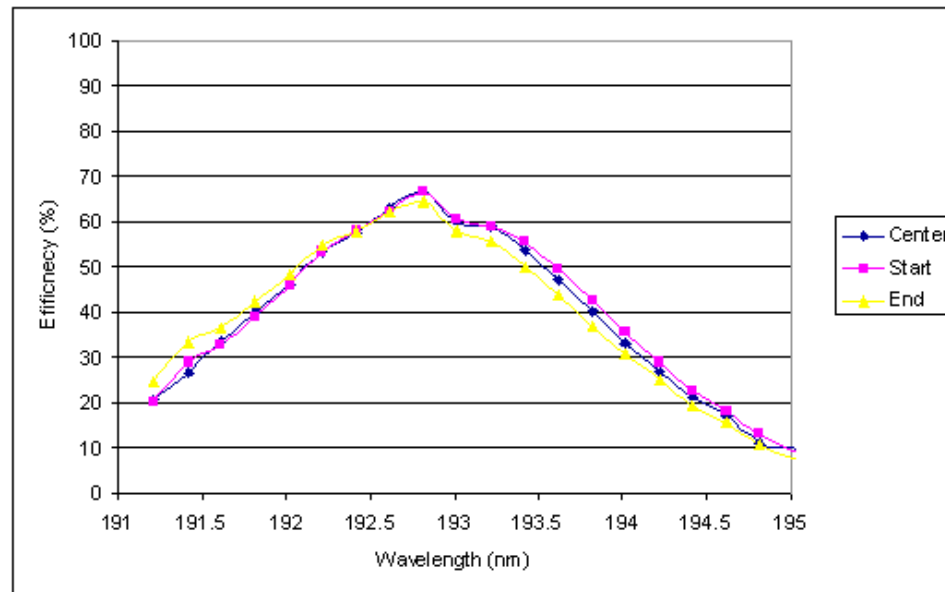
$\theta =$

TEXE

エキシ

Catalog no.	53-*-084E		
Grating Description	117.94 g/mm echelle grating with 79° nominal blaze angle		
Master no.	MR228	Coating:	aluminum
Maximum Ruled Area:	128 x 258 mm	groove length:	128 mm
		ruled width:	258 mm

Efficiency Curve	spectral order:	m = 86	polarization(s):	S & P Average
Remarks	MgF <sub>2</sub> Unpolarized Measured under Quasi-Littrow conditions. Wavelength data corrected for over-under geometry			



