

キヤノン 可視赤外線デバイス

Canon's visible infrared device

Takashi. SUKEGAWA

Optical Products Operations

10.Decmber.2021

1. 最初に

- キヤノン製品と技術力
- 内製切削加工機とポテンシャル
- 切削方式

2. 回折格子

- 種類と対応波長
- 反射型
- 裏面反射（イメージジョン InP,Ge,CdZnTe）
- グリズム(InP,Ge)
- 適用例（METIS,東京大学,JILA,VLT）

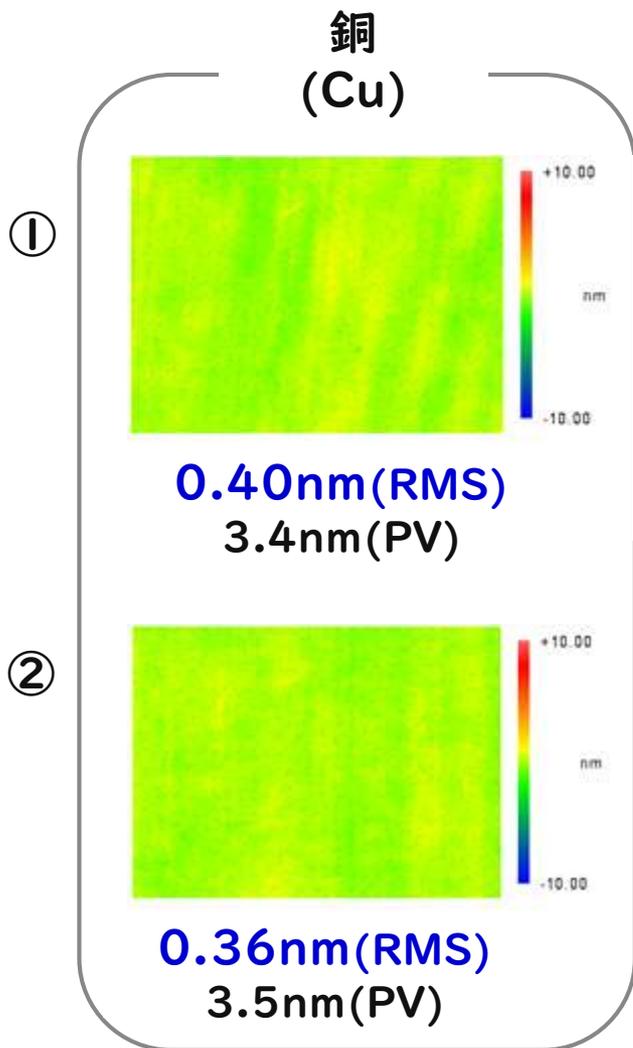
3. 一体型ミラー（面分光用ミラー）

- 面分光
- イメージスライサー
- 一体型多面ミラー
- キヤノンブラック
- 適用例(NAOJ,LASP)

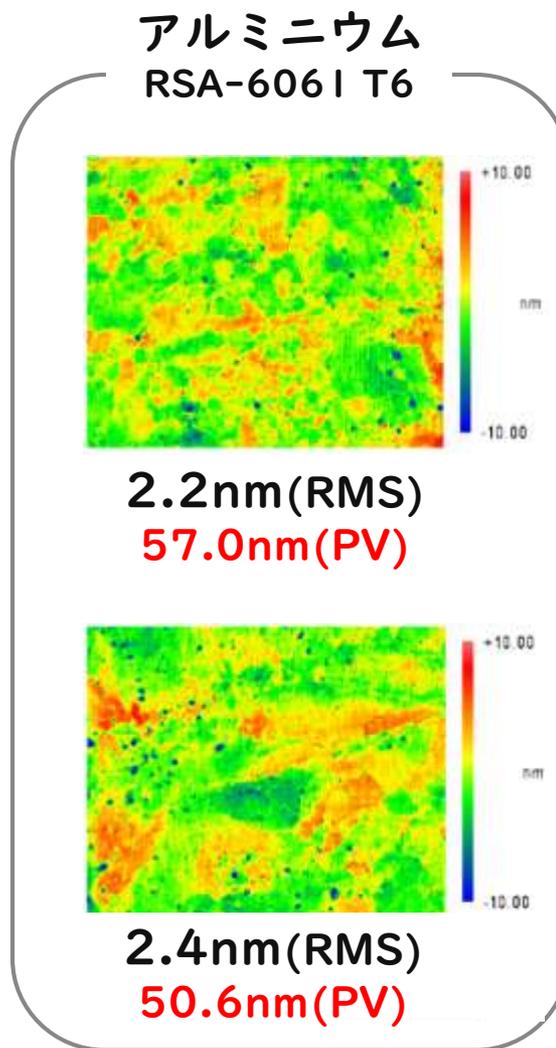
4. まとめ

最初に

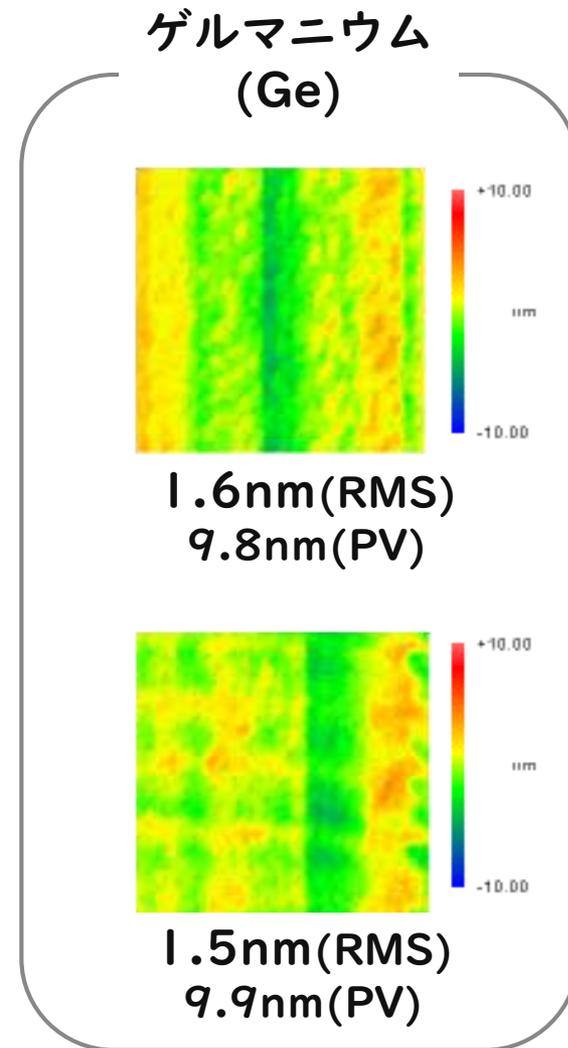
切削による表面粗さ



Zygo NewView 3D profiler
評価領域：70 x 50 μm



Zygo NewView 3D profiler
評価領域：70 x 50 μm



Zygo NewView 3D profiler
評価領域：50 x 50 μm

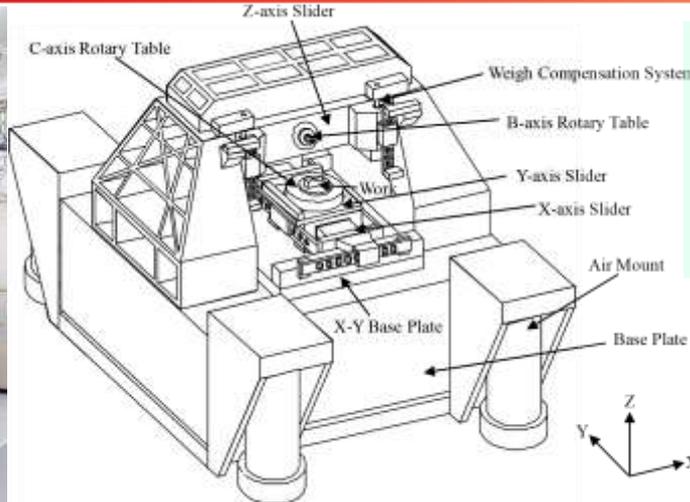
数字：同デバイス内の異なる箇所

キヤノン内製切削加工装置

<https://global.canon/en/technology/>

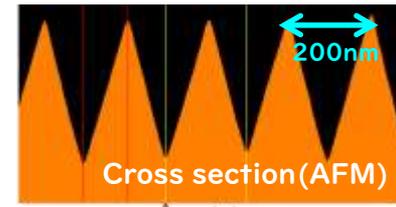
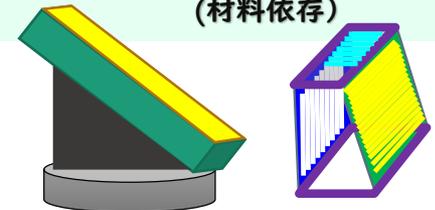


加工機外観 (Canon HPより)

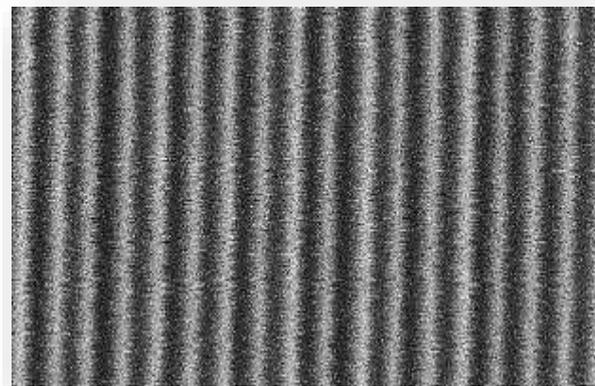


軸構成 : 5軸加工機 (直動3軸, 回転2軸)
加工方法 : シェイパー / フライカット

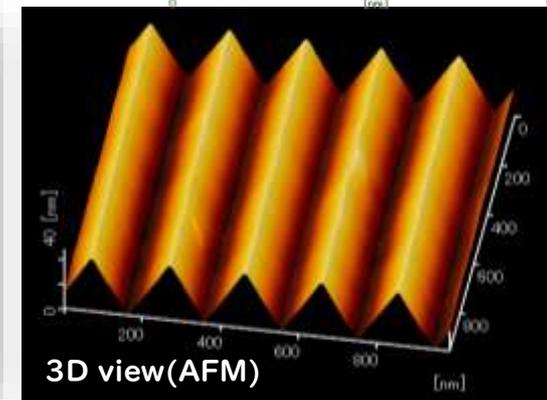
位置安定性 : < 2nm(RMS)
リニアリティ : < 10nm(RMS)
面粗さ : 0.3nm(RMS) ~ (材料依存)



加工エリア (Canon HPより)



50,000 grooves/mm
間隔: 20nm

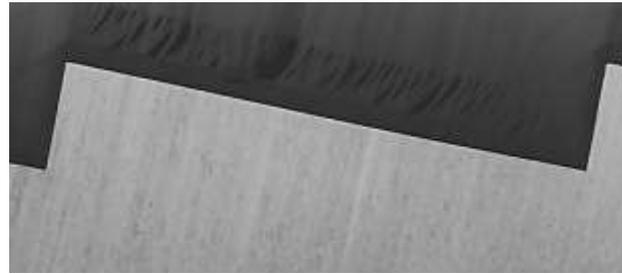


5,000 grooves/mm
間隔: 200nm

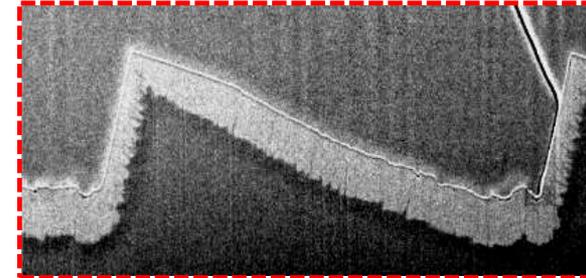
高品位切削プロセスの優位性

除去加工

シャープな形状

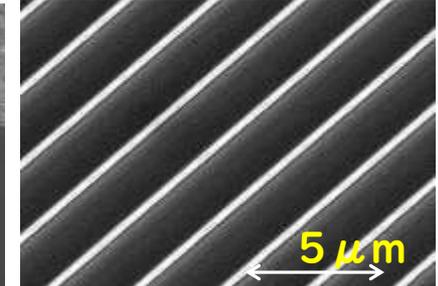
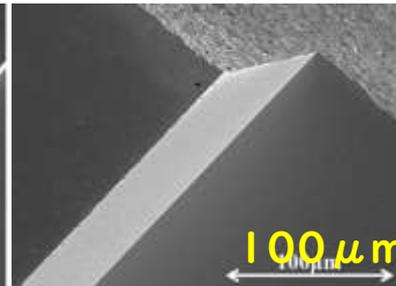
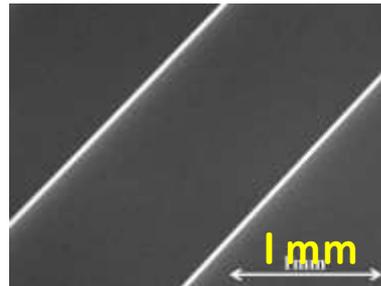


切削格子断面 (Canon)



