

ROMANIA

INSTITUTUL CENTRAL DE FIZICA
INSTITUTUL DE FIZICA SI TEHNOLOGIA APARATELOR CU RADIATII
C.P. MG-6, Bucuresti - Magurele

CEI 7- LOP-61-1988

Martie

Detectori fotoelectrici utilizati in
instalatiile de aliniere si control cu
laseri
I. CHIS, A. I. CIURA, M. V. UDREA

Abstract : In much laser based control and alignment equipment, employment of photoelectric reception systems requires the realization of the best trade-off between the signal level, response time and the necessity to avoid photodetector saturation due to the ambient light. In this work some theoretical considerations and practical results regarding the utilization of the ROL 50 photovoltaic cell in a leveling control system and glass quality control equipment are presented. The signal evaluation and practical results concerning the use of the quadrant ROL-210 photovoltaic cell in the measurements of small displacements are also shown.

Intr-un punct convenabil din teren se fixează un emițător laser, laserul fiind fixat în interiorul său în poziție verticală. Fasciculul emis este deviat la 90° de o pentaprismă care execută o mișcare de rotație; în acest fel fasciculul va descrie un plan orizontal sau înclinat cu unghiul dorit, considerat plan de referință. Pe utilajul care execută nivelarea terenului sau săparea unor canale de irigație sau drenaj se fixează sistemul de recepție. Acesta trebuie să acopere pe verticală o înălțime de 15-20 cm și să răspundă indiferent de unghiul de incidență al fasciculului rotitor. Semnalele electrice date de sistemul de recepție sînt prelucrate apoi de o unitate de control de la bordul utilajului, care permite atât indicarea vizuală a poziției contrului receptorului față de cota corectă cît și obținerea de semnale de comandă pentru ridicarea sau coborîrea organului de lucru (lamă, freză) al utilajului.

Pentru a evita un număr exagerat de deplasări ale emițătorului în cursul realizării unei lucrări, sistemul de recepție trebuie să fie capabil să detecteze pulsurile laser pînă la o distanță de minim 300 m de emițător.

Deci cerințele ce se impun sistemului de recepție sînt:

- a) să acopere o zonă de 15 - 20 cm pe verticală;
- b) să recepționeze radiația din orice unghi, deci să fie un detector de 360° ;
- c) să răspundă la pulsurile scurte produse la trecerea fasciculului laser prin dreptul zonei fotosensibile pentru o distanță de lucru de minim 300 m;
- d) să nu se satureze la lumina ambiantă.

Evident, pentru a satisface cu un număr minim de componente primele două condiții, este nevoie de detectori cu suprafața și unghiul de acceptanță mari. Din acest punct de vedere, celulele fotovoltaice ROL 50 sînt soluția ideală, detectorul fără unghi mort fiind realizat cu patru coloane verticale de celule, la cîte 90° , fiecare coloană cuprinzînd 8 asemenea detectori. Cîte două rînduri orizontale de detectori sînt legate în paralel, avînd deci cîte 8 celule fotovoltaice pe o sarcină comună.

In ceea ce privește respectarea ultimelor două condiții,

1. Introducere

În ultima perioadă asistăm la o extindere masivă a laserului cu He-Ne în numeroase domenii, cum ar fi industria minieră, construcțiile de tuneluri, nivelarea terenurilor, controlul pantei canalelor de irigație sau drenaj, centrarea de precizie a unor piese (turbine, elice, etc.) /1,2/. Dacă în unele aplicații, cum ar fi săparea galeriilor subterane, și tunelurilor de cale ferată, se poate urmări vizual fasciculul laser de referință, în alte aplicații acest lucru nu mai este posibil, fie din cauza luminii ambiante, fie datorită preciziei mari solicitată.

În lucrarea de față se prezintă câteva aplicații care fac apel la dispozitive fotoelectrice dezvoltate la CCSIT-CE Băneasa, respectiv celulele fotovoltaice ROL 50 și ROL 210, arătându-se configurațiile în care se folosesc și performanțele obținute.

2. Utilizarea celulei fotovoltaice ROL 50

Vom prezenta în continuare două aplicații dezvoltate în secția Laseri-IFTAR, care cuprind sisteme de recepție echipate cu detectori ROL 50 în regim fotovoltaic.

