

Hf-STJ開発

筑波大学 数理物質系 物理学域

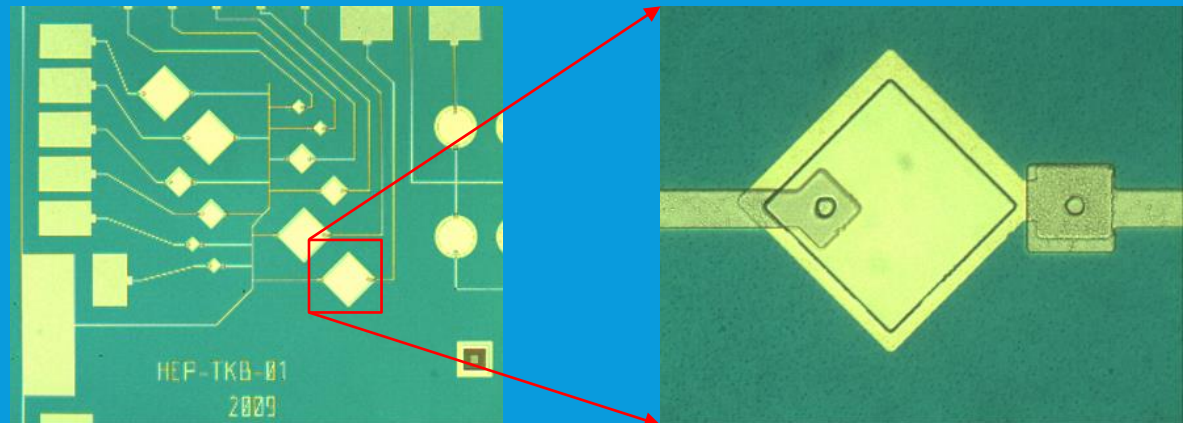
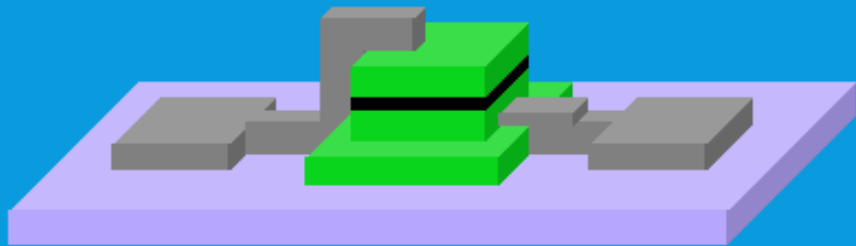
武政 健一

第二回CiRfSEワークショップ

2016/1/19

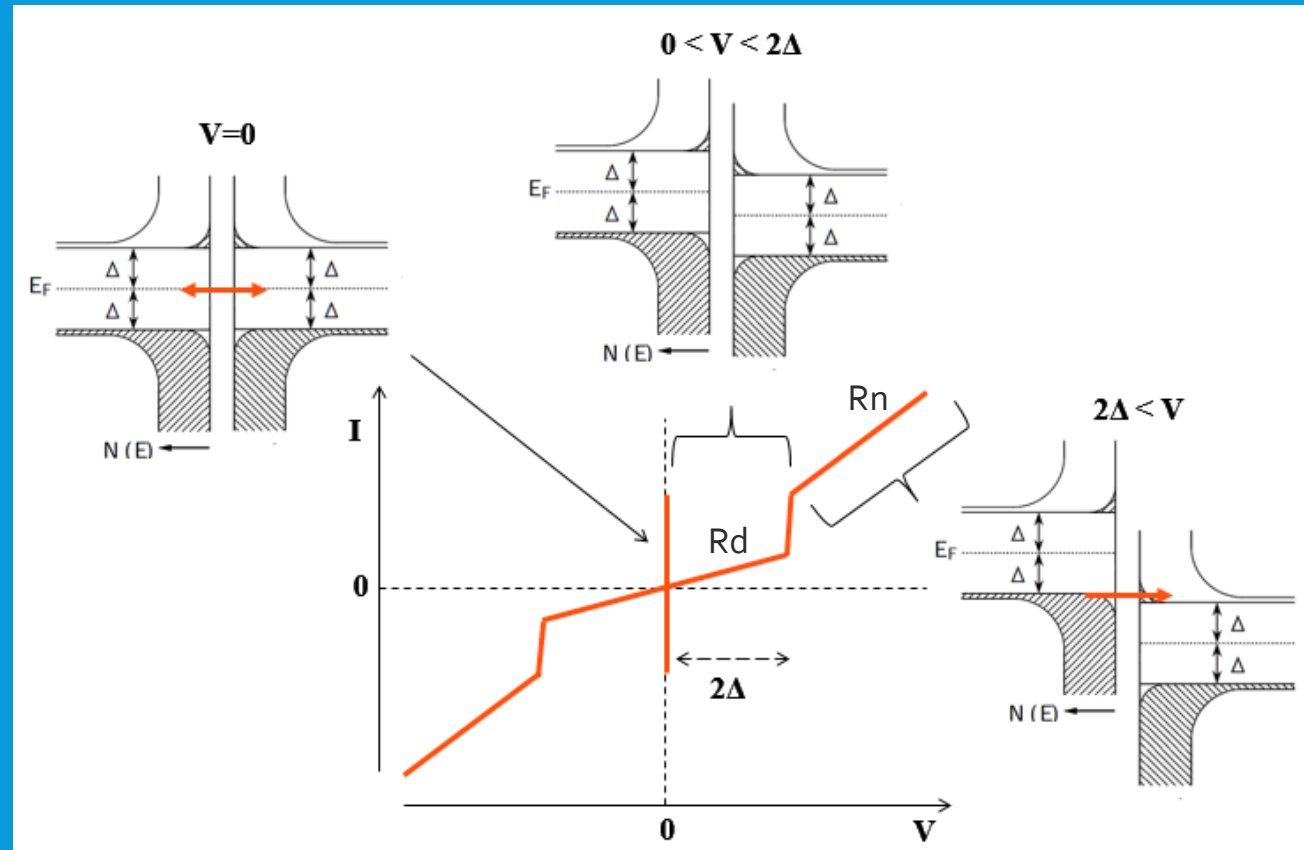
Superconducting Tunnel Junction (STJ)

- ・ 超伝導体を用いた光検出器
- ・ キャリア生成に必要なエネルギーが小さいため、エネルギー分解能に優れる
- ・ 構造
 - ・ 超伝導体/絶縁膜/超伝導体という構造のジョセフソン素子
 - ・ 大きさ：縦横 数 $10\ \mu\text{m}$ 角 \times 高さ 数 $100\ \text{nm}$
 - ・ 絶縁膜は厚さ数 nm 程度



