

# 電波望遠鏡マルチビーム受信機のための 超伝導モノリシックマイクロ波集積回路の開発

国立天文台・先端技術センター  
江崎翔平



2024年6月7日  
関東甲信越技術職員懇談会

# 国立天文台・SISクリーンルーム

## ○歴史

- 1985年 野辺山にクリーンルーム発足
  - 野辺山宇宙電波観測所完成(1982年)
  - 野辺山45m電波望遠鏡に搭載するデバイス開発
  - 高性能な超伝導デバイス(SISミキサ)の開発
- 2004年 ALMA望遠鏡日米欧共同建設
- 2006年 三鷹キャンパス先端技術センターに移設.
  - ALMA Band 4, 8, 10開発
- 2013年 ALMA開所式
- 2013年- ALMA将来開発他
- 2023年- ALMA2プロジェクト
  - ALMA Band 8 upgrade



野辺山45m望遠鏡<sup>[1]</sup>



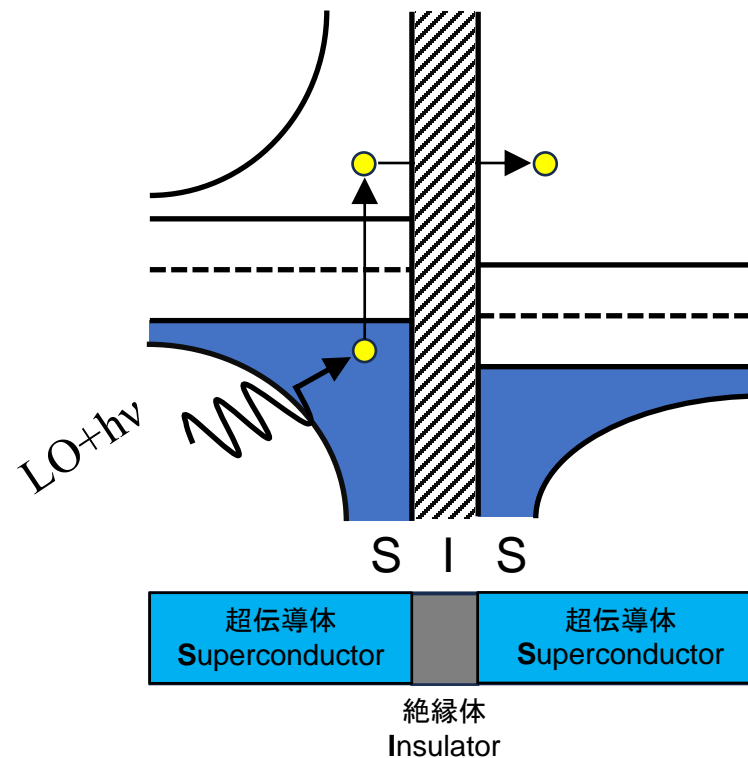
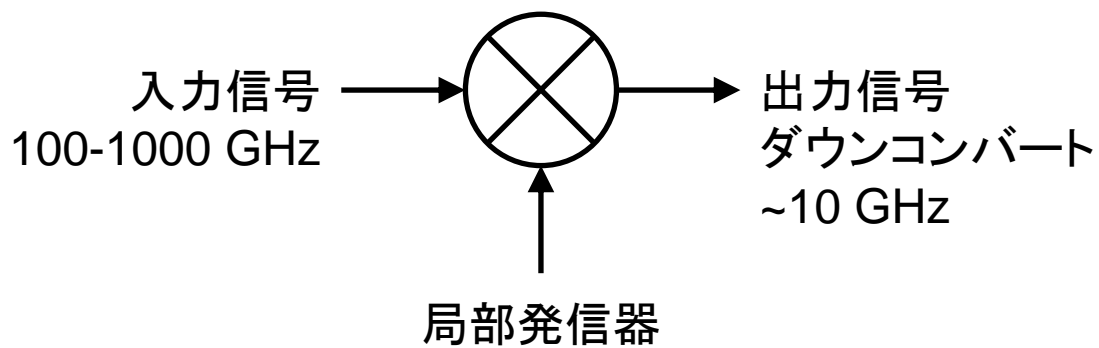
ALMA望遠鏡<sup>[2]</sup>

[1] <https://www.nao.ac.jp/research/project/nro.html>

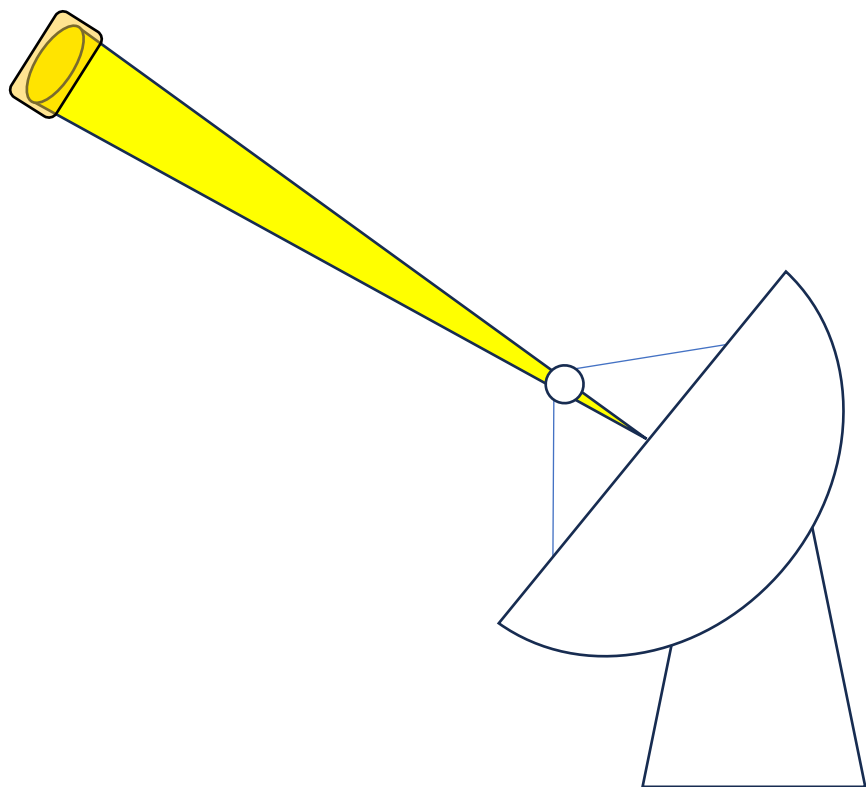
[2] Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), A. Marinkovic/X-Cam. (<https://alma-telescope.jp/gallerytag/instruments#aos-aerial2>)

# SISミキサ

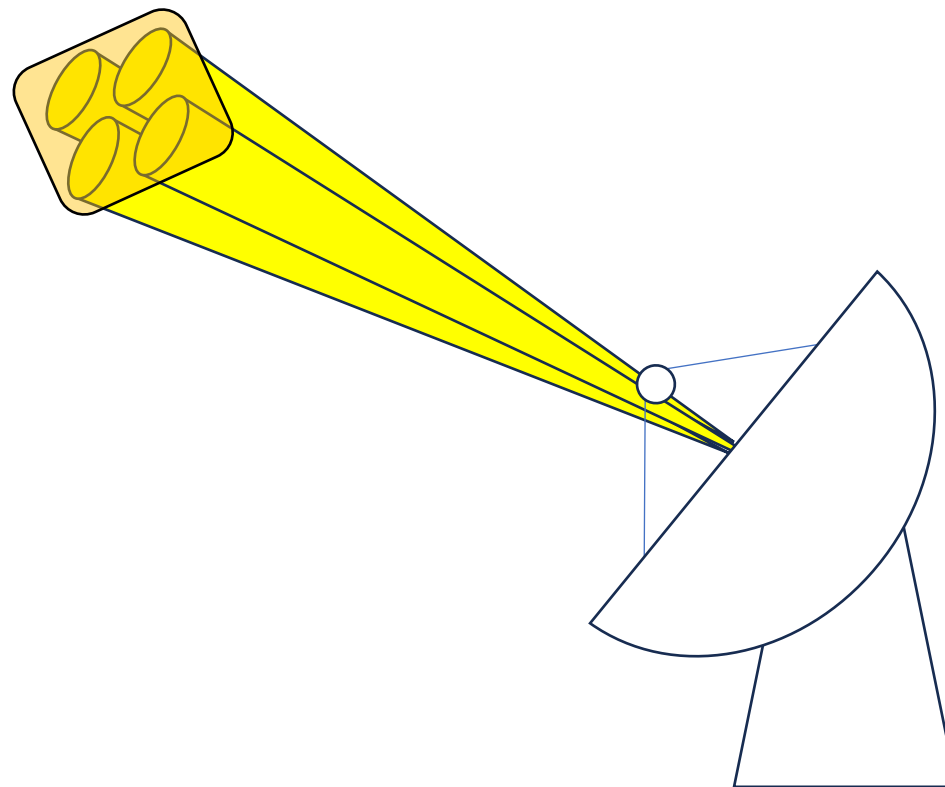
- ヘテロダイン受信機で用いられる周波数変換器.
- Josephson接合におけるトンネル電流の強い非線形性を利用



# マルチビーム受信機



シングルビーム受信機



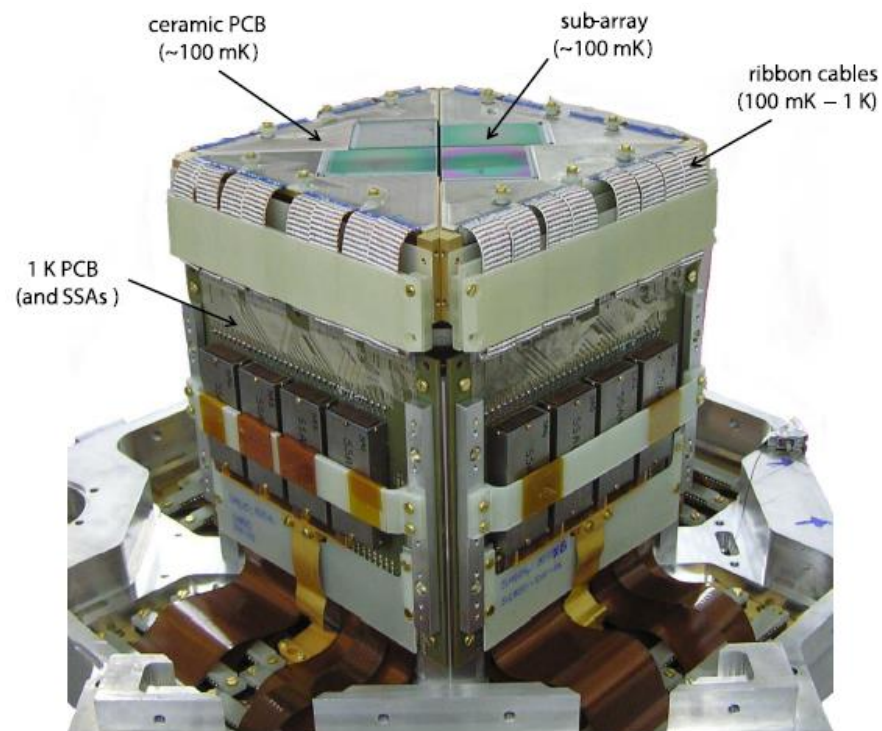
マルチビーム受信機

マッピング観測の効率化

# 受信機・検出器の多ピクセル化



64-pixel heterodyne imaging spectrometer (SuperCam) [1]

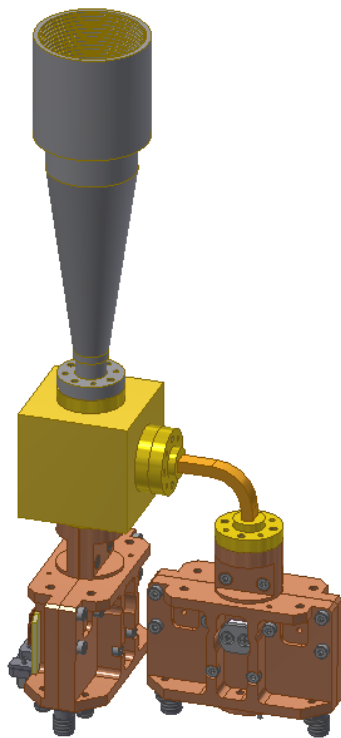


10000 pixel bolometer camera (SCUBA-2) [2]

