

SIS素子製作システムの立ち上げと ALMA Band 8受信機用SIS素子の開発

田村 友範, 野口 卓, 遠藤 光^{*1}, Matthias KROUG, 単 文磊^{*2},
伊藤 哲也, 新関 康昭, 飯塚 吉三

(2009年4月30日受付; 2009年9月1日受理)

The Establishment of SIS Mixer Device Fabrication System and the Development of SIS Mixer Device for the ALMA Band 8 Cartridge Receivers

Tomonori TAMURA, Takashi NOGUCHI, Akira ENDO ^{*1}, Matthias KROUG, Wenlei SHAN ^{*2},
Tetsuya ITO, Yasuaki NIIZEKI, Yoshizo IIZUKA

Abstract

We established a new SIS device fabrication system which uses an i-line stepper, a sputterer and an ICP etcher in Advanced Technology Center of NAOJ. We also established a new fabrication method (via hole etching) which etches the insulation layer for making via holes. SIS mixer devices for ALMA Band8 cartridge receivers are fabricated using the new system and DC IV curves of their SIS junctions show small leakage current at high current density ($>10 \text{ kA cm}^{-2}$). The DSB receiver noise temperature of the Band 8 mixer with our SIS devices is below 100 K in the Band 8 frequency range (385–500 GHz) and meets the ALMA specifications.

1. はじめに

ミリ波, サブミリ波の天体観測においては, 宇宙からの微弱な電波を観測するために, アンテナで集めた電波を受信機で数GHz程度の低い周波数に変換して増幅する必要がある. 受信機において, 周波数変換の役割を担うヘテロダインミキサとして用いられるのが, SIS素子である. SIS素子がミキサとして優れているのは, 電流-電圧特性が強い非線形性を持ち, 変換効率が高いことによる. また, 雑音が極めて小さく, 他の非線形素子と比べて低電力のローカル信号源で駆動できるなどの利点を持つ.

日本が米国, 欧州と共同で建設を進めているアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, 以下

ALMA) は, 周波数30–950 GHzの間に観測周波数帯 (Band) があり, 日本は3つの周波数帯, Band 4 (125–169 GHz), Band 8 (385–500GHz), Band 10 (787–950 GHz) の受信機カートリッジの開発を担当している. これらの受信機カートリッジ及びSIS素子の開発が, 国立天文台の先端技術センターで行われている.

これまで国立天文台では, 野辺山観測所のクリーンルームにおいてSIS素子が製作されていて, ALMAのSIS素子の開発も行われていた. しかし, ALMAでは, 素子の微細化に加えて, これまで経験したことのない多量の高性能素子を製造しなければならず, 従来の装置では対応することが難しかった. 素子の微細化と量産に対応していくためには, 露光解像度及び製作歩留まりを飛躍的に向上させる必要があり, 先端技術センターに新しい装置が導入されることになった.

一方で, 半導体素子と比較して, 一般的に安定

^{*1} 東京大学 (The University of Tokyo)

^{*2} 紫金山天文台 (The Purple Mountain Observatory)

した製作プロセスが確立されていないSIS素子の分野において、全く新しい装置を立ち上げて開発を行うことは、野辺山観測所での経験があるとは言え、簡単ではない。SIS素子の製作プロセスにおいて、SIS接合の膜質や、電流密度を安定して制御することは困難である。それ以外でも、1つ1つの製作工程において、新しい装置に対応した、安定した製作方法を確立していく必要がある。

さらに、我々は、ALMAのBand 8 (385–500GHz)、Band 10 (787–950 GHz) というALMAで最も高い周波数帯である受信機用のSIS素子の開発を担当することになる。そのためには、SIS接合の微細化、厳しい寸法精度、高電流密度、低リーク電流など、これまでの実績を大きく上回る要求に対して、多くの課題を克服する必要がある。

本論文は、先端技術センターにおけるSIS素子製作システムの立ち上げとALMA Band 8受信機用SIS素子の開発・量産について報告するものである。

2. 国立天文台 先端技術センターのSIS素子製作システム

国立天文台 先端技術センターにおけるSIS素子開発は、ALMA受信機カートリッジ用SIS素子の開発・量産を目的として、2003年の高度環境試験棟クリーンルームの完成とともに準備が始められた。SIS素子製作システムに関しては、g線ス



図1-1. i線ステッパ (Canon FPA-3000 i5+) 波長365nmの紫外線で露光する装置。解像度はLine and Space 0.35 μ mである。

テッパ、ICPエッチング装置、スパッタ装置の導入後に2005年からSIS接合製作が開始されて、2006年 クリーンルームの増床、野辺山観測所のSIS素子製作装置の先端技術センターへの移設、i線ステッパの導入をもって、設備面での整備がほぼ完了した。図1に、SIS素子製作システムの主な装置を示す。

3. SIS素子の構造

超伝導体で薄い絶縁体を挟んだトンネル接合がジョセフソン接合というものであり、その構造からSIS (Superconductor - Insulator - Superconductor) 接合と呼ばれる。図2にALMA Band8受信機用

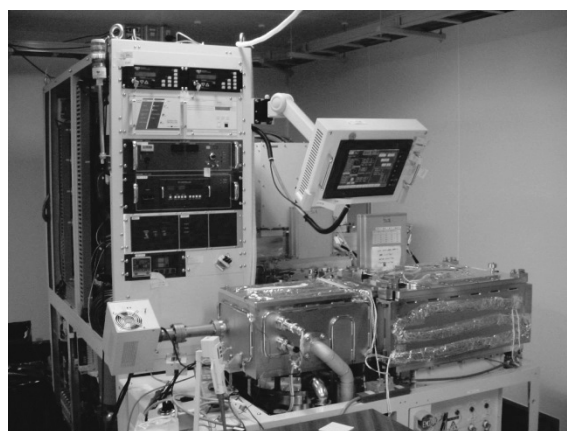


図1-2. DCマグネトロンスパッタ装置 (ULVAC CS200ET) Nb, Al, NbTiNを成膜する。



図1-3. ICP (Inductively Coupled Plasma) エッチング装置 (ULVAC CE300I)

