

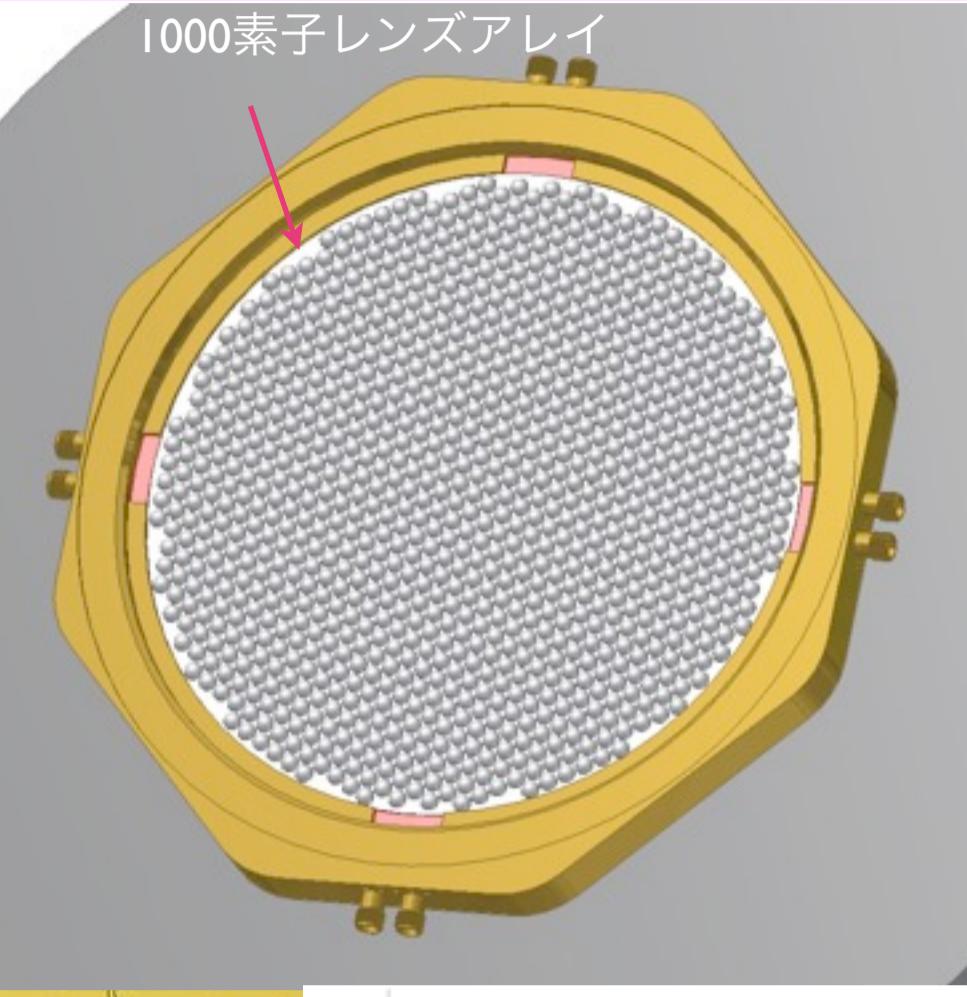
サブミリ波カメラ搭載用シリコンレンズアレイの開発と広帯域反射防止構造の設計

新田 冬夢（筑波大学／国立天文台）、成瀬 雅人（東京大学／国立天文台）、関本 裕太郎、松尾 宏、野口 卓、鵜澤 佳徳
岡田 則夫、三ツ井 健司（国立天文台）、瀬田 益道、中井 直正（筑波大学）

I . Sub-millimeter Camera

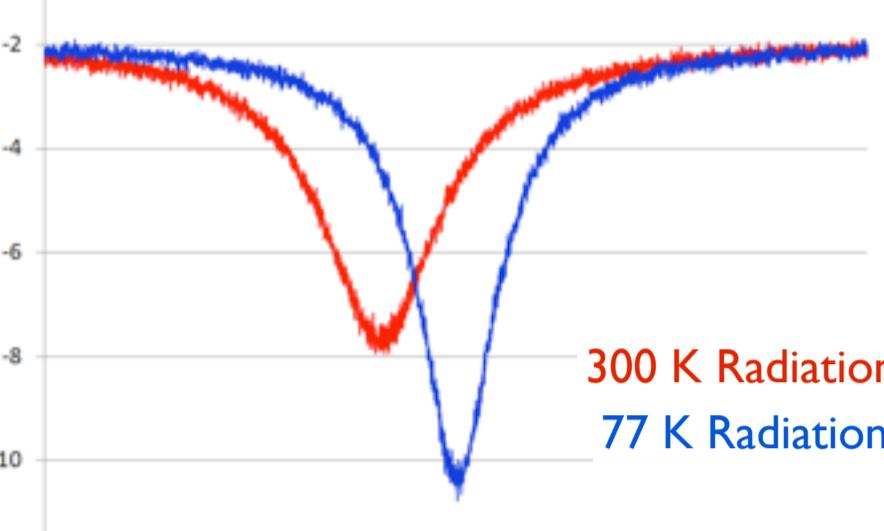
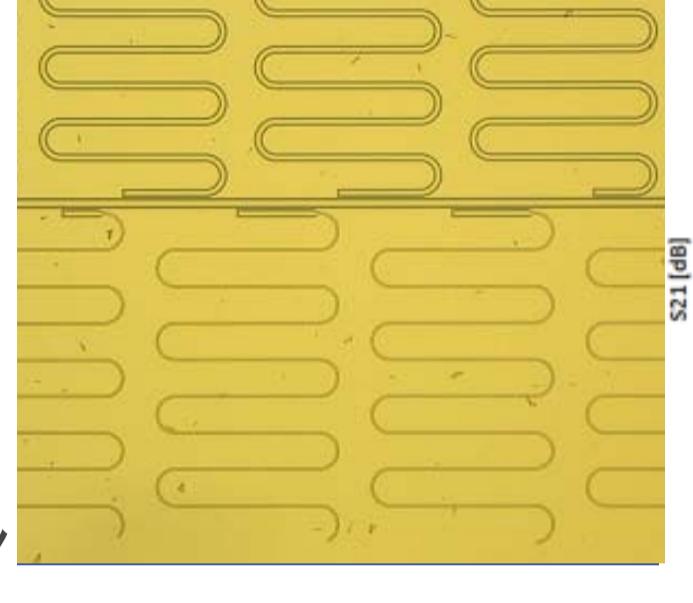
* Sub-millimeter Camera