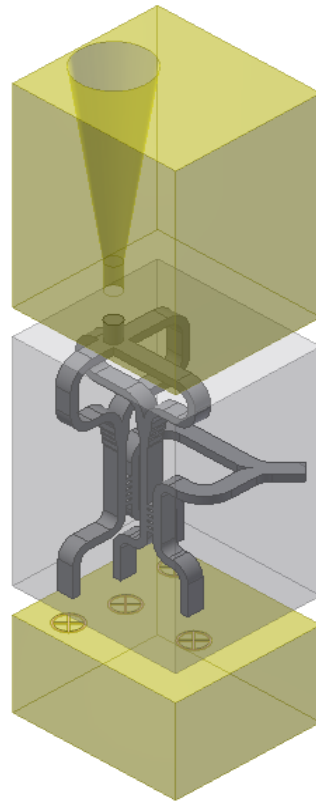
[1] Christopher Groppi, et al., Proc. of SPIE Vol. 6275, 62750O, (2006)

[2] W. S. Holland, et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 430, Issue 4, 21 April 2013, Pages 2513–2533

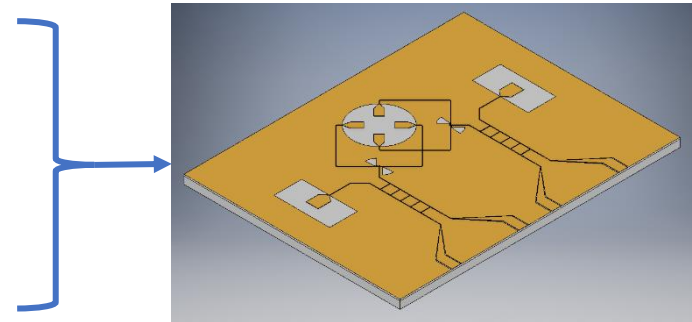
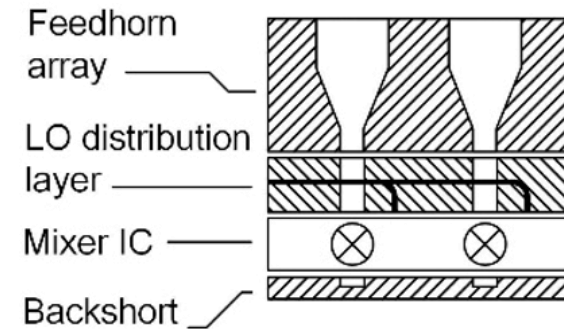
# 国立天文台・マルチビーム受信機



従来型



集積化



平面化

モノリシックマイクロ波集積回路

472

IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. 8, NO. 4, JULY 2018

THz Letters

A New Concept for Quasi-Planar Integration of Superconductor-Insulator-Superconductor Array Receiver Front Ends

Wenlei Shan, Shohei Ezaki, Jie Liu, Shinichiro Asayama, and Takashi Noguchi

# 作製工程

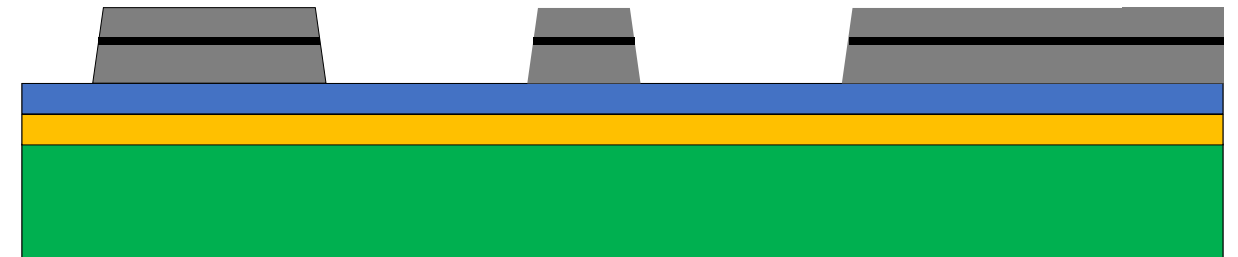
- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜



■ Wafer    ■  $\text{Al}_2\text{O}_3$     ■  $\text{SiO}_2$

# 作製工程

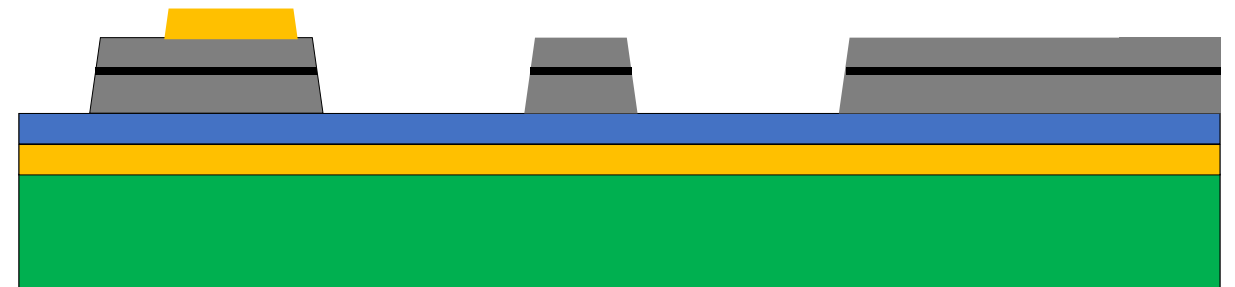
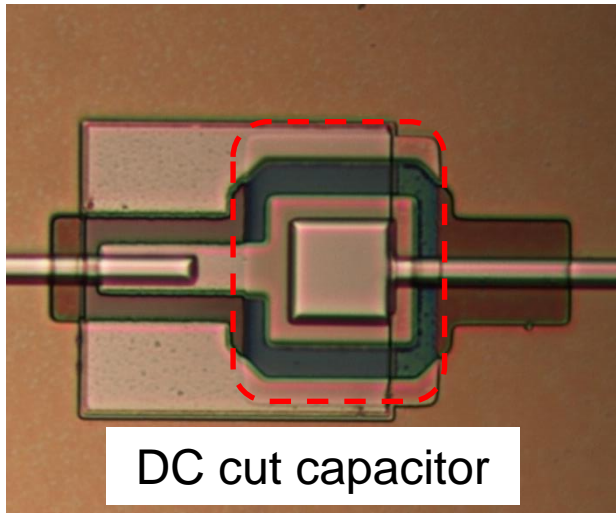
- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)





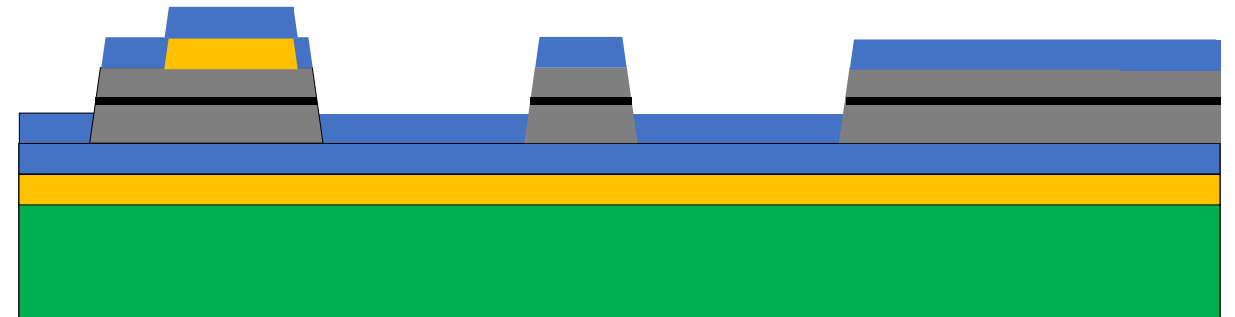
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)



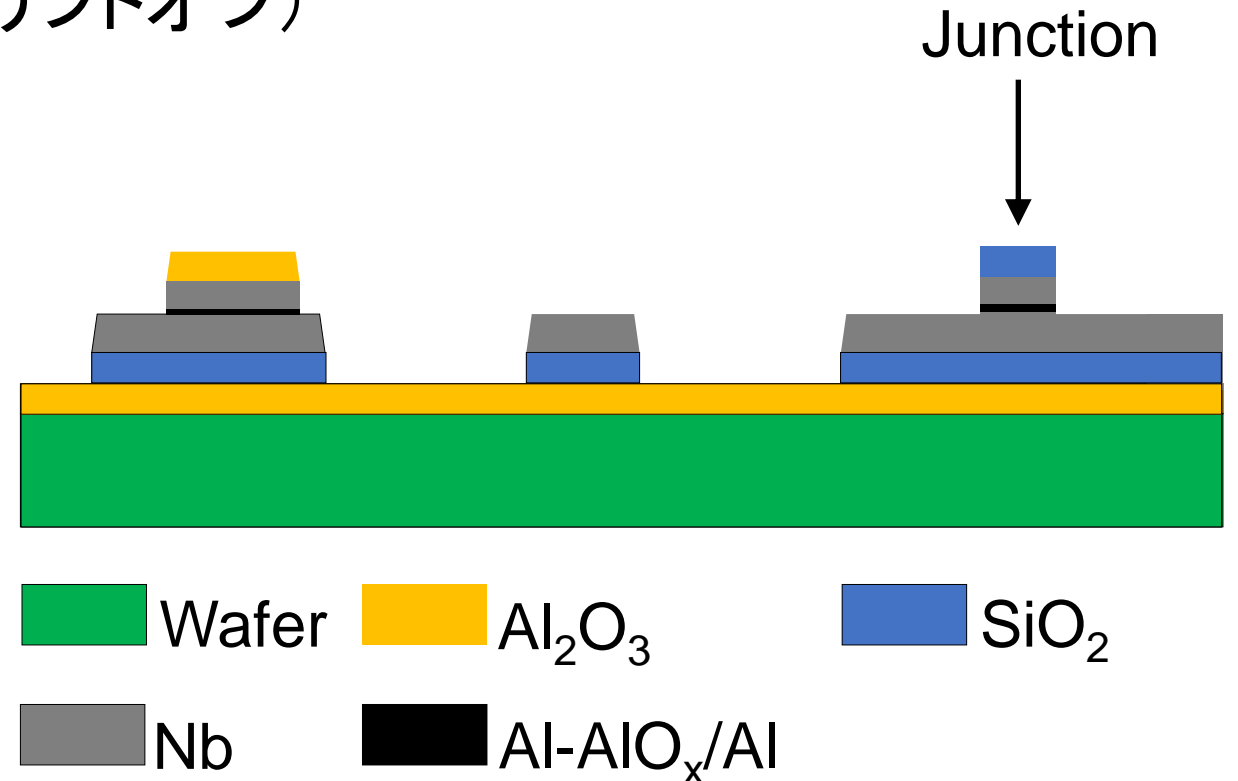
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- $\text{SiO}_2$ 成膜



