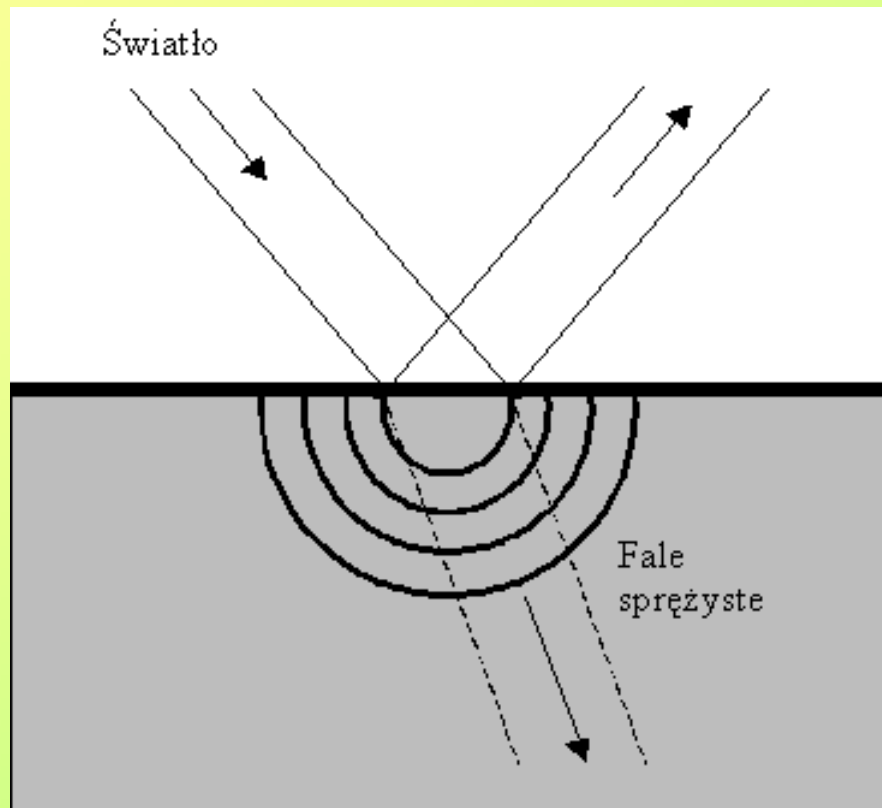


Obrazowanie struktur z wykorzystaniem efektów fotoakustycznych

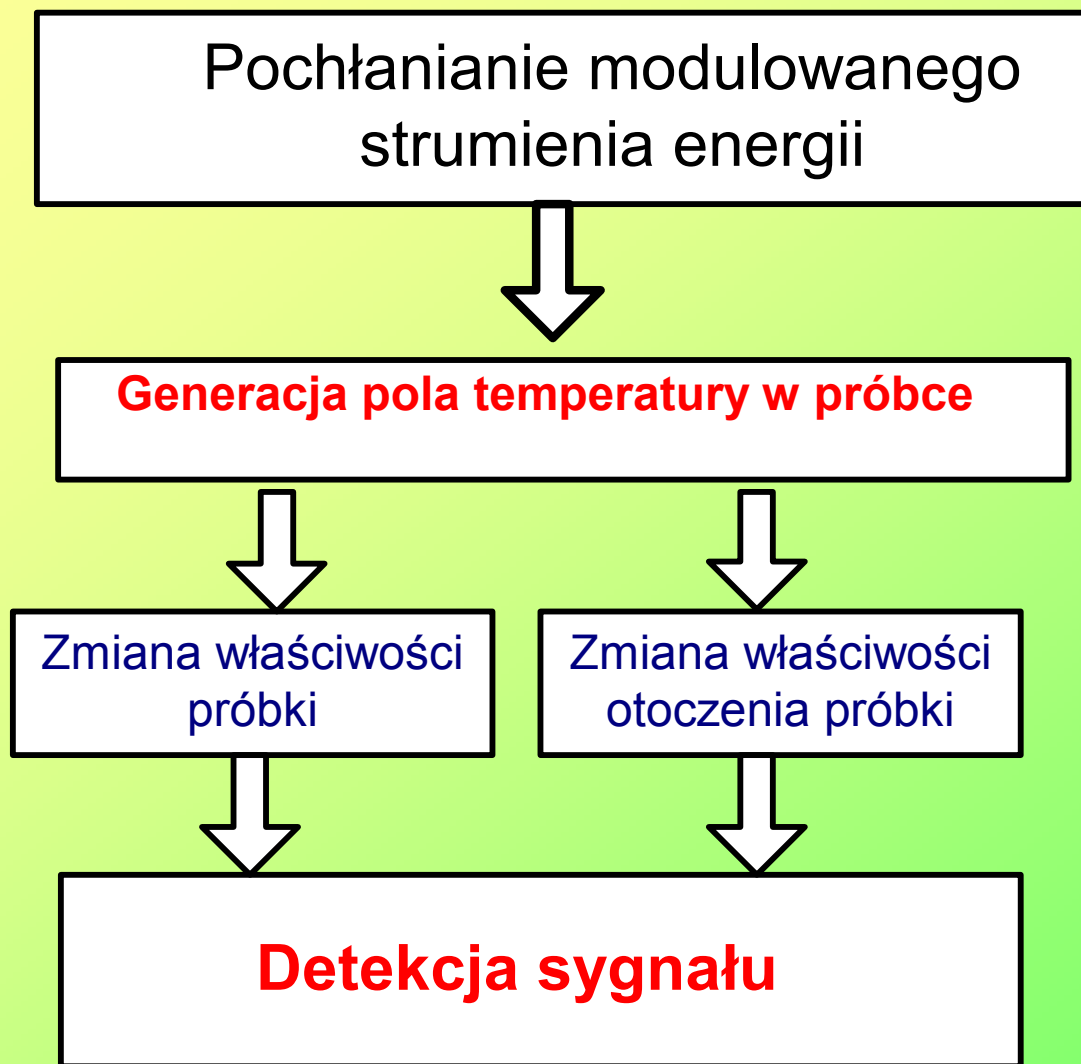
B. Augustyniak

Zasada działania metody



Wykorzystanie efektu fal 'termicznych' generowanych w materiale po dostarczeniu energii cieplnej w sposób modulowany

Zależności : pobudzenie- odpowiedź



Schemat ogólny zależności między 'pobudzeniem' a 'odpowiedzią' dla badanej próbki w metodzie fotoakustycznej

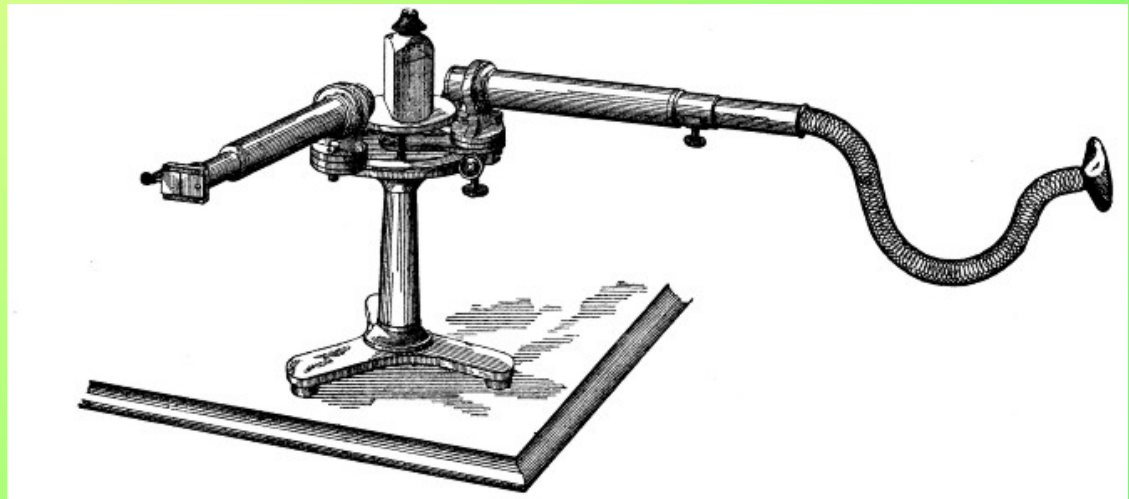
Historia fotoakustyki

fotophone Bell'a

A. G. Bell discovered in 1880 that if a focused beam of light was rapidly interrupted and allowed to fall on a selenium block, an audible signal could be picked up through a hearing tube.



Alexander Graham Bell

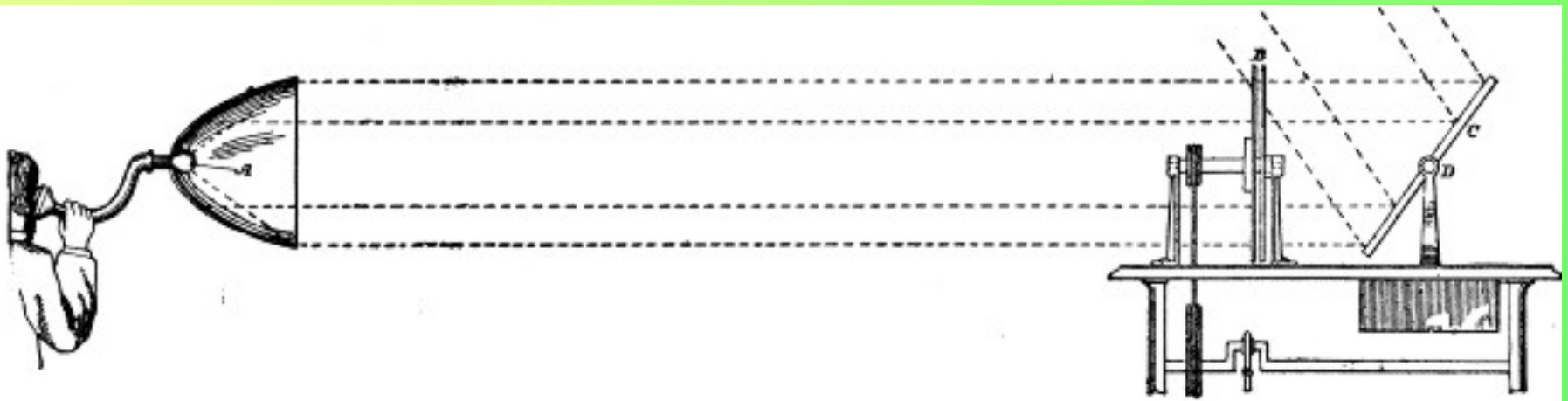


<http://cdl.library.cornell.edu/cgi-bin/moa/moa-cgi?notisid=ABS1821-0013-416>

http://www.americaslibrary.gov/cgi-bin/page.cgi/jb/gilded/bell_1

Doswiadczenia Bell'a

At the time of publishing his account of the photophone, Prof. Bell announced the fact that thin disks of very many different substances emitted sounds when exposed to the action of a rapidly interrupted beam of sunlight. This led to the suspicion that sonorousness under such circumstances was a general property of all matter. The correctness of this generalization was subsequently fully verified. In the first experiments which led to this conclusion, the substances tested were placed in a test tube, the mouth of which was connected with a rubber tube, the further end of which was held to the ear, and the intermittent beam of light then focussed upon the substance in the tube. With this device excellent sonorous ef-



