



# 銅酸化物高温超伝導体で THz波の連続発振に成功

門脇 和男  
山口 勇人, 川又 晃平, 山本 卓, 南 英俊, 掛谷 一弘

筑波大学大学院数理物質科学研究科物性・分子工学専攻  
[kadowaki@ims.tsukuba.ac.jp](mailto:kadowaki@ims.tsukuba.ac.jp), <http://www.kadowaki.ims.tsukuba.ac.jp>

and

L. Ozyuzer, A. E. Koshelev, C. Kurter, N. Dopalsami, Q. Li,  
K. E. Gray, W. K. Kwok and U. Welp

Materials Science, Division, Argonne National Laboratory  
Argonne, IL60439, USA

平成19年(2007年)11月20日、13:30～、筑波大学本部棟8階経営協議会室

1



## 初めに

- ・ 超伝導の特徴
  - 電気抵抗がゼロである
  - マイスナー効果(Meissner effect)がある(完全反磁性)
  - ジョセフソン効果(Josephson effect)がある
- ・ ジョセフソン効果と固有ジョセフソン接合
- ・ ジョセフソンプラズマ吸収と励起
- ・ THz発振と検出(主に実験結果)
- ・ 発振機構は?(ジョセフソンレーザー?)
- ・ まとめ

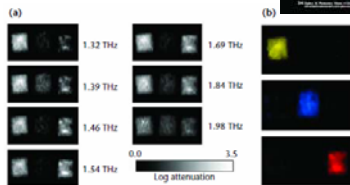
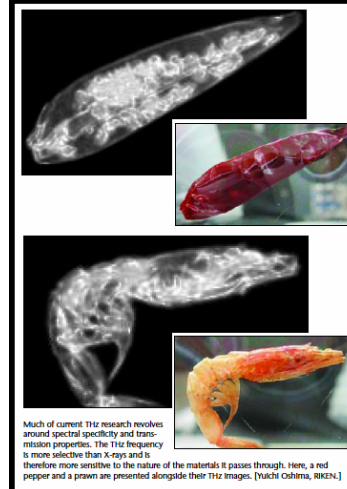
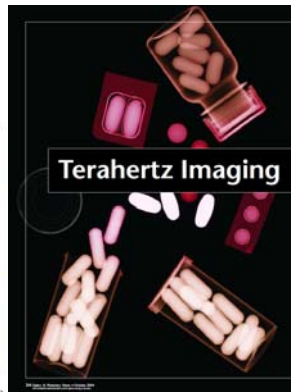
2



