

テラヘルツ(THz)域は、電磁スペクトルのマイクロ波と中赤外間、およそ0.1~10THz(〜3mm、〜30 μ m、3cm⁻¹~300cm⁻¹)を指します。

THz域は皮膚、プラスチック、衣類、紙製品などの有機材料にも使用可能です。これは、フォトンエネルギーが低いためダメージを引き起こす電離放射線(X線など)を放出しないからです。THz波は金属には浸透しないので、薬品製造などのプロセス・品質管理と共に、THzイメージングでも有用です。また最近では安全管理、パッケージ検査、半導体の機能チェック、化学組成解析、生化学開発においても注目され、なかでも分光、防衛イメージング、セキュリティにおいて大きな期待を担っています。

THzアプリケーションでは、高い透過率を持つ材料として高抵抗フロートゾーンシリコン(High Resistivity Float Zone Silicon: HRFZ-Si)が最も広く使用されています。これと平行して、他の材料についても検証を行いました。使用したのはABB FTIR分光器、Bomem DA3、Bruker IFS 125HR(精度は100 μ m以下では2-3%、100 μ m以上では4-5%)です。近赤外での計測はPerkin ElmerのLambda-9(精度<0.5%)を使用しました。

1 ポリマー

数あるポリマーの中には、テラヘルツ域において比較的低い反射と高い透過性をあわせ持つものがあります。PE(ポリエチレン)、ポリプロピレン(PP)、テフロン、TPX(ポリエチルメテン:PMP)などです。長波長側ではポリマーの透過率は無構造でフラットです。短波長、特に200 μ m以下では固有振動と不均一性が高まるため散乱光が増加します。また、ポリマーは短波長側では徐々に白濁してしまいます。

1.1 ポリエチルメテン(TPX)

TPXはポリマーの中でも最軽量で、UV、VIS、FIRにおいて透過性を持っているのでHeNeなどの可視光をガイド光として使用可能です。屈折率は約1.46で、波長による変化はあまりありません。

波長(μ m)	n
0.633	1.463
24	1.4568
60	1.4559
300	1.46
667	1.46
1000	1.4650
3191	1.466

TPXはmm波長までの損失が非常に低く、優れた耐熱性、殆どの市販薬剤(有機/無機)への高い耐久性を持っています。

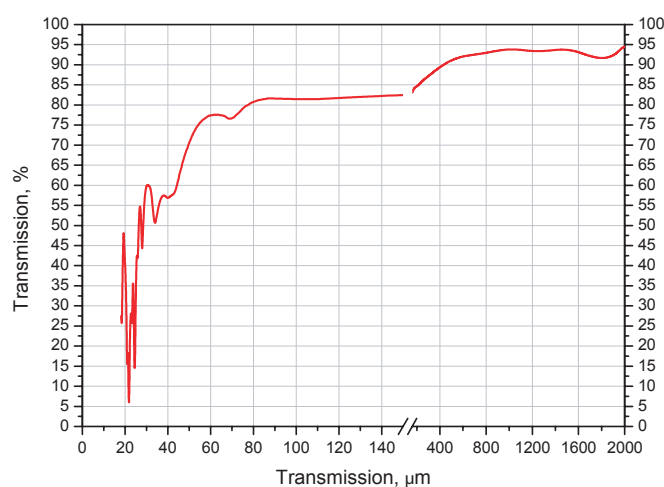


図1 2mm厚TPXの透過率(FIR域)

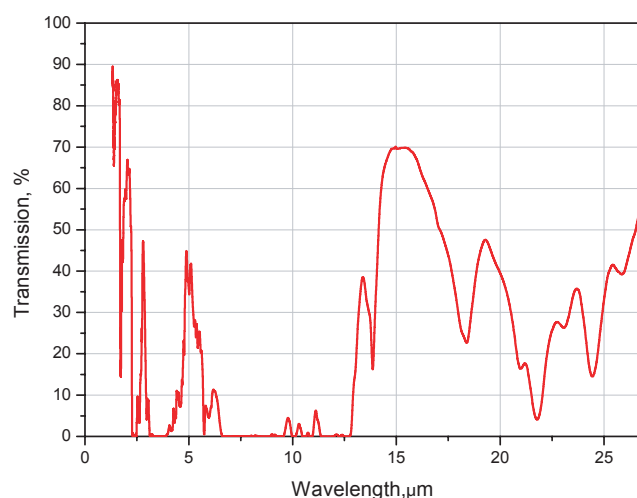


図2 2mm厚TPXの透過率(NIR&MIR域)