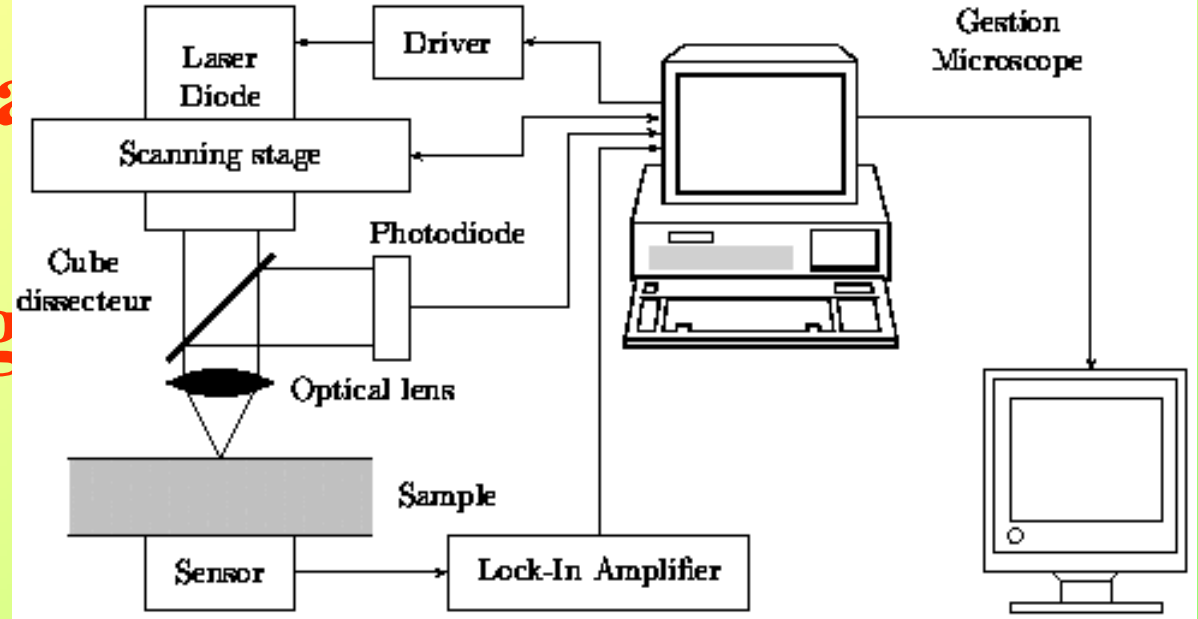
Historia - cd

- Pierwsze obserwacje w ciałach stałych
1880 Bell
- Rozwój coraz czulszych mikrofonów
- 1973 – spektroskopia fotoakustyczna (PAS)
- 1980 ? - obrazowanie struktur (**mikroskopia
fotakustyczna**)



Zasada działania mikroskopu fotoakustycznego

0



1- próbka jest oświetlana w płaszczyźnie x-y promieniem lasera

2 – badane są synchronicznie sygnały uzyskiwane z detektora wybranej wielkości fizycznej w sposób:

- a) **kontaktowy** np. mikrofon i komora fotoakustyczna lub bezpośrednio - piezoceramika albo warstwa termoczuła
- b) **bezkontaktowy** (odchylenie wiązki światła)

Metoda z komorą fotoakustyczną

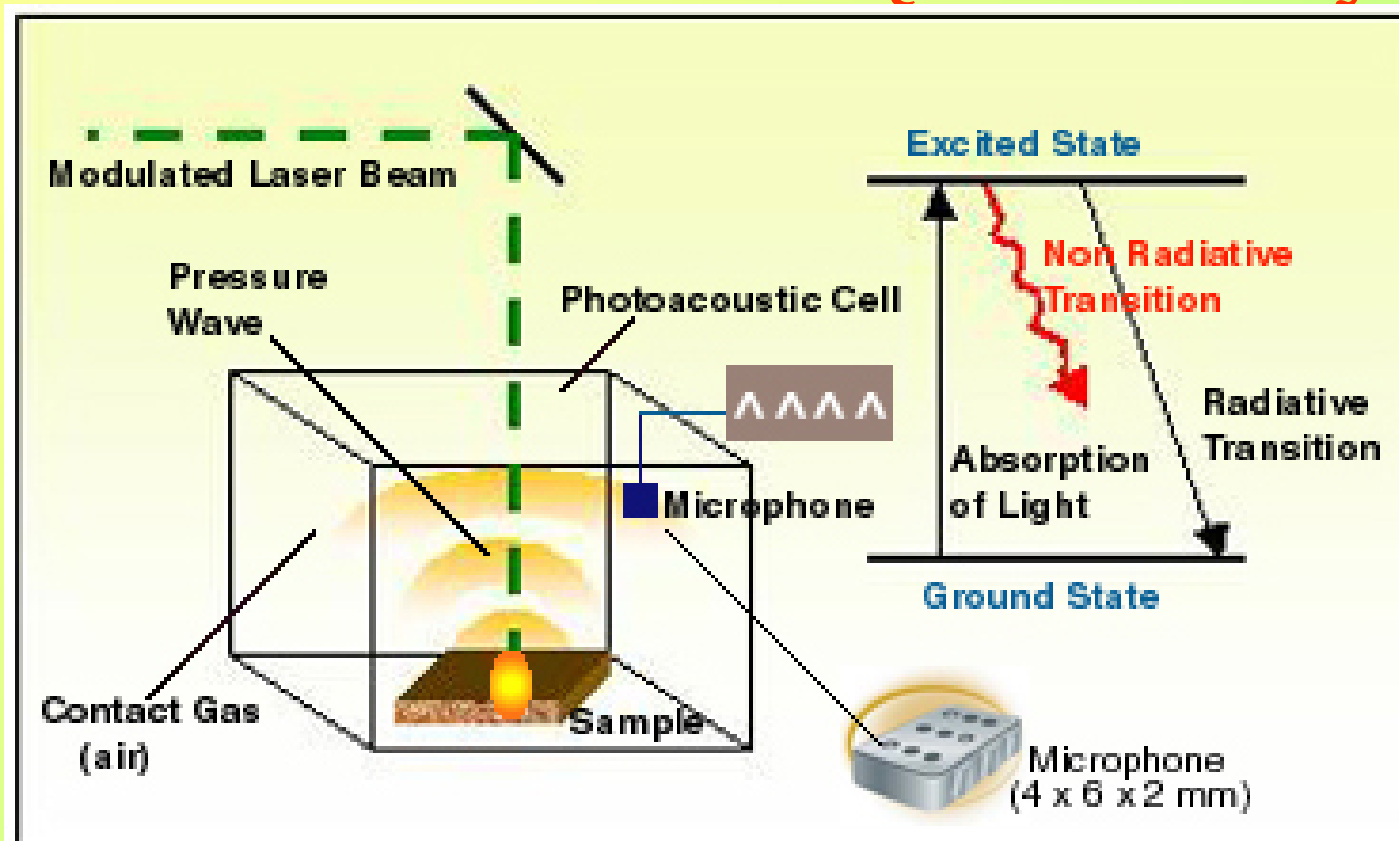
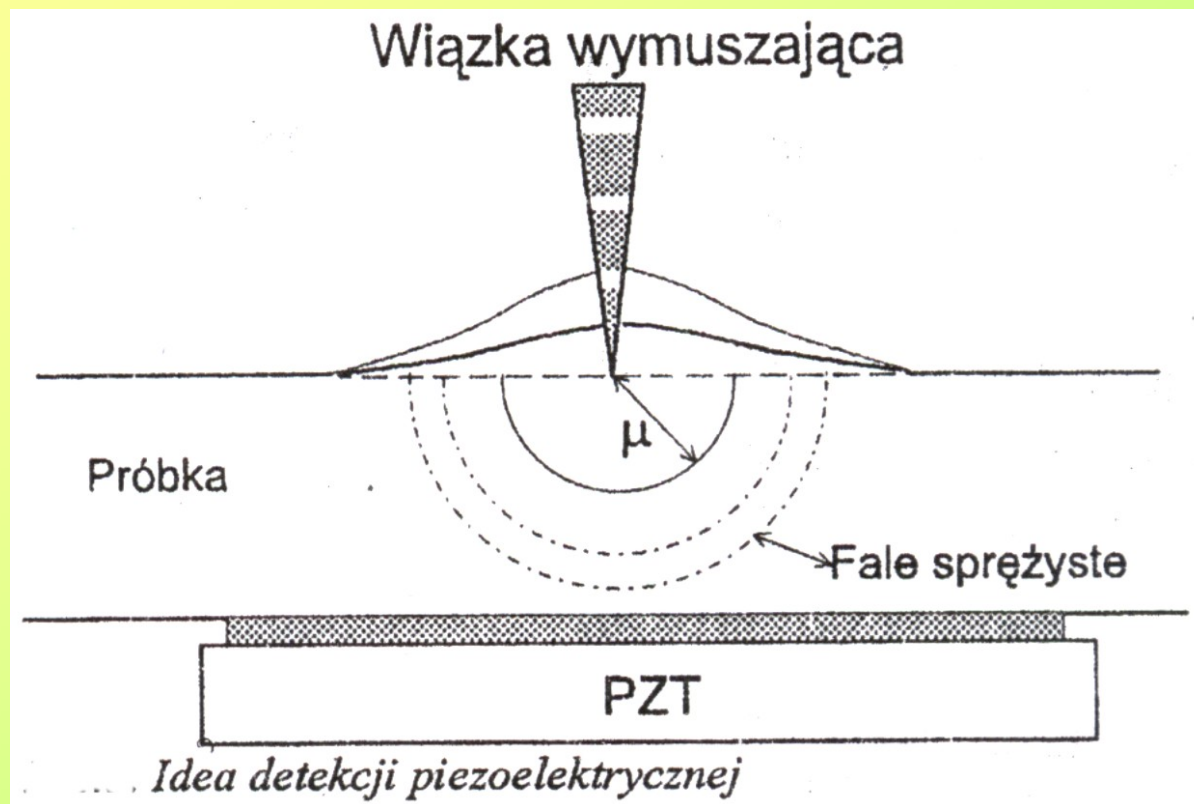


Fig.(1) Photoacoustic effect from a sample

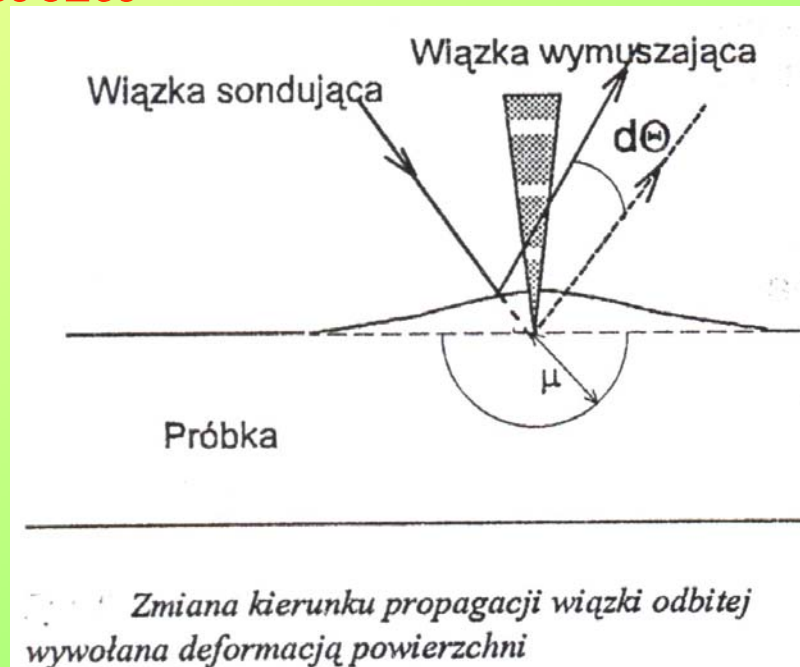
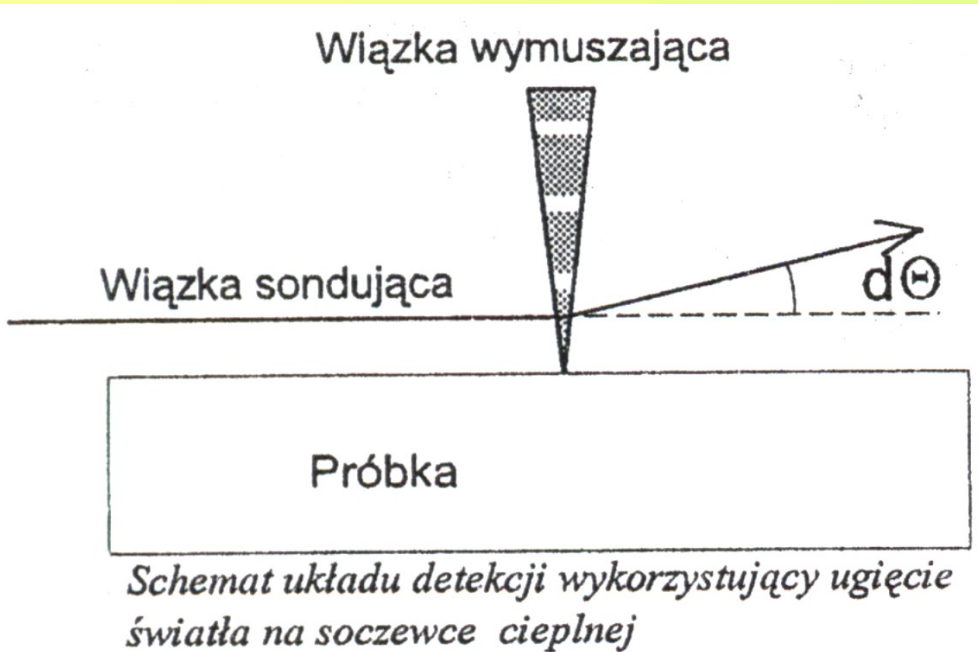
Nagrzana próbka ogrzewa otaczający ośrodek (gaz). Zmiana ciśnienia gazu jest rejestrowana przez mikrofon zamocowany do ścianki komory

