

# テラヘルツ帯ヘテロダイン受信機の開発研究

小嶋崇文 (国立天文台 先端技術センター)

Wenlei Shan, Matthias Kroug, Alvaro Gonzalez、藤井泰範、  
金子慶子、菊池健一、浅山信一郎、江崎翔平、野口卓(国立天文台)、  
池谷瑞基、高橋宏明、酒井剛(電気通信大学)、  
鵜澤佳徳、牧瀬圭正、寺井弘高(情報通信研究機構)、  
相馬達也、山本智(東京大学)

本研究の一部は

-新学術領域研究25108005 原始惑星系の化学的多様性とその進化

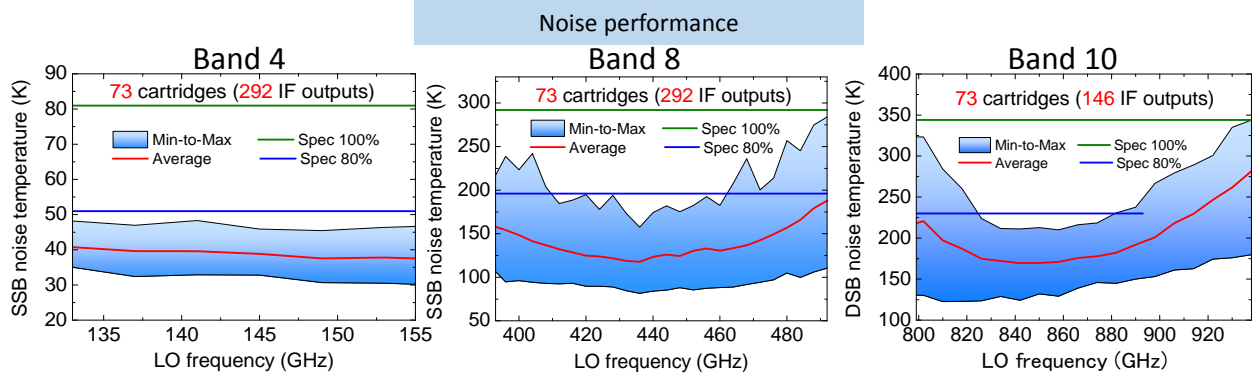
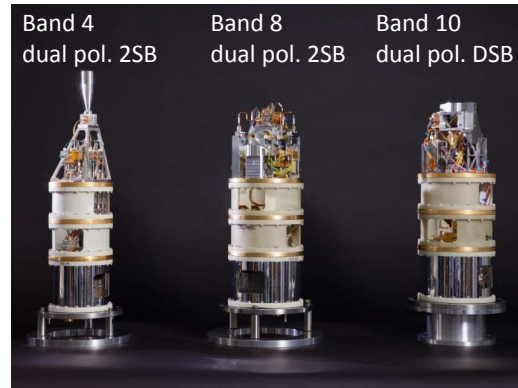
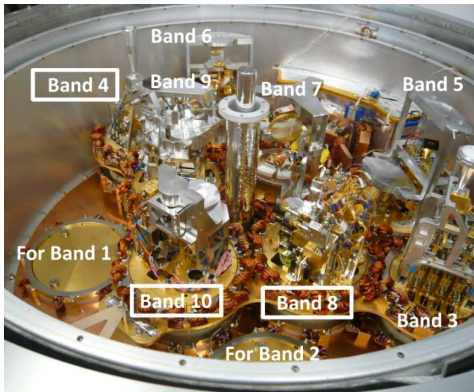
-基盤研究C 26420330 量子雑音限界を目指した高感度テラヘルツ検出器の研究  
により実施中.

## 内容

- ヘテロダイン受信機の将来開発テーマ
- ALMA Band 10受信機の性能向上に向けた課題抽出と一部の検討結果
  - SIS受信機の低雑音化
  - 2SB化の課題
- ALMA Band 11(テラヘルツ)受信機開発の進捗と課題
  - SISミキサ  
接合と同調回路
  - HEBミキサ：  
1.2-1.5 THzヘテロダイン応答を確認

# ALMA Cartridge Receivers Mass-produced at ATC

2014年2月全受信機の出荷完了



## Band 10受信機の性能向上に向けた課題と取り組み

1. SIS受信機のさらなる低雑音化
  1. LO雑音の低減
  2. 同調回路内の損失低減
2. サイドバンド分離型ミキサ(2SB)化

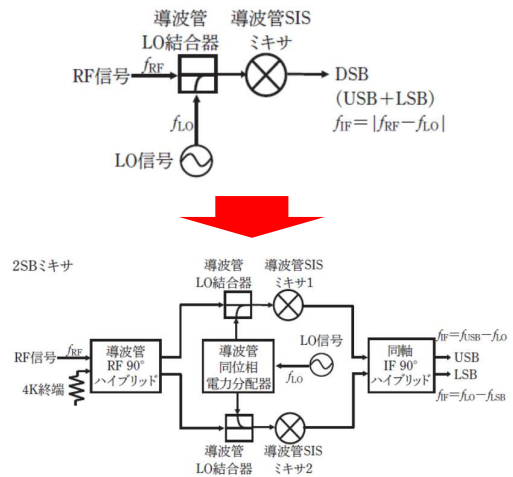
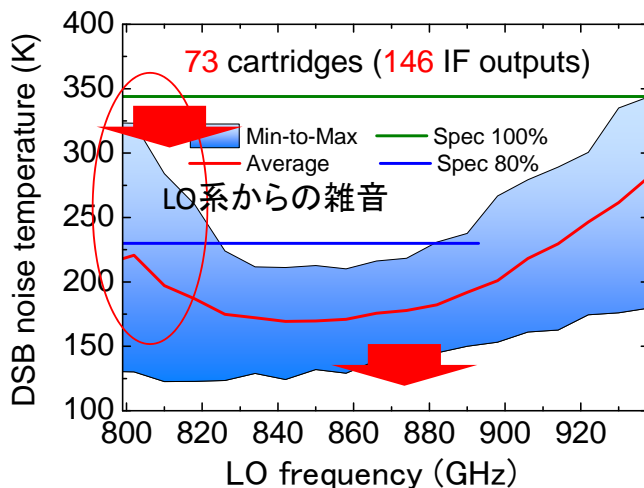