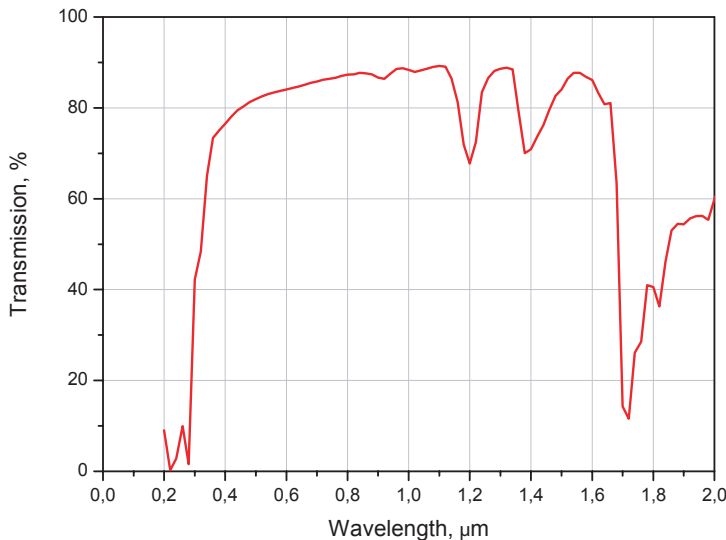


図3 2mm厚TPXの透過率 (DUV&VIS&NIR域)

TPXの標準仕様

密度 (g/cm ³)	0.83
引張強度	4100psi~28.3MPa
引張弾性係数	280000psi~1930.5MPa
破断点強度	10%
曲げ強度	6100psi~42.1MPa
曲げ弾性率	210000psi~1447.8MPa
融点	464F / 240°C

TPXは硬質でレンズやウィンドウなど、様々な光学部品への加工が簡単に行えます。THz域では透過率が高く、10umの励起域は透過率が低いため、特にCO2励起のモレキュラーレーザーのアウトプットウィンドウとして使用されています。

他の材料と比較して、TPXはTHz域において優れた光学特性を有しています。

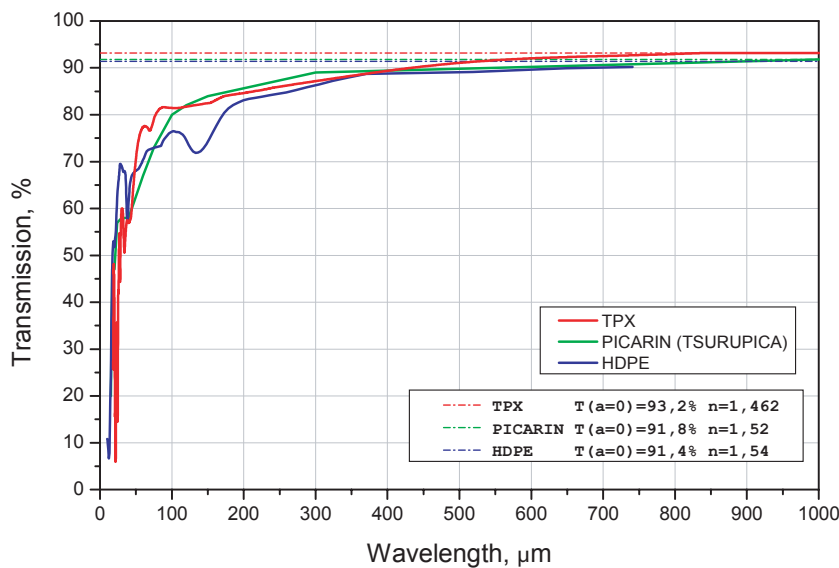


図4 TPX、Picarin、HDPE2mm厚の透過率

標準在庫として供給可能なTPXウィンドウ、レンズ

材質	TPX
タイプ	平行基板もしくはウエッジ(6mrad)
供給サイズ	100mm径まで
径公差	+/-0.25mm
厚さ公差	厚さの2%(ただし0.1mm以下)
EFL公差(レンズ)	+/-1%
表面粗さ(両面研磨)	Scr/dig : 60/40
面精度	+/-0.01偏差