Detekcja piezoelektryczna



Fale termiczne. Podstawy teoretyczne i możliwości zastosowań praktycznych,
Z. Kleszczewski, J. Bodzenta, B. Pustelny; *Podstawy Fizyczne badań Nieniszczących*, Gliwice 95, Politechnika Śląska

Detekcja za pomocą sondującej wiązki światła



Fale termiczne. Podstawy teoretyczne i możliwości zastosowań praktycznych,
Z. Kleszczewski, J. Bodzenta, B. Pustelny; *Podstawy Fizyczne badań Nieniszczących*, Gliwice 95, Politechnika Śląska

Detekcja za pomocą wiązki światła - 2

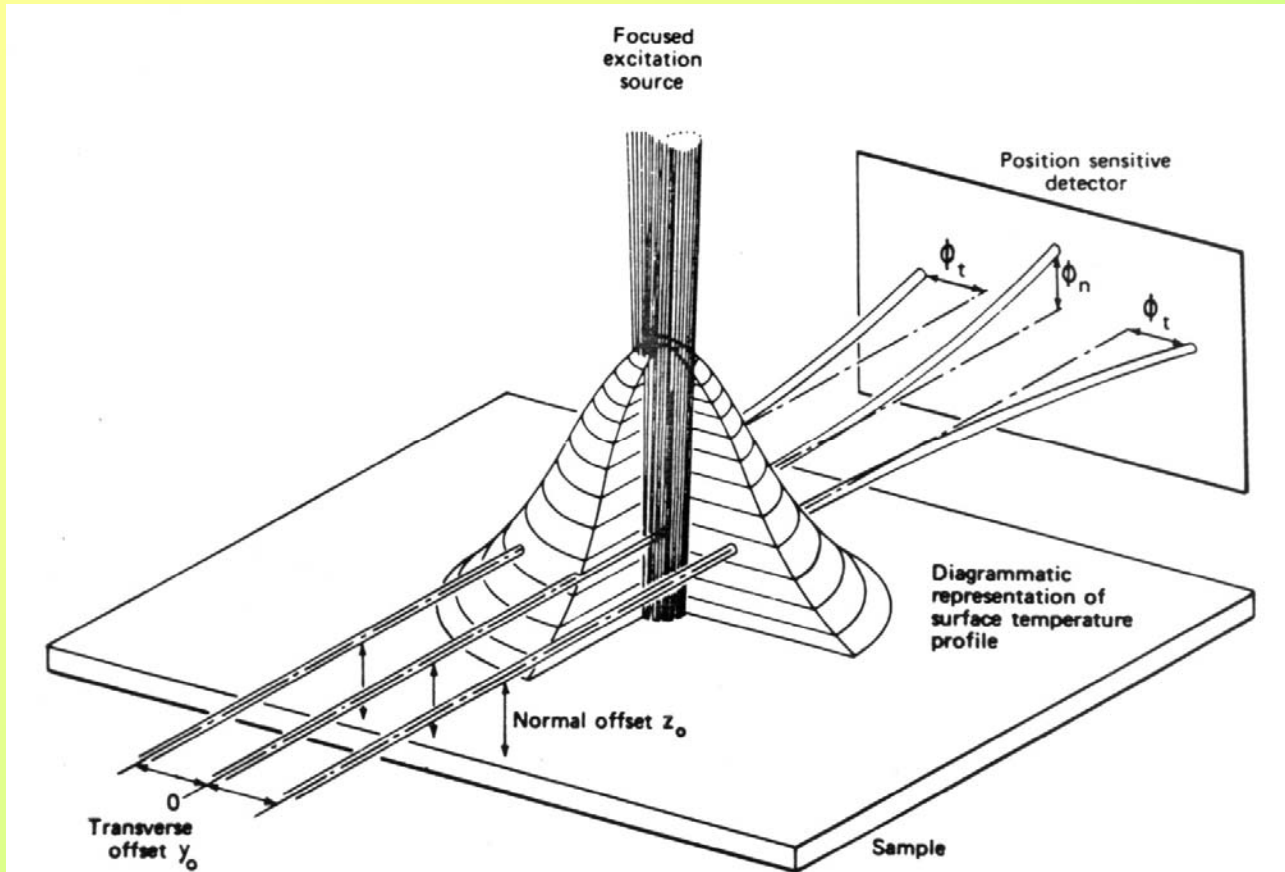


Fig. 10. Profile of surface temperature modulation for localized excitation. Optical beam deflection trajectories are shown for various probe-beam transverse offsets y_0 . Only transverse components are indicated for clarity [65].

Imaging with optically generated thermal waves

G. Busse; *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-32, no. 2, 1985

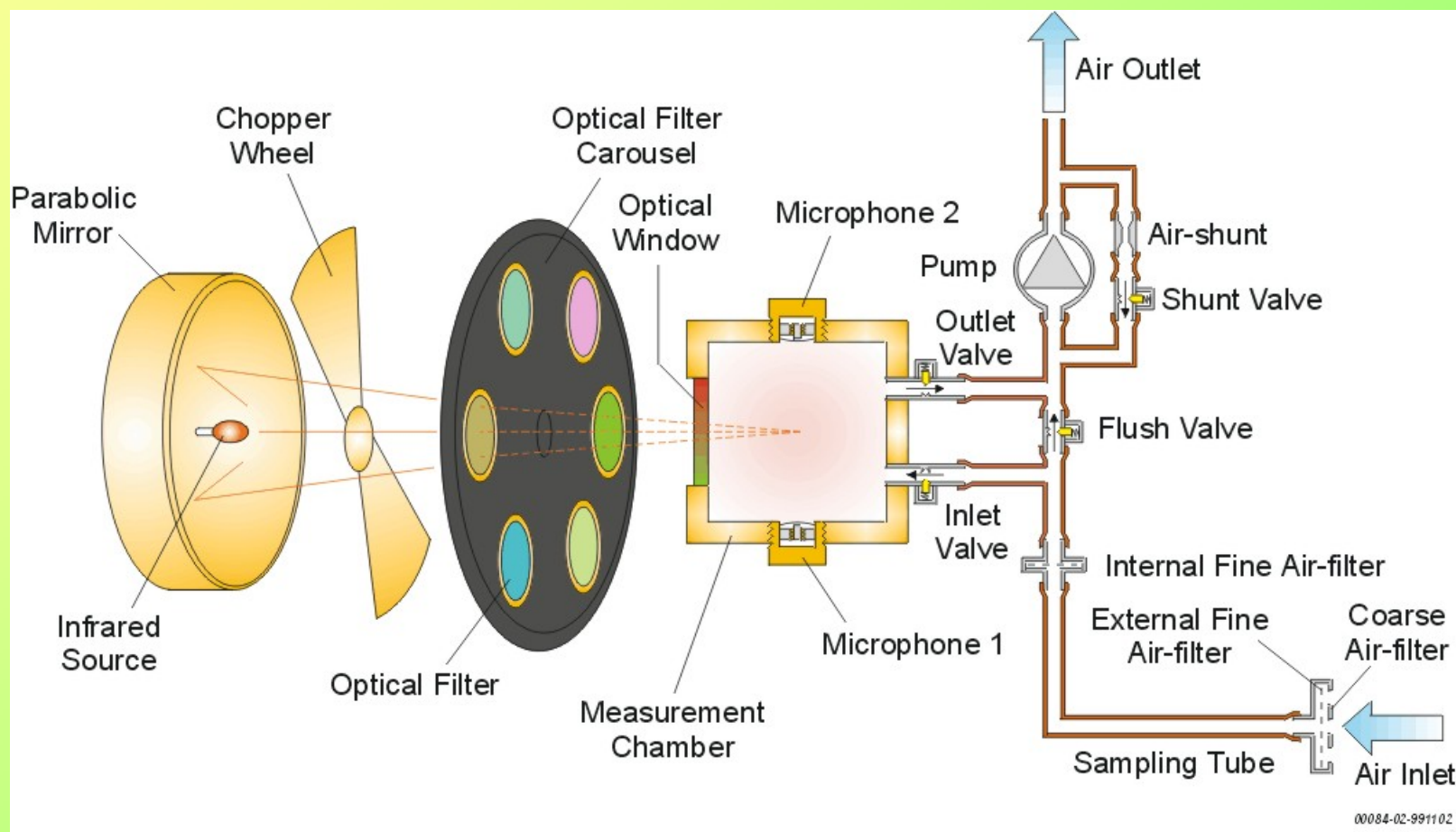
UWAGA:

**Komora fotoakustyczna –
wykorzystana jest do badań
właściwości materiałów
jednorodnych (gazy, ciecze,
proszki, smary, żele)**

Komora fotoakustyczna :

badanie gazów i cieczy

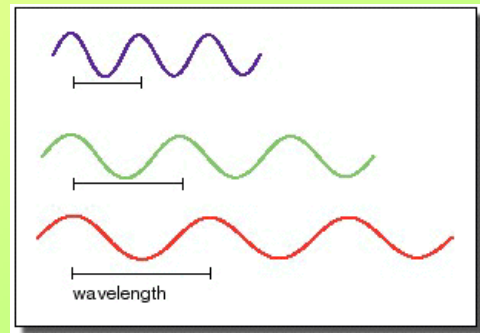
Bada się szybkość dyfuzji w funkcji np.. długości fali padającej na próbkę czy częstości modulacji natężenia tej fali



Źródła optyczne dla metod fotakustycznych

- Lampy wolframowe (żarnikowe)
- Wysoko ciśnieniowe lampy Xenonowe
- Lampy kwarcowe
- Żarniki Nearnst'a (bliska i średnia podczerwień)
- Lasery

Długości fal źródeł laserowych



<u>Laser Type</u>	<u>Wavelength (μm)</u>		
Argon fluoride (Excimer-UV)	0.193	Helium neon (yellow)	0.594
Krypton chloride (Excimer-UV)	0.222	Helium neon (orange)	0.610
Krypton fluoride (Excimer-UV)	0.248	Gold vapor (red)	0.627
Xenon chloride (Excimer-UV)	0.308	Helium neon (red)	0.633
Xenon fluoride (Excimer-UV)	0.351	Krypton (red)	0.647
Helium cadmium (UV)	0.325	Rhodamine 6G dye (tunable)	0.570-0.650
Nitrogen (UV)	0.337	Ruby (CrAlO ₃) (red)	0.694
Helium cadmium (violet)	0.441	Gallium arsenide (diode-NIR)	0.840
Krypton (blue)	0.476	Nd:YAG (NIR)	1.064
Argon (blue)	0.488	Helium neon (NIR)	1.15
Copper vapor (green)	0.510	Erbium (NIR)	1.504
Argon (green)	0.514	Helium neon (NIR)	3.39
Krypton (green)	0.528	Hydrogen fluoride (NIR)	2.70
Frequency doubled	0.532	Carbon dioxide (FIR)	9.6
Nd YAG (green)		Carbon dioxide (FIR)	10.6
Helium neon (green)	0.543		
Krypton (yellow)	0.568		
Copper vapor (yellow)	0.570		