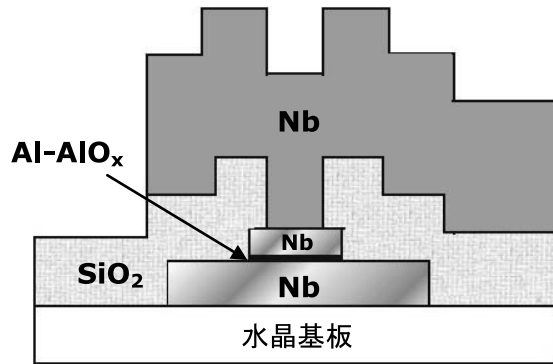


図 2-1. Band 8 SIS素子の断面図

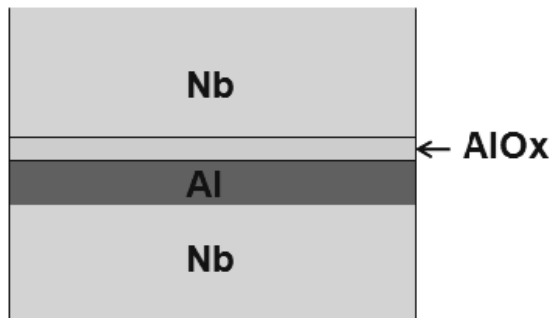


図 2-2. SIS接合部の拡大図

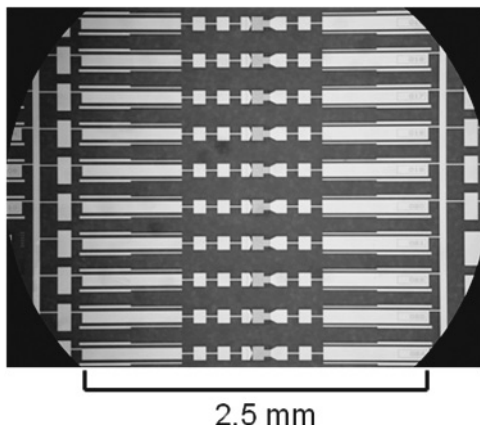


図 4-1. ALMA Band 8 SIS素子

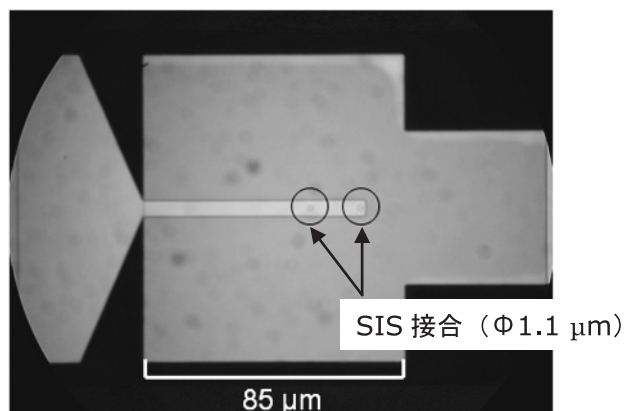


図 4-2. SIS素子の拡大写真

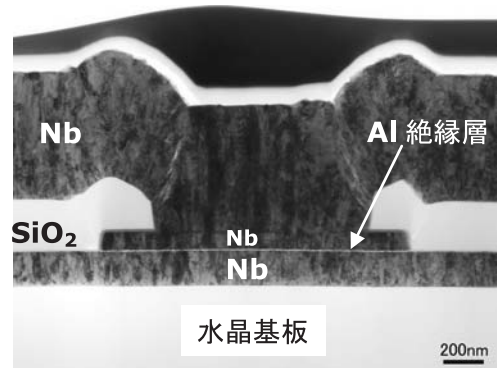


図 3. SIS接合の透過型顕微鏡写真

SIS素子の断面構造を示す。Band 8素子は、接合部がNb（ニオブ 超伝導層、厚さ2000 Å）、Al-AlOx（アルミニウム-酸化アルミニウム 絶縁層、厚さ100 Å）、Nb（超伝導層、厚さ1000 Å）という構造からなり、接合の直径は、1.1 μmである。接合の上にSiO₂の絶縁層3000 ÅとNb配線層7000 Åが積層される。

図 4 にALMA Band 8受信機用のPCTJ型（Parallel-connected twin junction）SIS素子の写真を示す。

4. SIS接合の電流-電圧特性

超伝導体で非常に薄い絶縁体を挟んだSIS接合において、トンネル効果によって超伝導体間に電流が流れることをジョセフソン効果と言う。接合電圧が0でもトンネル電流が流れることを直流ジョセフソン効果と言い、直流ジョセフソン電流の最大値を接合面積で規格化した値を、接合の臨界電流密度（ J_c ）と呼ぶ。また、SIS接合のトンネル電流には、直流ジョセフソン電流とは別に、準粒子電流がある。超伝導体は、超伝導エネルギーギャップ（ 2Δ ）を持つが、準粒子電流は、エネルギーが 2Δ 以上になるバイアス電圧 $V > 2\Delta/e$ （ e ：電気素量 1.602×10^{-19} C）を接合にかけた時に流れるトンネル電流である。

図 5 に、ALMA Band 8 SIS素子の電流-電圧特性（以下、 IV 特性）を示す。図 5 では、直流ジョセフソン電流は、磁場等で抑制されて見えていないが、バイアス電圧の大きさがある値より大きくなると、突然、接合に準粒子電流が流れるのが分かる。つまりSIS接合の強い非線形な IV 特性は、準粒子電流によるものである。この急峻な電流の立ち上がりを見せるバイアス電圧（図 5 では

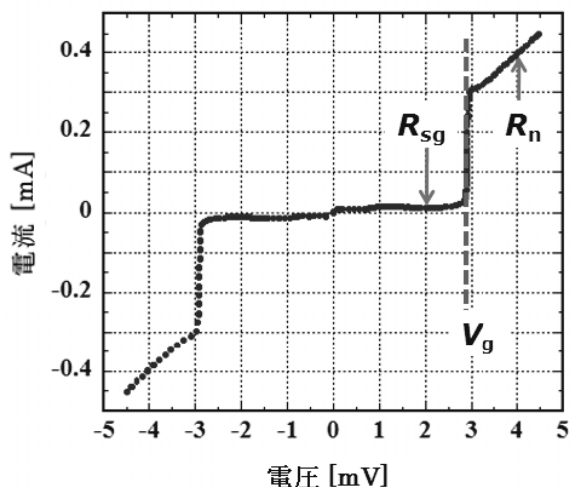


図5. Band8 SIS素子の電流-電圧特性

2.8mV) が超伝導ギャップ電圧 (V_g) と呼ばれるもので、 V_g よりも低い電圧における抵抗値をサブギャップ抵抗 R_{sg} と言い、 V_g よりも高い電圧における抵抗値を常伝導抵抗 R_n と言う。 V_g 以下で流れる電流が接合の欠陥などによって生じるリーク電流であり、サブギャップ抵抗値を常伝導抵抗値で規格化した値 (R_{sg}/R_n) を Quality Factor と呼んで、これがリーク電流の大きさ、つまり SIS 接合の性能を示す指標となる。例えば、図5の Band 8 SIS素子では、電圧 2mV の点におけるサブギャップ抵抗値 R_{sg} と 4mV の点における常伝導抵抗値 R_n から計算すると Quality Factor = 18 (電流密度 11 kA cm^{-2}) である。電流密度 10 kA cm^{-2} 程度の SIS 接合においては、Quality Factor が 15 以上あれば、受信機で使用するミクス素子として十分リーク電流が小さいとされる。したがって、この SIS 素子は、Band 8 受信機用として必要な性能を持つと判断することができる。

5. SIS 接合の製作

5.1 スパッタリングで形成される薄膜の構造

スパッタ装置で成膜した薄膜の構造について、例として、図6にThorntornのモデル¹⁾を示す。

このモデルによると、スパッタリングで形成された薄膜は、成膜条件（このモデルでは、放電ガス圧力と基板温度）によって異なる構造を持つことが示されている。Thorntorn のモデルでは、図の左端が最も粒子が粗い多孔性の柱状構造であり、右にいくほど構造は緻密になっていって、右端では粒状の結晶構造になっている。