- 目的：遠方銀河探査、CMBの偏光観測
- 観測波長：1360 μm & 750 μm
- 素子数：1000 ~ 10000



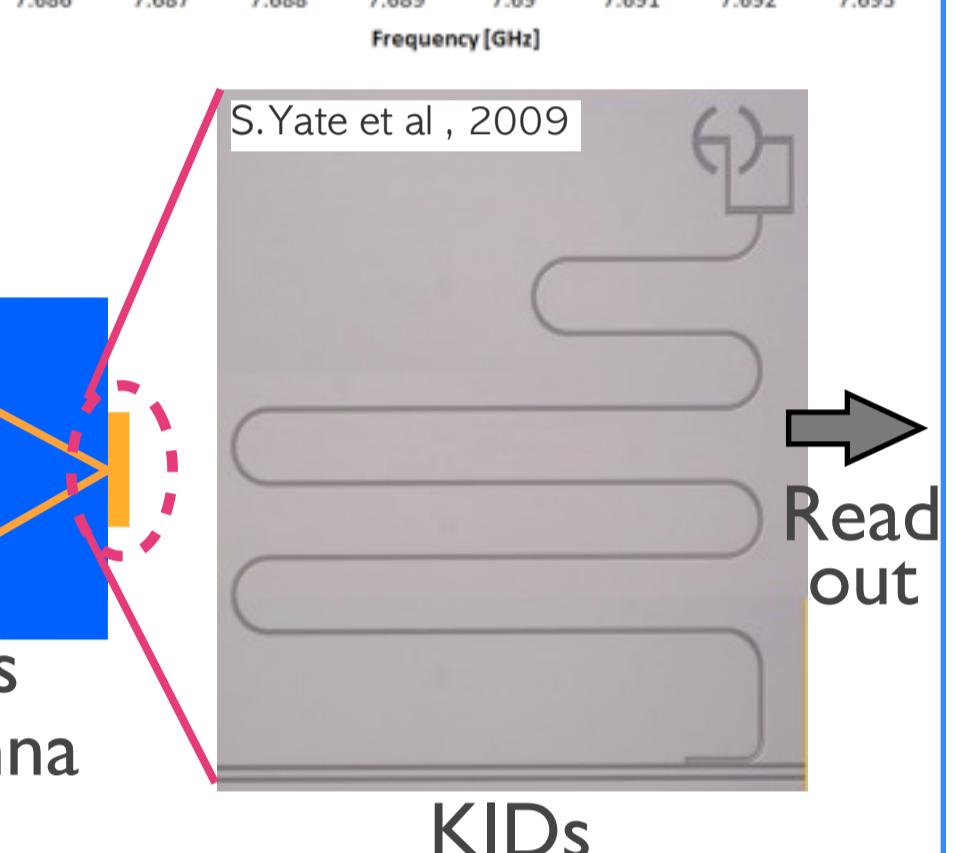
* Detectors

- Kinetic Inductance Detectors (KIDs)
- 超伝導体：アルミニウム ($T_c \sim 1\text{ K}$)
- 基板：シリコン
- 使用温度：100 mK