Key: UV = ultraviolet (0.200-0.400 μm)
VIS = visible (0.400-0.700 μm)
NIR = near infrared (0.700-1.400 μm)

ABC procesu propagacji fali cieplnej -1

Założenia:

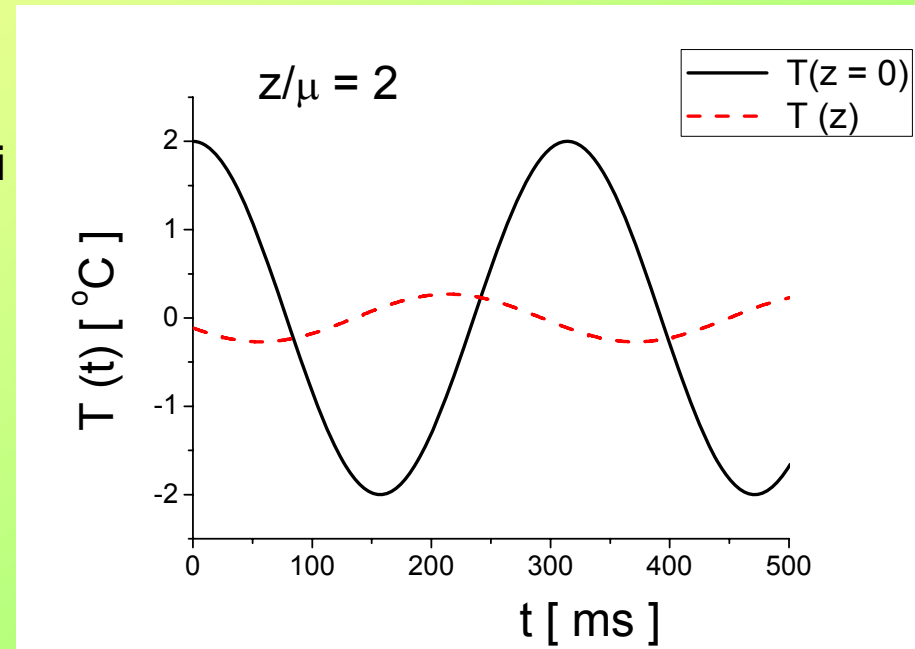
- światło jest absorbowane na powierzchni
- oświetlenie jest równomierne o pulsacji ω

Temperatura T na głębokości z
w chwili t :

$$T(z, t) = T_s + \Delta T e^{z/\mu} e^{i(\omega t + z/\mu)}$$

Efekt: **przesunięcie fazowe oraz obniżenie temperatury z głębokością**

UWAGA: parametr μ (droga dyfuzji termicznej)
jest funkcją częstości zmian natężenia
padającej fali światła



$$\mu = \sqrt{\frac{2\beta}{\omega}}$$

Właściwości fali termicznej

:

- fale termiczne są silnie tłumione
- głębokość wnikania zmniejsza się ze wzrostem pulsacji natężenia oświetlenia
- można obrazować powierzchnie oraz obszary podpowierzchniowe

Przykłady działania mikroskopii fotoakustycznej ciał stałych

- wyniki z lat 1980 –tych
- wyniki badań współczesnych
- obrazowanie tkanek

Pierwsze wyniki badań nad obrazowaniem struktur

Detekcja za pomocą mikrofonu i komory akustycznej

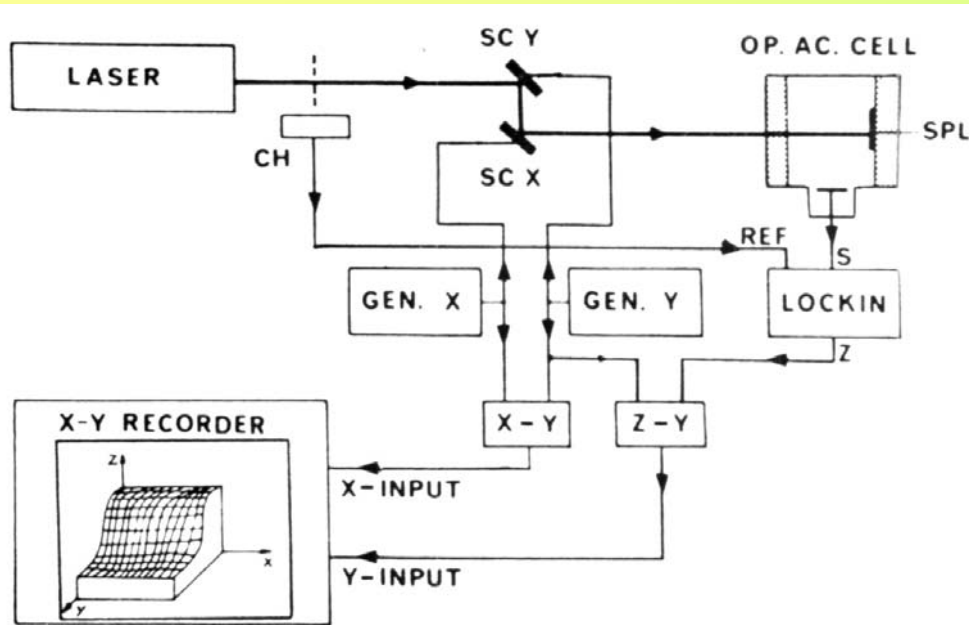


Fig. 1. Experimental arrangement for thermal-wave imaging with optoacoustic microphone detection [23].

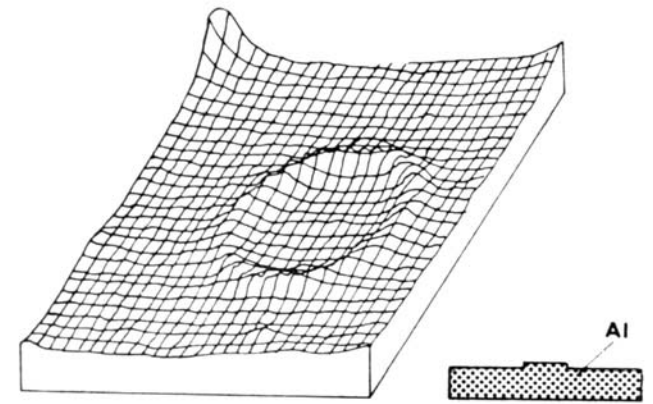


Fig. 2. Optoacoustic image of a circular step on an aluminum surface [23].

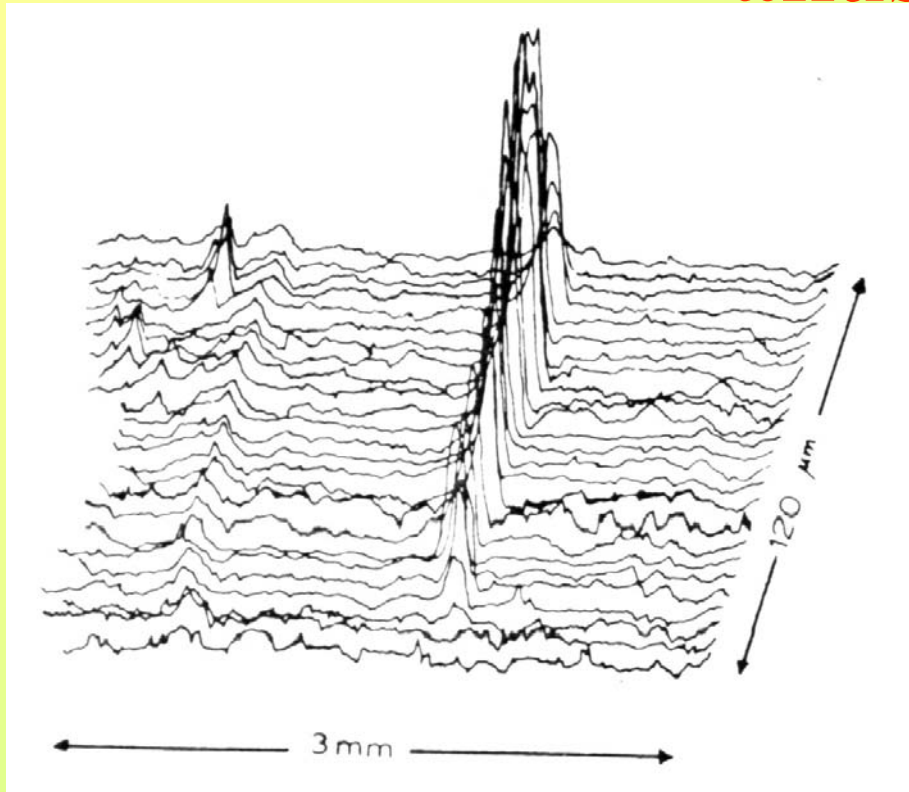
Układ pomiarowy

Laser 5 W, CO₂

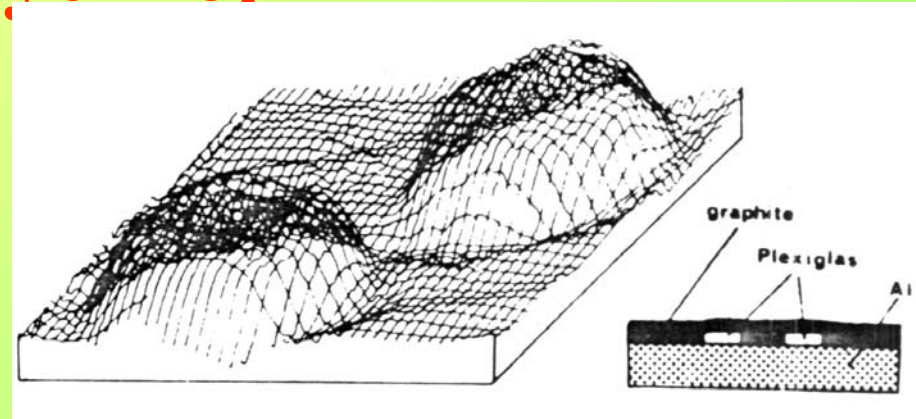
Występ o wysokości
kilku μm w aluminium

G. Busse, A. Ograbek; . *Appl. Phys.* Vol. 51, (1980)

Detekcja za pomocą mikrofonu i komory akustycznej



Crack detection in ceramic material at a modulation frequency of 800 Hz [26].