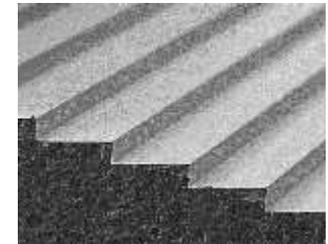
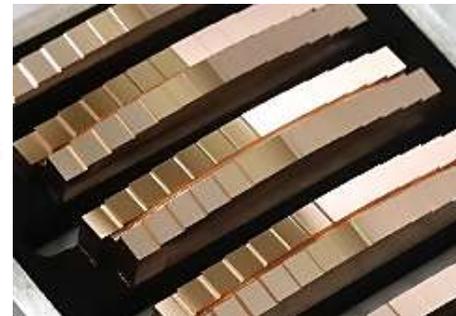
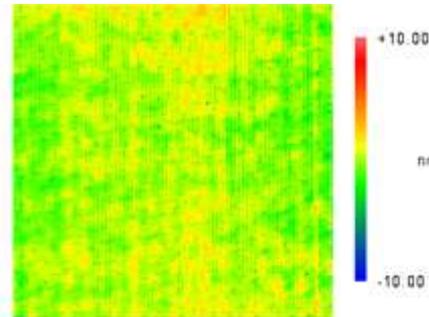
レプリカ格子断面 (比較例)

大型格子
立体構造
脆性材



*低負荷加工

自由形状
表面粗さ



面粗さ：0.9nmRMS
右ミラー評価領域口1mm

*高能率

高精細構造
汎用部品

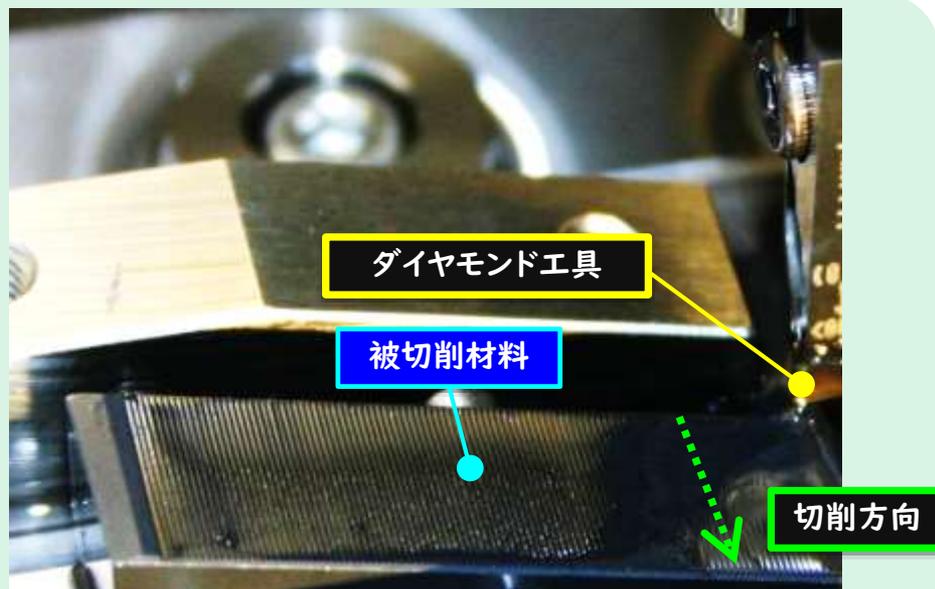
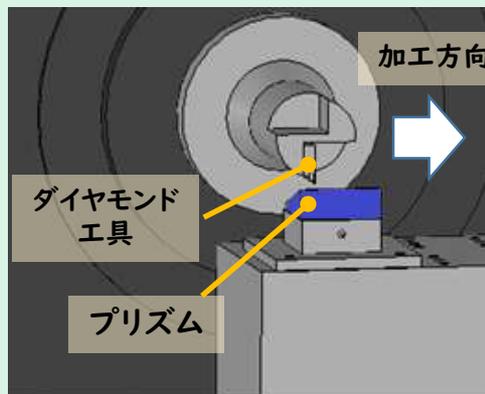


多面、回折格子だけでなく、
球面/非球面大口径ミラーなど



シェーパー

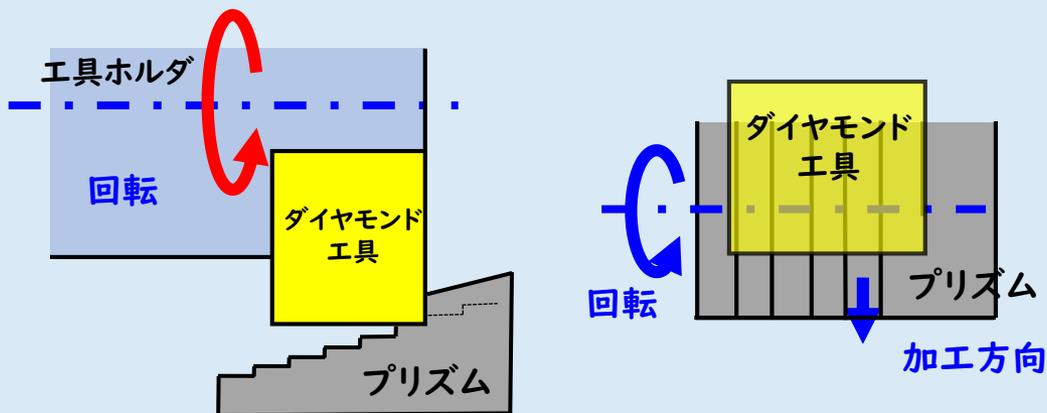
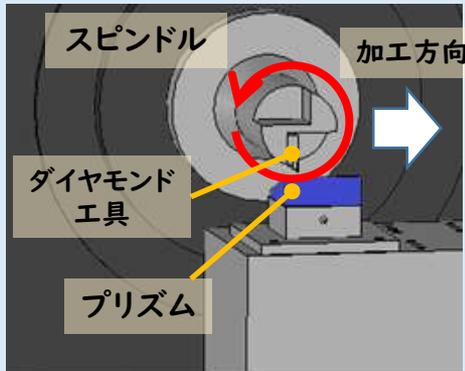
工具を一方向に動かして加工～彫刻刀



2012 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Sukegawa et al CANON Inc

フライカット

回転した工具を動かして加工



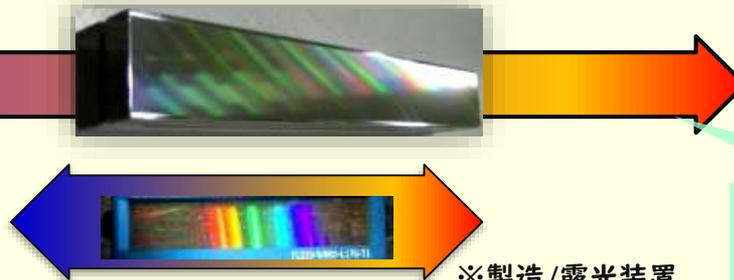
回折格子

種類と対応波長



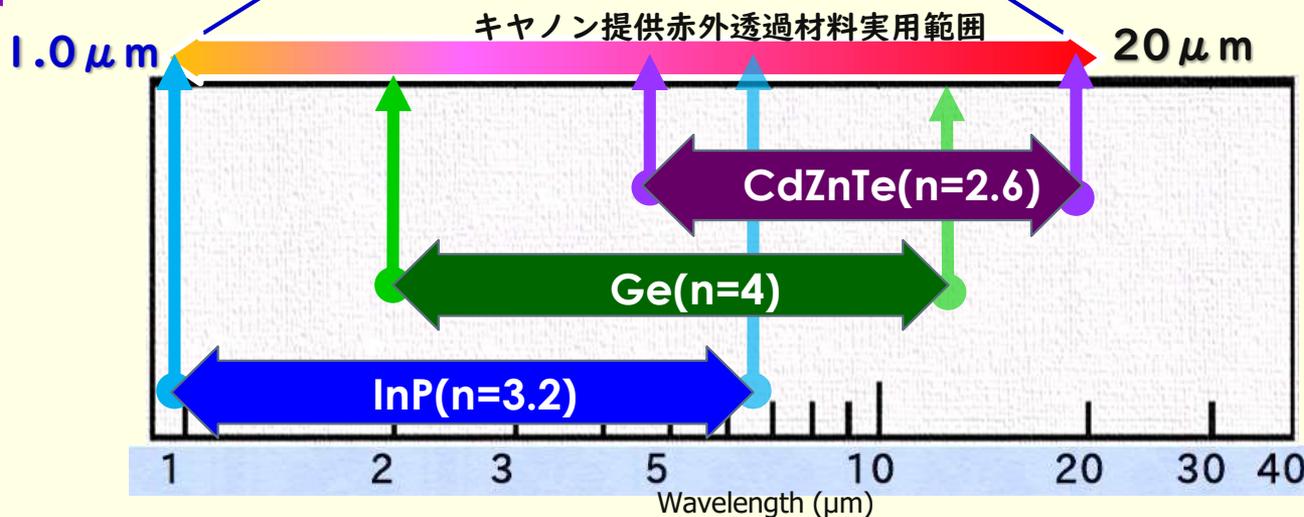
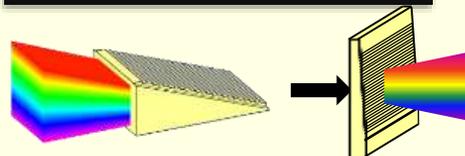
反射

透過



切削方式=材料除去なので
良好な大型格子が製作可能
長波長で優位(赤外)

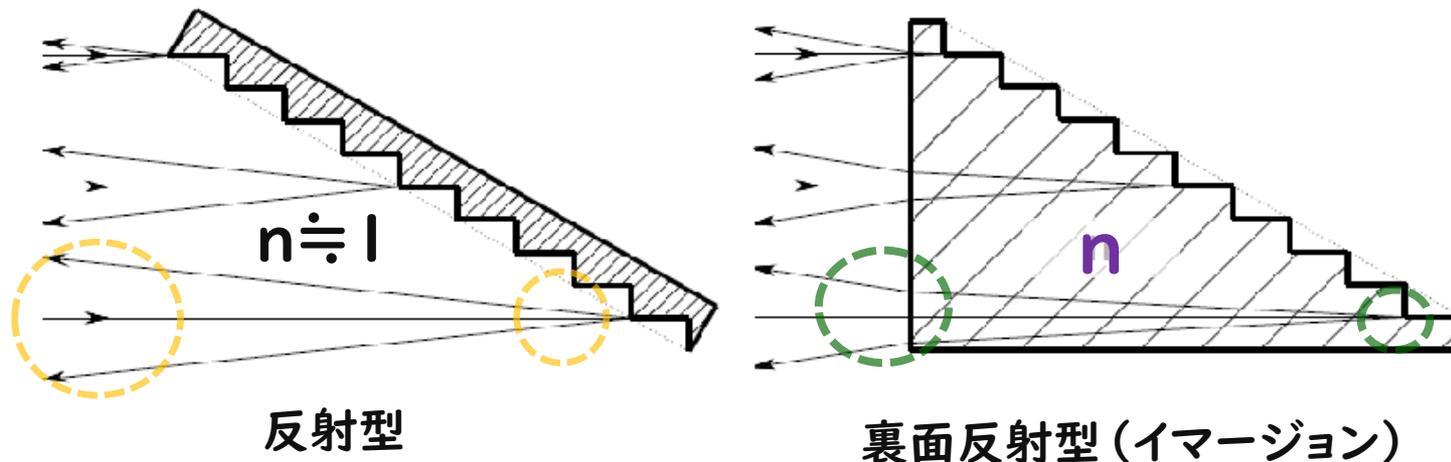
裏面反射/グリズム



裏面反射(イメージョン) 回折格子

回折面が屈折率 n の媒質中であれば、波長は $1/n$ になり、
分散力(回折角)は n 倍になる。

$$\text{理論分解能}(R) = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{2n\phi \tan \theta}{\lambda}$$