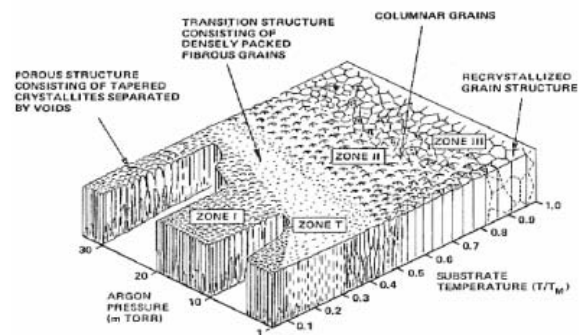


図6. Thorntornモデル

我々のスパッタ装置で形成した薄膜も、このモデルで示されたような構造を持つと推測されて、成膜条件によってその構造が変化すると考えられる。その場合、スパッタリングで形成した膜は、たとえ結晶性の良い膜であっても、微少の結晶（以下、結晶粒）からできている多結晶体であり、結晶粒の境界面（以下、結晶粒界）には空孔や欠陥が存在することになる。したがって、スパッタ装置で多層膜を形成した場合には、結晶粒間に生じる界面に沿って膜間で原子が拡散すること（粒界拡散）は避けられないと言える。この原子の拡散によって、我々が製作する SIS 接合にどのような問題が起こるのかということを次に述べる。

5.2 SIS 接合における Al と Nb の拡散

SIS 接合において、絶縁層を形成する膜（酸化アルミニウム等）は、約 $100 \text{ \AA}$ と非常に薄いので、膜にピンホールが開いてしまうことがある。それがトンネル接合の欠陥になって、リーク電流を引き起こすことになる。我々が製作する SIS 接合は Nb 膜の上に Al 膜を堆積するが、膜にピンホールが開くのは、Al と Nb の拡散が 1 つの原因と考えられるので、拡散を低減できれば、接合のリーク電流を減少させることができる。実際には、Al と Nb で相互拡散が起こると考えられるが、図7には、Nb 膜に Al 原子が拡散する様子を示す。拡散を防ぐ手段として、次の 2 つの方法が考えられた。1 つ目は、Nb と Al の間にアウトガスを付着させて拡散を防ぐという方法であり、2 つ目は、緻密で結晶性が良い Nb 膜を作って、結晶粒の間の隙間をできるだけ小さくするという方法である。

5.3 真空チャンバーのアウトガス

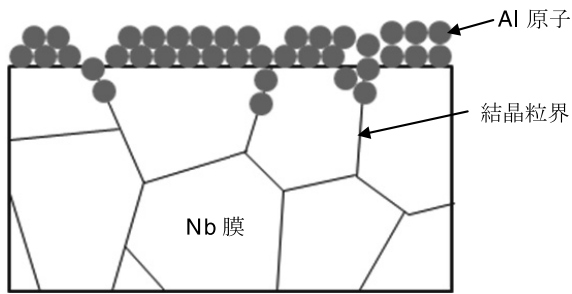


図7. AlのNb膜への拡散

まず、1つ目のNbとAlの間にアウトガスを付着させて拡散を防ぐという方法について述べる。スパッタした膜の表面には、真空チャンバー内に存在するアウトガスが付着する。そのアウトガスの水分子がNb膜とAl膜の間に付着して、その水分子が拡散を防いで接合のリーク電流を減少させる、ということが報告されている²⁾。

我々は、Nbを成膜して、時間を置かずに続けてAlを成膜した場合と、時間を1時間置いた後にAlを成膜した場合で、接合のリーク電流を比較する実験を行った。図8にIV特性の比較を示す。結果としては、時間を1時間置いた接合の方が、Quality Factorが明らかに高く、リーク電流が小さくなった。この1時間置くという方法は、野辺山から移設したスパッタ装置で、すでに実績があったやり方であるが、同様にして、新しいスパッタ装置（CS200ET）においてもリーク電流の改善が見られた。SIS接合のIV特性を見ると、Nb膜の上に付着したアウトガスは接合に悪い影響を及ぼしていないと判断できるので、膜を形成

するほどの多量のアウトガスが付着しているとは考え難い。しかし、そのアウトガスの水分子の付着が、拡散を防ぐという意味では、SIS接合に良い効果をもたらしているということが考えられる。

しかし、真空チャンバーの中のアウトガスの成分や量は、常に変わっていくものであって、かなり不安定な要素である。実際、CS200ETの実験では、放置時間がなくても、リーク電流が非常に小さいSIS接合を作ることでもできていた。しかし、数カ月の期間で見えていくと、放置時間がない場合は、徐々に接合のリーク電流が増えていくというような変化が見られた。そこで、放置時間を置いたプロセスを取り入れたところ、長期的に見ても変化がなく、安定してほぼ一定の微小なリーク電流の接合を作ることが可能になったのである。このことは、図8の結果が他の要因によるものではなく、確実に放置時間がリーク電流に影響を与えていることを示していて、またアウトガス量がたとえ不安定であっても、1時間程で飽和して、拡散を防ぐ程度のアウトガスが付着するということと言える。なお、真空チャンバーは、スパッタリングターゲットの交換などで、半年に1回程度の頻度で大気開放するため、チャンバー内のアウトガスが減り過ぎてしまうようなことはない。

5.4 Nb膜の結晶性と内部応力

次に2つ目の緻密で結晶性が良いNb膜を作って、結晶粒の間の隙間をできるだけ小さくして拡

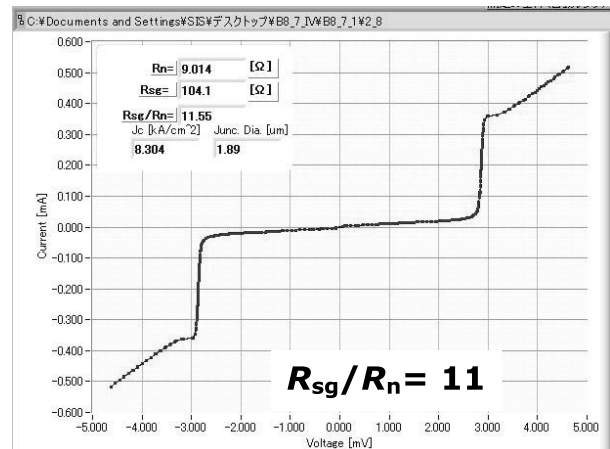
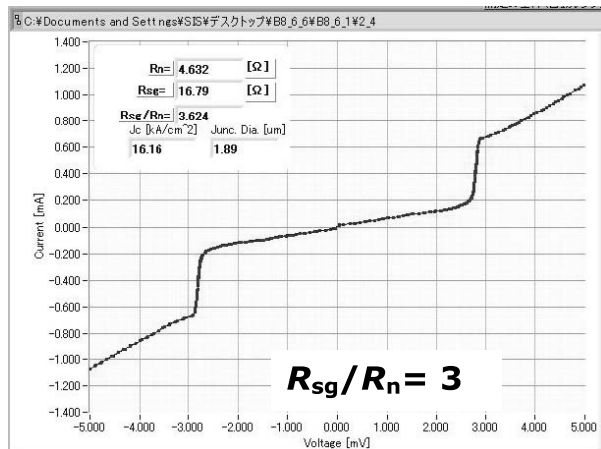


図8. 左図IV特性のSIS接合は、放置時間なし。右図IV特性のSIS接合は、Nbを成膜した後に、1時間放置してその後Alを成膜した。

散を防ぐという方法について述べる。結晶性が良い膜は、粒子が粗い膜に比べて、Nb膜の上のAl原子が拡散しにくくなるので、SIS接合のリーク電流を低減させることができると考えられる。また別の観点で見ると、Nb膜の結晶性が良いと、膜表面の平坦度が良くなるので、Al膜のNb表面への被覆率を上げることになり、SIS接合のリーク電流をさらに減少させることができる。

