

The College of Judea and Samaria



מכללת יהודה ושומרון

Dept. of Electrical and Electronic Engineering

המחלקה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה

APPLICATION OF TERA-HERTZ WAVES FOR DETECTION OF HIDDEN OBJECTS FINAL REPORT

Prof. Yosef Pinhasi

Prof. Asher Yahalom



נושא המחקר : שימוש בקרינת טרה-הרץ לחישת מרחוק וגילוי עצמים מוסתרים

- חוקרים ראשיים : פרופ' יוסף פנחסי, פרופ' אשר יהלום
- התאמה לחזון המאגד : גילוי אובייקטים חשודים מרחוק
בעזרת קרינת טרה-הרץ
- נציג במאגד : דני חרדון

BAND			FREQUENCY	WAVELENGTH
Extremely Low Frequency	ELF		300 - 3,000 Hz	1,000 - 100 Km
Very Low Frequency	VLF		3 - 30 KHz	100 - 10 Km
Low Frequency	LF		30 - 300 KHz	10 - 1 Km
Medium Frequency	MF		300 - 3,000 KHz	1 - 0.1 Km
High Frequency	HF		3 - 30 MHz	100 - 10 m
Very High Frequency	VHF		30 - 300 MHz	10 - 1 m
Ultra High Frequency	UHF		300 - 3,000 MHz	1 - 0.1 m
		L	1 - 2 GHz	
		S	2 - 4 GHz	
Super High Frequency	SHF		3 - 30 GHz	10 - 1 cm
		C	4 - 8 GHz	
		X	8 - 12 GHz	
		Ku	12 - 18 GHz	
		K	18 - 26.5 GHz	
		Ka	26.5 - 40 GHz	
Extremely High Frequency	EHF		30 - 300 GHz	1 - 0.1 cm
		V	40 - 75 GHz	
		W	75 - 110 GHz	
Sub-millimeter (TeraHertz)			300 - 3,000 GHz	1 – 0.1 mm
Far infra-red			3 – 30 THz	100 – 10 µm
Infra-red			30 – 300 THz	10 – 1 µm

יעדי מחקר

#	פעילות/משימה (כולל קבלני משנה)
1	סקר ספרות מקיף ואיסוף נתונים לגבי המקדם הדיאלקטרי המרוכב של חומרים שונים החשובים לזיהוי וחומרי ביגוד ואריזה.
2	פיתוח מודל תיאורטי להחזרה, העברה ובליעה מחומרים אלה. תכנון קונספטואלי של מערכת הגילוי והזיהוי על סמך המודל התיאורטי שיפותח והנתונים האמפיריים שיאספו.
3	הקמת מערך מדידות ניסיוני ומדידות המקדמים הדיאלקטריים של חומרי ביגוד, אריזה וחומרים מסוכנים

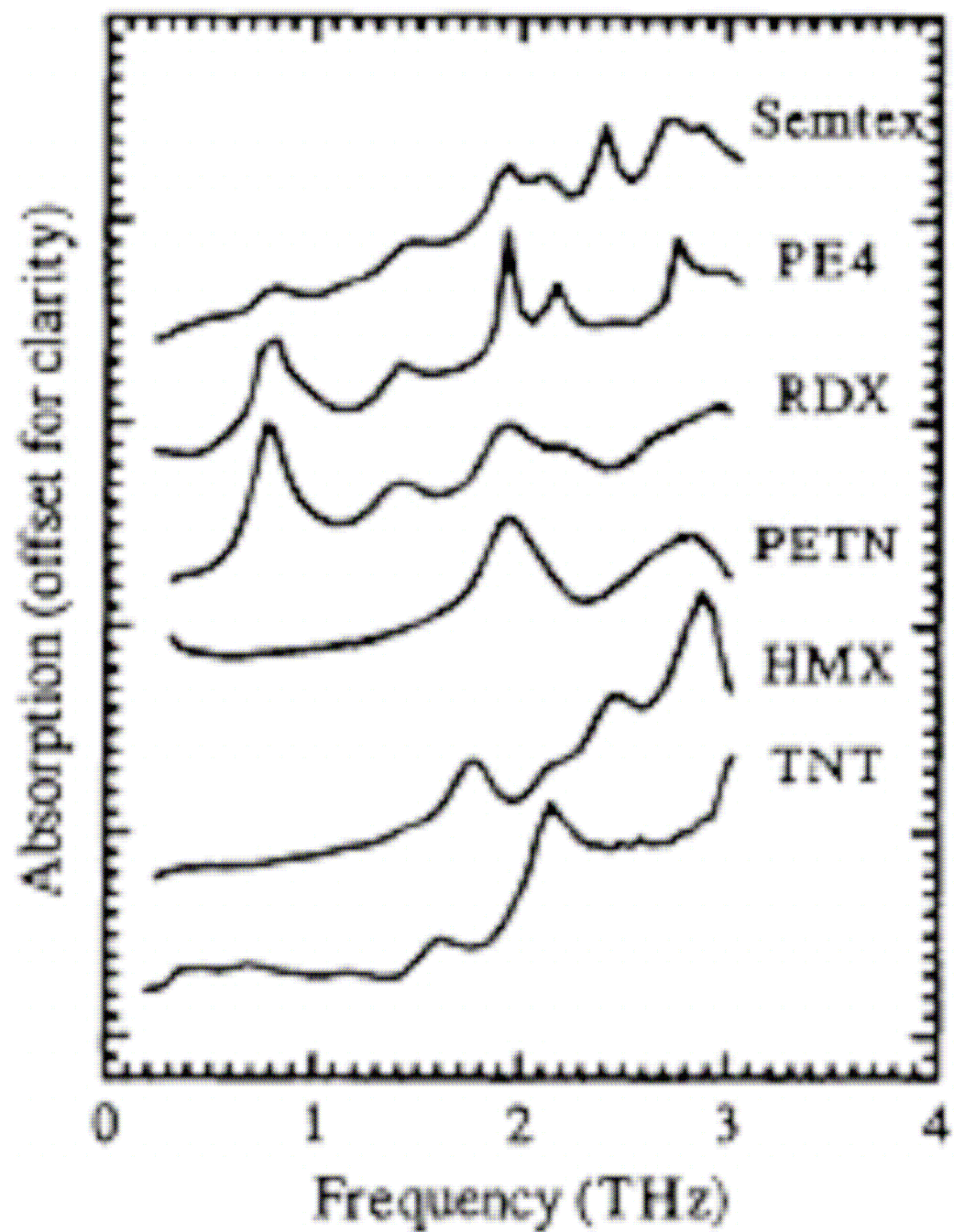
סקר ספרות

חומרי נפץ וסמים

Unique Spectral Lines of Explosives and Drugs

Material	Feature band centre position frequency (THz)
Explosive	
Semtex-H	0.72, 1.29, 1.73, 1.88, 2.15, 2.45, 2.57
PE4	0.72, 1.29, 1.73, 1.94, 2.21, 2.48, 2.69
RDX/ C4	0.72, 1.26, 1.73
PETN ^a	1.73, 2.51
PETN ^b	2.01
HMX ^a	1.58, 1.91, 2.21, 2.57
HMX ^b	1.84
TNT ^a	1.44, 1.91
TNT ^b	1.7
TNT	5.6, 8.2, 9.1, 9.9
NH ₄ NO ₃	4, 7
Drugs	
Methamphetamine	1.2, 1.7–1.8
MDMA	1.4, 1.8
Lactose α -monohydrate	0.54, 1.20, 1.38, 1.82, 2.54, 2.87, 3.29
Icing sugar	1.44, 1.61, 1.82, 2.24, 2.57, 2.84, 3.44
Co-codamol	1.85, 2.09, 2.93
Aspirin, soluble	1.38, 3.26
Aspirin, caplets	1.4, 2.24
Acetaminophen	6.5
Terfenadine	3.2
Naproxen sodium	5.2, 6.5

Absorption Spectra



γ -HNIW הצגת נתונים לחומר הנפץ

חלק ממשי ומדומה של מקדם דיאלקטרי

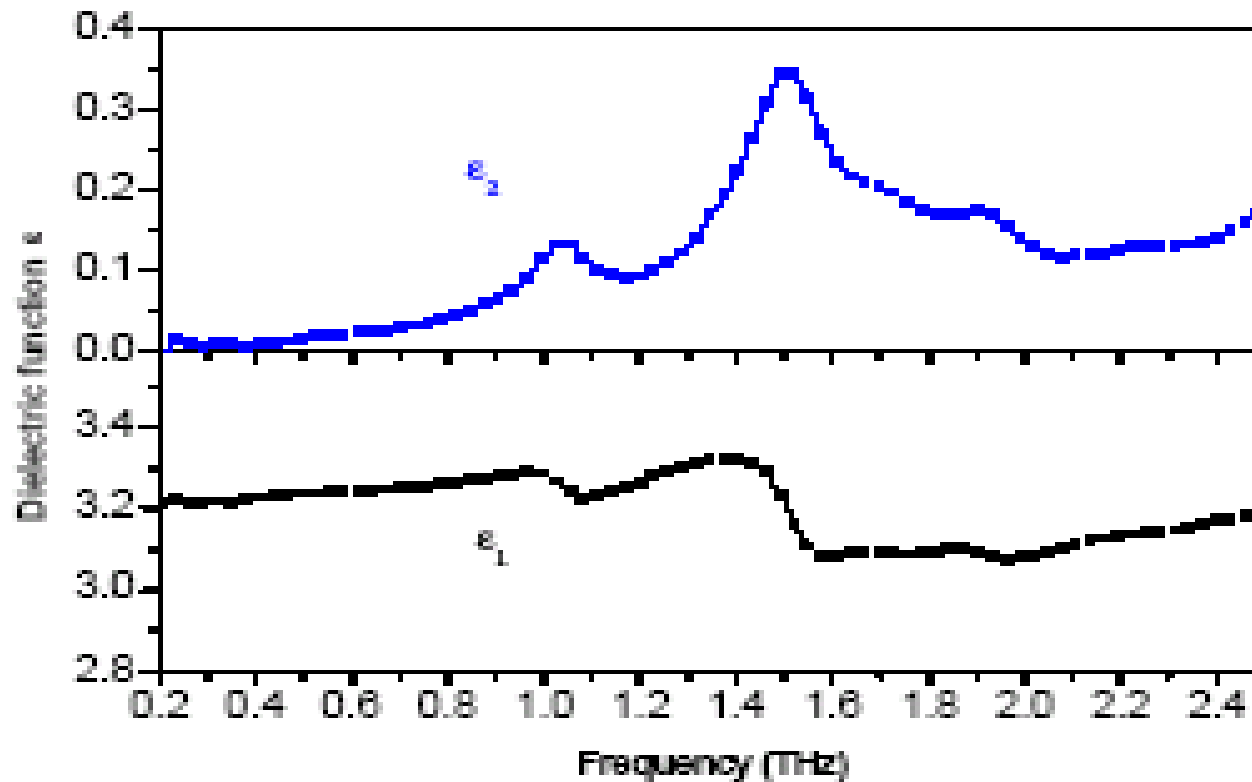


Fig. 2. Frequency-dependent complex dielectric function of γ -HNIW. ϵ_1 and ϵ_2 are the real part and imaginary part of the dielectric function.

מקדם הניחות ואינדקס השבירה

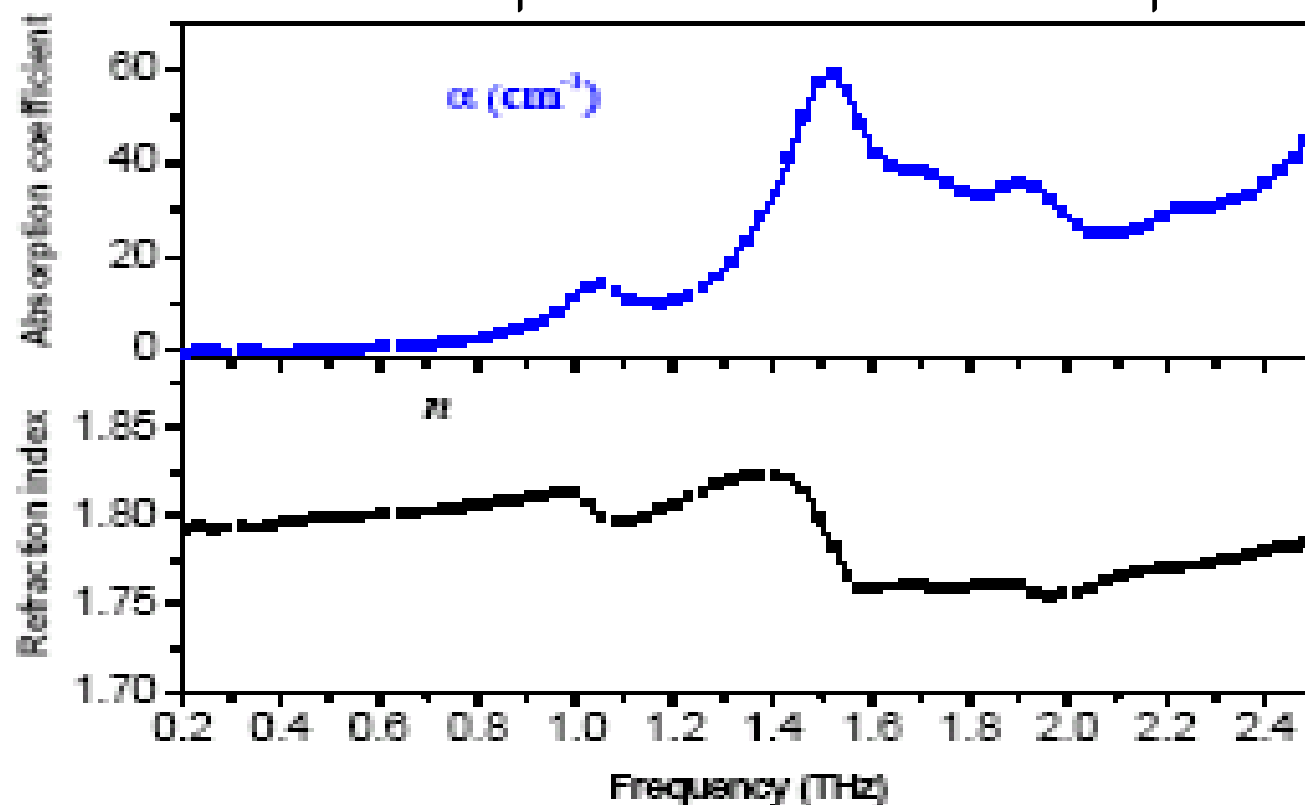


Fig. 1. Frequency-dependent refractive index $n(\nu)$ and absorption coefficient $\alpha(\nu)$ of γ -HNIW.

תדריי רזוננס נבחרים וערכים מתאימים להם

Resonans frequency [THz]	ϵ'	ϵ''	$tg[\delta]$ (10^{-3})	$2\alpha[cm^{-1}]$	$\beta\left[\frac{rad}{cm}\right]$
1.05	3.25	0.11	33.846	14.2	396.5
1.52	3.12	0.325	104.16	59.2	563.0
1.9	3.1	0.157	50.645	36.2	700.8

הצגת נתונים לחומר הנפץ RDX

אינדקס השבירה ומקדם הבליעה

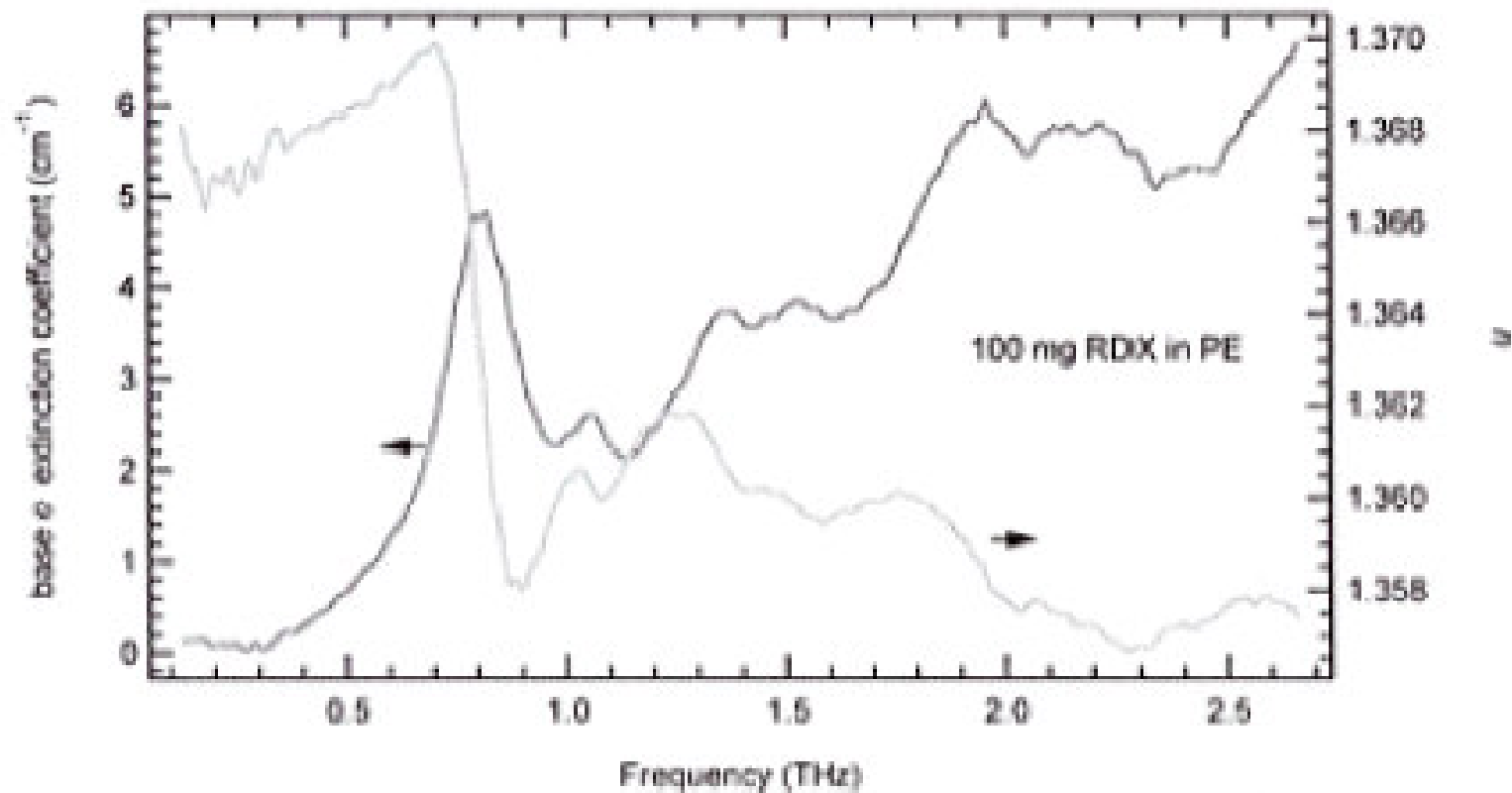


Fig. 2. The spectral extinction coefficient (base e) and refractive index of RDX (100 mg in polyethylene).