効果

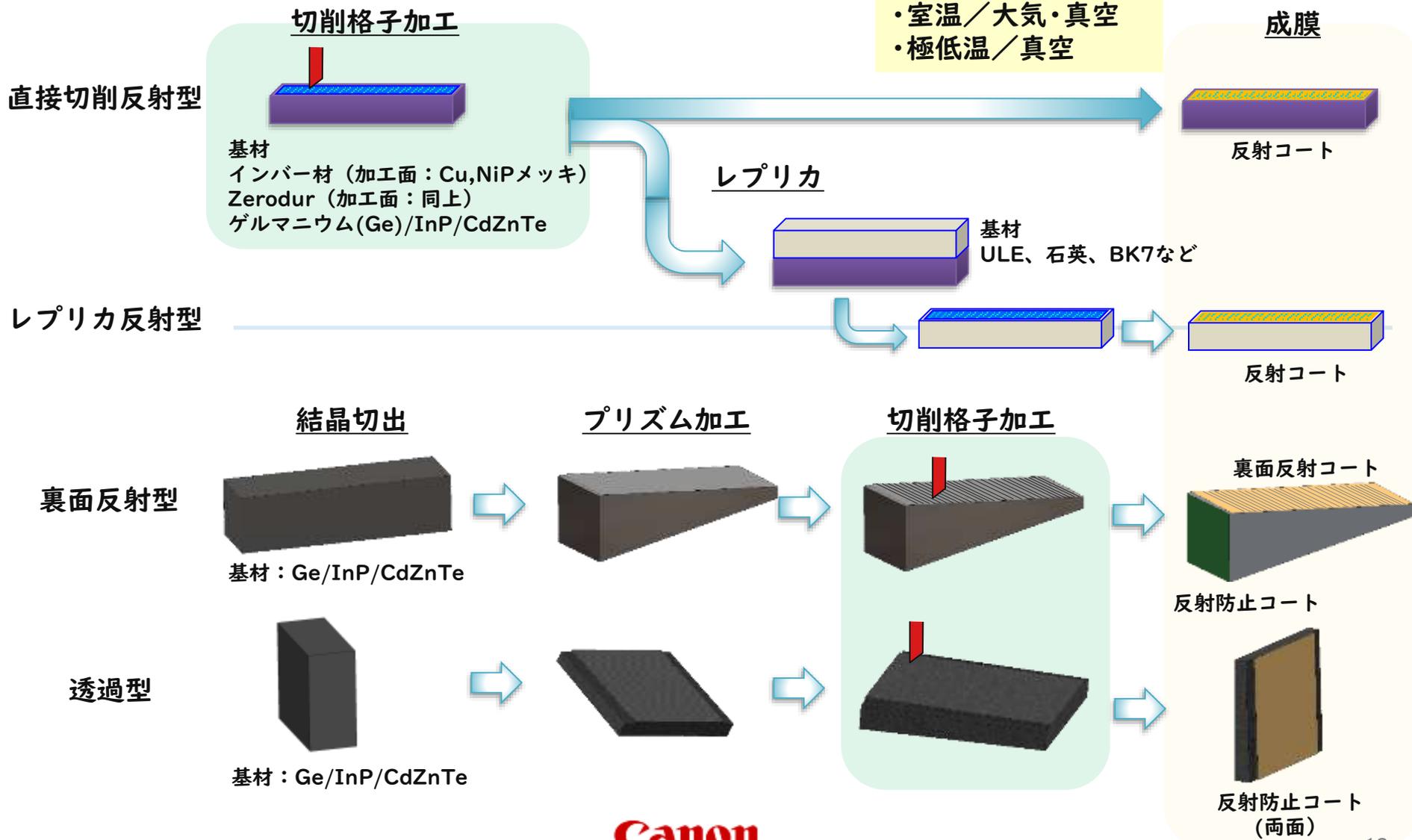
- n 倍高い分解能 同性能で $1/n$ にコンパクト
- 同性能でも分散光束の拡がりが抑えられる(対反射)

導入課題

- 高価
- 表面/内部反射(迷光)のケア

切削回折格子と製造の流れ

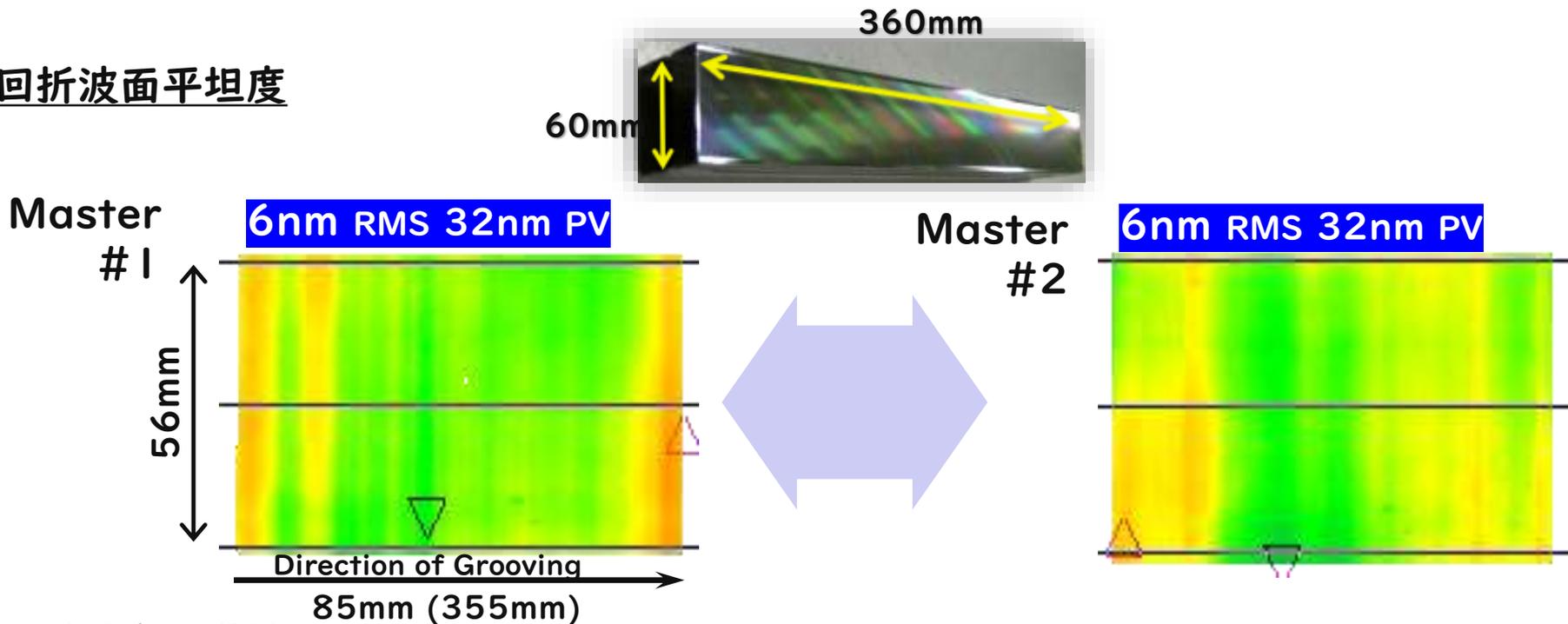
タイプ : 工程・材料



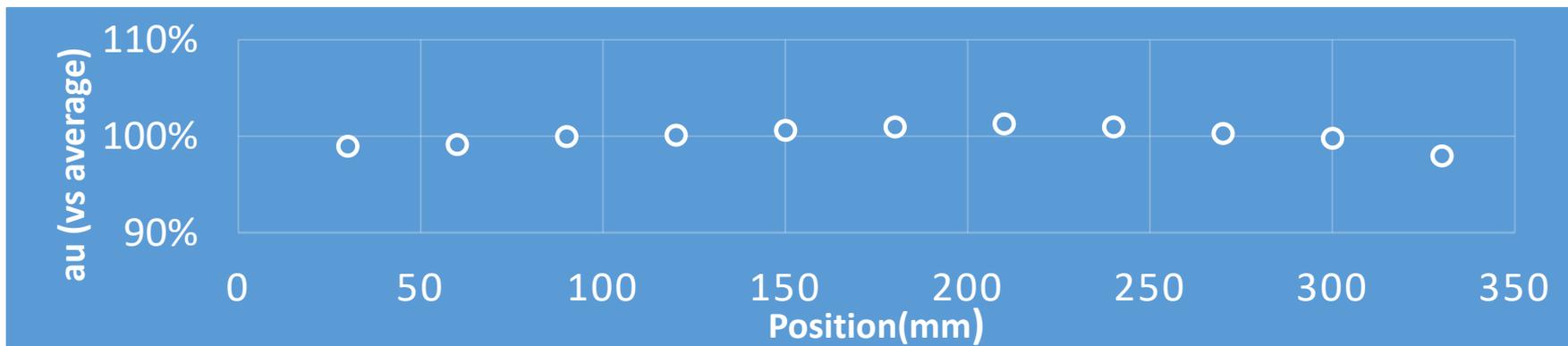
使用環境
・室温 / 大気・真空
・極低温 / 真空

反射型 ~ 回折波面/効率平滑性(装置ポテンシャル)

回折波面平坦度



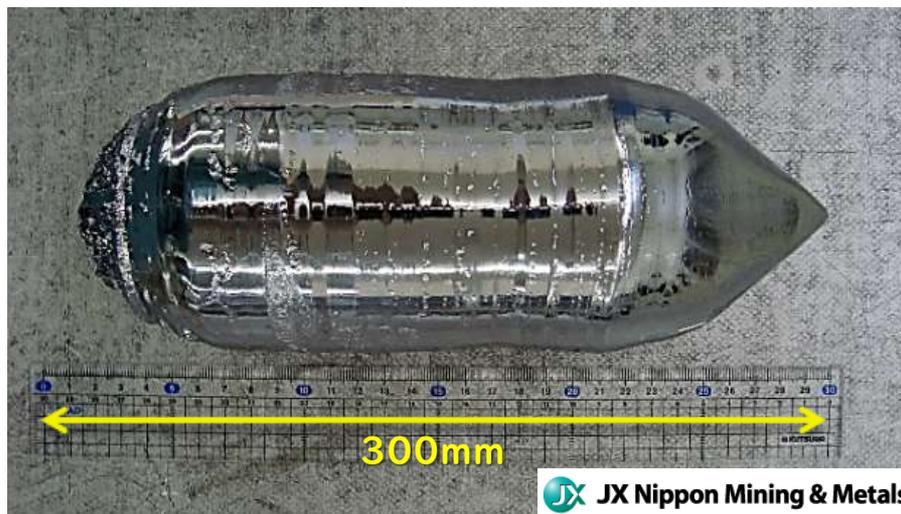
回折効率平滑性



InP とは？

基板上の形成したヘテロエピタキシャル構造を利用し、HEMTやHBT等の超高速半導体素子の基板として用いられる。通常InPより電子移動度が高いInGaAsを電子走行層として利用することが多い。近年は、Si上のCMOS、SiGe系HBTの性能が向上し、InP系デバイスは、耐圧、消費電力、動作速度、帯域の点で有利であるものの、回路設計や製造コスト上の比較劣位な点もあり、特殊な用途に限定されているようである。

光通信用途では、InGaAsPやInGaAlAsといった四元系混晶半導体材料をエピタキシャル成長することができるので、半導体レーザー、光変調器、光増幅器、光導波路、発光ダイオード、受光素子等の各種光通信用デバイスの基板として使用され、通常は格子整合する混晶組成がカバーする1.0-1.7 μm の波長のデバイスに用いられる。特に光ファイバーの波長分散が最小になる1.3 μm 帯や伝送損失が最も少ない1.49-1.6 μm 帯のデバイスが多い。他の材料系に比べデバイスの信頼性が高いこと、すでに幹線系から家庭まで敷設されるようになりインフラが整備されていること、デバイス価格の低コスト化に後押しされる追い風の中で、さらにデータコム分野やデジタル家電向けへと拡大するものと期待されている。通信以外の用途では、これらの波長に対応する各種光センサーに用いられることもあるが、さらに格子整合しない1.9-2.6 μm 帯の受光素子用基板にも利用され、水分センサー、分光器や輻射温度計測器などに用いられている。



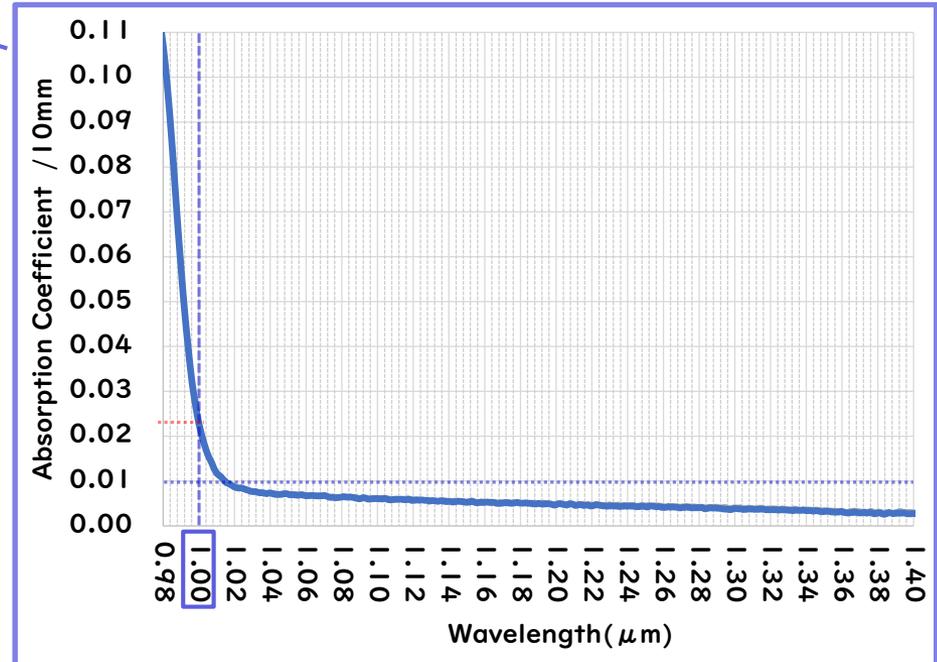
イメージ用材料としては..