Optoacoustic image of a delamination model

G. Busse, A. Ograbek; . *Appl. Phys.*
Vol. 51, (1980)

Pęknienie w ceramicznym

Y. G. Wong *et al* ; *Appl. Phys. Lett.* Vol 32, (1978)

Detekcja za pomocą przetwornika niezoelektrycznego

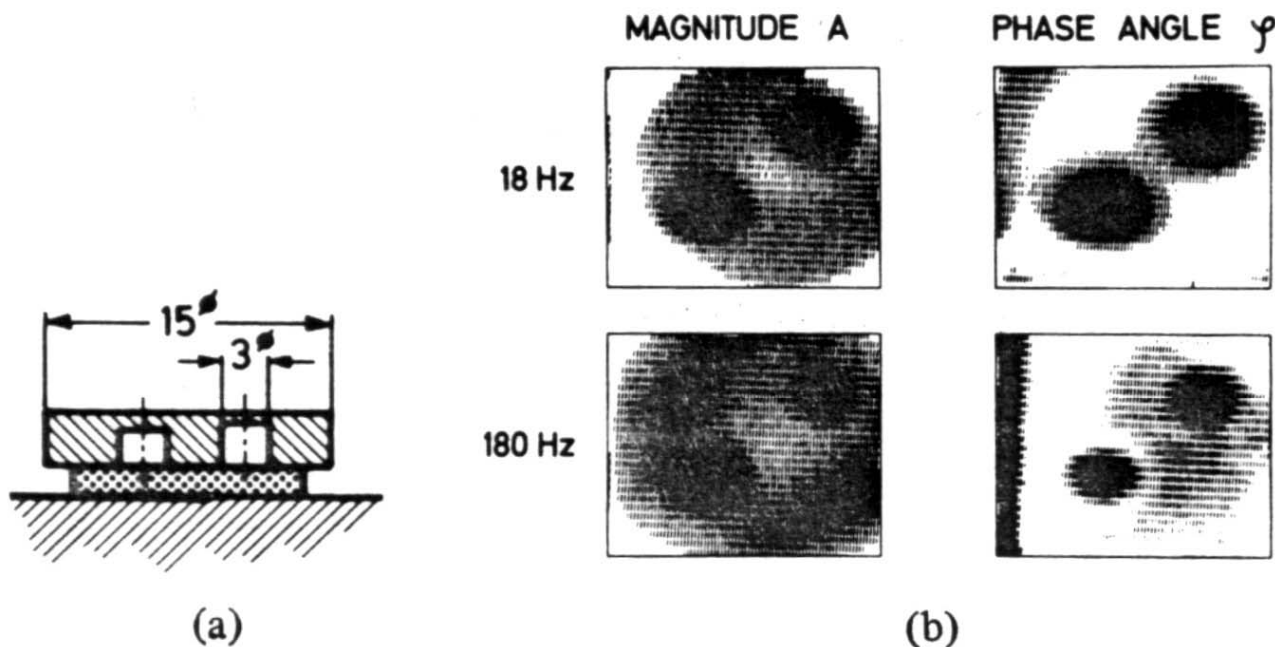


Fig. 6. (a) Geometry of aluminum sample on a piezoceramic detector. (b) Magnitude (A) and phase images (φ) obtained at two modulation frequencies [40], [64].

Owady sztuczne w aluminiowym wałku

Dwie częstotliwości modulacji fali świetlnej. 'Lepsze' obrazy daje sygnał 'przesunięcia fazowego'

Detekcja za pomocą przetwornika pyroelektrycznego

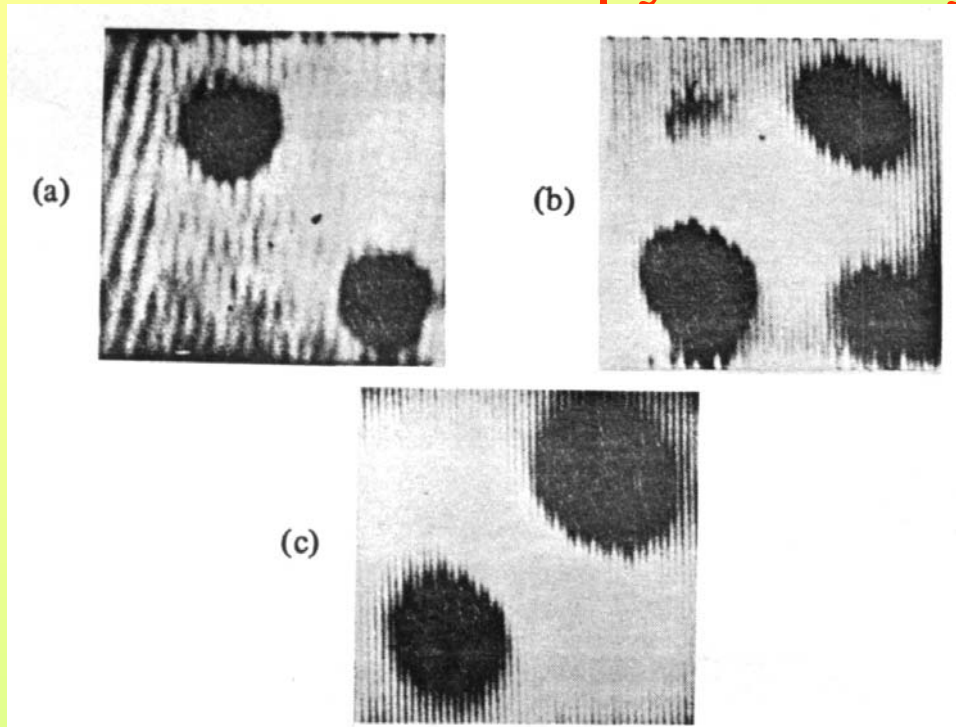
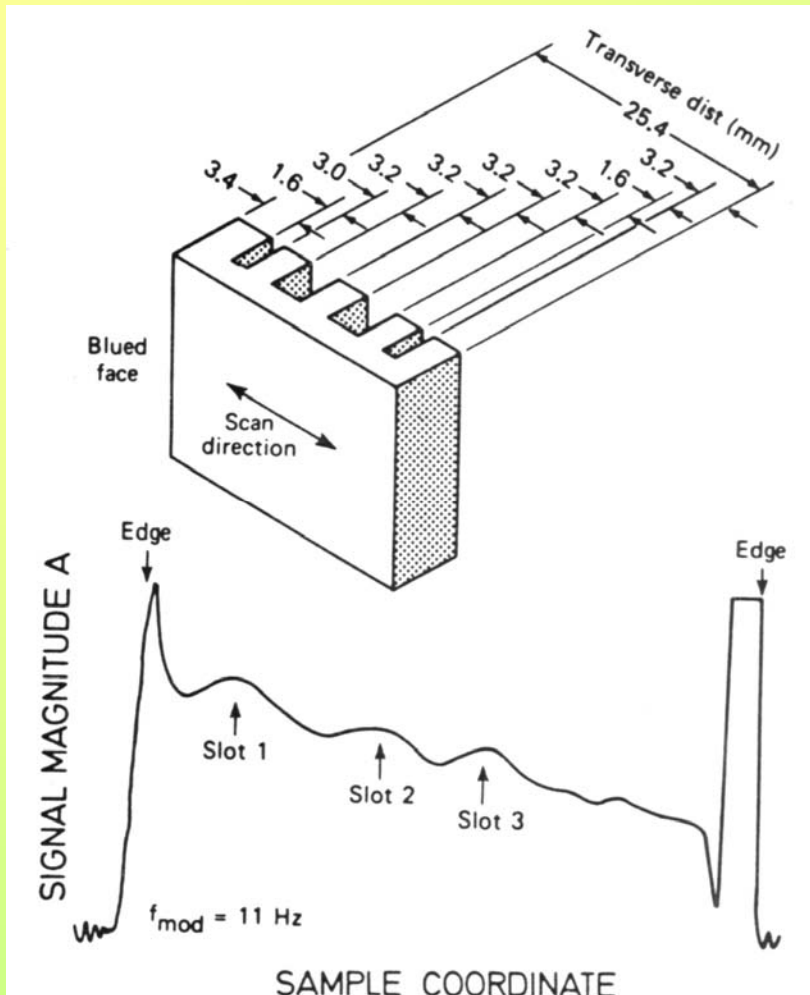


Fig. 8. Sample with two black dots on the surface. (a) Optical image. (b) Magnitude (A) image. (c) Phase (φ) image (see Fig. 6). Modulation frequency is 20 Hz [44].

Czujnik- aluminizowana folia (polyvinylogen) PVF_2) połączona z próbką za pomocą żelu.

A.C. Boccara et al ; Appl. Phys. Lett. Vol 36, (1980)

Detekcja bez kontaktu – detekcyjna wiązka światła jest równoległa do powierzchni (1)



Płytkę metalowa

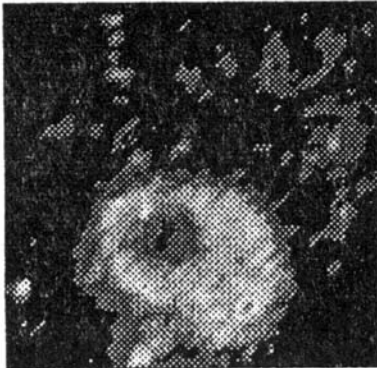
Wiązka detekcyjna przechodzi centralnie przez wiązkę padającą

J.C. Murphy et al ; Appl. Phys. Lett. Vol 38, (1981)

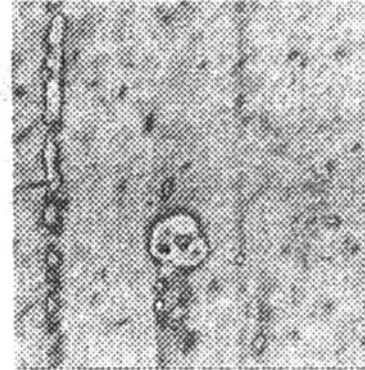
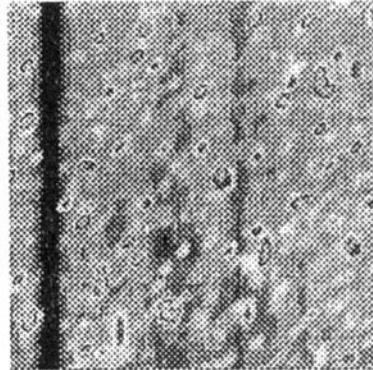
Detection of rear surface structure with magnitude of ϕ_n [48].

Detekcja bez kontaktu – detekcyjna wiązka światła jest równoległa do

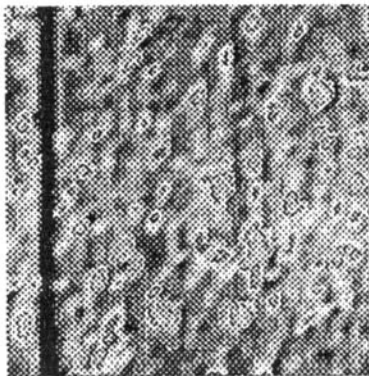
Światło odbite



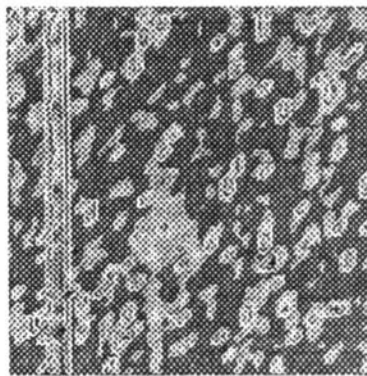
Amplituda odchylenia normalnego Amplituda odchylenia stycznego



Faza odchylenia normalnego



Faza odchylenia stycznego



Optyczny i fototermiczny obrazy próbki stalowej z pokryciem diamentopodobnym

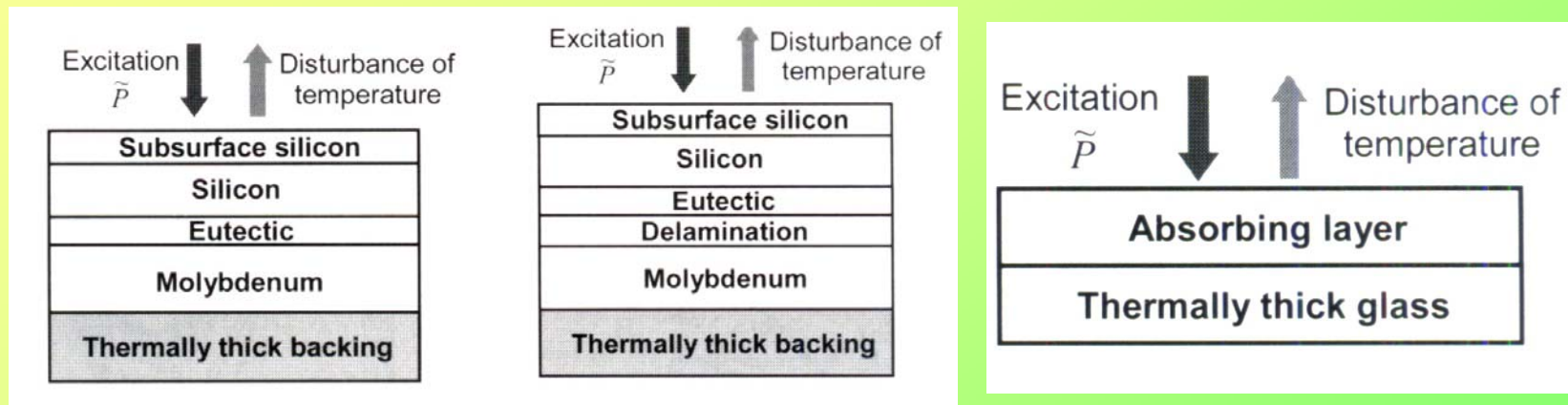
Warstwa nałożona na stalowe podłoże

Najlepszy obraz dla sygnału 'fazy'; dodatkowe struktury (pionowe linie) są związane ze strukturą warstwy diamentopodobnej oraz strukturą podłoża

Z. Kleszczewski, J. Bodzenta, B. Pustelny; *Podstawy Fizyczne badań Nieniszczących*, Gliwice 95, Politechnika Śląska

Wyniki badania współczesnego mikroskopu fotakustycznego (lata 2000)

Wyniki badania układów warstwowych (tranzystory)



Schematic diagrams of structures considered: a) normal area, b) delamination area, c) reference area.