## 実用例

- *imaging*

JSPS-ESF CTC program  
Nanoscience and Engineering in  
Superconductivity



After *K. Kawase*,  
*Optics and Photonics News*, Oct. 2004, p.38

3

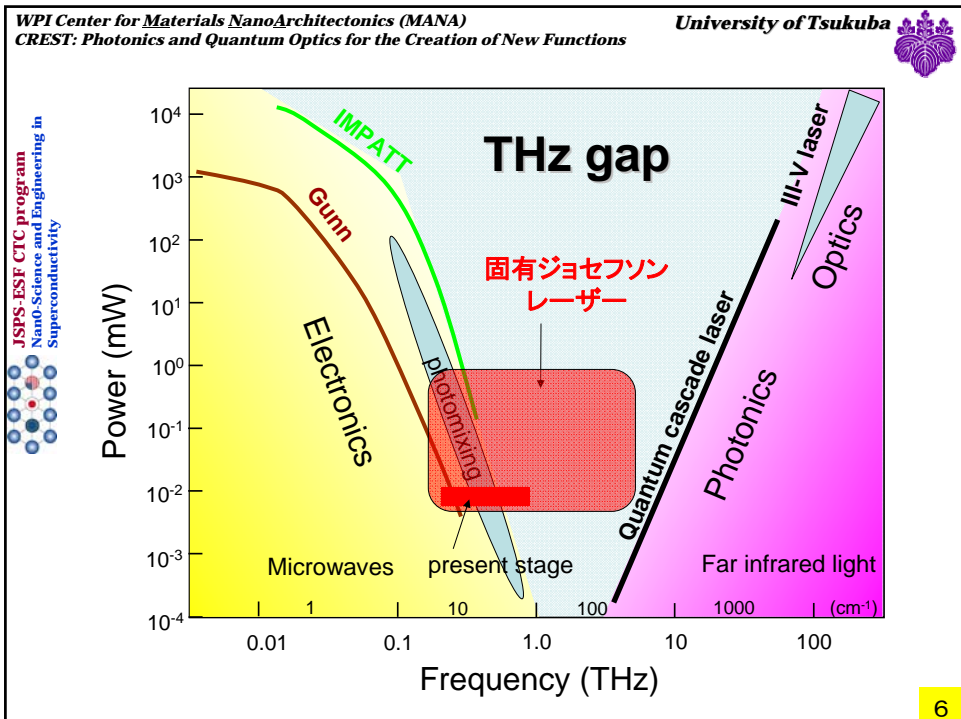
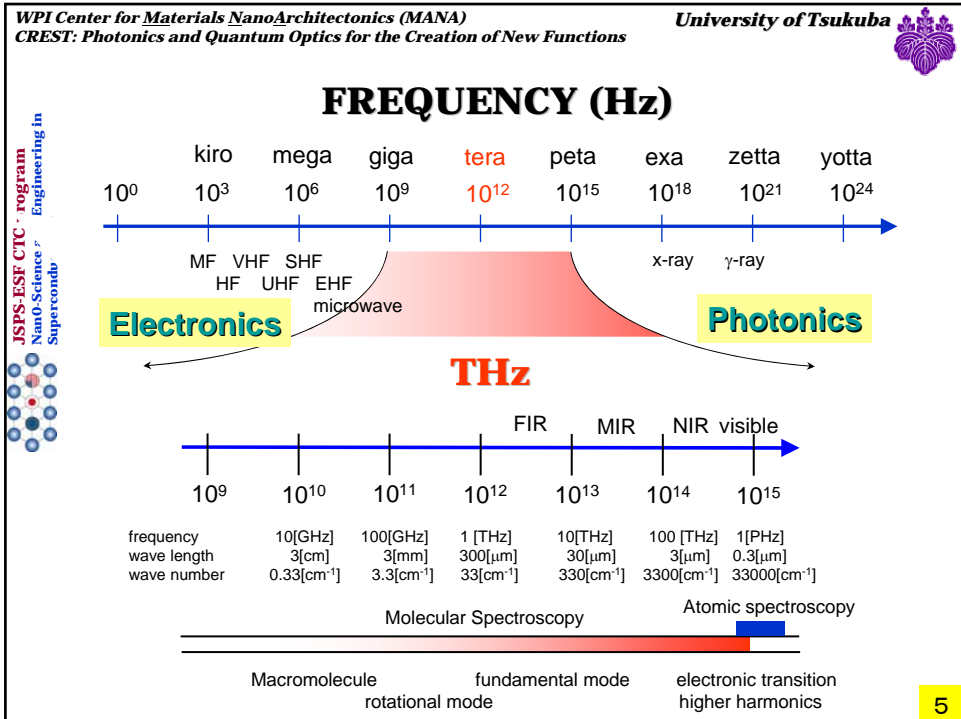


## THz波の活躍する分野

JSPS-ESF CTC program  
Nanoscience and Engineering in  
Superconductivity

- 原子・分子の分光、有機物、薬品、タンパク質、DNA、生体物質などの同定(物質の同定)
- 非破壊検査、透視
- セキュリティ、防衛
- 医療、診断、治療(比較: MRI、X線など)
- 通信、天文学、宇宙
- 環境モニター、食品検査
- その他

4





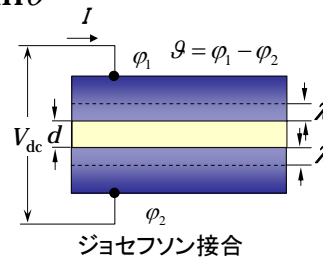
# ジョセフソン効果

- 直流ジョセフソン効果:  $I = I_C \sin \theta$
- 交流ジョセフソン効果

$$\hbar \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial t} (= \hbar \omega = h \nu) = 2eV$$

$$\nu = \frac{V_{dc}}{\phi_0} = 0.483 \text{ THz/mV}$$

$$\phi_0 (= h / 2e) = 2.067833636 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$



ジョセフソン接合

### Theory

B. D. Josephson, Phys. Lett. **1**, 251 (1962).

### Experiments (Indirect)

S. Shapiro, PRL **11**, 80 (1963), S. Shapiro, et al., Rev. Mod. Phys. **36**, 223 (1964), I. Giaever, PRL **14**, 904 (1965).

### Direct measurements

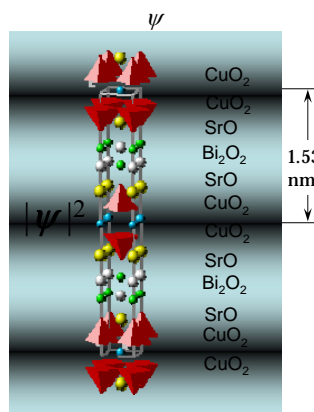
I. K. Yanson, V. M. Svistunov and I. M. Dmitrenko, ZhETF, **48**, 976 (1965), D. N. Langenberg, et al., PRL **15**, 294 (1965).