- 1.0 μm ～使用可能/Siより短波長で使用可能
- 高い屈折率 ($n=3.2@1\mu\text{m}$)
- 良質な大型結晶 (> $\phi 4$ インチ)
- 良好な切削性

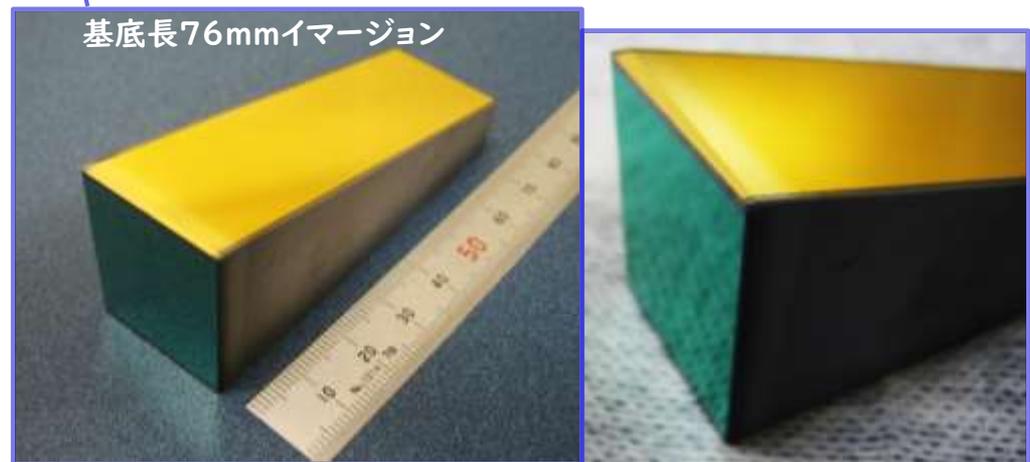
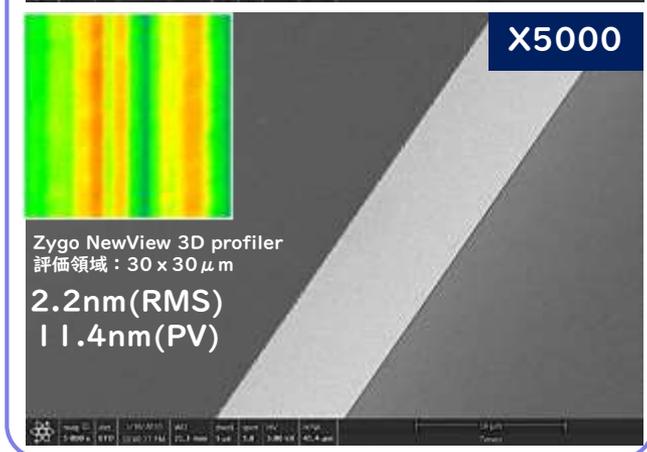
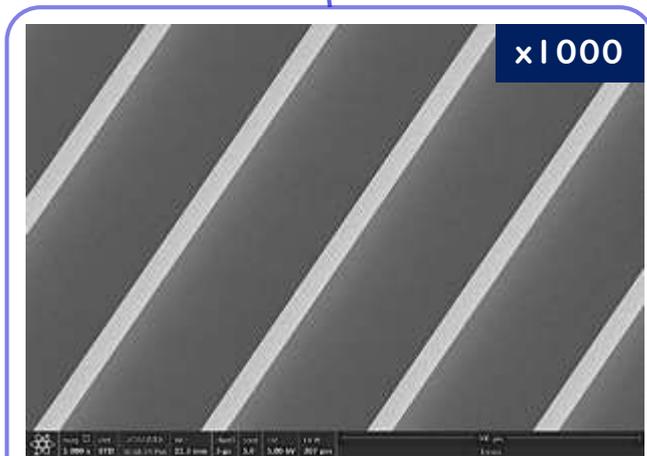
適材

InPイメージョン回折格子

- 1.0 μm ~ 使用可能 / Siより短波長で使用可能
- 高い屈折率 ($n=3.2@1\mu\text{m}$)
- 良質な大型結晶 ($> \Phi 4$ インチ)
- 良好な切削性



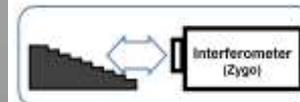
2020 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Sukegawa et al CANON Inc



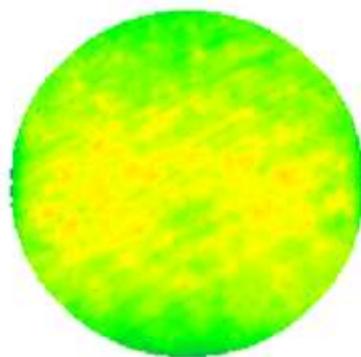
ゲルマニウム(Ge)イメージョン回折格子

3種の中で最も切削性が良好で最もパワフル($n=4$) かつ大型結晶($\Phi 300\text{mm}$) が入手可能

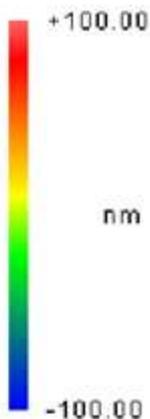
高屈折率 = 反射型の置換には 相応の波面収差、面粗さが求められる 



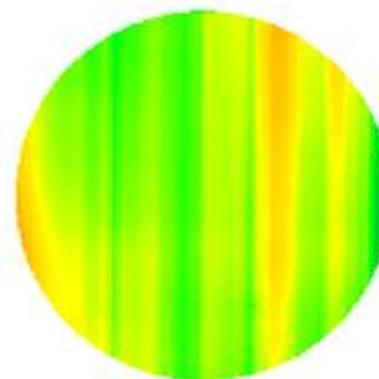
Ø 40 入射/出射面(研磨)



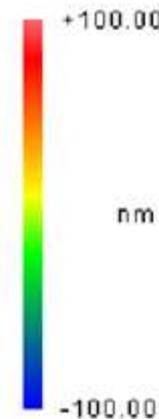
9.4nm(RMS)
70.4nm(PV)



Ø 40 格子面(切削)大気側リトロー計測(75度)

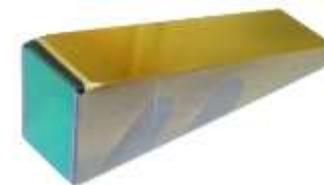
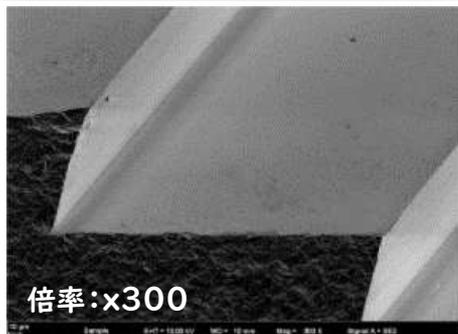
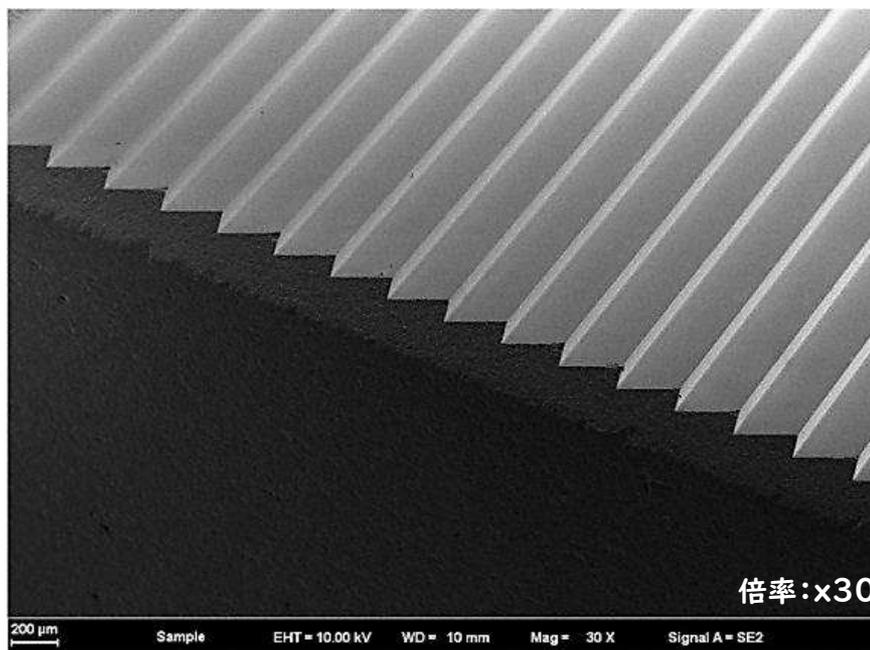


10.5nm(RMS)
78.5nm(PV)



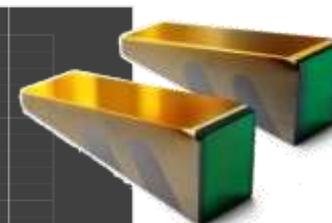
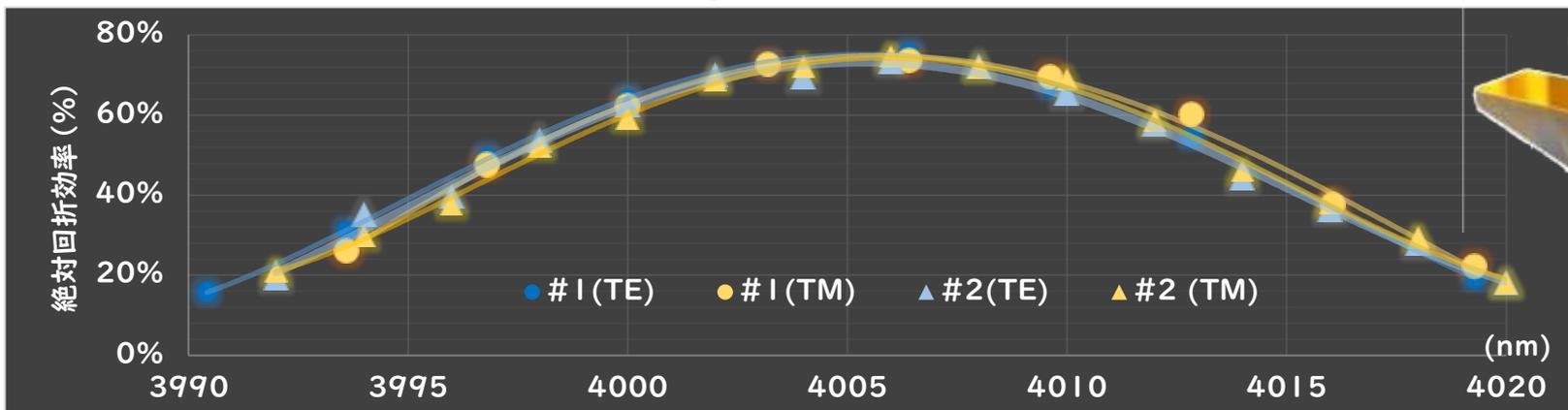
CdZnTeイメージジョン

三種の中で最も脆い材料だが、長波長($\sim 20\mu\text{m}$)で使用可能



成膜後 (AR/HR)

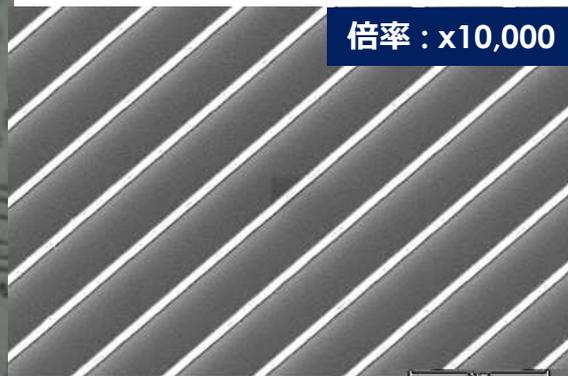
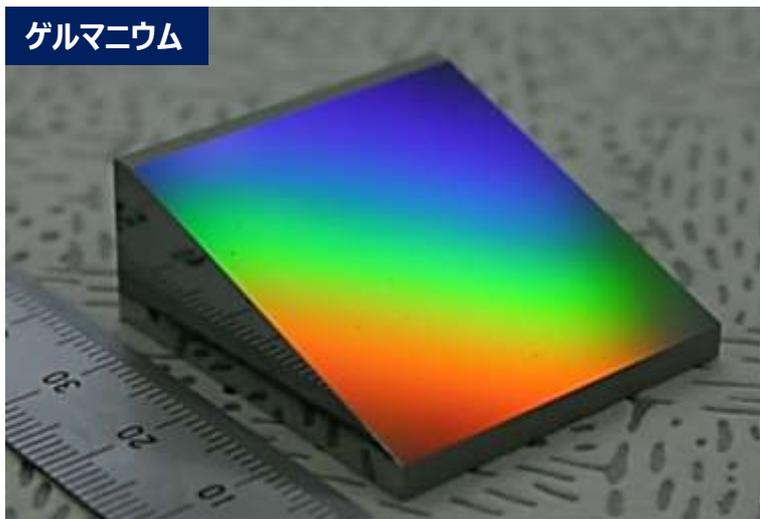
2012 SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation Sukegawa et al CANON Inc