我々は従来からNbの膜質を判断する指標として、膜の内部応力（以下、ストレスと記述する）を用いてきた。Nb膜のストレスと図6に示したような薄膜の構造には相関があると考えていて、膜のストレスの値からSIS接合に適したNbの膜質を判断してきた。図9に示すように、Nb膜のストレスは、成膜する時の放電電圧（以下、スパッタ電圧）に依存する。実際に従来から我々は、スパッタ電圧によってNb膜のストレスを制御して、リーク電流の小さいSIS接合の製作を実現してきた。

5.5 Nb膜のストレスのガス圧力依存性

ここで、スパッタ装置（CS200ET）で成膜する際のパラメータについて説明する。装置に入力する設定条件としては、放電電流と放電ガスの圧力の2つだけである。放電電圧は、電流と圧力の値によって決まるので、電圧を成膜条件のパラメータとする場合は、電流と圧力の条件で目的の電圧に制御することになる。現在は、電流値は4Aで常に固定しているので、ガス圧力の設定条件を変えて目的のスパッタ電圧に制御する。図9は、電流値を固定（4A）して、スパッタ電圧を振って、膜のストレス値を測定したものである。

Nb膜のストレス値をスパッタ電圧で制御して製作するということは、実際にはそれほど容易な

ことではない。それは、図9に示すように、スパッタターゲットの減少に応じて、スパッタ電圧と膜のストレスの関係が変化していくからである。頻繁にストレスの測定をするのも容易ではないが、結局、条件が変化し続けている限りは、毎回、同一の膜を作製することは、不可能である。

そのなかで、新しいSIS素子製作システムのスパッタ装置CS200ETの実験において、Nb膜の最適なスパッタ条件を容易に決める方法を見出すことができた。それは、図10に示すように膜のストレスが成膜時の放電ガス（Ar）の圧力に強く依存しているということであり、圧力値を一定にすることで、常に同じストレスの膜を作製できるということが明らかになった。図10は、電流値を固定（4A）して、放電ガス圧力を振って、膜のストレス値を測定したものである。つまり、このスパッタ圧力とストレスの関係は、スパッタ電圧には全く依存していない。

図9と図10は一見すると似たようなグラフであるが、大きな違いがある。図9が、数日間で、ストレスの測定を行ったデータであるのに対して、図10は約2年間の測定データである。図9のスパッタ電圧とNb膜のストレスの関係が、スパッタターゲットの減少とともに数カ月で大きく変化するのに対して、図10のスパッタ圧力とNb膜のストレスの関係は、約2年に渡っても変化していない。この結果が意味することは、我々はこれまで膜質（ストレス）をスパッタ電圧すなわち、スパッタされる原子の運動エネルギー（スパッタレート）のみで制御しようとしていたが、本質的には、膜質はスパッタ時のガス圧力によって決まっているということである。ガス圧力が高い方が平均自由行程は短くなり、スパッタされるNbは、Arガスと衝突して散乱しながら基板まで到達す

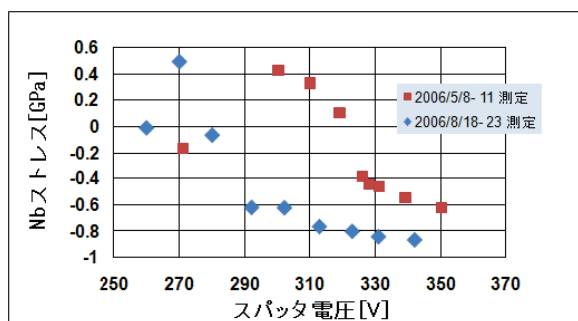


図9. スパッタ電圧とNb膜のストレス

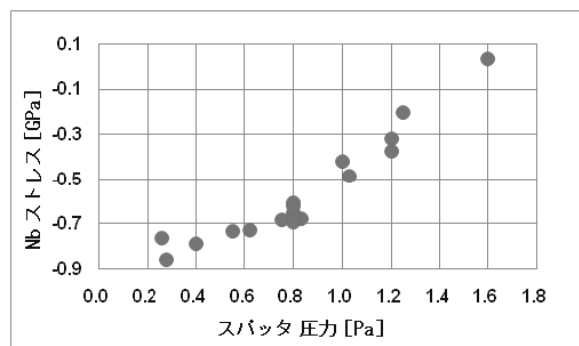


図10. スパッタ圧力とNb膜のストレス
(2007年2月～2008年11月の測定データ)

る。それによって、ガス圧力が低い場合と比べて、様々な方向から原子が基板に入射するので、膜としては緻密で様な結晶性の良い膜ができると考えられる。しかし、ガス圧力が高過ぎる場合には、スパッタされるNbはArガスと衝突を繰り返すので、基板に入射する原子の運動エネルギーが低くなり過ぎて、膜の結晶性は低下すると推測される。ガス圧力による原子の散乱の効果は、ターゲットと基板間の距離やチャンバーの構造、寸法によって決まっているので、同じスパッタ装置ではガス圧力と膜質の関係は常に一定と考えられる。

5.6 CS200ETによるSIS接合製作の安定性

表1にALMA Band 8素子におけるNb膜のスパッタ時のガス圧力とNbストレス、SIS接合のQuality Factorの関係を示す。圧力が0.8 から 1.2 Pa（ストレス -0.6 から -0.3 GPa）の範囲で、接合のQuality Factorが最も高い値17を示している。電流密度が約10 kA cm⁻²で、Quality Factor 17というのは、Band 8素子として必要な性能と言える。この結果は、接合のリーク電流がNbのストレスに大きく依存することを示していて、それは野辺山における過去の実績からも明らかなことである。

現在のCS200ETを使用したSIS接合製作において、驚くべきことは、Quality Factorの安定性である。Nbの成膜において、スパッタ電圧をパラメータとしていた時には、ストレス制御が不安定であるため、接合を作る度にQuality Factorが良かったり悪かったりしていた。それはCS200ETに限らず、野辺山のスパッタ装置でも同様である。それが、Nbの成膜のパラメータをガス圧力に変更してからは、これまで何十回と同じ圧力条件でSIS接合を作ってきたが、Nb膜のストレスのずれに起因するQuality Factorの有意な変化は全く見られない。すなわち、CS200ETでは、ガス圧力によるNb膜のストレス制御の再現性が極めて高く、Al原子のNb膜への拡散を安定して抑制で

きるということである。

したがって、表1に示すように0.8から1.2 Paの範囲がガス圧力の最適値であり、それに従って圧力条件を常に一定値に固定するだけで、受信機用ミキサ素子として十分な性能を示すSIS接合を、常時、安定して製作することが可能になった。

以上のことがCS200ETを用いた本実験で明らかになったことであり、これによって我々のSIS素子開発、製作の効率は飛躍的に向上した。

6. i線ステッパの解像性能

6.1 解像度のばらつき

i線ステッパCanon FPA3000 i5+の解像度の仕様は、線幅で0.35 μ mである。ALMAの受信機用のSIS素子で要求される解像度は、最も微細なパターンで ϕ 0.8 μ mであり、i5+はその要求を十分満たすと考えられた。実際に設置直後の解像度のテストでは、期待した解像性能を示していた。しかし、SIS素子の製作を続けていくうちに、露光した基板の面内で、解像度（転写したパターンのサイズ）にばらつきが発生するということが分かった。それはつまり、露光する際のフォーカス合わせが、ばらついているということである。例えば、 ϕ 1.2 μ mのSIS接合の場合、接合の面積に10%を超えるばらつき（ σ ）が発生する。基板面内の一部では、フォーカスが大きくずれていて、 ϕ 1.2 μ mのフォトレジスト（感光剤）が完全に消失して、接合が存在しない部分もできてしまう。