STJのIV特性

- $V=0$
 - ジョセフソン電流が流れる。
- $0 < V < 2\Delta$
 - 理想的には電流の流れない領域。
 - 検出に用いる領域。
- $2\Delta < V$
 - 電圧に比例した電流が流れる領域
- 光検出するときは、
 - 磁場をかけてジョセフソン電流を抑制
 - 超伝導転移温度の1/10以下に冷却し、熱ノイズを抑制する

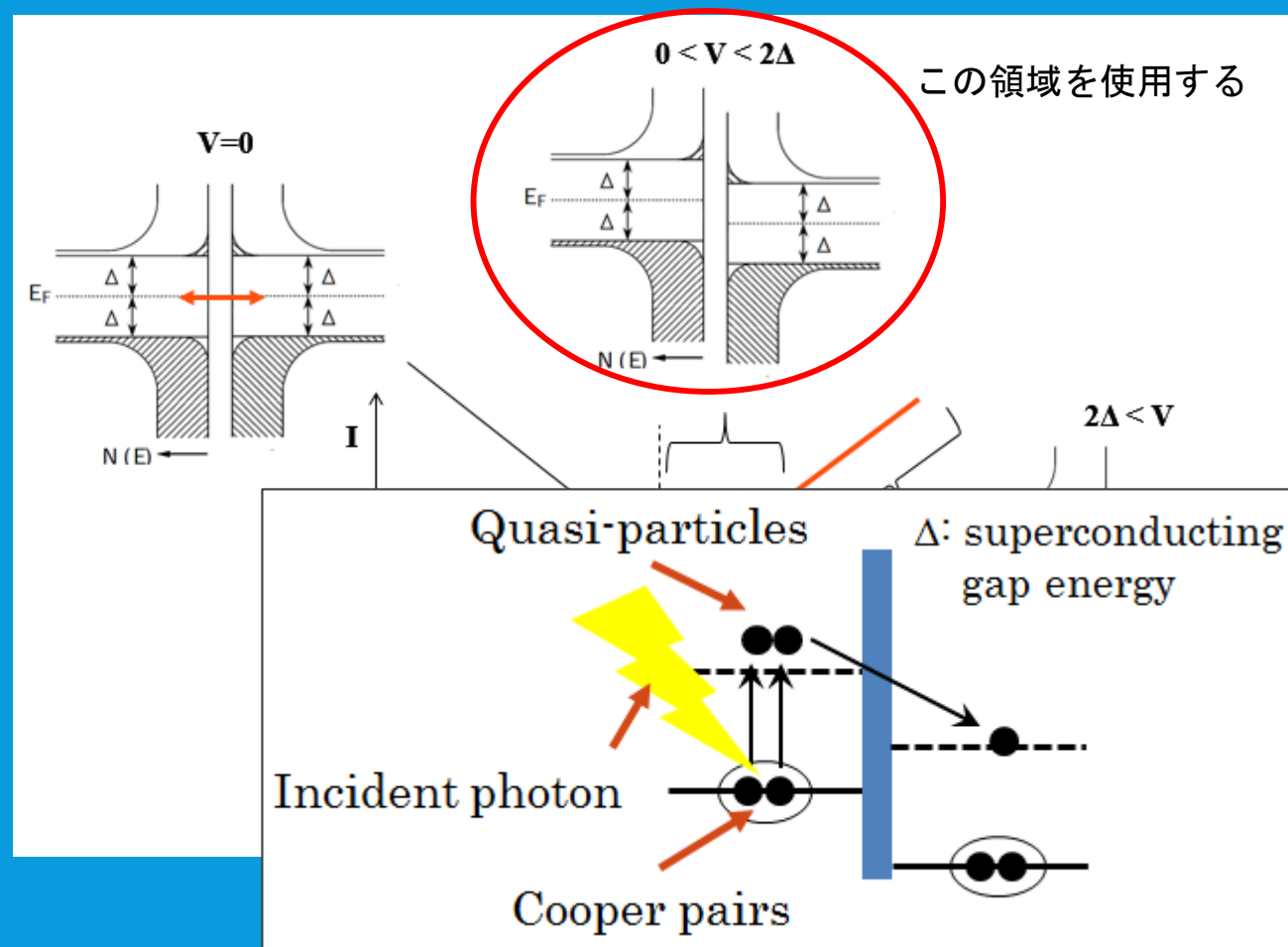


Δ : 超伝導体のエネルギーバンドギャップ

STJの動作原理

動作原理

- ・ 電圧 $0 < V < 2\Delta$ をかける
- ・ 光が入射 → 光電効果で吸収
- ・ クーパー対にエネルギー付与され、乖離が起こり準粒子が生成される。
- ・ 準粒子が他のクーパー対の乖離させたり、フォノンを生成する。
- ・ 準粒子が絶縁膜をトンネルしてもう一方の超伝導体へ → 電流
- ・ 準粒子の数は入射した光のエネルギーによって決まる
→ 準粒子の数 = 電流を測れば光のエネルギーが分かる



STJのエネルギー分解能

- STJのエネルギー分解能

$$\sigma_E = \sqrt{(1.7\Delta)FE}$$

Δ : energy band gap
F: fano factor
E: Photon energy

- Δ が小さいほど準粒子の生成数が大きくなり、エネルギー分解能が良い。

Material	Tc(K)	Δ (meV)
Si	—	1200
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.13	0.021

Tc : Superconducting critical temperature
Need $\sim 1/10T_c$ for practical operation



- $N_{q.p.} = 25\text{meV}/1.7\Delta = 735$
- 2% energy resolution is achievable if fano factor < 0.3

- Hf-STJはニュートリノ崩壊の観測に必要な要求を満たすことができる。

Hf-STJ作成プロセス

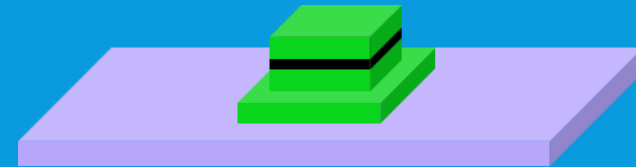
- ・ SIS構造の作成

- ・ 薄膜を形成 (下部電極)
- ・ 絶縁膜を形成
- ・ 薄膜を形成 (上部電極)



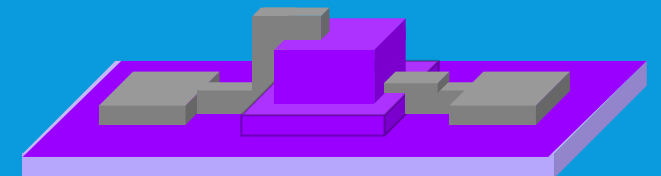
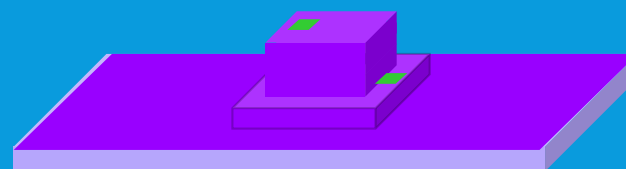
- ・ 形状加工