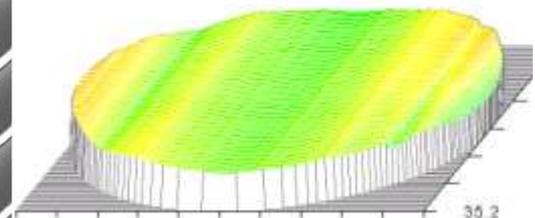
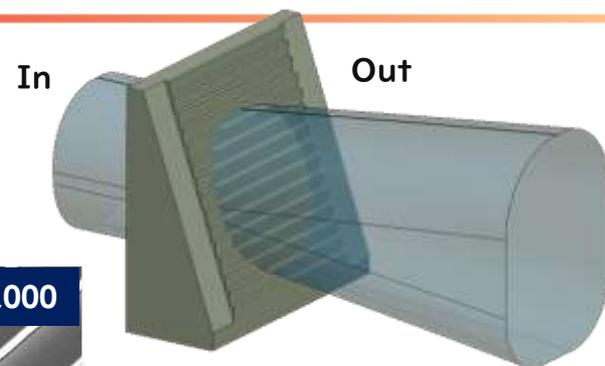
グリズム/平面

脆性材料切削回折格子として最も難しい

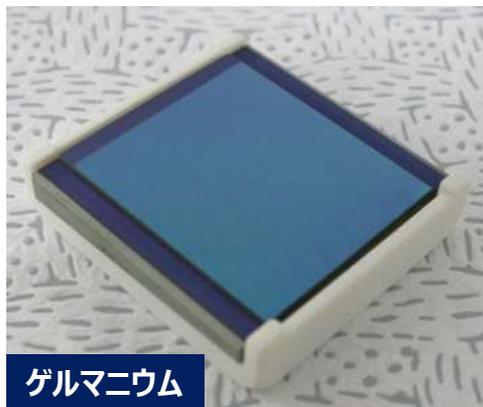
ゲルマニウム



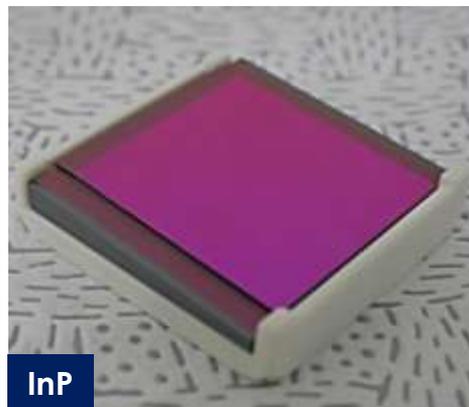
格子ピッチ : $2.174 \mu\text{m}$ ブレーズ角 : 19.19° 15,000本/ $\phi 30\text{mm}$



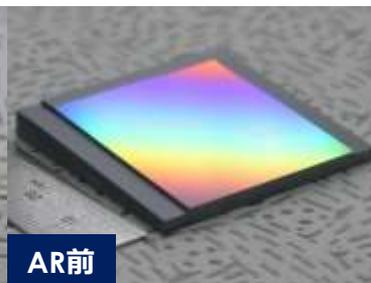
9nm(RMS) 47nmPV



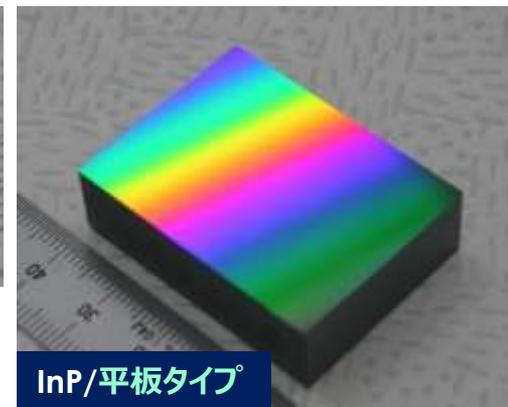
ゲルマニウム



InP



AR前

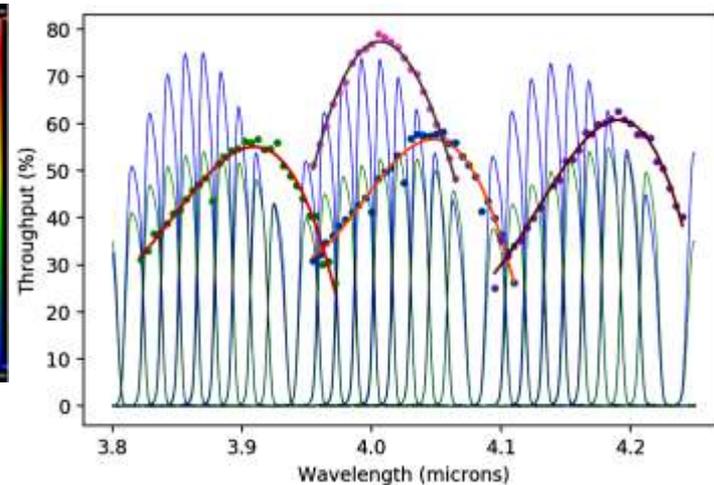
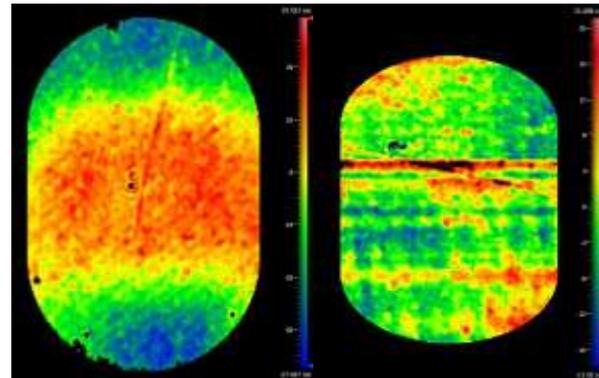
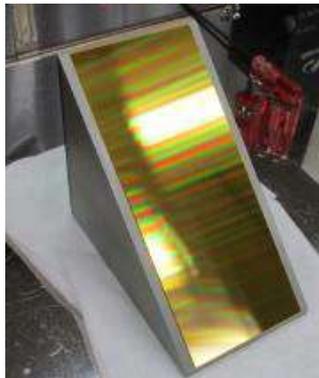
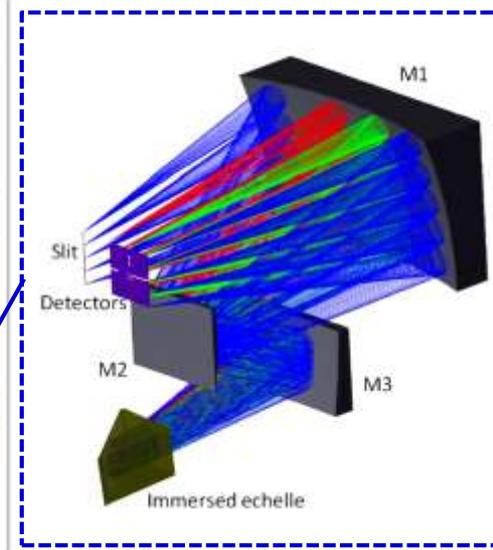
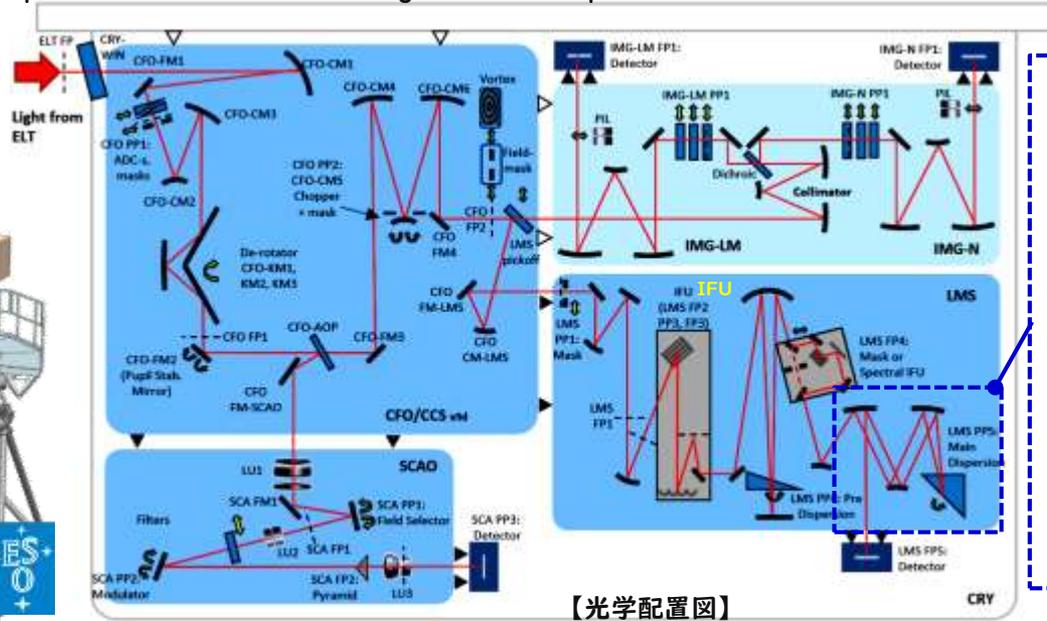


InP/平板タイプ

～ 適用例紹介 ～

Geイマージョン~ELT/METIS

Tibor Agócs, Takashi Sukegawa, et al. "Ge immersed grating manufacturing and optical verification for the METIS high-resolution spectrograph" SPIE 2020. 11451, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV



- FTS: 120 deg pol.
- MIRCcat: TM pol.
- MIRCcat: TM pol. fit
- MIRCcat: TM pol. (order -1)
- ▲ MIRCcat: TM pol. (order +1)
- ◆ MIRCcat: TM pol. (order +1) fit
- ◇ MIRCcat: TE pol.
- MIRCcat: TE pol. fit

回折効率ピーク
(偏光平均)
62~72%
@2.9-5.3 μm

$$WFE_{IG} = \sqrt{[\sqrt{2}(n-1) \cdot \#1]^2 + [n \cdot \#2]^2}$$

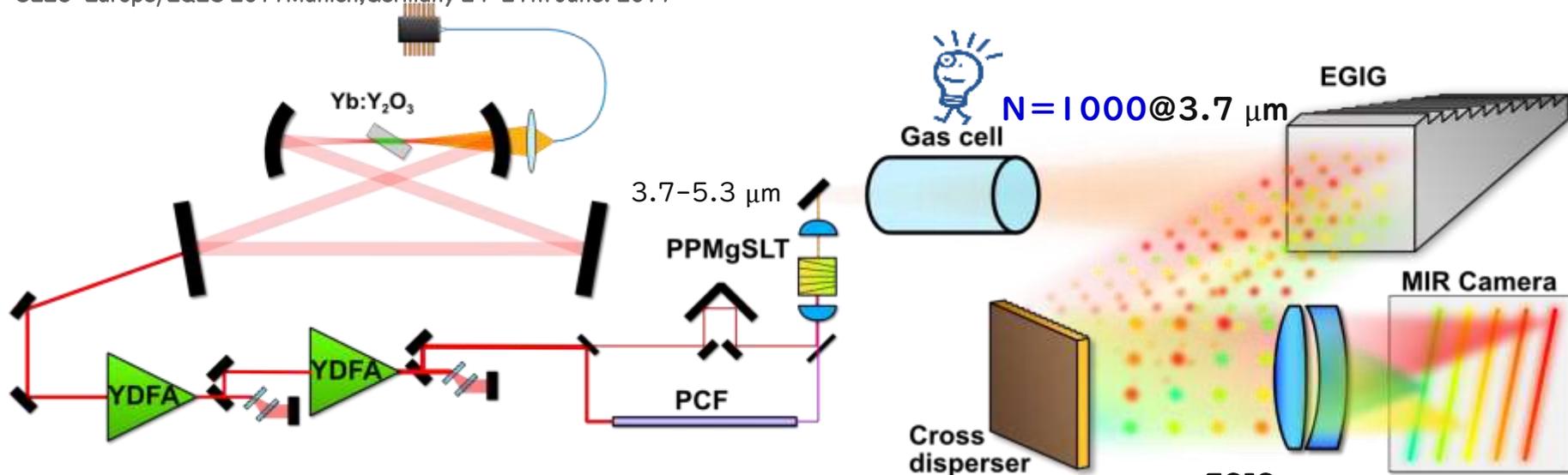
$$WFE_{IG} = 64.6 \text{ nmRMS}$$

Geイメージジョン～東京大学/物性研/小林研究室

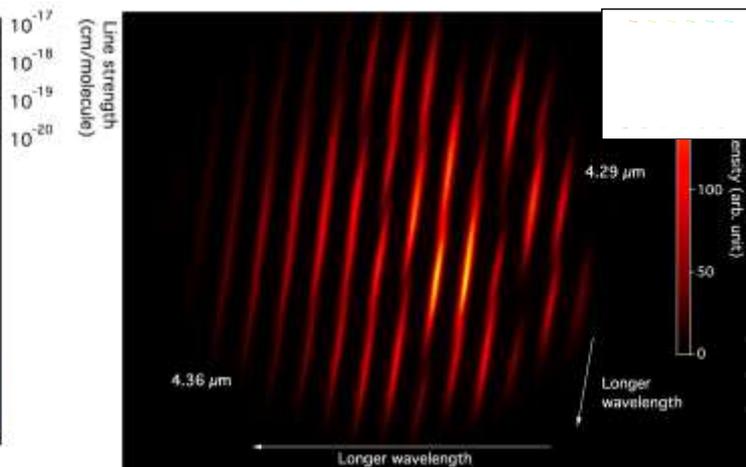
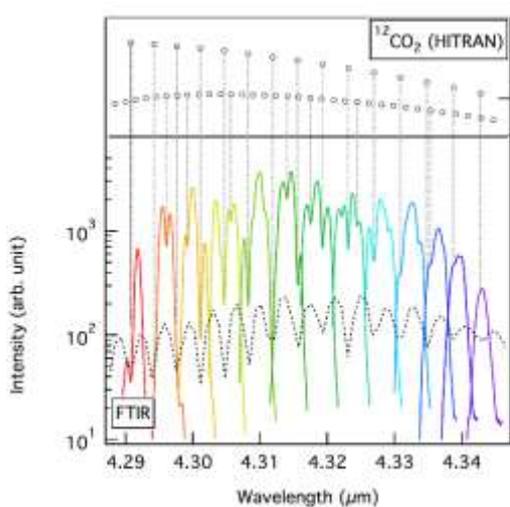
Shuntaro Tani, Takashi Sukegawa, Takuma Nakamura, and Yohei Kobayashi