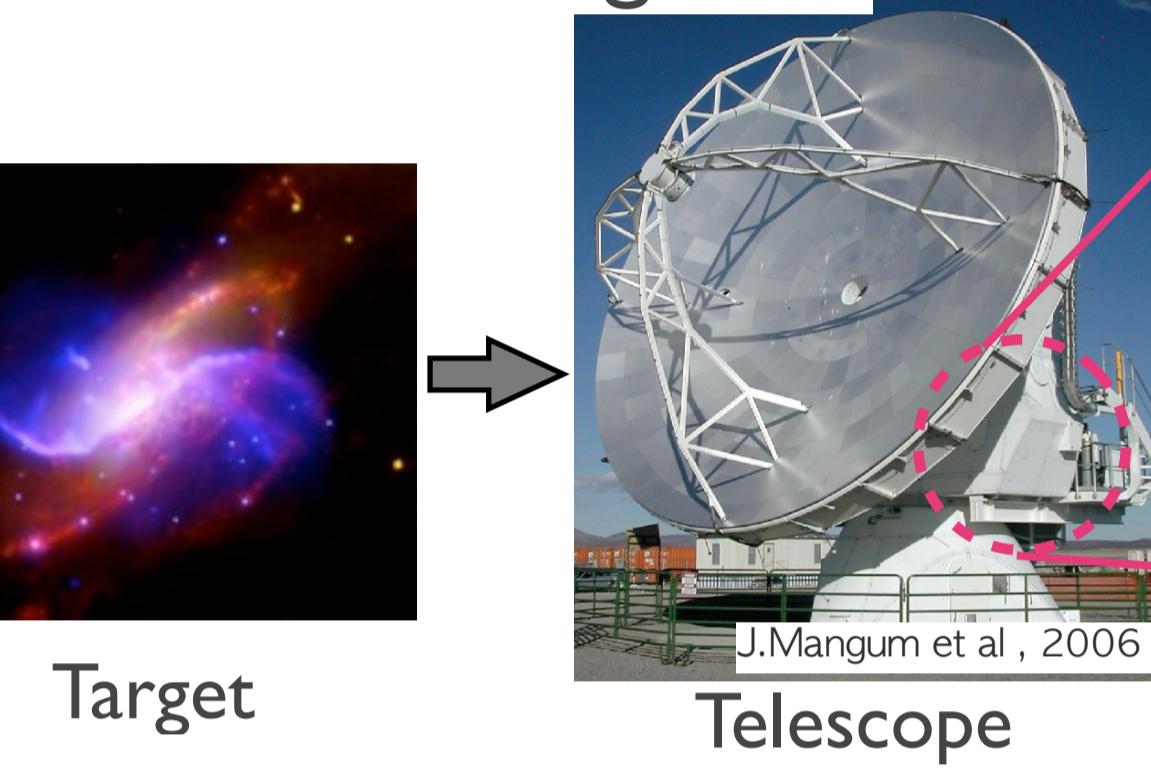


* Optics

- アンテナ：Double Slot Antenna
- レンズ：Synthesized Elliptical Lens
- レンズ材料：高純度多結晶シリコン



* Camera Design



本ポスターではレンズの開発と反射防止法を紹介する

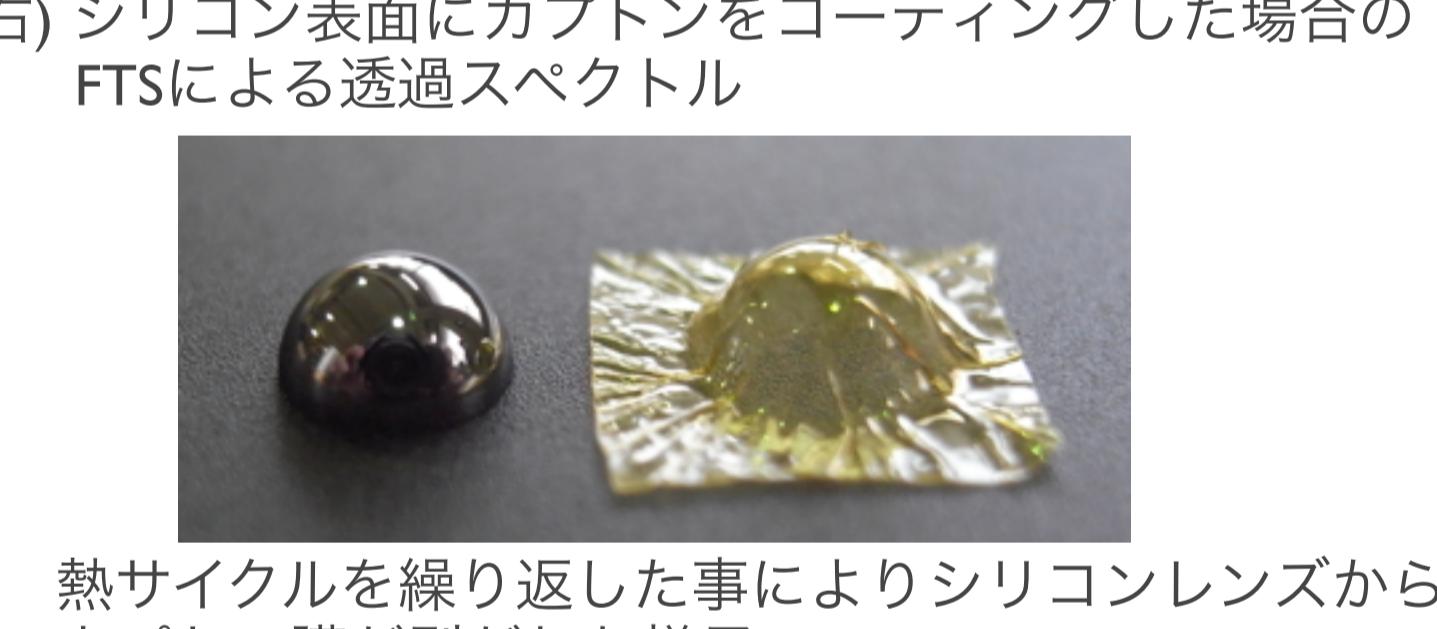
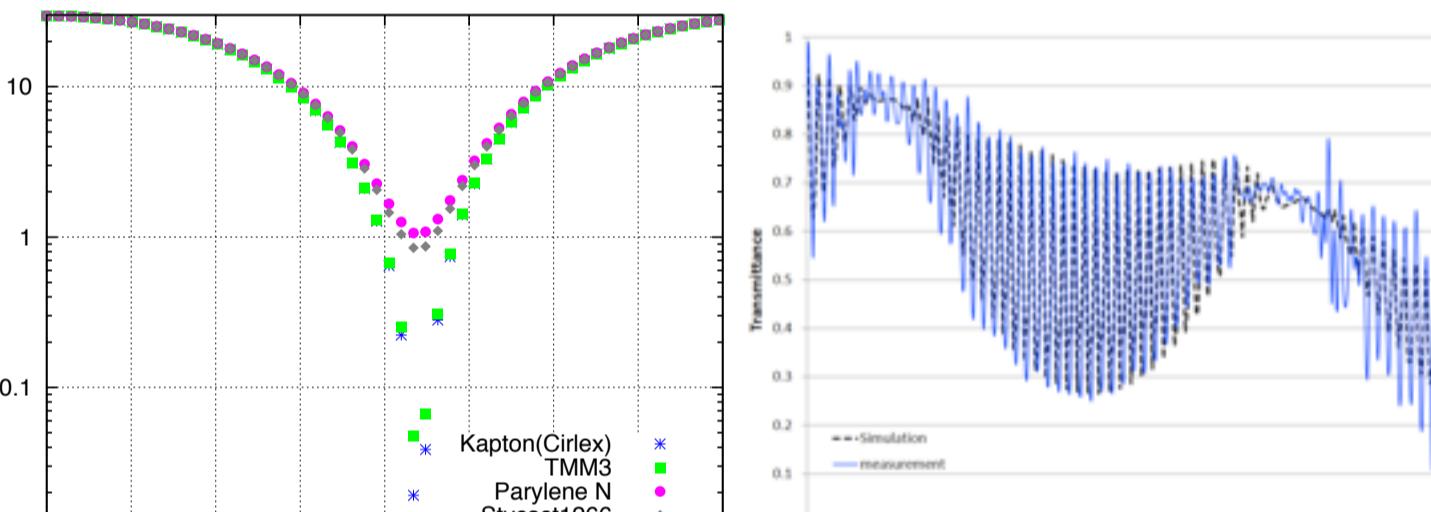
3 . Anti Reflection Coating

*シリコン表面では約30 %の反射ロスが生じるため反射防止対策が必要

* $\lambda/4$ AR Coating

$$n_{AR} = \sqrt{n_{air} \cdot n_{Si}} = 1.84 \quad d = \frac{\lambda}{4 \cdot n_{AR}}$$

$$n_{Si} = 3.388$$



* Material

	refractive index	thickness@220GHz
Kapton	1.84	185 μm
TMM3	1.81	188 μm
Parylene N	1.66	205 μm
Stycast 1266	1.68	203 μm