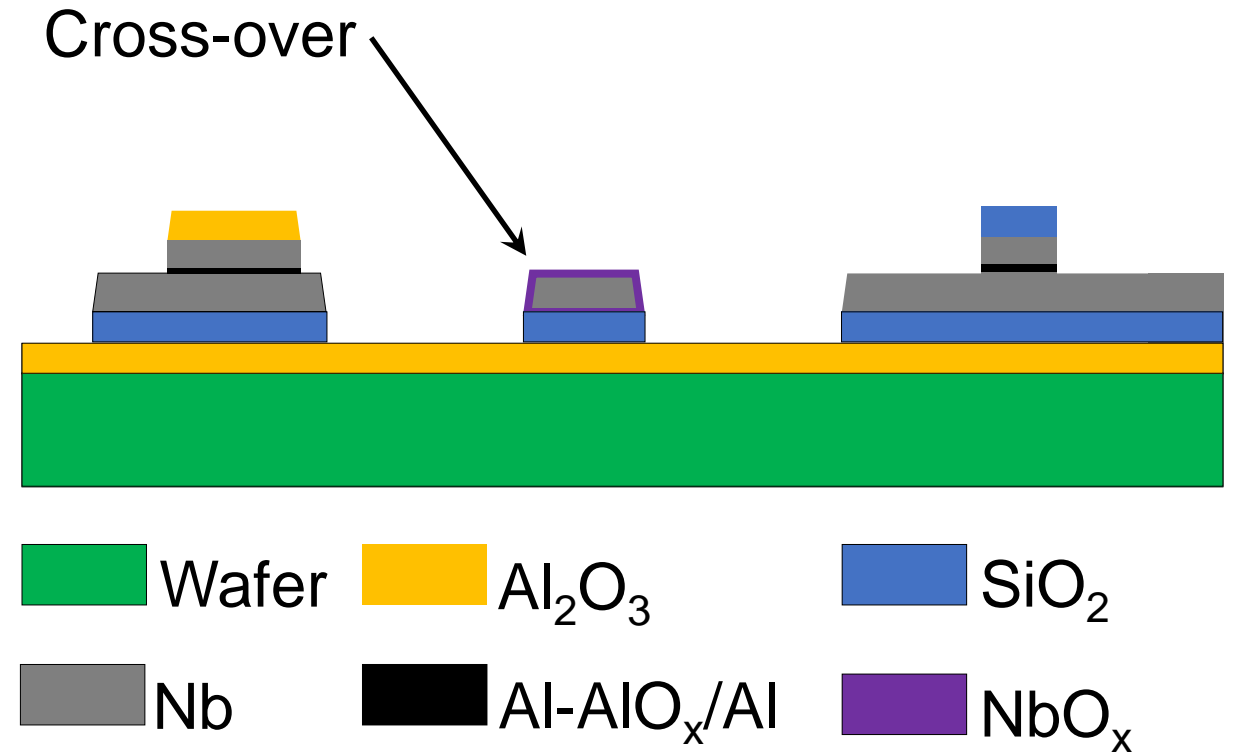
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- $\text{SiO}_2$ 成膜
- Junction形成



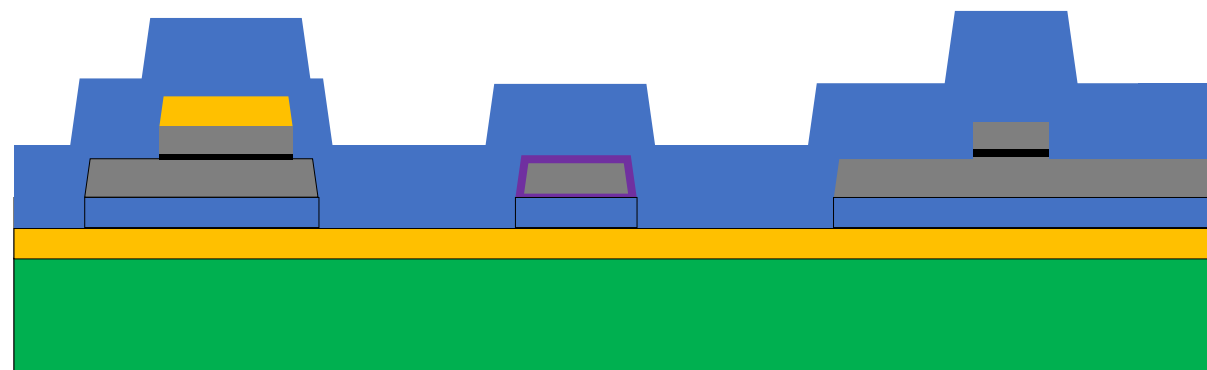
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- $\text{SiO}_2$ 成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)



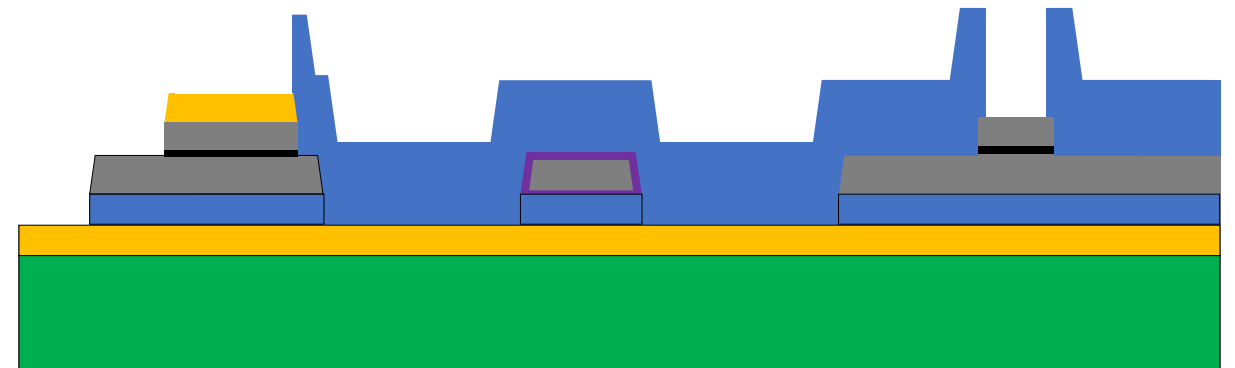
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- $\text{SiO}_2$ 成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)
- 絶縁層成膜



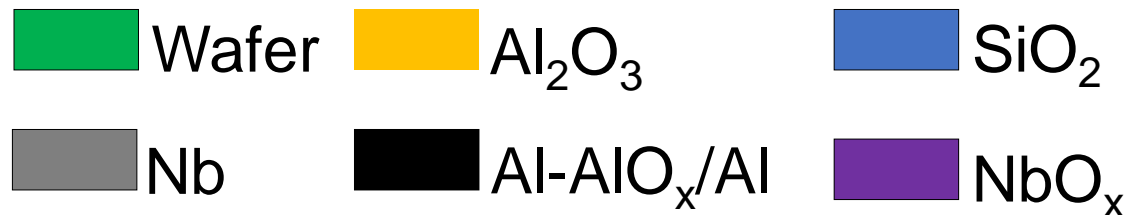
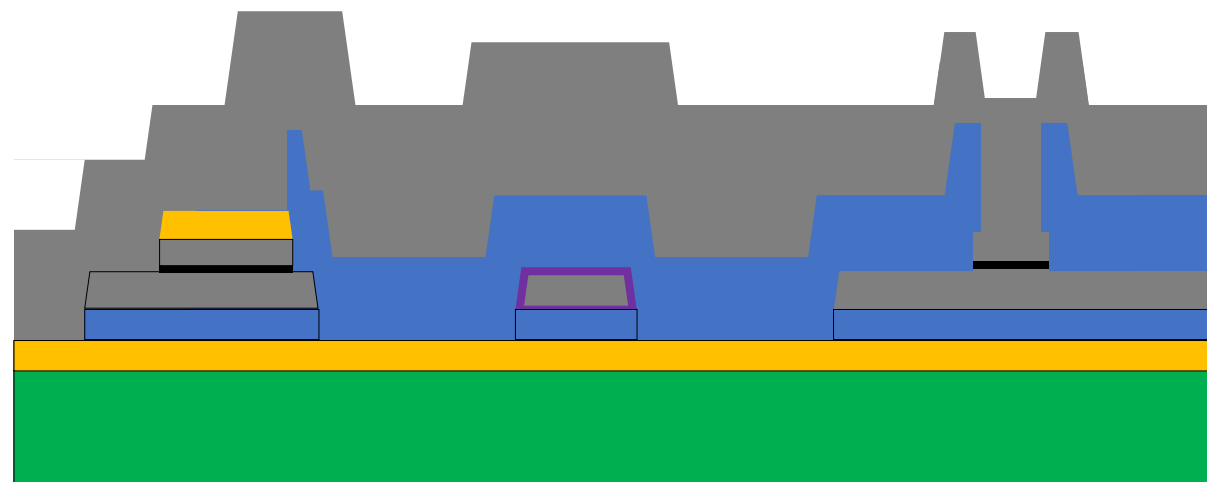
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- 絶縁層( $\text{SiO}_2$ )成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)
- Via-hole形成



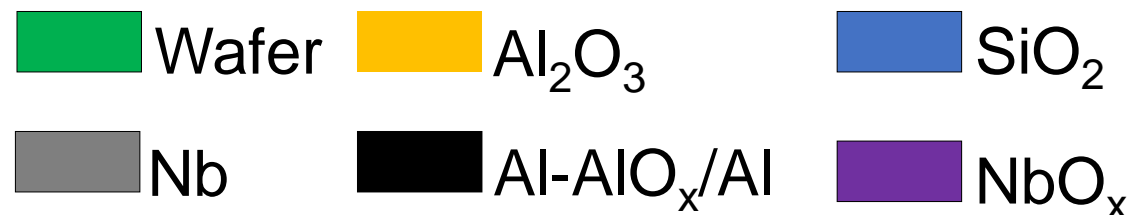
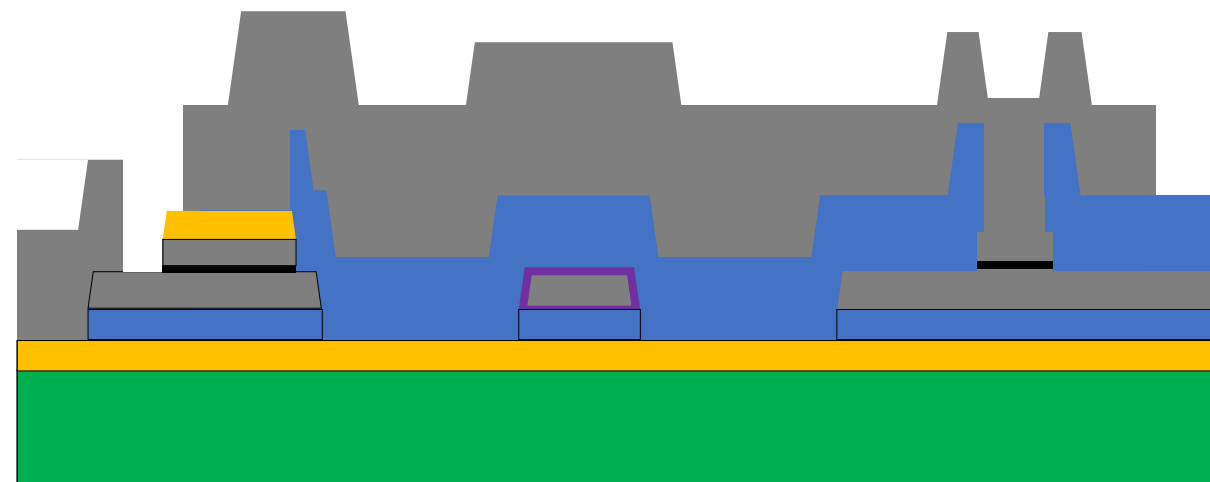
# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- 絶縁層( $\text{SiO}_2$ )成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)
- Via-hole形成
- Nb成膜



# 作製工程

- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- 絶縁層( $\text{SiO}_2$ )成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)
- Via-hole形成
- Nb成膜
- 配線等形成