"Extremely-high-order Ge Immersion Grating-based Spectrometer for Offset-free Precision Spectroscopy in the Mid-infrared Region"

CLEO-Europe/EQEC 2017Munich, Germany 24-29th June, 2017



Absorption @ CO₂

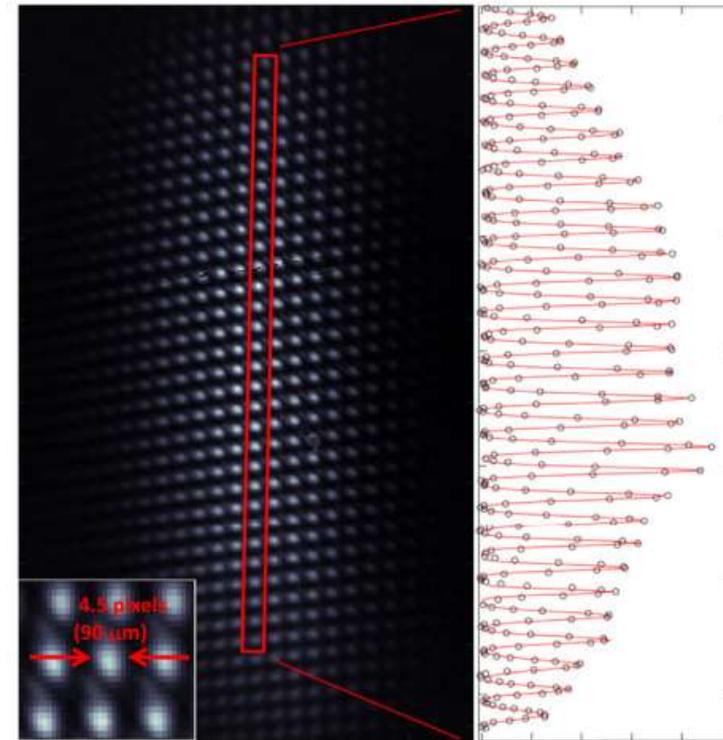
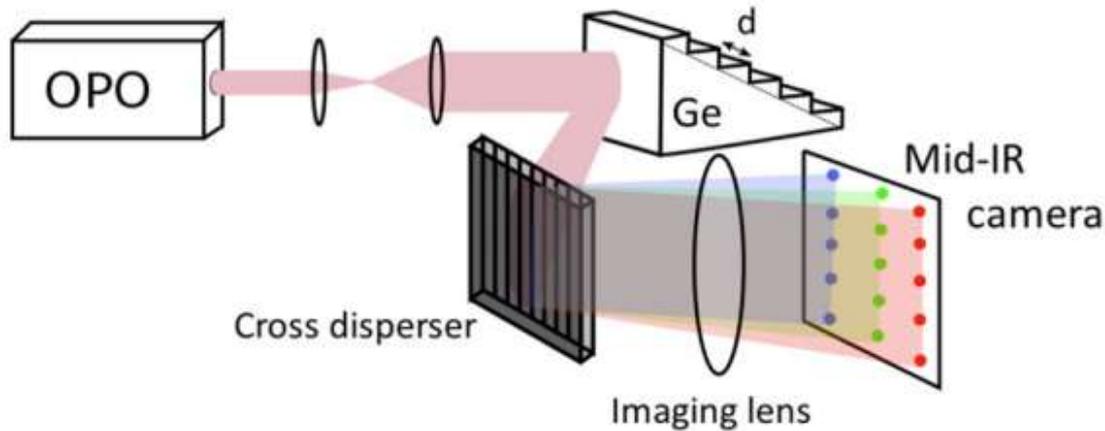
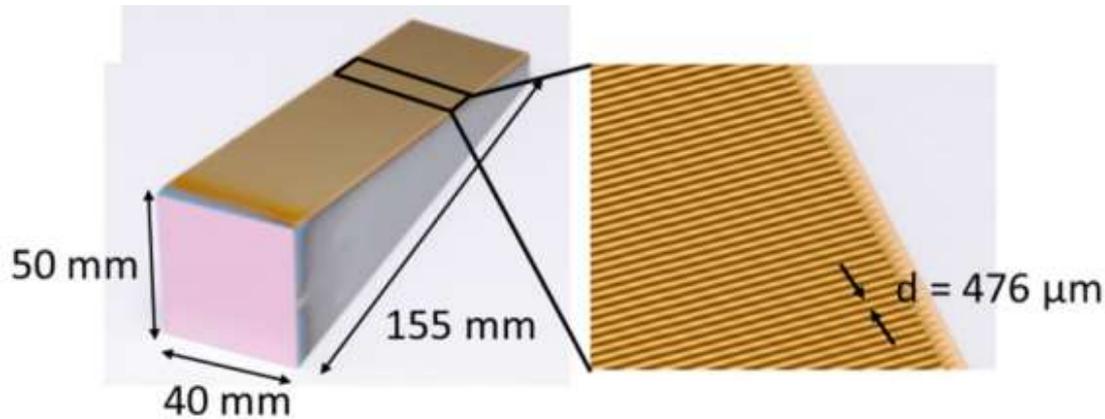


EGIG
Extremely-high-order
Ge Immersion Grating



分解能 < 4 GHz
検出範囲 > 50 nm
検出速度 : 125 Hz
(カメラ速度律速)

K. Iwakuni, T. Q. Bui, J. F. Niedermeyer, T. Sukegawa, and J. Ye
"Comb-resolved spectroscopy with immersion grating in long-wave infrared"
Optics Express Vol. 27, Issue 3, pp. 1911-1921 (2019)



光コムの構成光を個々で検出



追補: 第一著者: 岩國さんは電通大に在籍@2021年時点

グリズム@VLTI/GRAVITY

<https://www.mpe.mpg.de/ir/gravity>

Senol Yazici, Takashi Sukegawa, et.al. "GRAVITY upgrade with high-performance grisms with factor >2 enhanced throughput"
SPIE 2020. 11446, Optical and Infrared Interferometry and Imaging VII



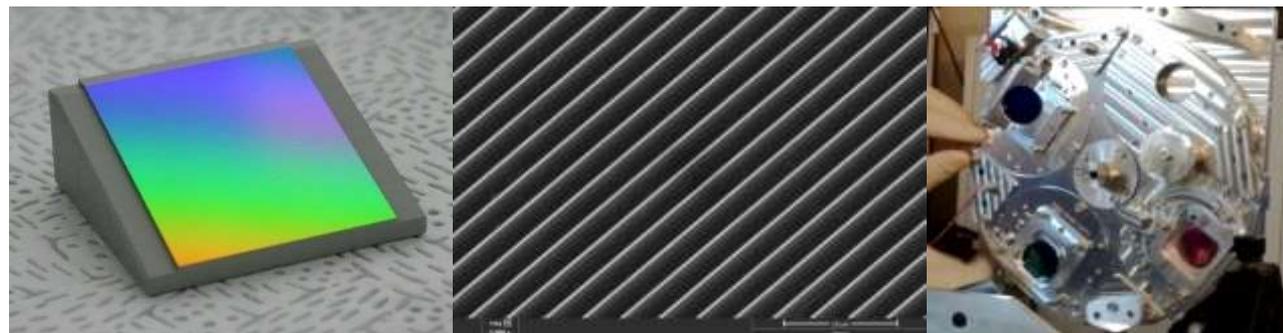
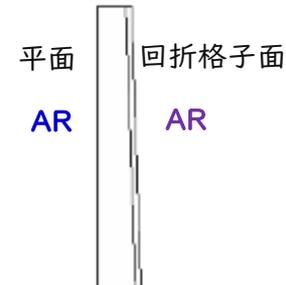
VLTI



GRAVITY

Trivial Name (Part Name)	Material	refractive index n*	prism angle (°)	ruling frequency (1/mm)	spectral resolution R ($\lambda/\Delta\lambda$)
R4000 Germanium #1 (GIMG W44R T1PT1)	Germanium	~ 4.15	19.19	460	4000
R4000 Germanium #2 (GIMG W44R T1PT2)					
R500 Germanium (GIMG W44R T2PT1)			2.32	58	500
R500 Indium (IIMG W44R T2PT1)	Indium Phosphide	~ 3.12	3.48	59	
R4000 old (ITEM 32435)	Zinc Selenide	~ 2.44	37.92	400	4000
R500 old (ITEM 32436)			5.24	60	500

Canon



【単体評価】

Grism	T_{avg}	T_{new}/T_{old}
R500 Germanium	93.91 %	1.783
R500 Indium	89.18 %	1.693
R500 old	52.67 %	-
R4000 Germanium #1	67.69 %	3.032
R4000 Germanium #2	68.02 %	3.017
R4000 old	22.44 %	-

【装置運用評価】

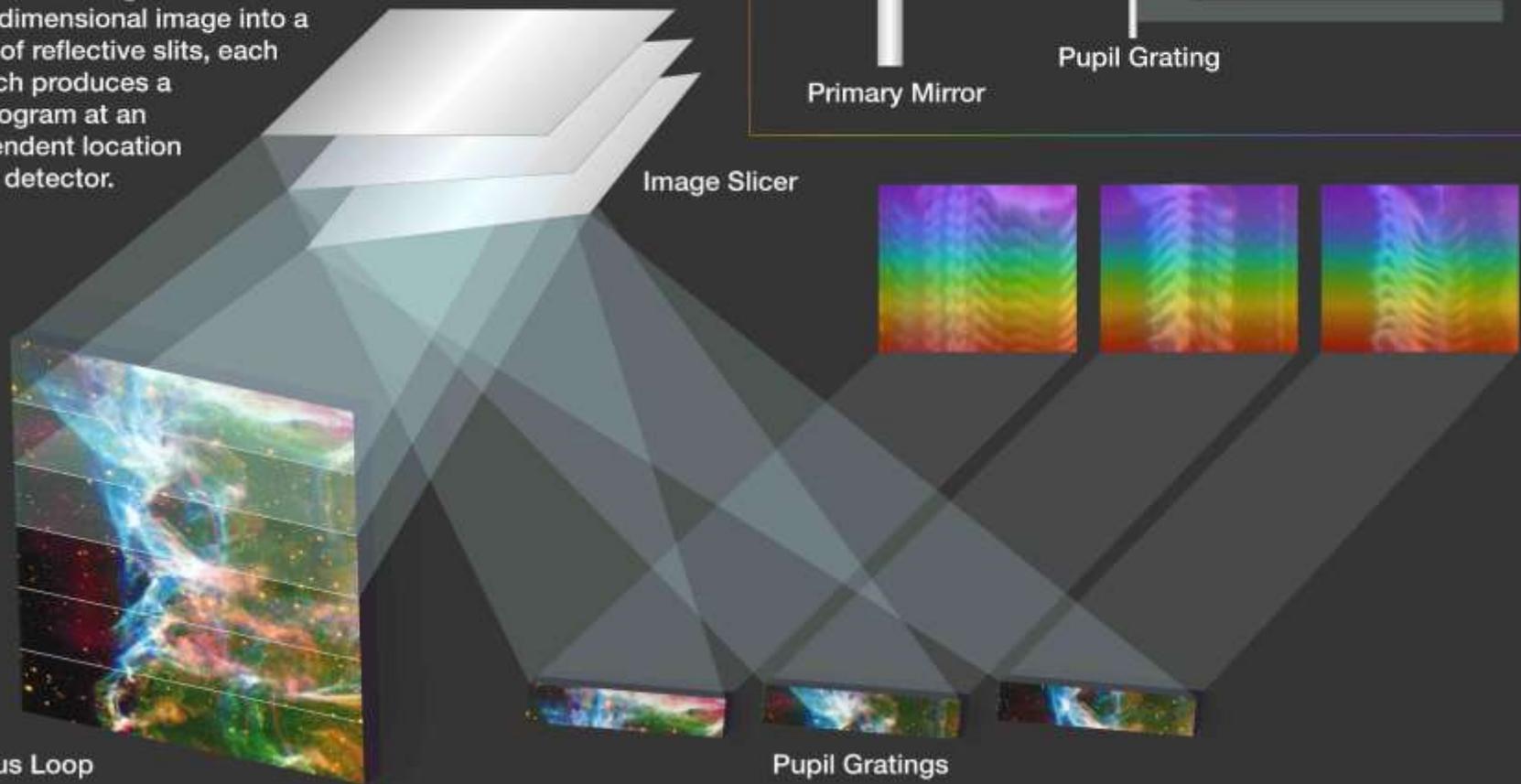
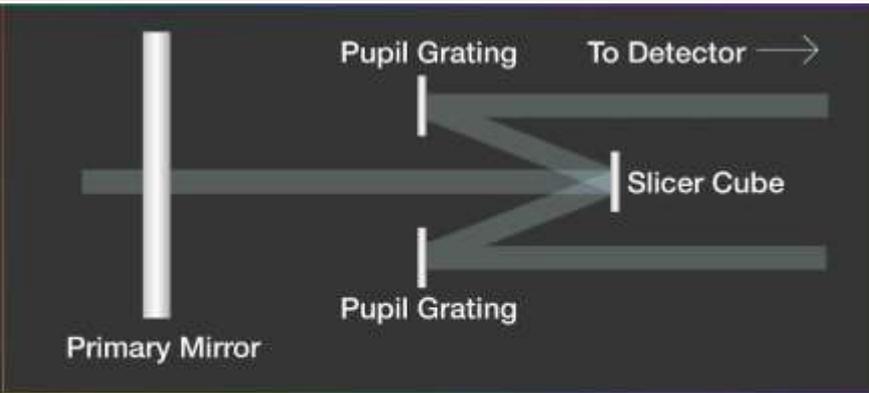
旧ZnSe製グリズム比
R500 : 2.2倍の効率Up
R4,000: 2.8倍の効率Up