7

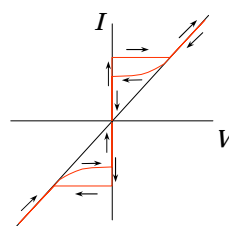


# 固有ジョセフソン効果: $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

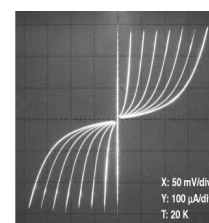
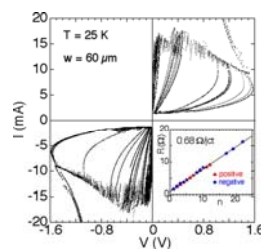
Bi2212の単位胞  
Bi-2212の秩序パラメーター



本質的に不均一な超伝導体



通常の超伝導体におけるジョセフソン接合のI-V特性



固有ジョセフソン接合におけるI-V特性

### 多層効果

↓  
1 μm で約 N~760枚

8

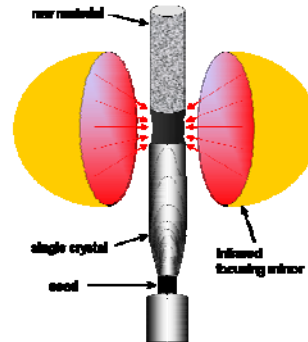


# 単結晶 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$

固有ジョセフソン接合を高密度に内包している系

大きな異方性パラメーター  $\gamma$

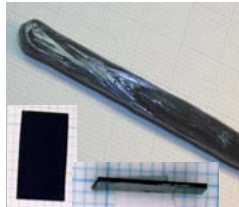
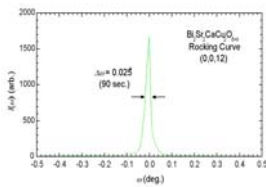
不足ドーピング  $\gamma \sim 1000$   $\Rightarrow$  過剰ドーピング  $\gamma \sim 80$



High Quality Large Single Crystal Growth  
 Sophisticated ILSTSFSZ Method

単結晶の例

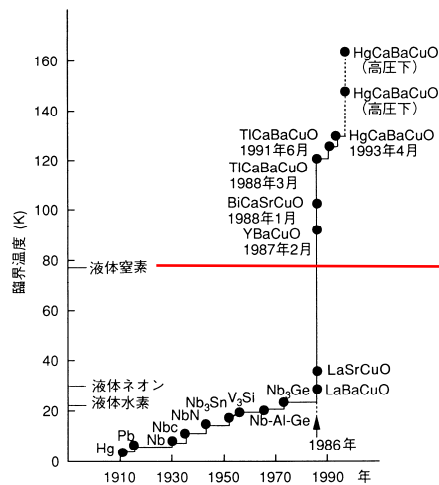
ロッキングカーブ



# 超伝導の発展の歴史



Heの液化  
 1908  
 超伝導の発見  
 1911  
 ノーベル物理学賞  
 1913



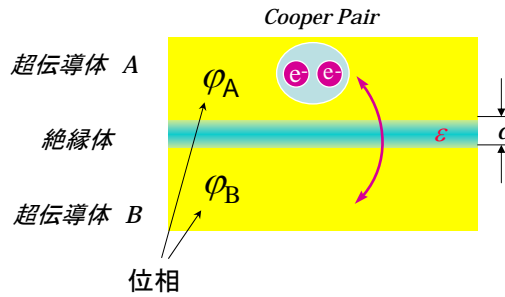


# ジョセフソンプラズマ

$$\hbar\omega_p = \sqrt{8\pi ed\hbar j_c / \epsilon}$$

$$\ll 2\Delta \approx 60 \text{ meV}$$

$$f_p = \omega_p / 2\pi \approx 100 \text{ Gc/s}$$



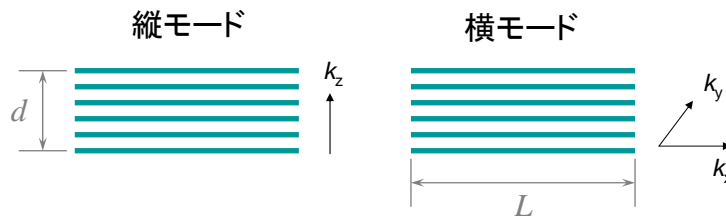
P. W. Anderson, *Lectures on The Many-Body Problem* (vol. II), edited by E. R. Caianiello, Academic press, 1964, p113.



ジョセフソン効果とは  
 絶縁層をペアがトンネルする現象



# 縦モードと横モード



$$\omega_L = \omega_p \sqrt{1 + \epsilon\mu^2 k_z^2}$$

$$\epsilon\mu^2 k_z^2 \ll 1$$

no  $d$  dependence

$$\omega_T = \omega_p \sqrt{1 + \lambda_c^2 k_{x,y}^2}$$

$$\lambda_c^2 k_{x,y}^2 \approx 1$$

$$\frac{B_n}{B_p} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\epsilon} \left[ \frac{(2n-1)\pi}{L(\omega/c)} \right]^2}$$