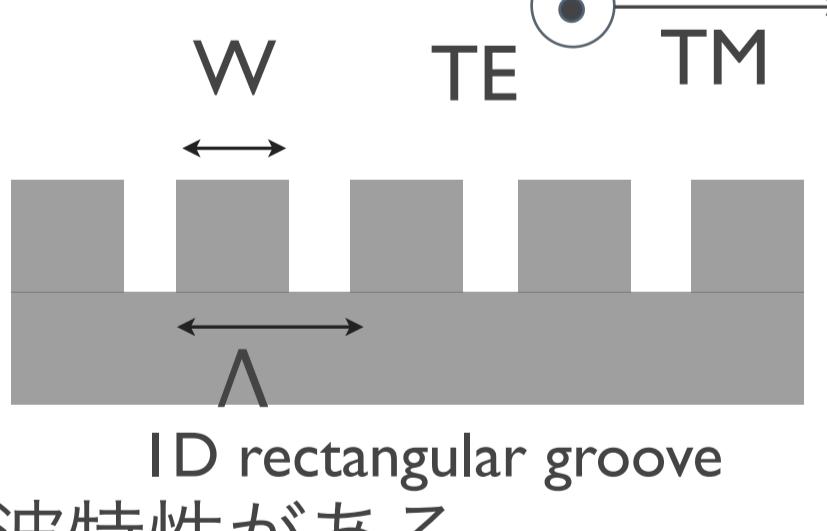
* Problem

- 極低温下で使用のため、膜の剥離や熱膨張率の違いによりレンズが破損する
- 広帯域化には多層膜にする必要がある

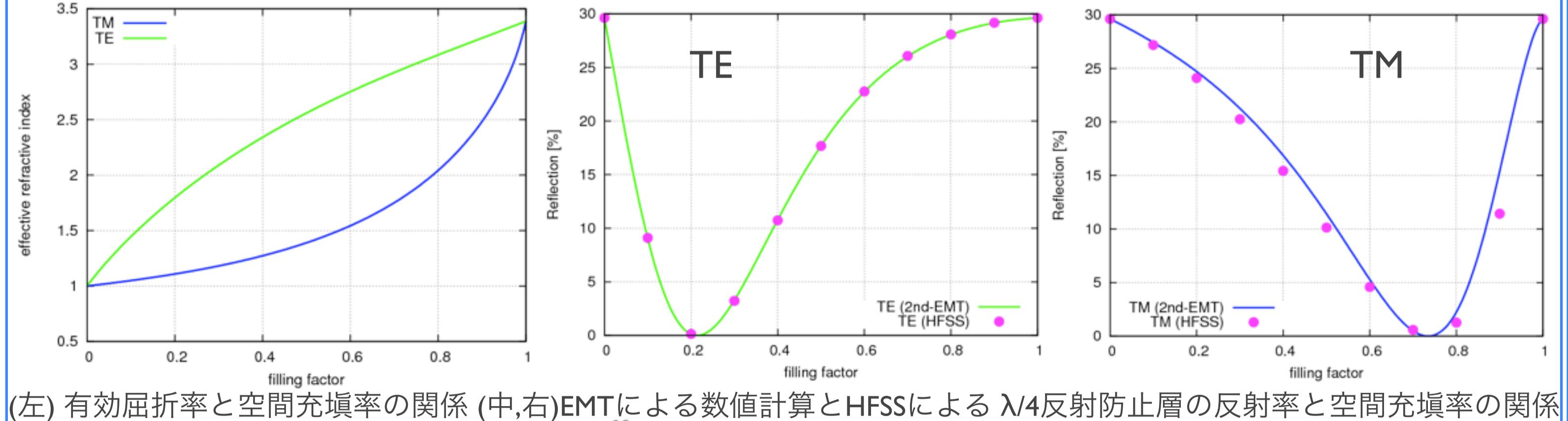
5 . ID Sub-Wavelength Gratings

* ID sub-wavelength gratings

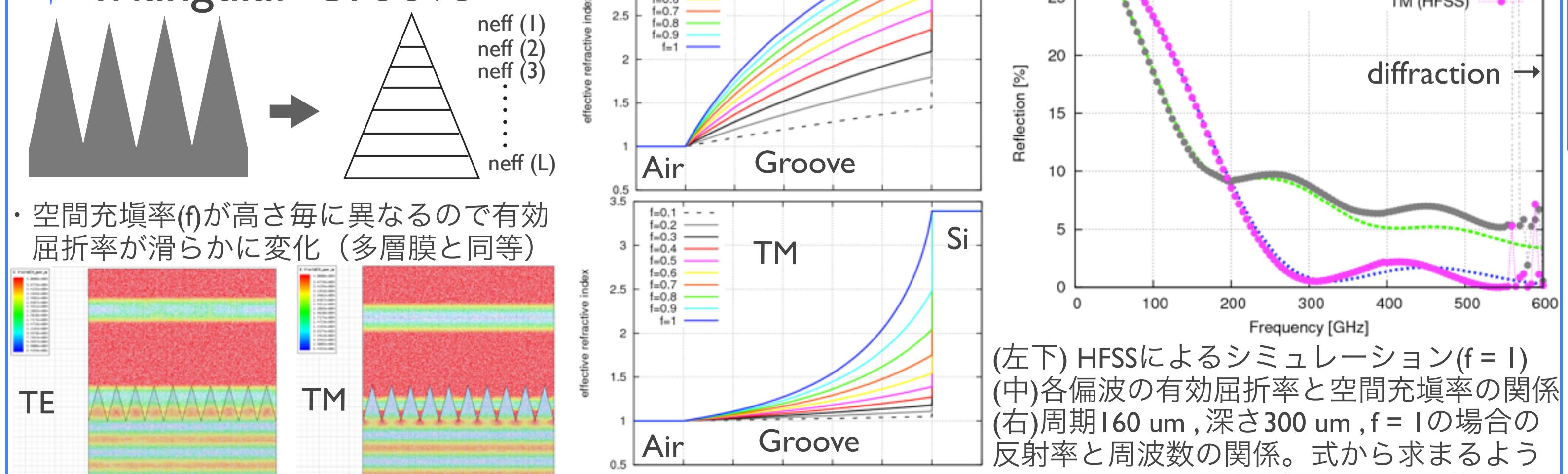
- 空間充填率： $f = W/\Lambda$ の値により有効屈折率の値を制御
- 回折の影響：周期 Λ の条件 $\frac{\Lambda}{\lambda} \leq \frac{1}{n_s} = \frac{1}{3.388} \sim 0.3$
- 溝に平行 (TE) 方向と垂直 (TM) 方向で有効屈折率の偏波特性がある