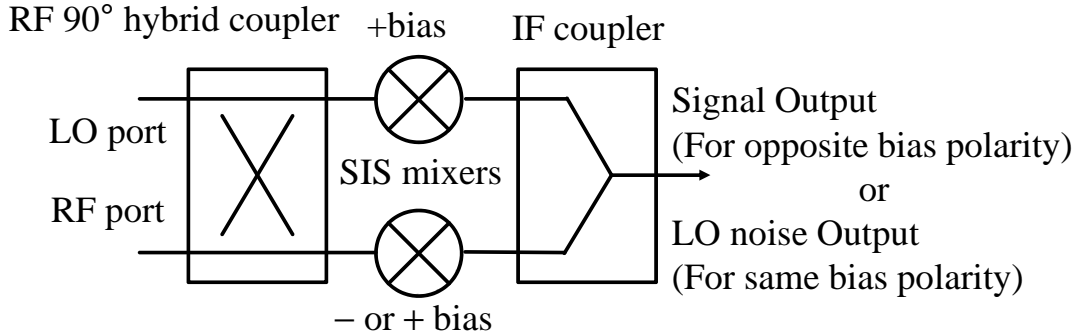
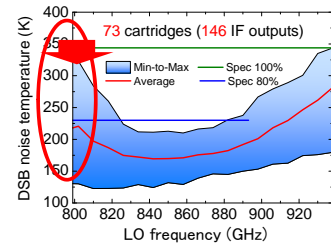
図: 応用物理学会誌より



# 1. SIS受信機のさらなる低雑音化 - バランスドミキサによるLO雑音の低減 -

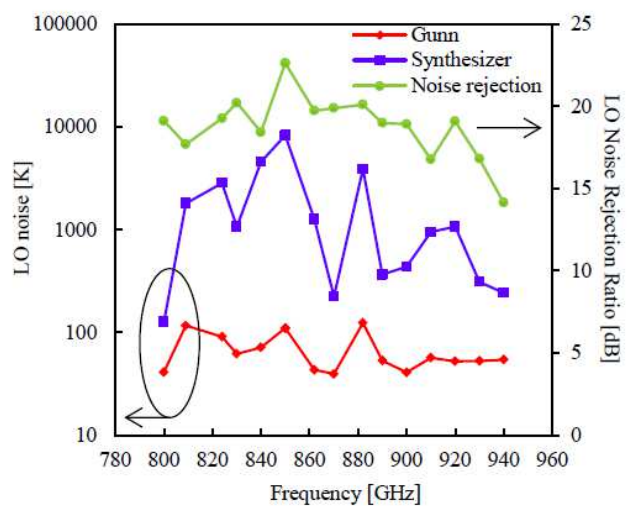
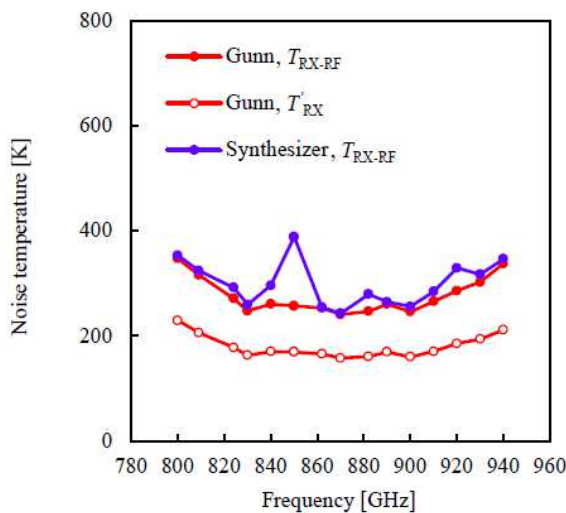
進捗

1. LO雑音の低減
2. テラヘルツ帯で問題となるLO電力不足を解消  
一方, RF90度ハイブリッドや2つのSISミキサ,  
IF180度ハイブリッドが必要になるため, 回路の小型化・簡素化が必須.



## Experiment of 790-950 GHz Balanced SIS mixer

- ・当周波数帯で, バランスドミキサの原理を実証. Band 10受信機で生じた課題であるLOノイズは改善の見通し
- ・課題は, 導波管損失の低減



# 2SB化への課題

-モジュール型の90度ハイブリッド+LOカプラは導波管損失約0.7dB(15%)/15mmが発生. ミキサブロックへ回路を集積するとともにLO導入系の工夫が必要

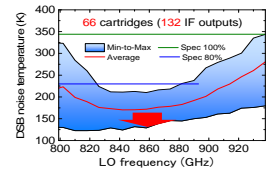
RF horn

20 mm

LO horn

0.04 dB/mm @WR1.2(152um\*304um)  
T. Kojima et al, (2010)