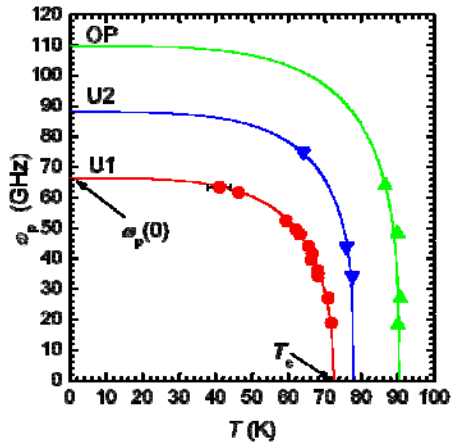
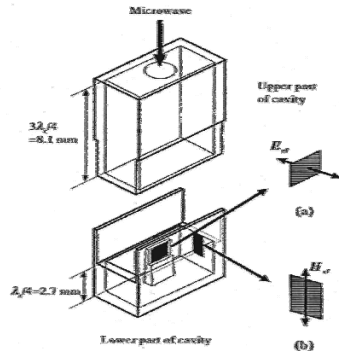


# ジョセフソンプラズマ共鳴

Microwaves

9 GHz~90 GHz

JSPS-ESF CTC program  
Nano-Science and Engineering in  
Superconductivity

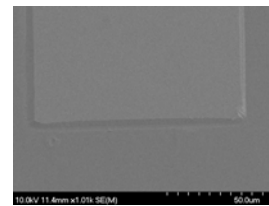
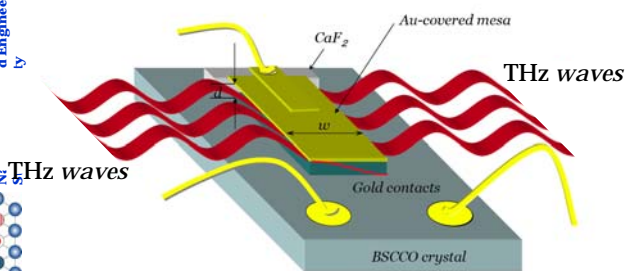


13



# メサ構造とTHzの発振

JSPS-ESF CTC program  
Nano-Science and Engineering in  
Superconductivity



メサ構造の詳細

メサ構造のSEM像

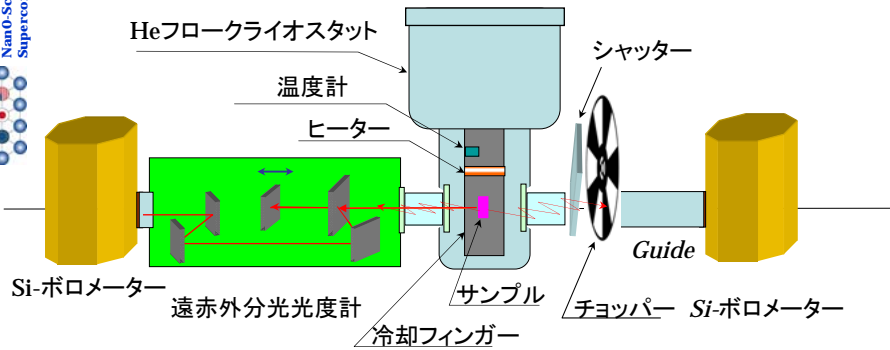
L (μm)	w (μm)	d (μm)	2λ (μm)	f <sub>cal</sub> (GHz)	f <sub>obs</sub> (GHz)	2f <sub>obs</sub> (GHz)
300	100	1.0	200	358	357	—
300	80	1.0	160	447	480	990
300	60	1.0	120	597	560	—