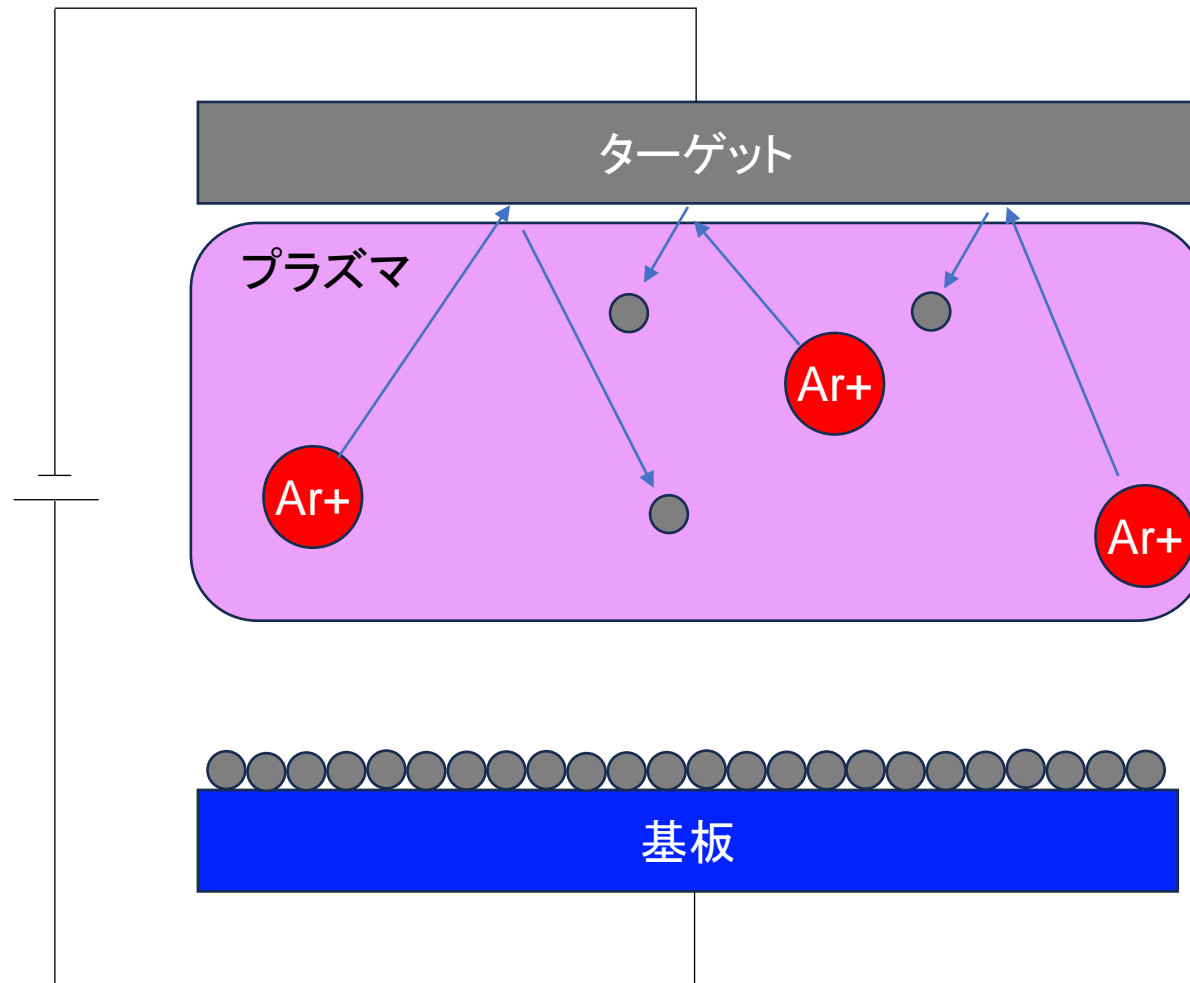
# 作製工程

---

- 薄膜成膜
- エッチング
- リフトオフ

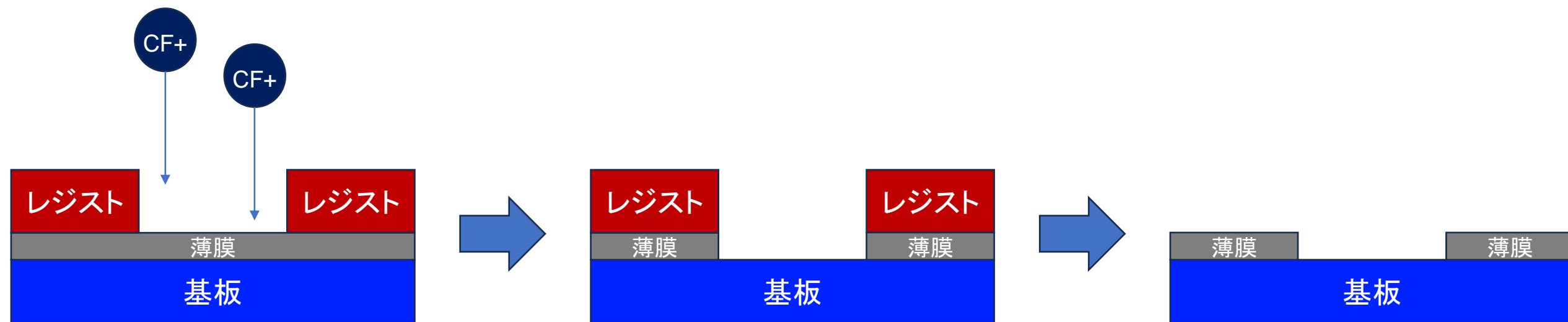
# 作製工程

- 薄膜成膜
- エッチング
- リフトオフ



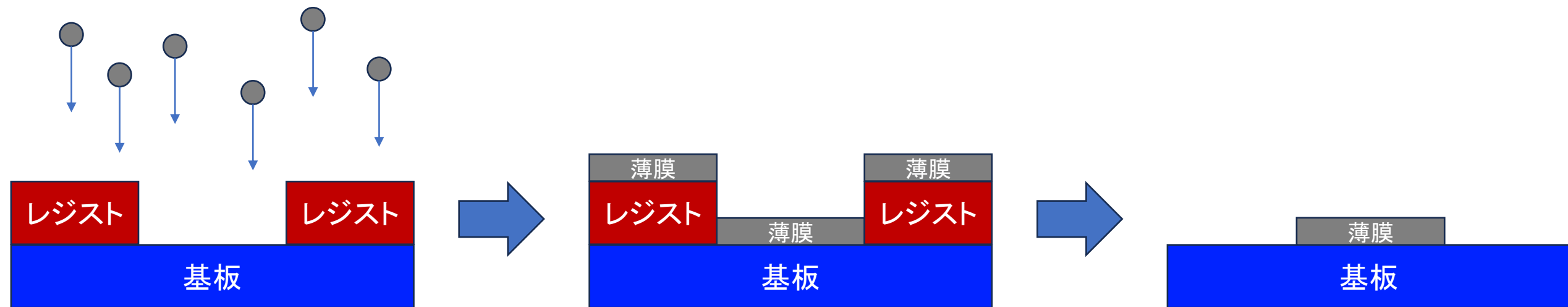
# 作製工程

- 薄膜成膜
- エッチング
- リフトオフ



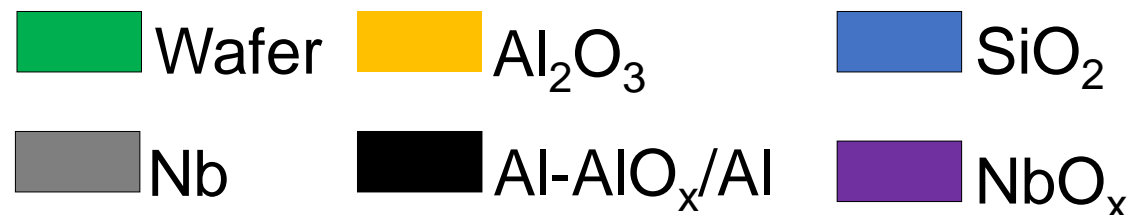
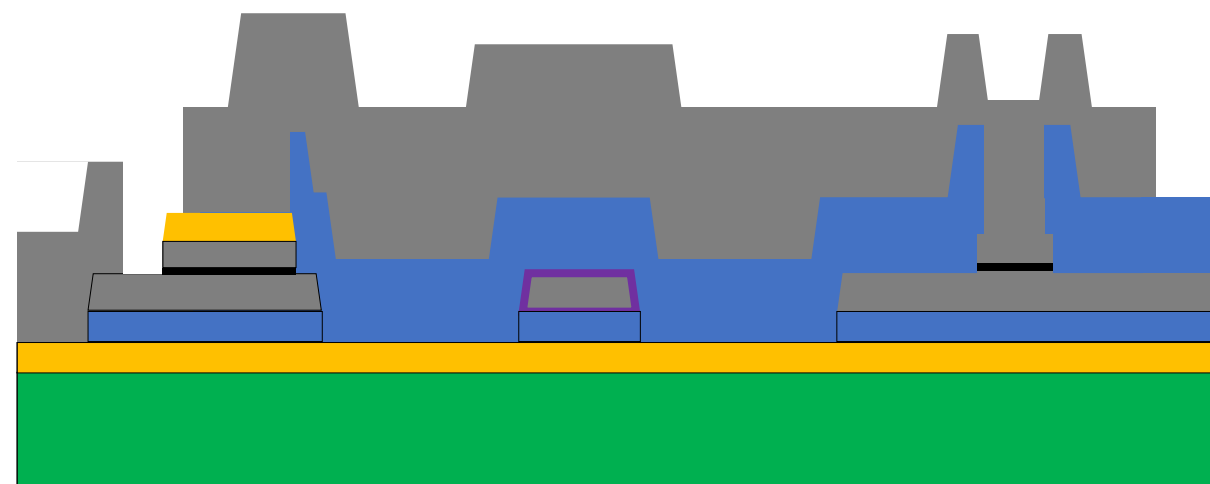
# 作製工程