תדריי רזוננס נבחרים וערכים מתאימים להם

Resonans frequency [THz]	ε'	ε''	$tg[\delta]$ (10^{-3})	$2\alpha[cm^{-1}]$	$\beta\left[\frac{rad}{cm}\right]$
1.05	3.25	0.11	33.846	14.2	396.5
1.52	3.12	0.325	104.16	59.2	563.0
1.9	3.1	0.157	50.645	36.2	700.8

הצגת נתונים לחומר הנפץ PETN

אינדקס השבירה ומקדם הבליעה

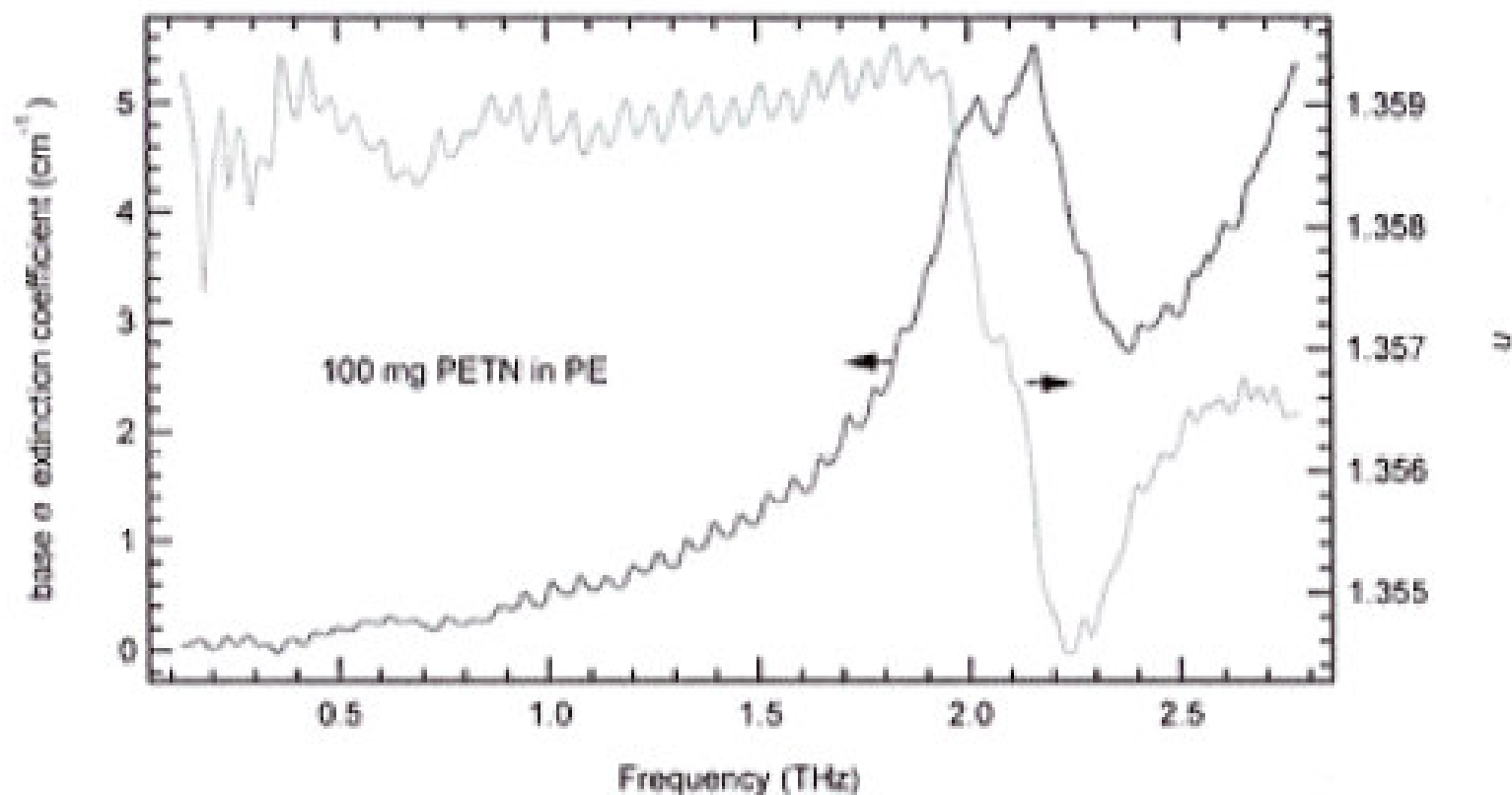


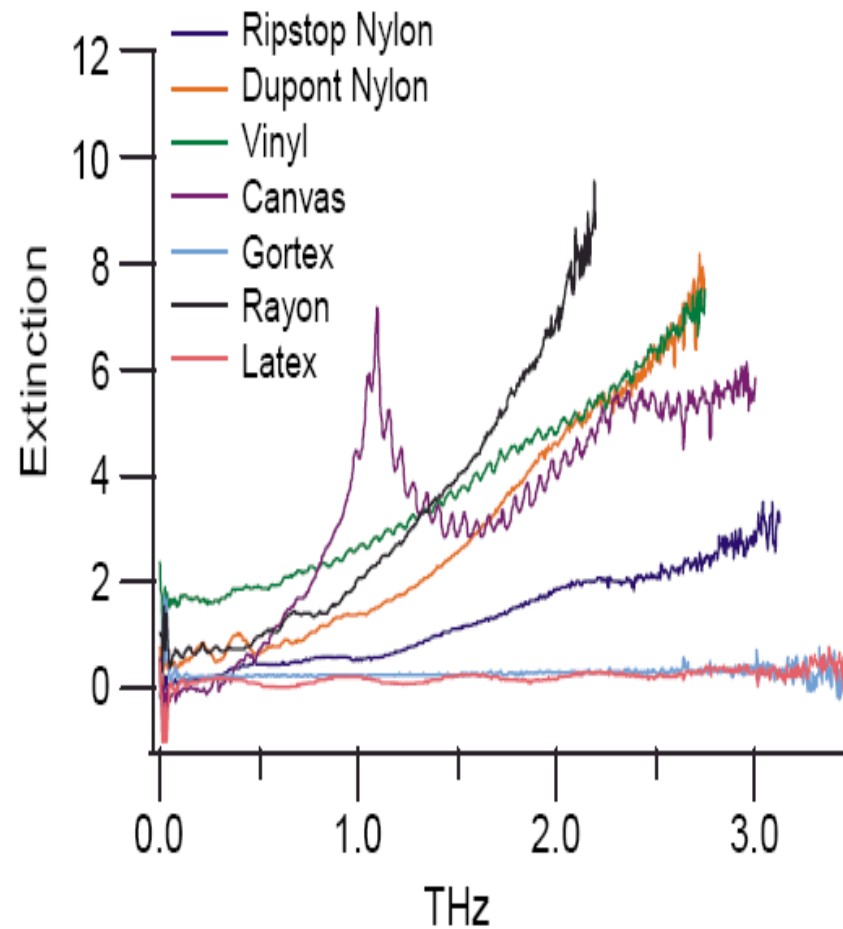
Fig. 1. The spectral extinction coefficient (base e) and refractive index of PETN (100 mg in polyethylene).

תדריי רזוננס נבחרים וערכים מתאימים להם

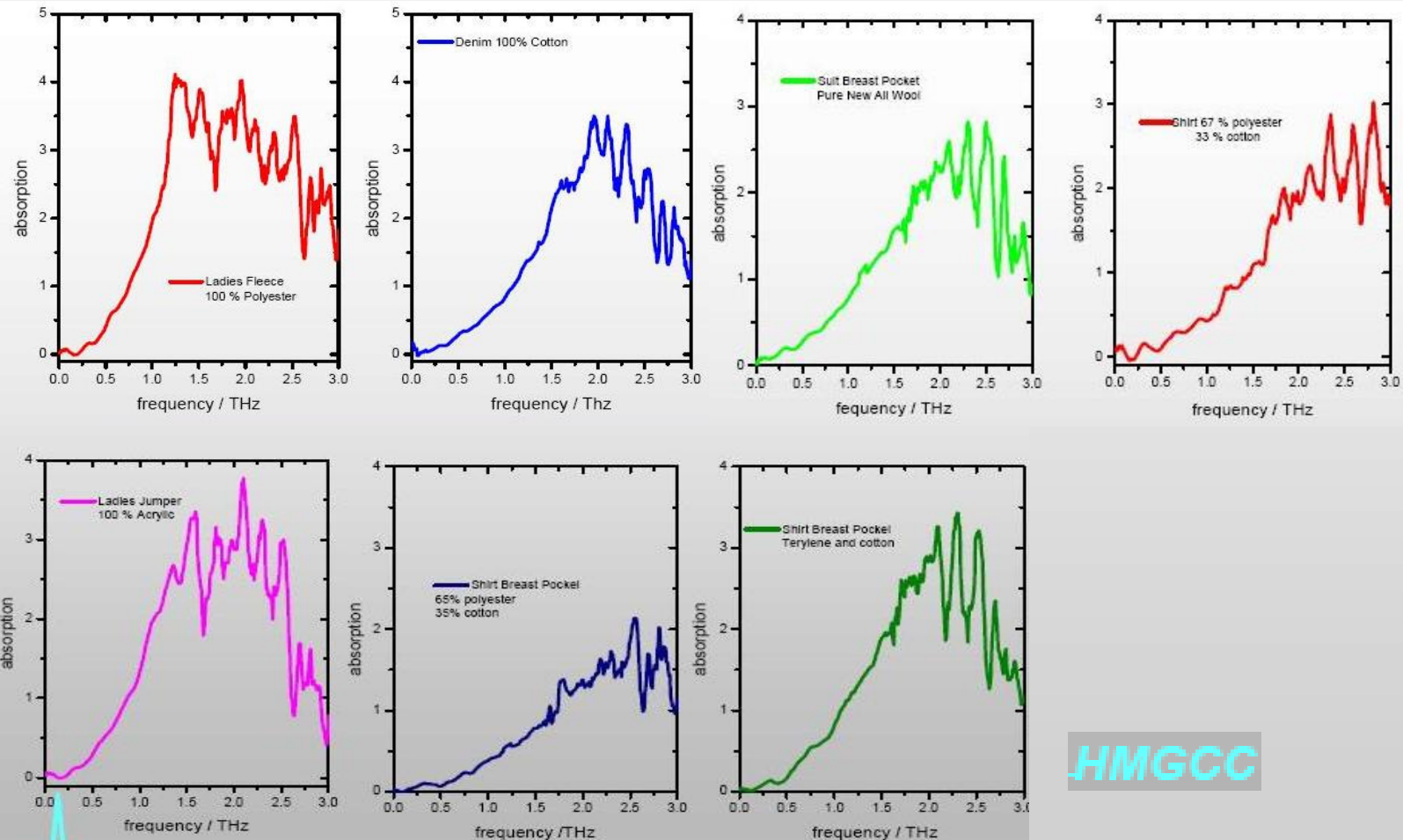
Resonans frequency [THz]	ϵ'	ϵ''	$tg[\delta]$ (10^{-3})	$2\alpha[cm^{-1}]$	$\beta\left[\frac{rad}{cm}\right]$
1.05	3.25	0.11	33.846	14.2	396.5
1.52	3.12	0.325	104.16	59.2	563.0
1.9	3.1	0.157	50.645	36.2	700.8

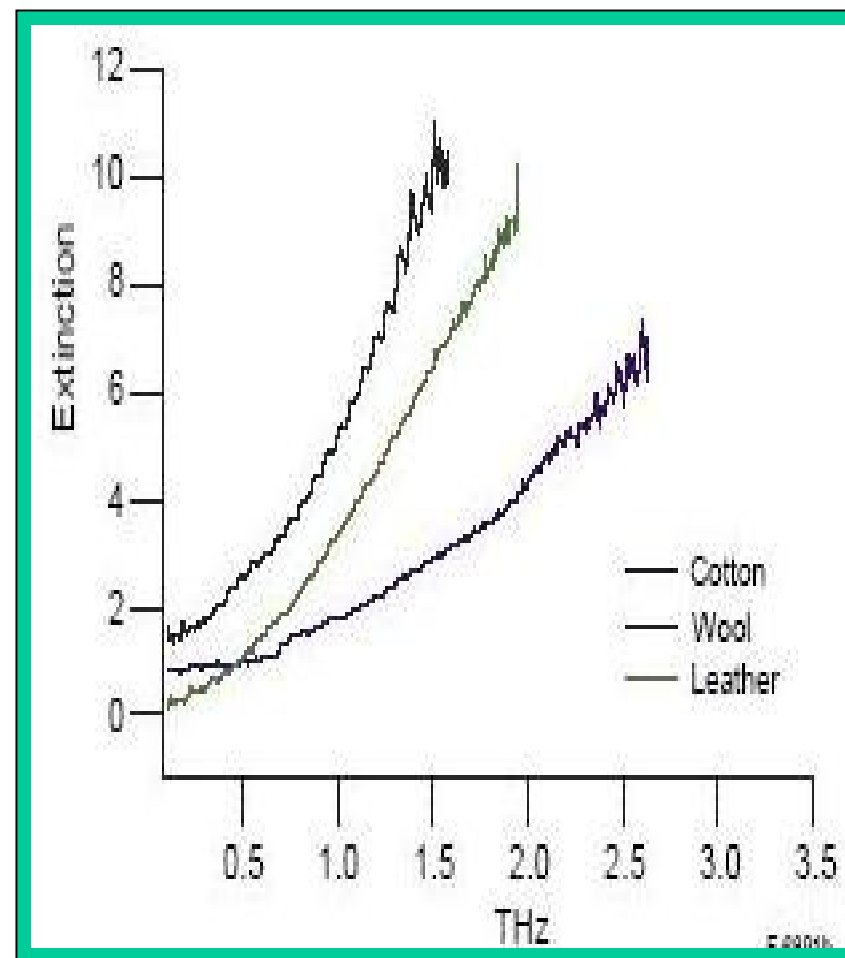
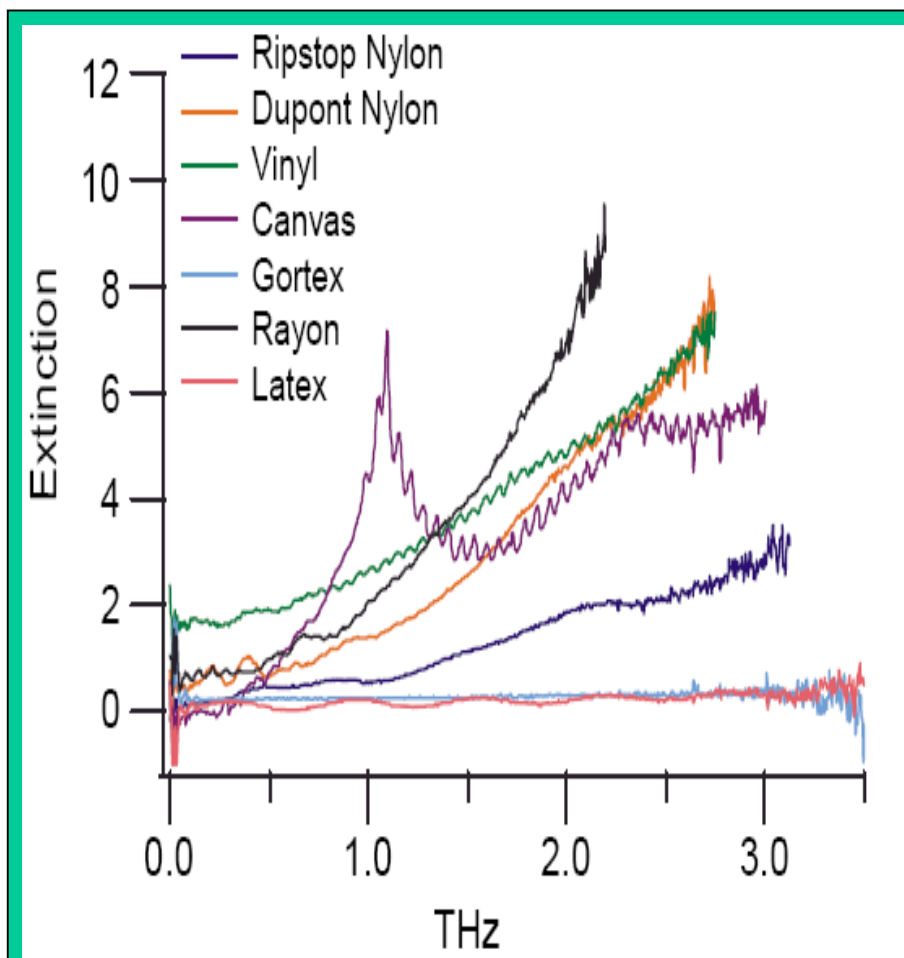
בגדים וחומרי אריזה