Application of photoacoustic method and evolutionary algorithm for determination of thermal properties of layered structure

R. Asoba, Z. Suszyński; *J. Phys. IV*, vol. 117 (2004)

Wyniki badania (tranzystory) 2

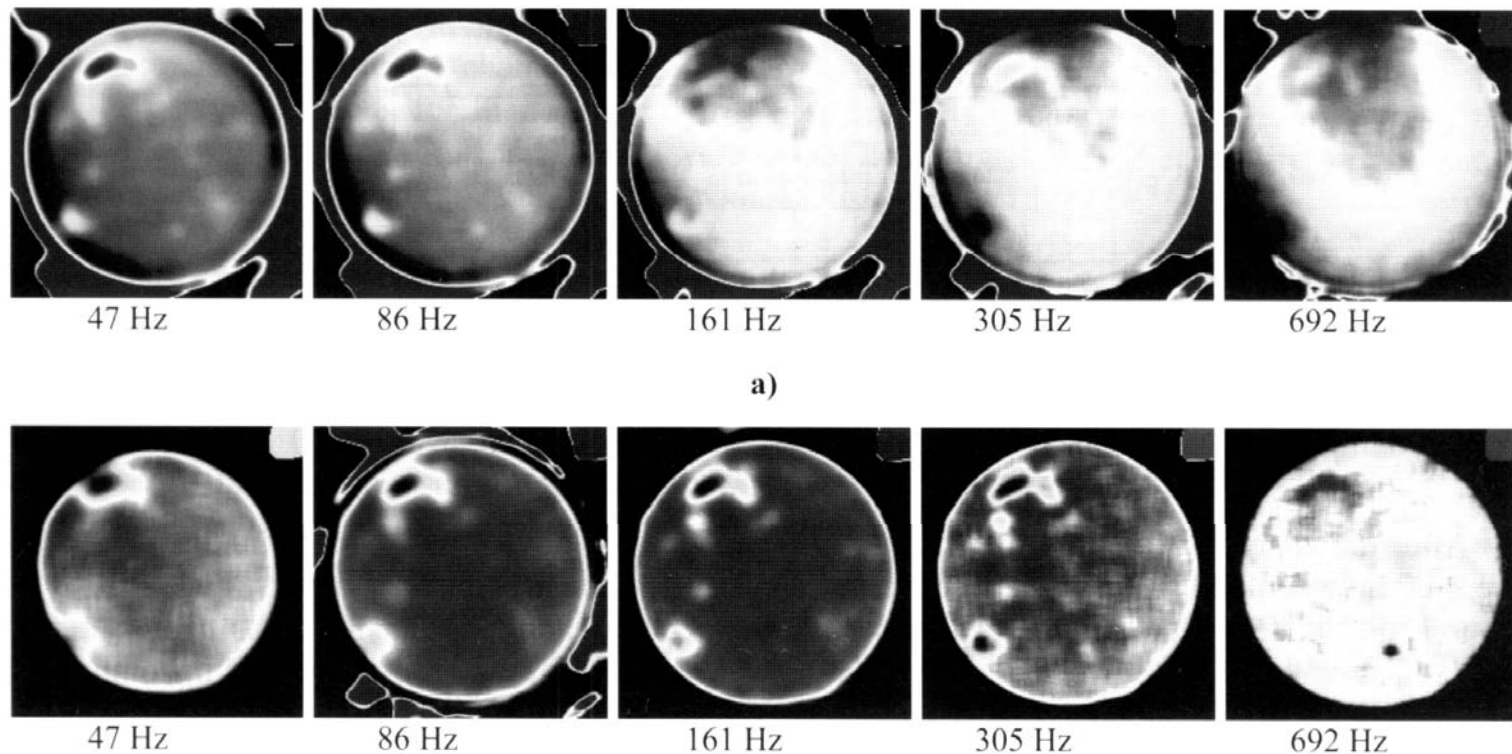
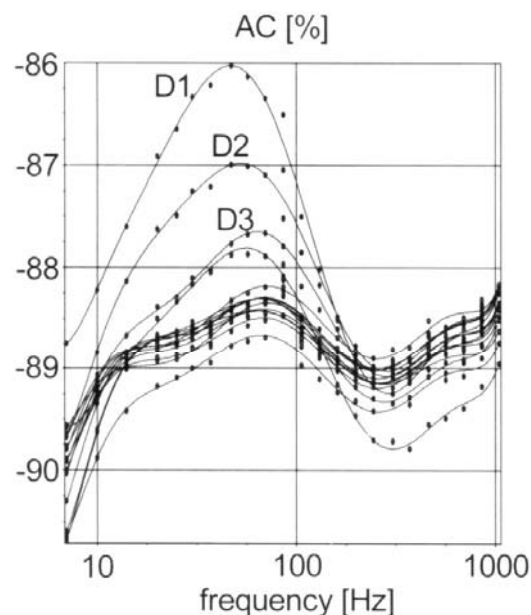
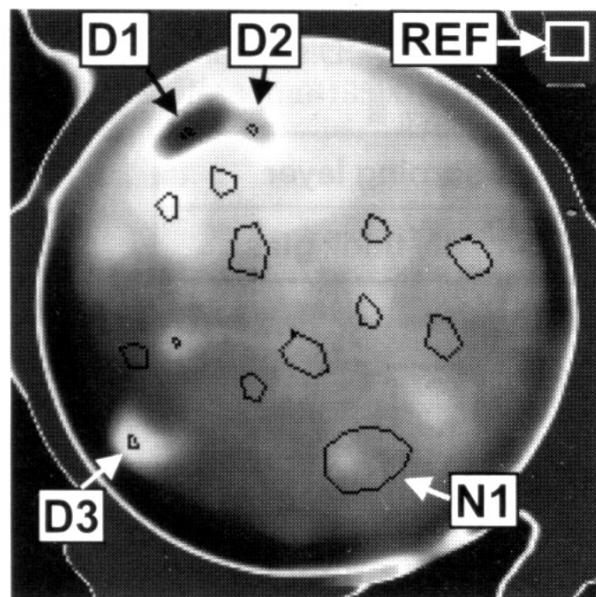


Figure 3. Photoacoustic images of thyristor structure for selected frequencies of modulation: a) amplitude images, b) phase images.

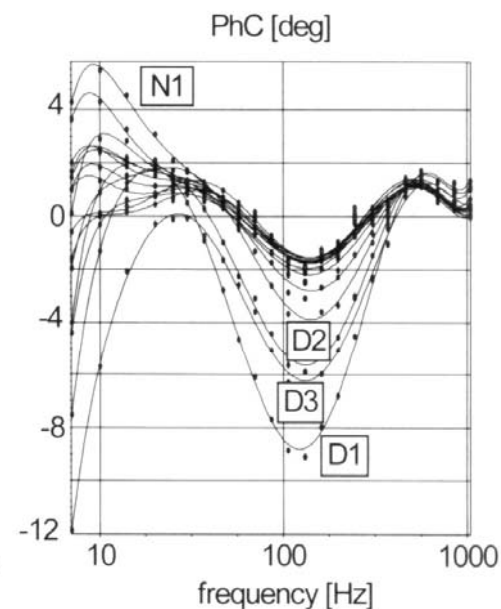
Application of photoacoustic method and evolutionary algorithm for determination of thermal properties of layered structure

R. Asoba, Z. Suszyński; *J. Phys. IV*, vol. 117 (2004)

Wyniki badania (tranzystory) 3



b)



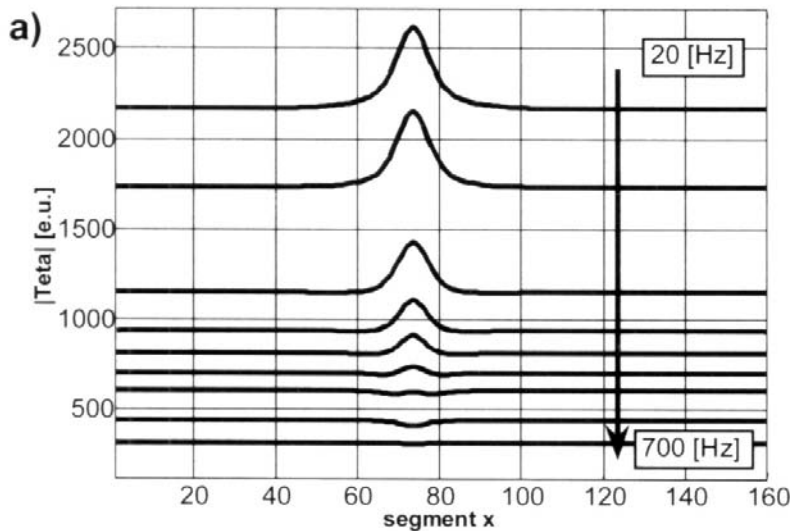
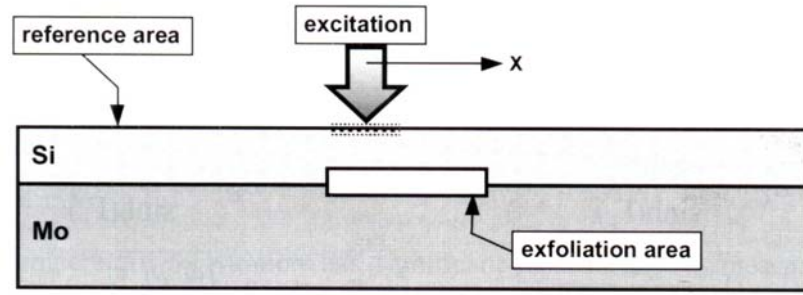
c)

Figure 4. Areas of thyristor structure selected for analysis (a) and their temperature contrast characteristics: amplitude contrast AC (b) and phase contrast PhC (c). D1, D2, D3 - delaminations, N1 - area of good adhesion REF - reference area.