- 薄膜成膜
- エッチング
- リフトオフ

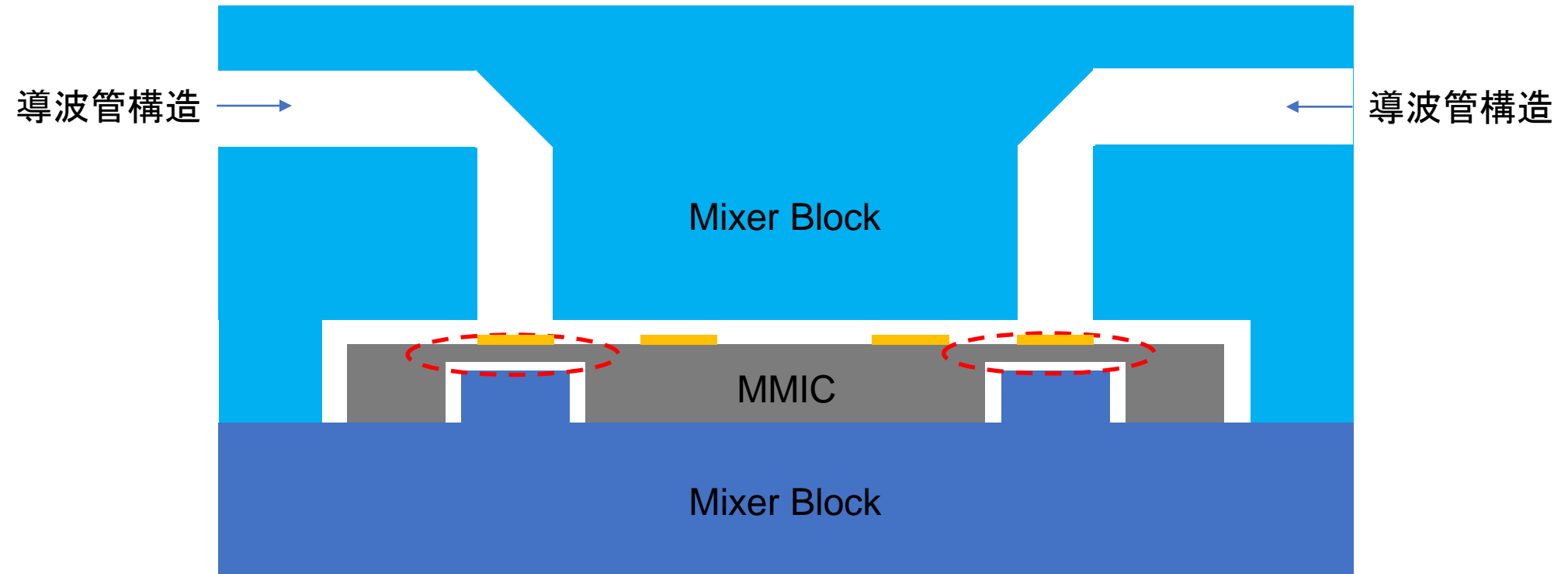


# 作製工程

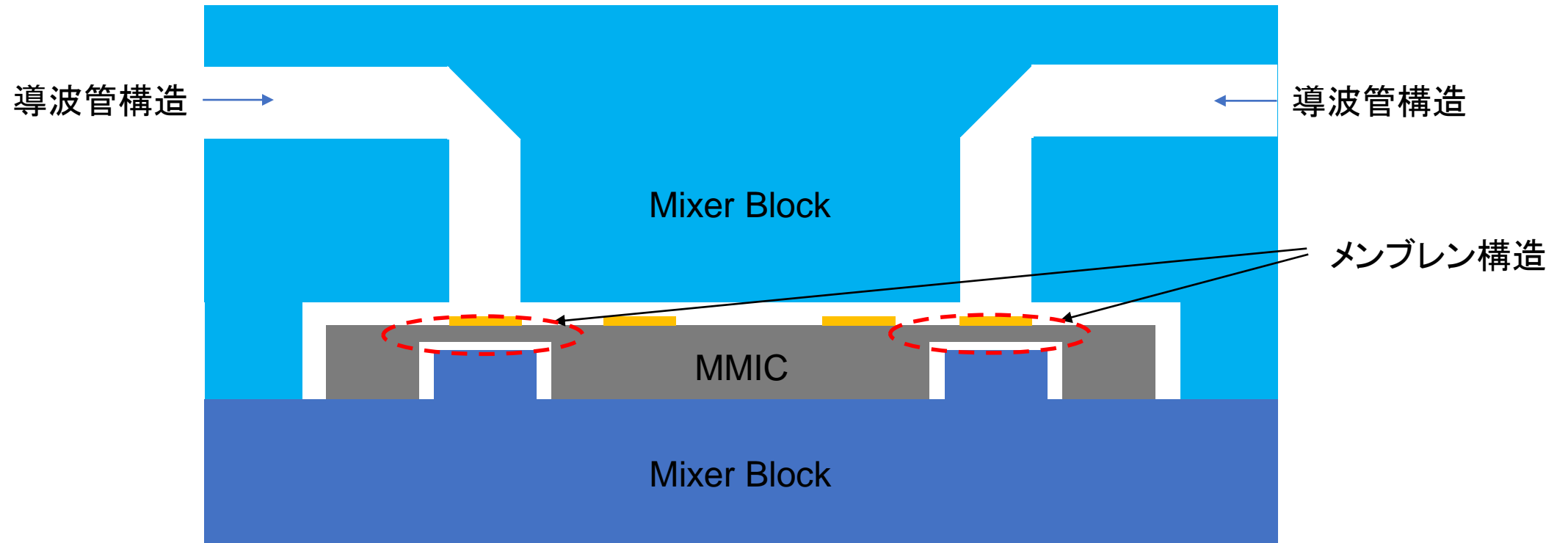
- ウェハー保護膜( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ )成膜
- SIS層成膜(ベースパターンのためリフトオフ)
- DCカットキャパシタ形成( $\text{Al}_2\text{O}_3$ リフトオフ)
- 絶縁層( $\text{SiO}_2$ )成膜
- Junction形成
- 陽極酸化(立体交差構造)
- Via-hole形成
- Nb成膜
- 配線等形成



# メンブレン構造

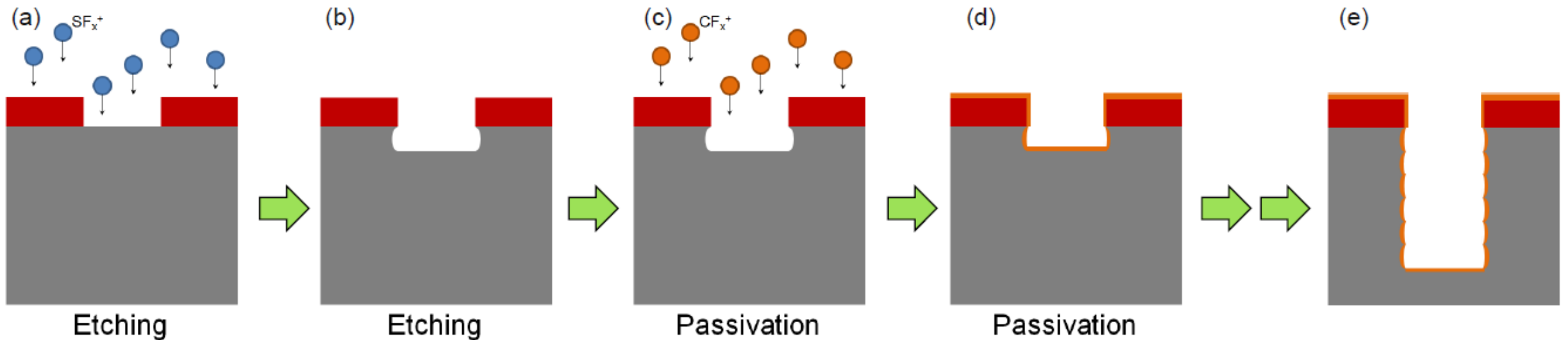


# メンブレン構造



# シリコン深掘りエッチング

- シリコンエッチングと壁面保護を繰り返して、垂直に近い形状でシリコンを数十～数百ミクロンの深さの穴を掘る。
  - 薄膜エッチング：百ナノメートル台の厚さを削る。
- MMICではほとんどシリコン基板を掘りぬく(400ミクロン)。



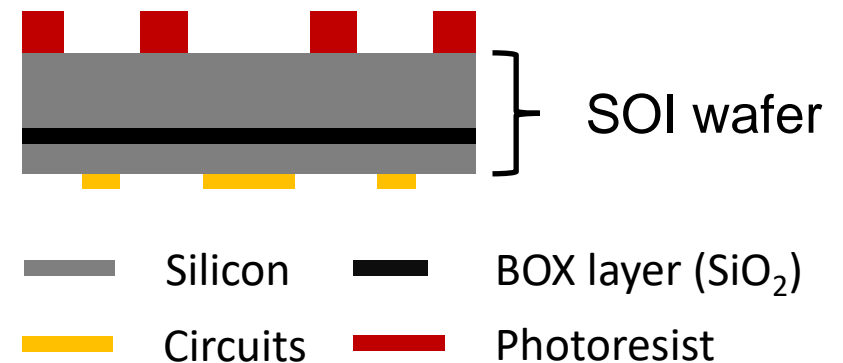


# 作製工程

## • メンブレン構造

### • Deep silicon etching process

- <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 8.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:140 W, 2.0 s
  - <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 22.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:20 W, 7.0 s
  - <Pass.>  $\text{C}_4\text{F}_8$ :400 sccm, 10.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:0 W, 2.0 s
  - 110 cycles
- } 1 cycle



# 作製工程

- メンブレン構造

- Deep silicon etching process

- <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 8.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:140 W, 2.0 s
    - <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 22.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:20 W, 7.0 s
    - <Pass.>  $\text{C}_4\text{F}_8$ :400 sccm, 10.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:0 W, 2.0 s
  - 110 cycles

} 1 cycle



— Silicon      — BOX layer ( $\text{SiO}_2$ )  
— Circuits      — Photoresist

# 作製工程

## • メンブレン構造

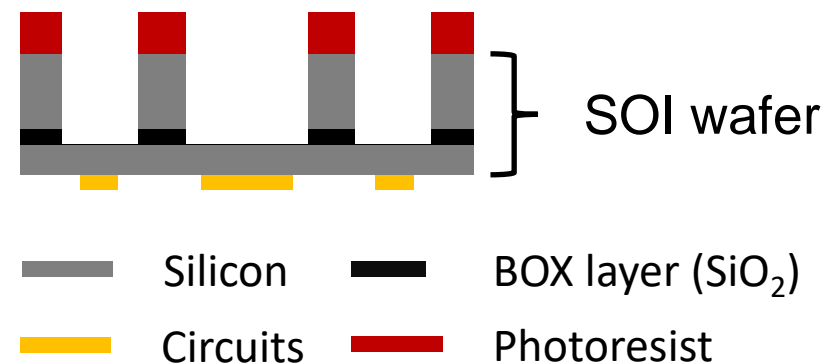
### • Deep silicon etching process

- <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 8.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:140 W, 2.0 s
  - <Etch>  $\text{SF}_6$ :500 sccm, 22.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:20 W, 7.0 s
  - <Pass.>  $\text{C}_4\text{F}_8$ :400 sccm, 10.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:0 W, 2.0 s
- } 1 cycle
- 110 cycles

### • 熱酸化膜エッチング

- $\text{C}_4\text{F}_8$ :25 sccm , Ar: 25 sccm, 1.0 Pa, Coil: 1400 W, Bias: 150 W, 4 min

➡ メンブレン平坦化

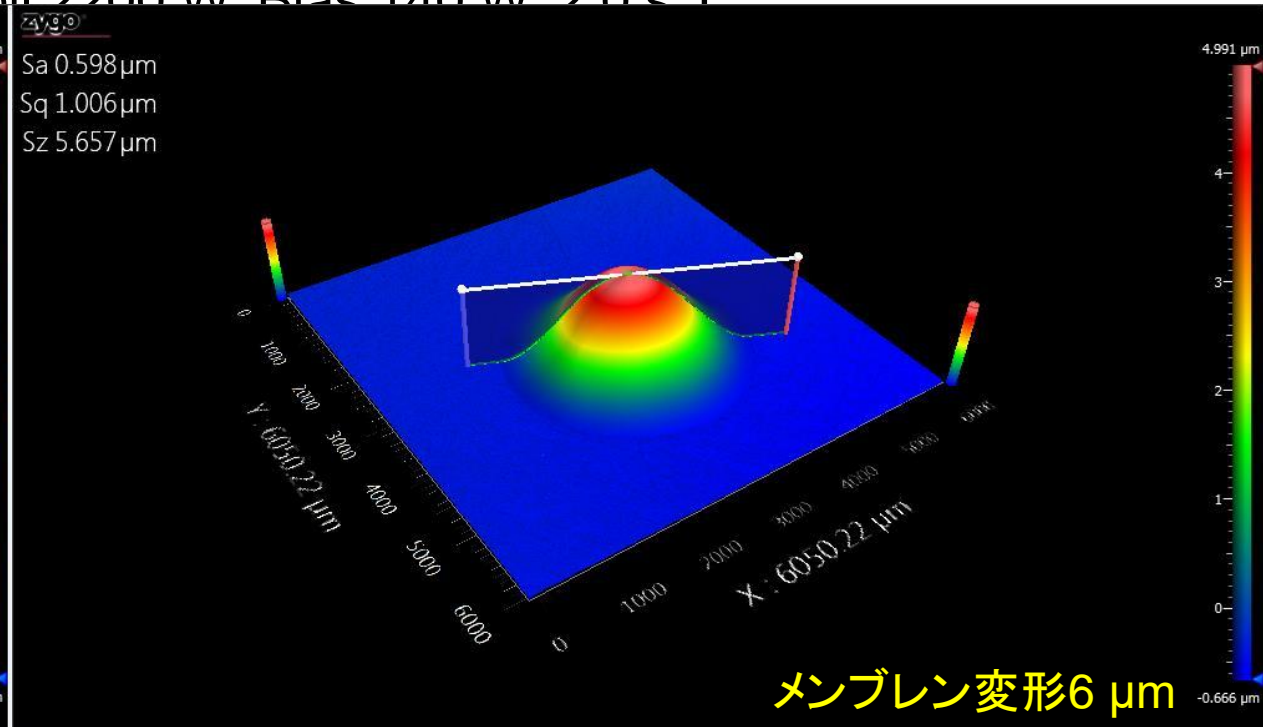
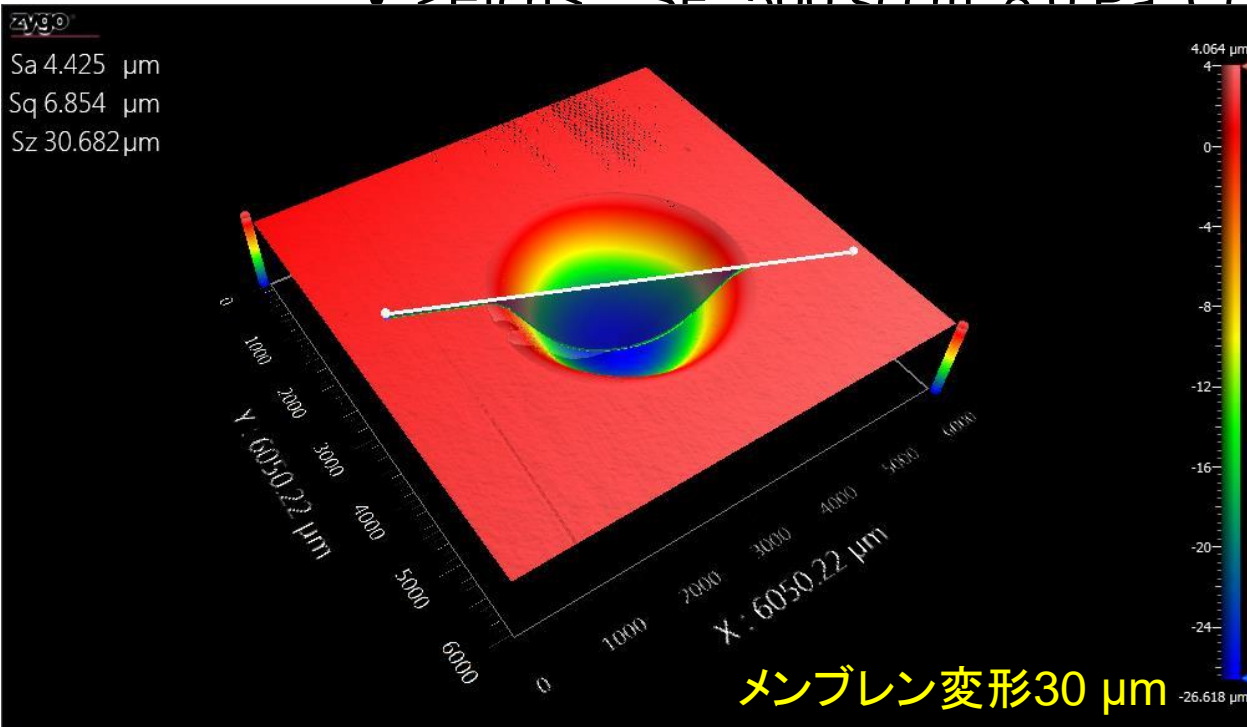