TPXウィンドウ 標準在庫品

	径	厚さ
1	1.0" (25.4mm)	2.0mm
2	1.5" (38.1mm)	3.0mm
3	2.0" (50.8mm)	3.5mm

他のサイズも供給可能です(最大厚さは30mmまで)

TPX平凸レンズ 標準在庫品

	径	EFL	エッジ厚さ
1	1.0" (25.4mm)	25.0mm	2.0mm
2	1.0" (25.4mm)	50.0mm	2.0mm
3	1.0" (25.4mm)	100.0mm	2.0mm
4	1.0" (25.4mm)	200.0mm	2.0mm
5	2.0" (50.8mm)	50.0mm	3.0mm
6	2.0" (50.8mm)	75.0mm	3.0mm
7	2.0" (50.8mm)	100.0mm	3.0mm
8	2.0" (50.8mm)	200.0mm	3.0mm

*EFLは300umでの数値です。EFL偏差はTHz域(30-3,000um)の屈折率分散に依存し、可視域では製造時のEFL公差ほどには問題ではありません。特注対応の場合、20mm厚まで対応可能です。

1.2 ポリエチレン(PE)

PEは光弾性結晶材料です。熱安定性は110℃まで、-45から-120℃まで冷却可能なグレードもあります。PEは優れた誘電体特性、耐薬品性、放射線抵抗性を持っていますが、逆にUV照射、脂質、油脂に対しては安定性がよくありません。PEは生物学的に不活性で製造が簡単です。密度(23℃)は0.9から0.925g/cm³、変形応力限界(23℃)は8-13MPa、伸縮性(23℃)は118-350MPa、屈折率は~1.54で波長によってもあまり変わりません。通常、光学部品としてはHDPE(High-density polyethylene)を使用します。厚みが大きなレンズやウィンドウに加えて、ポラライザーやゴーレセルのウィンドウにもHDPE薄膜フィルムを使用します。

