



操作マニュアル

IMM-200

蒸着モニター



INFICON

Two Technology Place

East Syracuse, NY 13057-9714

目次

1 商標、免責事項、および著作権	5
2 適合宣言	6
3 保証	7
4 概要と仕様	8
4.1 仕様	8
4.2 安全	11
4.2.1 注記、注意、警告、および危険の定義	11
4.2.2 一般的な安全情報	11
4.2.3 アース	12
4.3 サービスおよび技術サポート	13
4.3.1 カスタマーサポートへのお問い合わせ方法	13
4.3.2 INFICONサービスセンターへの発送	13
4.4 部品およびオプションの概要	13
4.4.1 オプションのマウンティングブラケットキット	14
4.5 初期電源投入時の確認	15
5 設置とインターフェース	17
5.1 センサーの種類と設置方法	17
5.1.1 センサーの種類	17
5.1.2 センサーの設置	17
5.2 電氣的干渉の回避	19
5.3 機器の接続	22
5.4 インジケーターとスイッチ	22
5.4.1 ステータスLED	22
6 特別な機能	24
6.1 はじめに	24
6.2 50/60 Hz 電源周波数	24
6.3 測定開始／停止	24
6.4 クリスタルタイプ	24
6.5 クリスタルライフと開始周波数	25
7 Ethernet通信	27
7.1 はじめに	27
7.2 IPアドレスの設定	27
7.3 プロトコル	27

7.4	IMM-200 P3Pメッセージの例	29
7.4.1	読み取り値の要求	29
7.4.2	値の書き込み要求	29
7.4.3	属性読み込み／書き込み要求 -コンビネーションメッセージ	29
7.5	IMM-200 PIDリスト	31
7.6	CRC計算	34
8	メンテナンスおよび校正手順	37
8.1	密度、ツーリング、Z レシオの重要性.....	37
8.2	密度を求める	37
8.3	ツーリングの決定	38
8.4	Z レシオの実験的決定	38
9	トラブルシューティングとエラーメッセージ.....	40
9.1	トラブルシューティング	40
9.2	センサーのトラブルシューティング	41
9.3	コンピューター通信のトラブルシューティング	45
10	測定理論.....	46
10.1	基礎	46
10.2	モニタークリスタル.....	46
10.3	周期測定技術	48
10.4	Zマッチ技術.....	49
10.5	アクティブオシレーター	50
10.6	ModeLock測定	52
11	付録A：材料テーブル	54

1 商標、免責事項、および著作権

商標

本操作マニュアルに記載されている製品の商標は、各製品の製造元が所有しています。

INFICON® は、INFICON Holding AGの登録商標です。

その他のすべてのブランド名および製品名は、各社の商標または登録商標です。

ソフトウェアの著作権

本製品には、以下の著作権により保護されている組み込みソフトウェアが含まれています：

Copyright INFICON Inc.

免責事項

本操作マニュアルに記載されている情報は、正確かつ信頼できるものであると確信しております。ただし、INFICONは本製品の使用について一切の責任を負わず、本製品の使用に関連して生じた特別損害、付随的損害、または結果的損害について、いかなる責任も負いません。

本製品は改良のため予告無く仕様を変更する場合があります。

著作権

©2026全著作権所有。

本書のいかなる部分も、許可なく複製または改編を行うことは法律によって禁じられています。

2 適合宣言



EU DECLARATION OF CONFORMITY

This declaration is issued under the sole responsibility of the manufacturer INFICON. The object of the declaration is to certify that this equipment, designed and manufactured by:

INFICON Inc.
Two Technology Place
East Syracuse, NY 13057
USA

is in conformity with the relevant Community harmonization legislation. It has been constructed in accordance with good engineering practice in safety matters in force in the Community and does not endanger the safety of persons, domestic animals or property when properly installed and maintained and used in applications for which it was made.

Equipment Description: IMM-200 Thin Film Deposition Monitor

Applicable Directives: 2014/35/EU (LVD)

2014/30/EU (EMC)

2011/65/EU (RoHS)

Applicable Standards:

Safety: EN 61010-1:2010 Safety Requirements for Electrical Equipment For Measurement, Control, and Laboratory Use.
Part 1: General Requirements

Emissions: EN 61326-1:2013 (Radiated & Conducted Emissions)
(EMC – Measurement, Control & Laboratory Equipment)
EN 55011:2009/A1:2010 Group 1, Class A
ICES-001 Issue 4 ISM emissions requirements (Canada)
FCC 47 CFR Part 18 Class A emission requirement (USA)

Immunity: EN 61326-1:2013 (General EMC)
Class A: Immunity
(EMC – Measurement, Control & Laboratory Equipment)

RoHS: Fully compliant

CE Implementation Date: February 26, 2020

Authorized Representatives:


Oliver Wyrsh
President, ISS


Hjalmar Bruhns, Ph.D.
VP of R&D, ISS

ANY QUESTIONS RELATIVE TO THIS DECLARATION OR TO THE SAFETY OF INFICON'S PRODUCTS SHOULD BE DIRECTED, IN WRITING, TO THE AUTHORIZED REPRESENTATIVE AT THE ABOVE ADDRESS.

3 保証

保証および責任 — 制限：販売者は、販売者またはその関連会社が製造し、販売者が販売する製品について、以下に定める保証期間中、通常かつ適切な使用および保守の下において、材料または製造上の欠陥がないことを保証します。各製品の保証期間は、当該製品に関する売主の取扱説明書に定めるところによりますが、売主による当該製品の出荷日から起算して2年を下回ることはないものとします。本保証に基づく販売者の責任は、当該製品の保証期間が満了してから30日以内に、送料着払いにて販売者の工場へ返送され、かつ販売者の検査の結果、不適切な設置や誤用によるものではなく、製造上の欠陥または材料の欠陥により正常に機能していないと認められた上記製品またはその部品に限定され、販売者の選択により、以下のいずれか一つに限定される。(a) 当該製品またはその部品を修理して返送すること、または (b) 代替製品またはその部品を提供することのいずれかであり、いずれの場合も送料は販売者が負担するものとします。買主は、製品が保証に適合しないことを発見または知った場合、直ちに、当該不適合の内容を合理的な詳細をもって特定した上で、書面により売主に通知するものとする。売主が当該書面による通知を受領しなかった場合、売主は、直ちに書面による通知が提供されていれば回避できたであろうそれ以上の損害について、一切の責任を負わないものとする。

本保証は、本契約に基づき販売される製品の瑕疵に対する買主の唯一の救済手段として、商品性、特定目的への適合性、その他いかなる明示的または黙示的な保証にも代わるものとして提供され、かつ受諾されるものです。契約、不法行為（過失を含む）、またはその他の事由に基づくか否かを問わず、売主のその他すべての義務および責任は、明示的に除外されます。いかなる場合においても、売主は、製品の欠陥に関するいかなる請求についても、買主が当該製品に対して支払った代金および前払いされた返送運賃の合計額を超える費用、経費、または損害（直接的か間接的かを問わず、特別損害、付随的損害、派生的損害、その他いかなる損害であっても）について、責任を負わないものとする。

売主は、売主の書面による取扱説明書に反して設置、使用もしくは操作された製品、または誤用、過失もしくは事故にさらされた製品、売主以外の者によって修理もしくは改造された製品、あるいは当該製品の設計意図とは異なる方法もしくは目的で使用された製品について、いかなる保証も行いません。また、買主により、または買主のために売主に提供された図面や指示に起因する欠陥についても、保証の対象外とします。

この取扱説明書はINFICON Inc.とその顧客による私的使用を目的としています。内容を複製する場合は、事前にINFICONに連絡してください。



本取扱説明書は、本装置の設置、操作または保守に関連して発生する可能性のあるすべての不測の事態に対応するものではありません。さらにサポートが必要な場合は、INFICONまでご連絡ください。

4 概要と仕様

主に物理蒸着（PVD）プロセスでの使用を想定して設計されたIMM-200は、薄膜のその場での蒸着レートと膜厚を測定するための蒸着モニターです。レートと膜厚は、露出された状態で振動する水晶振動子に付加される質量によって誘発される周波数変化から推定されます。この水晶振動子は、蒸着材料の蒸発源と対象基板の間または側面に配置されるセンサー本体に収められています。

ユーザーとの対話はリモート通信を介して行われ、パラメーターを選択または入力することで材料と機器の特性を定義します。完全なQCMシステムは、この電子ユニットと、水晶を内蔵したセンサーヘッドで構成されています。この操作マニュアルは、電子ユニットの設置、プログラミング、および操作に関するユーザー向け情報を提供しています。操作マニュアルを読むときは、本文中に出てくる「注」「注意」「警告」に特に注意してください。「注」「注意」「警告」の定義は、注記、注意、警告、および危険の定義 [▶ 11] に記載されています。

4.1 仕様

測定	センサー入力	1
	測定周波数範囲	6.0 MHz（新品のクリスタル）～4.5 MHz
	基準周波数安定性	±2 ppm 0～50°C
	周波数分解能	0.0035 Hz（100 ms当たり）
	レートおよび膜厚分解能	0.0042 Å（新品の水晶振動子）、0.0076 Å（水晶振動子が4.5 MHzのとき）、ATカット水晶振動子、材料密度 = 1.0 g/cm ³ 、Zレシオ = 1.0の場合、100 msサンプルに対して
	測定間隔	100 ms
	測定技術	ModeLock
構成パラメーター	材料名	29文字列
	Density	0.10～99.99 g/cm ³
	Z-Ratio	0.100～9.999
	ツーリング	1.0～999.9%
	水晶振動子のタイプ	AT、BT、SCおよびITカットに対応
	最大膜厚	0.000～9999.9 kÅ
	レートフィルター時間	0.0～30.0 s/0.1 s刻み
	アクティビティフィルター	0.0～10.0 s/0.1 s刻み
	AC電源周波数	0 = 50 Hz、1 = 60 Hz
リモート通信ステータス	タイムスタンプ	毎秒10回更新されるタイムスタンプチェックを示します
	タイムスタンプ警告	0 = なし、1 = 最大値におけるタイムスタンプ

	ユニットステータス	0 = 不明／エラー、1 = 測定、2 = アイドル、100 = 保留、101 = 保留、102 = 保留
	周波数	4.5 MHz～6.0 MHz
	ローレート	100 msごとに更新される測定レート（単位Å/s）
	フィルタードレート	100 msごとに更新されるレートフィルタ一時間について平均したローレート値
	膜厚	計算された厚さをkÅ単位で表記し、100 msごとに1回更新
	蒸着ステータス	0 = 厚さ < 最大厚さ、1 = 厚さ ≥ 最大厚さ、98 = 不明、99 = 測定せず
	アクティビティ	0～820
	水晶振動子の寿命	0～100%
	水晶振動子ステータス	0 = 初期化中、1 = 良好、2 = 最低限、3 = 失敗、98 = 不明、99 = 測定せず
	ユーザータイマー	64ビットの符号なし値（単位μs）
	通信ステータス	0 = なし、1 = 警告、デバイス応答なし、2 = エラー、デバイス応答なし
リモート通信コマンド	測定開始／停止	機器の周波数測定を開始または停止します
	膜厚をゼロに設定	材料厚さをゼロにします
	タイマーをゼロに設定	ユーザータイマーをゼロにします
	膜厚とタイマーをゼロに設定	厚さとユーザータイマーの両方を同時にゼロにします
	デフォルトパラメーター	すべてのパラメーター値をデフォルト値にリセットします
	パラメーターを保存	すべてのパラメーターを不揮発性メモリーに保存します
	チェックサムを計算	不揮発性メモリーに現在保存されているすべての書き込み可能な不揮発性パラメーターのチェックサムを計算します
通信	通信タイプ	Ethernet、1 x RJ45ジャック
	プロトコル	P3 Plus
	ケーブル長さ	<100 m
LEDインジケーター	ステータス	ユニットステータス
操作環境	使用場所	屋内使用のみ
	湿度	相対湿度85%以下（結露しないこと）
	温度	0～50°C（32～122°F）
	最大高度	最大2000 m

	設置（過電圧）	Category II per IEC 60664
	汚染度	2（EN 61010）
	保管温度	-10～60°C（14～140°F）
	清掃	中性の研磨剤を含まないクリーナーまたは洗剤を使用し、クリーナーがユニットに入り込まないように注意します
物理的寸法	サイズ	222.6 mm（8.76 in.） x 106.1 mm（4.18 in.） x 35.3 mm（1.39 in.）
	重量	0.48 kg（1.06 lb）
電源	入力電圧	24 V（dc）
	消費電力	12 W
	ヒューズ	30 V（dc）、2.5 A、内部、自己リセット
	短時間過電圧	CE要件による
	暖機時間	要求なし、最大限の安定性のために最長15分

4.2 安全

4.2.1 注記、注意、警告、および危険の定義

本書を使用するときには、「注記」、「注意」、「警告」、および「危険」に注意してください。本操作マニュアルの目的に合わせて、それぞれは、下記のように定義されています。



例えば、IMM-200の効率を最大化するのに役立つ関連情報。



⚠ 注意

このメッセージの内容を遵守しないと機器が損傷する危険性があります。



⚠ 警告

この記号は、重要な操作および保守（整備）に関する指示があることをユーザーに知らせるものです。



⚠ 危険

差し迫った危険、死亡、あるいは極めて重篤な傷害が生じる恐れがあります。



⚠ 危険

感電の危険

危険な電圧が存在しており、人身事故につながる恐れがあります。

4.2.2 一般的な安全情報



⚠ 危険

感電の危険性

本装置のケース内には、ユーザが修理できる部品はありません。致命的となる可能性のある電圧が存在します。保守はすべて有資格者に依頼してください。

**⚠ 注意**

製造元が指定していない方法で本製品を使用しないでください。

製造元が指定した方法以外で使用した場合、本機器の保護機能が損なわれるおそれがあります。

**⚠ 注意**

本装置には、過渡的な電力線電圧の影響を受けやすい繊細な回路が含まれています。インターフェースを接続するときは、必ず電源を切ってください。保守はすべて有資格者に依頼してください。

4.2.3 アース

シールド付きの3芯（3導体）電源ケーブルで、本装置をアースに接続します。保護アース端子のあるコンセントに接続してください。延長ケーブルを使用する場合は、保護アースを含む3芯ケーブルが必要です。ユーザが用意した電源を使用する場合は、電源コネクタにはシールドが必要で、そのシールドはACラインのアースに接続されていなければなりません。

**⚠ 危険****感電の警告**

保護接地回路を絶対に遮断しないでください。機器の内部または外部における保護接地回路の断線、あるいは保護接地端子の外しを行うと、機器の表面または内部に危険な電圧が発生するおそれがあります。

このシンボルは、本装置の内部で保護アースが接続されている場所を示します。絶対にこの接続を外したり緩めたりしないでください。



4.3 サービスおよび技術サポート

4.3.1 カスタマーサポートへのお問い合わせ方法

世界各国のカスタマーサポートに関する情報は、**お問い合わせ** のページ（www.inficon.com）でご確認いただけます：

- 営業およびカスタマーサービス
- テクニカルサポート
- 修理サービス

お使いの機器に関する不具合をご報告いただく際は、以下の情報を手元に用意しておいてください：

- 機器の部品番号およびシリアル番号
- 問題の説明
- これまでに実施された是正措置に関する説明
- エラーメッセージの正確な文言

テクニカルサポートについては、www.inficon.com にアクセスし、**お問い合わせ >> サービス&サポート**を選択してください。サポートの連絡先情報を確認するには、お住まいの地域と製品を選択してください。

4.3.2 INFICONサービスセンターへの発送

事前に返品承認番号（RMA番号）を取得しない限り、本機器のいかなる部品も INFICON サービスセンターに返送しないでください。RMAを取得するには、サービス リクエストフォーム <https://www.inficon.com/en/rma/> に必要事項を記入し、送信してください。

発送の際は、必ずRMA番号を同梱してください。RMA番号なしでサービスセンターに荷物を持ち込んだ場合、その荷物は一時保留となり、後日ご連絡いたします。その結果、機器の点検・整備に遅れが生じることになります。

INFICONでは、特定の化学物質が当社施設内に持ち込まれることを制限しています。お使いの機器が、当社の不承認リストに掲載されている化学物質にさらされた場合、サービスセンターから、製品を除染施設へ送付するよう指示されることがあります。

4.4 部品およびオプションの概要

IMM-200 部品番号785-602-G1

オプションの電源の部品番号

下記の電源の定格は、入力が100～249 V（ac）、2 A、50～60 Hz、出力が24 V（dc）、3.34 A、最大80 Wです。

部品番号	説明
961-021-G1	電源キット、米国、120 V
961-021-G2	電源キット、米国、4.5 m (14.8 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G3	電源キット、米国、9.0 m (29.5 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G4	電源キット、230 V
961-021-G5	電源キット、230 V、4.5 m (14.8 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G6	電源キット、230 V、9.0 m (29.5 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G7	電源キット、IL、240 V
961-021-G8	電源キット、IL、4.5 m (14.8 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G9	電源キット、IL、9.0 m (29.5 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G10	電源キット、英国、240 V
961-021-G11	電源キット、英国、4.5 m (14.8 ft.) 電源延長コード付き
961-021-G12	電源キット、英国、9.0 m (29.5 ft.) 電源延長コード付き

オプションの取付ブラケット部品番号

部品番号	説明
785-201-G1	IMM-200取付ブラケット、4つの取付フット付き（衝撃吸収、オス-メス、黒色のネオプレンラバー製）。
785-202-G1	IMM-200取付ブラケット、4つの取付フット付き（クリーンルーム対応衝撃吸収、メス-メス、ステンレススチール製）。

オプションの通信ケーブル部品番号

部品番号	説明
600-1190-P4	Ethernet通信ケーブル、長さ4.3 m (14.1 ft.)
600-1190-P8	Ethernet通信ケーブル、長さ7.6 m (24.9 ft.)
600-1190-P15	Ethernet通信ケーブル、長さ15.3 m (50.2 ft.)