$D \tan \theta$

DS

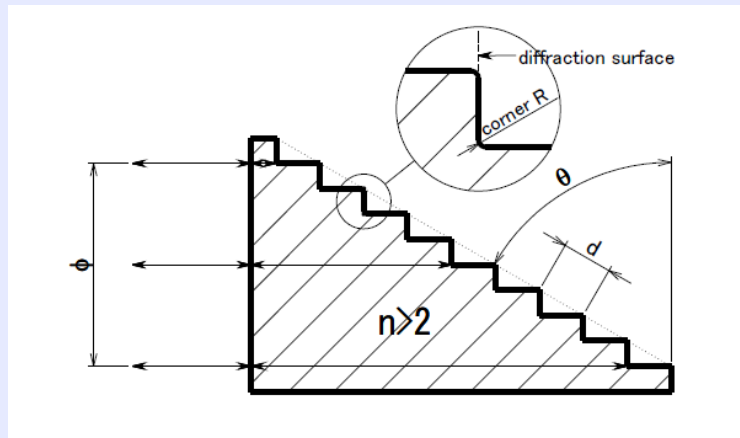


# そもそもイマージョンが良いのか？

## Immersion grating

欠点

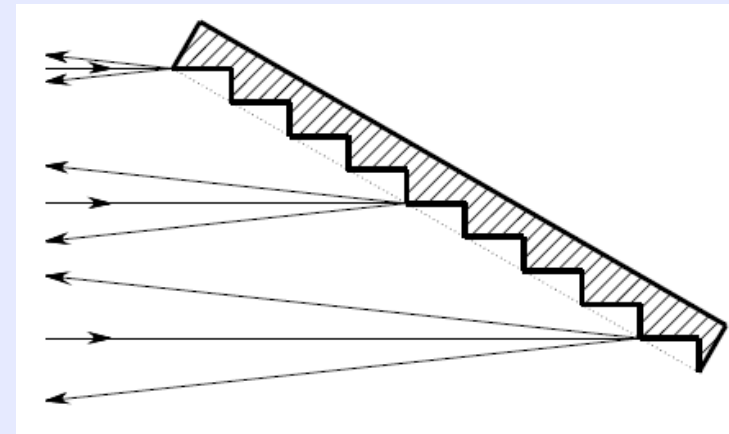
- 入射出面でのゴースト
- ピーク効率が低い  
(入射出面、回折面反射率、内部吸収)
- 波面精度が悪い
- 硝材サイズリミット