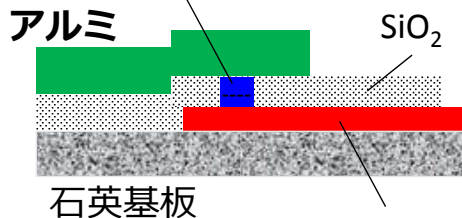
## 2. SISミキサのさらなる低雑音化 -同調回路内の損失低減-



### Band 10

現行素子構造 (約1.5dBの損失)  
Y. Uzawa et al./Physica C 494 (2013) 189-194

ニオブ(Nb)接合

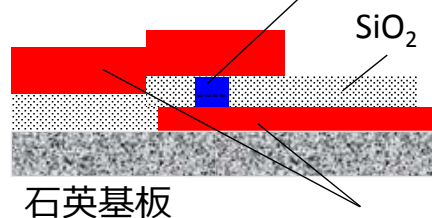


窒化ニオブチタン(NbTiN)

### アプローチ

素子構造の変更 (損失~0 dB化)

ニオブ(Nb)接合



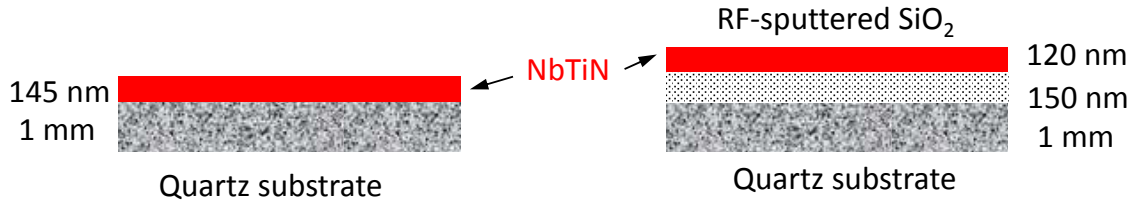
窒化ニオブチタン(NbTiN)

### 課題

- SiO<sub>2</sub>上のNbTiN膜の品質
- NbTiN/Nb//Nb/NbTiNの準粒子トラップによるHeating現象

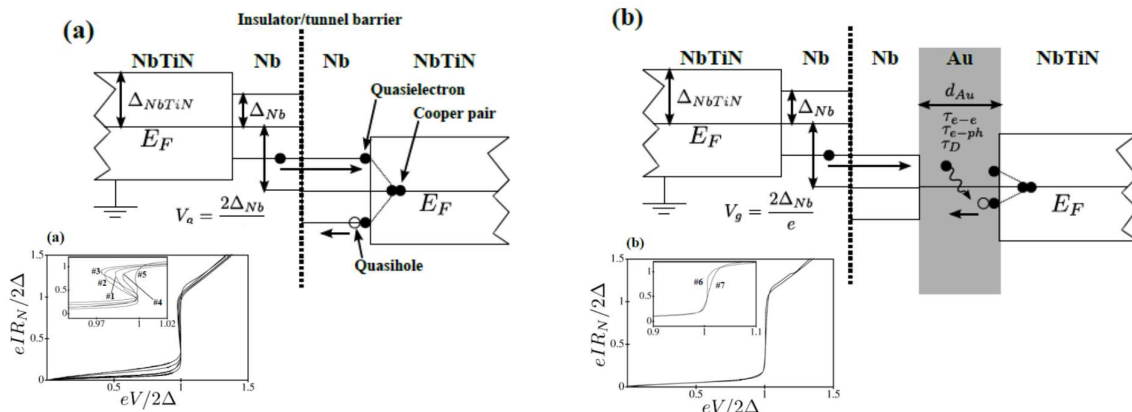
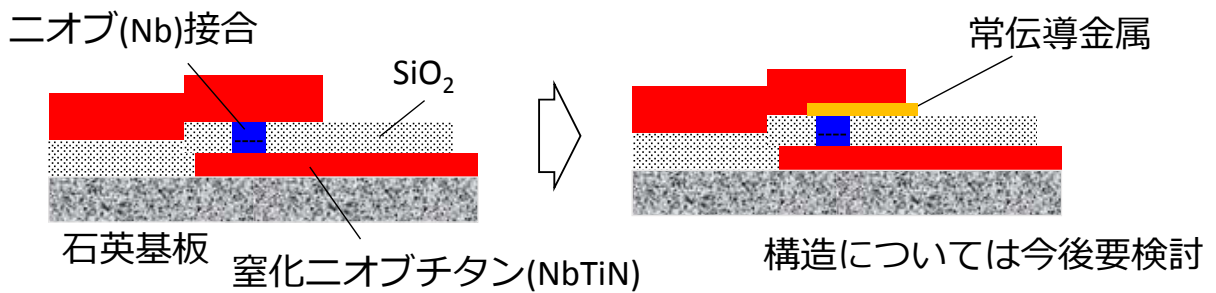
# SiO<sub>2</sub>上のNbTiN膜の品質

SiO<sub>2</sub>上のNbTiN膜もQuartz基板上と同等の特性が得られた。  
=> RF損失はギャップ周波数(1.2 THz)以下ではかなり小さいと考えられる。