14



# 実験のセットアップ

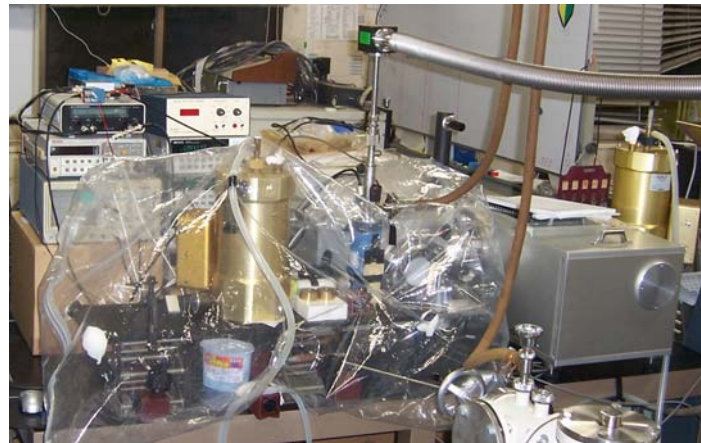
双方向で同時測定



15



# 実験装置の写真



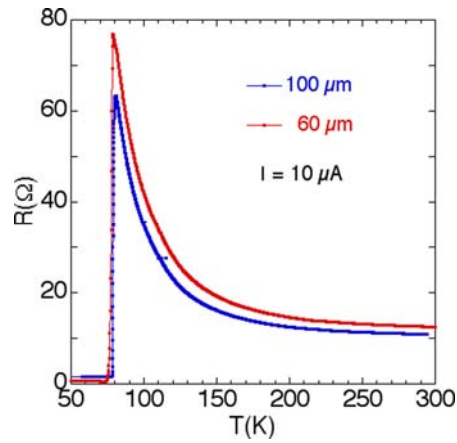
16



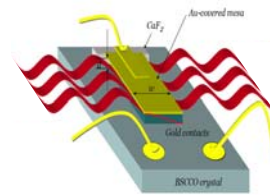


## メサの電気抵抗の温度依存性

JSPS-ESF CTC program  
 Nano-Science and Engineering in  
 Superconductivity



- Slightly underdoped
- $T_c = 76, 80 \text{ K}$
- $\Delta T_c = 2 \text{ K}$

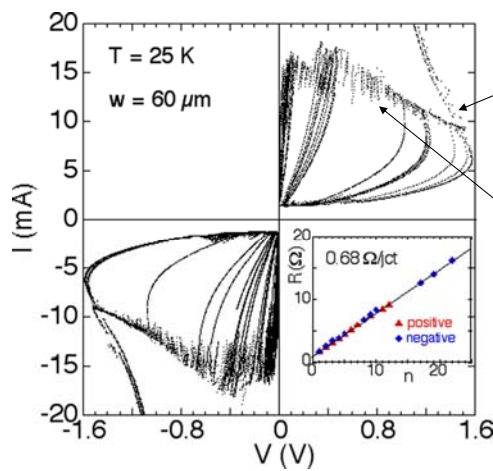


17



## メサのI-V特性

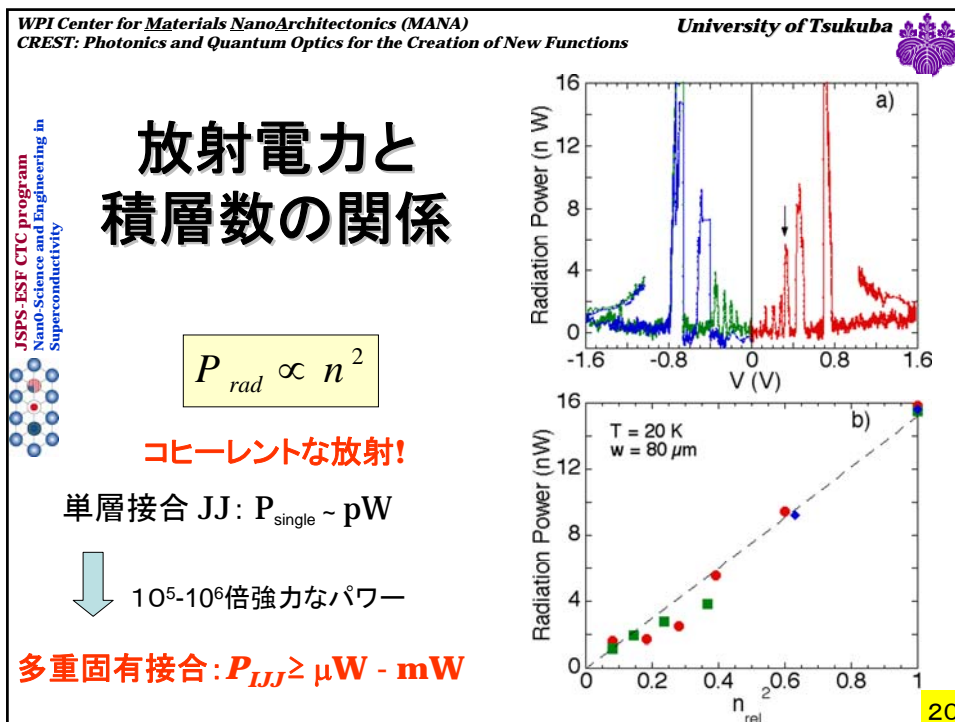
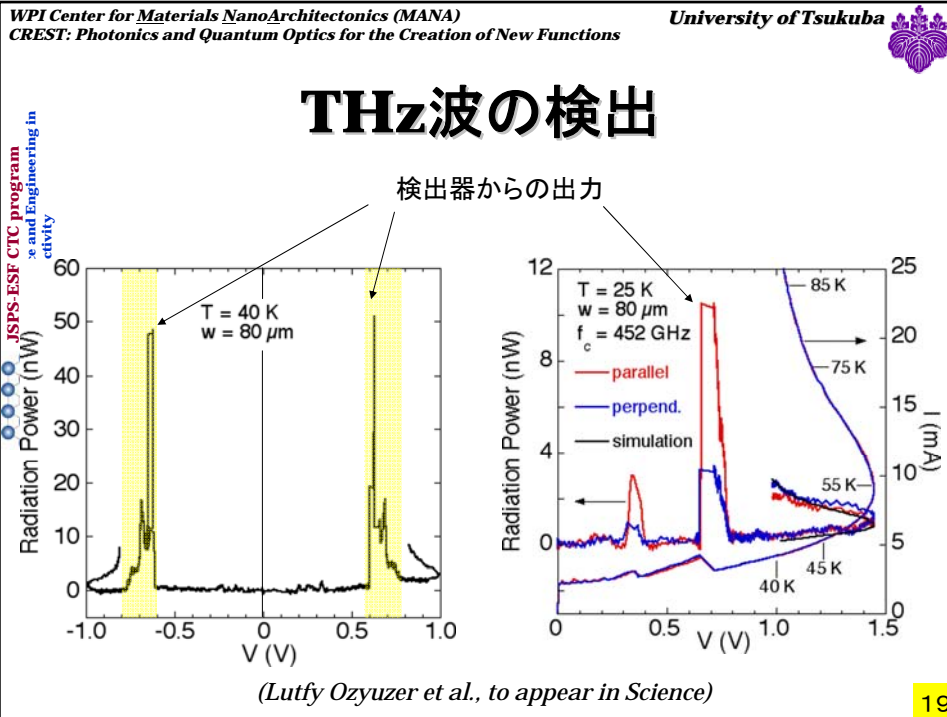
JSPS-ESF CTC program  
 Nano-Science and Engineering in  
 Superconductivity