Application of photoacoustic method and evolutionary algorithm for determination of thermal properties of layered structure

R. Asoba, Z. Suszyński; *J. Phys. IV*, vol. 117 (2004)

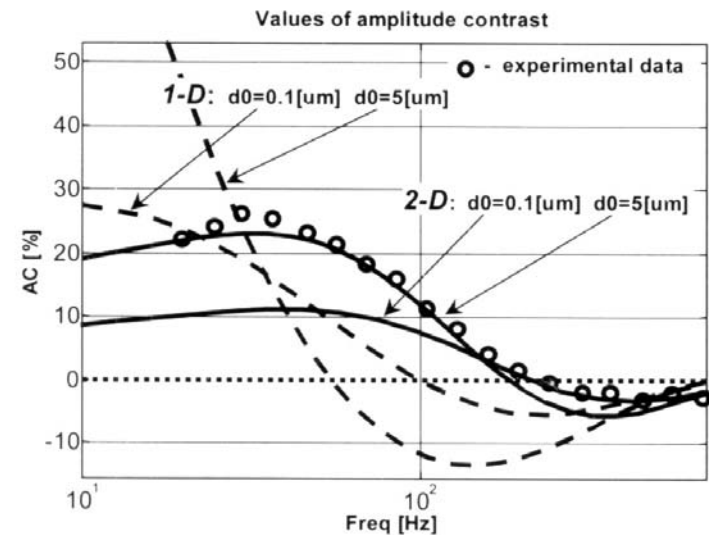
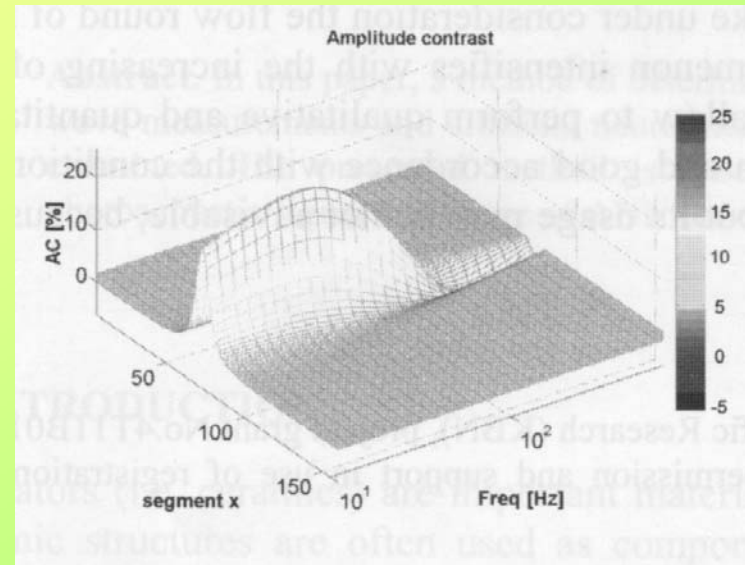
Delaminacja - modelowanie



Analiza zmiany amplitudy sygnału FA od częstotliwości modulacji.

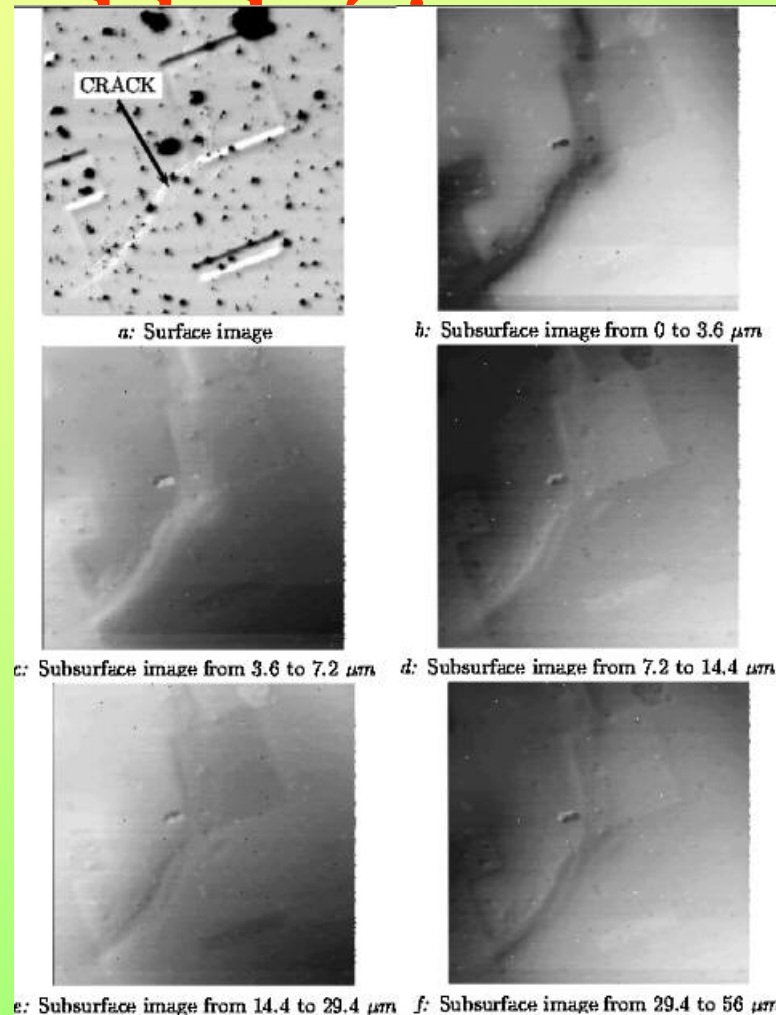
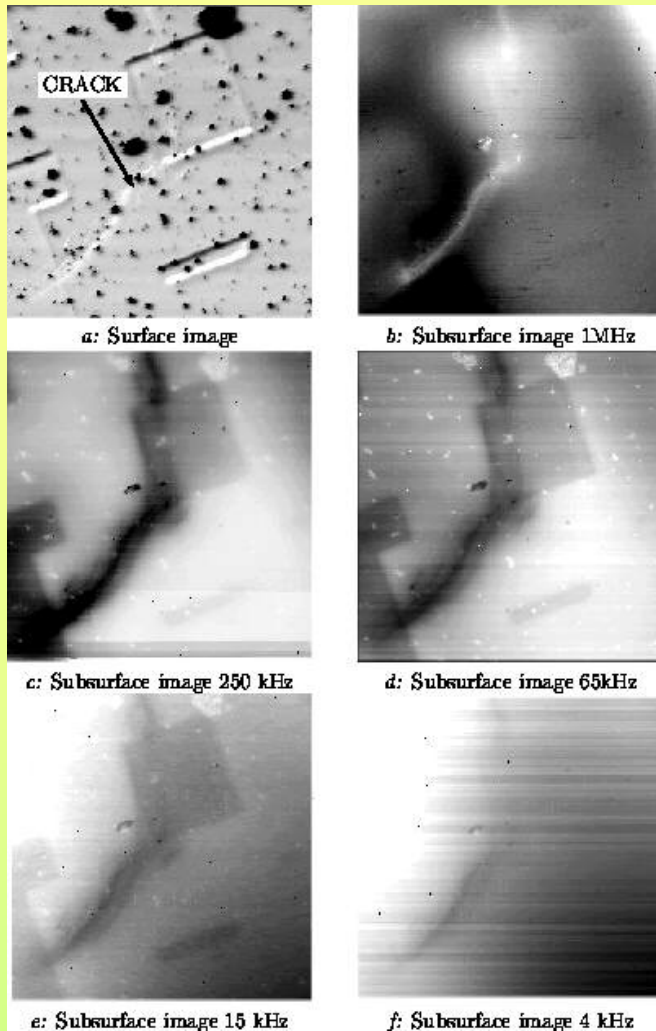
1D – szeregowo połączenie

2D – uwzględnia się efekty brzegowe



Limitation of 1D thermal model in comparison with 2D model of light thyristor structure in thermal wave microscopy; Z. Suszyński, R. Duer, R. Arsoba; *J. Phys. IV*, vol. 117 (2004)

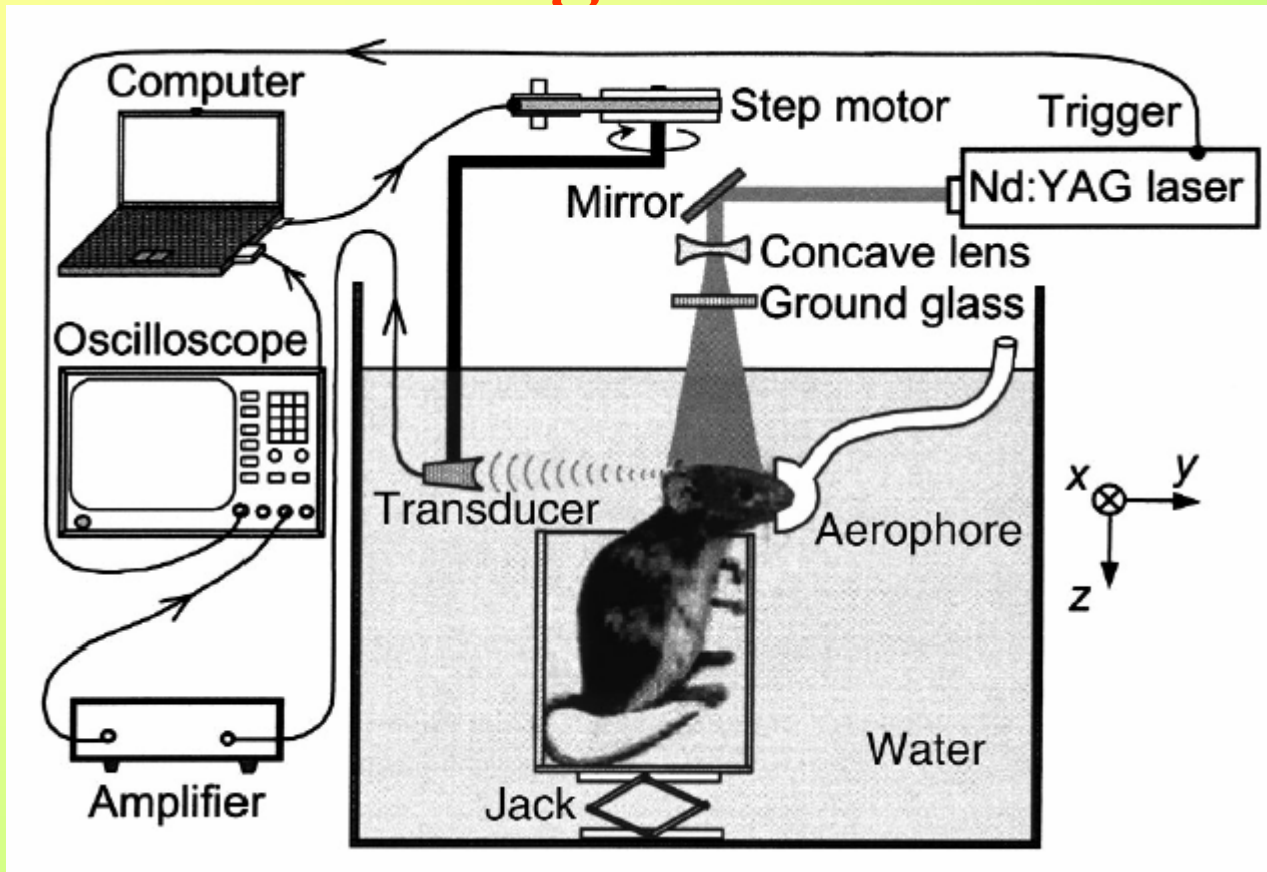
Mikroskop fotoakustyczny — analiza po



In depth Analysis and Characterisation by
Photoacoustic Imagery, 15 WCND, Roma 2000

a crack on an integrated circuit for
different frequencies — > wyznaczone
obrazy dla różnych głębokości