Y. Uzawa et al, East Asia workshop (2014)

## NbTiN/Nb界面における準粒子トラップによるJunction Heating



# Band 11受信機の開発状況

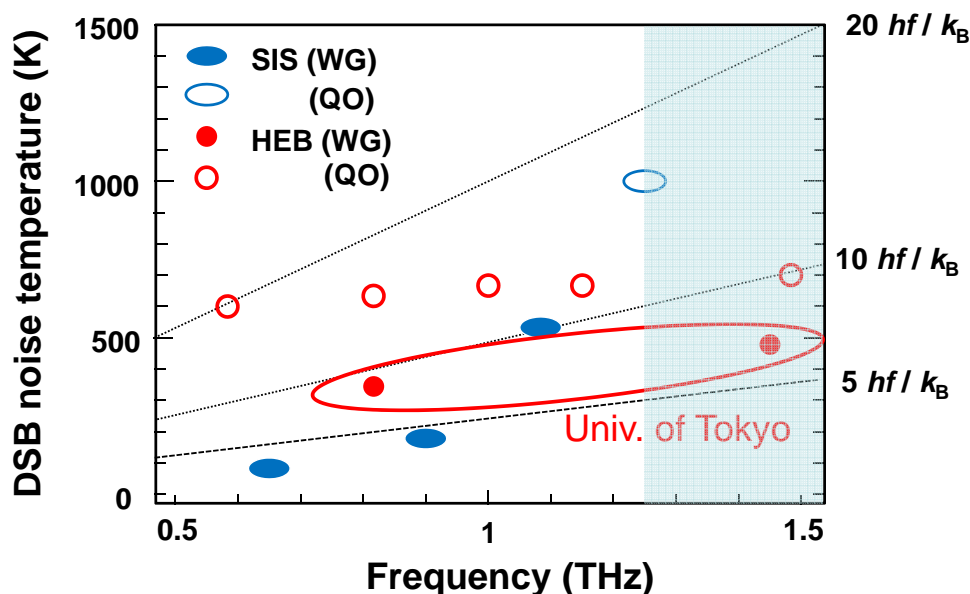
- 超伝導ミキサ > 1 THz
  - SISミキサ:
    - 高臨界電流密度接合を開発
  - HEBミキサ:
    - 1.2-1.5 THzヘテロダイン応答を確認
- 光学系: 評価系を構築
- 導波管: WR0.71 (90 um x 180 um)の損失

## Heterodyne Mixer Element (SIS vs HEB)

Frequency Band: 1.25-1.57 THz at present (Fractional BW: 22.7 %)

SISおよびHEBミキサの両面から開発を進めている。

- SIS: "Quantum limited" sensitivity < 1 THz
- HEB: State-of-the-art > 1 THz, almost frequency independent





# THz heterodyne Receiver Noise budget

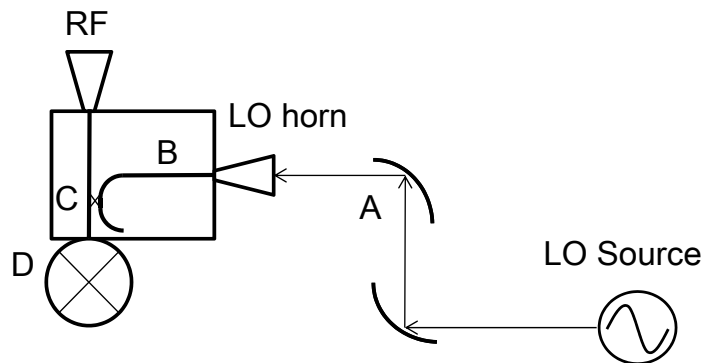
課題抽出

例えば, 受信機雑音を500 K以下に抑えるには,

	Operating Temp. [K]	SIS Receiver (single ended)			HEB Receiver			
		Gain [dB]	Input noise [K]	Noise at Rec. Input [K]	Gain [dB]	Input noise [K]	Noise at Rec. Input [K]	
Vacuum window	295	-0.2	13.9	13.9				
IR filter	110	-0.2	5.2	5.4				
IR filter	15	-0.2	0.7	0.8				
Cold optics	4	-0.2	0.2	0.2				
Waveguide	4	-0.3	0.3	0.3				
LO coupler	4	-0.5	0.4	5.6				10-dB couple for single-ended
Tuning circuit	4	-4.0	6.0	8.6				
Mixer	4	-5.0	101	362.3	-10.0	235.2	338.2	1.5 $h\nu k_B$ (SIS), 3.5 $h\nu k_B$ (HEB)
Isolator	4	-1.0	1.0	11.8			14.9	
1st Amplifier	4	31.0	< 5.0	71.6			90.5	
Room temp. IF	295	24	<1100	10			12.6	
		43.2		491	42.2		483	< 500 K