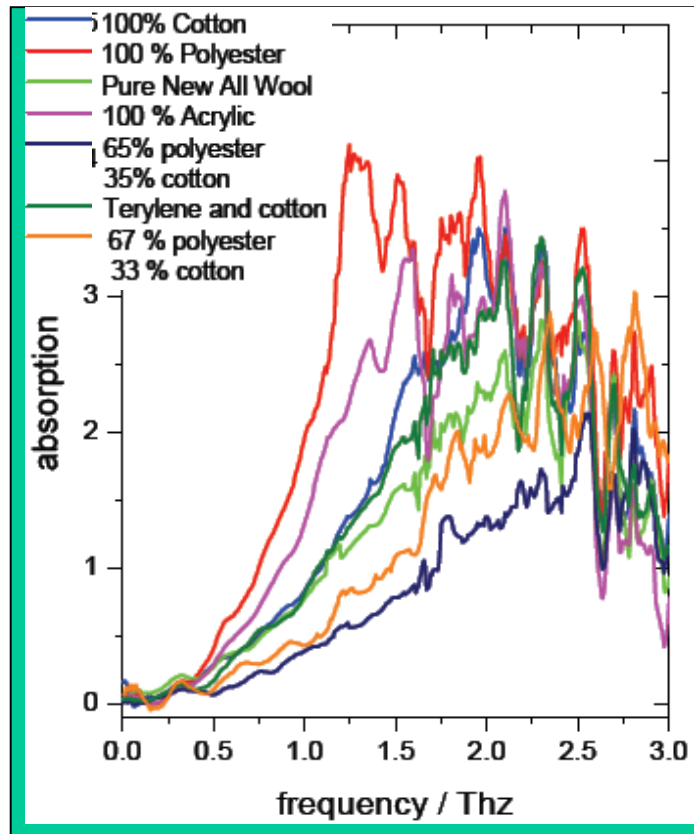
THz properties – clothes & packs



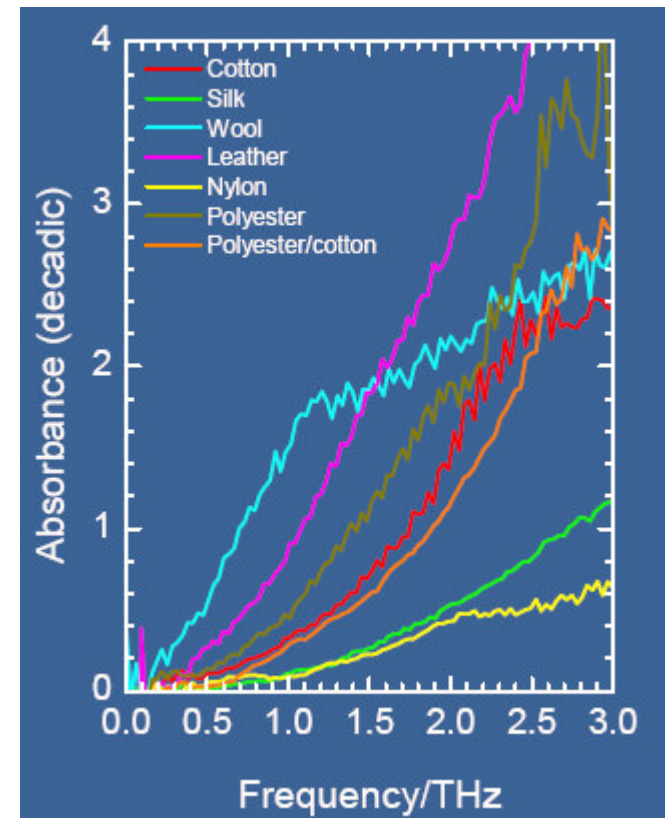
Absorption in Clothes







HMGCC

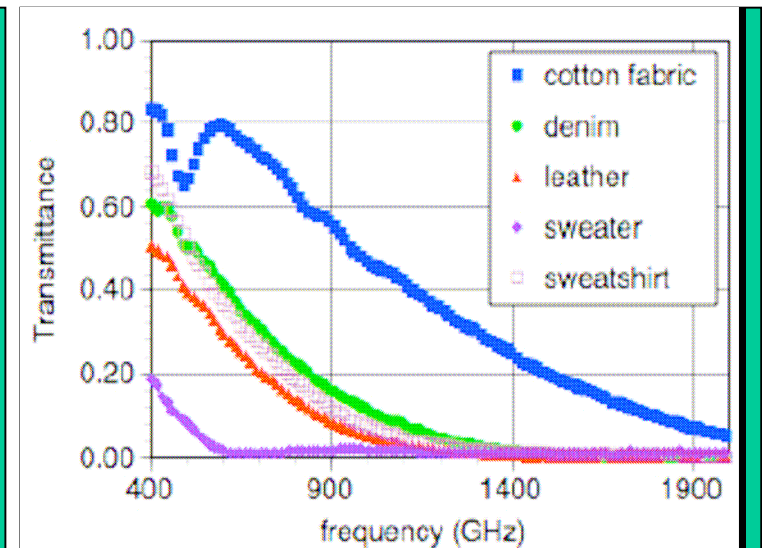
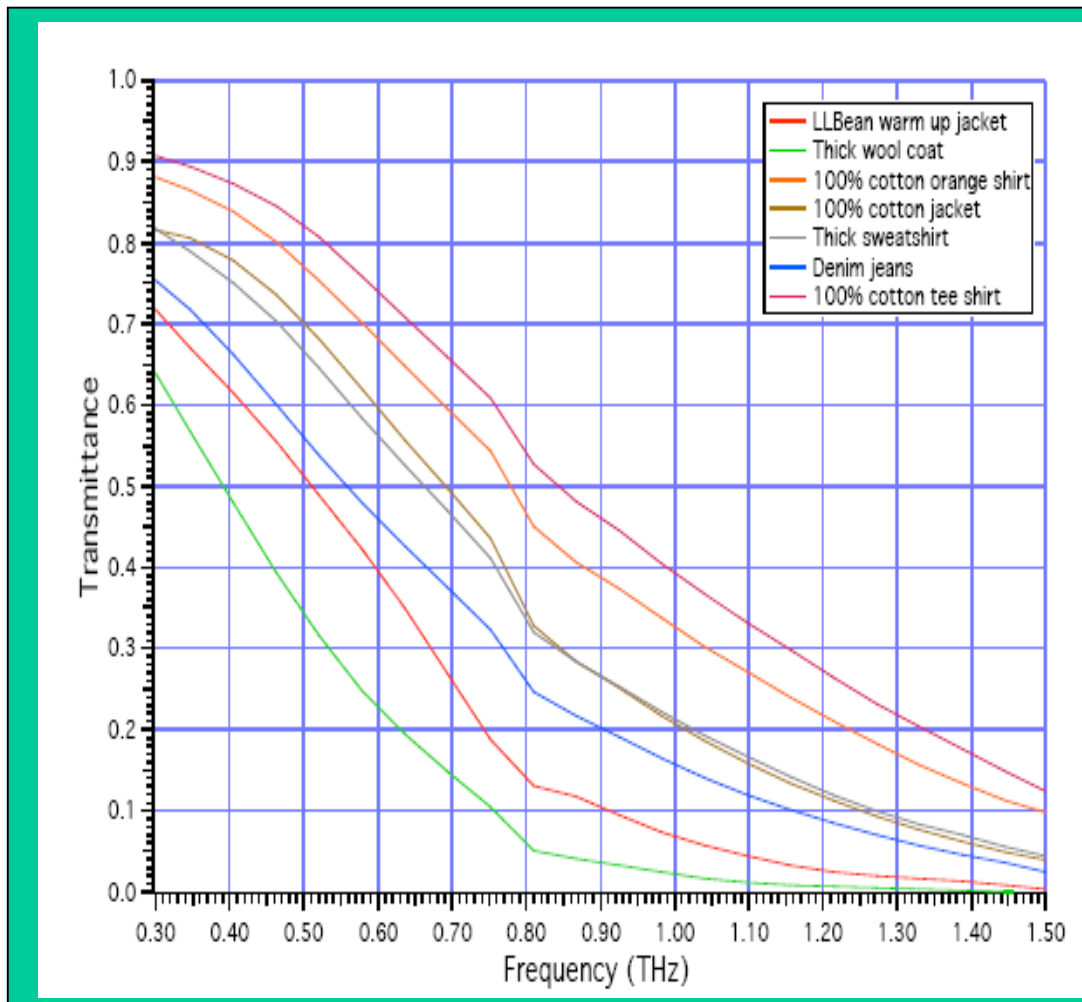


TeraView

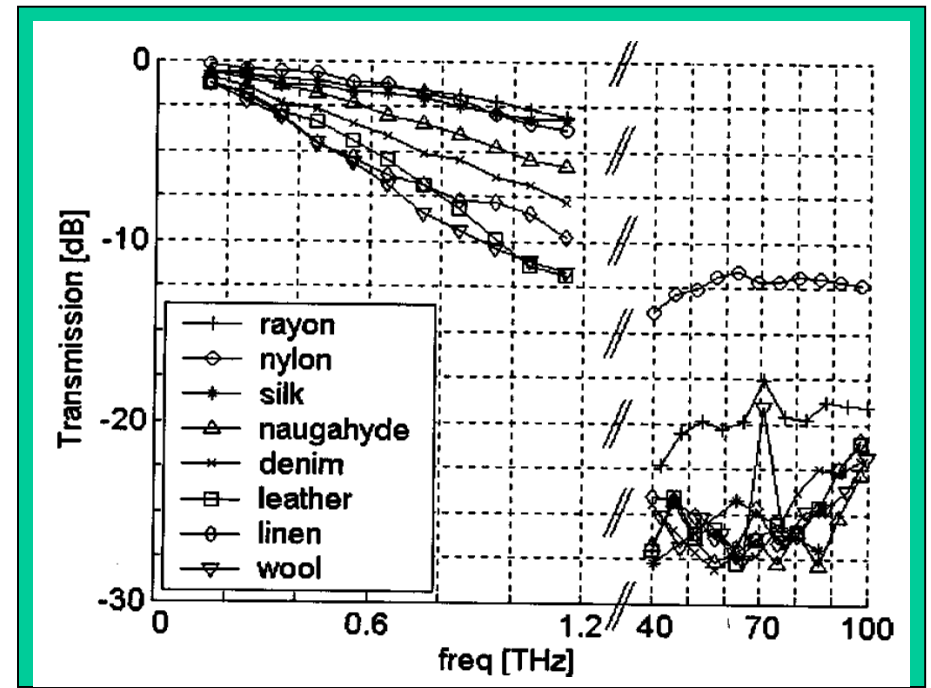
•מגמה ברורה של הגדלת הניחות עם עליית התדר.

•אין אחידות בין הניסויים השונים. סיבות אפשריות להבדלים: עובי הבגד, מבנה הבגד- צורת התפירה\אריגה, תנאי הניסוי.

Transmittance in Cloth



<i>Fabric</i>	<i>Morphology</i>	<i>Origin</i>
Wool	Nap	Animal
Linen	Woven	Plant (flax)
Leather	Compound polymer	Animal (mammal)
Denim	Woven	Plant (cotton)
Naugahyde	Homogeneous polymer	Synthetic
Silk	Woven	Animal (insect)
Nylon	Knit	Synthetic
Rayon	Woven	Synthetic



<i>Fabric</i>	<i>Thickness [mm]</i>	<i>Density [kg/m³]</i>	<i>-3 dB Frequency [THz]</i>	<i>Attenuation At 1 THz [dB]</i>	<i>ϵ' (100kHz)</i>
Wool	2.2	214	0.35	11.0	1.6
Linen	1.1	509	0.35	8.0	2.9
Leather	0.75	813	0.40	10.0	5.1
Denim	0.96	490	0.50	6.5	2.3
Naugahyde	0.65	800	0.70	5.5	2.6
Silk	0.36	256	1.0	3.0	1.4
Nylon	0.19	379	1.0	3.0	1.9
Rayon	0.15	733	>1.0	2.5	1.9

ממצאים ומסקנות:

בתדרים נמוכים העברה טובה מאוד
בכל סוגי הבדים.

תדר מחצית ההספק המינימלי-
0.35 THz

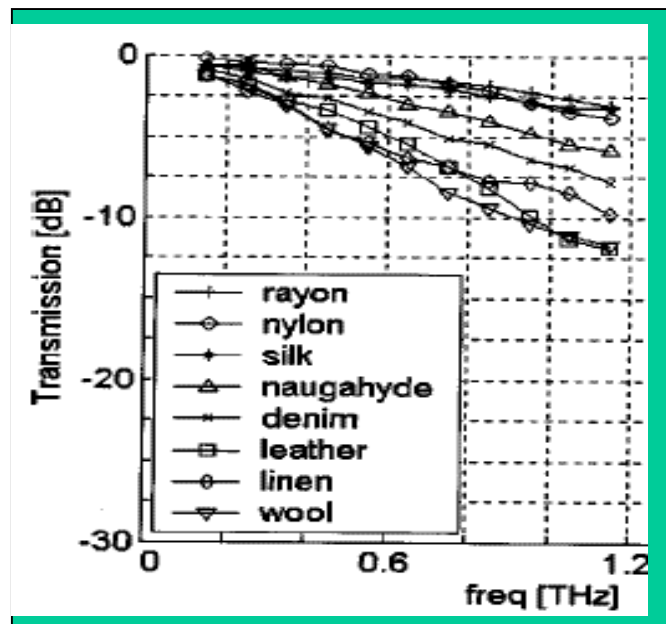
בתדר 1THz יש הבדל של כמעט
9dB בין סוגי הבגדים.

העברה מושפעת בעיקר מ:

1. סוג הבד
2. תדר
3. עובי הבד(!)

המחקר לא הבחין בין פיזור, בליעה, והחזרה.

<i>Fabric</i>	<i>Thickness [mm]</i>	<i>Density [kg/m³]</i>	<i>-3 dB Frequency [THz]</i>	<i>Attenuation At 1 THz [dB]</i>	<i>ϵ' (100kHz)</i>
Wool	2.2	214	0.35	11.0	1.6
Linen	1.1	509	0.35	8.0	2.9
Leather	0.75	813	0.40	10.0	5.1
Denim	0.96	490	0.50	6.5	2.3
Naugahyde	0.65	800	0.70	5.5	2.6
Silk	0.36	256	1.0	3.0	1.4
Nylon	0.19	379	1.0	3.0	1.9
Rayon	0.15	733	>1.0	2.5	1.9



הצגה אנליטית

ניחות בתווך דיאלקטרי מתנהג בצורה אקספוננציאלית: $\exp[-\alpha d]$

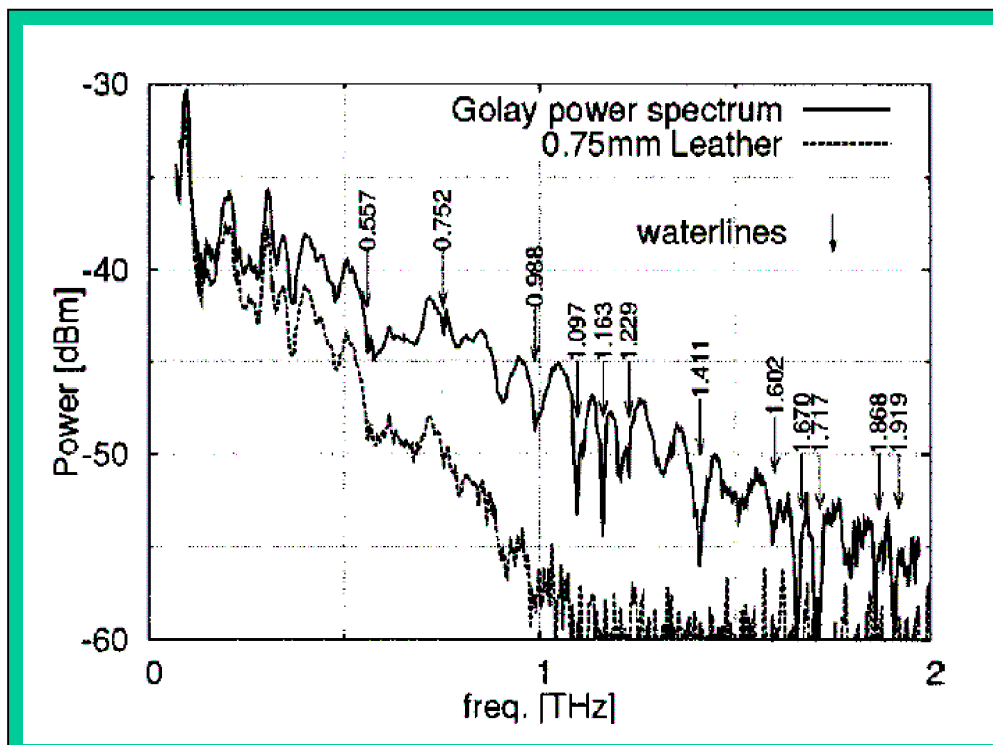
עבור תדר נמוך $\alpha \approx 0$ ולכן $T = T_0$

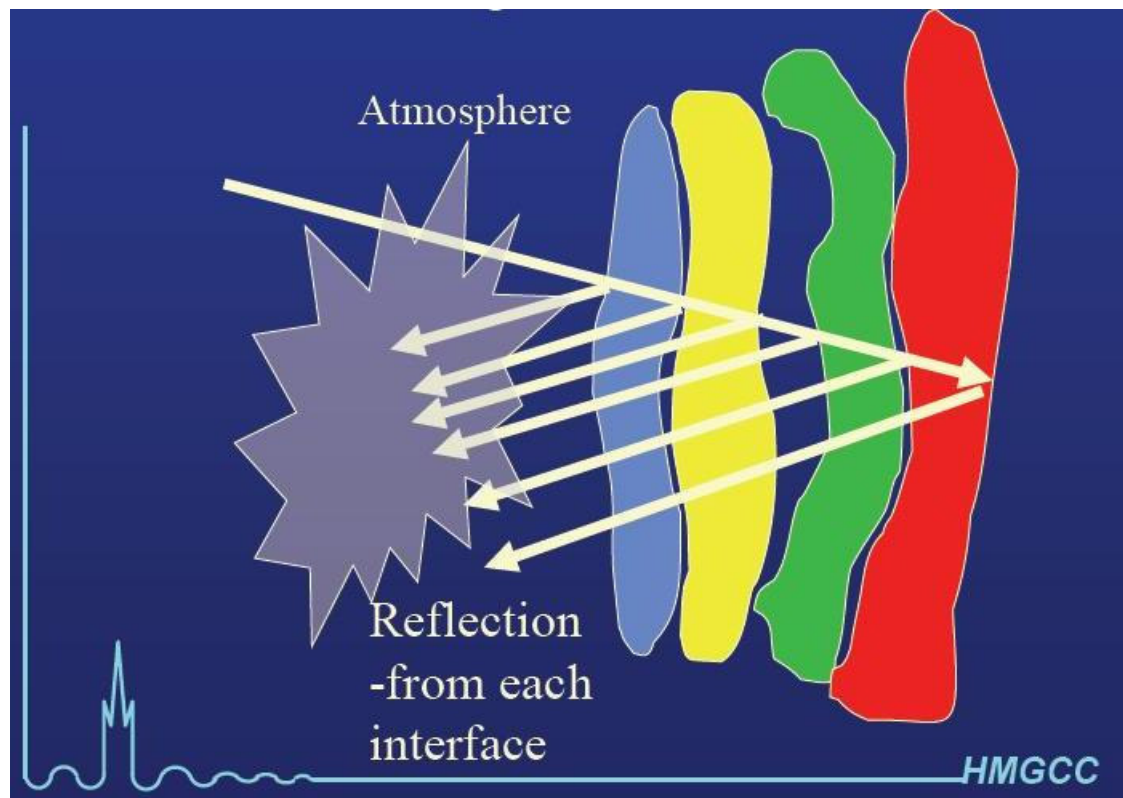
כאשר T_0 הוא פונקציה של ε'

$$T = T_0 \exp[-\alpha d]$$

ע"פ משוואה זו מספיק לדעת את α ע"מ לקבל את ההעברה בכל תדר.