では、接合サイズにばらつきがあったとして、それがSIS素子の性能にどのような影響を及ぼすのだろうか。例えば、図11はBand 8ミキサの雑音温度測定の結果であるが、雑音温度100K以下がスペックとなっている。この結果を見ると、 R_n （接合の常伝導抵抗、接合面積に比例する）が11 Ω の素子と10 Ω の素子で、雑音温度に明白

表1. Nbのスパッタ時のガス圧力とストレス、SIS接合のリーク電流

Sample No.	B8_43_2	B8_46_7	B8_45_4	B8_46_3	B8_46_6
電流密度 [kA cm ⁻²]	10	11	11	9.5	11
Nb スパッタ圧力 [Pa]	0.16	0.4	0.8	1.2	1.6
Nb ストレス [Gpa]	-0.9	-0.8	-0.6	-0.3	0
Quality Factor (R_{sg}/R_n)	6	8	17	17	14

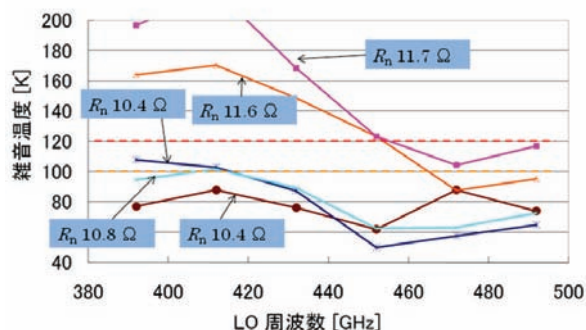


図11. ミクサの雑音温度測定

雑音温度とは、雑音電力が絶対温度 T (K) の抵抗が発生する熱雑音に等しいとして、その雑音を温度で表したものである。温度が低いほど雑音小さい。

な差が表れている。接合面積が変わると、抵抗と電気容量の値が素子の設計値からずれてしまう。図11の11 Ωと10 Ωの素子は、接合の容量では約12%の差がある。それによってミクサの共振周波数は約27 GHzほど高周波にシフトするが、この接合容量のずれだけでは、雑音温度の差は説明できないので、 R_n のずれがミクサの性能に大きく影響していると考えられる。これらの結果はBand 8ミクサの途中評価であるので、この素子における許容誤差は明らかではないが、接合の面積に10%以上のばらつきがあった場合に、ミクサの性能に影響して歩留まりが著しく低下する可能性があるということを示している。

6.2 ばらつきの原因

解像度のばらつきが発生する原因として、以下のようなことが推測された。

- ①フォーカス測定機構の不具合
- ②ソフトの設定上の不具合
- ③SIS素子基板の平坦度が悪い

①は、メーカーによって実施されたステップの設置検査と同様にφ3インチのシリコンウエハを使ってテストしてみれば分かる。結果としては、フォーカス機構に問題はなかった。②については、実際に正しくフォーカス計測ができていないという不具合が存在した。それは、この装置のソフトは元々φ3インチ基板用に作られているが、我々が使う基板はφ35mmの水晶基板であるため、シ

ョットレイアウト、フォーカス計測その他の設定でかなり無理をしていることが原因であった。当初は、これが解像度のばらつきの主要因であると考え、メーカーとともに原因の究明を行い、ソフトの設定をφ35mm基板用に最適化することができた。ところが、この不具合が解決しても、ばらつきにはほとんど改善が見られなかった。結論としては、解像度のばらつきは、③の基板の平坦度が悪いことで生じていて、表面に凸凹があるせいで、ある場所ではフォーカスが合い、ある場所ではフォーカスがずれるということが起きていた。

6.3 基板の平坦度

基板の平坦度が悪いという言い方には語弊があり、実際は基板ではなくて、基板を載せているφ3インチのトレイチャック(図12)に問題があった。このトレイは、φ35mmの基板を載せてφ3インチに変換するアダプタの役割をしているが、使用しているうちにトレイの表面にゴミが付着したり、トレイの表面の一部が削れたりして、表面の平坦度が劣化していると考えられる。基板

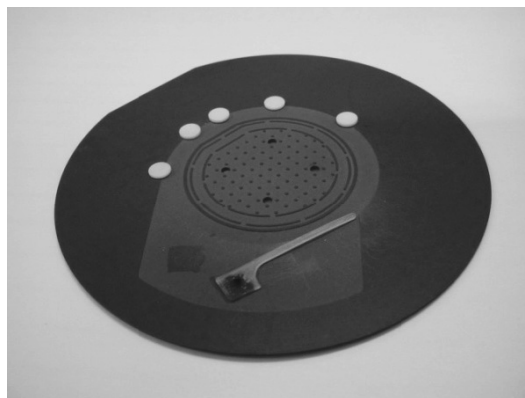


図12. φ3インチトレイチャック

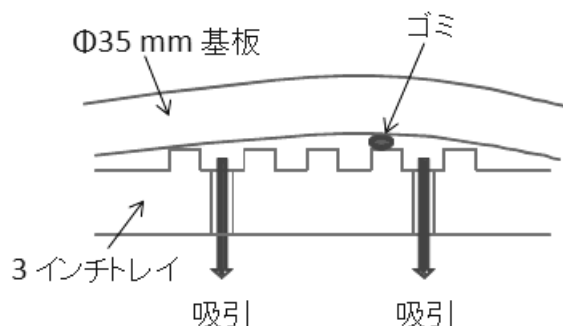


図13. φ3インチトレイチャック断面図

を露光する際には、トレイに開いた穴を通して下から基板を吸着するので、基板表面に図13のような凹凸が生じてしまうと推測される。したがって、ゴミの付着も含めたトレイチャック表面の平坦度の劣化によって、結果的にステップで露光する際の基板表面の平坦度が悪くなると考えられる。

i線ステッパのウエハ平坦度測定機能によって、3インチトレイチャックの上に35mm基板を載せた状態での平坦度測定を行った結果を図14に示す。平坦度は、約 $4\mu\text{m}$ 程度であり、推測通りの結果だった。

6.4 基板の3インチ化

実際の露光結果と平坦度測定の結果を見る限り、トレイチャックの上に基板を載せて露光すること自体が困難であると考えられた。そこで、トレイチャックを使わずに、基板そのもののサイズを3インチにすることを検討するため、 $\phi 3$ インチの合成石英基板を試作購入して実験を始めた。平坦度測定の結果を図15に示す。平坦度は約 $0.3\mu\text{m}$ であり、トレイチャックを使った場合と比べて、1桁良い結果だった。