## Required LO Power

課題抽出

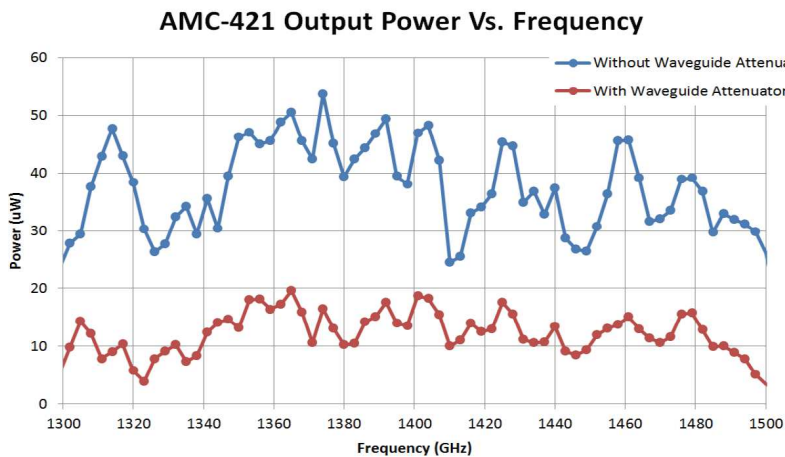


		Single	Balanced
Required LO power at SIS Junction		~0.5 uW	
A	horn to horn	-3.0 dB	-3.0 dB
B	Waveguide	-1.0 dB	-1.0 dB or more
C	Coupler	-10.0 dB	-3.0 dB
D	Tuning circuit (Normal metal)	-4.0 dB	-4.0 dB
Total		-18.0 dB	-11.0 dB
Required LO power at LO output		<b>31.5 uW</b>	6.3 uW



# Terahertz source by VDI

- Source to 1.3-1.5 THz  
Configuration Amp-X2-X2-X3-X3  
~200 mW of power at 155 GHz
- For wider BW operation, they used "Frequency Optimized Bias"



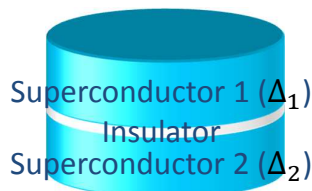
Need to be more compact .  
Frequency limit is because of lower frequency multiplier

<http://vadiodes.com/index.php/en/>

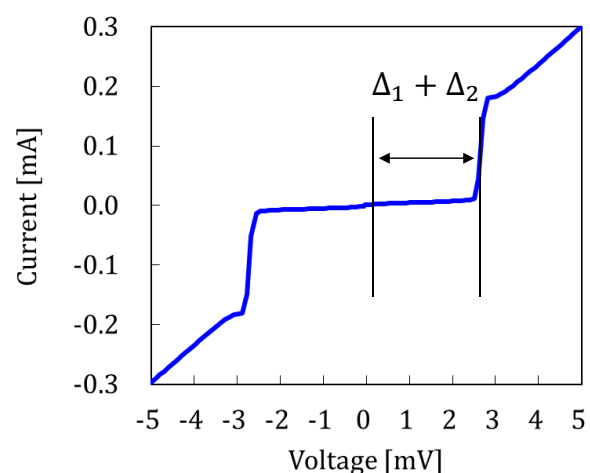
## Combination of SIS Junction Materials for 1.2-1.6 THz mixer

課題抽出

Requirement  $\Delta_1 + \Delta_2 > 3.3$  meV



NbNベースの接合を現在検討中



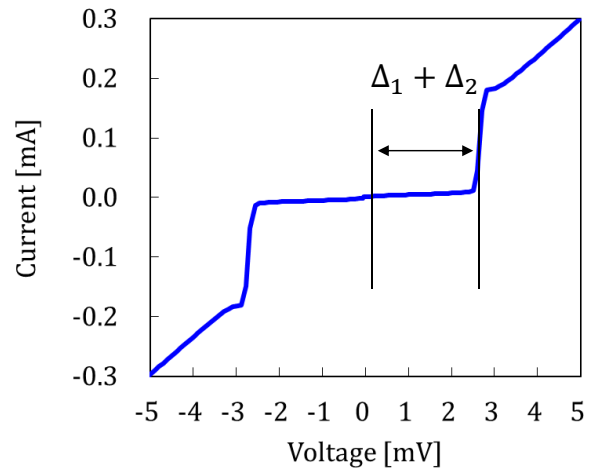
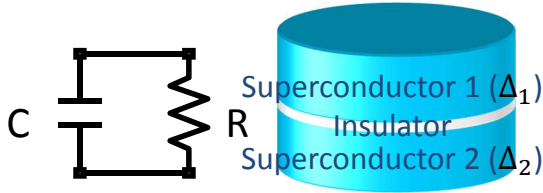
	Material	Energy $\Delta_1 + \Delta_2$	Theoretical limit	Practical limit (Expected as 80 % of theory)
✗	Nb//Nb	~2.8 meV	1.35 THz	~1.05 THz
△	Nb//Nb(Ti)N	~3.5 – 3.7 meV	1.7-1.8 THz	~1.35 THz
○	NbTiN//NbTiN	~4.5 meV	2.2 THz	~1.7 THz
○	NbN//NbN	~5.5 meV	2.65 THz	~2.1 THz



# Combination of SIS Junction Materials for 1.2-1.6 THz mixer

課題抽出

Requirement  $\Delta_1 + \Delta_2 > 3.3 \text{ meV}$



$$\frac{\Delta f}{f_{\text{center}}} \propto \frac{1}{\omega R_{NC}} \propto J_C = \frac{\pi}{4} \frac{V_g}{R_{NA}}$$