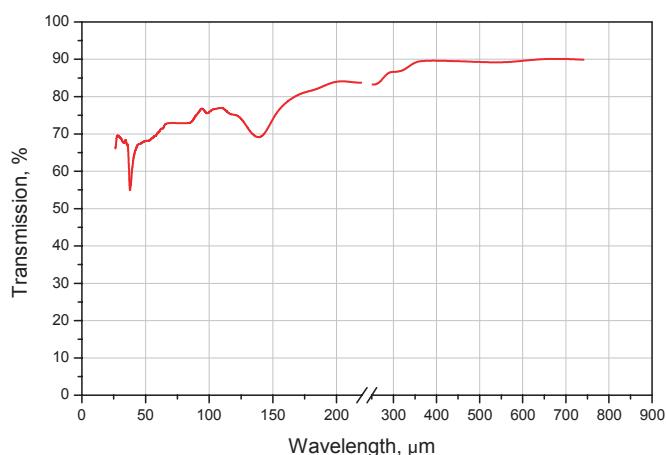


図5. FIR域、2mm厚HDPE透過率

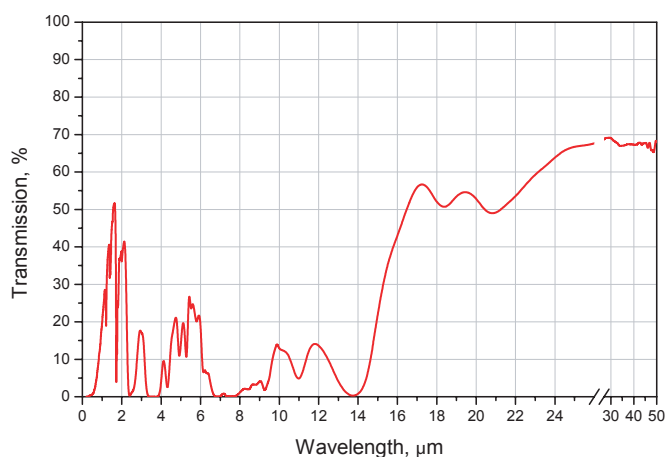


図6. NIR&MIR域、2mm厚HDPE透過率

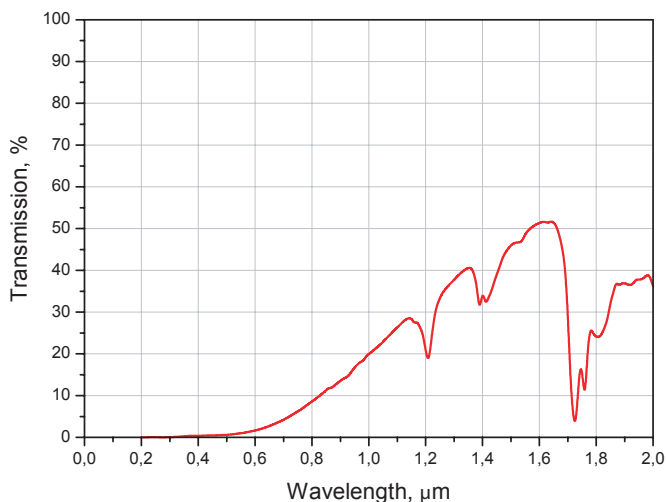


図7. VIS&NIR域、2mm厚HDPE透過率

HDPEは可視域の透過率が良くないため、ガイド光を使用してのアライメントはできません。

1.3 ポリプロピレン(PP)

ポリプロピレンは低密度ポリエチレンと高密度ポリエチレンの中間に位置する結晶です。ヤング率(縦弾性係数)も中間に位置します。PPはポリエチレンと似た特性もありますが、全く異なる点もあります。PPはポリエチレンより低い密度、高い融点(ポリエチレンやプラスチックが100℃くらいで溶け出すのに対し、PPは160℃以下では溶けません)、高い剛性、硬度が特徴です。PPの密度は0.905g/cm³で融点は160℃、屈折率は~1.49です。