この基板を使って、SIS接合を製作してみた。図16の走査型電子顕微鏡写真は、基板内のある1ショットの露光後のフォトリソトであるが、 $\phi 1\mu\text{m}$ 以下のパターンも理想通りの円柱状の形状でできている。問題となっているのは、基板面内のばらつきだったはずだが、電子顕微鏡で見える限りは、レジスト形状に関しては基板の全面でほぼ均一にできていることが確認された。接合の抵抗値（接合面積に比例する）で、接合サイズのばらつき（ σ ）を調べたところ、 $\phi 1.2\mu\text{m}$ の接合で約2%であり、10%以上あったばらつきを大幅に改善することができた。この結果から、 $\phi 3$ インチ基板を使うことによって、i線ステッパの本来の解像性能を引き出すことができることが確かめられた。

解像度に関しては、3インチ基板で何の問題もないが、国立天文台では、野辺山観測所でSIS素子製作をしていた時代からずっと35mm基板を使用してきたので、実験室のすべての装置が35mm仕様になっている。基板の寸法が変われば、製作治具も変更することになるので、それによって膜をスパッタする際の基板の温度が変わってしまい、それがSIS素子の性能に影響する懸念があっ

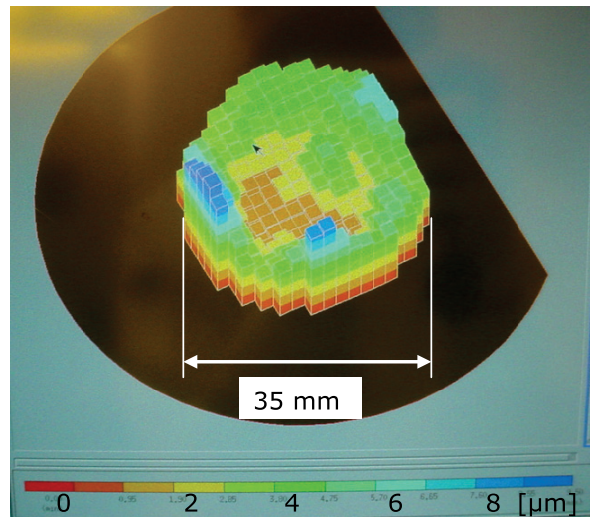


図14. 平坦度測定結果 $\phi 35\text{mm}$ 基板（3インチトレイ使用）

図中の色の違いが高さを表していて、平坦度は約 $4\mu\text{m}$ である。基板の端の盛り上がりは、位置決めピンに接触していることによるので無視する。

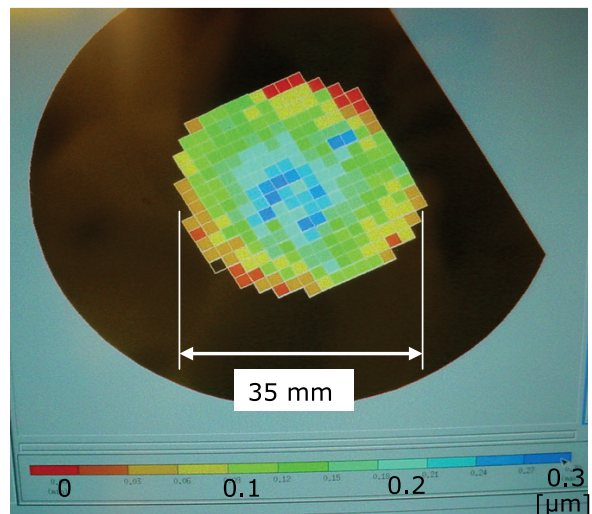


図15. 平坦度測定結果 $\phi 3$ インチ基板

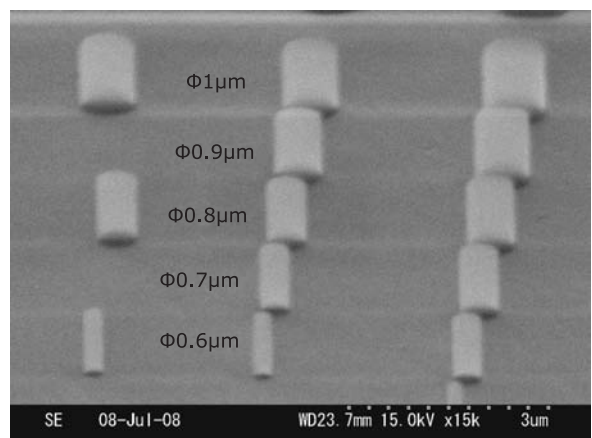


図16. 3インチ基板露光結果

た。しかし、実際に3インチ基板で製作したSIS接合のIV測定を実施したところ、35mm基板で製作したSIS接合と全く同じ特性を示すことが確かめられた。

以上の結果から、3インチ基板を使用することによって、接合サイズのばらつきの問題は解決して、ALMAのSIS素子の開発、量産に対してi線ステッパが十分な解像性能を持つことが実証された。

7. 新たな製作プロセス (via hole エッチング) の試み

SIS素子の製作において、SIS接合と配線のコンタクトを取るためには、何らかの方法で層間絶縁膜に穴（以下、via hole）を開ける工程が必要になる。我々は、先端技術センターに新しく導入されたi線ステッパとICPエッチング装置を用いて、via holeを、従来行っていたリフトオフ法ではなく、削って穴を開ける（エッチング）方法で製作することを試みた。図17にvia holeのリフトオフとエッチングによる製作工程の比較を示す。

従来から我々が行っているリフトオフという方法は、接合パターンフォトレジストの上に絶縁膜を堆積した後、アセトンに浸すことによってフォトレジストの溶解と同時に絶縁膜を取り除いて穴を開けるというものである。リフトオフで作製されるvia holeは、直径寸法が接合とほぼ同じである上に、絶縁膜を引き剥がすことになるために、絶縁膜と接合周囲の間の密着が不十分で隙間ができやすくなる。それによって、絶縁が不十分となり、接合の周囲で電流がリークする原因となる。その接合周りのリーク電流の対策として、従来から接合の周りに陽極酸化膜を形成する方法が用いられてきた。これは電解液（五ホウ化アンモニウム、エチレングリコール、水の混合液）に試料を浸して、接合周縁部のNbを陽極に通電して酸化Nb膜を作って絶縁するというものであり、この方法で接合周りのリーク電流をほぼ抑制することができる。

これに対して、via holeエッチングプロセスでは、接合の上に直接、絶縁層を堆積した後、絶縁層に接合直径よりも一回り小さい穴を開けるので、接合周りはしっかり絶縁されている。したがって、リフトオフのように絶縁のための陽極酸化膜を作る必要もなく、その分製作工程を短縮でき