Band 10 (~20% 比帯域): 10-13 kA/cm<sup>2</sup> で達成

NbN 接合を用いた場合, 単純計算では

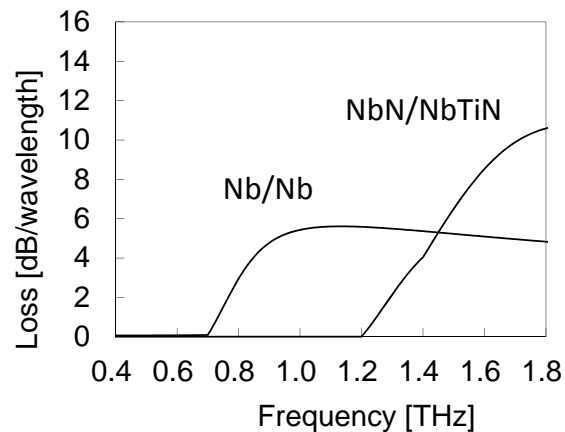
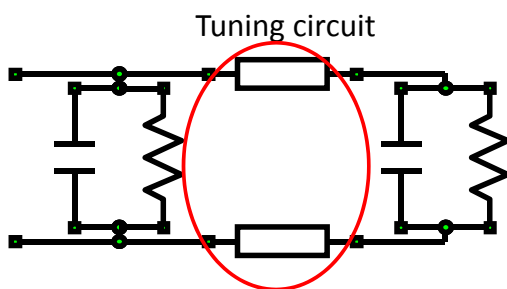
$$\frac{1400 \text{ GHz}}{870 \text{ GHz}} \frac{V_{g,\text{NbN}}}{V_{g,\text{Nb}}} \cong 3.2 \text{ より, } J_C > 30 \text{ kA/cm}^2 \text{ が必要}$$

# Tuning circuit material

課題抽出

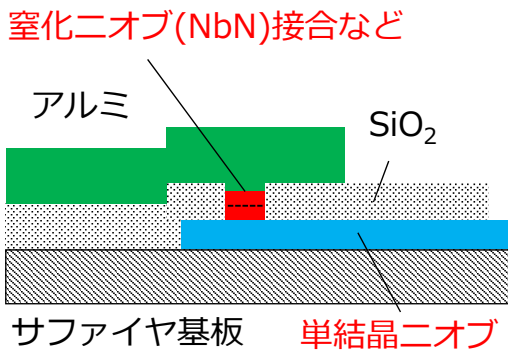
At present, no superconducting material is available for B11 tuning circuit.

	Ground plane (270 nm thick)	Dielectric layer (300 nm thick)	Wiring layer (500 nm thick)	Highest application Frequency [THz]
M-I	Nb-a	SiO <sub>2</sub> (ε <sub>r</sub> = 4.4)	Nb-a	0.7
M-II	NbN	MgO (ε <sub>r</sub> = 9.8)	NbTiN	1.2

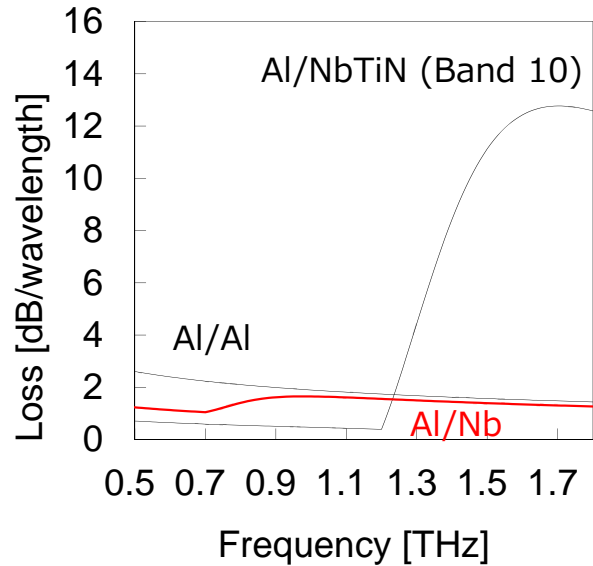


グランドプレーンに単結晶ニオブを用い、極めて高い導電率をもつ常伝導金属として低損失化を図る。  
 10 K で抵抗率  $\rho_{10K} \sim 0.15 \text{ uOhm cm}$  以下をすでに確認 (アルミの数倍良)

## バンド 11ミキサ (目標)



A. Karpov, et al IEEE, (2007)



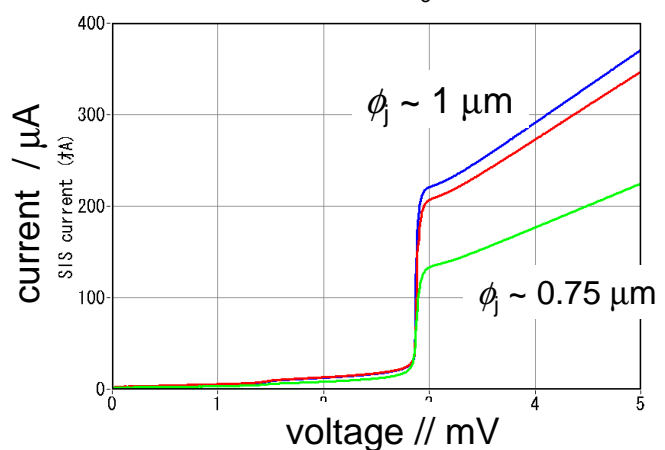
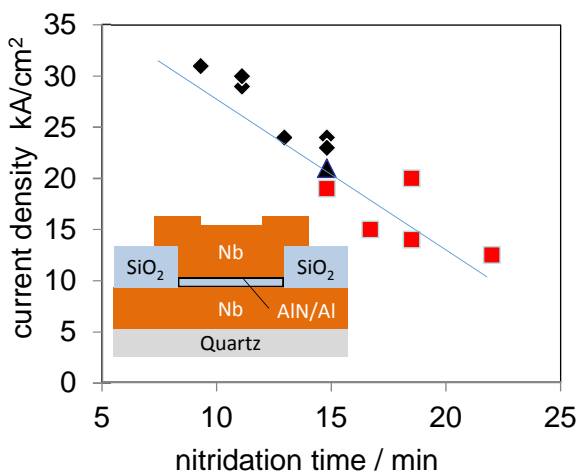
## 高臨界電流密度 Nb/AlN<sub>x</sub>/Nb 接合