4.4.1 オプションのマウンティングブラケットキット



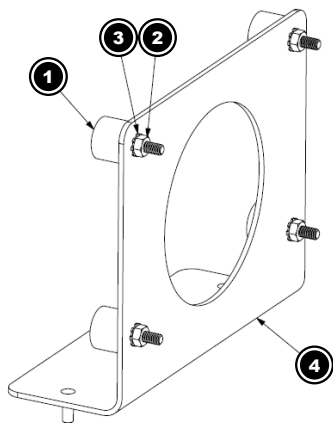
⚠ 警告

オプションの取付ブラケットキットは、壁や天井に取り付けるためのものではありません。

取付ブラケットが壁や天井から落下して人に当たると、怪我をする恐れがあります。

振動の激しい環境では、防振取付フット付きのオプションの取付ブラケットを使用することで、IMM-200に対する振動の影響が大幅に低減されます。

オプションの取付ブラケットとネオプレン製取付フットを下図に示します (PN 785-201-G1)。番号1がネオプレン製取付フット070-2104、番号2がステンレススチール製M4六角ナット、番号3がステンレススチール製M4内歯ロックワッシャーで、番号4が取付ブラケットです。



取付ブラケットは任意の向きに配置でき、IMM-200 と取付ブラケットの合計重量 (約 0.68 kg (1.5 lb.)) に耐えられる、壁および天井以外の任意の面に取り付けることができます。



⚠ 注意

IMM-200 を固定位置に取り付ける際は、必要な場合に電源コードの接続を外すための十分な空間があることを確認してください。

PN 070-2104はネオプレンを含有しています。IMM-200 と取付ブラケットをクリーンルームに取り付ける際に、ネオプレンがクリーンルームに適合しない場合は、ステンレススチール製衝撃吸収取付フット (PN 785-202-G1) 付きの取付ブラケットを使用することができます。

4.5 初期電源投入時の確認

IMM-200を設置する前に、事前機能チェックを実施することができます。これを行うために、センサーや通信ケーブルを接続する必要はありません。

緑色の機器 **Status** ライトを使用して、ユニットが正しく動作しているか、または故障状態であるかを識別します。

に記載されている定格出力**Power**を持つ、ユーザーが用意した電源装置を使用して、24 V (直流) を電源コネクタに接続してください。

INFICON では、IMM-200への電源接続に、Kycon社製コネクタ (品番: KPPX-4P) の使用を推奨しています。ピン3および4は+24 V (dc)、ピン1および2は接地です。ユーザー供給電源を使用する場合は、必ず24V電源ケーブルのコネクタースヒールドが、ユーザー供給電源を介してコンセントの保護接地端子に接続されなくてはなりません。

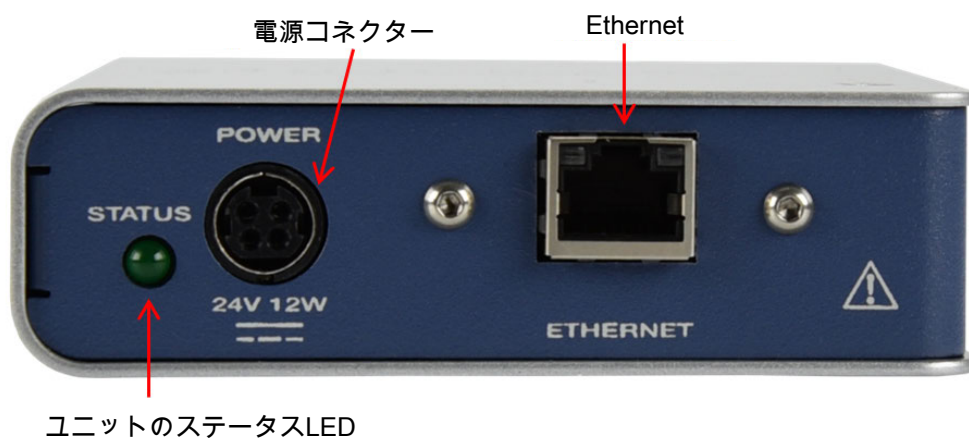


適切な水晶振動子が接続されている場合は、**Status**が点灯し続けます。このステータスは、IMM-200の正常な動作を示します。適切な水晶振動子が接続されていない場合は、**Status** LEDが1秒間点灯して1秒間消灯し、水晶振動子の不具合を示します。**Status** LEDの点滅パターンが1秒間点灯、4秒間消灯の場合、IMM-200は**Idle**状態です。

Status LEDが以下の点滅パターンの場合、エラーが存在しているので INFICONにお問い合わせください。INFICONサービスにお問い合わせされるときは、お問い合わせ方法を参照してください。

LEDの状態	説明
0.5秒間点灯、0.2秒間消灯、0.5秒間点灯、1秒間消灯	無効なファームウェアまたはPOST不具合

Status LEDが消灯している場合、適切な電源がIMM-200に接続されていることを確認してください。適切な電源が接続されているにもかかわらずLEDが消灯し続ける場合は、INFICONサービスにお問い合わせください。



⚠ 警告

機器のケースを開けないでください。機器のケース内にユーザーがサービス可能なコンポーネントはありません。電源が通じているときは、常に危険な電圧が存在している可能性があります。すべてのメンテナンスは、資格を持った担当者に依頼してください。

この記号 ⚡ は、IMM-200内部の保護接地接続の位置を示しています。この接続は決して取り外したり弛めたりしないでください。

5 設置とインターフェース

IMM-200を恒久的に設置する前に、この章全体をお読みください。推奨事項にできる限り忠実に従ってください。INFICONは、装置がさまざまな厳しい状況においても確実に作動するように多くの対策を講じています。これらの簡単な実施基準に従わない場合は、IMM-200の性能と耐用年数に悪影響が及ぶことがあります。

注記

IMM-200を固定位置に取り付ける際は注意してください。必要な場合に電源コードの接続を外すための十分な空間があることを確認してください。

5.1 センサーの種類と設置方法

5.1.1 センサーの種類

センサーの種類の設定は、プロセス、蒸着材料、およびプロセスチャンバーの物理的特性によって決まります。INFICON 社が製造する各センサータイプに関する一般的なガイドラインは、INFICON のウェブサイトに掲載されている「センサーデータシート」に概要が記載されています。具体的な推奨事項については、INFICON の担当者にお問い合わせください。

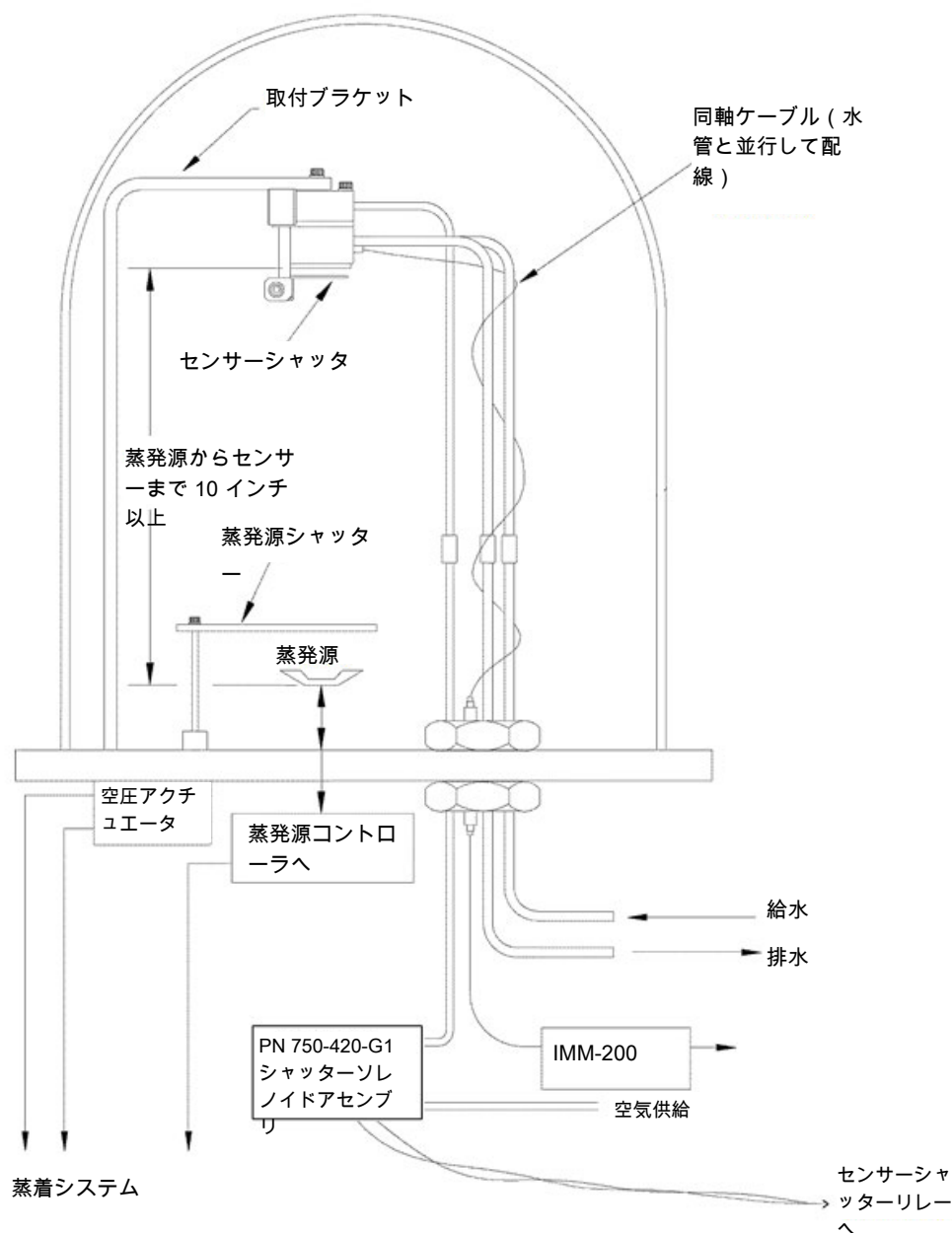
⚠ 注意

IMM-200 の性能は、選択したトランスデューサーを慎重に設置するかどうかによって左右されます。

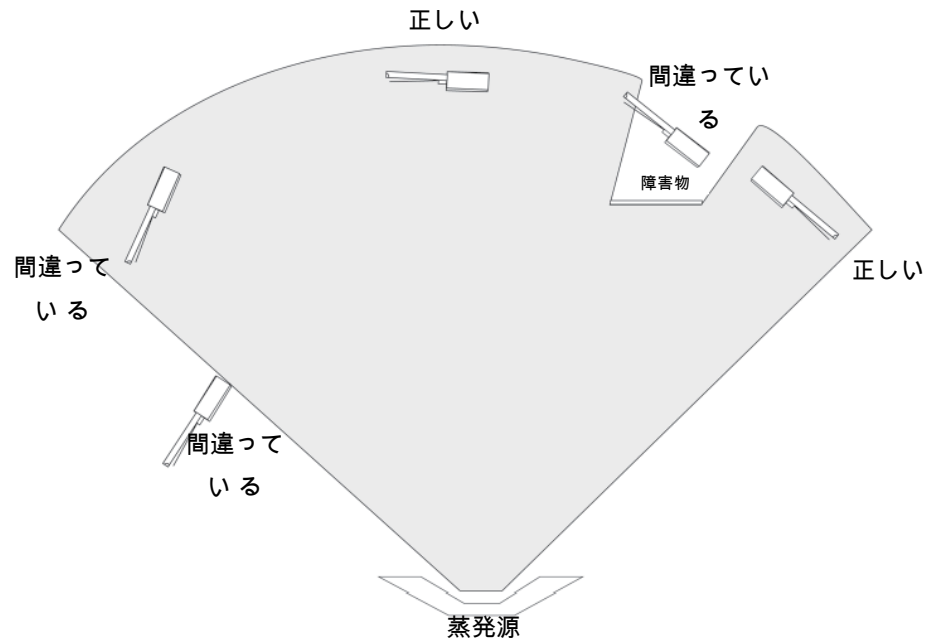
センサーの種類の設定は、プロセス、蒸着材料、およびプロセスチャンバーの物理的特性によって決まります。

5.1.2 センサーの設置

下図は、真空プロセスチャンバー内における。INFICON水冷式結晶センサーの代表的な設置例を示しています。最適な性能と使いやすさを実現するために、図と以下のガイドラインを参照してセンサーを取り付けてください。



一般的には、基板上への堆積に比例したレートで膜厚が堆積する位置を保ちつつ、センサーを蒸発源から可能な限り離して（最低25.4 cm（10インチ）を推奨）設置してください。センサーを適切に配置するには、水晶振動子の表面が蒸発源に対して垂直になり、材料のフラックスプルーム内に位置し、かつ蒸発源への視線が遮られないようにする必要があります。



飛散を防ぐため、初期のソーク期間中は、蒸発源シャッターまたは水晶振動子シャッターを使用して水晶振動子を保護してください。たとえごく微細な溶融物質の粒子が水晶振動子に付着しただけでも、水晶振動子が損傷して発振が停止するおそれがあります。発振が完全に停止しない場合でも、発振が不安定になる可能性があります。以下の注意事項に従ってください:

- センサーを、チャンバー内の堅固で固定された物体に取り付けてください。水冷管をセンサーの支持に使用しないでください。
- センサーと蒸発源の間の経路を遮る障害物がないよう、設置計画を立ててください。また、回転または移動する治具についても必ず考慮してください。
- センサーを設置する際は、その中心軸（水晶振動子面の中心に立てた法線の仮想線）が、監視対象となる仮想蒸発源をまっすぐ向くようにしてください。
- 水晶振動子の受け渡しができるよう、アクセスが容易であることを確認してください。