- ・ フォトリソグラフィによるパターンニング
- ・ ICP-RIEによるエッチング



- ・ 読み出し配線作成

- ・ SiO₂による絶縁層形成
- ・ Nb配線の形成



作成環境

- ・ 高エネルギー加速器研究機構 KEKのクリーンルームにて作成
 - ・ マグネトロンスパッタによる薄膜形成
 - ・ フトリソグラフィとRIE, ICP-RIEによる微細加工
 - ・ 酸素雰囲気中での酸化や陽極酸化などによる絶縁膜形成を試行



金属膜スパッタ



酸化膜スパッタ



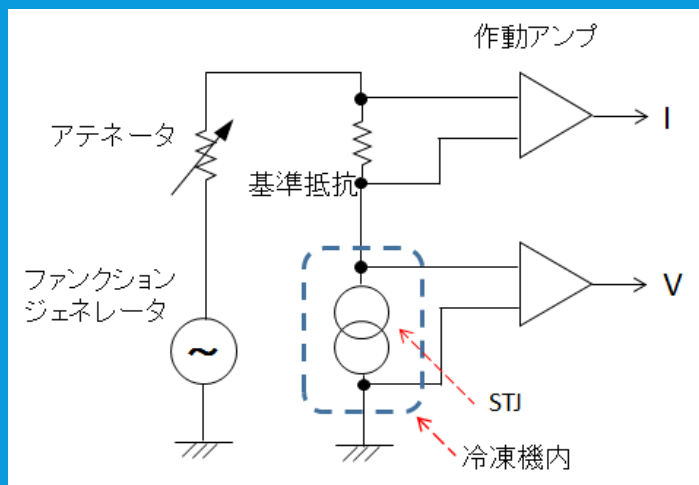
フトリソグラフィ



ドライエッチング

評価環境

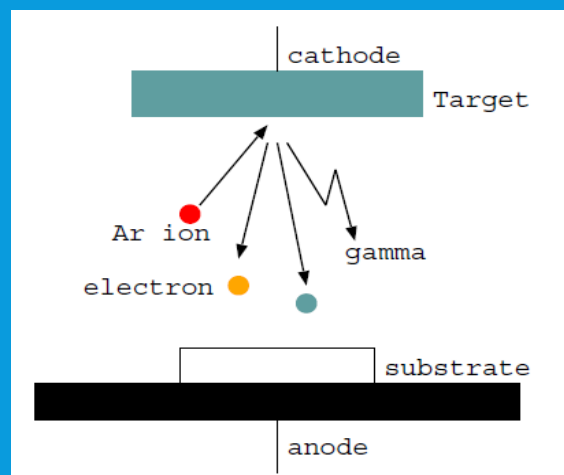
- ・ 希釈冷凍機@筑波大学にて素子の評価を行っている。
- ・ 昨年度から故障していたが2015年11月に復旧。
- ・ 現在は～120mK程度まで冷却が可能。
 - ・ 過去には15mKの実績有
- ・ 150mK以下で四端子法を用いてIV特性の評価を実施。



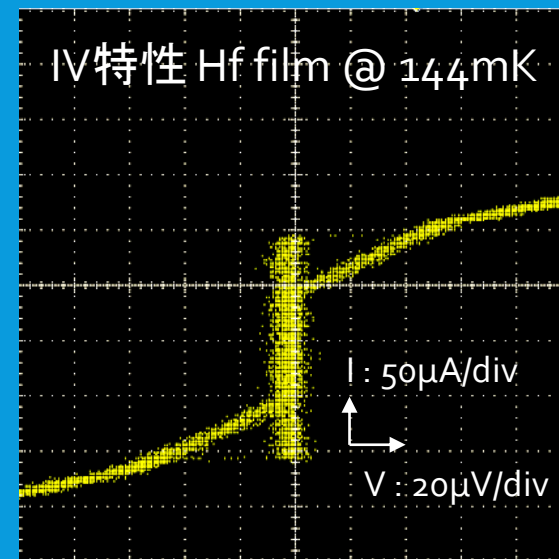
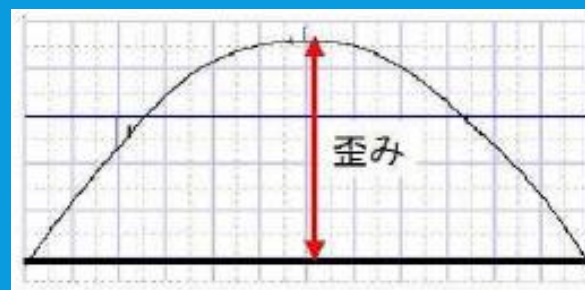
開発の現状(成膜)

Hf薄膜の形成

- ・ マグネトロンスパッタにて応力の小さい薄膜の形成を達成
 - ・ 60W, Arガス 2 Pa, ターゲット-基板間距離 75mm
 - ・ 成膜速度 : 30.8nm/min
 - ・ 成膜による基板の歪み : 0.9 μ m / 100nm
- ・ 冷却試験を行い、169mKで超伝導転移。