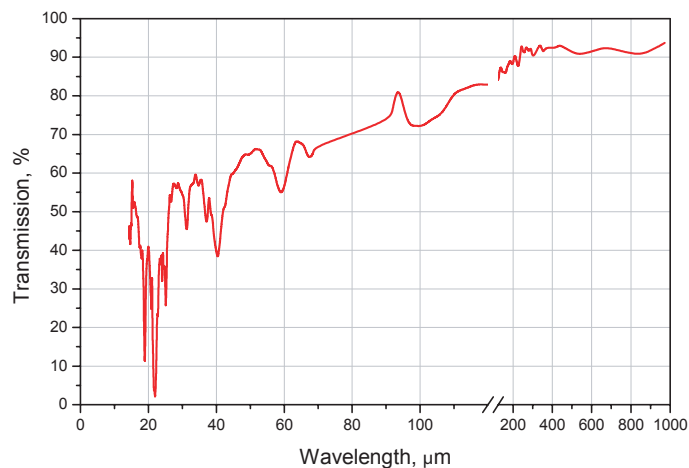


図8. FIR域、2mm厚ポリプロピレン透過率

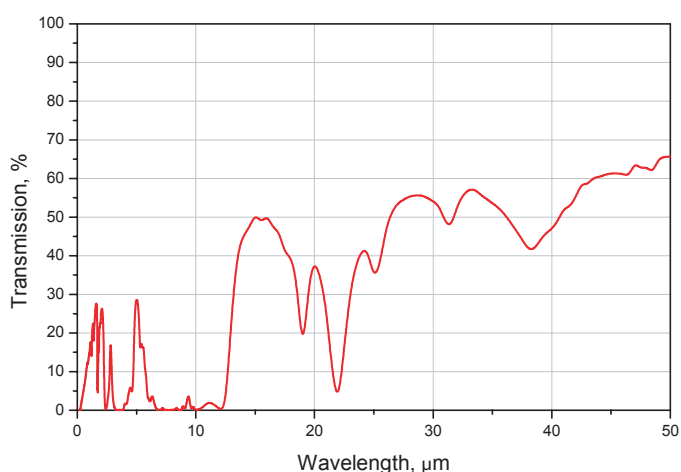


図9. NIR&MIR域、2mm厚ポリプロピレン透過率

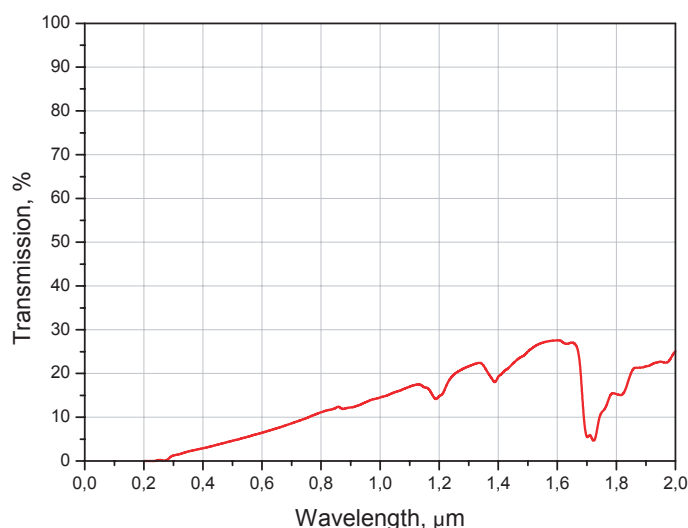


図10. VIS&NIR域、2mm厚ポリプロピレン透過率

1.4 ポリテトラフルオロエチレン(PTFE、テフロン)

PTFE(ポリテトラフルオロエチレン-テフロン)は室温では密度: 2.2g/cm³の白色の固体です。融点は327℃ですが、-73~+204℃の広い範囲で問題なく使用可能です。広い範囲の波長域にわたって、屈折率は~1.43です。

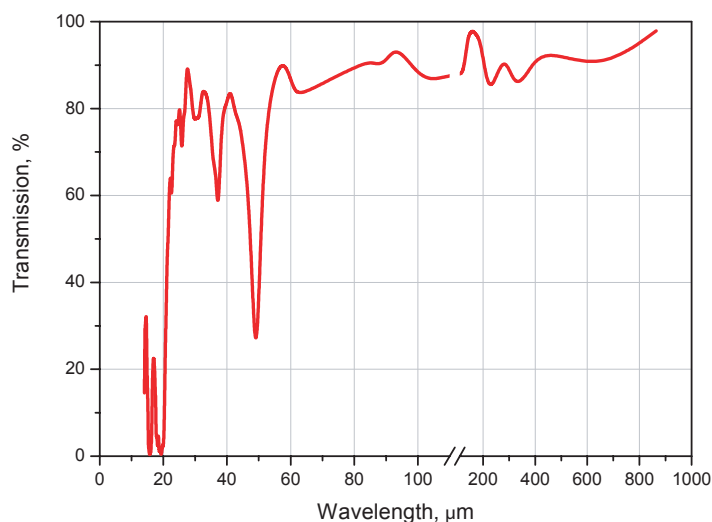


図11. FIR域、0.1mm厚PTFE透過率

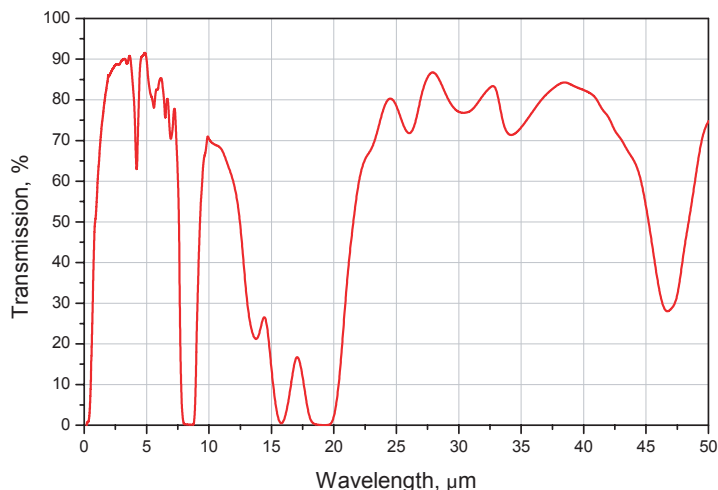


図12. NIR&MIR域、0.1mm厚PTFE透過率

PTFEは1~7 μm の範囲において優れた透過率を持つため、IRポラライザーに利用されています。結晶のポラライザーに比べて初期コストが安いいため、IRセンサーなどの大量生産に適しています。

PTFEの特徴

引張強度	3900psi~26.7MPa
引張弾性係数	80000psi~551.6MPa
引張破断伸び	300%
曲げ強度	破断なし
曲げ弾性率	72000psi
圧縮強度	3500psi
圧縮弾性率	70000psi