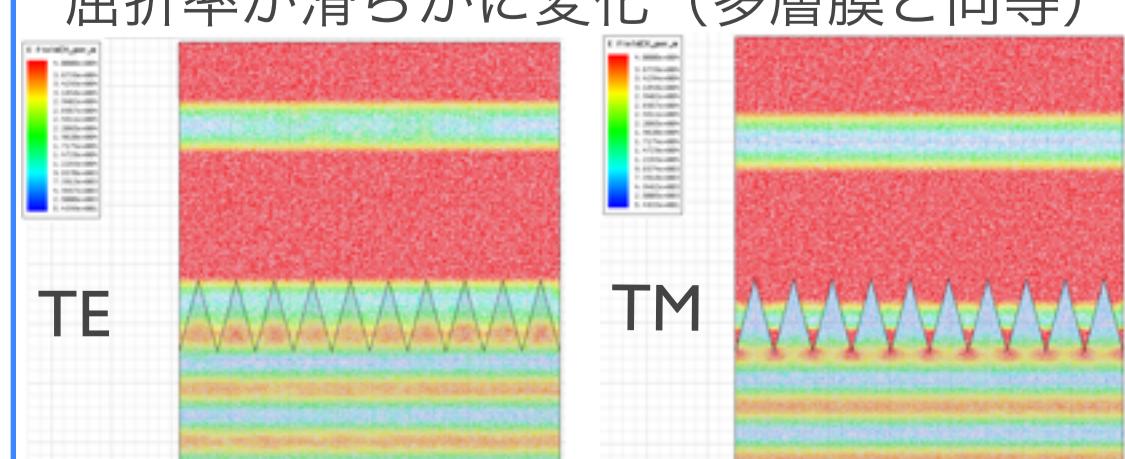
* Rectangular Groove



* Triangular Groove



・空間充填率(f)が高さ毎に異なるので有効屈折率が滑らかに変化（多層膜と同等）



2 . Silicon Lens Array

* Silicon Lens Array

- 高純度多結晶シリコンを使用

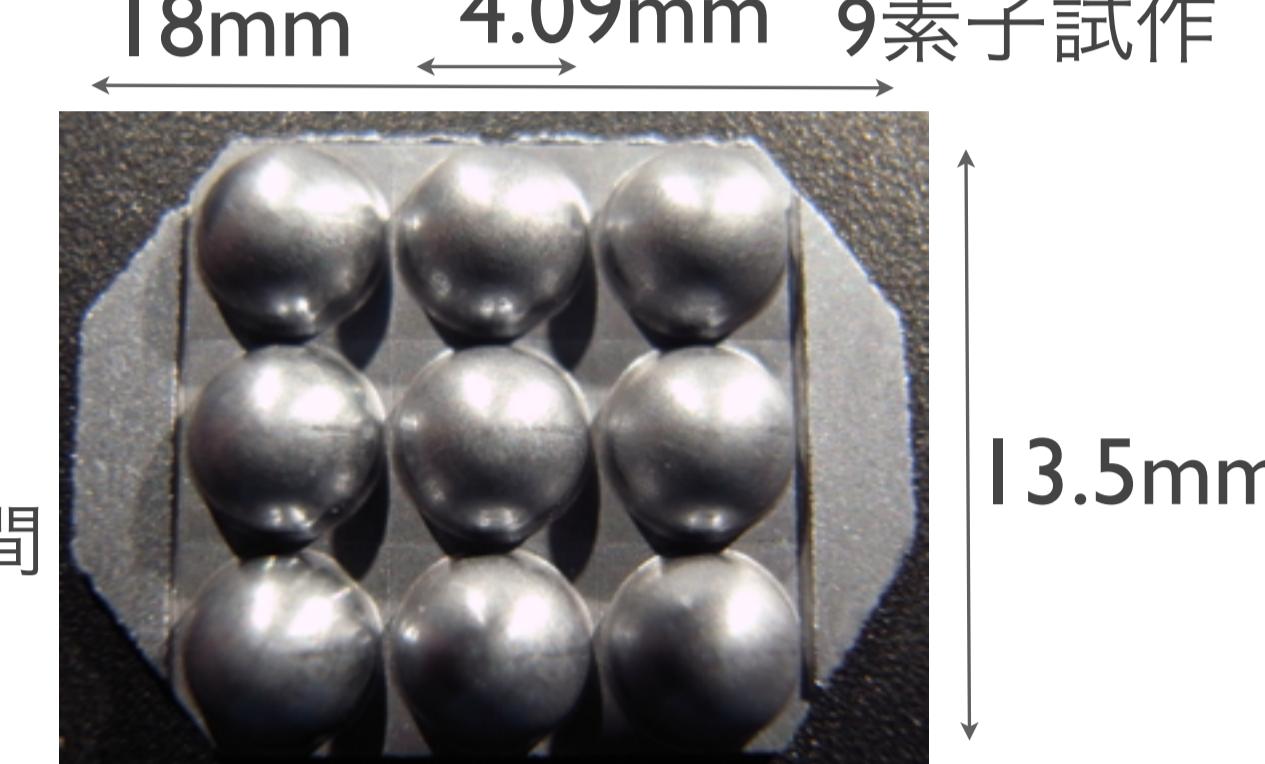
→サブミリ～テラヘルツ帯で低損失を実現

- レンズ直径4.09 mm, 平面延長部0.35 mm
- 高速スピンドルを用いた小径エンドミルによる切削加工
- 国立天文台ATC MEショップで9素子の試作