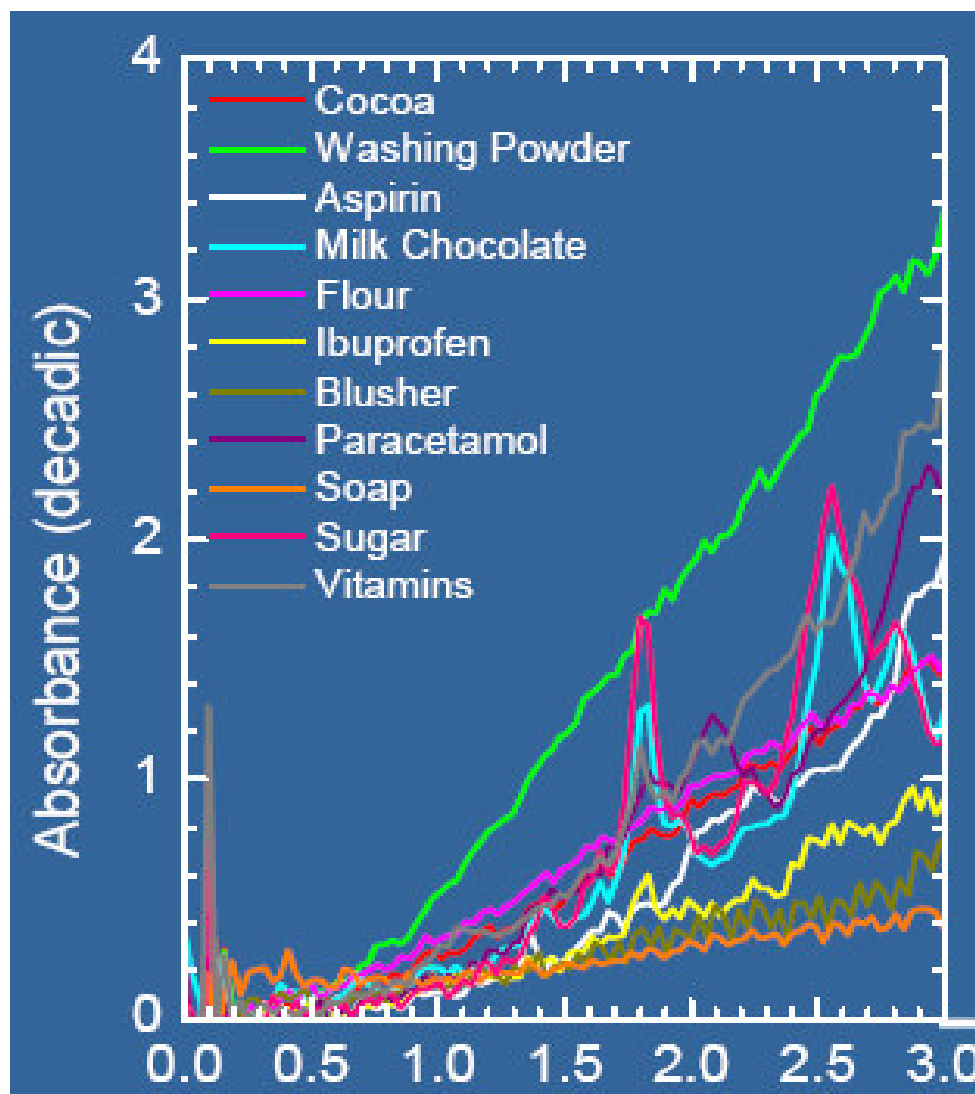
ההנחה היא ש- T_0 לא משתנה, כלומר ε' לא משתנה. הנחה זו צריכה בדיקה.





חומרים ביולוגיים

התנהגות חומרים שונים בטרה-הרץ



TeraView

פיתוח מודל תיאורטי

הכללה של חוק סנל לתווד בולע
ונוסחאות העברה

השדה החשמלי בתווך ללא מטענים וזרמים חופשיים מקיים את
המשוואה הבאה:

$$\nabla^2 \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) + k^2(f) \tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) = 0$$

כאשר:

$$k^2(f) = \mu \varepsilon(f) (2\pi f)^2 = \mu_r \varepsilon_r(f) \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

בתווך שאינו מגנטי אפשר להניח:

$$\mu_r = 1$$

בואקום וגם באוויר (בתדרים מסוימים) אפשר להניח:

$$\varepsilon_r = 1$$

אך בדרך כלל התווך בולע חלק מסוים של הקרינה העוברת בו ולכן
המקדם הדיאלקטרי הוא גודל מרוכב:

$$\varepsilon_r = \text{Re } \varepsilon_r + j \text{Im } \varepsilon_r$$

גלים מישוריים וגלים מישוריים מוכללים

בדרך כלל מקובל להניח כי קיים למשוואות השדה החשמלי
בוואקום פתרון בצורת גל מישורי:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) = A e^{+j \cdot \vec{k}(f) \cdot \vec{r}}$$

כאשר $\vec{k}$ וקטור הגל הוא וקטור ממשי. זהו פתרון
כאשר מתקיים:

$$\vec{k}^2(f) = \varepsilon_r(f) \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

יחד עם זאת למשוואה:

$$\vec{k}^2(f) = \varepsilon_r(f) \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

אין פתרון כאשר המקדם הדיאלקטרי מרוכב שהרי:

$$\text{Im } \vec{k}^2(f) = 0 \neq \text{Im } \varepsilon_r(f) \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

לשם כך אנו נגדיר גל מישורי מוכלל:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) = A e^{+j \cdot \vec{k}(f) \cdot \vec{r}}$$

כאשר $\vec{k}$ וקטור הגל הוא וקטור מרוכב:

$$\vec{k} = \vec{k}_r + j\vec{k}_i$$

כלומר:

$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) = A e^{+j \cdot \vec{k}_r(f) \cdot \vec{r}} e^{-\vec{k}_i(f) \cdot \vec{r}}$$

מתקיים:

$$\vec{k}^2(f) = \varepsilon_r(f) \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

$$\vec{k}_r^2 - \vec{k}_i^2 = \text{Re } \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

$$2\vec{k}_r \cdot \vec{k}_i = \text{Im } \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2$$

הפתרון:

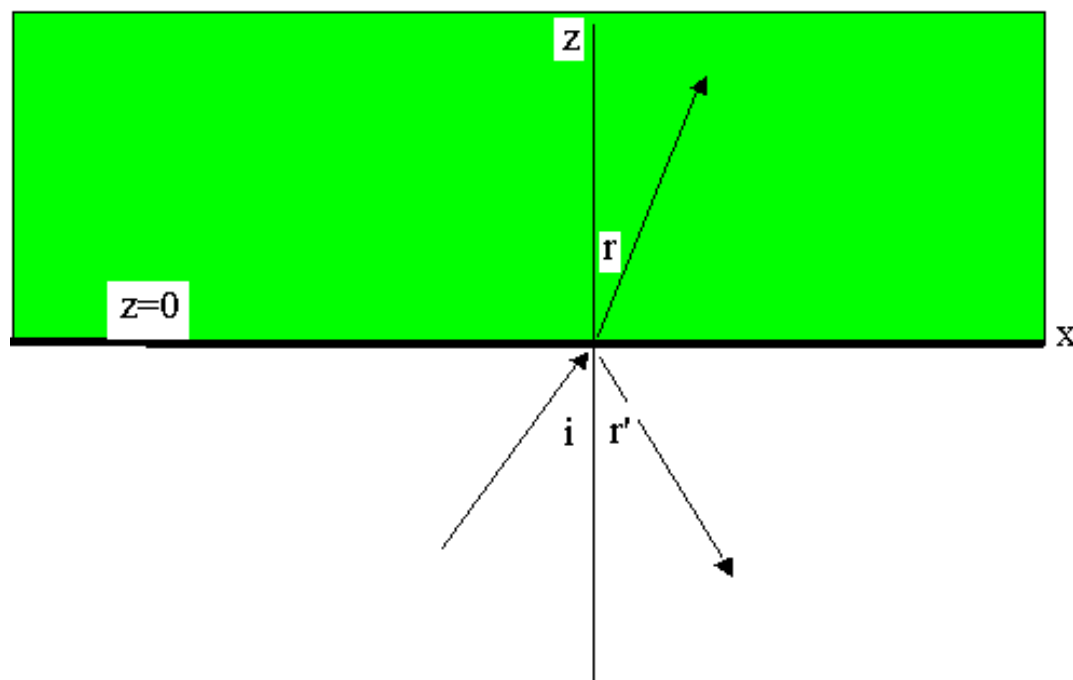
$$\tilde{\mathbf{E}}(\mathbf{r}, f) = A e^{+j \cdot \vec{k}_r(f) \cdot \vec{r}} e^{-\vec{k}_i(f) \cdot \vec{r}}$$

אינו מקיים תנאי שפה של סופיות השדה כאשר:

$$\vec{r} \rightarrow \pm\infty$$

ולכן איננו פתרון קביל במרחב כולו. יחד עם זאת זהו פתרון קביל בחצי מרחב כמו בבעיה שלפנינו.

בעיות שבירה והחזרה



$$\epsilon_r = \text{Re } \epsilon_r + j \text{Im } \epsilon_r$$

$$\epsilon_r = 1$$

גלים

$$\tilde{\mathbf{E}}_{in} = E_{in} e^{+j \cdot \vec{k}_r^{in}(f) \cdot \vec{r}} \qquad \tilde{\mathbf{E}}_{re} = E_{re} e^{+j \cdot \vec{k}_r^{re}(f) \cdot \vec{r}}$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{z<0} = \tilde{\mathbf{E}}_{in} + \tilde{\mathbf{E}}_{re}$$

$$\tilde{\mathbf{E}}_{z>0} = \tilde{\mathbf{E}}_{tr} = E_{tr} e^{+j \cdot \vec{k}_r^{tr}(f) \cdot \vec{r}} e^{-\alpha z}$$

$$\alpha = \operatorname{Im} k_z^{tr} > 0, \quad \operatorname{Im} k_{x,y}^{tr} = 0$$

$$\operatorname{Im} \vec{k}^{in} = \operatorname{Im} \vec{k}^{re} = 0$$

$$(\vec{k}^{in})^2 = (\vec{k}^{re})^2 = \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2$$

$$\vec{k}_r^{tr2} - \alpha^2 = \text{Re } \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2$$

$$2k_{rz}^{tr} \alpha = \text{Im } \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2$$

פתרון

$$\alpha^2 = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - (k_{\perp}^{tr})^2 \right) \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^4 (\operatorname{Im} \varepsilon_r)^2}{\left(\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - (k_{\perp}^{tr})^2 \right)^2}} \right)$$

כאשר

$$(k_{\perp}^{tr})^2 = (\vec{k}^{tr})^2 - (k_z^{tr})^2$$

בליעה קטנה

$$\alpha^2 \cong \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - (k_{\perp}^{tr})^2 \right) \left(-1 + 1 + \frac{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^4 (\operatorname{Im} \varepsilon_r)^2}{2 \left(\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - (k_{\perp}^{tr})^2 \right)^2} \right)$$

$$= \left(\frac{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^4 (\operatorname{Im} \varepsilon_r)^2}{4 \left(\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - (k_{\perp}^{tr})^2 \right)} \right)$$

בליעה קטנה

$$\alpha \cong \left(\frac{\left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 \operatorname{Im} \varepsilon_r}{2 \sqrt{\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2 - \left(k_{\perp}^{tr} \right)^2}} \right)$$

רציפות

תנאי הכרחי (ולא מספיק) לקיום תנאי השפה מחייב רציפות של כל
הגורמים האקספוננציאליים במישור $z=0$:

$$\begin{aligned} &+ j \cdot \vec{k}_r^{in} \cdot \vec{r} \big|_{z=0} = + j \cdot \vec{k}_r^{re}(f) \cdot \vec{r} \big|_{z=0} = + j \cdot \vec{k}_r^{tr}(f) \cdot \vec{r} - \alpha z \big|_{z=0} \\ &= + j \cdot \vec{k}_r^{tr}(f) \cdot \vec{r} \big|_{z=0} \end{aligned}$$

$$\vec{r}|_{z=0} = (R\hat{R} + z\hat{z})|_{z=0} = R\hat{R}|_{z=0}$$

$$\Rightarrow$$

$$\vec{k}_r^{in} \cdot \hat{R} = \vec{k}_r^{re} \cdot \hat{R} = \vec{k}_r^{tr} \cdot \hat{R}$$

$$\Rightarrow$$

$$\vec{k}_{r\perp}^{in} \cdot \hat{R} = \vec{k}_{r\perp}^{re} \cdot \hat{R} = \vec{k}_{r\perp}^{tr} \cdot \hat{R}$$

כאשר:

$$\vec{k}_{\perp} = \vec{k} - k_z \hat{z}$$

מכיוון שהמשוואות מתקיימות לכל $\hat{R}$

$$\hat{R} = \cos \phi \hat{x} + \sin \phi \hat{y}$$

ϕ דהיינו לכל זווית

$\Rightarrow$

$$\vec{k}_{r\perp}^{in} = \vec{k}_{r\perp}^{re} = \vec{k}_{r\perp}^{tr}$$

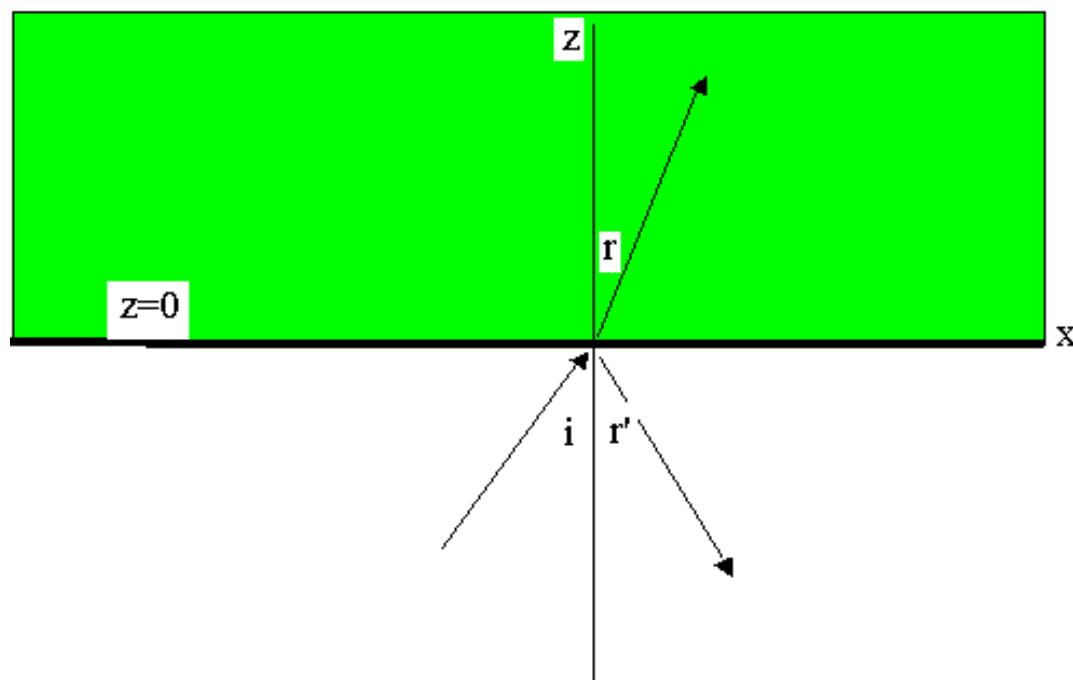
ובפרט

$\Rightarrow$

$$k_{r\perp}^{in} = k_{r\perp}^{re} = k_{r\perp}^{tr}$$

$$k_{r\perp} = |\vec{k}_{r\perp}|$$

נסתכל באיור:



$$\epsilon_r = \text{Re } \epsilon_r + j \text{Im } \epsilon_r$$

$$\epsilon_r = 1$$

$\Rightarrow$

$$k_r^{in} \sin i = k_r^{re} \sin r' = k_r^{tr} \sin r$$

מכיוון ש:

$$k_r^{in} = k_r^{re} = \frac{2\pi f}{c} \quad i < \frac{\pi}{2}, r' < \frac{\pi}{2}$$

$\Rightarrow$

זווית הפגיעה שווה לזווית ההחזרה

כמצופה!

$$i = r'$$

כמו כן:

$$k_{r\perp}^{tr} = k_r^{tr} \sin r = \frac{2\pi f}{c} \sin i$$

$\Rightarrow$

$$\alpha \cong \left(\frac{\left(\frac{2\pi f}{c} \right) \text{Im } \varepsilon_r}{2\sqrt{\text{Re } \varepsilon_r - (\sin i)^2}} \right)$$

מקדם הבליעה תלוי
בזווית הפגיעה, בתדר,
ובתכונות החומר!

נחשב את זווית השבירה

$$\sin r = \frac{2\pi f}{ck_r^{tr}} \sin i$$

$$\left(k_r^{tr}\right)^2 = \alpha^2 + \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \operatorname{Re} \varepsilon_r$$

$$= \operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2 \left[1 + \frac{\alpha^2}{\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c}\right)^2} \right]$$

נחשב את זווית השבירה:

$$\sin r = \frac{\sin i}{\sqrt{\operatorname{Re} \varepsilon_r \left[1 + \frac{\alpha^2}{\operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2} \right]}}$$

בקירוב:

$$\sin r \cong \frac{\sin i}{\sqrt{\operatorname{Re} \varepsilon_r}} \left[1 - \frac{\alpha^2}{2 \operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{2\pi f}{c} \right)^2} \right]$$

בקירוב:

$$\sin r \cong \frac{\sin i}{\sqrt{\operatorname{Re} \varepsilon_r}} \left[1 - \frac{(\operatorname{Im} \varepsilon_r)^2}{8 \operatorname{Re} \varepsilon_r (\operatorname{Re} \varepsilon_r - \sin^2 i)} \right]$$

במקרה: $\operatorname{Im} \varepsilon_r = 0$

$$\sin r \cong \frac{\sin i}{\sqrt{\operatorname{Re} \varepsilon_r}}$$

קיבלנו את חוק סנל הידוע!