2 結晶

THz域において、非常に有用な結晶はシリコン、水晶、サファイアです。

2.1 水晶

50 μm 以上で最適な材料はzカットの水晶です。zカット水晶は可視光も透過するため、ガイド光を使った調整が簡単に行えます。偏光状態も変わらず、液体ヘリウムのラムダポイント以下までの冷却が可能です。

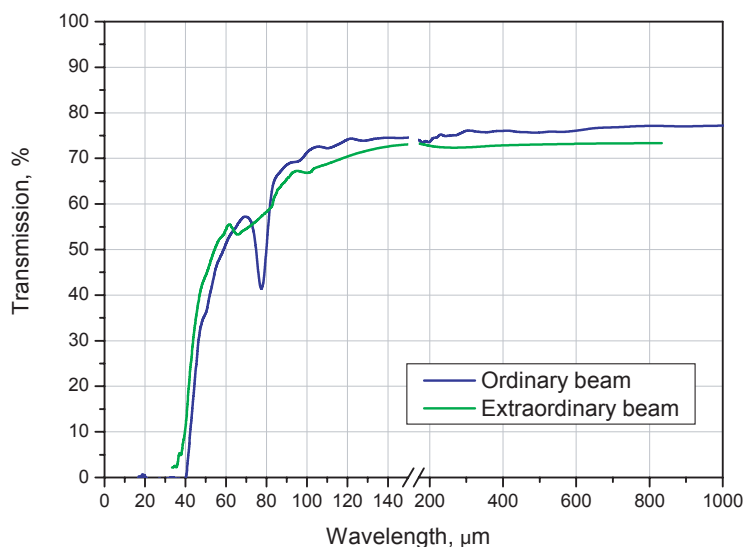


図13. 1.0mm厚水晶の透過率

水晶の透過性のみを使用したい場合は、オリエンテーションがランダムタイプであれば75 μm の吸収ピークを避ける事が可能です。吸収が非常に大きいため(下図参照)、水晶製のレンズは可視域と赤外域では焦点距離が変わりますのでご注意ください

波長、 μm	n_o	n_e
0.589	1.544	1.553
6.0	1.32	1.33
10.0	2.663	2.571
30.0	2.5	2.959
100.0	2.132	2.176
200.0	2.1114	2.159
333.3	2.1801	1.156

水晶は複屈折結晶のため、偏光特性が重要な場合は注意が必要です。xカットの水晶は、THz用L/2、L/4波長板に使用されています。

供給可能なサイズは：Z軸成長結晶：X：>100mm、Y：>150mm、Z：35mmまで

X軸成長結晶：X：30mmまで、Y：>100mm、Z：>125mm

Z軸、X軸とも左右回転が可能です。

水晶製THz波長板の標準仕様は下記の通りです。

材料	水晶
オリエンテーション	Xカット (Z軸、Y軸は面内、側面に平行)
オリエンテーション公差	+/-10 arc. Min.
サイズ	20 x 20 (+/-0.25)mm
有効径	> 90%
平行度	5 arc. Min.
厚さ公差	+/-1.0mm
スクラッチ/ディグ	60/40
TWD(透過波面歪)	1/2 @ 633nm

	波長板厚さ、mm	動作波長、 μm
L/2	0.412	35.0
	0.826	76.0
	0.984	90.5
	1.721	148.0
	3.256	280.0
	4.4477	385.0
L/4	5.767	496.0
	0.206	35.0
	0.413	76.0
	0.492	90.5
	0.860	148.0
	1.628	280.0
	2.238	385.0
2.884	496.0	

2.2 サファイア

サファイアは可視域とサブミリ域において透過性を持っています。また、下記グラフからも分かるように、結晶のオリエンテーションや測定の正確さなどには依存しません。計測サンプルは1~5mm厚で、600 μm 以下では厚さに依存することが分かります。薄いサンプルの場合、透過率は短波長での飽和と近くなります。