同時蒸発（同時蒸着）を採用するシステムでは、各蒸発源からの蒸発物質が1つのセンサーのみに流れ込むように、センサーを配置してください。特別なシールドやオプションの「マテリアルディレクター」（品番 750-201-G1）なしでは、通常、これを行うことはできません。

5.2 電氣的干渉の回避

設置時に基本的な電気に関する指針を慎重に考慮することで、電気ノイズに起因する多くの問題を回避できます。必要なシールドおよび内部接地を維持し、安全かつ適切な動作を確保するため、IMM-200 は、すべての筐体カバー、サブパネル、およびブレースを取り付けた状態で、付属のネジや留め具で完全に固定して使用する必要があります。

接地の確認・設置

接地を行う必要がある場合は、以下の手順を推奨します。

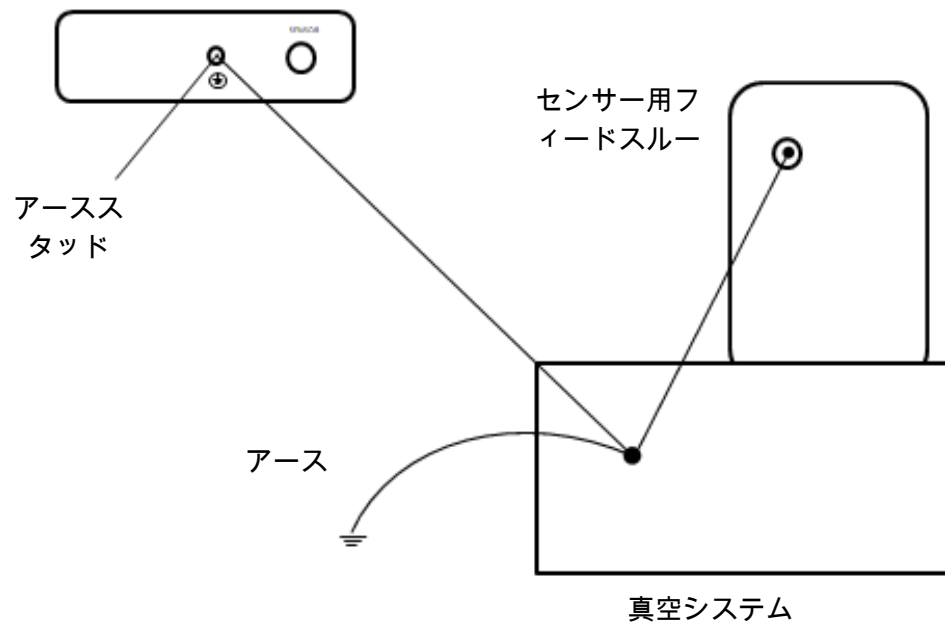
- ▶ 土壌の状態が許す場合は、長さ10フィートの銅被覆鋼棒を2本、6フィート間隔で地面に打ち込んでください。接地の導電性を高めるために、各ロッドの周囲に硫酸銅または塩溶液を注ぎます抵抗値がほぼゼロと測定された場合は、接地が確立されていることを示しています。

⇒ この接地ネットワークへの接続は、できるだけ短くしてください。

接地への接続

必須の接地接続は2つあります：

1. IMM-200の接地接続部は、六角ナット付きのネジ付きスタッドです。リング端子を接地ストラップに接続し、確実な接続を確保するとともに、取り外しや取り付けが容易になるようにします。この接続は、設置時に必ず行ってください。高周波ノイズに対して最大の保護を得るには、接地導体の縦横比が5：1を超えないようにしてください。図に示すように、接地ストラップをIMM-200から真空システムに接続してください。



2. 機器は、24V電源ケーブルを介しても接地に接続されます。電源は、密閉型の3芯電源ケーブルを介して接地に接続されており、このケーブルは、保護接地端子を備えたコンセントに差し込む必要があります。延長コードには、必ず保護接地端子を含む3本の導線が備わっていなければなりません。

ユーザー供給電源を使用する場合は、必ず24V電源ケーブルのコネクターシールドが、ユーザー供給電源を介してコンセントの保護接地端子に接続されなくてはなりません。



⚠ 危険

感電の警告

保護接地回路を絶対に遮断しないでください。機器の内部または外部における保護接地回路の断線、あるいは保護接地端子の外しを行うと、機器の表面または内部に危険な電圧が発生するおそれがあります。



この記号は、IMM-200内部の保護接地接続の位置を示しています。この接続は決して取り外したり弛めたりしないでください。



⚠ 注意

正しい運転を行うために、特に電氣的ノイズが多い環境においては、外部接地接続が必要です。

RF電源を使用するスパッタリングシステムと一緒に使用する場合、具体的な状況に応じて接地方法を変更しなくてはならない場合があります。H.D. Alcaide 氏による、「接地とRFI防止」をテーマとした有益な記事が、“Solid State Technology,” 誌1982年4月号の117ページに掲載されています。多くの場合、編組の接地ストラップで十分です。ただし、RFインピーダンスが低いため、膜厚0.8 mm×幅25.4 mm (0.030インチ×1インチ) の銅の無垢ストラップが必要となる場合もあります。

外部ケーブルからのノイズ混入を最小限に抑える

IMM-200が蒸着システムに完全に組み込まれると、多数の配線接続が生じる場合があります。各接続部は、電気ノイズがIMM-200の内部に侵入する可能性のある経路となります。以下のガイドラインに従うことで、これらの配線が問題を引き起こす可能性を大幅に低減することができます：

- すべての接続には、シールド付き同軸ケーブルまたはツイストペアケーブルを使用してください。
- ケーブルの長さをできるだけ短くしてください。
- 干渉が強く発生する可能性がある場所の近くには、ケーブルを配線しないようにしてください。例えば、電子ビーム銃やスパッタリング源などに使用されるような大型の電源は、大きくかつ急速に変化する電磁界の発生源となり得ますこのような問題のあるエリアからケーブルを最低でも30 cm (1 ft.) 離すことで、ノイズピックアップを大きく低減することができます。

- 推奨事項 電氣的干渉の回避 [▶ 19]に従って、適切な接地システムとストラップが確実に設置されていることを確認してください。
- すべてのIMM-200カバーが所定の位置に設置され、付属の留め具でしっかりと固定されていることを確認してください。



IMM-200に接続する際は、常にシールド付きケーブルを使用し、電気ノイズの混入を最小限に抑えてください。

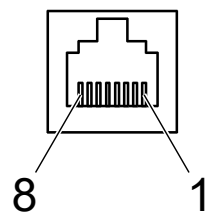
5.3 機器の接続

IMM-200を操作するには、Ethernet規格に準拠したインターフェースケーブルが必要です。

ケーブルが利用できない場合は、以下の手順に従って作成することができます。

ケーブルタイプ：FCC68コネクタを備えるEthernetシールドパッチケーブル（CAT5eと同等以上の品質）。

ピン配列



ピン	信号	説明
1	TD+	送信データ +
2	TD-	送信データ -
3	RD+	受信データ +
4	nu	未使用
5	nu	未使用
6	RD-	受信データ -
7	nu	未使用
8	nu	未使用

5.4 インジケータースイッチ

5.4.1 ステータスLED

緑色のLEDはユニットのステータスを表示します

LEDの状態	説明
ブートローダーのフラッシュ 1 (0.4秒点灯、 0.4秒消灯)	正常。有効なファームウェアバージョンがインストールされています。
ブートローダーのフラッシュ 2 (0.2秒点灯、 0.2秒消灯)	古いファームウェアが上書きされています。新しいファームウェアがダウンロードされ、整合性チェックに合格しました。
ブートローダーのフラッシュ 3 (0.5秒点灯、 0.2秒消灯、 0.5秒点灯、 1秒消灯)	ファームウェアが無効です。
オフ	本機は診断モードになっているか、エラーが発生しているか、あるいは電源が供給されていない状態です。
点滅 (1秒点灯、 4秒消灯)	本機はアイドルモードになっています。
点滅 (1秒点灯、 1秒消灯)	本機は測定モードにあり、水晶振動子の故障が検出されました。
オン	本機は測定モードにあるか、起動中に正常に動作しています。

6 特別な機能

6.1 はじめに

ロータリーセンサーヘッドを持つシステムへより容易な統合を可能にするために、IMM-200には特別な機能が備わっています。こうした特別な機能は、以降のサブセクションにおいて詳しく説明されます。

IMM-200。こうした特別な機能は、以降のサブ

6.2 50/60 Hz 電源周波数

「AC電源周波数」設定パラメーターは、IMM-200 に対して商用電源の周波数を特定することで、測定システムのノイズを最小限に抑えるために使用されます。50 Hzと60 Hzの電源周波数の違いは、測定回路のタイミングにわずかな影響を与えます。ほとんどの場合、これは無視できる程度です。ただし、材料密度や蒸着レートが非常に低い場合は、このパラメーターの値を商用電源の周波数に合わせて設定することで、IMM-200 の測定結果が最適化されます。

6.3 測定開始／停止

リモート通信コマンド **測定の開始/停止** は、IMM-200 に対して、周波数の測定を開始するか、または周波数の測定を停止するよう指示するものです。測定停止コマンドが送信されると、ユニットはアイドル状態になります。このコマンドは、回転式センサーヘッドを使用する際に非常に便利です。IMM-200 はロータリーヘッドのインデックス制御を行わないため、水晶振動子の切り替えが実行されているかどうかを把握する手段がありません。したがって、水晶振動子の切り替えが行われるたびに、水晶振動子の切り替えの最中に電氣的接触が途絶えた後に水晶の故障が発生します。

測定停止 コマンドが実行されると、IMM-200 は水晶信号の検出を停止します。これにより、水晶の故障が発生することなく、ロータリーヘッドを次の位置にインデックス移動させることができます。ロータリーヘッドが次の位置に到達すると、**測定開始** コマンドが発行され、装置は水晶信号を検出します。水晶振動子の周波数が取得されると、IMM-200 はレートと膜厚の計算を再開します。膜厚の値は、前の水晶振動子の最後の膜厚の値から増加し始めます。使用される値は、IMM-200が **Stop Measurement** コマンドを受信する直前に記録された値です。基板上の蒸着膜厚の誤差を低減するためには、**Stop Measurement** コマンドと **Start Measurement** コマンドの実行間隔をできるだけ短くする必要があります。

6.4 クリスタルタイプ

IMM-200では、石英の異なる水晶振動子の方位からカットされた水晶振動子を使用することができます。これらはATカット、BTカット、SCカット、またはITカット水晶振動子と呼ばれますこれらの異なる水晶振動子の切断面を伝播する膜厚せ振動モードの波は、それぞれ異なる音速を持ちます。文献で一般的に見られる典型的なZ レシオの値は、ATカット水晶の音響インピーダンスに基づいて正規化されています。

膜厚を正しく計算するには、使用している水晶振動子のに合わせて水晶振動子の種類を選択する必要があります。

- ATカットの水晶振動子の** ATカット水晶振動子のは、膜厚を測定するための重量式センサーとして広く使用されています。これらは単回転水晶振動子であり、二重回転水晶振動子のよりも安価です。ATカット水晶振動子の群の周波数対温度曲線には、室温付近に反転点があるため、室温またはその付近での動作が求められる用途に最適です。ATカット水晶振動子の周波数は熱放射パルスや加速度の影響を受けやすい一方で、その品質（Q因子）に対する大気負荷は、SCカットやITカットの水晶振動子のよりも小さい。
- BTカットの水晶振動子の** BTカット水晶振動子の周波数-温度特性は、反転のない2次多項式形状を示します。これらの水晶振動子の応力係数は、ATカット水晶振動子の応力係数と等しく、かつそれとは逆の向きである。言い換えると、BTカット水晶振動子に蒸着された張力膜では、ATカット水晶振動子上の同じ膜とは反対の方向に周波数がシフトします。
- SCカットの水晶振動子の** SCカットの水晶振動子のは、ATカットの水晶振動子のに比べて高価です。SCカット水晶振動子は、極めて安定した共鳴周波数を持ちます。その周波数-温度の反転点が約93°Cであり、これはオープン温度に近いことから、OCXOへの採用が有望視されています。この種の水晶振動子の共振周波数は、加速度に対する耐性が非常に優れています。その加速度感度は、ATカット水晶振動子のに比べて約2桁低い。TCXO（温度補償型水晶発振器）（クロック）の共振回路には、ほぼ例外なくこうした水晶が搭載されています。
- ITカットの水晶振動子の** SCカット水晶振動子と同様に、ITカット水晶振動子は、他のカットに比べて周波数温度反転点が高いため、OCXO（恒温槽付水晶発振器）に使用されます。ITカット水晶振動子は、約75°C付近で周波数-温度反転を示します。ITカット系とSCカット系はいずれも、高温での薄膜蒸着用途に最適です。より高い温度、例えば100~300°Cでは、ITカット水晶振動子とSCカット水晶振動子はいずれも、ATカット水晶振動子と比べて周波数温度係数が低くなります。

6.5 クリスタルライフと開始周波数

水晶振動子の寿命は、IMM-200が許容する1.50 MHzの周波数シフトに対するモニター水晶振動子の周波数シフトの割合（%）として報告されます。この数値は、蒸着中の水晶振動子の故障を防ぐために、いつ水晶振動子を交換すべきかの目安として役立ちます。

新たに装着された水晶振動子の場合、水晶振動子の寿命は0~5%です。多くの場合、新品の水晶振動子は、水晶振動子製造時のプロセスばらつきのため、周波数は正確に5 MHzまたは6 MHzではありません。新品の水晶振動子が5%ライフ消費を示す場合、それは、水晶ブランクが通常よりもわずかに厚い（より高い機械的耐久性）か、電極が通常よりもわずかに厚い（より優れた温度特性と電気特性）かのいずれか、または両方であることを意味します。この余分な膜厚は、開始周波数が5 MHzまたは6 MHzの定格値よりも低くなる原因となります。初期振動周波数が低いにもかかわらず、水晶振動子の性能に悪影響は生じない。このような低い開始周波数の水晶振動子をテストした結果、3~5%ライフ消費を示す新品の水晶振動子は、0~2%ライフ消費を示す水晶振動子より優れているとは言わないまでも、同じくらい良いことが示されています。

蒸着された材料が水晶振動子に付加されることで、水晶振動子の寿命（%）は最大100%まで増加します。通常、モニター用水晶振動子を水晶振動子の寿命の100%まで使用するのは不可能です。通常、水晶振動子の寿命が一定量消費されると、水晶振動子は交換されます。水晶振動子の有効寿命は、蒸着される材料の種類と、その結果としてその材料がモニター用水晶振動子に及ぼす影響によって決まります。銅など、低応力で水晶振動子に強固に密着する材料の場合、水晶振動子の寿命が約100%になると、モニター用水晶振動子固有の品質（Q）は、鋭い共振を維持することが困難になるところまで劣化し、モニター用水晶振動子の周波数を測定する能力が低下します。誘電材料や有機材料を蒸着するとき、金、アルミニウム、または銀を電極とするモニター用水晶振動子の寿命は、わずか10～12%とかなり短くなります。これは、石英と誘電体膜の界面における熱応力および固有応力によるものであり、膜の機械的強度が低いことによって、これらの応力がさらに増大しています。多くの有機材料は非剛性膜として堆積するため、水晶振動子のQが急激に低下する。これらの材料の場合、石英の耐用年数の割合は、モニター用水晶の故障とはほとんど関係がありません。