発熱効果

固有ジョセフソン接合  
 特有の多重ランチ  
 構造  
 667層/1μm

18





## 過去の研究

- K. Yanson, V. M. Svistunov and I. M. Dmitrenko, *Zh. Eksperim. i Teor. Fiz.* **48**, 976 (1965),  
 D. N. Langenberg, *et al.*, *PRL* **15**, 294 (1965).  
 A. H. Dayem and C. C. Crimes, *Appl. Phys. Lett.* **9** (1966) 47.  
 J. E. Zimmerman, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **9** (1966) 353.  
 K. Nagatsuma, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **54** (1983) 3302.  
 K. Nagatsuma, *et al.*, *J. Appl. Phys.* **56** (1984) 3284.  
 Kleiner, *et al.*, *PRL* **68** (1992) 2394.  
 Ustinov, *et al.*, *PRL* **77** (1996) 3617.  
 P. Barbara, *et al.*, *PRL* **82** (1999) 1963. ← アレイ  
 Iguchi, *et al.*, *Phys. Rev.* **B61** (2000) 689.  
 K. Kadowaki, *et al.*, *Physica C* **437-438** (2006) 111.  
 I. E. Batosv, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **88** (2006) 262504.  
 M. -H. Bae, H. -J. Lee and J. -H. Choi, *PRL* **98** (2007) 027002.

