高エネルギー分解能を有する ハフニウム系超伝導トンネル接合(STJ) 光子検出器の開発研究 ICEPPシンポジウム

筑波大学 数理物質科学研究科 素粒子実験室 STJグループ 木内 健司

Outline

- 超伝導光検出器
- STJの構造と原理
- ・ STJ用超伝導薄膜の条件だし
- Hf-STJ
- Hf/Al/AlOx/Hf-STJ
- まとめ

超伝導光検出器

- 超伝導トンネル接合素子(STJ)
- 超伝導力学インダクタンス検出器(MKID)
- 超伝導転移端温度計(TES)
- 超伝導ストリップ検出器(SSLD,SSPD)

	Pair breaking	
Calorimeter		
	Nanostrip	

様々な超伝導光検出器が開発されている

- ◆高いエネルギー分解能
- ・単一光子検出が可能
- ◆高い放射線耐性



STJは<u>高いエネルギー分解能と広いダイナミックレンジ</u>

Hf-STJの構造



理論的なエネルギー分解能 光子のエネルギー : E $\Delta E_{\sigma} = \sqrt{1.7\Delta FE}$ Fano Factor : F = 0.2

Material	$T_{c}(K)$	Δ (meV)
Niobium	9.20	1.550
Aluminum	1.14	0.172
Hafnium	0.13	<u>0.021</u>

ジョセフソン素子の電流電圧特性

絶縁膜と並行に磁場をかける





How to make STJ





スパッタリングした薄膜の内部応力(σ)





原子力間顕微鏡(AFM)観察



2.0Pa 70W 内部応力なし RMS 3.5nm 1/4

0.5Pa 50W 内部応力≒1.4GPa RMS 0.9nm

成膜条件と薄膜の特性

内部応力が小さい
 2.0Pa 70W
 表面が平滑
 0.5Pa 50W

内部応力と表面状態の両立はできない!

- 1. 2.0Pa 70W 🣛 採用
- 2. 0.5Pa 50W
- 3. Hf/Al/AlOx/Hf-STJ...平滑化、AlOx

Hf-STJ IV特性 酸化(10Torr 1hour)



Hf/Al/AlOx/Hf-STJ



Al/AlOx層導入のメリット

RMS=1.95nm

- AIがHf表面を平滑にする
- AlOxはSTJで実績ある絶縁膜材料
- ΔはAIが薄い(~25 nm)ので影響を受けない

Hf/Al/AlOx/Hf-STJ 30Torr 1hour



まとめ

- Hfスパッタ薄膜の多角的評価
 - -残留応力
 - 結晶構造、格子定数、配向性
 - 表面粗さ

世界初

とスパッタ時の圧力、出力の関係を明らかにした

• Hf-STJのジョセフソン電流を確認

Hf/Al/AlOx/Hf-STJのジョセフソン電流を確認
 ただし、光測定にはリーク電流を削減が必要

Back up



• 準備した新プロセスで

– 高ストレス条件で作製したHf-STJの測定
 – 酸化条件を強くしたHf/Al/AlOx/Hf-STJの測定

• 低温プリアンプの設置

Nb/Al-STJによる測定系の準備

新プロセスとその改良点

細かい改善点

- ・ウエハ洗浄
 - 中性洗剤
 - ・ アセトン
- ・リフトオフ法
 - 画像反転レジスト
 - ・逆スパッタの強化
- 陽極酸化
 - 高抵抗ウエハ上に孤立した素子を陽極酸化

現在作製済み,測定準備中





OUT LINE

- ・ニュートリノ崩壊とHf-STJ
- ・これまでの成果
- 冷凍機運転状況
- 光測定の準備
- Hf薄膜のスパッタリング条件だし
- 簡易型STJによる検証
 - Hf-STJ
 - Hf/Al/AlOx/Hf-STJ
- 新たなプロセスの確立
- ・結論と考察、今後に向けて

昨年度の成果 Nb/Hf-STJによる酸化膜の検証





酸化膜はHfを酸素ガスで酸化して形成 膜厚を酸素の圧力と時間でコントロール



光測定の準備

- Laser...470nm(2.64eV)のパルス光
- Attenuator...OdB~-60dBまで減衰
- Fiber...石英ファイバー
- Jig...アクリル製、照射位置が透けて見える
 3つのネジで照射位置を調整





Laser

Attenuator

排気管

冷凍機内部

fiber

希釈冷凍機運転状況(移設後)





ICP-RIEによるHfのエッチング



誘導結合プラズマを作る

- 高エネルギー・高密度
- CoilとPlatenの位相差で引き出す
- Heガスによるステージ冷却

Hfのエッチング条件 Coil 300W, Platen 120W CF4 15sccm, 5mTorr He 10Torr 位相差 150degree 温度 <90°C(5min) Hf 12-3nm / min. Resist 200nm/min.

200nm削るのが限界!

Arの場合4.5nm/min.



Hf-STJ IV特性 酸化(50Torr 1hour)







- ・ 陽極酸化の導入!! 側壁の酸化
- 膜厚:30 nm/10V
- エッチレート
- 12nm/min (ICP-RIE (Ar))







- ・ 陽極酸化の導入!! 側壁の酸化
- 膜厚:30 nm/10V
- エッチレート
- 12nm/min (ICP-RIE (Ar))





圧縮応力 内部応力=熱応力(熱膨張)+真応力(結晶欠陥など) スパッタリング・・・圧縮応力になりやすい