7 Ethernet通信

7.1 はじめに

IMM-200 は、IMM-200 とホストコンピューター間のすべての通信に、Ethernet通信インタフェースを使用します。通信には、計算されたCRCエラーチェック機能を備えたINFICON P3Plusプロトコルが使用されています。

7.2 IPアドレスの設定

IMM-200 Ethernetの設定は、以下のURLからダウンロードできるLantronix DeviceInstaller Windowsアプリケーションを使用して設定できます：<https://ltrxdev.atlassian.net/wiki/spaces/LTRXTS/pages/106070471/Latest+version+of+DeviceInstaller>。本製品には、サードパーティ製のソフトウェアが含まれています。INFICONは、サードパーティ製ソフトウェアコンポーネントの更新、アップグレード、または保守について、一切の責任を負いません。

IPアドレスを設定するには、いくつかの方法があります。これらはすべて、XPortデバイスのユーザーガイドに記載されています。

IPアドレスがすでにわかっている場合は、ブラウザに入力してください。ログインダイアログのプロンプトが表示されます。IMM-200 は、ユーザー名とパスワードの両方が未設定／空の状態出荷されていますので、それらを空白のままにして、**OK**をクリックしてログインしてください。IMM-200 の IP アドレスは、**ネットワーク**にあります。「リモートホスト」 ([チャンネル 1] | [接続] 内) の IP アドレスが、新しい IP アドレスと同じサブネットに設定されていることを確認してください。使用されることはありませんが、IPは互換性がある必要があります。

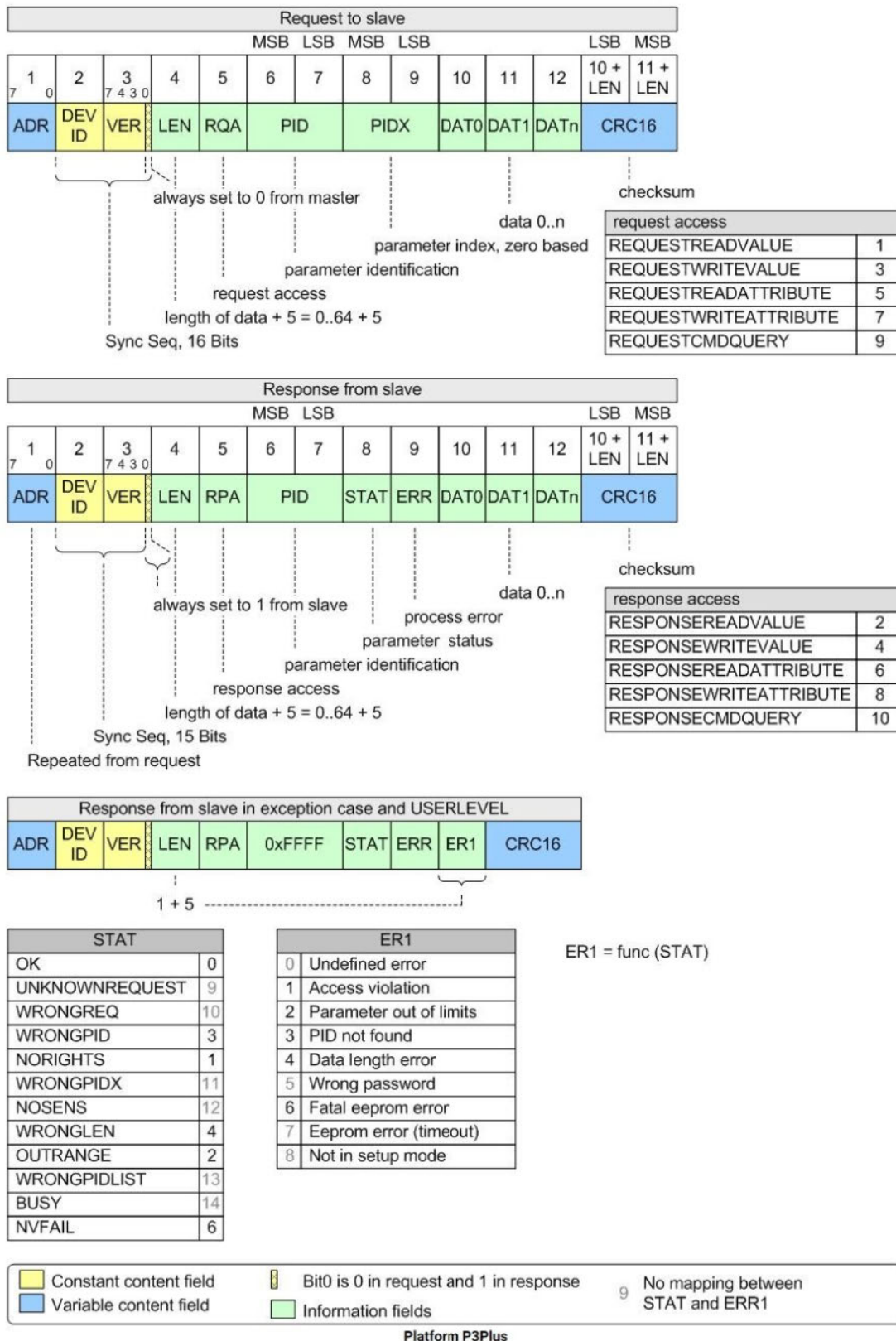
IPアドレスが不明な場合、デバイスにアクセスする最も簡単な方法は、Lantronix DeviceInstallerアプリケーションをインストールすることです。ネットワーク上のすべてのLantronixデバイスを検出します。Ethernetモジュールの工場出荷時のデフォルト設定では、IPアドレスは192.168.1.101、サブネットマスクは255.255.255.0に設定されています。DeviceInstaller は、ネットワーク上で多数の Lantronix デバイスを検出する場合があります。IMM-200 は XPort-05 を使用しています。変更対象のXPort デバイスを選択したら、アプリ内の **Web設定** を使用するか、または（既知のIPアドレスを使用して）ブラウザから直接アクセスしてください。

7.3 プロトコル

IMM-200は、P3Plus (P3P) 通信プロトコルを使用しますが、以下の点にご注意ください：

- ADRバイトは評価されません (0に設定)
- ADRバイトはCRC計算に含まれます
- スレーブへの**要求**において、DEV IDはスレーブにより無視されます。
- スレーブからのすべての**応答**について、DEV IDはスレーブにより129 (0x81) に設定されます。

- PIDXは無視されます (0に設定)



7.4 IMM-200 P3Pメッセージの例

7.4.1 読み取り値の要求

材料密度取得 RQA = 1 (要求された読み取り値)
PID = 302 (0×012e)

要求 (11バイト) :
0000000501012e0000405e

応答 (15バイト) :
0081010902012e00003f8000001e06
密度 = 1.0

7.4.2 値の書き込み要求

クリスタルカットタイ
プ設定 RQA = 3 書き込み値要求
PID = 308
DAT0-DAT3 = 0×00000001 (BTカット)

要求 (15バイト) :
00000009030134000000000001178a

応答 (11バイト) :
008101050401340000735b

7.4.3 属性読み込み／書き込み要求 - コンビネーションメッセージ

703 コンビネーション・メッセージとともに、複数の PID 値をまとめて返すようリクエストを設定してください。703メッセージのDATAセクションは、以下の形式となっています：

DAT0 = N (リクエスト内のPIDの数——「リクエスト書き込み属性」メッセージの10バイト目)

DAT1-DAT2：1^{番目の} リクエストのPID (11～12バイト目：(MSB-LSB))

DAT3-DAT4：リクエストの2^{番目の} PID

...

DAT(n-1)-DATn: N^{番目の} PID (n = N*2)

703とともに、以下の5つの値を返すよう要求してください

RQA = 7（書き込み要求属性）	
PID = 703	
DAT0:5	
DAT1-DAT2:205	タイムスタンプ
DAT3-DAT4:230	Crystal Status
DAT5-DAT6:233	アクティビティ
DAT7-DAT8:234	水晶振動子の寿命（%）
DAT9-DAT10:231	周波数

リクエスト（22バイト）：

000000100702bf00000500cd00e600e900ea00e7d490

応答（11バイト）：

008101050802bf0000c42c

そのデータに対して、703 コンビネーションメッセージ「属性読み取り要求」を送信する

RQA = 1（読み取り属性要求）

PID = 703

リクエスト（11バイト）：

000000050102bf000028a8

応答（39バイト）：

008101210202bf00000000001392054ec00000000100000065000000104155d21452d
fc79f1969

タイムスタンプ	84054200000
水晶振動子ステータス	1
アクティビティ	101
水晶振動子の寿命（%）	16
周波数	5720145.29491

crc16:26905

7.5 IMM-200 PIDリスト

	PID	アクセス要求 (RQA) / 応答 アクセス (RPA)					データ 型	データ 長 (バ イト)	注記
		値を読 み取る	値を書 き込む	属性の 読み取 り	属性の 書き込 み	Cmd クエリ			
デバイスの一般パラメータ		1/2	3/4	5/6	7/8	9/10			
製造番号	110	X					文字列	15	最後のバイトは常に NULL
シリアル番号	111	X					U32	4	
製品名	112	X					文字列	33	最後のバイトは常に NULL
メーカー名	113	X					文字列	20	最後のバイトは常に NULL
メーカー型番	114	X					文字列	20	最後のバイトは常に NULL
ファームウェアのバージョン	115	X					文字列	20	最後のバイトは常に NULL
ハードウェアのリビジョン	116	X					文字列	15	最後のバイトは常に NULL
AC Line Frequency	150	X	X				U32	4	
センサー／モジュールの 状態									
Unit Status	200	X					U32	4	
タイムスタンプ	205	X					U64	8	
ユーザータイマー	206	X					U64	8	
フィルター処理後のレー ト	207	X					F64	8	
ローレート	208	X					F64	8	
膜厚	209	X					F64	8	
Deposition Status	220	X					U32	4	
Crystal Status	230	X					U32	4	
周波数	231	X					F64	8	
アクティビティ	233	X					U32	4	
水晶振動子の寿命 (%)	234	X					U32	4	
水晶振動子の位置	235	X					U32	4	

		アクセス要求 (RQA) / 応答 アクセス (RPA)							
	PID	値を読 み取る	値を書 き込む	属性の 読み取 り	属性の 書き込 み	Cmd クエリ	デー タ 型	デー タ 長 (バ イト)	注記
Material Name	301	X	X				文字列	30	30バイトすべてを送信する必要があります (スペースまたはヌル文字でパディングすること)。最後のバイトは常にヌルに設定してください。
Density	302	X	X				F32	4	
Z-Ratio	303	X	X				F32	4	
ツーリング	304	X	X				F32	4	
最大膜厚	305	X	X				F32	4	
Rate Filter Time	306	X	X				F32	4	
水晶振動子のカットタイプ	308	X	X				U32	4	
アクティビティフィルター	309	X	X				F32	4	
センサー／モジュール									
リセットする	404					X			
デフォルトパラメーター	405					X			
チェックサムを計算	406					X			
タイマーと膜厚をゼロに設定	420					X			
膜厚をゼロに設定	421					X			
Zero Timer	422					X			
測定停止	425					X			
測定開始	426					X			
複合コマンド	703			X	X		注を参 照	書き込み属性：リクエストメッセージには、リストに含まれるPIDの数（データ型U08）に続いて、PIDのリスト（データ型U16）が含まれています。	

		アクセス要求 (RQA) / 応答 アクセス (RPA)							
	PID	値を読 み取る	値を書 き込む	属性の 読み取 り	属性の 書き込 み	Cmd クエリ	デー タ 型	デー タ 長 (バ イト)	注記
									属性の読み取り：応答メッ セージには、「Write Attribute」メッセージで要 求された順序通りに、返さ れた値のリストが含まれて います。データ型はPIDに依 存する

7.6 CRC計算

この情報のコピー可能なバージョンは、INFICON ウェブサイトの IMM-200 製品ページの「ダウンロード」セクションから入手できます（<https://www.inficon.com/en/products/thin-film-technology/imm-200>）。

これについて参照する

📄 CRC Calculation and Code Formatting [▶ 35]

CRC Calculation

```
/*!
```

```
### CRC LOOKUP TABLE
```

The following CRC lookup table was generated automatically by the Rocksoft © Model CRC Algorithm Table Generation Program V1.0 using the following model parameters:

Width : 2 bytes.

Poly : 0x1021

Reverse : TRUE.

```
*/
```

```
uint16_T const au16CrcTable[256] =
```

```
{  
    0x0000, 0x1189, 0x2312, 0x329B, 0x4624, 0x57AD, 0x6536, 0x74BF,  
    0x8C48, 0x9DC1, 0xAF5A, 0xBED3, 0xCA6C, 0xDBE5, 0xE97E, 0xF8F7,  
    0x1081, 0x0108, 0x3393, 0x221A, 0x56A5, 0x472C, 0x75B7, 0x643E,  
    0x9CC9, 0x8D40, 0xBFDB, 0xAE52, 0xDAED, 0xCB64, 0xF9FF, 0xE876,  
    0x2102, 0x308B, 0x0210, 0x1399, 0x6726, 0x76AF, 0x4434, 0x55BD,  
    0xAD4A, 0xBCC3, 0x8E58, 0x9FD1, 0xEB6E, 0xFAE7, 0xC87C, 0xD9F5,  
    0x3183, 0x200A, 0x1291, 0x0318, 0x77A7, 0x662E, 0x54B5, 0x453C,  
    0xBDCB, 0xAC42, 0x9ED9, 0x8F50, 0xFBef, 0xEA66, 0xD8FD, 0xC974,  
    0x4204, 0x538D, 0x6116, 0x709F, 0x0420, 0x15A9, 0x2732, 0x36BB,  
    0xCE4C, 0xDFC5, 0xED5E, 0xFCD7, 0x8868, 0x99E1, 0xAB7A, 0xBAF3,  
    0x5285, 0x430C, 0x7197, 0x601E, 0x14A1, 0x0528, 0x37B3, 0x263A,  
    0xDECD, 0xCF44, 0xFDDF, 0xEC56, 0x98E9, 0x8960, 0xBBFB, 0xAA72,  
    0x6306, 0x728F, 0x4014, 0x519D, 0x2522, 0x34AB, 0x0630, 0x17B9,  
    0xEF4E, 0xFEC7, 0xCC5C, 0xDDD5, 0xA96A, 0xB8E3, 0x8A78, 0x9BF1,  
    0x7387, 0x620E, 0x5095, 0x411C, 0x35A3, 0x242A, 0x16B1, 0x0738,  
    0xFFCF, 0xEE46, 0xDCDD, 0xCD54, 0xB9EB, 0xA862, 0x9AF9, 0x8B70,  
    0x8408, 0x9581, 0xA71A, 0xB693, 0xC22C, 0xD3A5, 0xE13E, 0xF0B7,  
    0x0840, 0x19C9, 0x2B52, 0x3ADB, 0x4E64, 0x5FED, 0x6D76, 0x7CFF,  
    0x9489, 0x8500, 0xB79B, 0xA612, 0xD2AD, 0xC324, 0xF1BF, 0xE036,  
    0x18C1, 0x0948, 0x3BD3, 0x2A5A, 0x5EE5, 0x4F6C, 0x7DF7, 0x6C7E,  
    0xA50A, 0xB483, 0x8618, 0x9791, 0xE32E, 0xF2A7, 0xC03C, 0xD1B5,  
    0x2942, 0x38CB, 0x0A50, 0x1BD9, 0x6F66, 0x7EEF, 0x4C74, 0x5DFD,  
    0xB58B, 0xA402, 0x9699, 0x8710, 0xF3AF, 0xE226, 0xD0BD, 0xC134,  
    0x39C3, 0x284A, 0x1AD1, 0x0B58, 0x7FE7, 0x6E6E, 0x5CF5, 0x4D7C,  
    0xC60C, 0xD785, 0xE51E, 0xF497, 0x8028, 0x91A1, 0xA33A, 0xB2B3,  
    0x4A44, 0x5BCD, 0x6956, 0x78DF, 0x0C60, 0x1DE9, 0x2F72, 0x3EFB,  
    0xD68D, 0xC704, 0xF59F, 0xE416, 0x90A9, 0x8120, 0xB3BB, 0xA232,  
    0x5AC5, 0x4B4C, 0x79D7, 0x685E, 0x1CE1, 0x0D68, 0x3FF3, 0x2E7A,  
    0xE70E, 0xF687, 0xC41C, 0xD595, 0xA12A, 0xB0A3, 0x8238, 0x93B1,  
    0x6B46, 0x7ACF, 0x4854, 0x59DD, 0x2D62, 0x3CEB, 0x0E70, 0x1FF9,  
    0xF78F, 0xE606, 0xD49D, 0xC514, 0xB1AB, 0xA022, 0x92B9, 0x8330,  
    0x7BC7, 0x6A4E, 0x58D5, 0x495C, 0x3DE3, 0x2C6A, 0x1EF1, 0x0F78  
};
```

```

#define CRC_INITIAL                (0xFFFFu)

uint16_T CRC_u16InitCrc16(void)
{
    return (CRC_INITIAL);
}

uint16_T CRC_u16CalcCrc16( const uint8_T *pu8Data, const uint16_T
u16CrcInit,
    const uint16_T u16Len )
{
    uint32_T u32Calc = u16CrcInit;
    uint32_T u32Dec = u16Len;

    while (u32Dec--)
    {
        u32Calc = (au16CrcTable[(u32Calc ^ (uint32_T)*pu8Data++) & 0xFFu]) ^
(u32Calc >> 8);
    }

    return (uint16_T)(u32Calc);
}

bool_T CRC_bCheckCrc16( const uint8_T *pu8Data, const uint16_T u16CrcInit,
    const uint16_T u16Len )
{
    uint16_T u16Crc;
    bool_T bReturnFlag = false;

    /* 2 bytes more than length and checksum is expected to be zero */
    u16Crc = CRC_u16CalcCrc16(pu8Data, u16CrcInit, u16Len + 2u);

    if (u16Crc == 0u)
    {
        bReturnFlag = true;
    }
    return bReturnFlag;
}