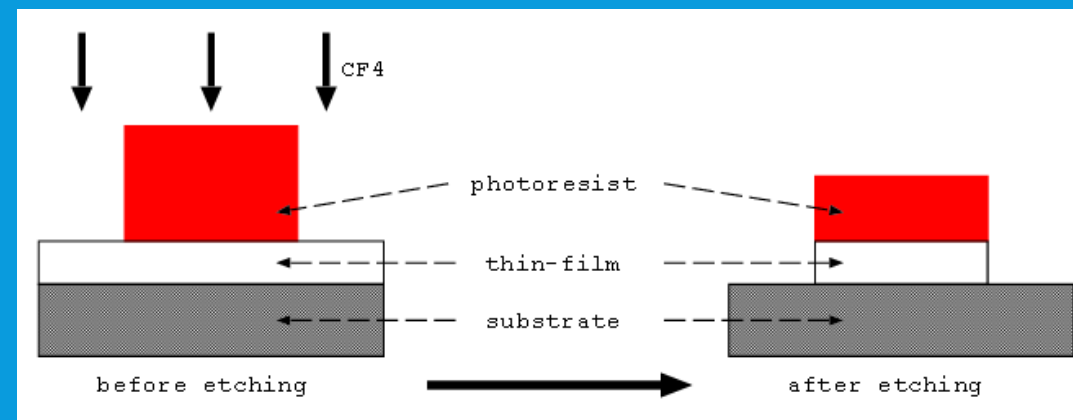
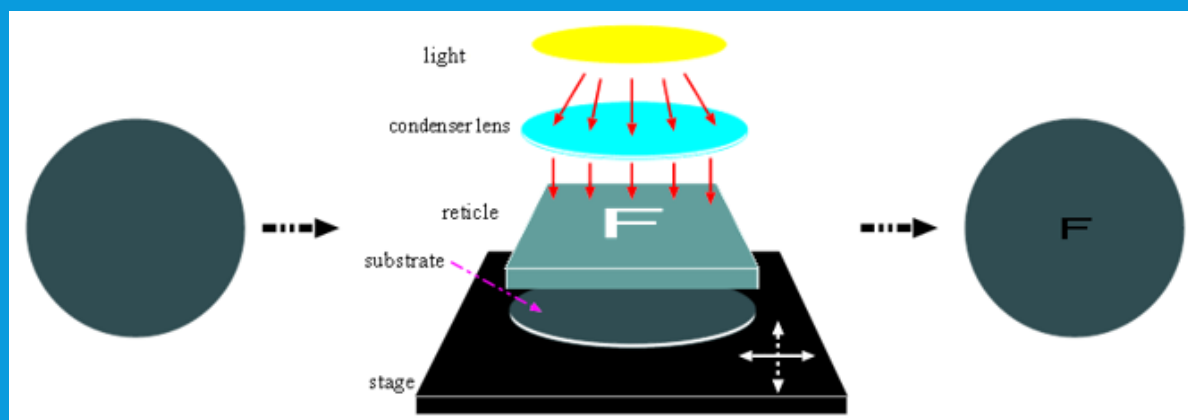
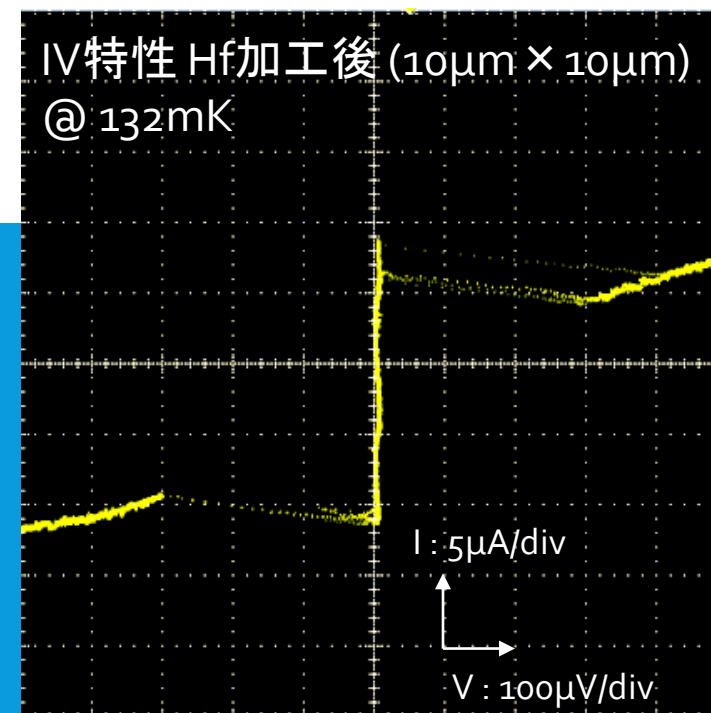
マグネトロンスパッタ



開発の現状(薄膜の形状加工)

Hf薄膜の加工

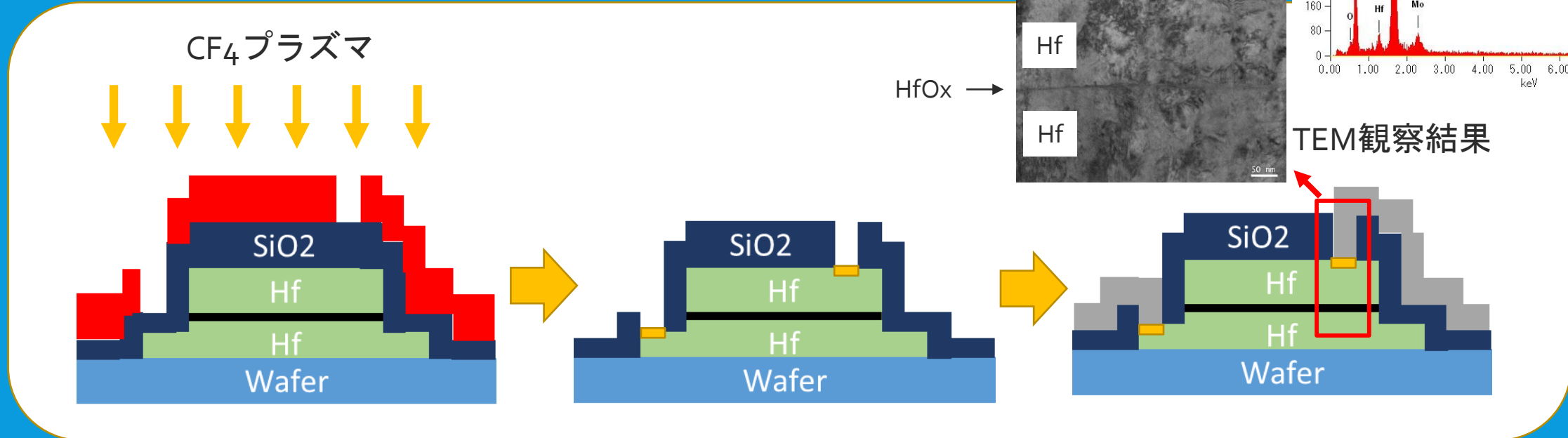
- ・ フトリソグラフィでパターンニング
- ・ ICP-RIEによるドライエッチングで加工
- ・ 加工後のHf膜を冷却し、超伝導転移することを確認。
- ・ 転移温度は、132~240mKの間



開発の現状(読み出し配線)

読み出し配線の形成

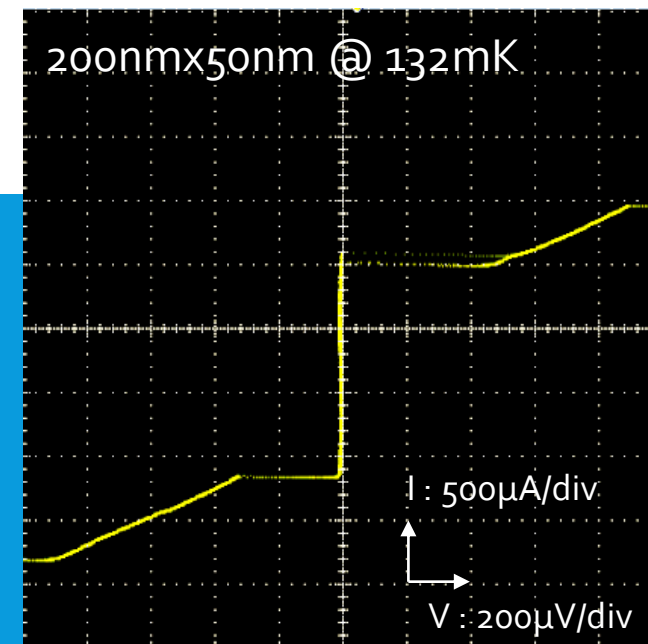
- ・ 上下の電極への読み出し用の穴を開けるためにSiO₂をドライエッチングで削っていたが、削った箇所のHf表面にフッ化Hfが形成され抵抗になっていた。