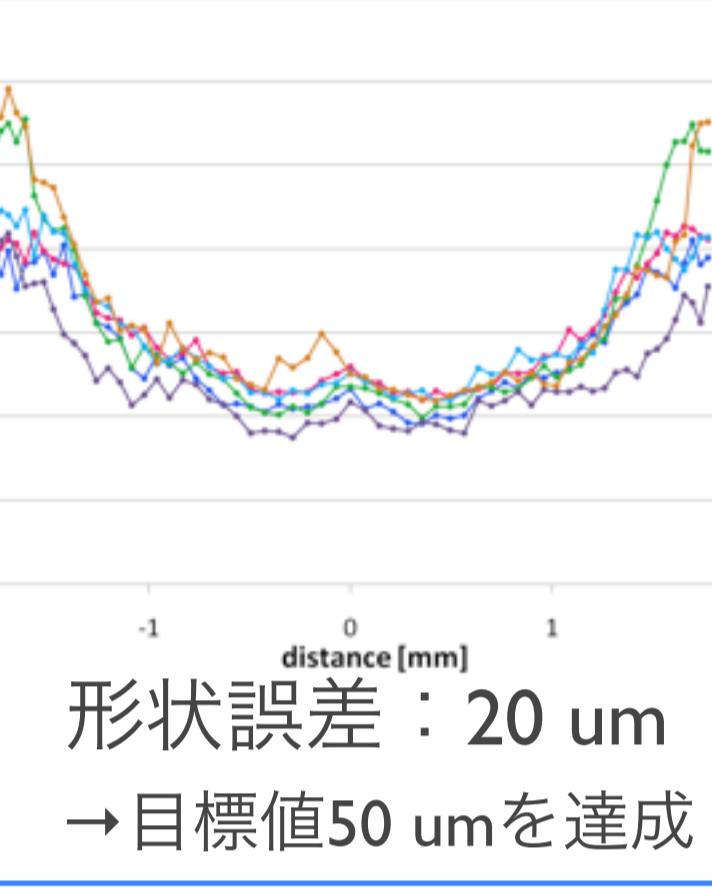
小径エンドミルによる切削加工風景

9素子試作の完成
加工時間：約40時間



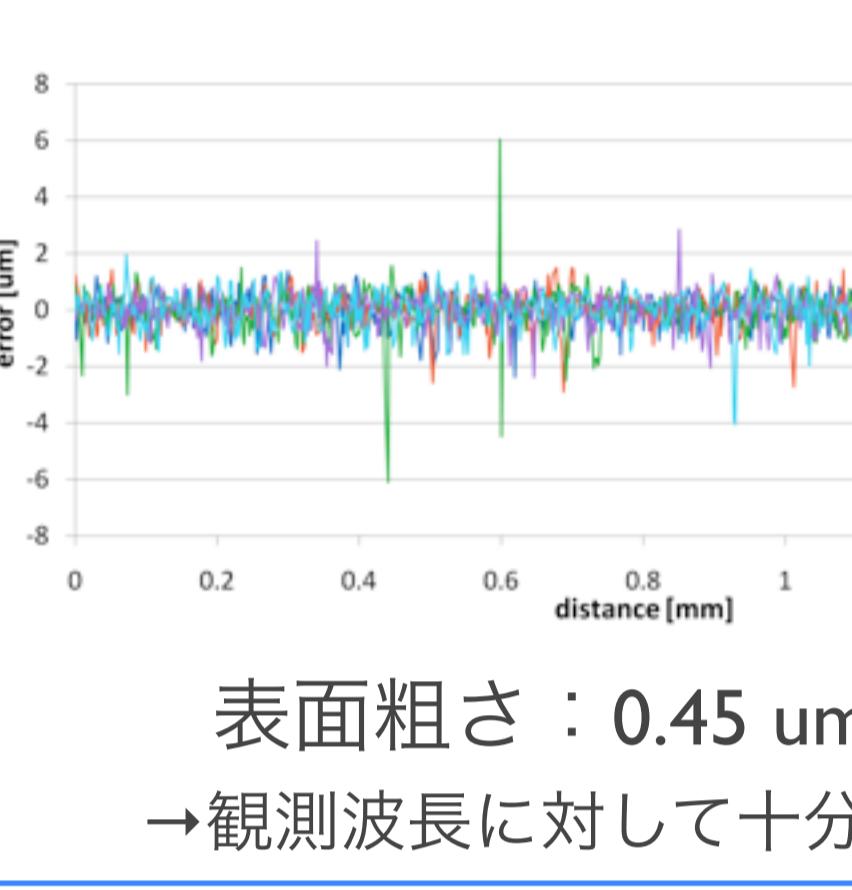
18mm 4.09mm 9素子試作
13.5mm

* Measurement



形状誤差：20 μm

→目標値50 μmを達成



表面粗さ：0.45 μm (Ra)

→観測波長に対して十分小さい

平面延長部：0.37 mm

→ビームに大きな影響はない

4 . Sub-Wavelength Gratings

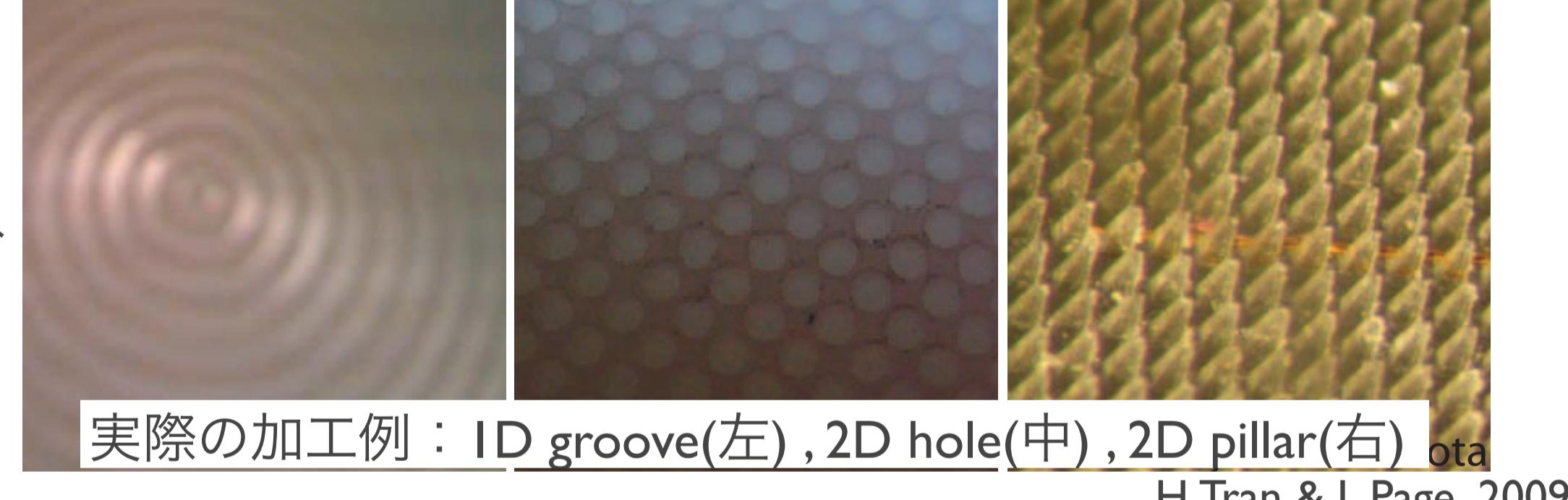
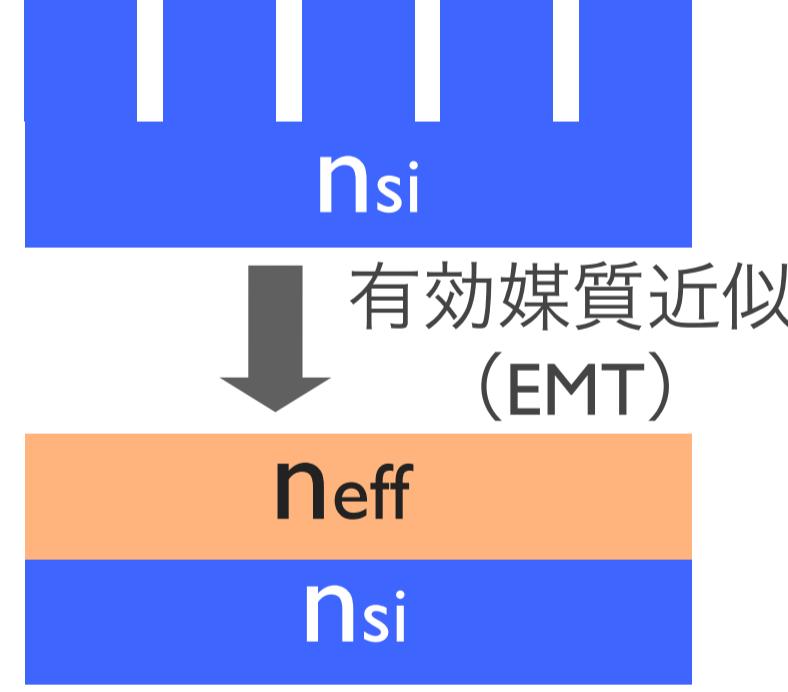
*誘電体膜を使用しない反射防止法にサブ波長構造を利用した方法がある