```

8 メンテナンスおよび校正手順

8.1 密度、ツーリング、Z レシオの重要性

水晶振動子マイクロバランス（QCM）は、振動する水晶振動子センサーの表面に付加される質量を精密に測定することができます。IMM-200 追加された材料の密度（密度パラメータで指定される）が分かれば、質量情報を膜厚に換算することができます。最高の精度が求められる場合は、`<dynamic_link linkid="803753484" use="grab" dynamic="true">密度の決定</dynamic_link>`に概略が説明されている密度校正を行う必要があります。蒸発源からの材料の流れが均一ではないため、センサーに到達する材料の量が基板と比較して異なることを考慮に入れる必要があります。この違いは、ツーリングパラメーターにおいて考慮されます。ツーリング係数は、`<dynamic_link linkid="803753612" use="grab" dynamic="true">ツーリングの決定</dynamic_link>`にある指針に従って実験的に確定することができます。IMM-200において、Z レシオが未知である場合、実験によるZ レシオの決定に概略が説明されている手順から推定することができます。[▶ 38]

これについて参照する

- 密度を求める [▶ 37]
- ツーリングの決定 [▶ 38]

8.2 密度を求める

付録A：材料テーブル [▶ 54] に記載されているバルク密度の値は、ほとんどの用途において十分な精度を有しています。

密度値を算出するには、以下の手順に従ってください。

- ✓ センサーのすぐ隣に（膜厚測定用に適切にマスキングを施した）基板を配置し、水晶振動子と基板の両方に同じ膜厚の膜が堆積するようにします。
 - 1 密度を、フィルム材料のバルク値、またはその近似値に設定してください。
 - 2 Z レシオを1.000、ツーリングを100%に設定します。
 - 3 センサーに新品の水晶振動子をセットして、手動制御で短時間の蒸着（1000～5000 Å）を実行します。
 - 4 蒸着後、試験用基板を取り出し、マルチビーム干渉計またはスタイラス式プロファイル計のいずれかをを用いて膜厚を測定します。
 - 5 等式[1]を用いて新しい密度値を決定します。
- ⇒ 計算された密度の簡易チェックを行うには、IMM-200 に新しい密度値をプログラムし、試験蒸着と計算密度の入力との間に IMM-200 の膜厚がゼロに設定されていないことを前提として、報告された膜厚が測定された膜厚と等しいことを確認します。

$$\text{密度 (g/cm}^3\text{)} = D_1 (T_x/T_m) [1]$$

ここで：D₁ = 初期密度設定、T_x = IMM-200での膜厚測定値、T_m = 測定膜厚



$T_x = T_m$ となるよう、密度をわずかに調整する必要がある場合があります。

8.3 ツーリングの決定

- 1 テスト用基板をシステムの基板ホルダーにセットしてください。
- 2 短時間の蒸着を行い、実際の膜厚を測定してください。
- 3 式[2]に示す関係からツーリング (%) を算出します。
- 4 ツーリング (%) は0.1%単位で四捨五入してください。
- 5 プログラムにツーリングの新しい値を入力する際、計算が正しく行われていれば、 T_m は T_x と等しくなります。

$$\text{ツーリング (\%)} = TF_i (T_m / T_x) [2]$$

ここで、 T_m = 基板ホルダーにおける実際の膜厚、 T_x = IMM-200 での膜厚測定値、 TF_i = 初期ツーリング係数



ツーリングの校正を行う際は、少なくとも3回の個別の蒸着を実施することを推奨します。原料の分布やその他のシステム要因によるばらつきが、膜厚のわずかなばらつきの一因となります。最終校正には、ツーリング係数の平均値を使用してください。

8.4 Z レシオの実験的決定

一般的に使用される材料のZ レシオ値の一覧は、付録A：材料テーブル [▶ 54] に記載されています。その他の材料については、Z レシオは次の式から算出できます：

$$Z = (d_q \mu_q / d_f \mu_f)^{1/2} [3]$$

$$Z = 9.378 \times 10^5 (d_f \mu_f)^{-1/2} [4]$$

ここで：

d_f = 蒸着された膜の密度 (g/cm^3)

μ_f = 蒸着された膜のせん断弾性率 ($\text{ダイン}/\text{cm}^2$)

d_q = 石英 (水晶振動子の) の密度 ($2.649 \text{ g}/\text{cm}^3$)

μ_q = 石英 (水晶振動子の) のせん断弾性率 ($3.32 \times 10^{11} \text{ ダイン}/\text{cm}^2$)

多くの材料の密度やせん断弾性率は、材料の物理的特性をまとめた数多くのハンドブックに記載されています。

実験結果によると、薄膜状の材料のZ レシオの値は、バルク状の材料の値と非常に近いことが示されています。しかし、高い応力を生じる材料の場合、薄膜のZ レシオの値はバルク材料のそれよりもわずかに小さくなります。より精密な校正が必要な用途については、以下の直接法をお勧めします：

- 1 「密度を求める [▶ 37]」という見出しのセクションに記載されているとおりに、正しい密度値を設定してください。

- 2 新しい水晶振動子を取り付け、その開始周波数 (F_{co}) を記録してください。周波数の値をPID 231で読む必要があります。
- 3 水晶振動子の寿命 (%) が約50%を表示するか、または特定の材料について水晶振動子の寿命の終了に近づくか、いずれか小さい値になるまで、テスト基板への蒸着を行います。PID 234 の **Read Request Value** を読み取り、水晶の寿命値を取得します。
- 4 蒸着を停止し、**読み取り要求値** PID 231 を使用して、最終水晶振動子の周波数 (F_c) を記録する。
- 5 試験用基板を取り外し、マルチビーム干渉計またはスタイラス式プロファイル計のいずれかを使用して膜厚を測定します。
- 6 手順 1 で求めた密度値と、記録した F_{co} および F_c の値を用いて、膜厚算出式 [5] における Z レシオの値を調整し、算出された膜厚が実際の膜厚と一致するようにします。膜厚の計算値が実際の膜厚よりも大きい場合は、Z レシオの値を大きくしてください。膜厚の計算値が実際の膜厚よりも小さい場合は、Z レシオの値を小さくしてください。

$$T_f = (Z_q \times 10^4 / 2\pi zp) ((1/F_{co}) \arctan(z \tan(\pi F_{co})/F_q)) - (1/F_c) \arctan(z \tan(\pi F_c)/F_q)) \quad [5]$$

ここで：

T_f = 蒸着膜厚 (kÅ)

F_{co} = センサー用水晶の初期周波数 (Hz)

F_c = センサー用水晶の最終周波数 (Hz)

F_q = 公称無負荷周波数 = 6045000 (Hz)

z = 堆積膜材料のZ レシオ

Z_q = 石英の比音響インピーダンス = 8765000 (MKS単位)

p = 蒸着膜の密度 (g/cm³)

複数の材料（例えば、2種類の材料）を順次堆積させる場合、2番目の材料に使用されるZ レシオの値は、2つの材料の相対的な膜厚によって決定されます。ほとんどの用途において、以下の3つのルールに従えば、十分な精度が得られます：

1. 材料1の膜厚が材料2に比べて厚い場合、材料1のZ レシオ値を両方の材料に使用します。
2. 材料1の膜厚が材料2に比べて薄い場合、材料2のZ レシオ値を両方の材料に使用します。
3. 両材料の膜厚がほぼ同じ場合は、材料1については材料1のZ レシオ値を使用し、材料2およびそれ以降の材料の蒸着については、2つのZ レシオ値の加重平均値を使用します。

9 トラブルシューティングとエラーメッセージ

9.1 トラブルシューティング

IMM-200が作動しなくなった場合、または、性能が低下したと思われる場合、以下の症状／原因／対策チャートが役立つことがあります。



⚠ 危険

感電の危険

死亡事故につながる可能性のある電圧が存在します。すべてのメンテナンスは、資格を持った担当者に依頼してください。



⚠ 注意

この機器には、電源ラインの過渡電圧の影響を受けやすい繊細な回路が搭載されています。インターフェースの接続を行う際は、必ず電源を切ってください。すべての保守作業は、有資格者に依頼してください。

症状	原因	対処法
電源オンLEDが点灯しません。	電源コードがコンセントまたは本体の背面から抜かれています。	電源コードを再接続します。
	電圧が正しくありません。	有資格者に電圧の確認を依頼します。
機器が「フリーズ」します。	高電気ノイズ環境。	ノイズピックアップを低減するために、ケーブルの配線を見直します（大電力の導線から30 cm [1 ft.] ほど離すと機器に侵入するノイズ量をかなり減らすことができます）。接地インピーダンスを最小化するため、すべての接地線を短く保ち、かつ表面積を大きくしてください（長さの幅の比が5:1の銅の無垢ストラップを推奨）。
	接地不足または接地取り付け不良。	接地が正しいことを確認します。適切な接地ストラップを使用します（長さの幅の比が5対1の固体銅ストラップを推奨）。正しいシステム接地を確立して、接地ループを排除してください。機器の接地が適切に行われていることを確認してください。

症状	原因	対処法
電源オフ時に機器がパラメーターを保持しません（電源オン時にパラメーターが失われます）。	電源に問題がある。	サービス部門にお問い合わせください。詳細は お問い合わせ方法をご参照ください。
水晶振動子不具合メッセージが常に表示されている。	フィードスルーから機器につながるケーブルに不具合があります。	必要に応じてオーム計またはDVM（デジタル電圧計）を使用して、導通または絶縁を確認します。
	トランスデューサー、フィードスルー、または真空同軸ケーブルの電気接触が不良。	必要に応じてオーム計またはDVMを使用して、導通または絶縁を確認します 詳細については、センサーの操作マニュアルをご覧ください。
	水晶振動子の不具合。	水晶を交換してください。
	水晶振動子がありません。	水晶振動子を挿入してください。
	水晶振動子ホルダーに2つの水晶振動子を取り付けられている。	水晶振動子の1つを取り外します。
	水晶振動子の周波数が範囲外。	水晶振動子の周波数が所定の範囲内にあることを確認するか、水晶振動子を交換してください。
	IMM-200 からセンサーヘッドまでのケーブルの長さが不適切です。	仕様を満たすよう、ケーブルの長さを調整してください。

9.2 センサーのトラブルシューティング

センサーヘッドの不具合の多くは、DMM（デジタルマルチメーター）を使って診断することができます。BNCケーブルをフィードスルーから外し、センターピンから接地までの抵抗を測定してください。測定値が10 MΩ未満である場合は、リークの原因を見つけて是正します。同様に、真空システムを開放した状態で、中心導体の導通を確認してください。フィードスルーからトランスデューサーの接点までの測定値が1Ωを超える場合は、問題があることを示しています。接点の清掃や、真空内ケーブルの交換が必要になる場合があります。



水晶振動子の寿命は、処理速度、蒸発源からの放射出力、設置位置、材料、および残留ガスの組成といったプロセス条件に大きく依存します。

症状	原因	対処法
蒸着中に、膜厚の測定値に大きな変動が見られる。	応力によって、水晶振動子の表面から膜が剥がれ落ちる。	水晶を交換するか、合金製の水晶を使用してください。メーカーにお問い合わせください。
	熔融蒸発源から放出された微粒子、いわゆる「スパッター」が水晶振動子の面に衝突している。	蒸着前に、蒸発源を十分に熱処理してください。蒸発源のコンディショニング中は、シャッターを使用して水晶振動子を保護してください。
	水晶振動子ホルダーの装着面に傷や異物が付着している（水晶振動子の装着不良）。	水晶振動子ホルダーの水晶振動子が置かれる面をきれいに拭き、磨き上げてください。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
	（水晶が上を向いている状態の場合）小さな破片が水晶の上に落ちた。	水晶振動子の表面を確認し、清浄な空気ではこりを吹き飛ばしてください。
	磁性体の小さな破片がセンサー用磁石に引き寄せられ、水晶振動子の（スパッタリングセンサーヘッド）に接触しています。	センサーカバーの開口部を確認し、水晶の全面を覆うのを妨げている可能性のある異物を取り除いてください。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
水晶振動子のは、通常の寿命に達する前に、蒸着中に発振を停止する。	水晶振動子には、熔融蒸発源からの微粒子や飛沫が飛来する。	蒸着前に、蒸発源を十分に熱処理してください。蒸発源のコンディショニング中は、シャッターを使用して水晶振動子を保護してください。
	水晶振動子のホルダー上の材料が、水晶振動子のカバーの開口部を部分的に覆っている。	水晶振動子ホルダーを掃除してください。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
	電氣的な短絡または断線が発生しています。	オーム計またはDMMを使用して、センサーケーブル、コネクタ、接点スプリング、センサー内部の接続線、およびフィードスルーにおける導通を確認してください。
	熱による電氣的短絡や断線がないか確認してください。	オームメーターまたはDMMを使用して、センサーケーブル、コネクタ、接点スプリング、センサー内部の接続線、およびフィードスルーにおける導通を確認してください。