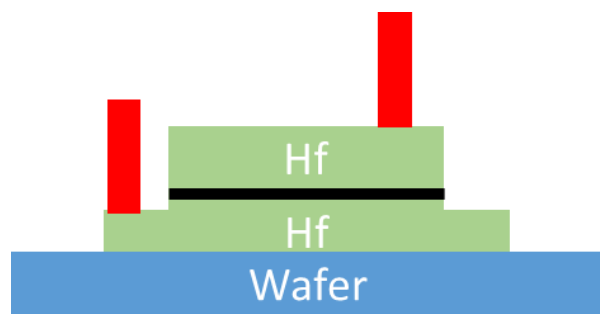
開発の現状(読み出し配線)

読み出し配線の形成

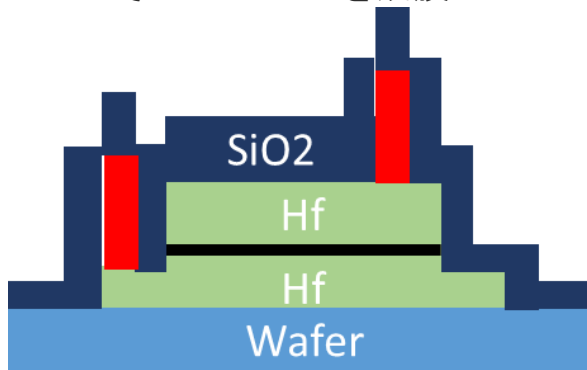
- ・ 不純物層の生成を防ぐために、Fを使わない加工方法としてリフトオフ法でSiO₂の加工を実施
- ・ この方法で作成したサンプルは160mKで超伝導転移を示し、不純物による抵抗成分の排除に成功した



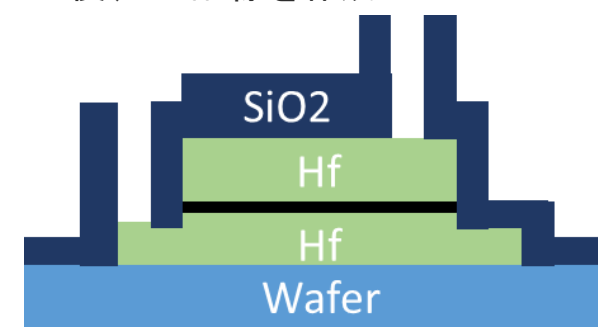
穴を開けたい位置にレジストを配置



その上にSiO₂を成膜



レジストを上に乗っているSiO₂ごと除去
この後、Nb配線を作成

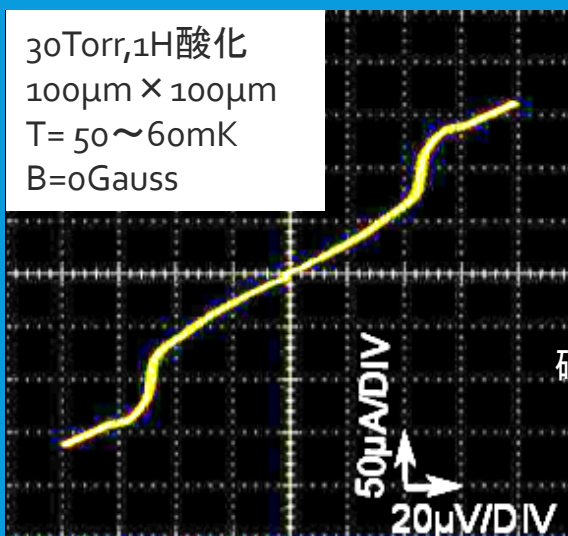


開発の現状(絶縁膜)

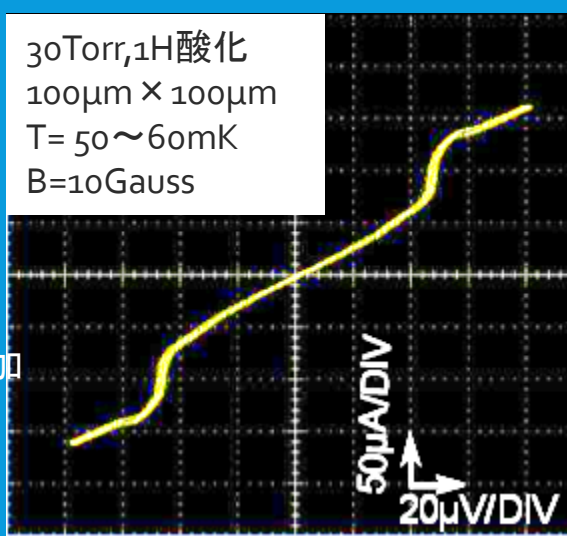
絶縁膜形成方法

Nb/Al-STJの作成方法を踏襲し、酸素雰囲気中で表面酸化で絶縁膜の作成を行っている。
 20TorrH,30TorrHともにジョセフソン電流が観測できた。
 STJの構造ができているが、もれ電流が大きく改善が必要。→ より強い酸化を行う。

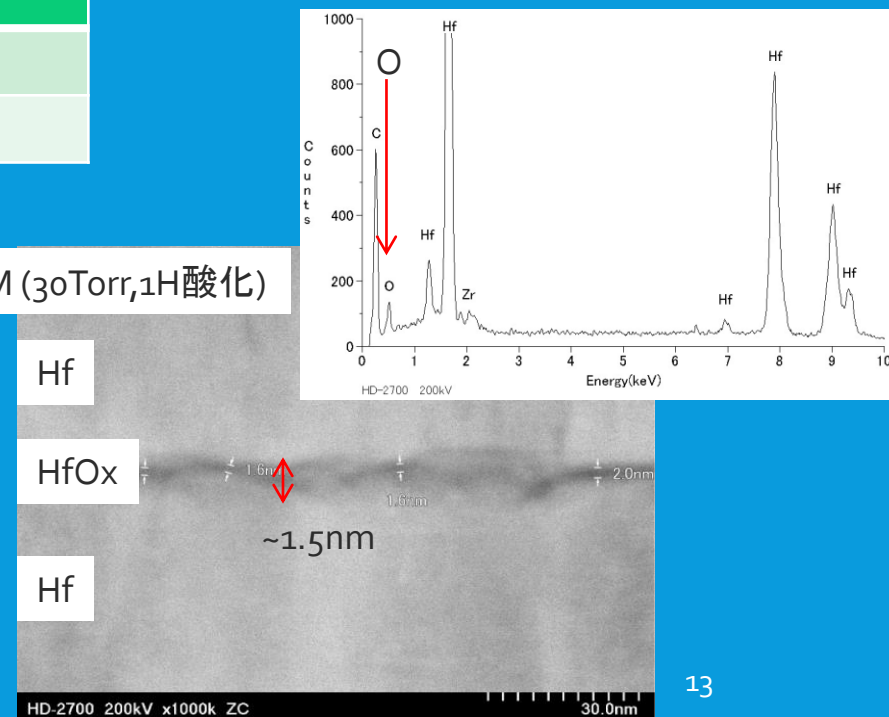
酸化条件 / 素子サイズ	200 $\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
20Torr, 1H	Rd = 0.23 Ω	Rd = 0.48 Ω	—
30Torr, 1H	Rd = 0.20 Ω	Rd = 0.85 Ω	Rd = 4 Ω