Badania materiałów biologicznych – tomografia fotoakustyczna



Badanie 'in vivo' mózgu szczura

Nature Biotechnology, vol. 21, 7 (2003)

tomografia fotoakustyczna - 2

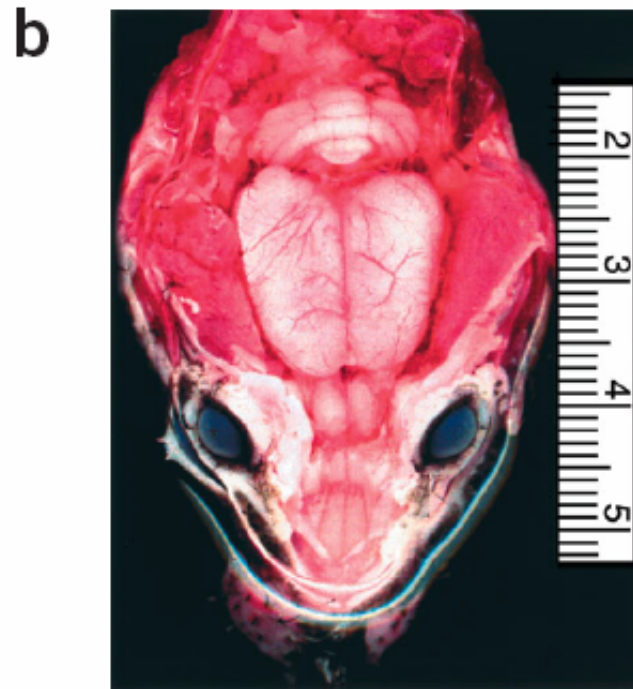
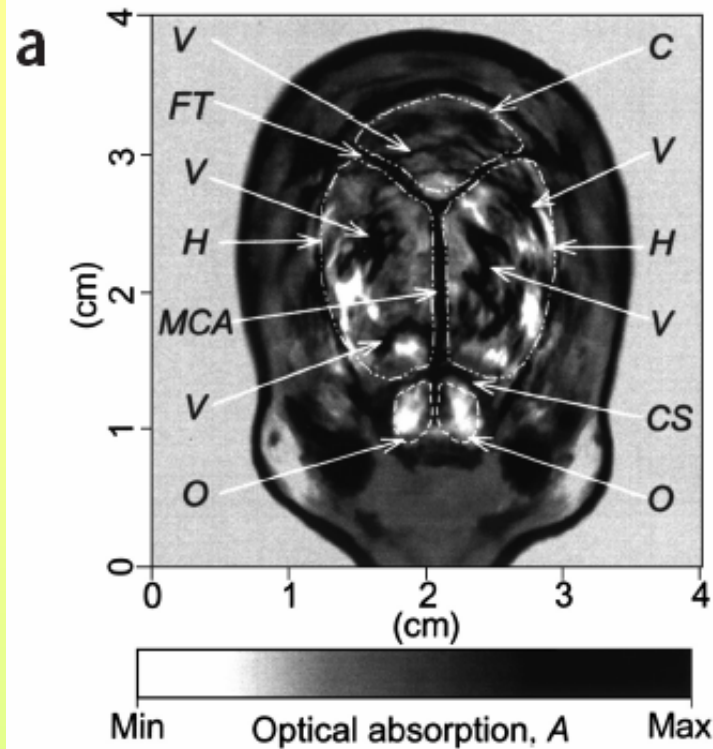
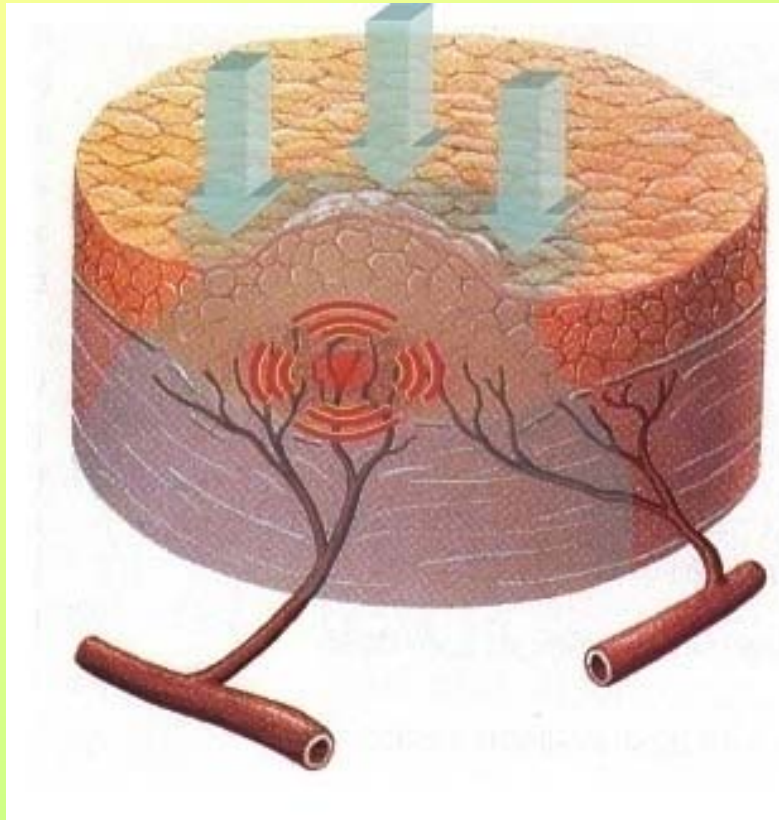


Figure 2 PAT imaging of the rat brain *in vivo*. (a) Noninvasive PAT image of the superficial layer of a rat brain acquired with the skin and skull intact, with optical absorption shown in grayscale (darker areas indicate greater absorption). (b) Open-skull photograph of the rat brain surface acquired after the PAT experiment.

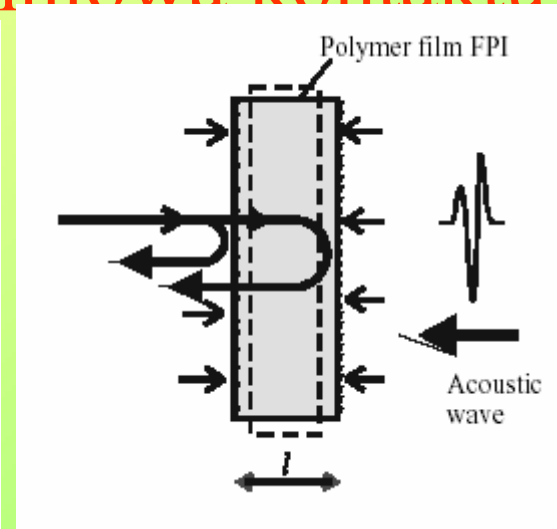
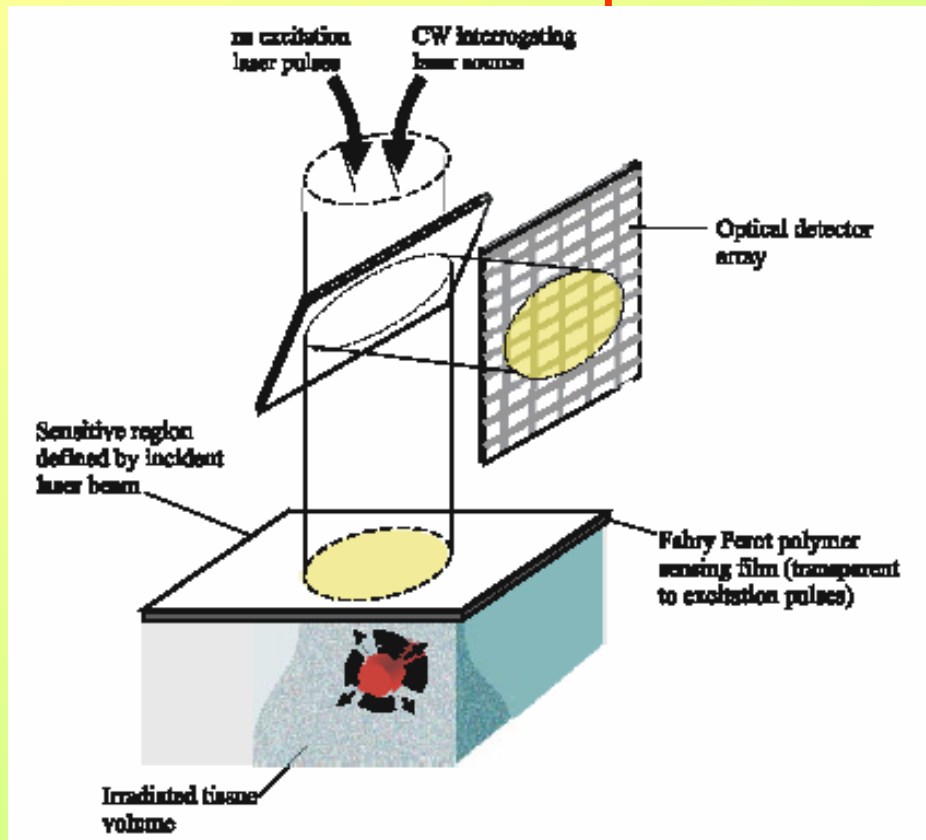
Badania tkanki za pomocą efektu fotoakustycznego



Wykrywanie stanów rakowych

Badanie tkanki

metoda powierzchniowa kontaktu



FP polymer film ultrasound sensor

http://www.medphys.ucl.ac.uk/research/mle/pdf_files/bios200manuscript2.pdf

Obraz z interferometru dla sondy powierzchniowej

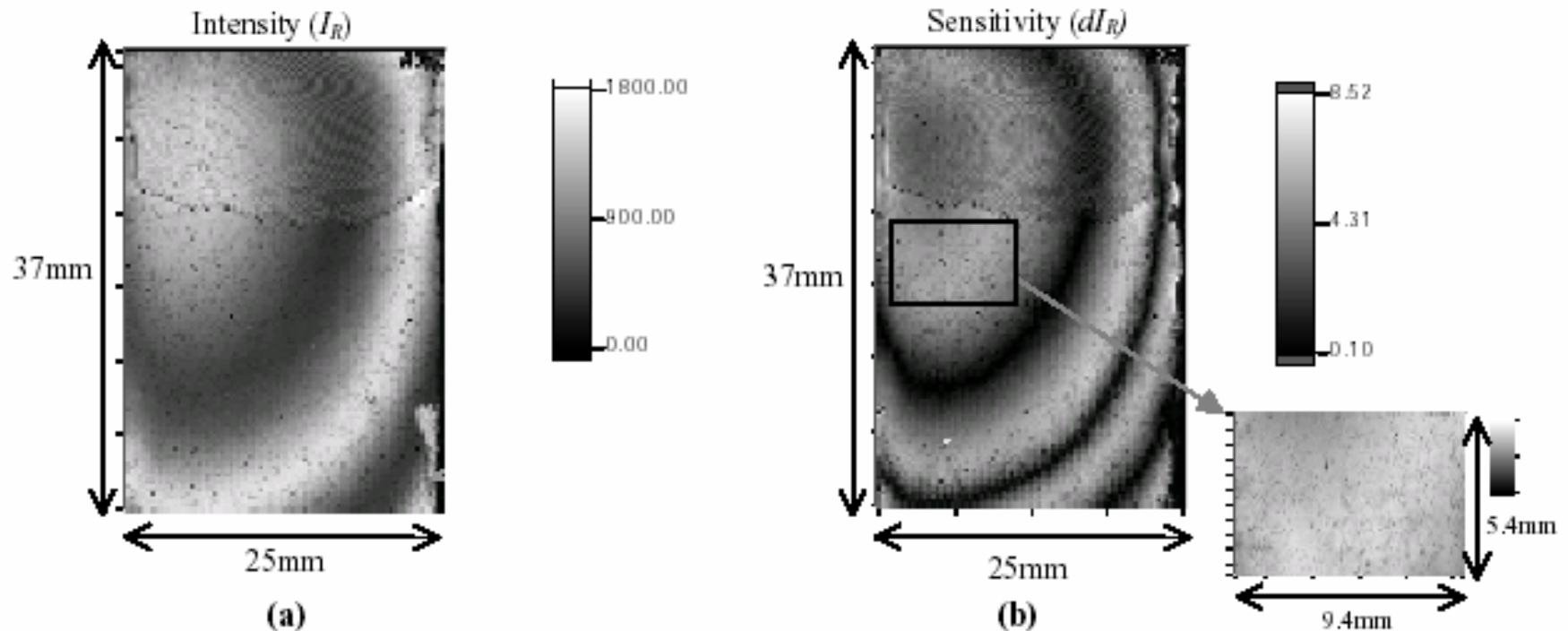


Figure 8 (a) Reflected interference fringes across sensor head and (b) corresponding sensitivity map. $60\mu\text{m}$ spot size, $300\mu\text{m}$ steps. Dotted area on sensitivity map shows location of region of uniform sensitivity – rescanned with $100\mu\text{m}$ steps.

Podsumowanie

Zalety:

- bezinwazyjna ?
- ‘ujawnia’ właściwości termosprężyste materiału

Wady:

- stosunkowo mała głębokość obrazowania (rzędu mm)
- ‘czasochłonne’ skanowanie ze względu na małą szybkość propagacji fal termicznych