症状	原因	対処法
水晶振動子のは発振しないか、断続的に発振する（真空中および空気中ともに）。	電氣的接触が断続的であるか、または不良です（接点が酸化しています）。	オーム計またはDMMを使用して、電氣的導通を確認してください。セラミックリテーナーを交換してください。
	リーフスプリングの保持力が失われています（セラミックリテーナー、センターインシュレーター）。	板ばねの各片を約45°に曲げます。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
	スパッタリング用電源からRF干渉が発生しています。	接地接続を確認してください。RF接地に適した接地ストラップを使用します（長さとの比が5:1の銅の無垢ストラップを推奨）。機器の設置場所を変更し、発振器の配線をRF電源線から離してください。電源を別の電源ラインに接続してください。
	ケーブルが接続されていないか、間違った入力端子に接続されています。	接続が適切に行われていることを確認してください。
この水晶は真空中で発振するが、大気にさらされると発振が止まる。	その水晶振動子のは寿命の終わりに近づいています。大気にさらされると膜の酸化が進み、膜応力が増大します。	水晶を交換してください。
	水晶の表面に過剰な湿気がたまってしまう。	排気を行う前に、センサーへの冷却水の供給を停止してください。チャンバーを開いた状態で、センサーに温水を流してください。

症状	原因	対処法
蒸発源のウォームアップ中に、膜厚の測定値が大きく変化します。 （これにより、通常、膜厚の測定値が小さくなります。） 蒸着終了後に熱的不安定性が生じる。（これにより、通常、膜厚の測定値が増加します。）	冷却水が不足しているか、冷却水の温度が高すぎる。	冷却水の流量を確認してください。冷却水の温度は30°C未満でなければなりません。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
	水晶振動子のへの熱入力が過大です。	蒸発源からの放射熱による熱が発生する場合は、センサーを蒸発源からさらに離し、熱安定性を高めるためにスパッタリング水晶振動子のを使用してください。放射線遮蔽板を取り付けてください。
	水晶振動子ホルダーがセンサー本体に正しく装着されていません。	水晶振動子ホルダーの水晶振動子を固定する面を、きれいに拭くか、磨き上げてください。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。
	高エネルギーの電子束によって引き起こされる水晶振動子の加熱が生じます（RFスパッタリングでよく見られます）。	スパッタリング式センサーヘッドを使用してください。
	水管から本体（CrystalSix™）への熱伝達が不十分です。	クランプアセンブリを本体から取り外した場合は、新しいウォーターチューブを使用してください。新しい水管が入手できない場合は、工程上可能であれば、冷却管とセンサー本体の間にアルミホイルを1層挟んでください。
	熱伝達が不十分です。	水晶振動子ホルダーとセンサー本体の間に、アルミニウムまたは金箔製のワッシャーを挟んでください。

症状	原因	対処法
膜厚の再現性が低い。	蒸発源のフラックスの分布にはばらつきがある。	蒸発物質を確実にサンプリングできるように、センサーをより中央の位置に移動させてください。溶融物の相対的な水位が一定に保たれるようにしてください。溶融物の中にトンネルを掘らないようにしてください。
	前回の蒸着以降、電子ビームが溶融物に照射されるスイープ、ディザ、または位置が変更されています。	スイープ周波数、スイープ振幅、および電子ビームの位置設定を一定に保つことで、蒸発源の分布を一定に維持します。
	この物質は水晶振動子のに付着しません。	水晶の表面がきれいであることを確認してください。水晶振動子に指で触れないようにしてください。中間接着層を活用してください。
	レートに周期的な変化が生じます	蒸発源のスイープ周波数が、測定周波数と「ビート」を起こしていないことを確認してください。
スパッタリング終了後、膜厚に大きなドリフトが生じます（密度 5.00 g/cm ³ の場合、200 Å 以上）。	熱接触不良による水晶振動子の加熱が発生しています。	水晶振動子ホルダーの水晶振動子が置かれる面を、きれいに拭くか、磨き上げてください。該当するセンサーの操作マニュアルを参照してください。

9.3 コンピューター通信のトラブルシューティング

症状	原因	対処法
コンピューターと計測器の間で通信が確立できません。	通信ケーブルの接続に不具合があります。	ケーブルが、計測器とコンピューターの正しいポートに接続されていることを確認してください。
	通信ケーブルに不具合があります。	ケーブルが正しく接続されており、損傷がないことを確認してください。通信ケーブルを交換してください。
	誤ったIPアドレスまたはサブネットマスクが使用されています。	機器内のIPアドレスとサブネットマスクが、コンピューター内の情報と一致していることを確認してください。
応答に不備または誤りがあります。	形式が正しくないメッセージがあります。	通信メッセージのフォーマットが正しいことを確認してください。

10 測定理論

10.1 基礎

水晶振動子蒸着モニター、すなわちQCMは、付加された質量を検出するために水晶振動子の逆圧電特性を利用します。QCMはこの質量感度を用いて、蒸着レートと最終的な真空蒸着膜厚を測定します。適切に形成された圧電水晶振動子の面に電圧が印加されると、水晶振動子はゆがみ、印加電圧に比例して形状を変化させます。印加電圧の特定の離散周波数において、非常に鋭い電気機械的共振状態が出現します。共振する水晶振動子の面に質量が付加されると、これらの共振の周波数は低減されます。この周波数の変化は再現性が非常に高く、水晶の特定の振動モードについて正確に理解されています。この理解しやすい現象は、付着異物の原子層未満の付加を容易に検出することが可能な欠くことのできない測定およびプロセス制御ツールの基礎です。

1950年代後半、Sauerbrey^{1,2}とLostis³によって以下のようにコート（合成）された周波数と未コートの周波数（それぞれ F_c と F_q ）を持つ水晶振動子における変化（ $\Delta F = F_q - F_c$ ）が、付加材料 M_f による質量の変化に関係することが発見されました。

$$M_f / M_q = \Delta F / F_q \quad [1]$$

ここで M_q は未コートの水晶振動子の質量です。単純に置換することで、最初の「周波数測定」機器で使用された方程式が導かれます。

$$T_f = K (\Delta F) / d_f \quad [2]$$

ここで膜厚 T_f は、周波数の変化 ΔF に比例し（ K を介して）、膜の密度 d_f に逆比例します。定数 $K = N_{at} d_q / F_q^2$ 、ここで $d_q (= 2.649 \text{ g/cm}^3)$ は、単水晶振動子の密度、 $N_{at} (= 166100 \text{ Hz cm})$ は、ATカット水晶の周波数定数です。6.0 MHzを開始周波数とする水晶振動子は、その表面に1 Åのアルミニウム（密度 2.77 g/cm^3 ）が付加されたとき、その周波数が2.27 Hz減少します。このように、水晶振動子の周波数変化を精密に測定して、硬質吸着層の膜厚を推測します。この効果を定量的に知ることにより、真空システムにおいて基板にどのくらいの材料が蒸着されているのかを判定する手段が提供されます。これが理解される以前の測定は便利でもなく、実用的でもありませんでした。

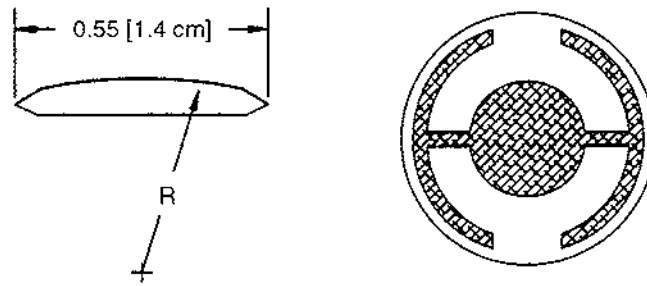
1. G. Z. Sauerbrey, Phys. Verhand .8, 193 (1957)

2. G. Z. Sauerbrey, Z. Phys. 155, 206 (1959)

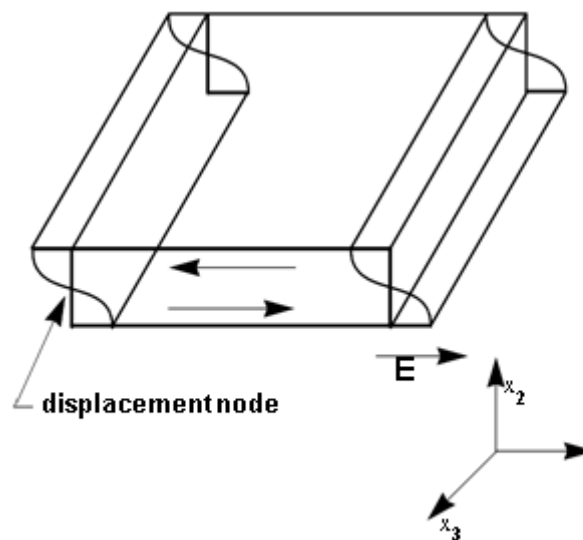
3. P. Lostis, Rev. Opt. 38, 1 (1959)

10.2 モニタークリスタル

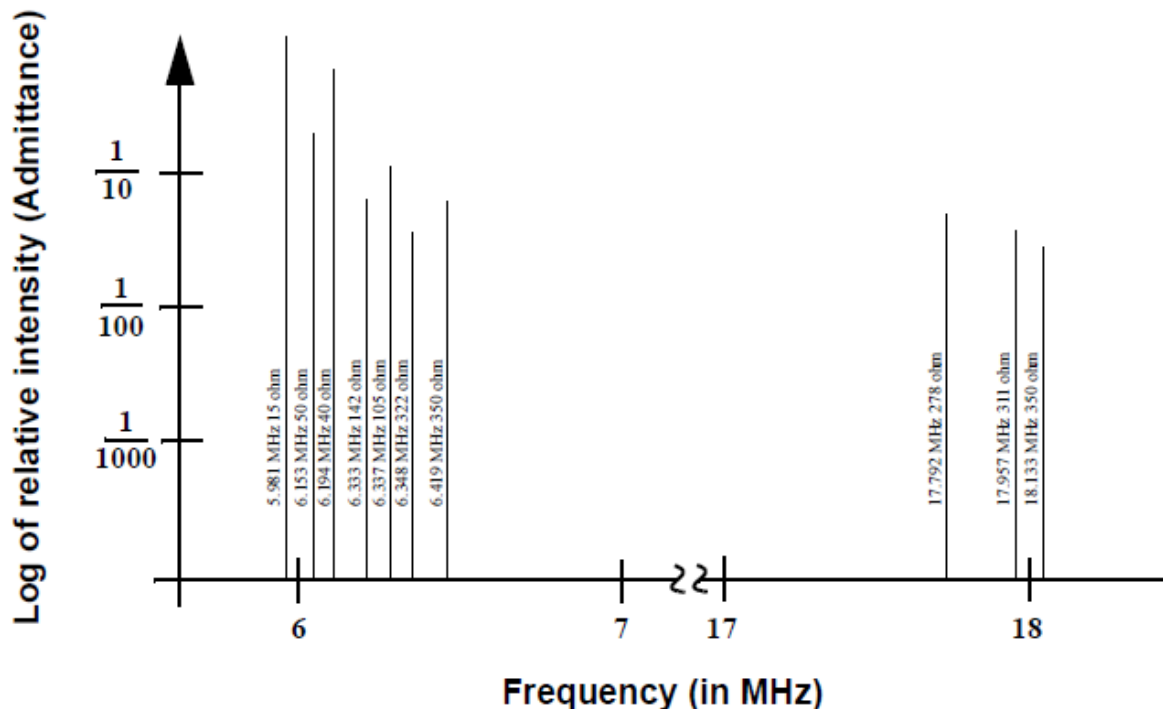
周辺の電子機器がどれだけ進化しても、蒸着モニターの基本装置となるのは水晶振動子です。



最低周波数応答は、主に基本周波数と呼ばれる厚みすべり振動モードです。厚みすべり振動モードの特徴的な動作は、主要モニター用水晶振動子の面に平行に行われる変位です。言い換えると、その面は変位波腹です。



周波数がわずかに高い位置にある応答は非調和と呼ばれ、厚みすべり振動モードと厚みねじれ振動モードが組み合わされたものです。基本周波数の約3倍における応答は、3次準調和と呼ばれます。また、準調和に関連する周波数よりわずかに高い一連の非調和もあります。上に描かれたモニター用水晶振動子のデザインは、最初に使用された完全電極化平面に平行な面を持つ四角形水晶振動子からのいくつかの重要な改善の結果です。最初の改善は、円形水晶振動子を用いることでした。これは対称性を大幅に高め、許容振動モード数を減らしました。2つ目の改善は、水晶振動子の1つの面の輪郭を描き、励起電極のサイズを小さくすることでした。これらの改善には、音響エネルギーをトラップする効果があります。電極の直径を小さくすることは、中心部への励起を制限します。輪郭を描くことにより、進行音波のエネルギーが水晶振動子の先端に到達する前に、このエネルギーを消散させます。エネルギーは、他に新しく発せられた波長と干渉する可能性がある中心部に反射させません。基本的には、小さな水晶振動子が無限大であるかのように動作するように見えます。水晶振動子の中心部に限定される振動があることから、水晶振動子の外縁をホルダーに固定することは実用的であり、しかも、望ましくない影響を及ぼしません。輪郭を描くことも、一般的に不要な非調和モードの応答強度を低減します。したがって、オシレーターが不要な振動を維持する可能性が大幅に低減されます。



接着層を使うことで、電極と水晶板の結合を改善し、膜応力が上昇したことに起因する電極と水晶板との間の微小断裂により生じる「レートスパイク」を低減します。この微小断裂は、蒸着膜の一部を未接着のままにするので、その部分と一緒に共振することができません。この未接着部分は検出されることがないため、間違った膜厚が推定されることになります。「AT」共振器は通常、蒸着モニタリング用に選択されます。これは、室温では、温度変化によって非常に小さな周波数変化を示すようになることがあるためです。現在、（負の）付加質量に起因する周波数変化と、水晶振動子または膜が誘発する応力の温度勾配に起因する周波数変化とを分離する方法はないため、このような温度に誘発される変化を最小化することが非常に重要です。質量の微細な変化を正確に測定することができるのは、この方法だけです。

10.3 周期測定技術

方程式[2]を用いた測定機器は非常に有効でしたが、精度が大きく限定されていることが分かりました。通常、 ΔF の精度は $0.02 F_q$ 未満でした。

1961年、次のことがBehrndt⁴によって確認されました。

$$M_f / M_q = (T_c - T_q) / T_q = \Delta F / F_q \quad [3]$$

ここで、 T_c と T_q は、それぞれ薄膜（合成物）を伴ったクリスタルの共振周期とベアクリスタルの共振周期です。周期測定技術は、次の2つの要素から生まれました。1つは、デジタル時間測定の実施で、もう1つは、クリスタルの膜厚 l_q と共振周期 $T_q = 1/F_q$ との比例に関する数学的に厳密な公式です。電子工学的には周期測定技術は、2番目のクリスタルオシレーター、すなわち蒸着に影響されず、通常モニタークリスタルよりもかなり高い周波数にある基準オシレーターを使います。この基準オシレーターは、モニタークリスタルの振動周期を特定するために使用される短時間の高精度時間

間隔を生成するために使用されます。これは、2台のパルス積算器を使用して実施されます。1台目は、モニタークリスタルの固定サイクル数 m を積算するために使用されます。2台目も同時にONにされて、1台目で積算されるカウント数が m になるまで基準オシレーターからのサイクルを積算します。基準オシレーターの周波数は安定していて既知の数値であるため、 m カウントを積算する時間は、 $\pm 2/F_r$ （ここで、 F_r は基準オシレーターの周波数）に等しい精度として知られています。モニタークリスタルの周期は、 $(n/F_r)/m$ （ここで n は2台目の積算器におけるカウント数）です。測定精度は、基準クロックとゲートタイム（ m の大きさにより設定されます）の長さにより決定されます。これらのパラメーターの1つまたは両方が増加すると、測定精度が改善します。高周波基準オシレーターを持つことは、高速測定（短いゲート時間が必要）、低蒸着レート、低密度材料に関して重要です。これらはすべて、測定間における微細な、質量に誘発された周波数変化を分解するために高度な時間精度を必要とします。測定間におけるモニタークリスタルの周波数の変化が微細である場合、すなわち、測定精度と同じ大きさである場合、高品質なレート測定を確立することはできません。測定の不確かさは、より多くのノイズをコントロールループにもたらしませんが、これは長い時間定数によってしか解消することができません。時間定数が長いと、レート誤差の補正が非常に遅くなり、要求レートからの逸脱がかなり長時間にわたります。このような逸脱は、一部のシンプルな膜では重要ではないこともありますが、光学フィルターや低蒸着レートで成長する非常に薄層化された超格子などの重要な膜の生産において、許容不可能な誤差の原因となります。多くの場合、層間の再現性が1~2%を超えると、このような膜の要求特性は失われる可能性があります。最終的には、基準オシレーターの実際の安定性と周波数により従来の機器の測定精度が制限されます。