磁場印加



TEM (30Torr,1H酸化)

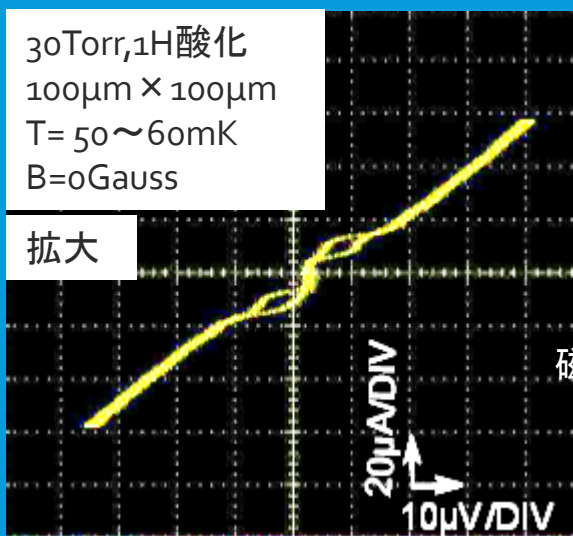


開発の現状(絶縁膜)

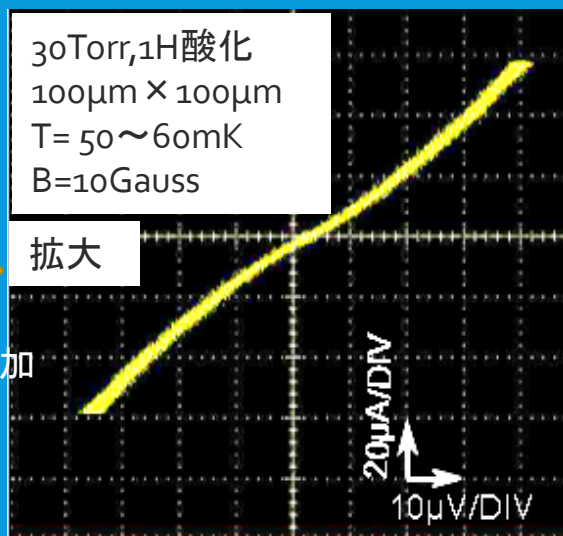
絶縁膜形成方法

Nb/Al-STJの作成方法を踏襲し、酸素雰囲気中で表面酸化で絶縁膜の作成を行っている。
 20TorrH,30TorrHともにジョセフソン電流が観測できた。
 STJの構造ができているが、もれ電流が大きく改善が必要。→ より強い酸化を行う。

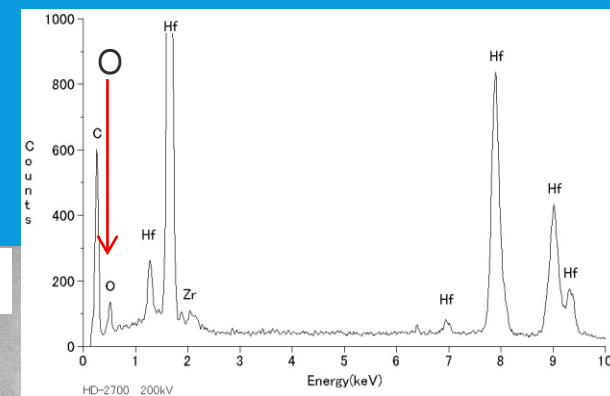
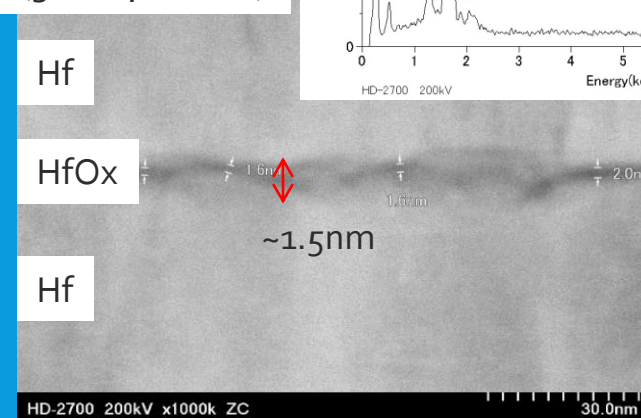
酸化条件 / 素子サイズ	200 $\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$
20Torr, 1H	Rd = 0.23 Ω	Rd = 0.48 Ω	—
30Torr, 1H	Rd = 0.20 Ω	Rd = 0.85 Ω	Rd = 4 Ω



磁場印加

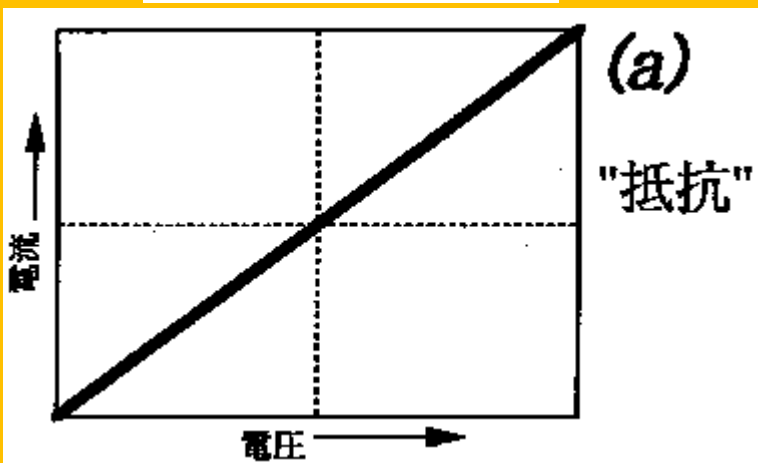


TEM (30Torr,1H酸化)