* Sub-wavelength gratings

- 対象とする波長より小さい周期構造をシリコン表面に形成することにより、サブ波長構造を有効屈折率の媒質で置き換えることが出来る（Effective Medium Theory:EMT）。
- 構造の幅と周期の比で決まる空間充填率により有効屈折率を自在に制御できる。

* Advantage

- 単一の物質で反射防止対策が可能→極低温化での膜の剥離や破損の問題がない。
- 屈折率を連続的に変化させることで多層膜近似ができるため、容易に広帯域化が可能。



H.Tran & L.Page ,2009

→以下5,6ではレンズ表面への溝・孔加工による反射防止効果について議論する

5 . 2D Sub-Wavelength Gratings

* 2D sub-wavelength gratings

$$\text{回折の影響} : \frac{\Lambda}{\lambda} \leq \frac{f_g}{n_s} \begin{cases} f_g = 1 & (\text{Rectangular Array}) \\ f_g = 1.155 & (\text{Hexagonal Array}) \end{cases}$$

* 2D Hole Structure

穴の断面図

hole

nsi

gradient profile

→有効屈折率が滑らかに変化するため多層膜

が形成されたと同じ効果（広帯域化）

Λ

hole

nsi

d

Conical Hole

→浅い構造は低周波の反射特性が悪い

Λ

hole

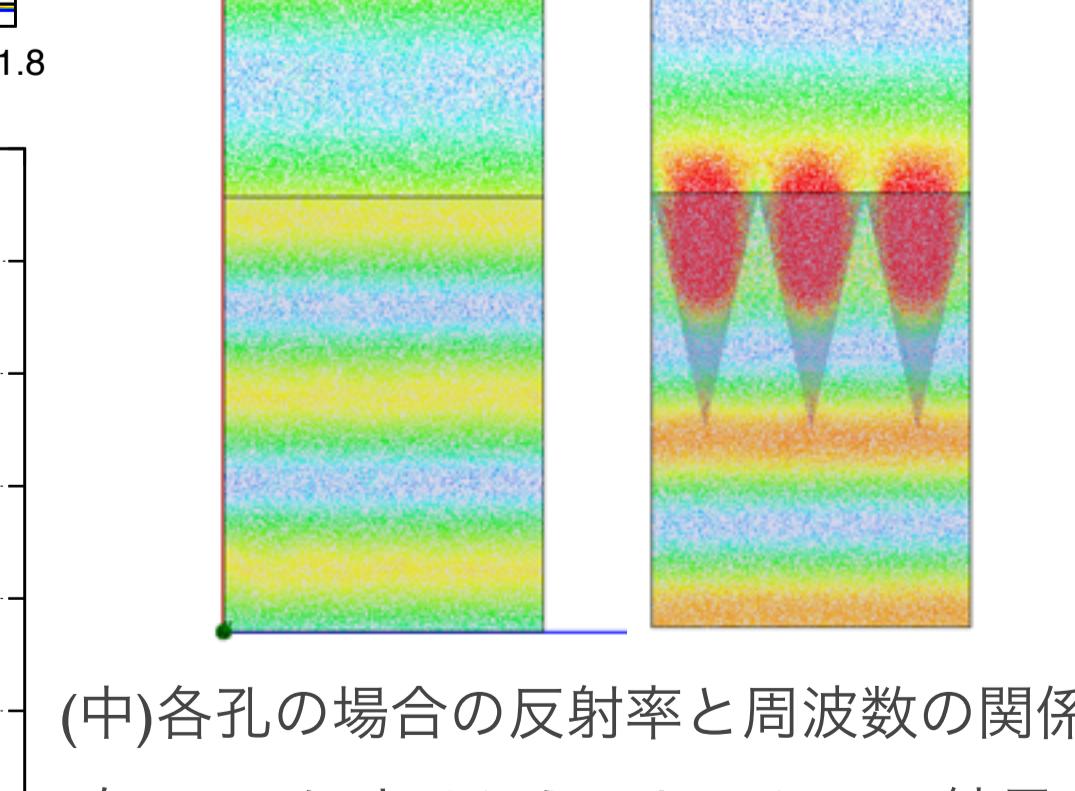
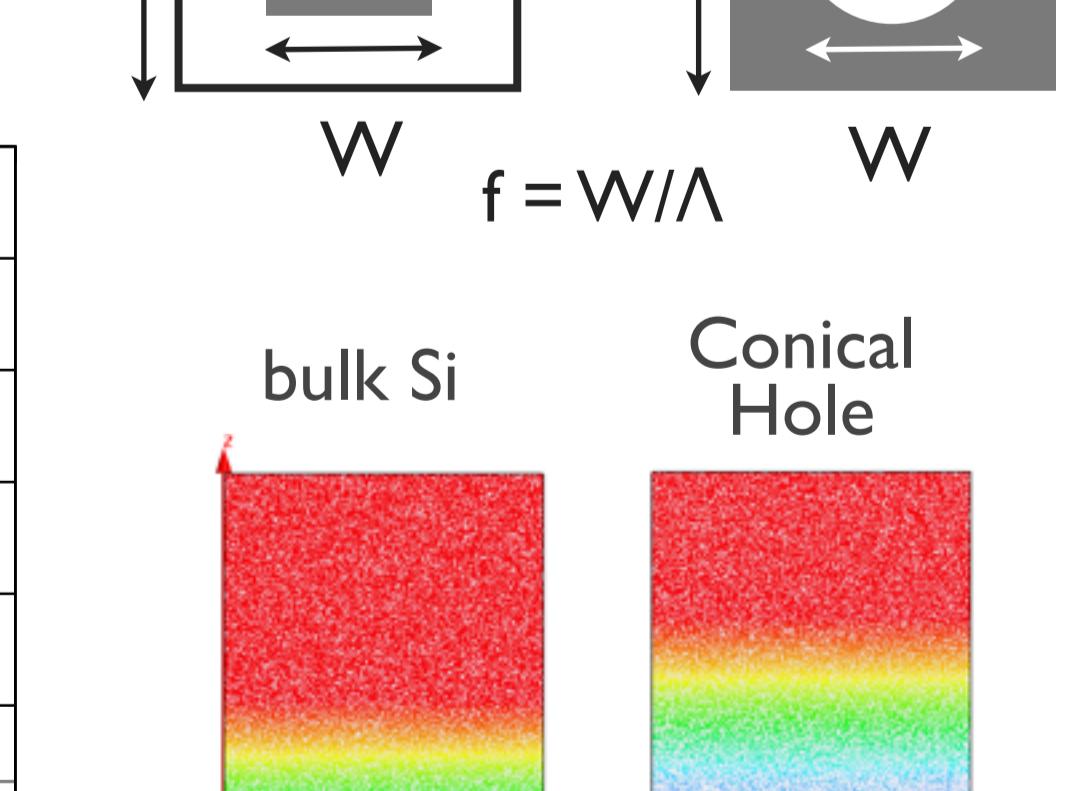
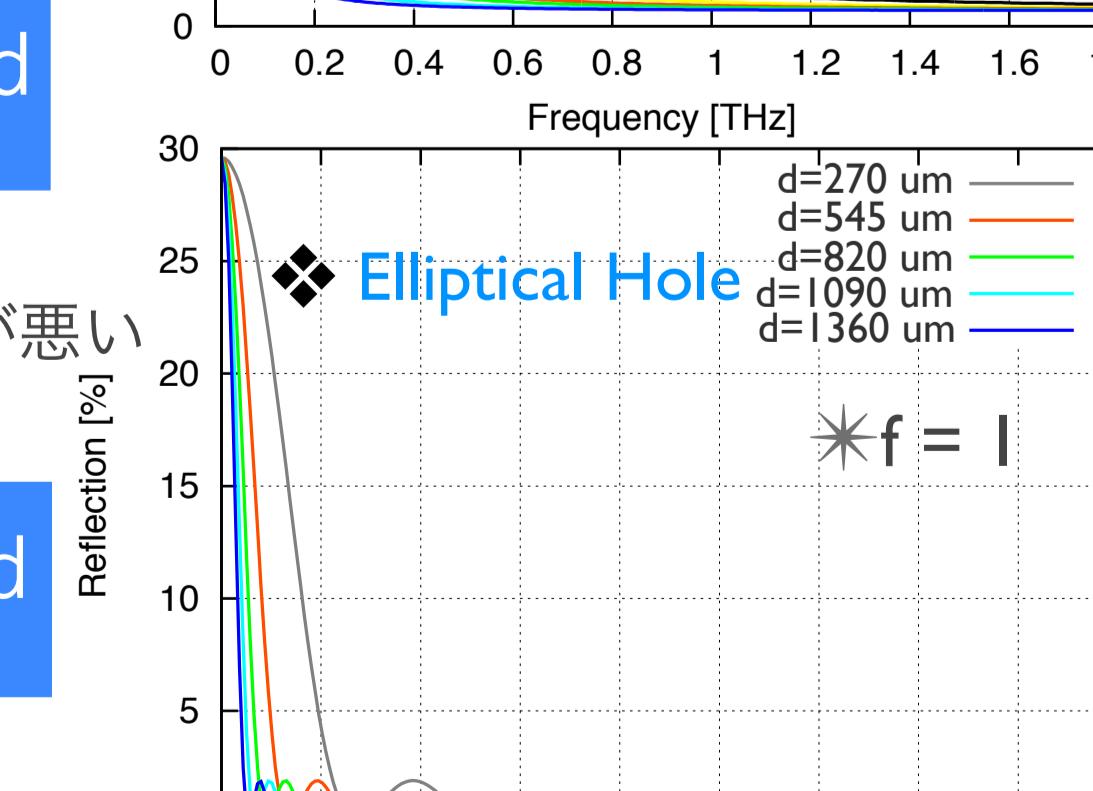
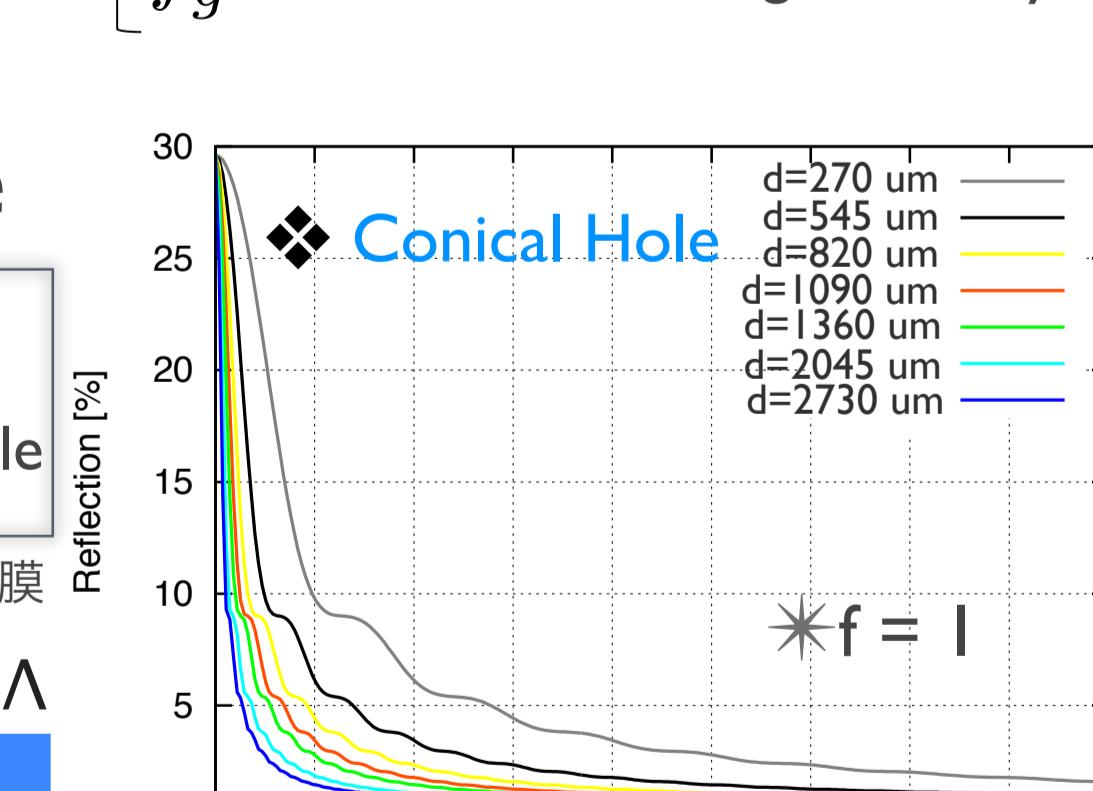
nsi

f = W/Λ

Elliptical Hole

→深さ270 μm程度で0.22 - 1.8THzの

広帯域が実現出来る



7 . Conclusion

- 小径エンドミルによる切削加工で9素子シリコンレンズアレイを製作した。
→形状誤差20μm, 表面粗さ0.45 μm(Ra), 平面延長部誤差20μmを達成した。今後100素子アレイを製作
- サブ波長構造を利用したシリコンレンズの反射防止設計を行った。
- 楕円状の穴構造の場合、空間充填率を高くすることでテラヘルツ帯にかけて反射率数%を達成できる設計を行った。実際の加工ではスピンドルやレーザーなどの方法が考えられる。

* Reference : I.C.Bruckner et al ,2009 2. E.B.Grann et al ,1994 3. S.Biber et al ,2003