במקרה: $\text{Im } \varepsilon_r \neq 0$

$$\sin r \cong \frac{\sin i}{\sqrt{\text{Re } \varepsilon_r}} \left[1 - \frac{(\text{Im } \varepsilon_r)^2}{8 \text{Re } \varepsilon_r (\text{Re } \varepsilon_r - \sin^2 i)} \right]$$

זווית השבירה תהיה קטנה יותר מאשר מנבא חוק סנל!
שכן:

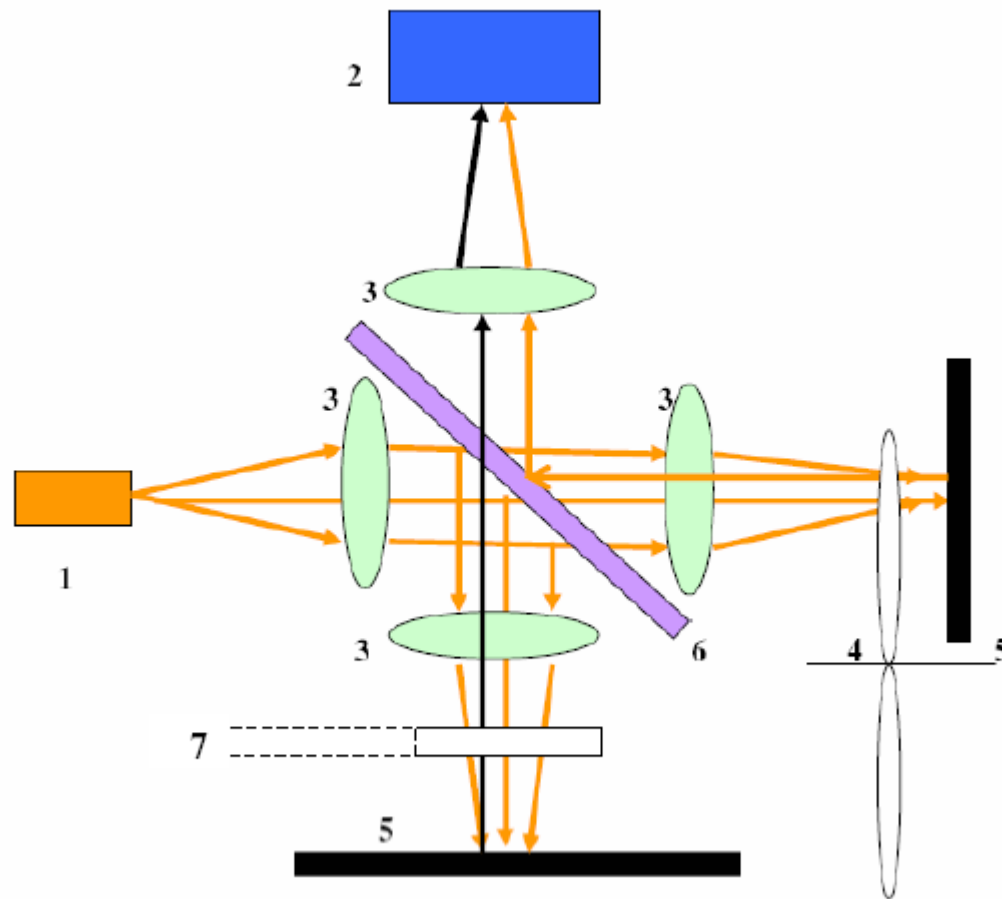
$$\text{Re } \varepsilon_r > 1 \geq \sin^2 i$$

$$T_{TM} = \frac{2 \cos i \sqrt{2 \alpha^2 + \operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{\omega}{c} \right)^2}}{\varepsilon_r \left(\frac{\omega}{c} \right) \cos i + \sqrt{\alpha^2 + \operatorname{Re} \varepsilon_r \left(\frac{\omega}{c} \right)^2} \cos r - j \alpha}$$

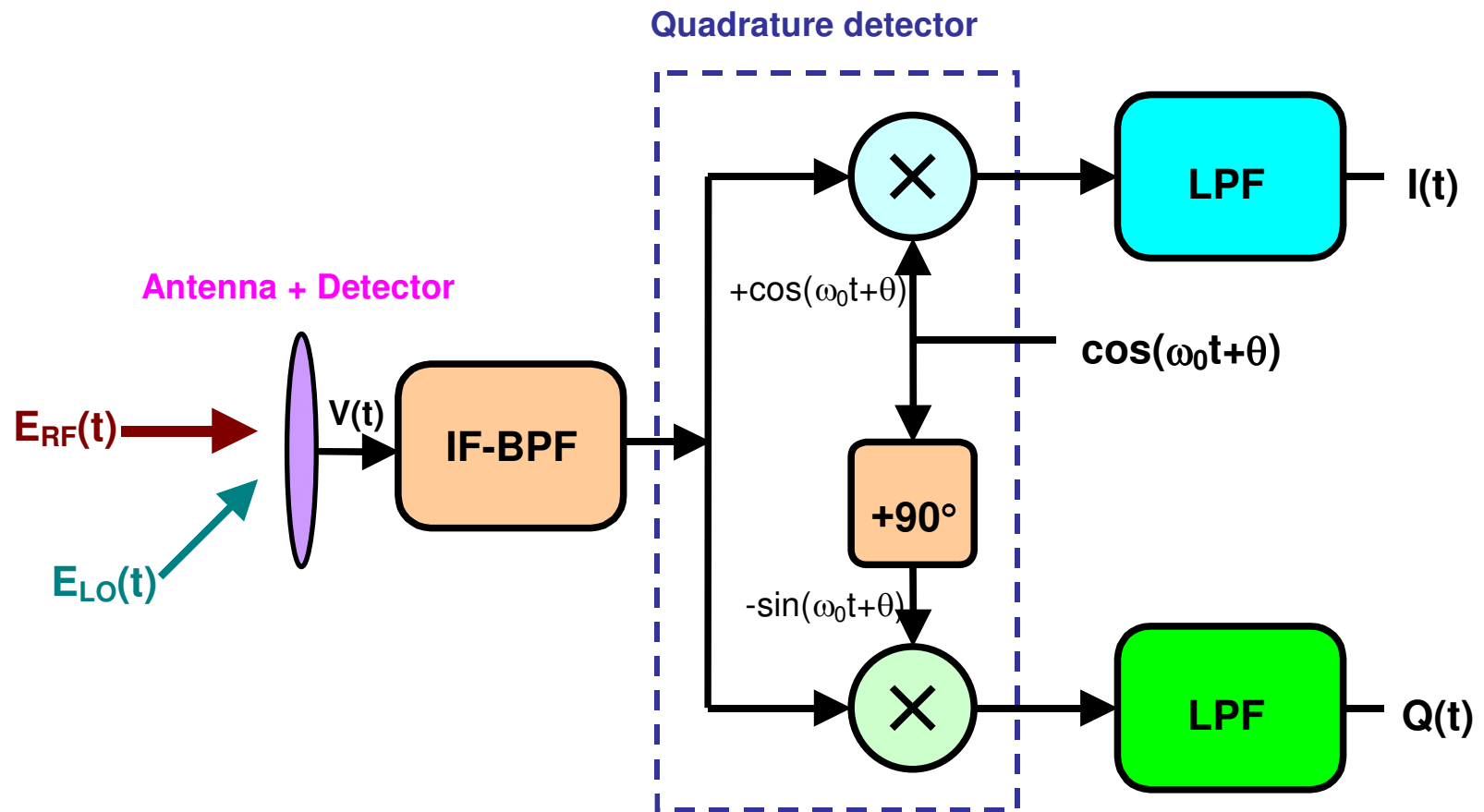
תכנון קונספטואלי

Heterodyne מדידה בשיטת

Outlook: interferometric homodyne detection scheme



- 1 – THz BWO**
- 2 – THz detector**
- 3 – Focusing lenses**
- 4 – Chopper**
- 5 – Reflecting mirror**
- 6 – Quasi-optical splitter**
- 7 – Shutter.**
- Solid box – shut,**
- dashed – open**



$$v(t) = R \cdot \frac{1}{Z} \cdot \overline{\left| \tilde{E}(t) \right|^2}$$

$$\begin{aligned} V(t) &= R \cdot \frac{1}{Z} \cdot \overline{\left| \underbrace{\tilde{E}_{RF}(t) \cdot e^{j\omega_{RF}t}}_{RF-signal} + \underbrace{\tilde{E}_{LO} \cdot e^{j\omega_{LO}t}}_{Local-oscillator} \right|^2} = \\ &= R \cdot \frac{1}{Z} \cdot \left[\left| \tilde{E}_{RF}(t) \right|^2 + \left| \tilde{E}_{LO} \right|^2 + \underbrace{2 \operatorname{Re} \left\{ \tilde{E}_{RF}(t) \cdot \tilde{E}_{LO} \cdot e^{j(\omega_{RF} - \omega_{LO})t} \right\}}_{Intermediate-Frequency} \right] \end{aligned}$$

$$V_{IF}(t) = 2R \cdot \frac{1}{Z} \cdot |\tilde{E}_{RF}(t)| \cdot |\tilde{E}_{LO}| \cdot \cos(\omega_{IF}t + \Delta\phi)$$

$$I(t) = +V_{IF}(t) \cdot \cos(\omega_{IF}t + \theta) = +R \cdot \frac{1}{Z} \cdot |\tilde{E}_{RF}(t)| \cdot |\tilde{E}_{LO}| \cdot \cos(\theta - \Delta\phi)$$

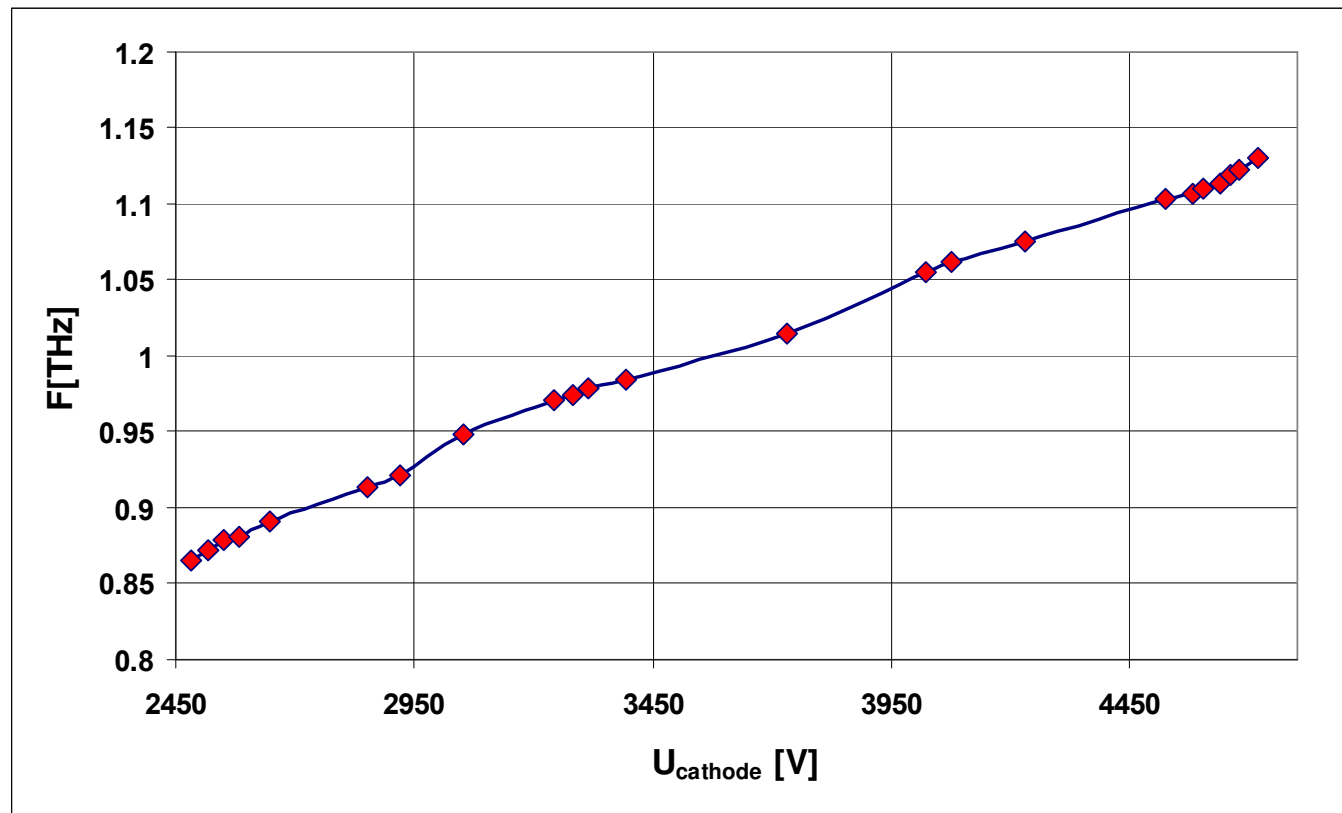
$$Q(t) = -V_{IF}(t) \cdot \sin(\omega_{IF}t + \theta) = -R \cdot \frac{1}{Z} \cdot |\tilde{E}_{RF}(t)| \cdot |\tilde{E}_{LO}| \cdot \sin(\theta - \Delta\phi)$$

מערך מדידות

Experimental set-up

# #		Manufacturer
1	THz source GBWO-103 (Power Supply)	Gycom, Nizhny Novgorod, Russia
2	Pyro-electric Detector (based on LiTaO ₃ Crystal)	Microtech Instruments, Inc
3	High-Performance Mid-Range Travel Linear Stage ILS-100PP With Universal Motion controller ESP-300	Newport Corporation
4	THz Absolute Power Meter System	Thomas Keating LTD, UK

Frequency Measurements



Calibration curve: frequency vs. e-beam energy

שרטוט קונספטואלי

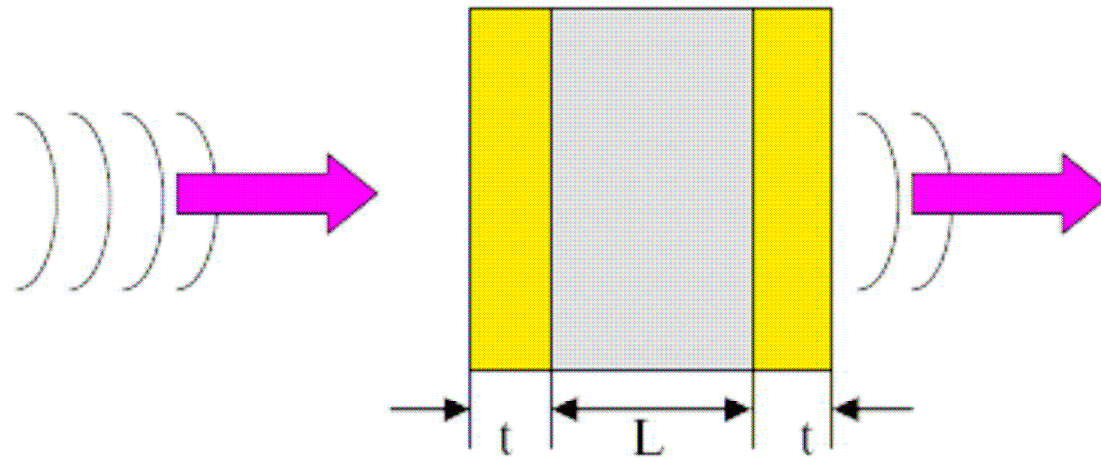
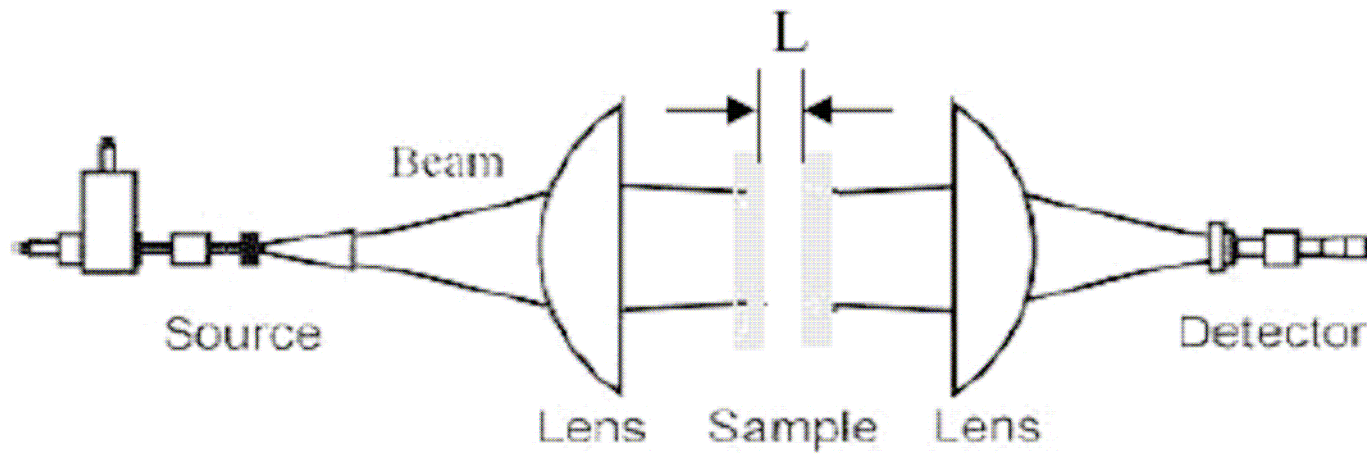
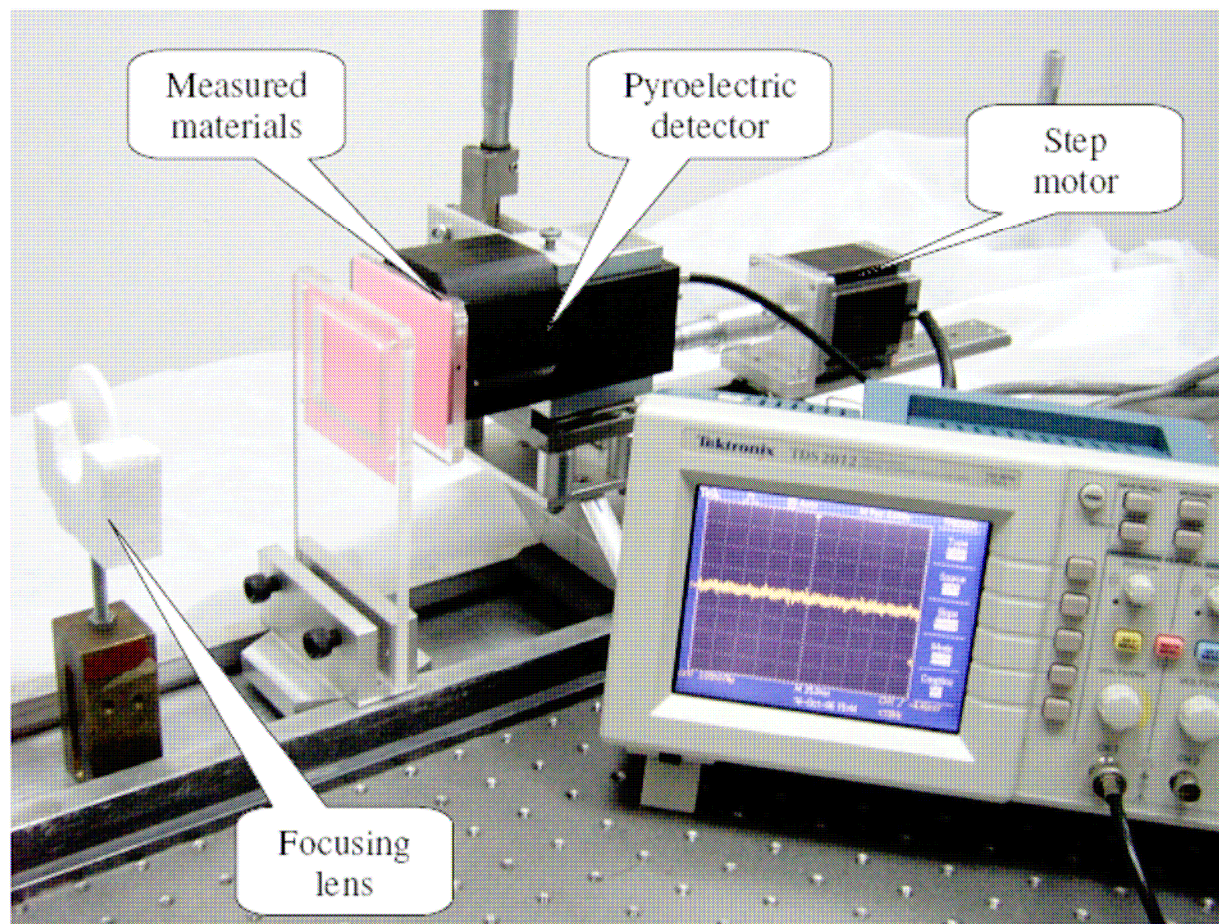


Fig.1. Configuration of the measuring cell used in THz experiments.