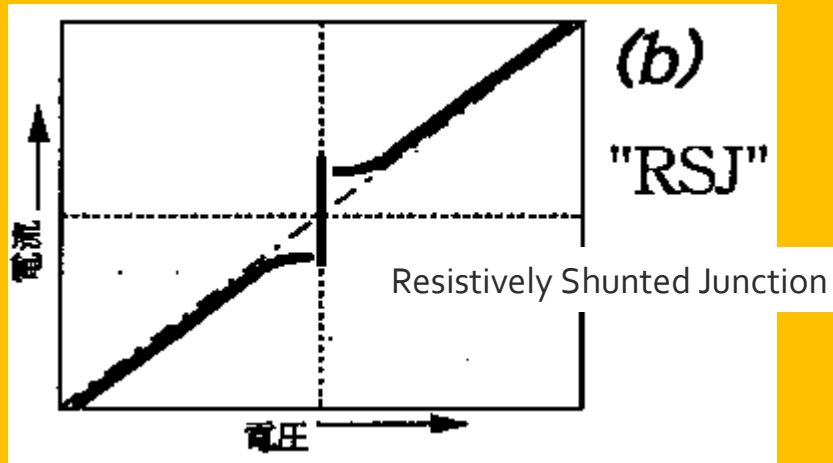
開発の現状(絶縁膜)

絶縁膜が厚すぎる場合



30Torr, 1H

絶縁膜が適切な場合

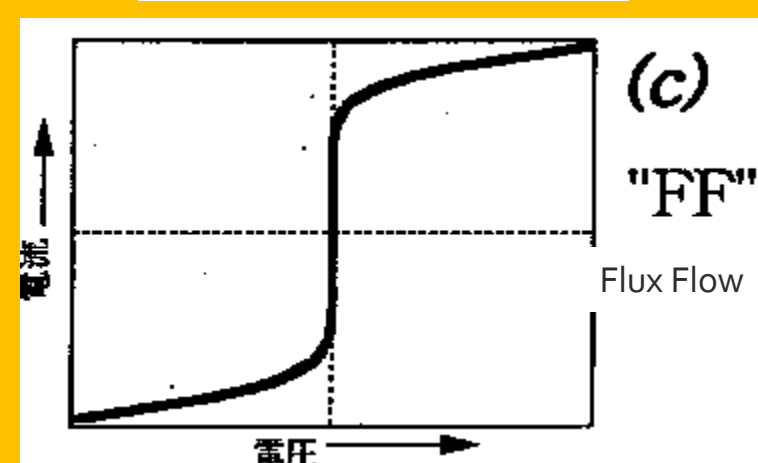


$R_u = 0.20 \Omega$

$R_u = 0.85 \Omega$

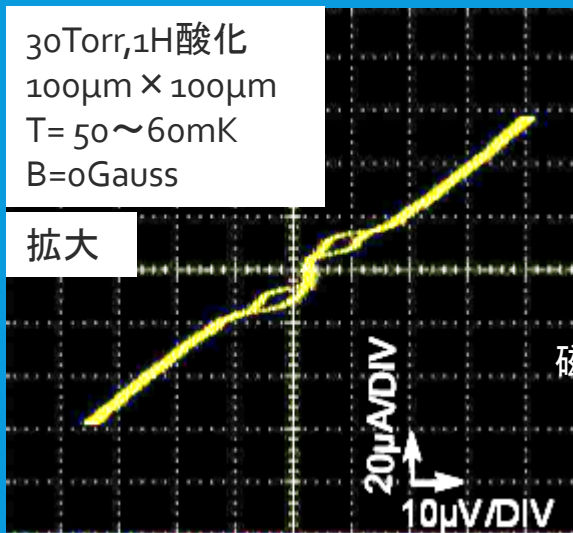
$R_u = 4 \Omega$

薄すぎて短絡している場合



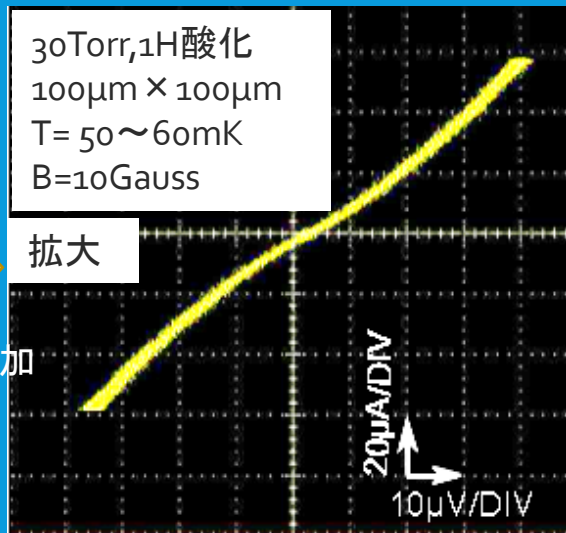
30Torr, 1H酸化
100 μ m × 100 μ m
T = 50 ~ 60mK
B = 0 Gauss

拡大



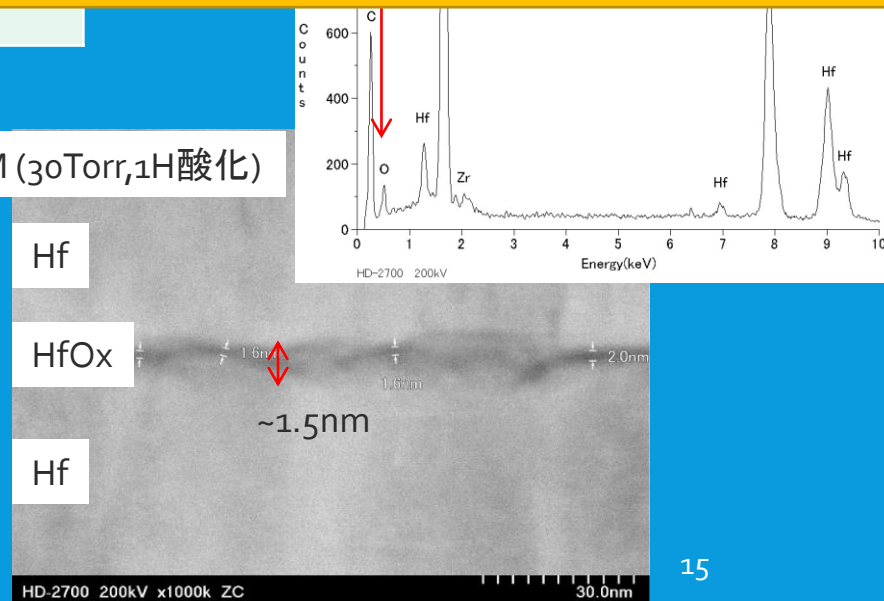
30Torr, 1H酸化
100 μ m × 100 μ m
T = 50 ~ 60mK
B = 10 Gauss

拡大



磁場印加

TEM (30Torr, 1H酸化)