# 作製工程

- メンブレン構造

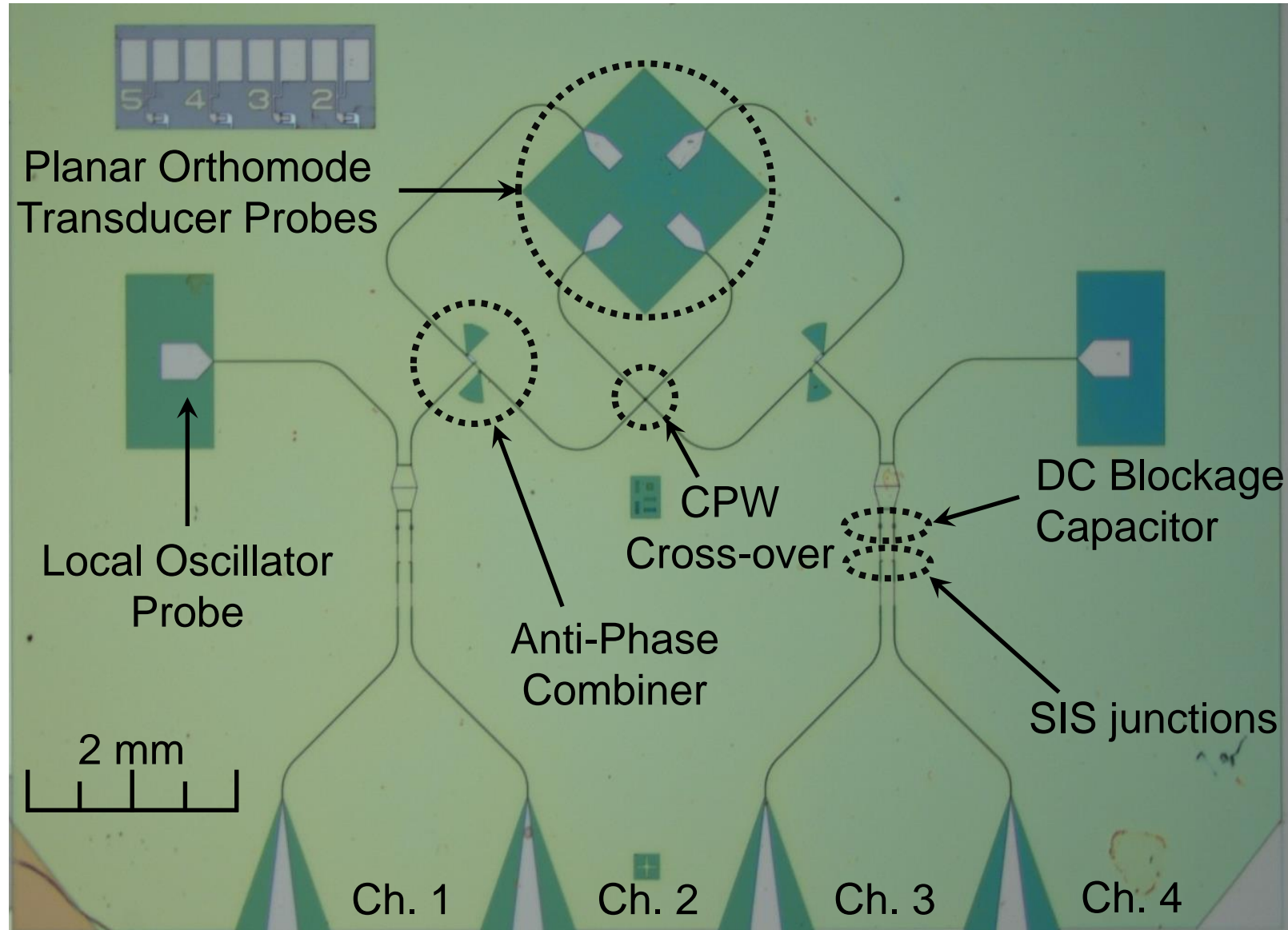
- Deep silicon etching process

- [Etch] SF<sub>6</sub>:500 sccm, 8.0 Pa, Coil:2200 W, Bias:140 W, 2.0 s]

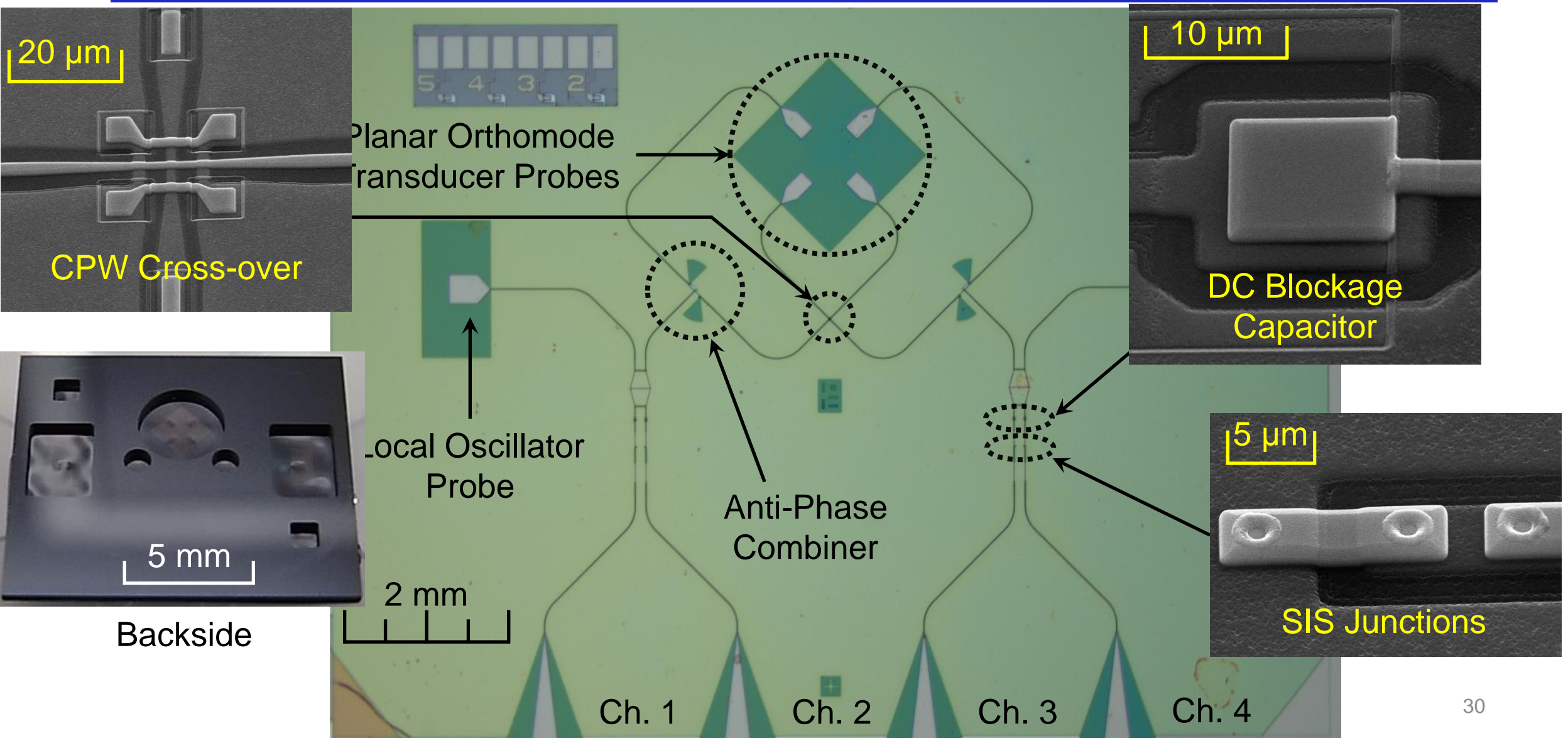


- |  |          |  |                               |
|--|----------|--|-------------------------------|
|  | Silicon  |  | BOX layer (SiO <sub>2</sub> ) |
|  | Circuits |  | Photoresist                   |