4. K. H. Behrndt, J. Vac. Sci. Technol. 8, 622 (1961)

10.4 Zマッチ技術

MillerとBolef⁵の一次元連続音響オシレーターとして共振クォーツと蒸着膜システムを厳格に扱う基礎的な業績を学んだ後、1972年、LuとLewis⁶は、単純化Z-match[®]方程式を開発しました。同じ頃、電子工学で起こっていた進化、つまりマイクロプロセッサの発達は、「リアルタイムで」Z-match方程式を解くことと現実のものとなりました。今日販売されている蒸着プロセスコントローラーのほとんどは、等式[4]に示した共振クォーツおよび膜システムの音響特性を考慮に入れたこの先進的な方程式を利用しています。

$$T_f = (N_{at} d_q / \pi d_f F_c Z) \arctan (Z \tan(\pi(F_q - F_c)/F_q)) \quad [4]$$

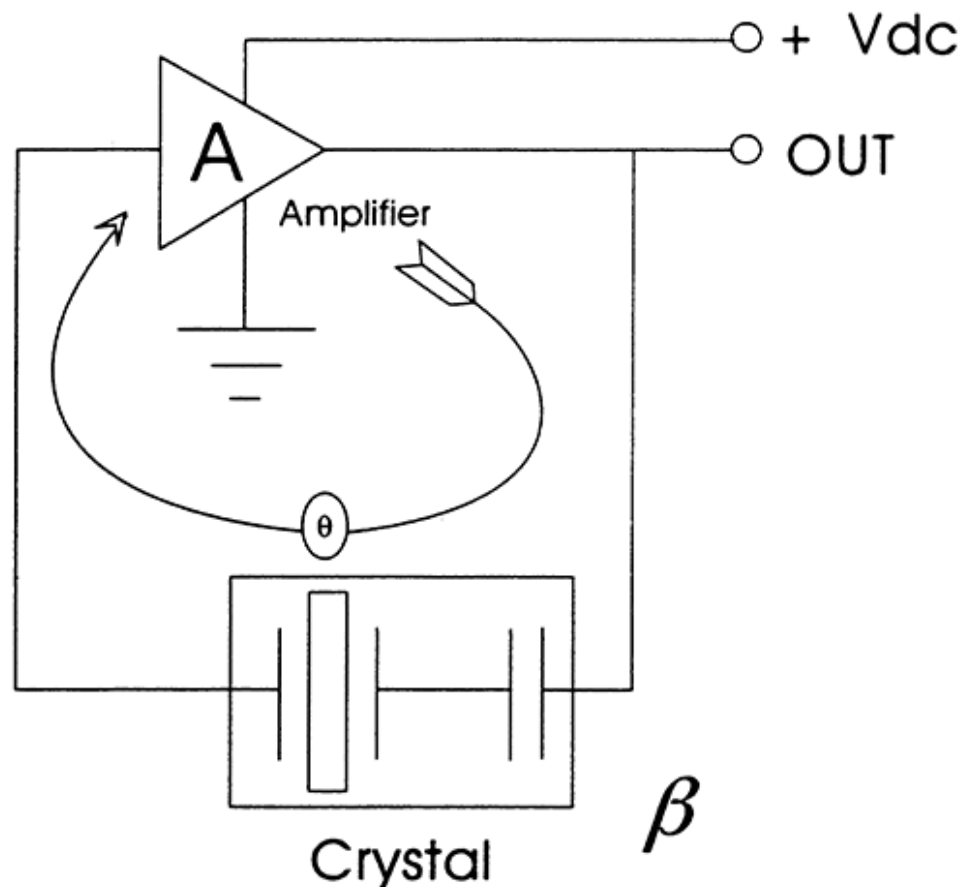
ここで、 $Z = (d_q \mu_q / d_f \mu_f)^{1/2}$ は音響インピーダンス比で、 μ_q と μ_f は、それぞれクォーツと膜の剛性率です。最後に、プロセス制御にとって実用的な時間枠において、理論的に正しい結果を出すことができた周波数-膜厚変換の基本的な理解がありました。この新たなレベルの精度を実現するために必要なのは、ユーザーが蒸着中の膜に関する追加材料パラメーター Z を入力することだけです。この等式は、多くの材料について試験され、 $F_f = 0.4F_q$ に等しい周波数の変化に有効であることが確認されています。等式[2]は $0.02F_q$ にのみ有効で、等式[3]は約 $0.05F_q$ についてのみ有効であることに留意してください。

5. J. G. Miller and D. I. Bolef, J. Appl. Phys. 39, 5815, 4589 (1968)

6. C. Lu and O. Lewis, J Appl. Phys. 43, 4385 (1972)

10.5 アクティブオシレーター

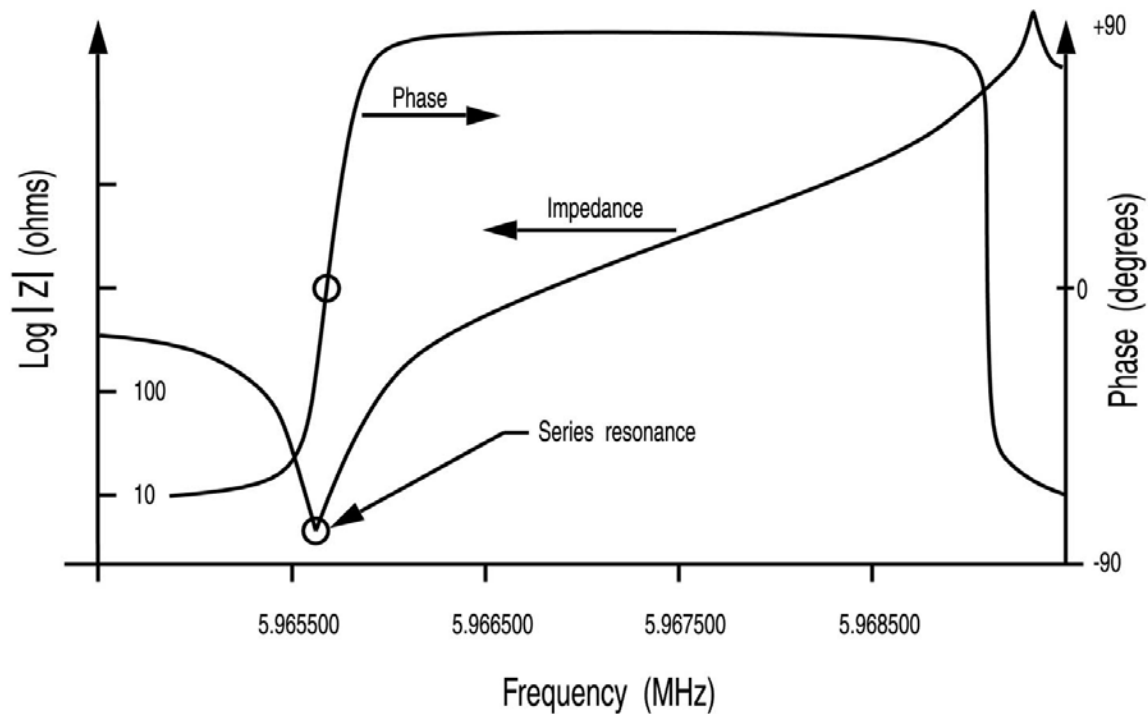
今日までに開発された計測装置の大部分は、通常、下の図に概略を示したタイプのアクティブオシレーター回路を利用して成り立っています。この回路は、アクティブにクリスタルを共振状態に保つため、どのようなタイプの周期や周波数測定も行うことができます。このタイプの回路では、増幅器により提供されるゲインがクリスタルと回路内の損失を相殺するのに十分である限り、なおかつクリスタルが要求された位相シフトを提供できる限り、発振は維持されます。基本的な水晶発振器の安定性は、直列共振点近くのクリスタルの周波数における微細な変化に関する位相の急速な変化から生まれます。

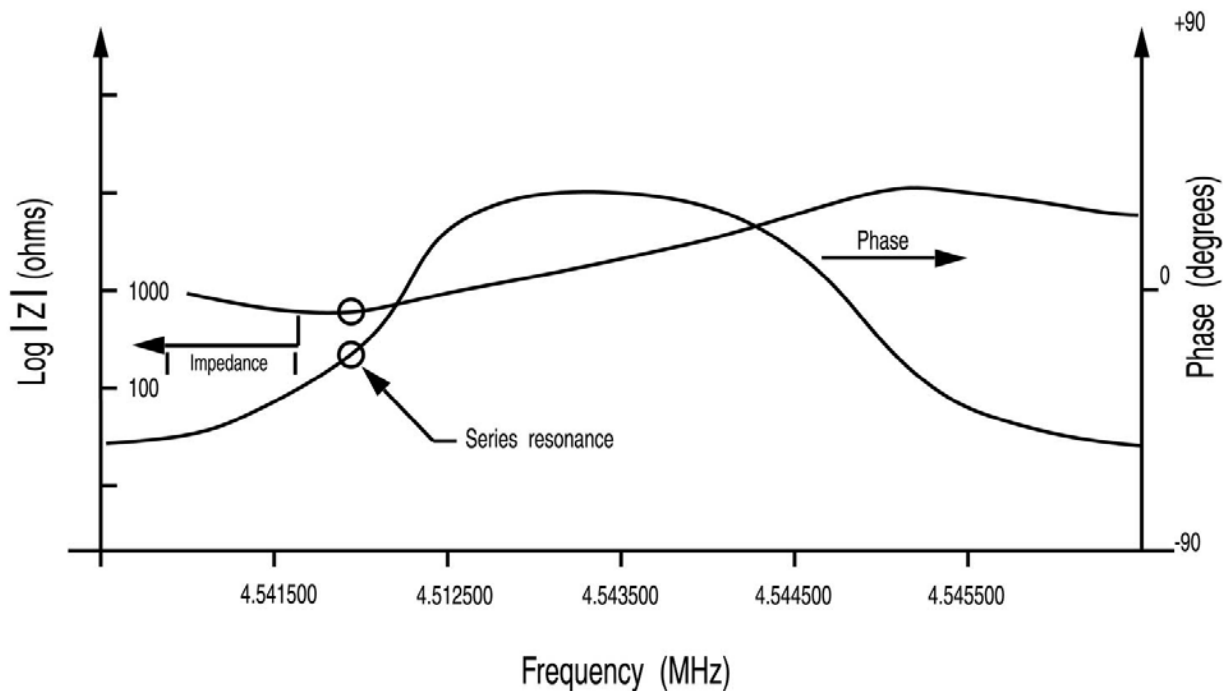


アクティブオシレーターの回路は、直列共振点において作動できるよう、クリスタルが0度の位相シフトを生む必要があるように設計されています。発振に要する位相シフトを維持するために非常に微細な周波数変化が必要であることから、長期間および短期間の周波数安定性は、水晶発振器の性質によって決定されます。温度や経年変化、短期間のノイズ誘発位相ジッターに起因する電気コンポーネントの数値における長期間の変化があっても、周波数の安定性は水晶振動子により与えられます。

クリスタルに質量が付加されると、その電気特性が変化します。大きな負荷をかけたクリスタルでは、急な位相傾斜が緩やかになります。位相傾斜が急ではないため、オシレーター回路のノイズが、新しいクリスタルにより生成されるであろう周波数シフトよりも大きい周波数シフトへ変換します。極端な場合、基本的な位相／周波数の形状は維持されず、クリスタルは90度すべてに渡って位相シフトを提供することができません。インピーダンス $|Z|$ も極めて高い値まで上昇しているのが分かります。このようになると、オシレーターにとっては、しばしばアンハーモニックの周波数の1つで共

振する方が有利です。この状態は時として短期間持続し、オシレーターが基本周波数モードとアンハーモニックモードの間で切り替わるか、アンハーモニックにおいて発振し続けることもあります。この状態はモードホッピングとして知られていて、厄介なレートノイズに加えて、見かけの周波数変更のために、膜の偽りの終端 (false termination) を発生させることがあります。アクティブオシレーターモニターが、このような状態において頻繁に作動し続けることに注意することが重要です。実際に、発振を維持している基本周波数とアンハーモニックとの周波数の差に等しい量だけ、膜厚が突然明らかに薄くなることを除いて、この現象の発生を識別する方法がありません。





10.6 ModeLock測定

INFICONは、アクティブオシレーターとその限界をなくす新しい技術を生み出しました。このシステムは、印加周波数に対するクリスタルの応答を常に試験して、共振周波数を決定するだけでなく、クリスタルが要求モードで振動していることも確認します。このシステムは、モードホッピングからも、このホッピングから生じる不正確な結果からも実質的な影響を受けることはありません。しかも高速かつ正確で、1秒間に10回の速さで、0.0035 Hz未満までクリスタルの周波数を測定します。このシステムは、特定のクリスタルモードを識別して測定することができるため、これらのモードの情報の内容を活用する追加機能を提供することができます。この「インテリジェント」測定システムは、クォーツクリスタルの位相／周波数特性を利用して、共振周波数を決定します。システムは、特定周波数について合成された正弦波をクリスタルに印加し、信号の印加電圧とクリスタルを通過する電流との位相差を測定することにより作動します。直列共振において、この位相差はちょうど0度になり、クリスタルは純抵抗のように作用します。印加電圧とクリスタルからの戻り電流を分離し、位相比較器の出力を監視することにより、印加周波数がクリスタルの共振点よりも高いか、低いかを確定することができます。クリスタルのインピーダンスは、基本周波数を大きく下回る周波数においては容量性ですが、共振よりもわずかに高い周波数においては本質的に誘導性です。この情報は、クリスタルの共振周波数が不明な場合に有効です。位相比較器の出力が変化するまで、周波数を急速に掃引して、共振イベントをマークすることができます。ATクリスタルに関しては、遭遇する中で最低の周波数イベントが基本周波数であることが分かっています。周波数がわずかに高いイベントはアンハーモニックです。この情報は初期化の場合だけでなく、まれに測定器が基本周波数を見失う事例においても有効です。クリスタルの周波数スペクトルが決定されると、測定器は変動する共振周波数を追跡し、後続の膜厚変換用に周波数を測定し、その値を定期的に提供します。

「インテリジェント」測定システムの使用には、先代のアクティブオシレーターと比べて、モードホッピング、測定速度、測定精度からの制限を受けないという一連の非常に明白な利点があります。また、この技術により、アクティブオシレーターを用いた手法では考えもしなかった高度な機能を実施することができます。この技術に基本周波数の掃引と特定を可能にさせるのと同じ能力を利用して、アンハーモニックやクウェジハーモニックなどの他の発振モードを特定することができます。測定器は基本周波数モードを継続的に追跡するだけでなく、1つのモードと複数のモードを切り換えられるように実装することもできます。この複数モードの問い合わせは、同じクリスタルの2つのモードの場合、10 Hzという速さで実施することができます。