שרטוט מערך ניסוי ממש



תצלום מערך הניסוי



THz lenses

Optical lenses : unbearable losses > 10 dB

THz lenses: **\$700 piece** =>

Home-made lenses' production

THz lenses

Mm-wave lenses: teflon

THz lenses: polyethylene (PE)

lower material losses $\sim 20\%$

higher refraction index $\sim 10\%$

THz lenses

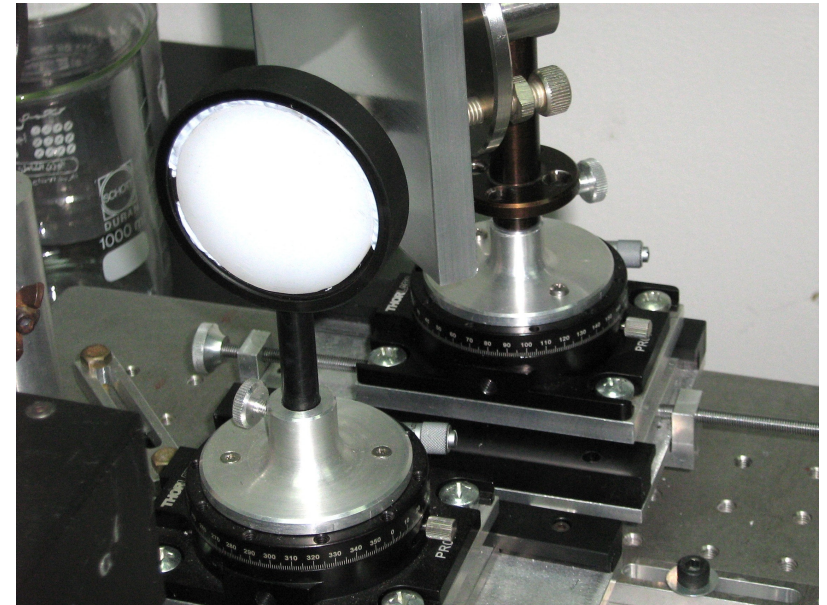
- Home-made THz lens design software

MathCad

- Lenses' design
- Manufacturing

(Weizmann Institute workshop)

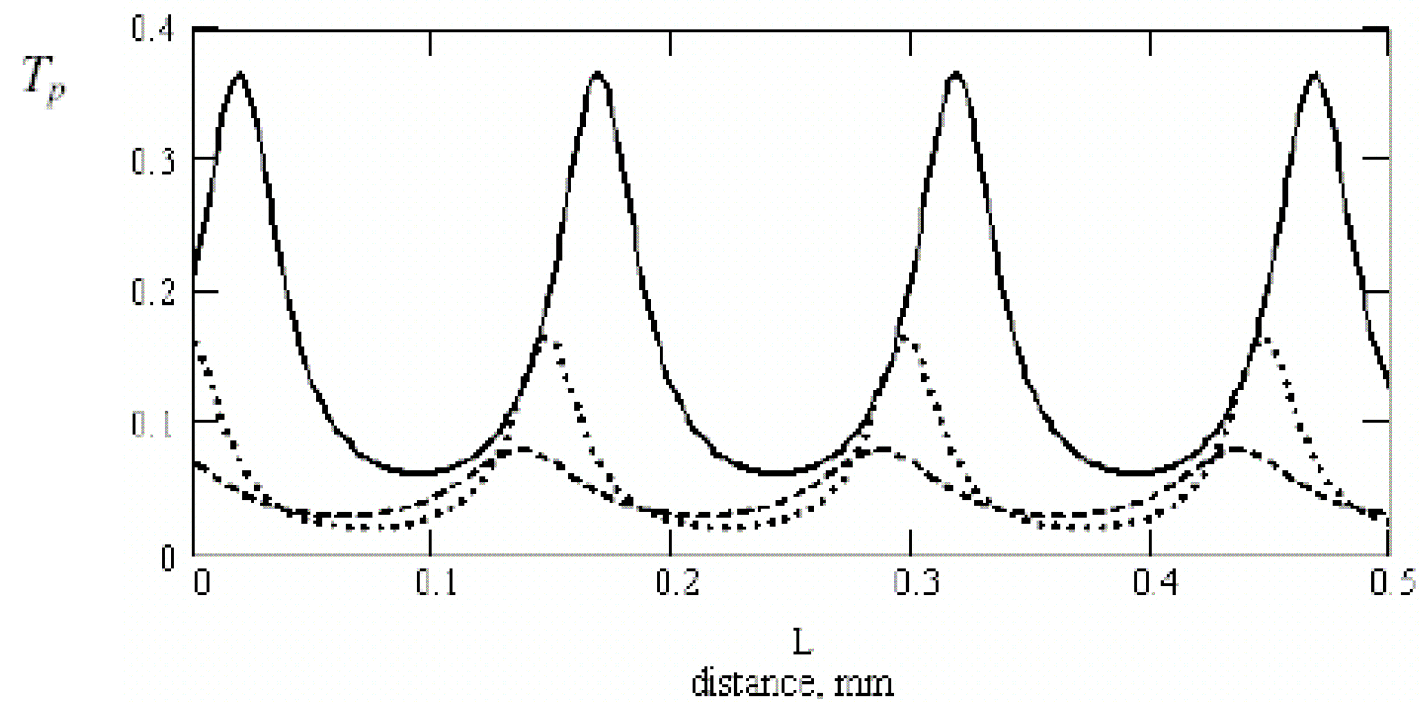
THz lenses



Home-made: \$ 75 piece

Microtech Inc. \$ 700

העברה במודל פברי-פרוט



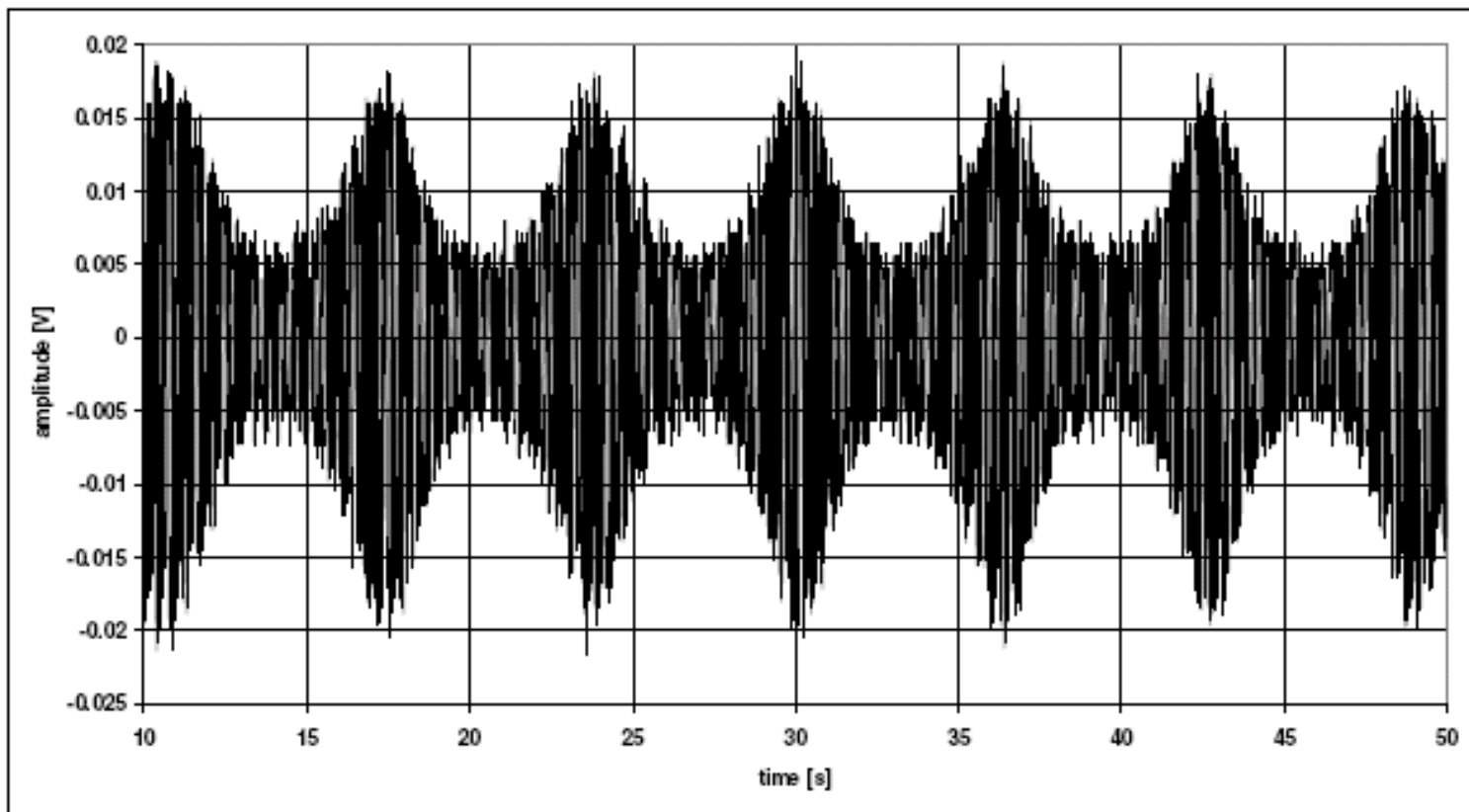
חילוץ מקדמים דיאלקטריים על ידי
פתרון משוואות לא לינאריות

$$T_p(L_1, t, \varepsilon_r', \varepsilon_r'', f) = A_1$$

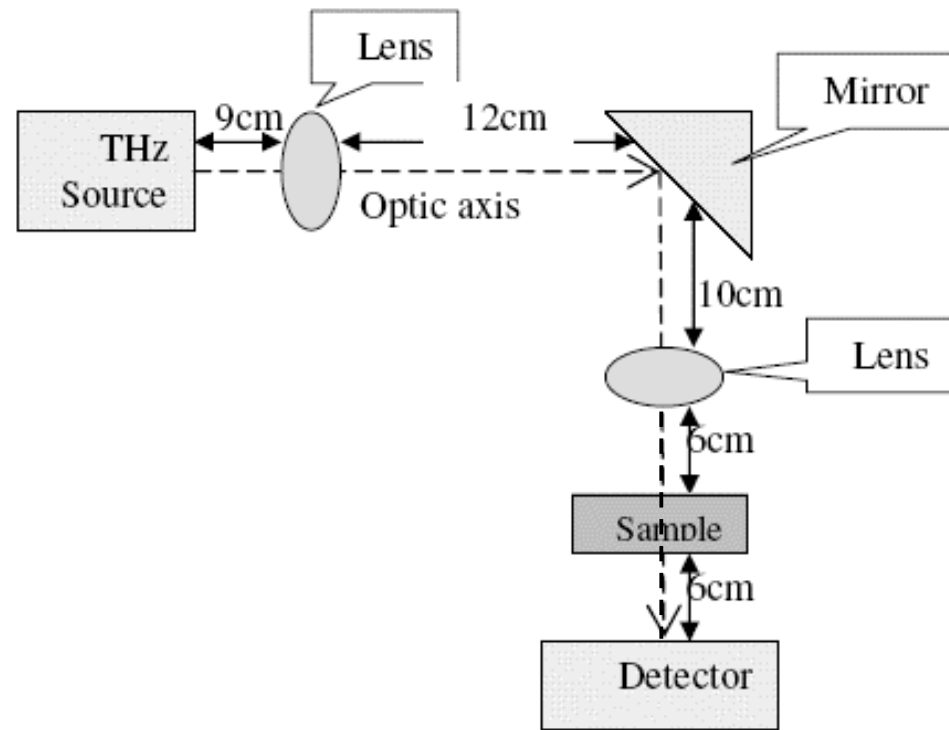
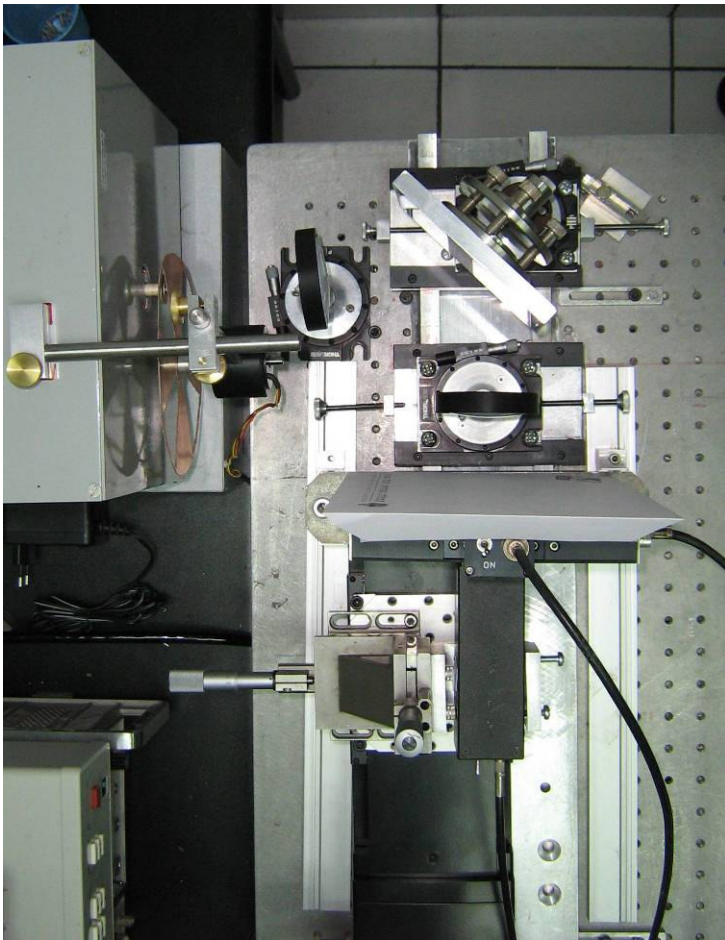
$$T_p(L_2, t, \varepsilon_r', \varepsilon_r'', f) = A_2$$

$$T_p(L_3, t, \varepsilon_r', \varepsilon_r'', f) = A_3$$

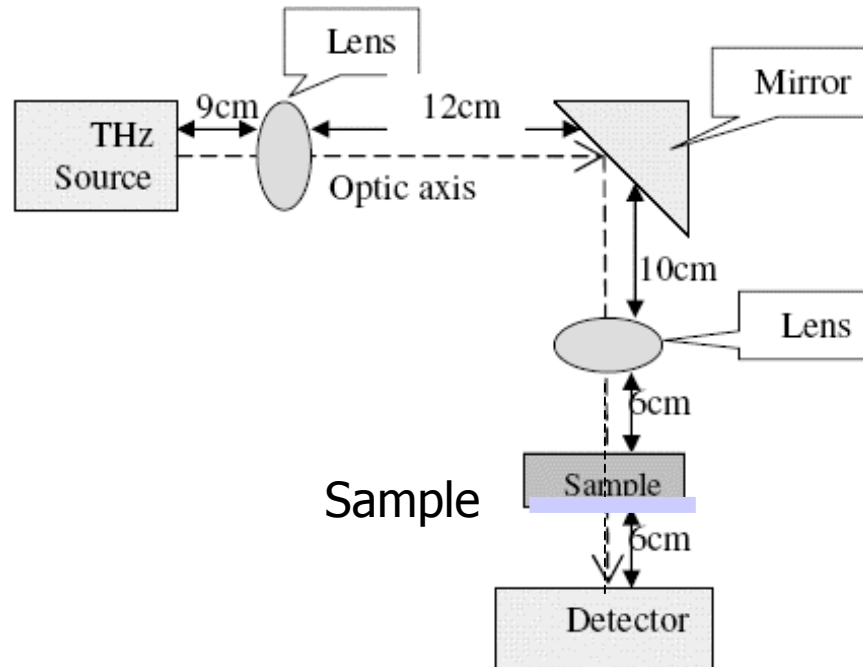
תוצאות הניסוי Alumina



Experimental set-up



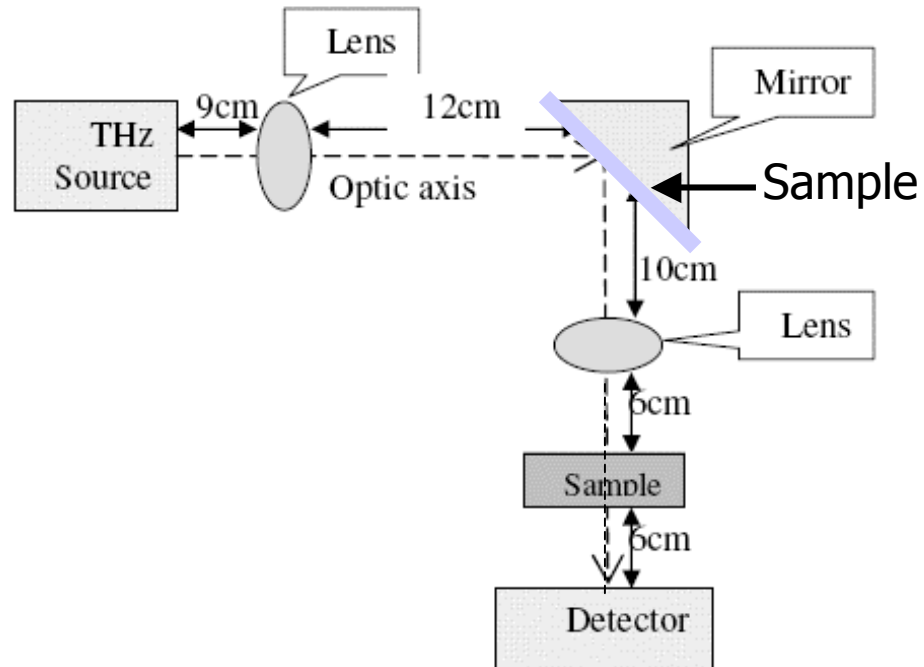
Experimental set-up



Transmission mode

- + : Absorption measurable
- : Impossible to measure high-loss samples

Experimental set-up



Reflection mode

- : Impossible to measure absorption
- + : Possible to measure high-loss samples (refraction index)