一体型多面ミラー（面分光用ミラー）

INFUSE Image Slicing

The slicer cube is a stack of flat, slit-shaped mirrors, each angled to reflect to a different pupil mirror.

The INFUSE image slicer dissects a two-dimensional image into a series of reflective slits, each of which produces a spectrogram at an independent location on the detector.

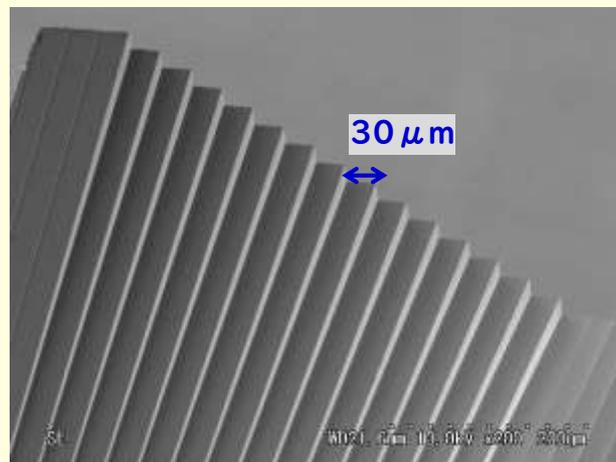
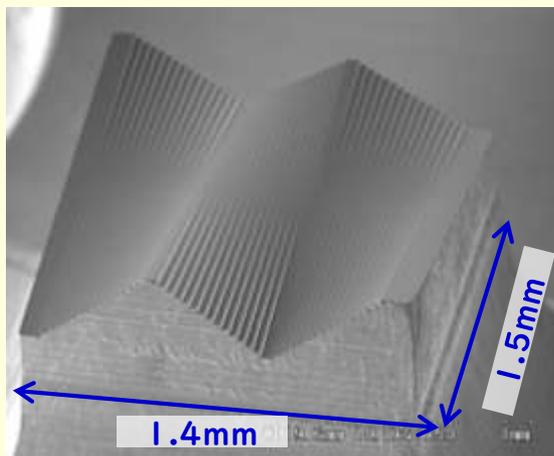


Emily Witt, Brian Fleming, Takashi Sukegawa', et.al. "INFUSE: assembly and alignment of a rocket-borne FUV integral field spectrograph" SPIE 2021. 11821, UV, X-Ray, and Gamma-Ray Space Instrumentation for Astronomy XXII

イメージスライサーの“深化”

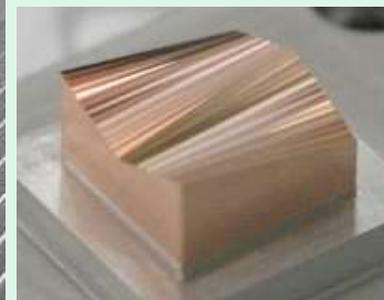
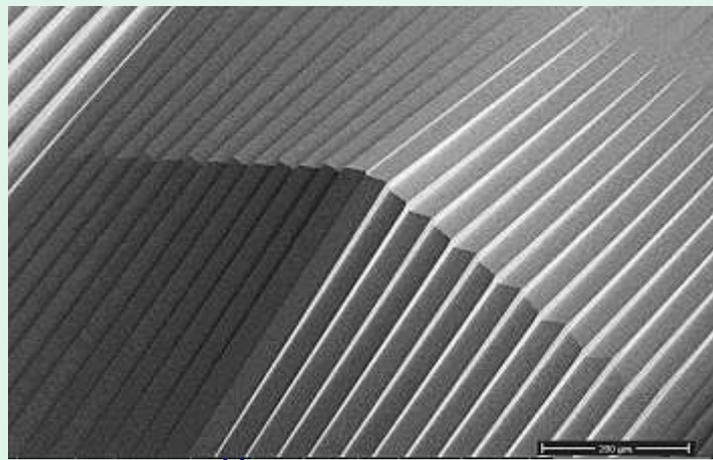
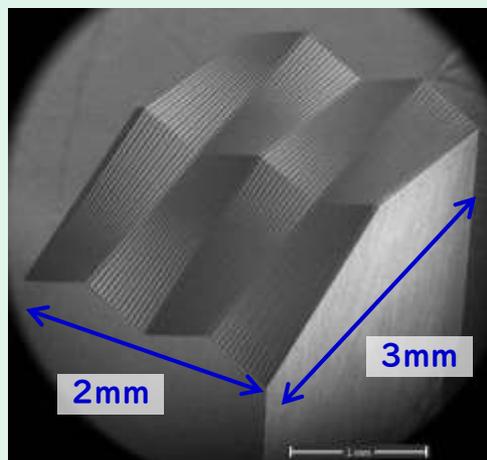
2013年

30 μ m
45面
平面
□1.4x1.5mm



2020年

36 μ m
112面
平面
□2x3mm



250 μ m/26面 曲面
□6.5mm

2021年

● 1,000 μ m/28面 曲面/□50x28mm

● 300 μ m/55 非球面/□13.5mm

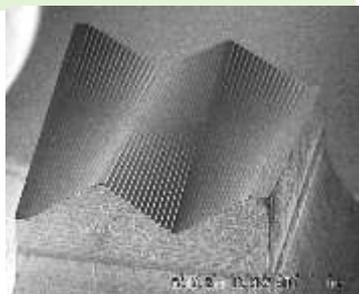


一体型多面ミラー

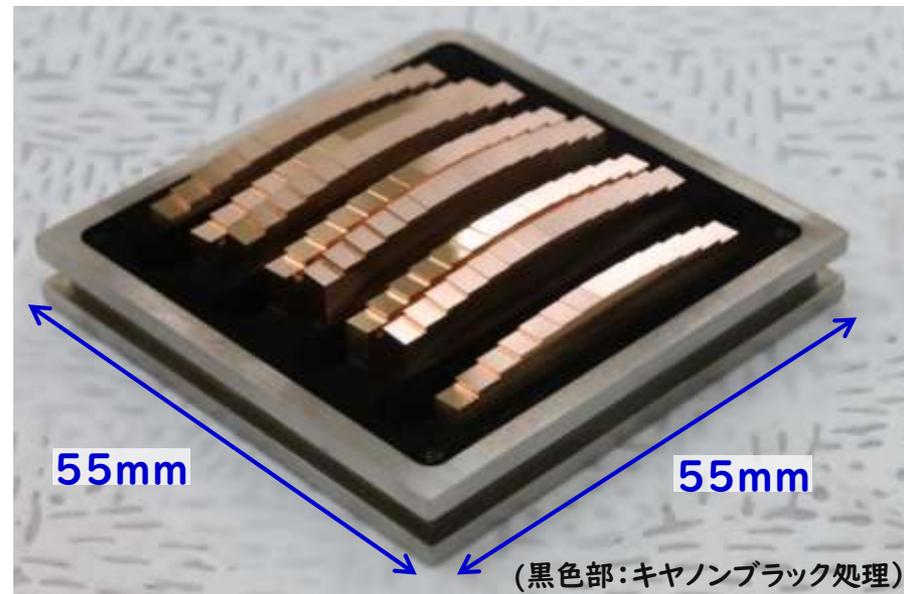
キャノン一体型ミラー

- ・立体配置・隣接ミラー構造
- ・角度・位置精度(相対): **グレーティング精度**
~0.1 μm , ~0.001°
- ・面粗さ: <2nm(RMS)
- ・自由曲面

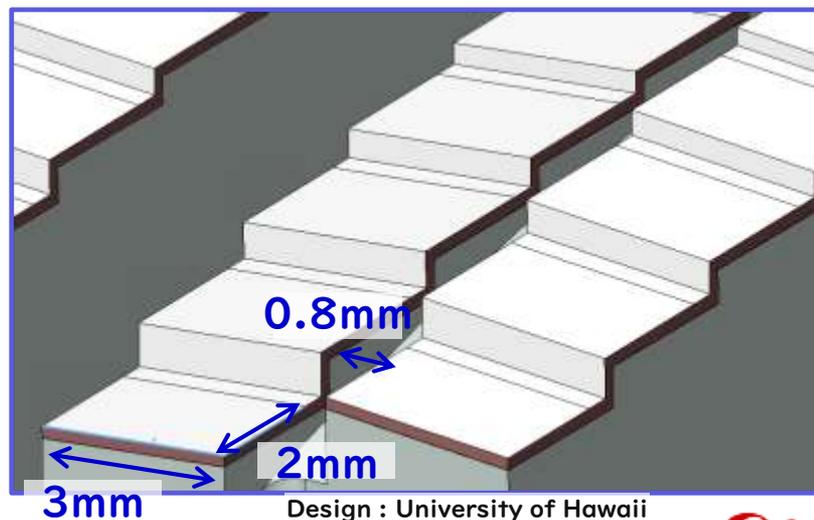
イメージスライサー



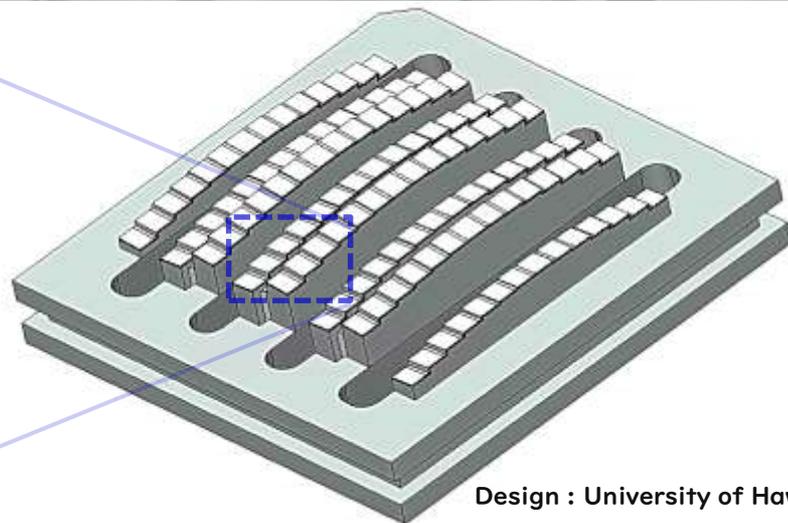
112面多面ミラー (□3mmx2mm x112面)



(黒色部:キャノンブラック処理)