単一接合

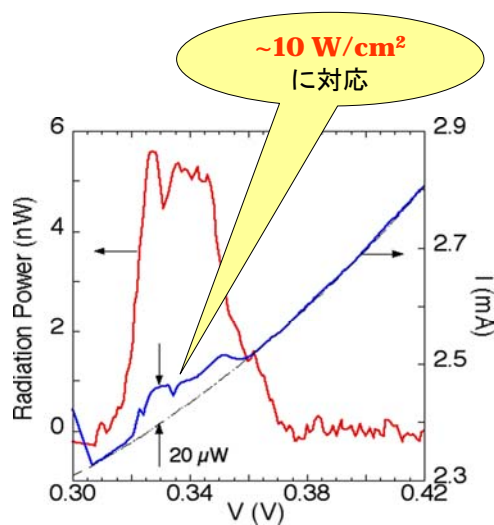


多重固有接合

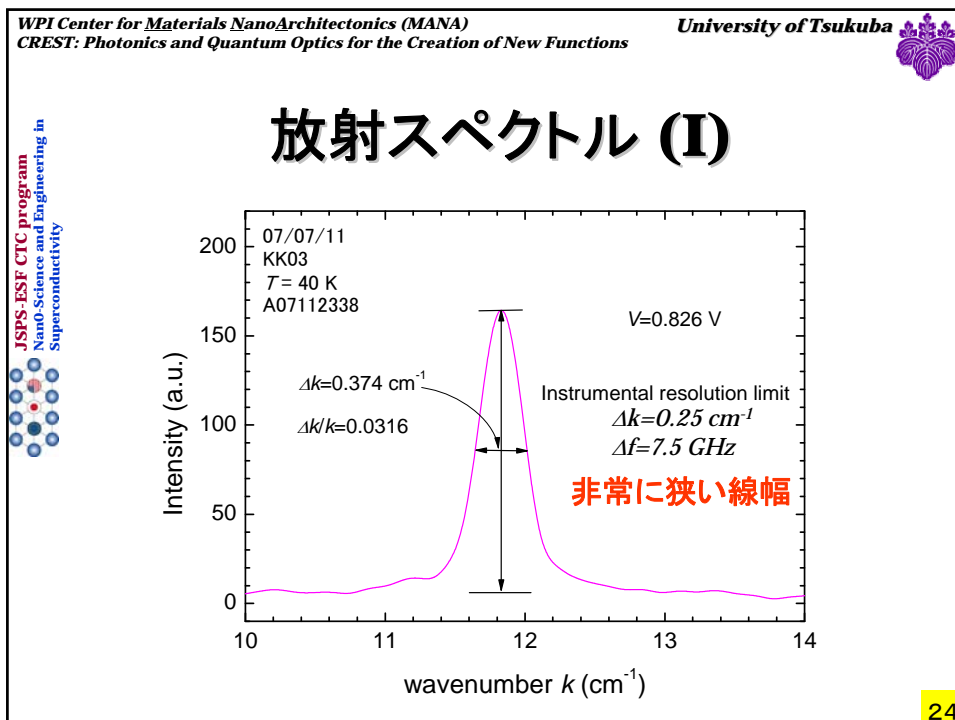
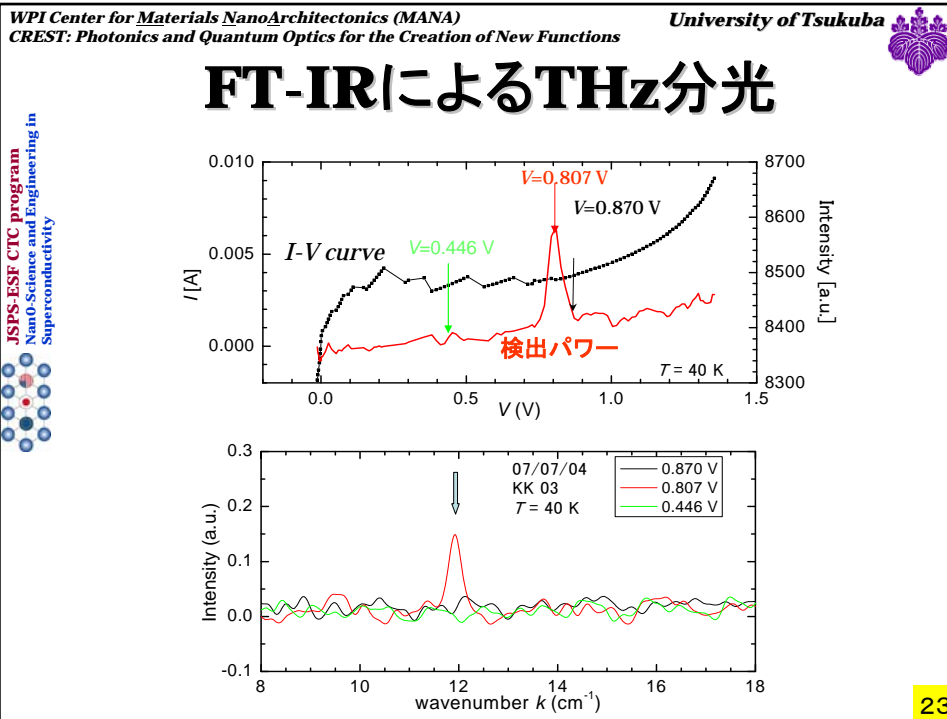
21



## 発振電力と供給電力の関係

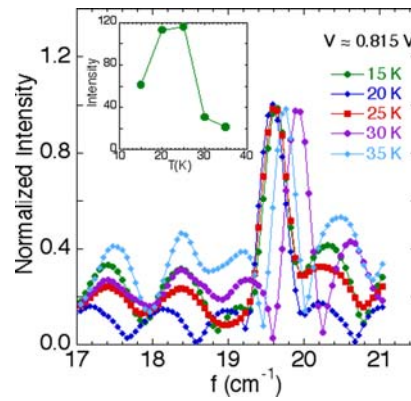
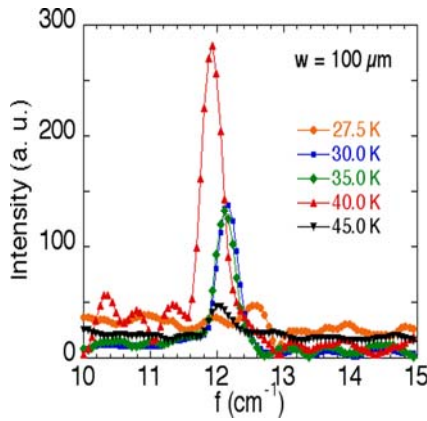


22





## 温度依存性



Emission occurs only in a limited temperature region !