ALMAで要求される帯域約20%程度を得るには  $J_c > 30 \text{ kA/cm}^2$  が必要  
 Nb/AlO<sub>x</sub>/Nb から Nb/AlN<sub>x</sub>/Nb 接合へ.

- reasonably good reproducibility

DC characteristic

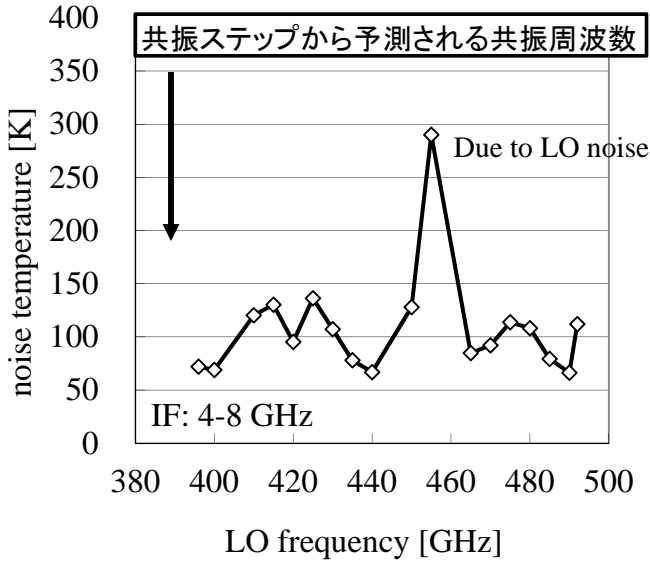
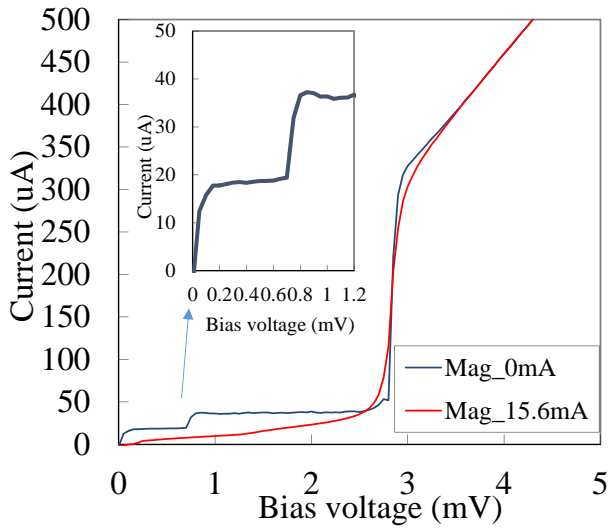
- gap voltage 2.80-2.85 mV
- quality factor  $\sim 12$   $j_c \sim 24 \text{ kA/cm}^2$



# DSB Receiver noise temperature at Band 8

進捗

-AlNバリアを用いた $J_c \sim 13 \text{ kA/cm}^2$ の試作SISミキサ測定結果  
 -今後SISミキサについては準光学型の回路を用いてテラヘルツ実証実験を予定