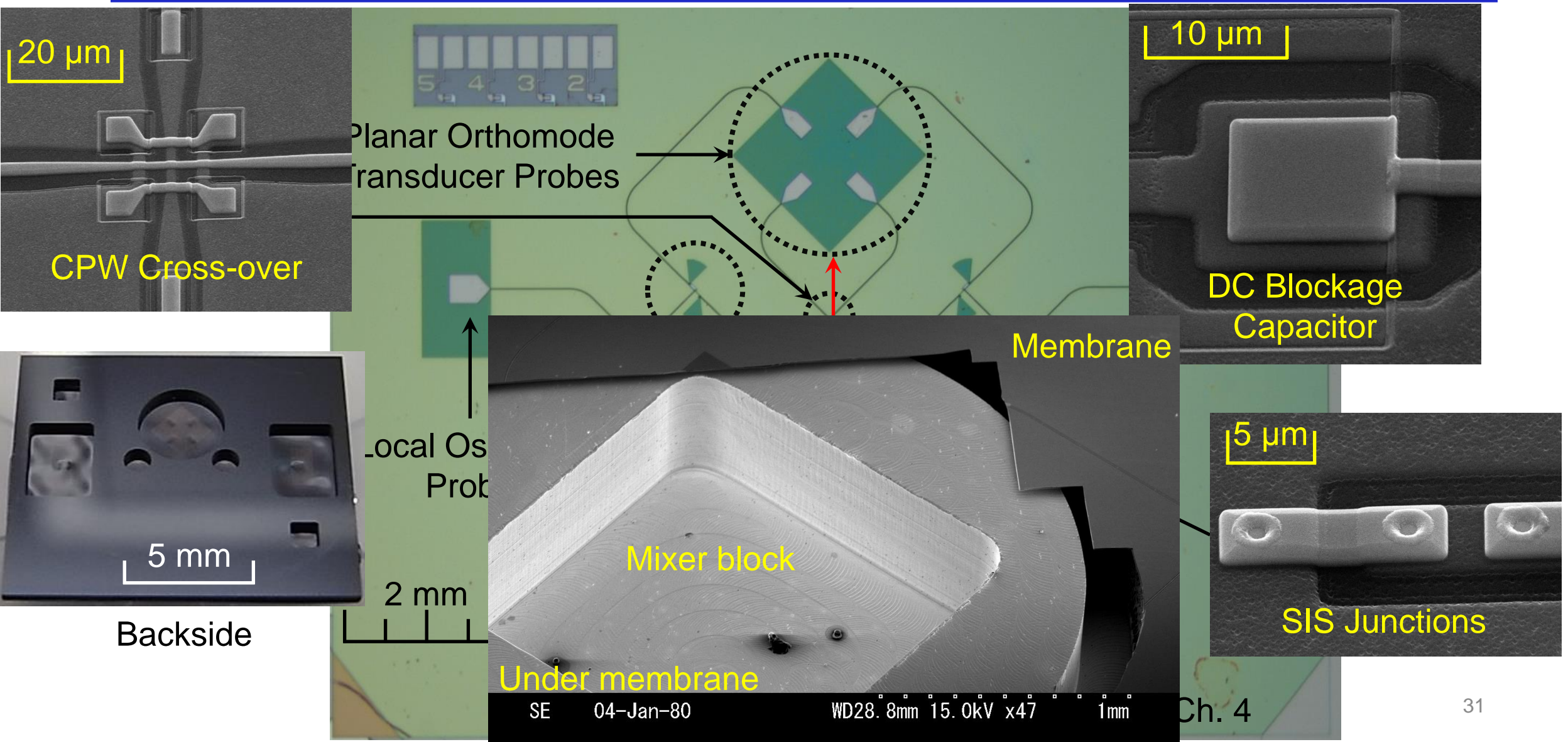
# Integrated Circuit



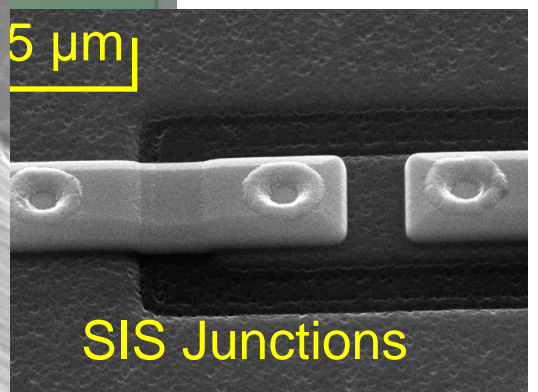
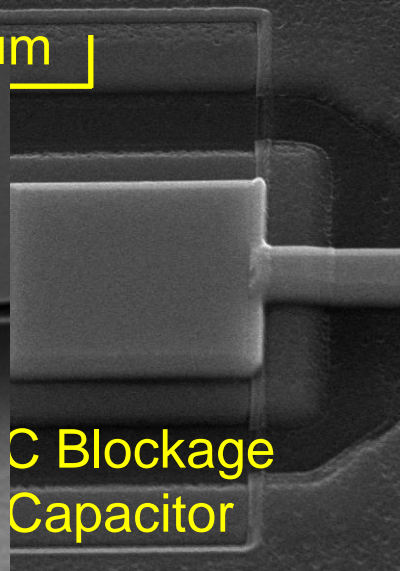
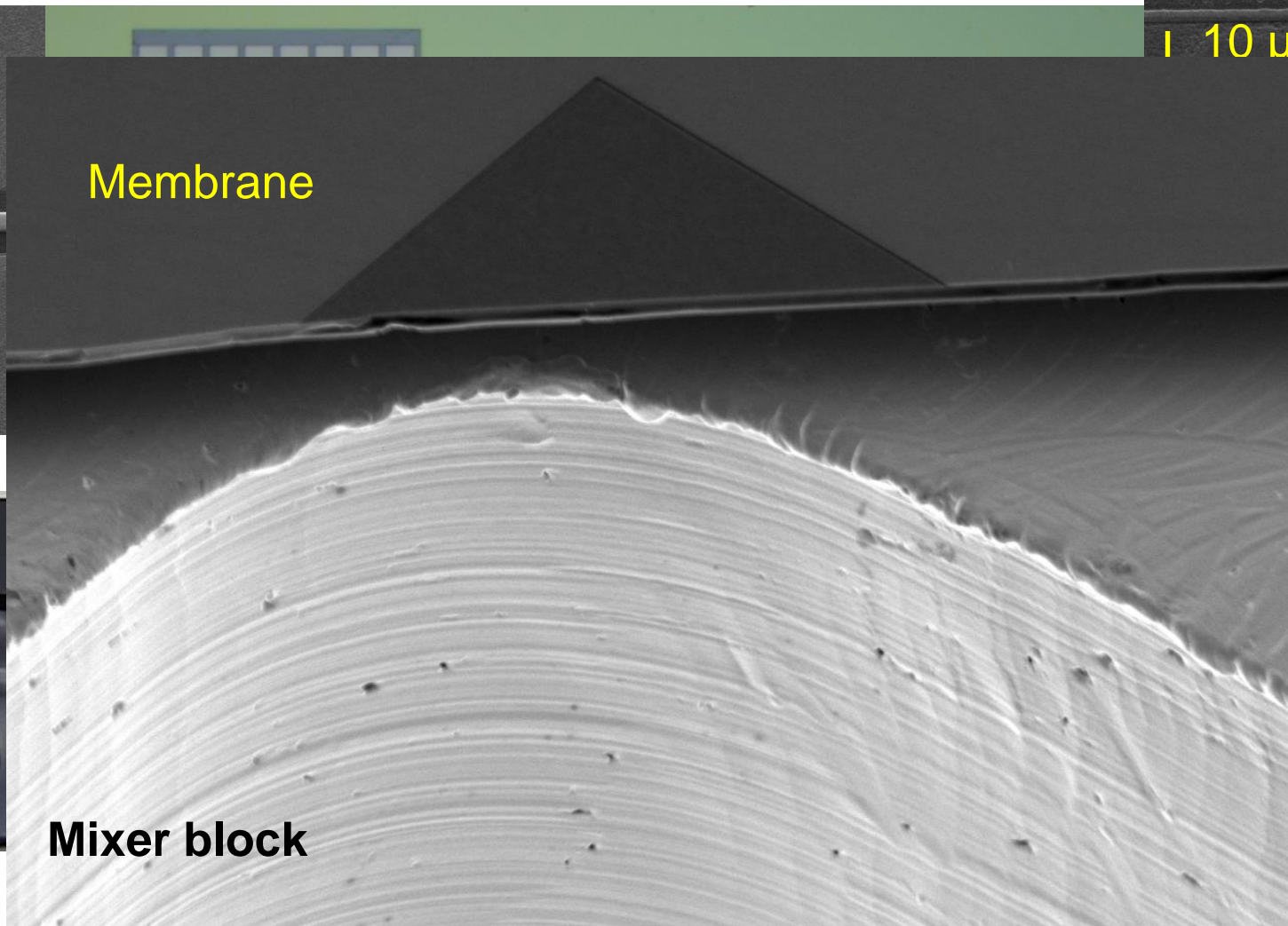
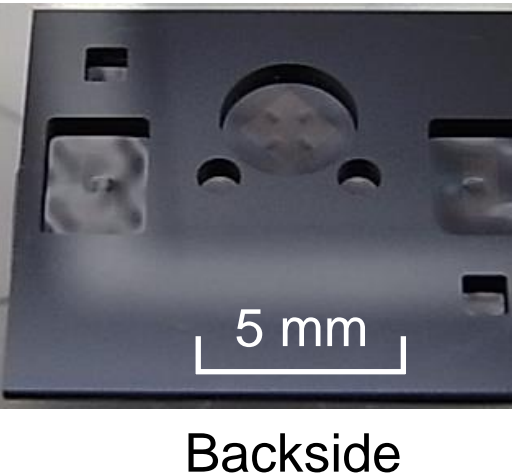
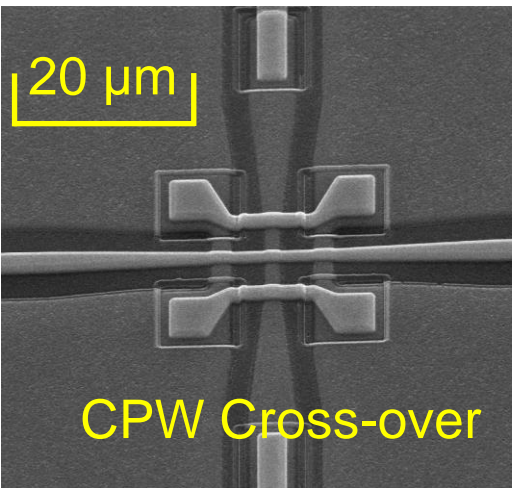
# Integrated Circuit