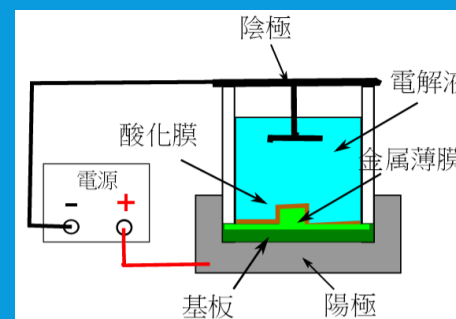
開発の現状(絶縁膜)

絶縁膜形成方法

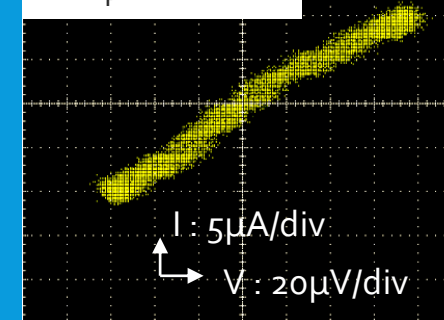
酸素雰囲気中での酸化以外に有効な絶縁膜形成方法が無いか探索している

・ 陽極酸化

- ・ 20Vで陽極酸化すると45nm程度のHf酸化膜ができる。
- ・ 1.3Vにて試作したところ、抵抗だった。
- ・ 弱い酸化条件を試行する。

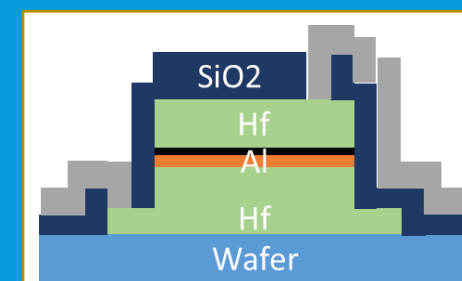


陽極酸化 1.3V
200 μ m \times 200 μ m
T= 146mK



・ Alを薄く成膜して酸化

- ・ Hf上にAlを数nm成膜し、それを酸化することで絶縁膜として利用する。
- ・ Nb/Al-STJの開発にて酸化条件が確立されている。
- ・ Hfより Δ の大きいAlを使用するため、性能悪化の懸念がある。



・ プラズマ酸化

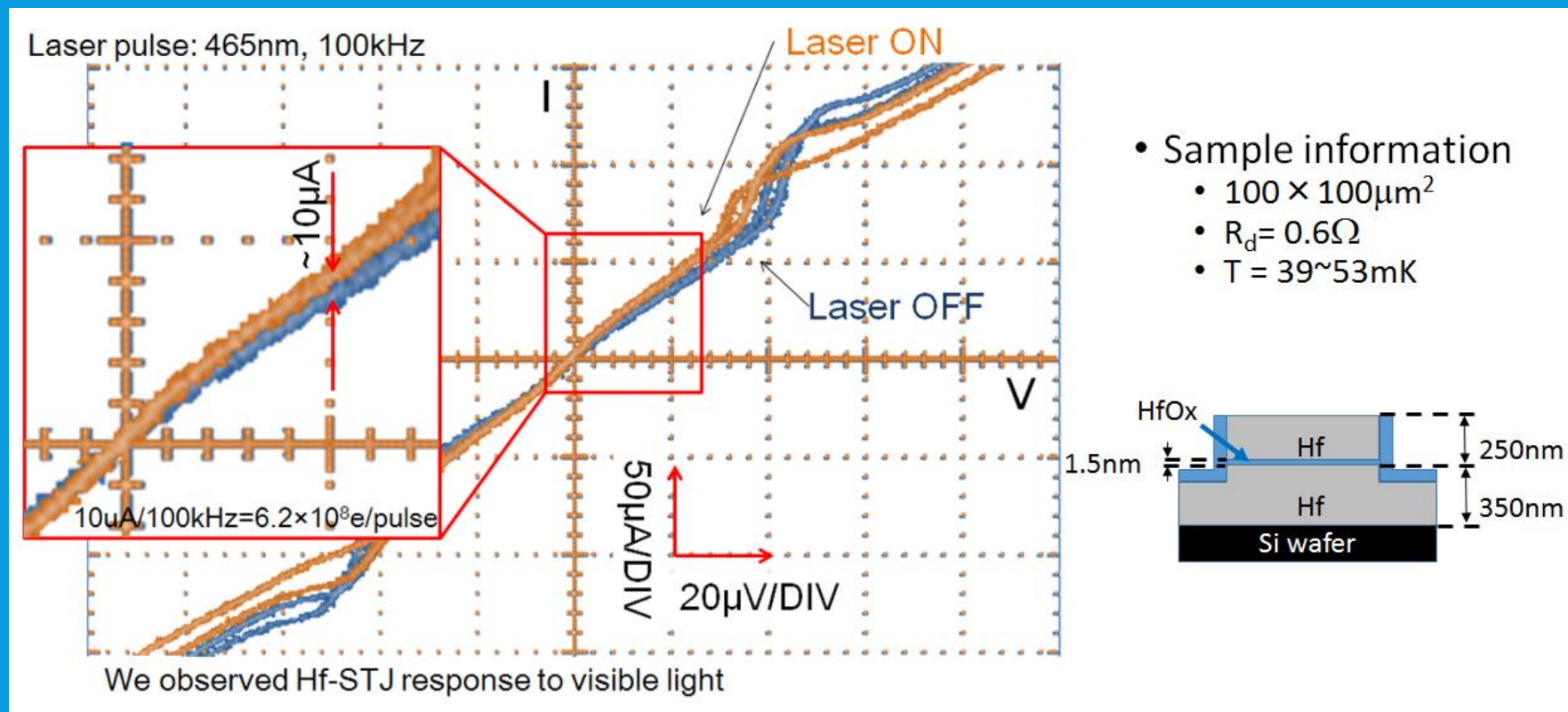
- ・ Hf表面にOプラズマを当て酸化を行う。

開発の現状(光応答)

光応答

Hf-STJに465nmのレーザーを当て、IVカーブが変化することを確認した。

サイズ : $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 酸化条件 : 30Torr, 1H



まとめ

- ・ ニュートリノ崩壊探索実験の要求を達成しうる、エネルギー分解能に優れたHf-STJを開発中
- ・ STJとしての特性を示すサンプルの作成に成功し、光への応答も確認できた。
- ・ しかしながら、漏れ電流が大きいため改善が必要。
- ・ 漏れ電流を抑制するため、良い絶縁膜の形成条件の探索を進めている。

Hf-STJ作成の必要項目

項目	現状
Hf薄膜の形成	マグネトロンスパッタにて達成
Hf薄膜の加工	フォトリソグラフィ、ICP-RIEにて達成
絶縁膜の形成	漏れ電流が大きいため改善が必要。 酸素雰囲気中での酸化、陽極酸化、酸化Al膜形成、プラズマ酸化を試行していく。
読み出し配線の作成	リフトオフ法により達成