## High blaze grating

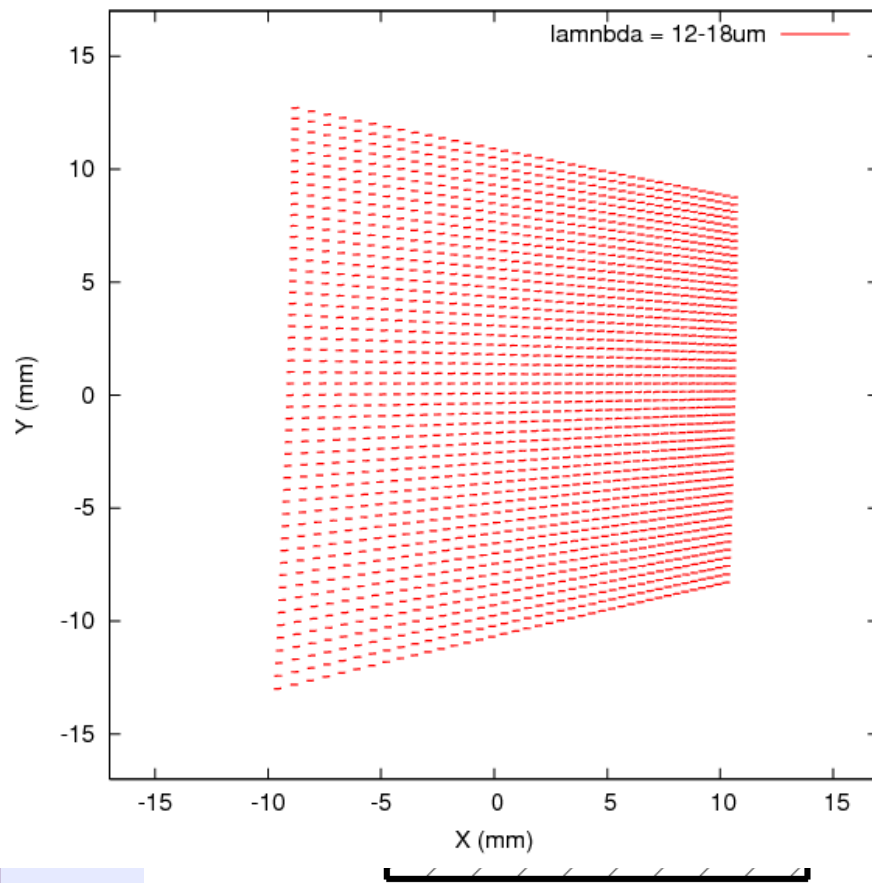
欠点

- 瞳収差が大きい  
(後段光学系が大きくなる)
- 長波長側の効率  
(シャドー効果)
- スペクトル分散の非線形性
- スリット像の傾き

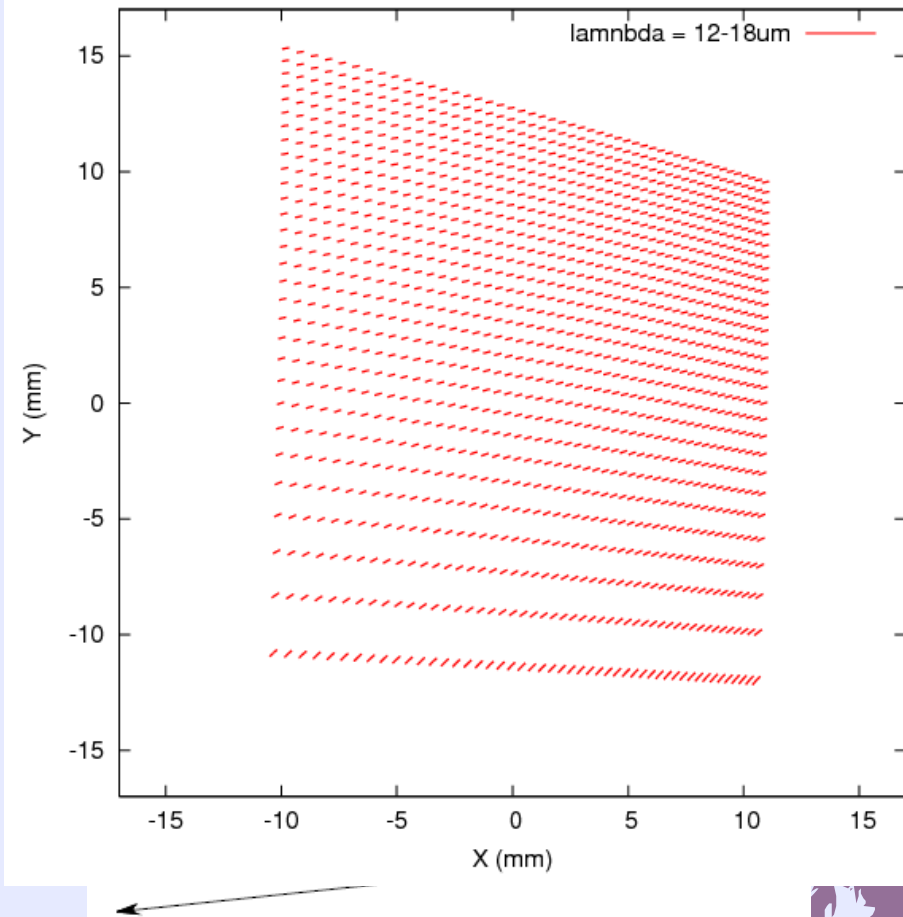


# そもそもイメージジョンが良いのか？

Immersion grating



High blaze grating

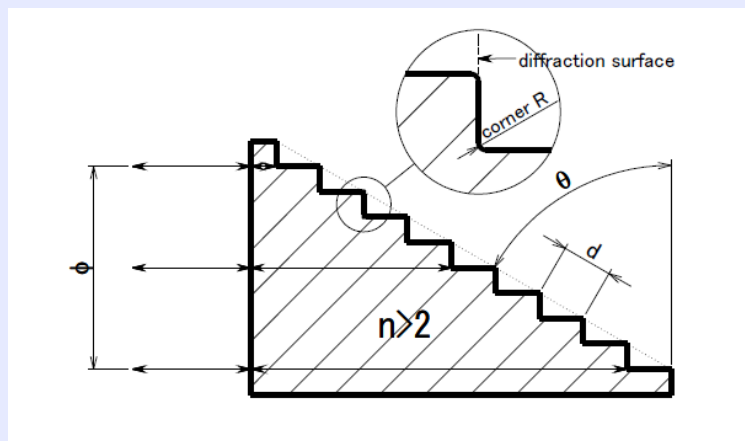


# そもそもイマージョンが良いのか？

## Immersion grating

欠点

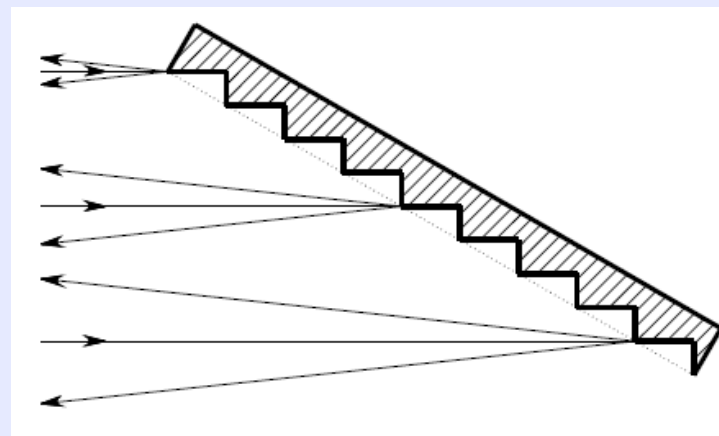
- 入射出面でのゴースト
- ピーク効率が低い  
(入射出面、回折面反射率、内部吸収)
- 波面精度が悪い
- 硝材サイズリミット



