超伝導共振器を用いたミリ波サブミリ波カメラの開発

成瀬雅人、関本裕太郎(国立天文台、東京大学)、野口卓、鵜澤佳徳、宮地晃平(国立天文台)、 新田冬夢(筑波大学)



概要

国立天文台・先端技術センターでは1000素子規模のミリ波・サブミリ波帯直接検出器を開発している。これらの研究はKEK,理研、岡山大学と協力して、 宇宙背景放射 偏光精密測定計画(LiteBIRD)への搭載を目指して行われている。ミリ波・サブミリ波帯での高感度検出器としては超伝導転移端センサー (TES),超伝導接合検出器(SIS),超伝導薄膜の表面インピーダンスの変化を読み取る共振回路検出器(KIDs)などがある。これらの中で、多素子化の際 に鍵を握る多重読み出しが容易で、単純な構造をもち高い歩留まりを期待できるKIDsの開発を進めている。

これまでNbN膜を用いたKIDsの研究を行い、複素数へと拡張した超伝導ギャップエネルギー(Noguchi, et. al, 2009)をMatthis-Bardeen理論へ適用する ことで、共振のQの温度変化をうまく説明できることを示した。さらに、共振器のQを大きくするためにはギャップの虚数部を小さくしなければならないこと がわかった。また、ギャップの虚数部の大きさは準粒子寿命と深い関係があることが示唆されており、虚数部の大きさを見積もることで超伝導体の膜質を 定量的に評価できると考えている。

これらの手法を用いて、ミリ波の信号に対して感度をもつAI膜を使ったKIDsの開発を行っており、0.1 Kで共振のQが500000を超えるような値を得ている。 さらに光学系も含めた電 波カメラ開発の現状及び、様々な膜質をもったAI KIDsの特性評価の結果を報告する。

5. 測定系 1, サブミリ波カメラの開発 @ATC-NAOJ lab Block diagram S21 spectrum @140 mK Road map detector detector + optics remarks vear 2010 120 pixel 9 pixel multiplex readout Signal generato (4-8 GHz) 2011 102 pixel 10⁻¹⁷ (W/Hz^{1/2}) axial Cable 2012 1024 pixel System KIDs CLNA Ð 0.1 K Cryostat IQ spectrum and noise 0.1 K stage 信号発生器及びIQミクサを用いて 3.5mm 4.09mm KIDsを通した後のS21の強度及び 220 GHz用9素子レンズアレイと440 GHz用102素子アレイ 位相の変化を測定する 2. カメラの光学系 6、共振器のQと複素ギャップエネルギー RF $Q = (2/\alpha)^* (\sigma 1/\sigma 2)$ signal $Z_S = Z_{1S} + iZ_{2S}$ 5×10^{5} (a: kinetic fraction) $Q \equiv \frac{Z_{1S}}{Z_{2S}},$ S21 [dB] 2×10^{5} $Z_{25} \approx const$ $\log(Q)$ 1×10^{10} (300K) Zn. « Ne $5 \times 10^{\circ}$ meV *e^(T/2) meV (77K) -10 0.33 K or Ø 2×10^{4} lens log(Z_{1S}) .12 1×10⁴ 5000 *Tc: ~15.7 k Si wafer ^(T/2) 7.692 10^-4 7.686 Frequency [GHz] *o20. ~60 uOch *Δr: 2.89 meV 2000 RF response of KIDs Zis 1000 2 4 6 8 Double slot antenna and Hyper-hemispherical lens T (K) (Operation frequency depends on only this optics design.) 複素ギャップエネルギの影響を考慮に入れた状態密度と励起エネルギー(左),Q 共振器のQと温度(中), ギャップの虚数部を変えたときのQと温度(右) 3. Kinetic Inductance Detectors Day et al, 2003 7, 実験結果 (AI KIDsのQ とSISのIVとの比較) -Superconducting resonators operated in the microwave range (4-8 GHz) -Pair breaking detectors Feed line (MW) REALIZED IN THE REAL T-50 at 5 =0.20 pc Reconst 1×10^{6} $\frac{1 \times 10^{\circ}}{8}$ 5 × 10⁴ 1.8*10^-8 meV 4.2*10^-8 meV 1×10^4 17 5000 9.5*10^-8 meV 500 um 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 Coupler 部のSEM画像 KIDsの 等価回路 T(K)T, Noguchi 4.KIDsの特徴 AI KIDs(膜厚140 nm, Tc 1.2K, s=3 um, w=2 um)のQの温度変化(左), Al/AlOx/AlのIVカーブの測定(Teufel et al.)と理論フィット(T. Noguchi.) -Simple fabrication One superconducting film and one etching process Simple system 8,まとめと今後 No bias line, only one CLNA 10 KIDsのQの飽和とSISのリークカレントの両 10 -Frequency multiplexing 方を複素ギャップモデルで説明できることを 10 Commercial products are available 示した。また、今後はMBE装置を用いてAI -Broad-band coverage の質を向上させ、検出器の性能向上を目指 三鷹天文台内のMBE装 $f > f_{\alpha}$ す。 置(左)とAI膜の電子線 -High Sensitivity (≦10⁻¹⁹ W/Hz^{1/2}) Barends, 2009 回折パターン(右)