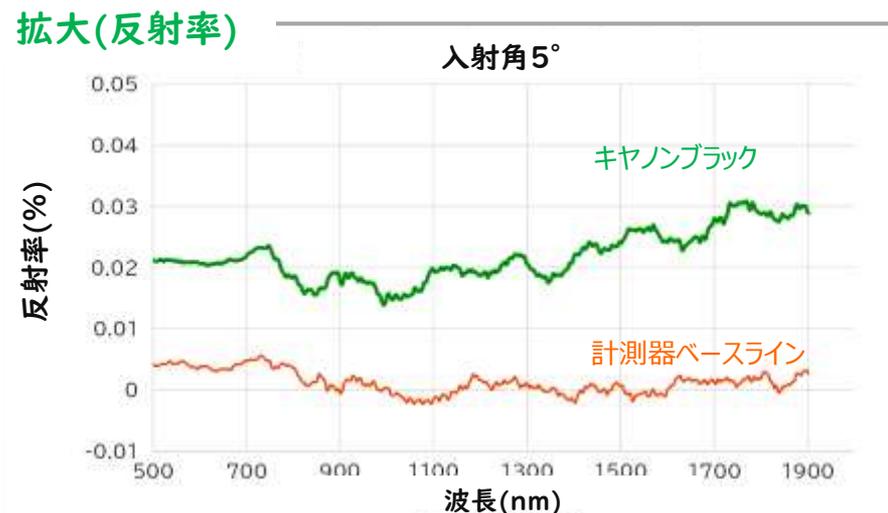
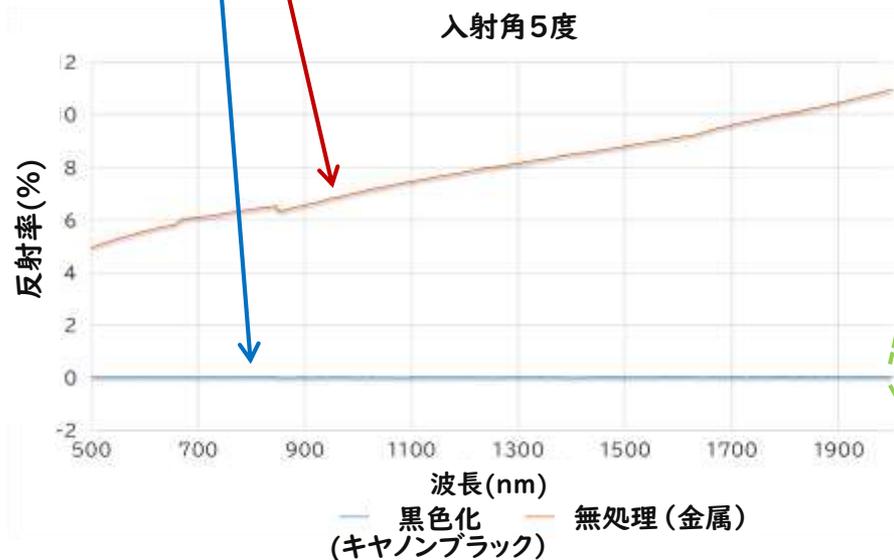
Design : University of Hawaii



Design : University of Hawaii

キヤノンブラック

- ・広帯域（紫外/可視/赤外）&射入射（ $>70^\circ$ ）で極低反射を実現
- ・構造色で極めて安定（ほとんどの金属表面に適用可）



～ 適用例紹介 ～

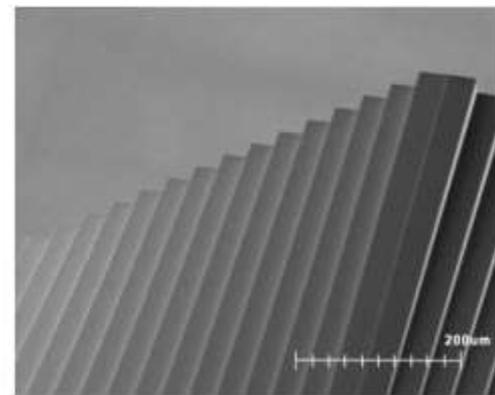
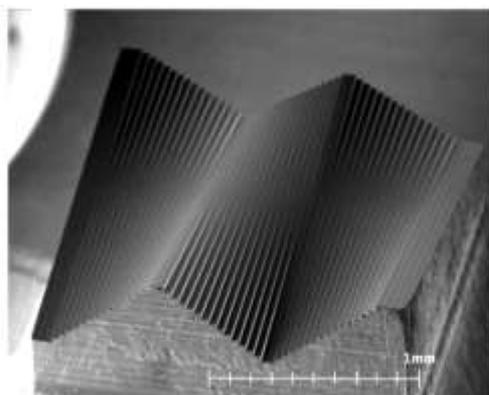
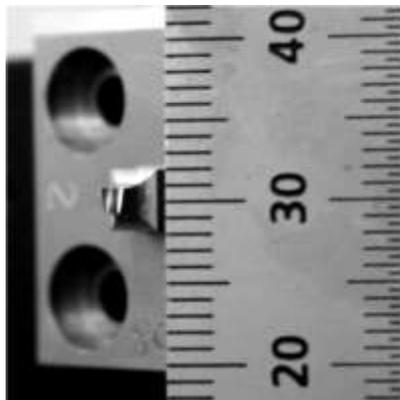
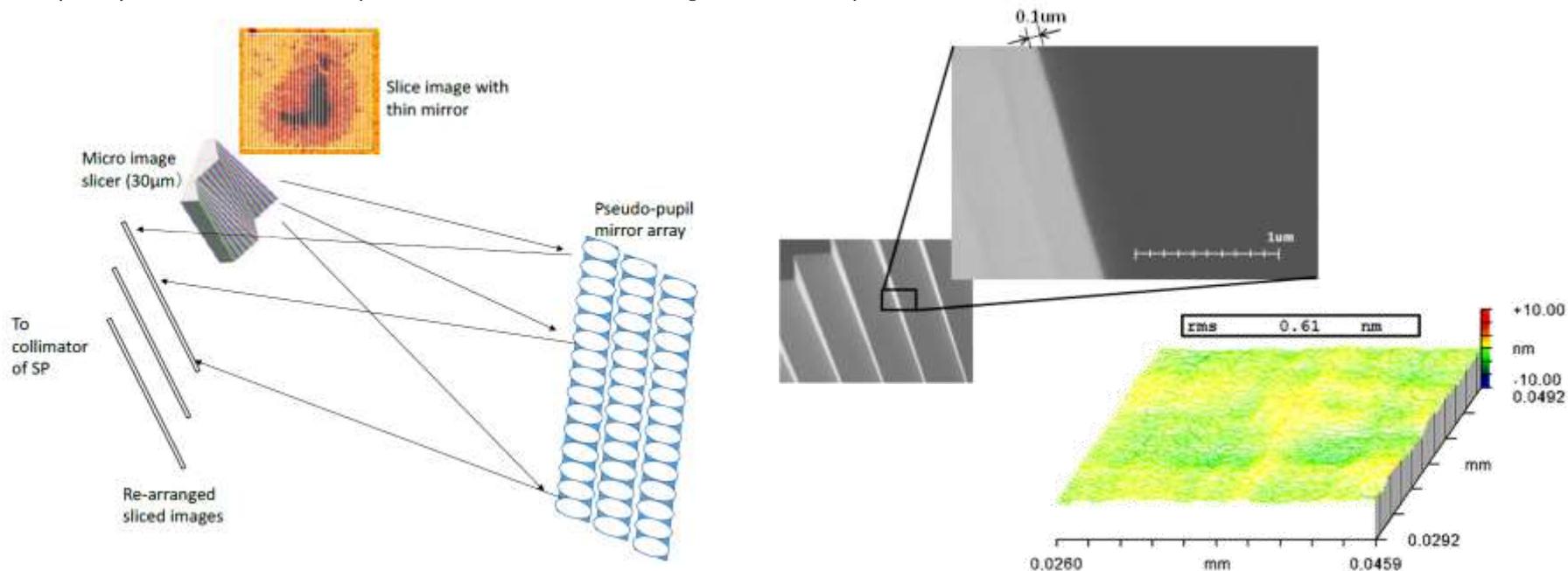
イメージスライサー/NAOJ

https://www.nao.ac.jp/contents/about-naoj/reports/annual-report/en/2017/2017e_023.pdf

Y. Suematsu, T. Sukegawa, Y. Okura, T. Nakayasu, Y. Enokida, M. Koyama, K. Saito, S. Ozaki, S. Tsuneta

“Development of micro image slicer of integral field unit for spaceborne solar spectrograph”

Proc. SPIE(2014). 9151, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation



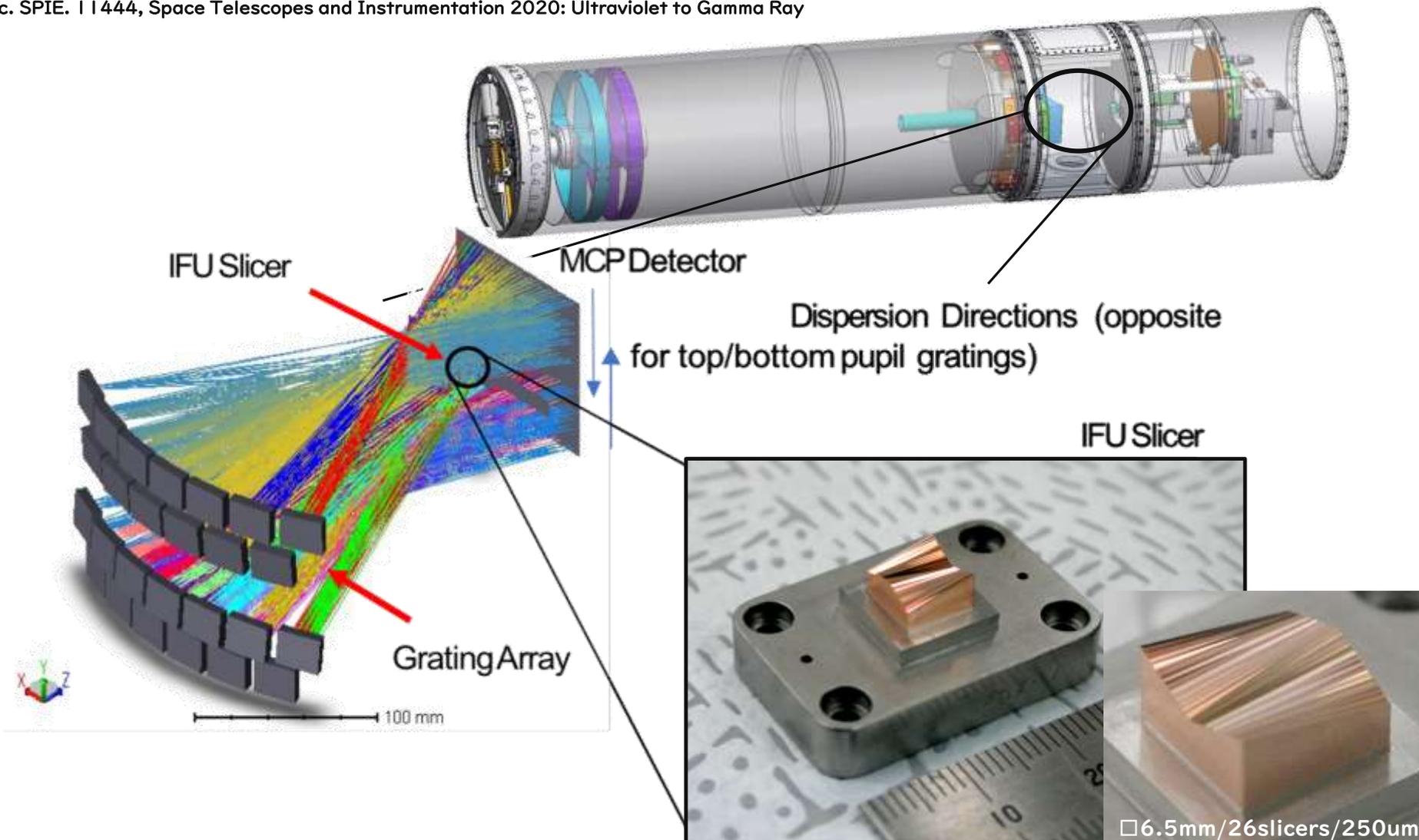
DUV用イメージスライサー/LASP

<https://lasp.colorado.edu/home/>

Emily Witt, Brian Fleming, James Green, Kevin France, Jack Williams, Takashi Sukegawa, Oswald Siegmund, Dana Chafetz

“INFUSE: a rocket-borne FUV integral field spectrograph”

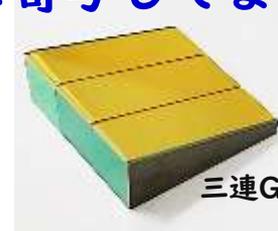
Proc. SPIE. 11444, Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray



まとめ

1. 内製切削加工機により高品位なデバイスを提供しています。
2. 一般的な反射型に加え、高分散/大型化などの課題のある赤外線向けに3種類の材料の裏面反射（イマージョン）回折格子を提供しており、 $1.0\mu\text{m}$ ～ $20\mu\text{m}$ の広範囲で使用することができます。波面性能は回折限界分光器の実現を可能とします。
3. 多面ミラーを一体で一括加工することで、一切の調整なく100面を超える多分割面分割ユニットを製作しています。面分割スライサーはmm級からから μm サイズまで幅広く製作が可能です。
構造サイズは300mm以上対応

キヤノンでは引続き超精密切削技術を生かしたデバイスを提供し、技術を通して世界の科学技術や自然科学の発展に寄与してまいります。



三連Geイマージョン回折格子

ご清聴ありがとうございました。

Canon