11 付録A：材料テーブル

以下に、各種材料の密度とZレシオを示します。リストは化学式のアルファベット順です。表示されているZレシオの値は、ATカット水晶に対して正規化されたものです。



警告

これらの物質の中には、有害なものもあります。ご使用前に、製品安全データシートおよび安全上の注意事項をご確認ください。

*（アスタリスク）は、ある材料のZレシオが確立されていないことを示すために使用されます。そのような場合には、1.000がデフォルト値になります。ここに記載されているZレシオの値は、ATカットの水晶振動子にのみ適用されます。BTカット、ITカット、またはSCカットを使用する場合は、IMM-200 に水晶振動子の種類を示すために、正しいエンコーディングを選択してください。これを行わないと、IMM-200による共振周波数のずれが、膜厚の変換において不正確に反映されてしまいます。

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
Ag	10.500	0.529	銀
AgBr	6.470	1.180	臭化銀
AgCl	5.560	1.320	塩化銀
Al	2.700	1.080	アルミニウム
Al ₂ O ₃	3.970	0.336	酸化アルミニウム
Al ₄ C ₃	2.360	*1.000	炭化アルミニウム
AlF ₃	3.070	*1.000	フッ化アルミニウム
AlN	3.260	*1.000	窒化アルミニウム
AlSb	4.360	0.743	アンチモン化アルミニウム
As	5.730	0.966	ヒ素
As ₂ Se ₃	4.750	*1.000	セレン化ヒ素
Au	19.300	0.381	金
B	2.370	0.389	ホウ素
B ₂ O ₃	1.820	*1.000	酸化ホウ素
B ₄ C	2.370	*1.000	炭化ホウ素
BN	1.860	*1.000	窒化ホウ素
Ba	3.500	2.100	バリウム
BaF ₂	4.886	0.793	フッ化バリウム
BaN ₂ O ₆	3.244	1.261	硝酸バリウム
BaO	5.720	*1.000	酸化バリウム
BaTiO ₃	5.999	0.464	チタン酸バリウム (正方晶)

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
BaTiO ₃	6.035	0.412	チタン酸バリウム (立方晶)
Be	1.820	0.543	ベリリウム
BeF ₂	1.990	*1.000	フッ化ベリリウム
BeO	3.010	*1.000	酸化ベリリウム
Bi	9.800	0.790	ビスマス
Bi ₂ O ₃	8.900	*1.000	酸化ビスマス
Bi ₂ S ₃	7.390	*1.000	硫化ビスマス (III)
Bi ₂ Se ₃	6.820	*1.000	セレン化ビスマス (III)
Bi ₂ Te ₃	7.700	*1.000	テルル化ビスマス
BiF ₃	5.320	*1.000	フッ化ビスマス (III)
C	2.250	3.260	炭素 (グラファイト)
C	3.520	0.220	炭素 (ダイヤモンド)
C ₈ H ₈	1.100	*1.000	パリレン (ユニオン カーバイド)
Ca	1.550	2.620	カルシウム
CaF ₂	3.180	0.775	フッ化カルシウム
CaO	3.350	*1.000	酸化カルシウム
CaO-SiO ₂	2.900	*1.000	ケイ酸カルシウム (3)
CaSO ₄	2.962	0.955	硫酸カルシウム
CaTiO ₃	4.100	*1.000	チタン酸カルシウム
CaWO ₄	6.060	*1.000	タングステン酸カルシウム
Cd	8.640	0.682	カドミウム
CdF ₂	6.640	*1.000	フッ化カドミウム
CdO	8.150	*1.000	酸化カドミウム
CdS	4.830	1.020	硫化カドミウム
CdSe	5.810	*1.000	セレン化カドミウム
CdTe	6.200	0.980	テルル化カドミウム
Ce	6.780	*1.000	セリウム

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
CeF ₃	6.160	*1.000	フッ化セリウム (III)
CeO ₂	7.130	*1.000	二酸化セリウム (IV)
Co	8.900	0.343	コバルト
CoO	6.440	0.412	酸化コバルト
Cr	7.200	0.305	クロム
Cr ₂ O ₃	5.210	*1.000	酸化クロム (III)
Cr ₃ C ₂	6.680	*1.000	炭化クロム
CrB	6.170	*1.000	ホウ化クロム
Cs	1.870	*1.000	セシウム
Cs ₂ SO ₄	4.243	1.212	硫酸セシウム
CsBr	4.456	1.410	臭化セシウム
CsCl	3.988	1.399	塩化セシウム
CsI	4.516	1.542	ヨウ化セシウム
Cu	8.930	0.437	銅
Cu ₂ O	6.000	*1.000	酸化銅
Cu ₂ S	5.600	0.690	硫化銅 (I) (アルファ)
Cu ₂ S	5.800	0.670	硫化銅 (I) (ベータ)
CuS	4.600	0.820	硫化銅 (II)
Dy	8.550	0.600	ジスプロシウム
Dy ₂ O ₃	7.810	*1.000	酸化ジスプロシウム
Er	9.050	0.740	エルビウム
Er ₂ O ₃	8.640	*1.000	酸化エルビウム
Eu	5.260	*1.000	ユウロピウム
EuF ₂	6.500	*1.000	フッ化ユウロピウム
Fe	7.860	0.349	鉄
Fe ₂ O ₃	5.240	*1.000	酸化鉄 (III) (酸化第二鉄)
FeO	5.700	*1.000	酸化鉄 (III) (酸化第二鉄)
FeS	4.840	*1.000	硫化鉄
Ga	5.930	0.593	ガリウム
Ga ₂ O ₃	5.880	*1.000	酸化ガリウム (ベータ)

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
GaAs	5.310	1.590	ヒ化ガリウム
GaN	6.100	*1.000	窒化ガリウム
GaP	4.100	*1.000	リン化ガリウム
GaSb	5.600	*1.000	アンチモン化ガリウム
Gd	7.890	0.670	ガドリニウム
Gd ₂ O ₃	7.410	*1.000	酸化ガドリニウム
Ge	5.350	0.516	ゲルマニウム
Ge ₃ N ₂	5.200	*1.000	窒化ゲルマニウム
GeO ₂	6.240	*1.000	酸化ゲルマニウム
GeTe	6.200	*1.000	テルル化ゲルマニウム（一テルル化ゲルマニウム）
Hf	13.090	0.360	ハフニウム
HfB ₂	10.500	*1.000	ニホウ化ハフニウム
HfC	12.200	*1.000	炭化ハフニウム
HfN	13.800	*1.000	窒化ハフニウム
HfO ₂	9.680	*1.000	酸化ハフニウム
HfSi ₂	7.200	*1.000	ケイ化ハフニウム
Hg	13.460	0.740	水銀
Ho	8.800	0.580	ホルミウム
Ho ₂ O ₃	8.410	*1.000	酸化ホルミウム
In	7.300	0.841	インジウム
In ₂ O ₃	7.180	*1.000	酸化インジウム (III)
In ₂ Se ₃	5.700	*1.000	セレン化インジウム
In ₂ Te ₃	5.800	*1.000	テルル化インジウム
InAs	5.700	*1.000	ヒ化インジウム
InP	4.800	*1.000	リン化インジウム
InSb	5.760	0.769	アンチモン化インジウム
Ir	22.400	0.129	イリジウム
K	0.860	10.189	カリウム
KBr	2.750	1.893	臭化カリウム
KCl	1.980	2.050	塩化カリウム
KF	2.480	*1.000	フッ化カリウム

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
KI	3.128	2.077	ヨウ化カリウム
La	6.170	0.920	ランタン
La ₂ O ₃	6.510	*1.000	酸化ランタン
LaB ₆	2.610	*1.000	ホウ化ランタン (六ホウ化ランタン)
LaF ₃	5.940	*1.000	フッ化ランタン
Li	0.530	5.900	リチウム
LiBr	3.470	1.230	臭化リチウム
LiF	2.638	0.778	フッ化リチウム
LiNbO ₃	4.700	0.463	ニオブ酸リチウム
Lu	9.840	*1.000	ルテチウム
Mg	1.740	1.610	マグネシウム
MgAl ₂ O ₄	3.600	*1.000	アルミン酸マグネシウム
MgAl ₂ O ₆	8.000	*1.000	スピネル
MgF ₂	3.180	0.637	フッ化マグネシウム
MgO	3.580	0.411	酸化マグネシウム
Mn	7.200	0.377	マンガン
MnO	5.390	0.467	酸化マンガン
MnS	3.990	0.940	硫化マンガン (II)
Mo	10.200	0.257	モリブデン
Mo ₂ C	9.180	*1.000	炭化モリブデン
MoB ₂	7.120	*1.000	ホウ化モリブデン
MoO ₃	4.700	*1.000	酸化モリブデン (酸化モリブデン (VI)、三酸化モリブデン)
MoS ₂	4.800	*1.000	硫化モリブデン
Na	0.970	4.800	ナトリウム
Na ₃ AlF ₆	2.900	*1.000	氷晶石
Na ₅ Al ₃ F ₁₄	2.900	*1.000	白雪石
NaBr	32.00	*1.000	臭化ナトリウム
NaCl	2.170	1.570	塩化ナトリウム
NaClO ₃	2.164	1.565	塩素酸ナトリウム
NaF	2.558	1.645	フッ化ナトリウム
NaNO ₃	2.270	1.194	硝酸ナトリウム

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
Nb	8.578	0.492	ニオブ
Nb ₂ O ₃	7.500	*1.000	三酸化ニオブ
Nb ₂ O ₅	4.470	*1.000	酸化ニオブ (V) (五酸化ニオブ)
NbB ₂	6.970	*1.000	ニホウ化ニオブ
NbC	7.820	*1.000	炭化ニオブ
NbN	8.400	*1.000	窒化ニオブ
Nd	7.000	*1.000	ネオジム
Nd ₂ O ₃	7.240	*1.000	酸化ネオジム
NdF ₃	6.506	*1.000	フッ化ネオジム
Ni	8.910	0.331	ニッケル
NiCr	8.500	*1.000	ニクロム
NiCrFe	8.500	*1.000	インコネル
NiFe	8.700	*1.000	パーマロイ
NiFeMo	8.900	*1.000	スーパーマロイ
NiO	7.450	*1.000	酸化ニッケル
P ₃ N ₅	2.510	*1.000	窒化リン
Pb	11.300	1.130	鉛
PbCl ₂	5.850	*1.000	塩化鉛
PbF ₂	8.240	0.661	フッ化鉛
PbO	9.530	*1.000	酸化鉛
PbS	7.500	0.566	硫化鉛
PbSe	8.100	*1.000	セレン化鉛
PbSnO ₃	8.100	*1.000	スズ酸鉛
PbTe	8.160	0.651	テルル化鉛
Pd	12.038	0.357	パラジウム
PdO	8.310	*1.000	酸化パラジウム
Po	9.400	*1.000	ポロニウム
Pr	6.780	*1.000	プラセオジム
Pr ₂ O ₃	6.880	*1.000	酸化プラセオジム
Pt	21.400	0.245	白金
PtO ₂	10.200	*1.000	二酸化白金 (酸化 白金 (IV))
Ra	5.000	*1.000	ラジウム
Rb	1.530	2.540	ルビジウム
RbI	3.550	*1.000	ヨウ化ルビジウム
Re	21.040	0.150	レニウム
Rh	12.410	0.210	ロジウム

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
Ru	12.362	0.182	ルテニウム
S ₈	2.070	2.290	硫黄
Sb	6.620	0.768	アンチモン
Sb ₂ O ₃	5.200	*1.000	三酸化アンチモン
Sb ₂ S ₃	4.640	*1.000	硫化アンチモン
Sc	3.000	0.910	スカンジウム
Sc ₂ O ₃	3.860	*1.000	酸化スカンジウム
Se	4.810	0.864	セレン
Si	2.320	0.712	ケイ素
Si ₃ N ₄	3.440	*1.000	窒化ケイ素
SiC	3.220	*1.000	炭化ケイ素
SiO	2.130	0.870	酸化ケイ素 (II)
SiO ₂	2.648	1.000	二酸化ケイ素
Sm	7.540	0.890	サマリウム
Sm ₂ O ₃	7.430	*1.000	酸化サマリウム
Sn	7.300	0.724	スズ
SnO ₂	6.950	*1.000	酸化スズ
SnS	5.080	*1.000	硫化スズ
SnSe	6.180	*1.000	セレン化スズ
SnTe	6.440	*1.000	テルル化スズ
Sr	2.600	*1.000	ストロンチウム
SrF ₂	4.277	0.727	フッ化ストロンチウム
SrO	4.990	0.517	酸化ストロンチウム
Ta	16.600	0.262	タンタル
Ta ₂ O ₅	8.200	0.300	酸化タンタル (V)
TaB ₂	11.150	*1.000	ホウ化タンタル
TaC	13.900	*1.000	炭化タンタル
TaN	16.300	*1.000	窒化タンタル
Tb	8.270	0.660	テルビウム
Tc	11.500	*1.000	テクネチウム
Te	6.250	0.900	テルル
TeO ₂	5.990	0.862	酸化テルル (二酸化テルル)
Th	11.694	0.484	トリウム
ThF ₄	6.320	*1.000	フッ化トリウム (IV)

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
ThO ₂	9.860	0.284	二酸化トリウム
ThOF ₂	9.100	*1.000	オキシフッ化トリウム
Ti	4.500	0.628	チタン
Ti ₂ O ₃	4.600	*1.000	酸化チタン (III)
TiB ₂	4.500	*1.000	ホウ化チタン
TiC	4.930	*1.000	炭化チタン
TiN	5.430	*1.000	窒化チタン
TiO	4.900	*1.000	酸化チタン
TiO ₂	4.260	0.400	酸化チタン (IV)
Tl	11.850	1.550	タリウム
TlBr	7.560	*1.000	臭化タリウム
TlCl	7.000	*1.000	塩化タリウム
TlI	7.090	*1.000	ヨウ化タリウム (ベータ)
U	19.050	0.238	ウラン
U ₃ O ₈	8.300	*1.000	八酸化三ウラン
U ₄ O ₉	10.969	0.348	酸化ウラン
UO ₂	10.970	0.286	二酸化ウラン
V	5.960	0.530	バナジウム
V ₂ O ₅	3.360	*1.000	五酸化バナジウム
VB ₂	5.100	*1.000	ホウ化バナジウム
VC	5.770	*1.000	炭化バナジウム
VN	6.130	*1.000	窒化バナジウム
VO ₂	4.340	*1.000	二酸化バナジウム
W	19.300	0.163	タングステン
WB ₂	10.770	*1.000	ホウ化タングステン
WC	15.600	0.151	炭化タングステン
WO ₃	7.160	*1.000	三酸化タングステン
WS ₂	7.500	*1.000	硫化タングステン
WSi ₂	9.400	*1.000	ケイ化タングステン
Y	4.340	0.835	イットリウム
Y ₂ O ₃	5.010	*1.000	酸化イットリウム
Yb	6.980	1.130	イッテルビウム

化学式	Density	Z-Ratio	Material Name
Yb_2O_3	9.170	*1.000	酸化イッテルビウム
Zn	7.040	0.514	亜鉛
Zn_3Sb_2	6.300	*1.000	アンチモン化亜鉛
ZnF_2	4.950	*1.000	フッ化亜鉛
ZnO	5.610	0.556	酸化亜鉛
ZnS	4.090	0.775	硫化亜鉛
ZnSe	5.260	0.722	セレン化亜鉛
ZnTe	6.340	0.770	テルル化亜鉛
Zr	6.490	0.600	ジルコニウム
ZrB_2	6.080	*1.000	ホウ化ジルコニウム
ZrC	6.730	0.264	炭化ジルコニウム
ZrN	7.090	*1.000	窒化ジルコニウム
ZrO_2	5.600	*1.000	酸化ジルコニウム



www.inficon.com reachus@inficon.com

Due to our continuing program of product improvements, specifications are subject to change without notice.
The trademarks mentioned in this document are held by the companies that produce them.

074-733-P4-B

©2026