Data processing - reflection

$$R(\text{TE}) = |r(\text{TE})|^2$$

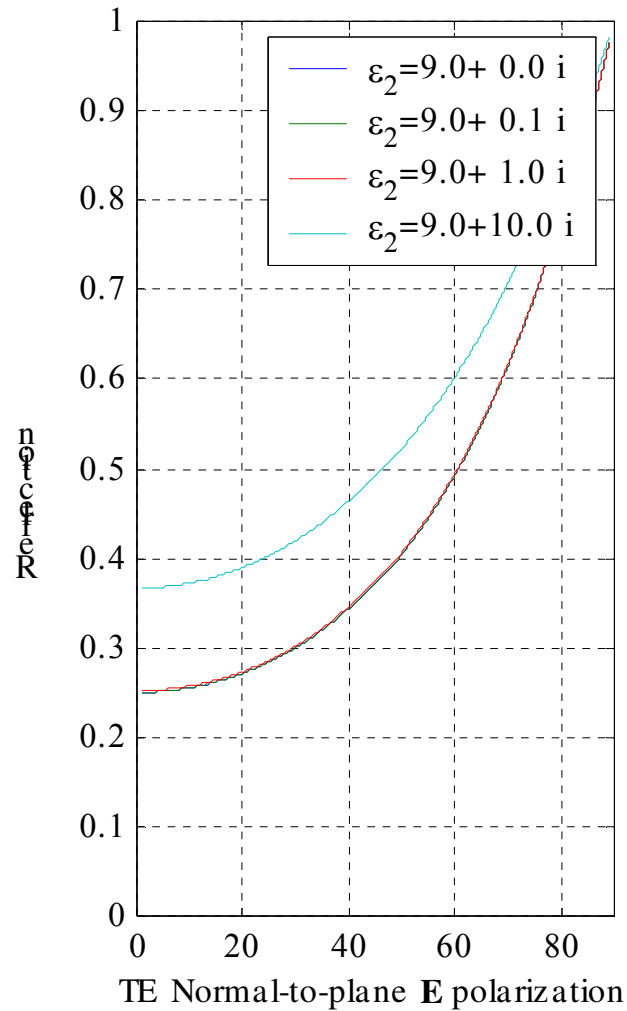
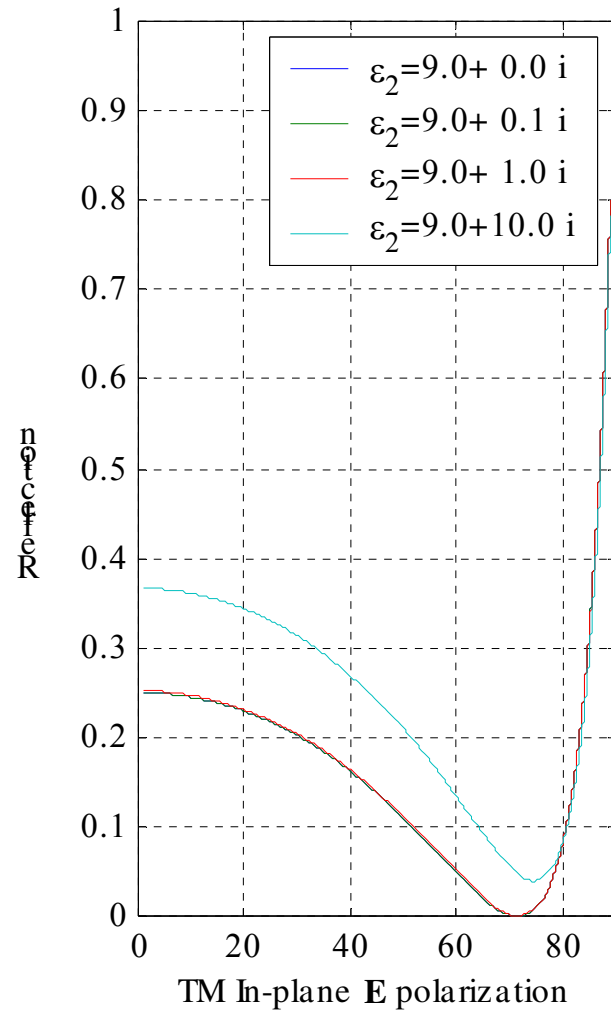
$$R(\text{TM}) = |r(\text{TM})|^2$$

where

$$r(\text{TE}) = \frac{\cos(\theta_1) - \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2(\theta_1)}}{\cos(\theta_1) + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2(\theta_1)}}$$

$$r(\text{TM}) = \frac{\epsilon_2 \cos(\theta_1) - \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2(\theta_1)}}{\epsilon_2 \cos(\theta_1) + \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2(\theta_1)}}$$

Data processing - reflection



Data processing - transmission

λ radiation wavelength (in vacuum)

a absorption coefficient

$n + i \kappa$ Complex refraction index

$\epsilon' + i \epsilon''$ Complex dielectric constant

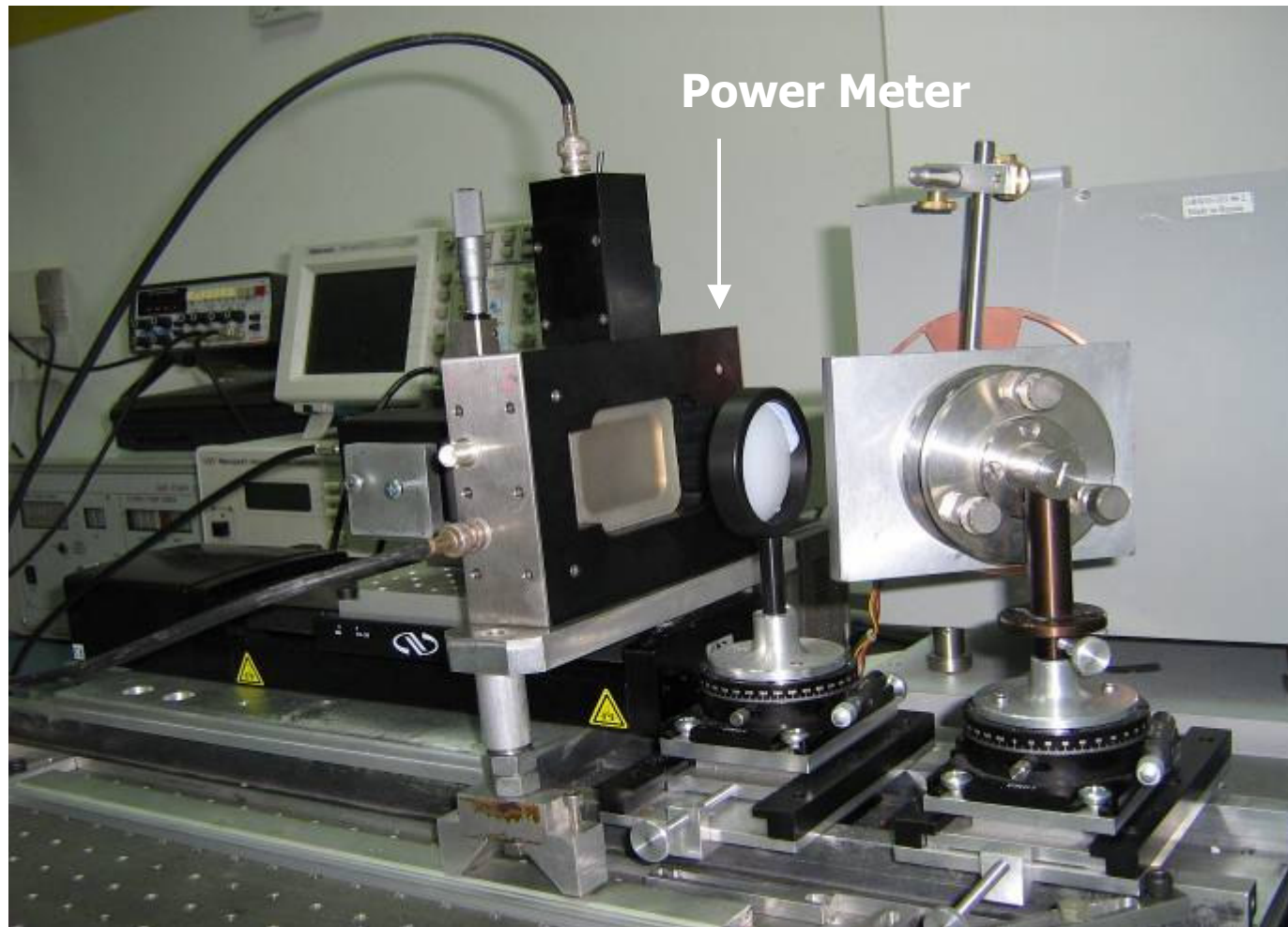
$$n + i \kappa = \sqrt{\epsilon' + i \epsilon''}$$

$$a = 4 \pi \kappa / \lambda$$

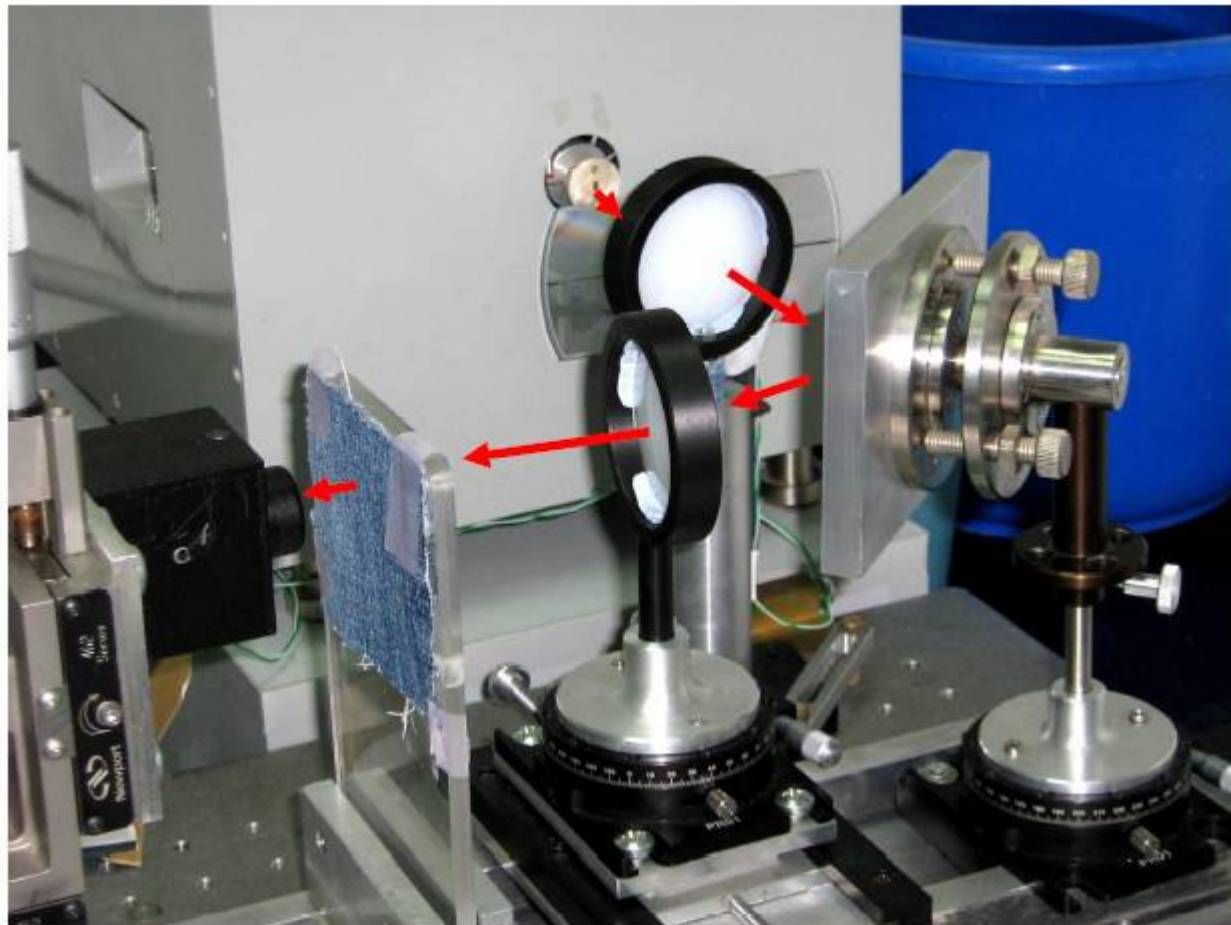
$$\epsilon' + i \epsilon'' = (n + i \kappa)^2$$

$$\kappa = a \lambda / 4 \pi$$

YOSH THz facility - upgrade



Measurements: clothes

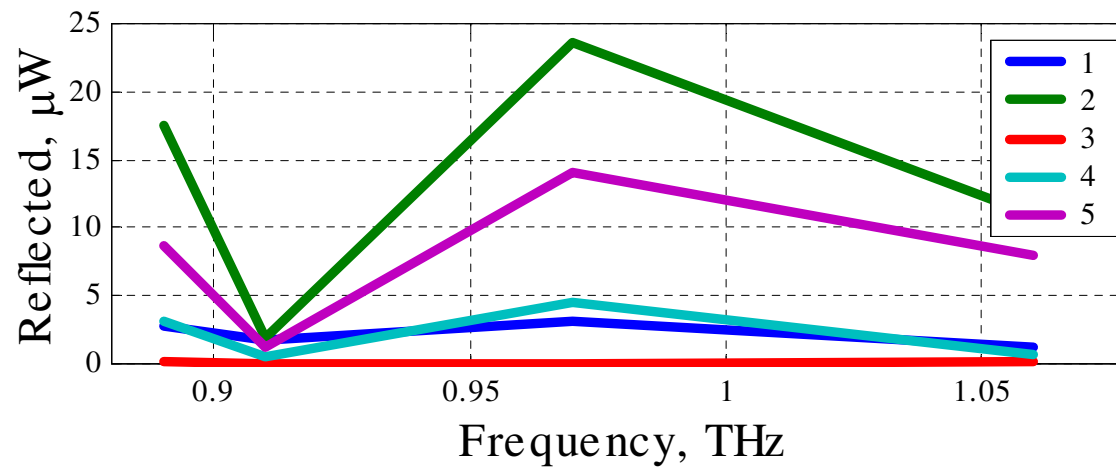
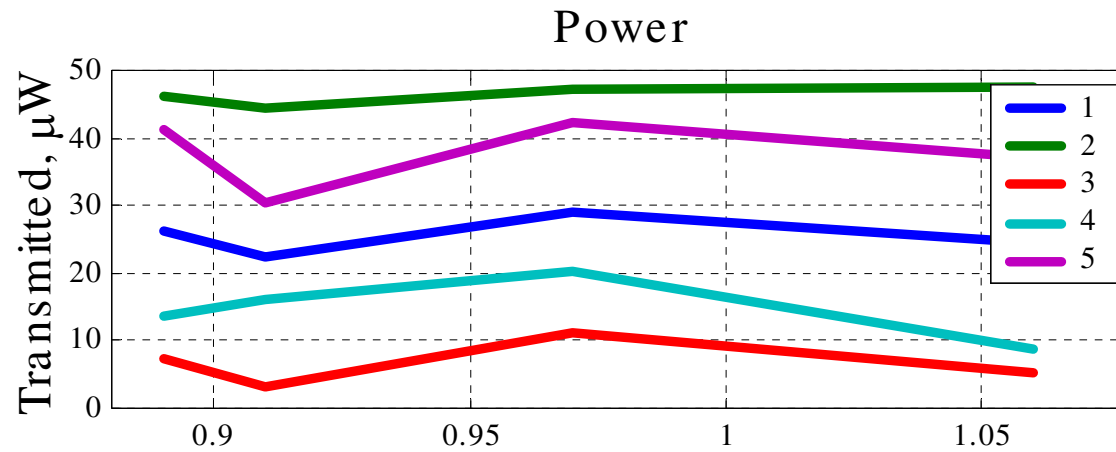