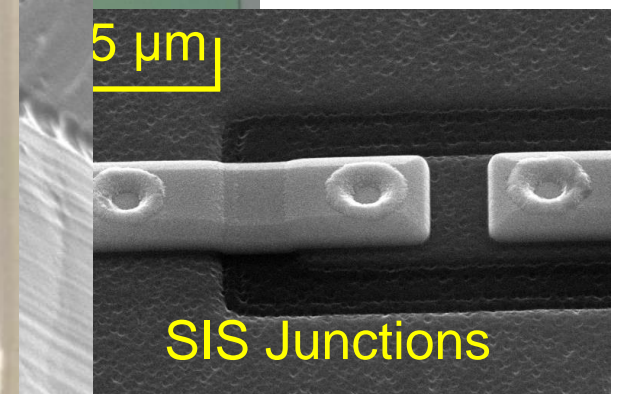
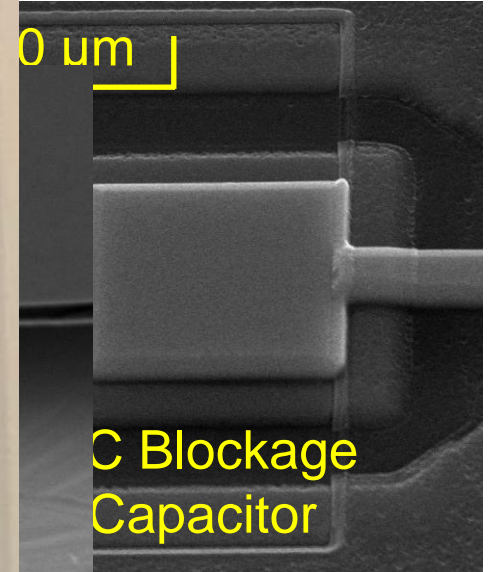
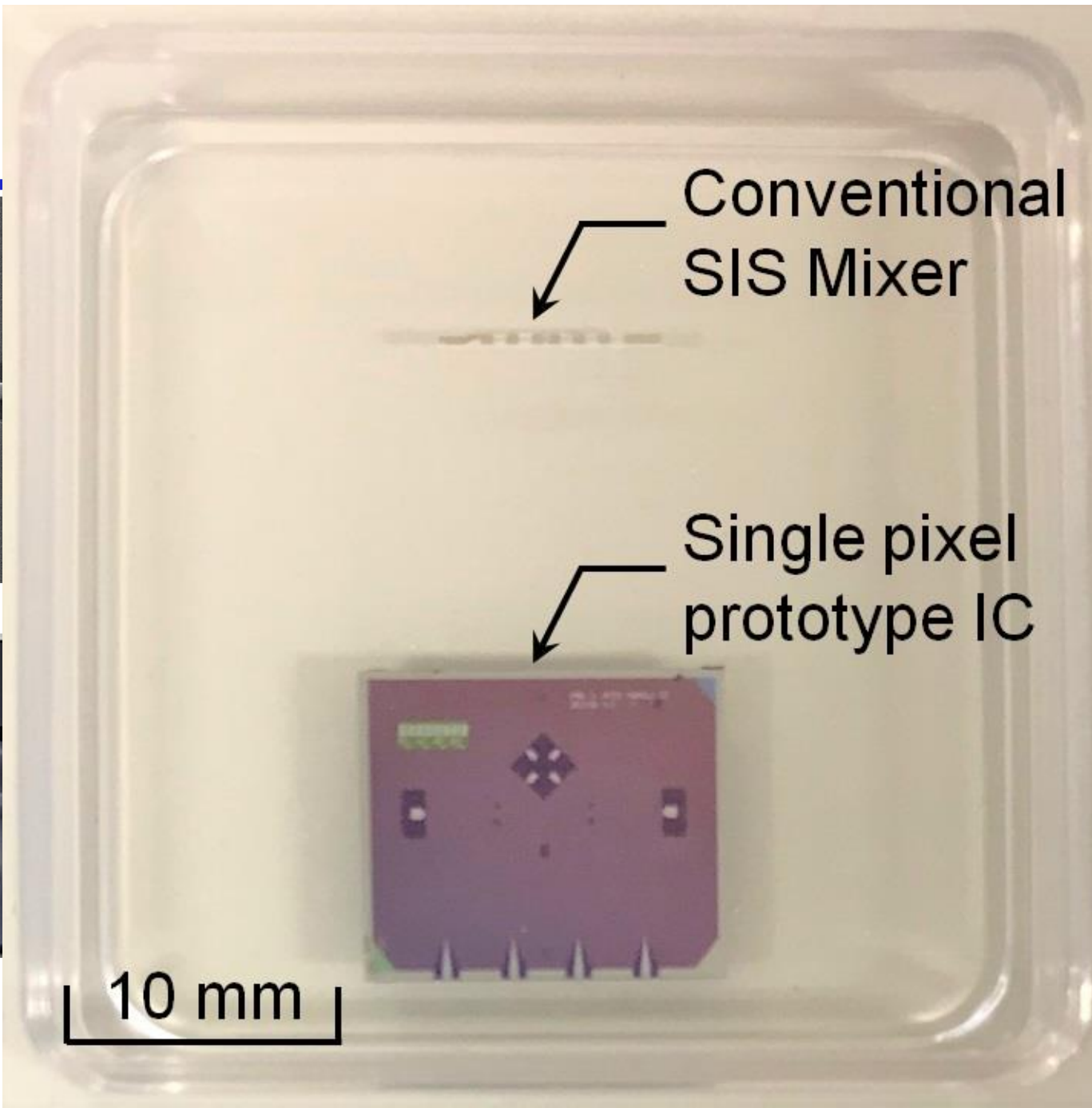
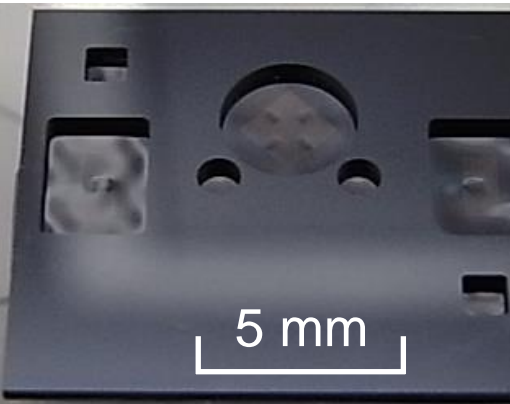
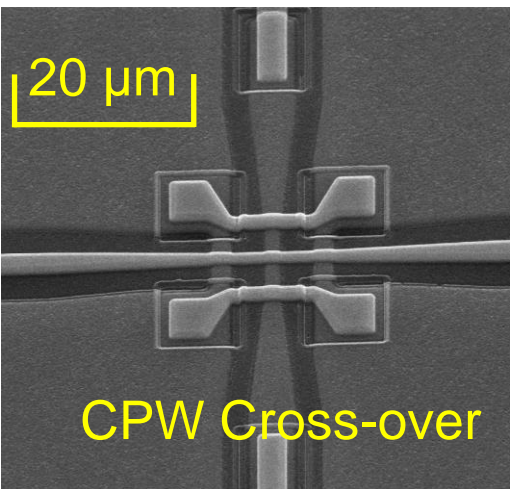
# Integrated Circuit



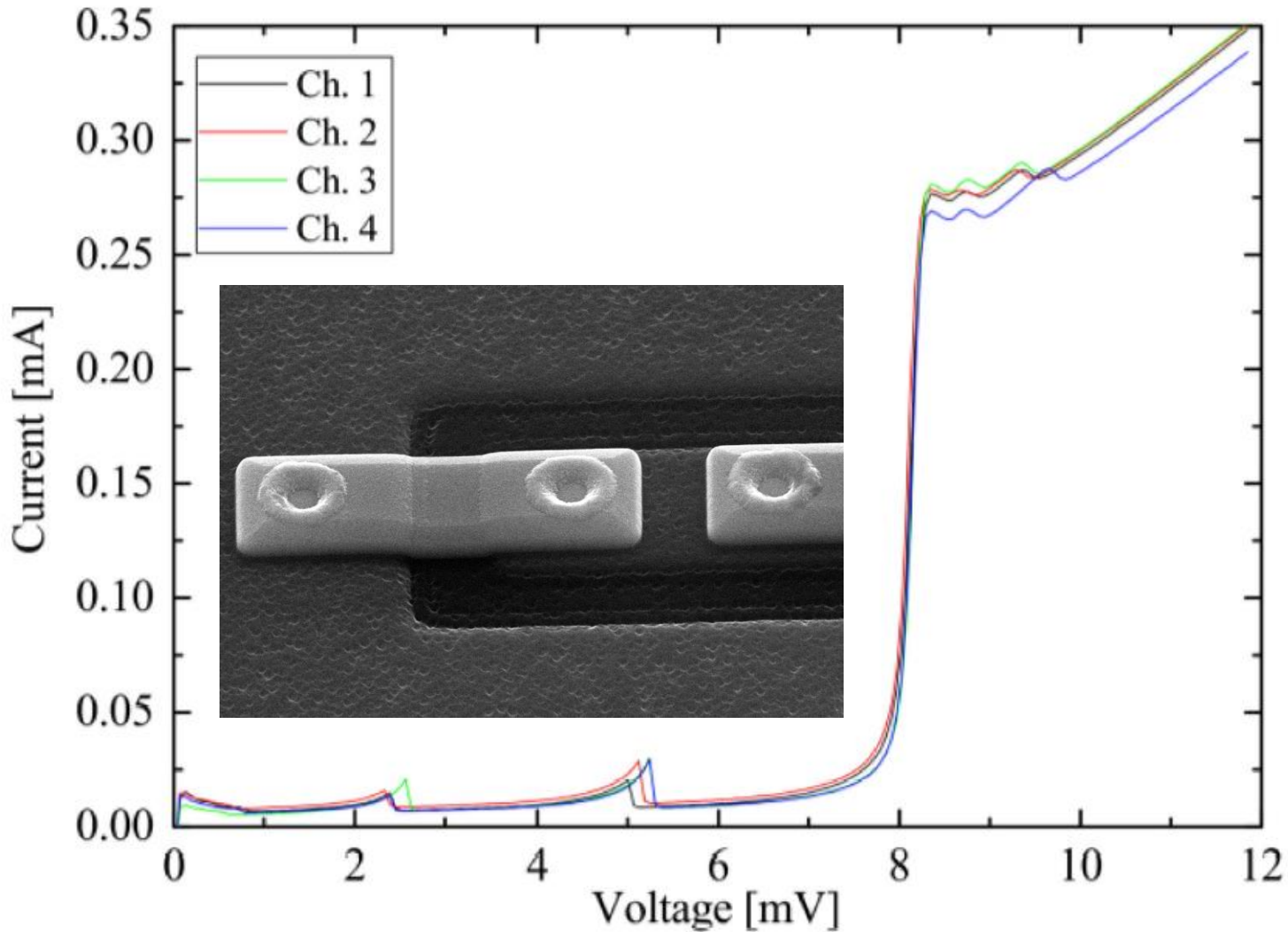
# Integrated Circuit





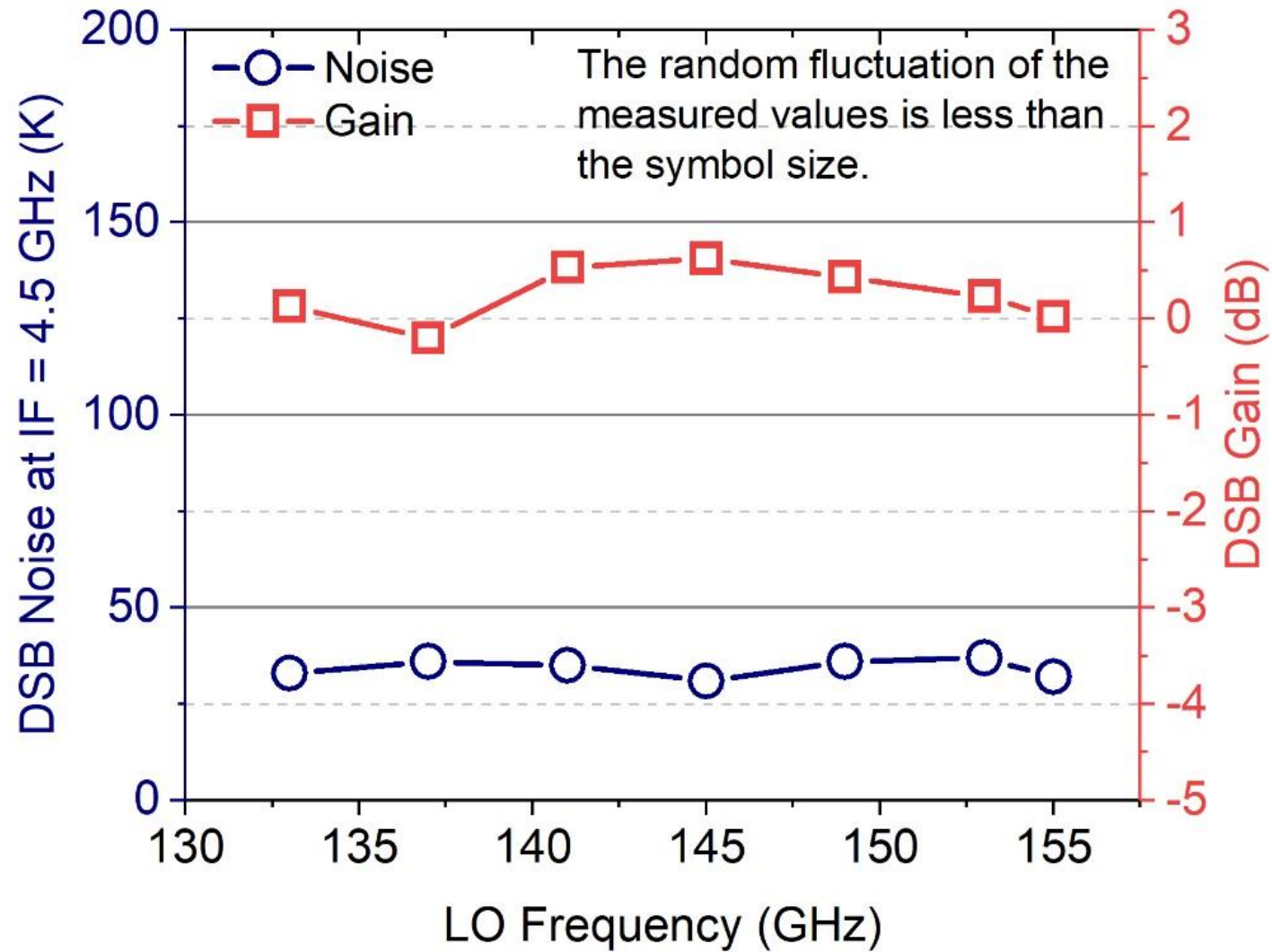


# SIS接合



- 直列 3-接合
  - $J_c \sim 6 \text{ kA/cm}^2$
  - $V_g \sim 8.1 \text{ mV}$
  - $R_{sg}/R_n \sim 18$

# ノイズパフォーマンス



# まとめ

---

- 国立天文台では電波望遠鏡に搭載するコンパクトなマルチビーム受信機のための集積回路の開発を行っている.
- 導波管回路の一部をシリコン基板上に取り入れた技術を導入し、シングルピクセルMMICチップを作製した.
- 作製したMMICにおいて良好なノイズパフォーマンスを得た.