る。この方法は、i線ステッパの高い解像性能とICPエッチング装置の優れたエッチング異方性によって実現が可能になったものである。

では、どちらの方法がより確実にvia holeを開けることができるだろうか。リフトオフの場合、

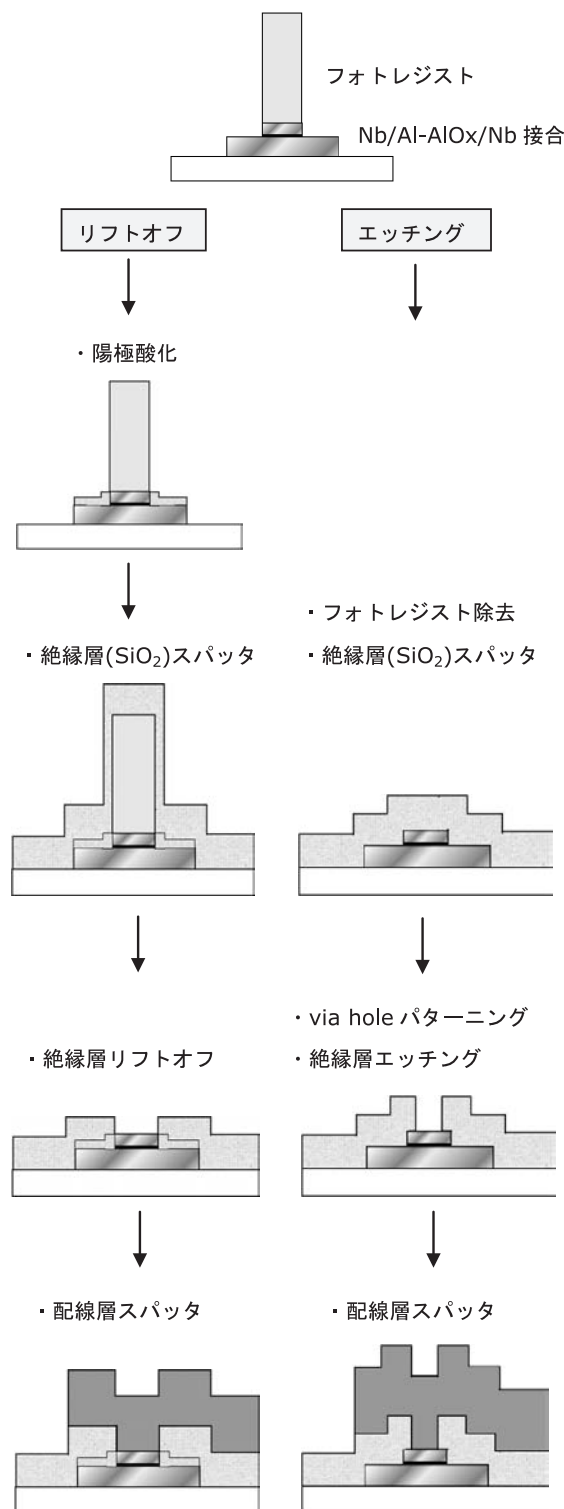


図17. via hole作製方法の比較

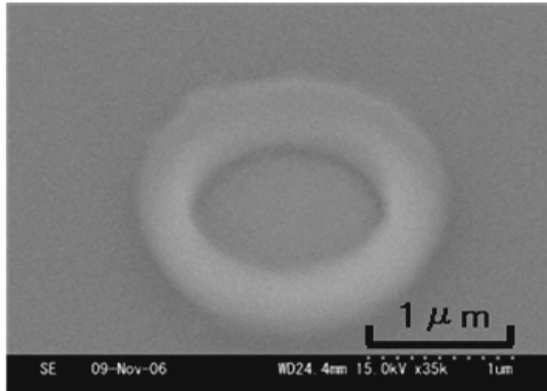


図18. via holeエッチング後の電子顕微鏡写真

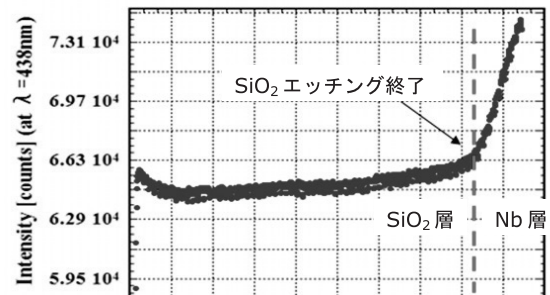


図19. via holeエッチングの分光測定

アセトンに試料を浸して、超音波洗浄やブラシで試料表面を擦るなどして、SIS接合上部の絶縁層を引き剥がすことになるが、それほど容易な作業ではなく、絶縁層が取りきれずに残ってしまって配線のコンタクトが取れない素子もできてしまう。

それに対して、エッチングの場合は、基本的には全ての素子の絶縁層が一様に削られるので、リフトオフのように所々で絶縁層が残るということは起こらない。実際にはウエハの真ん中と端で数%のエッチングレートの差があるが、それはオーバーエッチングで解決できるので、問題となるのはエッチングを停止するタイミングだけである。そこで我々は、浜松ホトニクス製プラズマプロセスモニタ (C7460) を使用して、エッチング終点の検出を行っている。この装置は、分光スペクトル測定装置であり、真空チャンバの窓に光ファイバケーブルの inputs を取り付けて、プラズマ光を分光器に入射させて CCD ラインセンサで光を検出して、光スペクトルをモニタすることができる。SiO₂ 絶縁膜のエッチング中に特定の波長の光をモニタして、光強度が大きく変化した点をエッチングの終点つまり SiO₂ 膜がなくなり Nb 膜のエッチングが始まった点と判定して、via hole のエッチングを停止する。図19に via hole エッチングの測定データを示す。

リフトオフ法の成否は、接合パターンのフォトリジストの形状に大きく左右される。露光解像度が貧弱な露光装置を使用していた時代は、レジストは図16のようなきれいな円柱状にはならず、図20のようになだらかな山型になってしまうことも多くて絶縁層のリフトオフは困難を極めた。露光に i 線ステッパを使用している現在では、昔

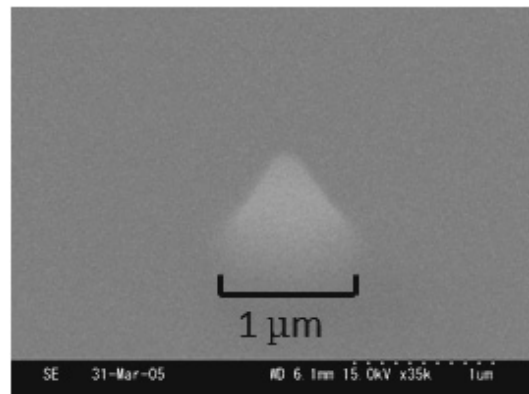


図20. g 線ステッパで露光した接合パターン

ほどリフトオフで苦労することはないが、穴を開けるという意味では不確実な方法なのは確かである。以上のことから、リフトオフ法よりもエッチングの方が via hole の開け方としては、より確実であると言える。

8. SIS素子の製作期間の短縮化による開発効率の向上について

我々は、SIS素子の製作効率の改善、製作期間の短縮化を、以下の項目を実施することで実現してきた。

- (1) 新しいスパッタ、エッチング装置の導入による真空排気効率の向上
- (2) i 線ステッパの導入による露光工程の自動化
- (3) 新しい製作プロセス (via hole エッチング) の導入による製作工程の減少
- (4) Nb 成膜時のガス圧力制御による膜質の安定化

新しい製作システムでは、基板1枚のSIS素子の製作を1日で完了することが可能になった。旧システムでは、製作におよそ2日かかっていたので、製作期間を2分の1に短縮したことになるが、単に製作期間が短くなったというだけでなく、それによって素子の開発効率は次に述べるように大きく向上した。

従来は、真空引きに時間がかかる上に、via holeエッチングの項で述べたように工程も現在のプロセスより多くて製作に時間がかかっていた。また、1つ1つの工程に時間がかかるため、複数の試料の製作を同時に進めなければどうしても効率が悪くなる。従来の製作装置、製作プロセスを用いた場合には、例えば、試料3枚を同時に進めたとして、製作、基板から素子の切り出し、ワイヤボンディング、IV特性の測定による評価まで含めて、約5日間必要である。SIS素子の開発を進めていく上では、複数の試料を同時に製作して、まとめて評価するよりも、短時間で1つの試料を製作、評価して、その結果を基に、次の試料を製作して、ということを繰り返す方が、はるかに効率的である。新しい製作システムでは、1日で基板1枚のSIS素子を製作することができて、IV特性の測定による簡易評価までを含めても1日強で終わるので、5日間で、基板4枚分の素子を連続的に評価することが可能である。これは、現在の製作システムが安定していて、実験の評価数量としては、試料1枚で十分であるということも示している。