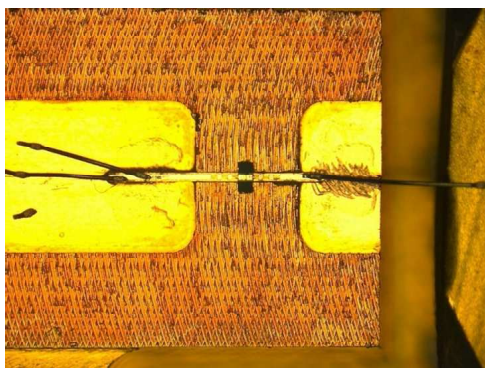


# 1.5 THz HEBミキサ-アンプモジュール

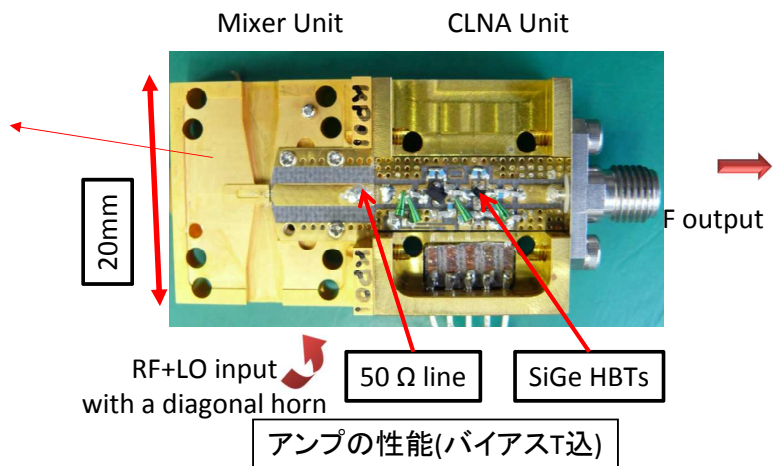
進捗

- RF+LO用のダイアゴナルホーンがミキサブロックと一体化
- IF広帯域化の妨げとなっているアイソレータを取り除き、ミキサとアンプを直結。

東京大学で作製されたHEBミキサチップ



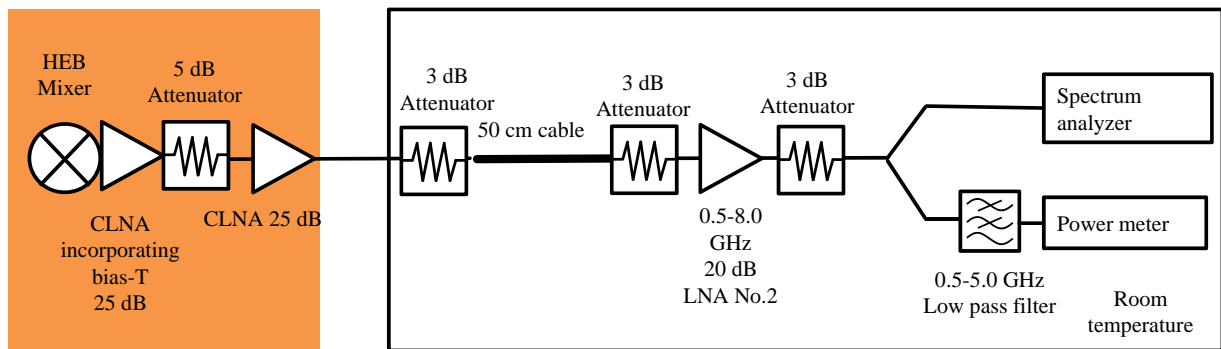
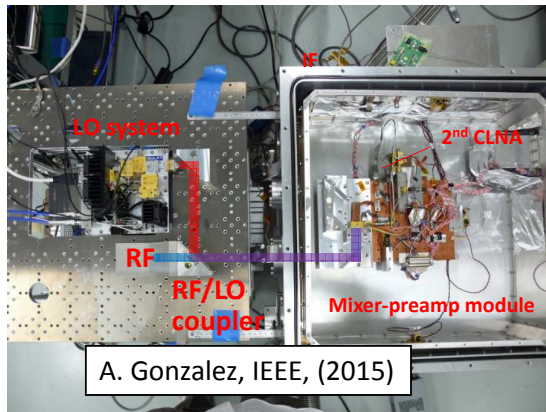
- Waveguide size  $90 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m}$
- Chip slot:  $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$
- Chip size:  $50 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m} \times 1500 \mu\text{m}$



# 1.5 THz ミキサ評価系

進捗

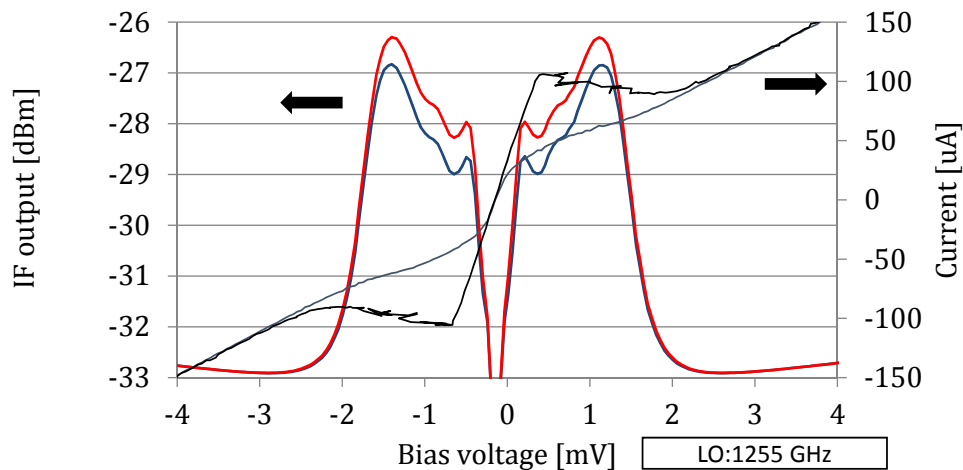
常温IF 0.5-8 GHz, アンプはすべて自作.



## THz HEB mixerのヘテロダイン応答特性

進捗

- ・従来1.0-1.2 GHzを0.5-7 GHzのテラヘルツヘテロダイン応答を確認
- ・受信機雑音温度: 1000-2000 K
- ・LO周波数に対して比較的フラットな出力特性



Paper in preparation



# Summary

- Band 10受信機の性能向上に向けた課題
  - SIS受信機の低雑音化
  - 2SB化の課題
- Band 11(1.2-1.5 THz)受信機開発の進捗と課題
  - SISミキサ:  
High gap 材料, 同調回路の損失低減, 臨界電流密度が課題.  
今後準光学ミキサを用いて動作実験予定
  - HEBミキサ:ヘテロダイン応答(IF:0.5-7GHzの応答)を確認
  - ビーム測定系の構築と評価
  - WR0.71導波管の損失評価