Measurements: clothes



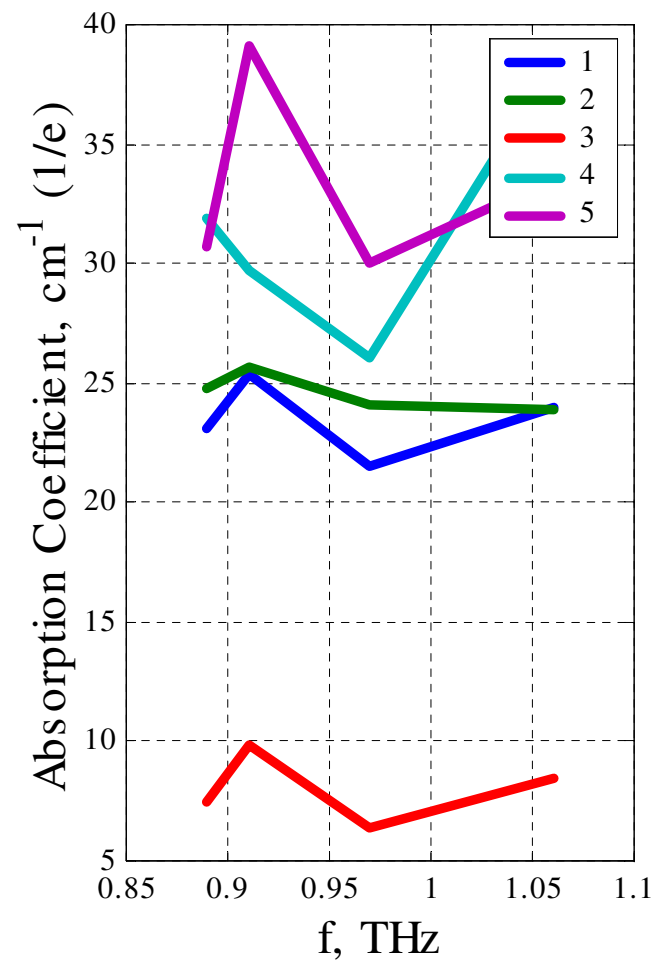
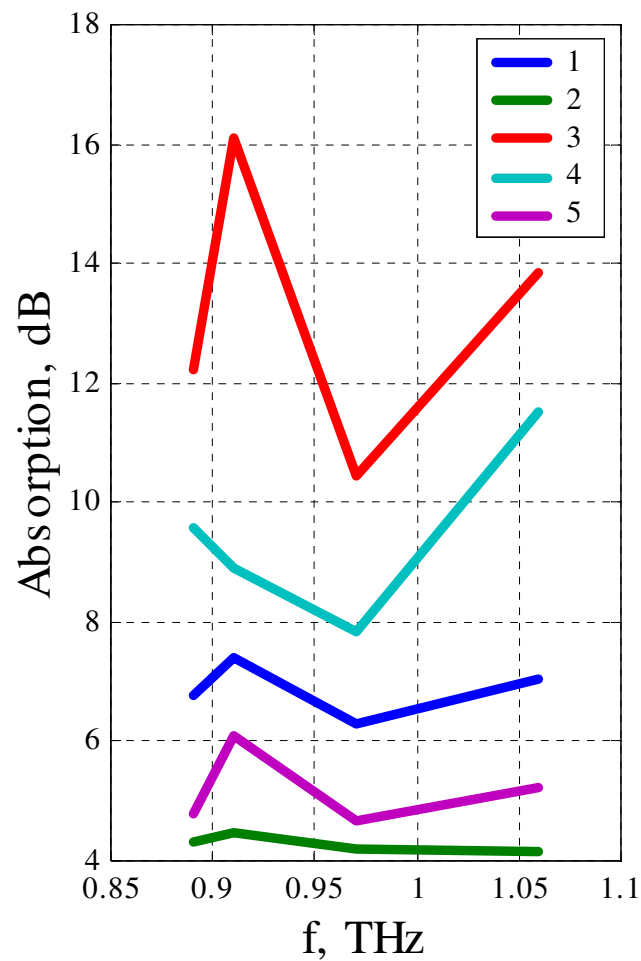
Measurements: clothes

Power Meter



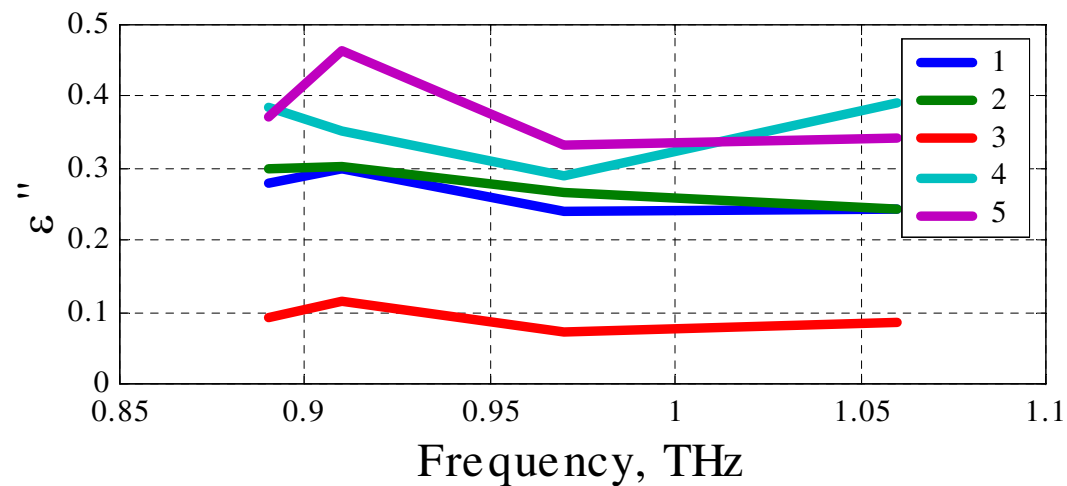
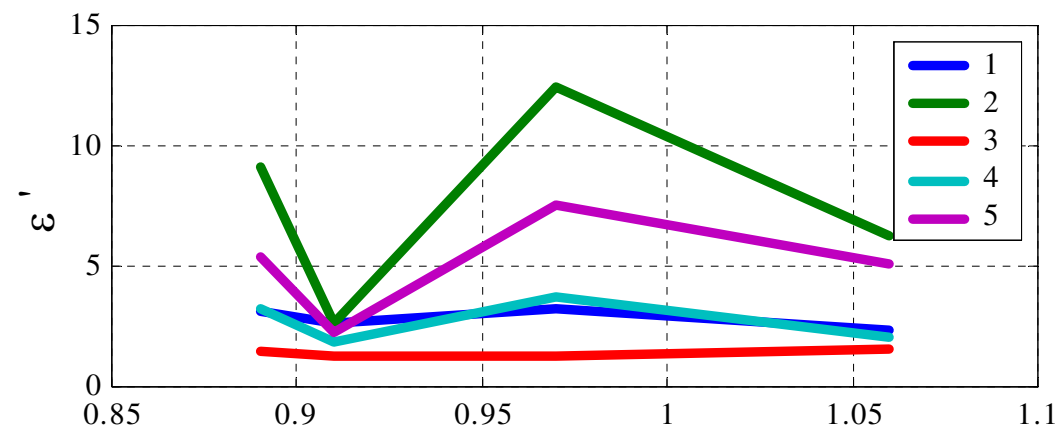
Measurements: clothes

Power Meter



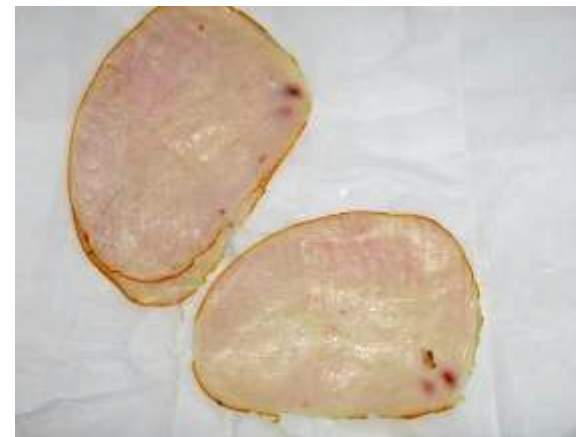
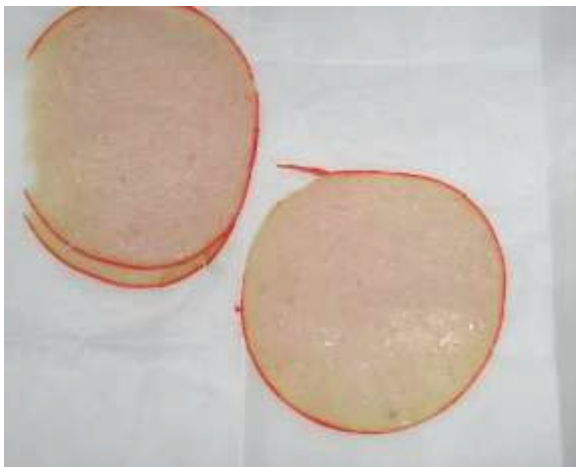
Measurements: clothes

Power Meter

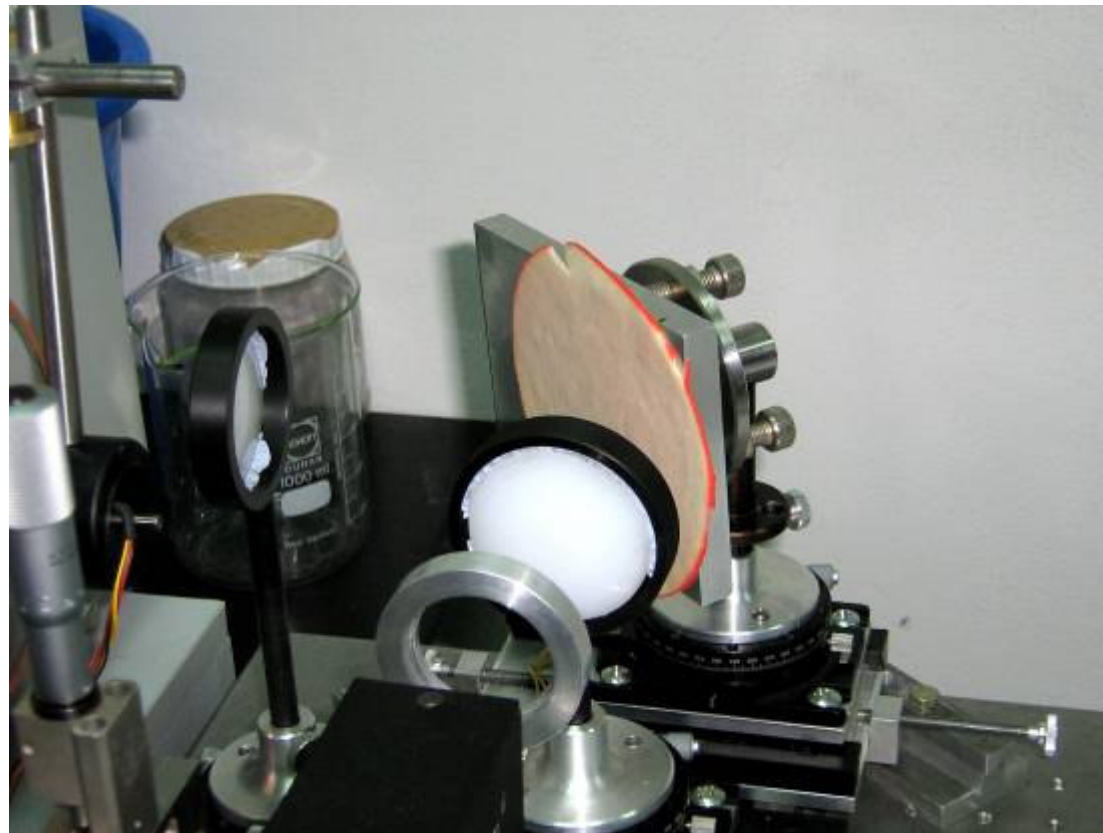


Measurements:

Bio-materials

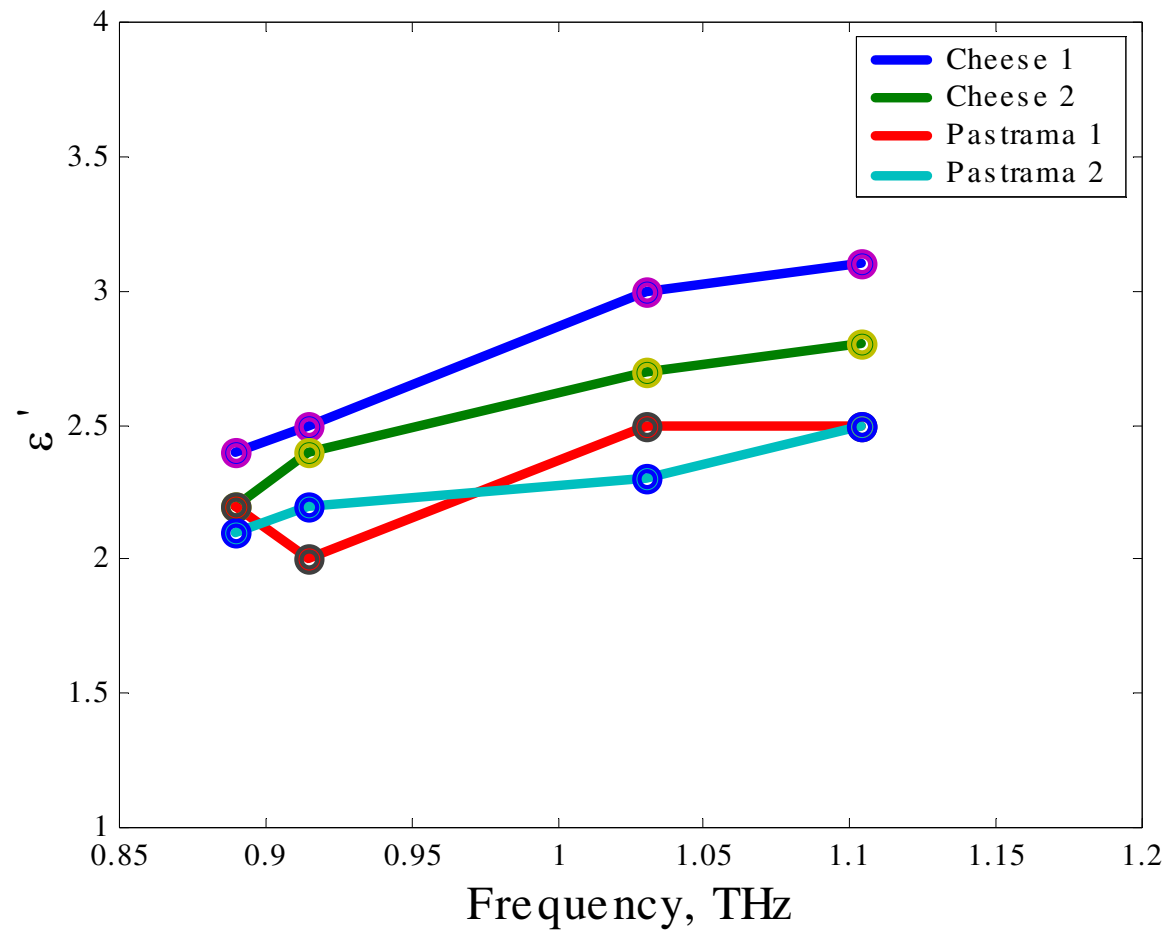


Measurements: Bio-materials



Measurements:

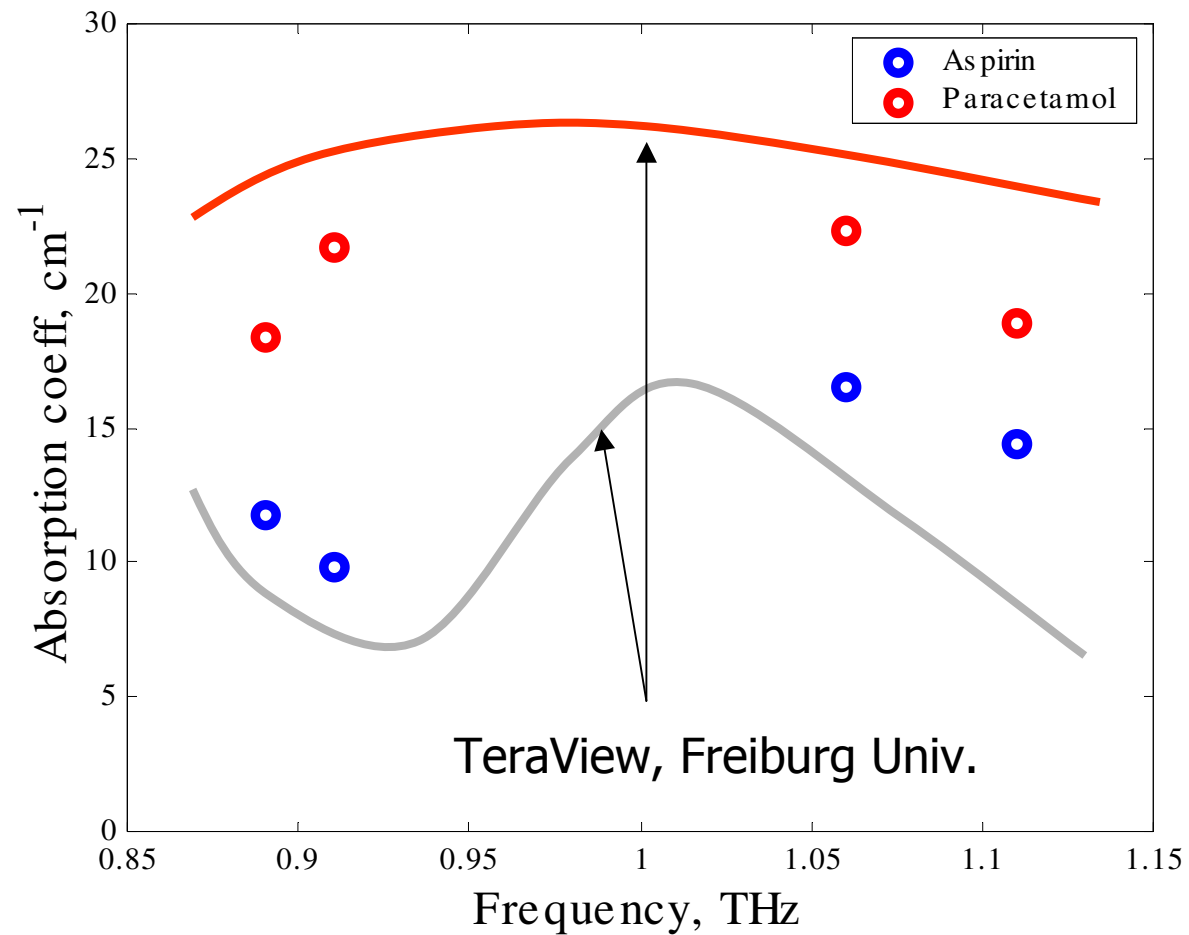
Bio-materials



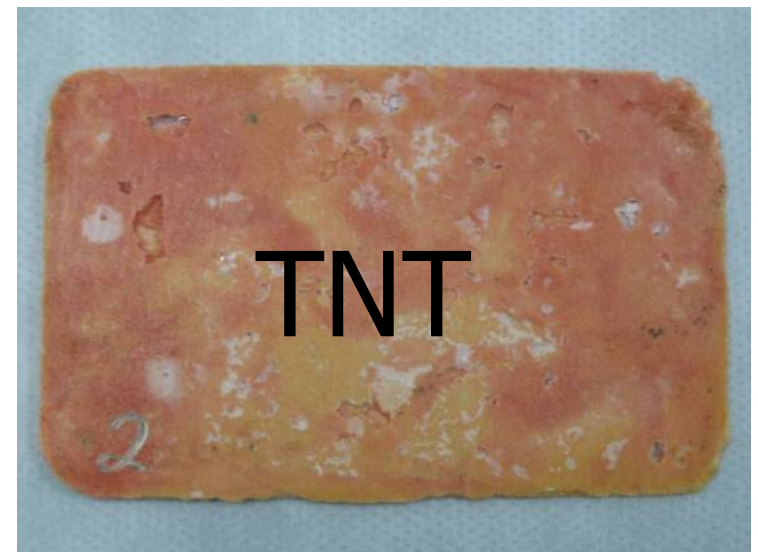
Measurements: Powders



Measurements: Powders



Experiment: dummy explosives



Experiment: dummy explosives