新しい装置を用いた製作プロセスの構築に際しては、終始一貫して、製作作業の効率化、製作時間の短縮化を目指して進めてきた。それは、新しい装置の導入による自動化や真空引き効率の改善によって大いに進められたことは確かだが、一方で前述のNbスパッタ条件の固定化による作業効率の改善やvia holeエッチングプロセスの導入を初めとした製作プロセスの簡略化を意識的に進めてきたことが大きい。SIS素子開発、製作の効率化という目標に対しては、目覚ましい成果をあげることができた。

9. ALMA Band 8受信機用 SIS素子の開発と量産

Band 8のような高周波受信機において、周波数の比帯域を確保するためには、SIS素子の電流密度を高くしなければならない。電流密度を高くするためには、SIS接合の酸化アルミバリアを薄くする必要があり、それだけリーク電流が小さい接合を製作することが困難になる。Band 8 SIS素子の設計では、電流密度は約 10 kA cm^{-2} とかなり高いが、すでに述べた新しい製作システムにおいては、Quality Factor 15~20を示すリーク電流が小さいSIS接合を確実に製作することができる。しかし、電流密度の制御性においては、アルミニウム膜の酸化プロセスにまだ課題があり、±20%程度の誤差が生じる。

Band 8受信機用 SIS素子は、野辺山観測所の製作システムを用いて開発が進められて、すでにミクサの雑音温度のALMAのスペックを満たす素子も製作されていた。しかし、製作精度の問題で歩留りが悪く、量産に対応するのは難しかった。例えば、現在のBand 8素子の接合直径は、 $\phi 1.1 \mu\text{m}$ であるが、仮に設計より $0.1 \mu\text{m}$ 接合サイズが小さくなっただけで、接合の抵抗値 R_n は17%大きくなり、ミクサの共振周波数は約40 GHzずれてしまうので、スペックから外れる可能性が高い。我々が新しいシステムで目指してきたのは、量産に向けて、まずSIS素子を設計通りの寸法・構造で安定して製作することであり、製作寸法精度については、前述のように基板の3インチ化によって要求を満たすことができるようになった。

先端技術センターの新システムに移行してからは、露光解像度、パターンの位置合わせ精度の向上に伴って素子デザインが改良されて、接合サイズがより小さくなり、via holeエッチングプロセスが導入された。新システムで製作したBand 8 SIS素子を用いたミクサの雑音温度測定の結果を図21に示す。

図21のBand 8ミクサは、ALMAの雑音温度のスペック（100 K以下）を満たしている。素子を量産するには、作った素子がたまたまスペックを満たしたというのでは意味がなくて、確実に設計通りの寸法で素子を製作し、狙い通りにスペックを満たすことができないといけない。図21のミクサに搭載された素子に関しては、それを実現した結果であり、これがBand 8素子の量産デザ

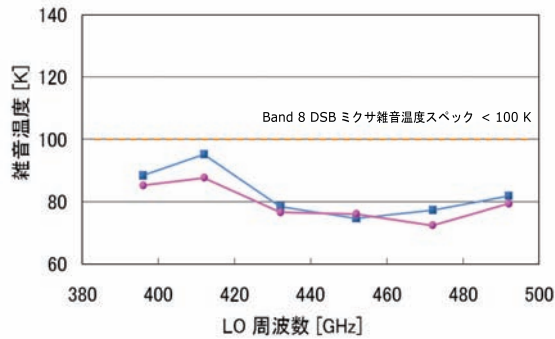


図21. Band 8 DSB ミキサ雑音温度

イン（電流密度 = 10.5 kA cm^{-2} , $R_n = 11 \Omega$, 接合サイズ = $\phi 1.1 \mu\text{m}$ ）となる。

ALMAの運用年数を30年程度として、受信機カートリッジの量産で必要となるSIS素子の数量は、30年分でおおよそ1000個程度である。基板1枚から取得できるSIS素子の数量と歩留まりは、素子の設計の余裕度と製作精度で決まってくるが、実際には、製作した素子を使ってミキサを十分に評価しなければ、SIS素子の量産デザインに対する許容誤差は明らかにはならない。Band 8 SIS素子は、まだミキサの雑音温度評価が十分に行われていないので、正確な歩留まりの議論はできないが、量産デザインの接合サイズを $\phi 1.1 \mu\text{m}$ として、接合面積で10%の誤差まで許容すると仮定した場合には、基板1枚あたりの取得素子数500個以上、基板1枚中の歩留まり90%程度は、実現可能な目標と考えている。

10. まとめ

先端技術センターのSIS素子製作システムの立ち上げに関しては、特に以下の3点が大きな課題であった。

- (1) スパッタ装置 CS200ETによる安定したSIS接合膜の形成
- (2) i線ステッパによる露光解像度
- (3) via holeエッチングプロセスの確立

(1) SIS接合については、リーク電流の小さい接合を常時安定して製作することができるようになった。また、Nbの膜質がスパッタ時のガス圧力に強く依存していることを実験から見出し、膜質の制御が容易になった。(2) i線ステッパは、当初は素子基板のトレイチャック表面の平坦度の

問題で解像度にばらつきが出ていたが、トレイチャックを使わずに、基板寸法を3インチ化することで、ばらつきの問題は解決した。(3) via holeエッチングは、実験によって問題なくvia holeを開けられることが確認されて、確実性の高い新しい製作プロセスを確立することができた。

これらの課題を克服したことによって、ALMAのBand 8 (385- 500 GHz), Band 10 (787- 950 GHz) のような高周波数帯受信機の高いレベルの要求にも対応することができるSIS素子の製作システムを立ち上げることができた。

また、製作システムを立ち上げるということは、そのままBand 8受信機のSIS素子の開発・量産にもつながっていく。本システムは、SIS素子の開発に止まらず、量産を目指してきたのであって、逆に言うと、設計通りのSIS素子を安定して量産することが可能になって、本当の意味で製作システムの立ち上げが完了したと言える。開発と量産で異なるのは、確実性である。新しい製作システムでは、SIS素子の安定性、確実性を大きく向上させることに成功した。Band 8 SIS素子に関しては、これまでに開発が完了し、量産デザインを決定して、量産に対応する体制を整えることができた。我々は、SIS素子の量産化に向けて、大きく前進したことになる。

謝辞

SIS素子製作システムの立ち上げにあたっては、SIS素子グループの木内洋子氏にご支援を頂きました。またBand 8受信機用SIS素子の開発に関しては、関本裕太郎氏よりご助言を頂きました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) J. A. Thornton: The microstructure of sputter-deposited coatings, *J. Vac. Sci. Technol. A* Volume 4, Issue 6, 3059-3065 (1986).
- 2) S. Morohashi, Y. Kataoka, T. Imamura and S. Hasuo: Secondary ion mass spectrometry study for Josephson junction with Nb/AlOx-Al/Nb structure, *Appl. Phys. Lett.* 62(10), (1993).