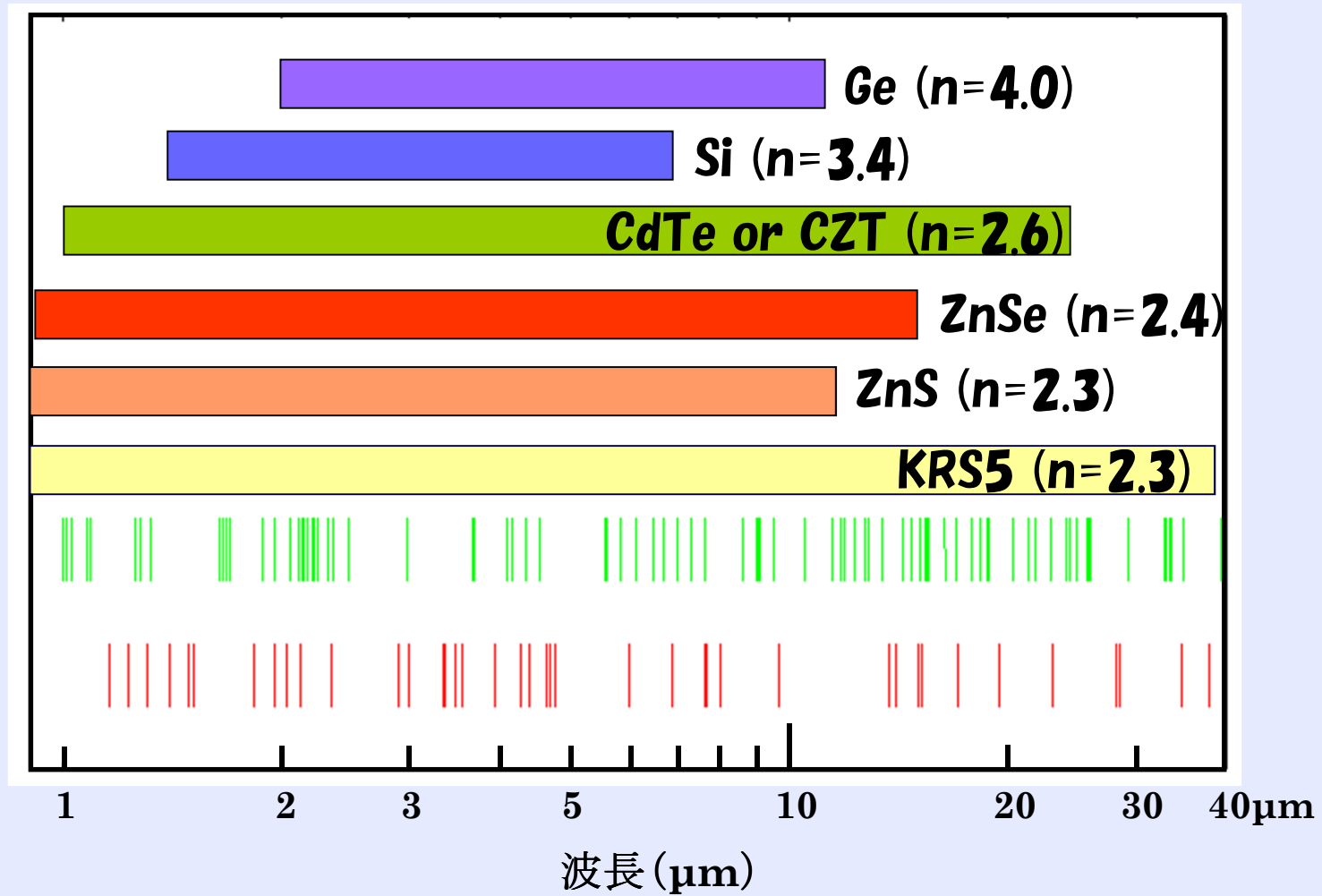
## High blaze grating

欠点

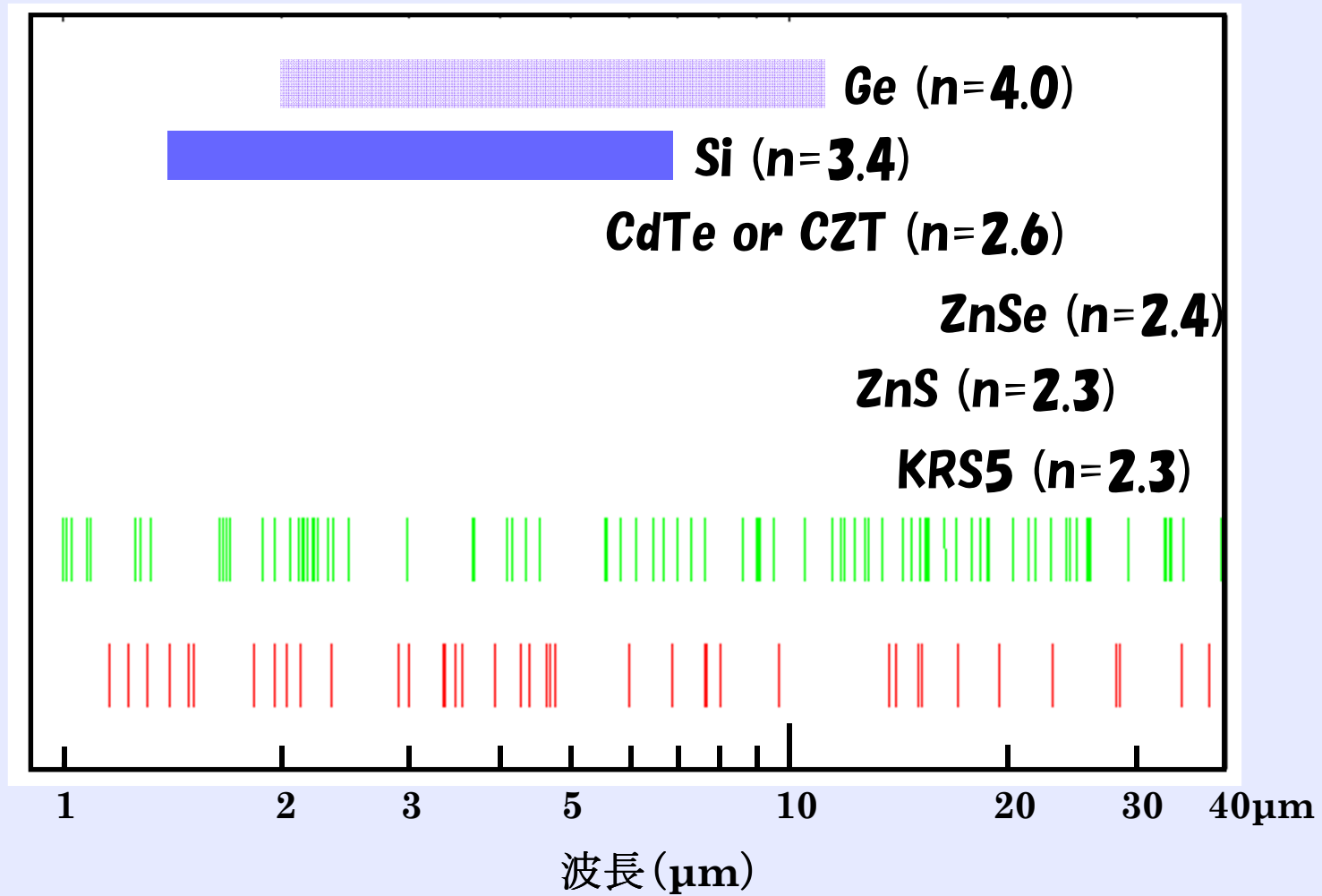
- 瞳収差が大きい  
(後段光学系が大きくなる)
- 長波長側の効率が悪い  
(シャドー効果)
- スペクトル分散の非線形性
- スリット像の傾き



# まとめに変えて



# まとめに変えて



# まとめに変えて