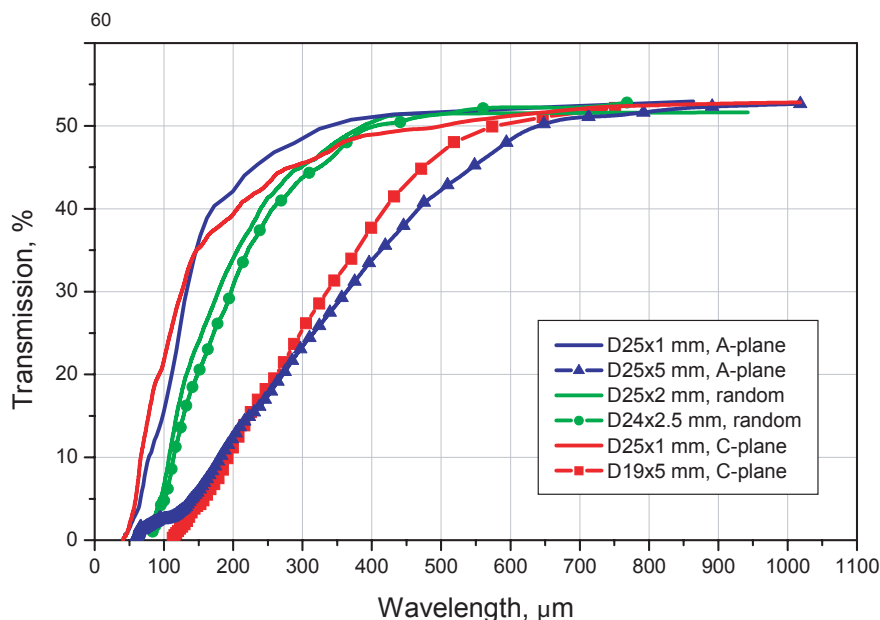


図14. 異なる厚さのサファイア透過率
異なるオリエンテーションサンプルの計測グラフ

サファイアとHRFZ-シリコンはTHz域での屈折率が似ているため、THz用光伝導アンテナとして使用可能です。

3 THzフィルター

ポリマーや結晶材のほかにTHzロングパスフィルターも供給しています。可視光と $\sim 13\mu\text{m}$ までのIRをブロック、長波長を透過します。一般的な透過率は下記の通りです。

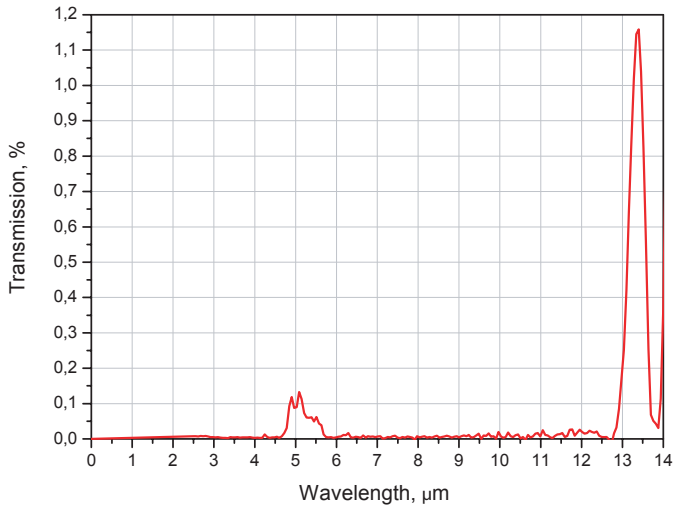


図15. NIR域、THzフィルター透過率

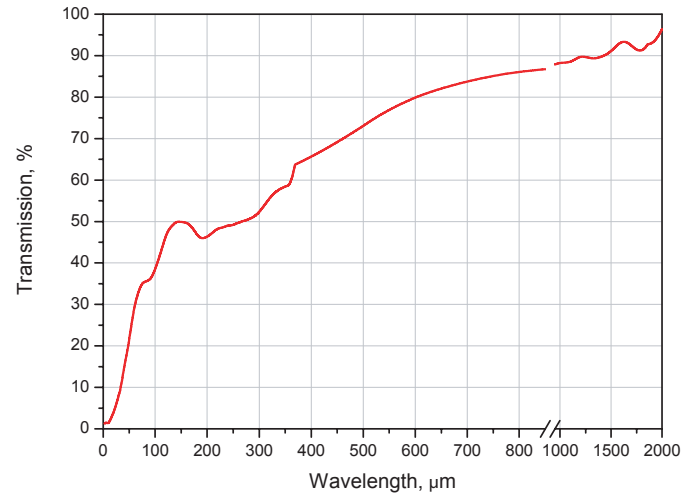


図16. FIR/THz域、THzフィルター透過率

標準フィルターは1"、1.5"、2"マウントで供給します。