25



## 周波数と試料の幅の関係

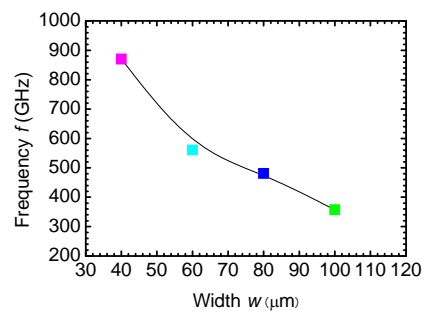
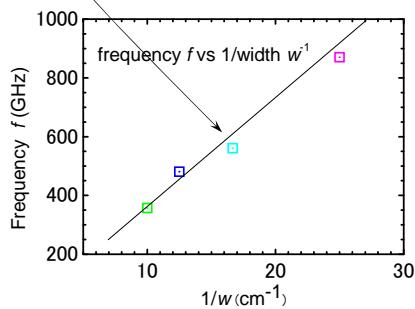
$$f = \frac{c_0}{2nw} = \frac{c_0}{n\lambda}$$

定在波



サンプルが共振器の役目

屈折率  $n=4.19$   
誘電率  $\epsilon=4.19^2=17.53$

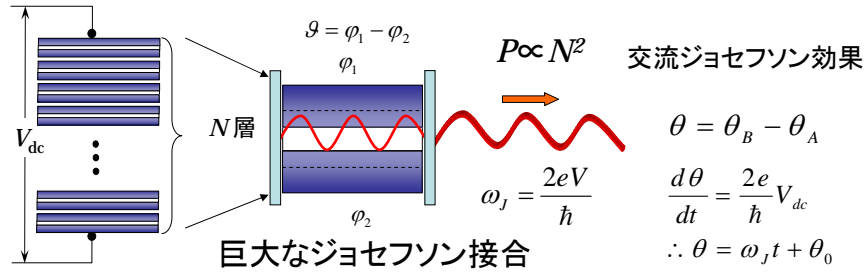


26



# 発振機構

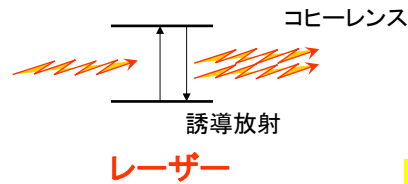
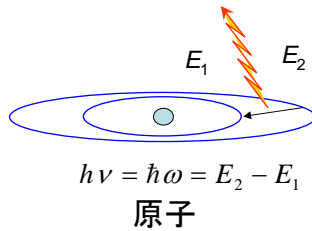
JSPS-ESF CTC program  
 Nano-Science and Engineering in  
 Superconductivity



多重固有接合

巨大なジョセフソン接合

$$f = \frac{2eV_{dc}}{h} = \frac{V_{dc}}{\phi_0}$$

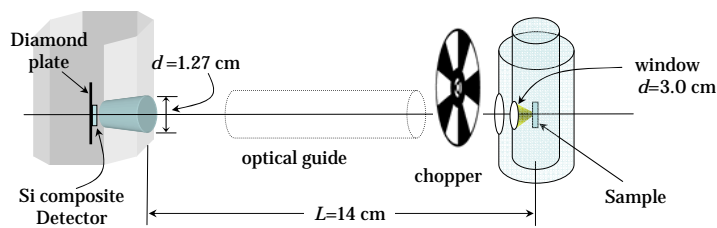


27



# 電力の概算

JSPS-ESF CTC program  
 Nano-Science and Engineering in  
 Superconductivity



$$P_{sample} \leq e_{eff} P_{obs}$$

$$P_{obs} = S^{-1} \times V_{out} = \frac{10mV}{2.73 \times 10^5} = 36.6nW$$

$$e_{eff}^{max} = \frac{4\pi(14)^2}{\pi \times (0.635)^2} \times 2 = 3.89 \times 10^3$$

$$e_{eff}^{min} = \frac{4\pi \times (1.0)^2}{\pi \times (1.5)^2} \times 2 = 3.6$$

$$0.32 \mu W < P_{sample} < 0.14 mW$$

28



## まとめ

1.  $f_{obs} = \frac{c_0}{2nw}$   $c_0$ : 光速  
 $n$ : 屈折率  $=1/\sqrt{\epsilon} = 4.19$   
 $w$ : 試料の幅

**共鳴モード**  $\lambda = 2w, w, w/2, \dots$

2.  $f_{obs} = \frac{2e V_{obs}}{h N}$   
 $N = \frac{h V_{obs}}{2e f_{obs}} = \frac{483.5940}{0.001} \times \frac{0.791523}{568.1617} = 673 (= 1.029 \mu m)$

**交流ジョセフソン効果が  
個々のジョセフソン接合で動作している！**

3.  $P_{obs} \propto N^2$

**全接合が同一位相で振動！**

***N intrinsic junctions  
work together  
as if they are  
a big single junction.***

***Coherent resonant emission  
occurs when***

$$V_{obs} = 88.7 \times \frac{N}{w} \quad (\text{mV})$$

***is satisfied. ([w]=[μm])***

**交流ジョセフソンレーザー**