2.1. Instalație pentru controlul pantei terenurilor

Pentru înțelegerea solicitărilor la care trebuie să răspundă sistemul de recepție, vom prezenta pe scurt principiul de lucru al unei astfel de instalații, care se utilizează în nivelarea terenurilor agricole, construcția pistelor de aterizare, controlul pantei șanțurilor de irigație sau drenaj, etc.

- filtrul introduce o atenuare, transmisia sa fiind in cel mai bun caz de ordinul a 70%;

- banda de trecere se deplasează funcție de unghiul de incidență al fasciculului laser, ceea ce are ca efect o și mai mare scădere a semnalului pe detectori;

- este dificil să se realizeze filtre uniforme de dimensiuni mari, capabile să reziste la utilizarea în teren a instalațiilor.

Toate aceste neajunsuri au ca efect atât scăderea performanțelor sistemului receptor cât și creșterea costului acestuia.

A doua soluție pentru evitarea saturării, mult mai elegantă și mai ieftină, constă în utilizarea unei sarcini inductive. În acest fel, în curent continuu rezistența de sarcină este practic nulă, în timp ce în impulsuri impedanța de sarcină variază liniar cu frecvența. Acest efect este deosebit de favorabil, deoarece pe măsură ce distanța emițător - receptor crește, densitatea de putere a fasciculului laser scade datorită divergenței, dar scade și durata impulsului pe fotodetector, ceea ce este echivalent cu creșterea benzii de frecvență, deci și a impedanței de sarcină. Acest efect de compensare nu poate fi însă folosit pe deplin deoarece în practică, din motive legate de amortizarea circuitului, în paralel cu inductanța trebuie pusă și o rezistență.

Semnalele date de detectori sînt amplificate cu un amplificator de bandă largă, comparate cu un nivel prestabilit și apoi formate în durată și amplitudine pentru a putea fi prelucrate logic.

Folosirea acestui sistem de recepție a permis detectarea unor pulsuri slabe, în condiții de imunitate la sursele exterioare de lumină, pînă la distanțe satisfăcătoare din punct de vedere al cerințelor de lucru. Utilizarea unei sarcini complexe a permis depășirea substanțială a posibilităților teoretice ale celulei fotovoltaice KOL 50 în montaj clasic, cu impedanța de sarcină rezistivă.

2.2. Instalație pentru controlul calității sticlei

În procesul de tragere a geamurilor este necesar un control permanent al acestora în scopul eliminării acelor por-

acestea sînt strict legate de performanțele elementelor foto-detectoare și de schema electrică utilizată. La o distanță de lucru de 300 m între emițător și receptor, se calculează ușor că pentru o frecvență de rotație de 5 Hz, durata trecerii fasciculului laser prin dreptul celulei fotovoltaice ROL 50 este de circa o microsecundă.

Figura 1 reprezintă timpul de creștere al celulei fotovoltaice ROL 50 funcție de rezistența de sarcină. Sursa de excitare a fost o diodă electroluminescentă cu timp de creștere de 10 ns excitată cu pulsuri cu durata de 0,5 ms și timp de creștere 1 ns. Se observă că pentru a detecta pulsuri de ordinul a 1 μ s, rezistența de sarcină trebuie să fie mai mică de 20Ω . Măsurătorile de sensibilitate făcute la lungimea de undă a laserului cu He-Ne, folosit pînă acum în marea majoritate a acestor aplicații ($\lambda = 633$ nm), am dat o valoare medie de 0,36 mA/mW. În cazul instalației la care ne referim, fasciculul laser de 1 mW la ieșire are la distanța de 300 m un diametru de circa 50 mm. Deci considerînd o distribuție uniformă, puterea care cade efectiv pe o zonă de detecție (formată din două celule fotovoltaice alăturate pe verticală) este de cel mult 0,2 mW. În acest caz semnalul obținut pe o rezistență de sarcină de 20Ω ar fi 1,4 mV, semnal ce ar putea fi amplificat fără dificultate pînă la un nivel convenabil pentru prelucrarea ulterioară. O problemă importantă rămîne însă saturarea datorată luminii ambiante, chiar la o rezistență de sarcină mică, de 10 - 20Ω . Comparînd cu calculele efectuate asupra celulei fotovoltaice ROL 11 /3/ și țînînd cont de raportul ariilor dintre cele două elemente detectoare, ar rezulta un curent de scurtcircuit de circa 35 mA pentru o celulă fotovoltaică ROL 50 expusă direct razelor solare (dacă acest curent nu ar fi limitat de alți factori). Legarea în paralel a opt celule fotovoltaice va produce cu siguranța saturarea tuturor elementelor detectoare chiar la nivele relativ scăzute ale iluminării ambiante, făcînd imposibilă detectarea pulsurilor laserului cu He-Ne. Pentru a depăși această problemă au fost folosite două soluții ; prima a constat în utilizarea unor filtre de bandă îngustă, centrate în jurul valorii de 633 nm. Această soluție este dezavantajoasă din mai multe puncte de vedere:

- ghidarea unor sisteme, fie pentru atingerea unor ținte, fie pentru păstrarea unei poziții relative constantă față de o sursă de lumină.

În cele ce urmează vom prezenta utilizarea acestui detector pentru realizarea unui sistem de centrare, capabil să pună în evidență abateri de ordinul zecilor de micrometri. După calculul semnalului dat de fotodetector funcție de abaterea fasciculului laser vom prezenta pe scurt și unele rezultate experimentale.

3.1. Calculul semnalului

Geometria tipică pentru detecția unor deplasări mici pe două axe este indicată în fig.3. În cazul în care fasciculul laser este centrat perfect pe suprafața fotodetectorului, curenții generați de ariele de incidență A₁ - A₄ vor fi egali, în ipoteza unei sensibilități egale a celor patru sectoare. Dacă fasciculul se va deplasa pe una din axe, de exemplu Cy, va apărea un decalaj Δt între centrul fasciculului și centrul fotodetectorului, iar curenții I₁ și I₂ nu vor mai fi egali, apărând un curent diferență ΔI .

Vom calcula semnalul diferență raportat la puterea P a fasciculului laser funcție de deplasarea t în următoarele condiții:

- sensibilitatea celor patru sectoare este egală și uniformă pe toată suprafața;
- fasciculul laser are o simetrie circulară, cu distribuție gaussiană a intensității;
- diametrul fasciculului laser este mai mic decât diametrul fotodetectorului;
- fotodetectorul are o separare metalurgică, 2 d, care în cazul celulei fotovoltaice ROL 21b este 0,3 mm. Dacă notăm cu I curentul produs la incidența fasciculului laser pe unul din sectoare, avem relația:

$$I = \int H \cdot S \cdot dx dy \quad (1)$$

unde H este intensitatea fasciculului laser (în mW/cm²), S este sensibilitatea fotodetectorului (în mA/mW), iar integrarea se face pe aria sectorului respectiv ocupată de fascicul.

riuni care conțin defecte (bule de aer, incluziuni, zgfrietură). Pentru a realiza acest control, un fascicul laser baleiază permanent geamul într-un plan vertical, perpendicular pe direcția de avansare a geamului. Sub geam se plasează un sistem de recepție format dintr-un număr suficient de detectori pentru a acoperi întreaga lățime a geamului, situați cât mai aproape unul de altul. Interpunerea unui defect în calea fasciculului laser se traduce printr-o variație a amplitudinii semnalului pe unul din elementele detectoare. Principiul de lucru se bazează pe numărarea semnalelor date de spațiile libere dintre detectori și de defectele geamului.

Cerințele care se impun sistemului de recepție sînt asemănătoare celor din cazul instalației pentru controlul pantei terenurilor.

Pentru a acoperi întreaga lățime a geamului (maxim 1,8m), cu un număr minim de componente, este preferabil să folosim celulele fotovoltaice ROL 50. Acestea corespund și cerinței ca între detectori să avem un spațiu minim posibil, pentru a evita pierderea semnalizării unor defecte de mici dimensiuni. În ceea ce privește viteza de răspuns, aceasta este determinată de frecvența baleierii, dependentă la rîndul ei de viteza de avansare a geamului. În cazul concret avut în vedere, impunînd condiția ca între două baleieri succesive geamul să avanseze cu mai puțin de 1 mm, rezultă o durată a pulsului de circa 2 μ s pentru defecte de 0,2 mm, limita minimă detectabilă propusă. Acest timp este posibil de atins cu celulele fotovoltaice ROL 50 folosind același circuit ca și în instalația descrisă anterior, cu sarcină inductivă.

Figura 2 reprezintă răspunsul celulei fotovoltaice ROL50 și al amplificatorului utilizat la un tren de impulsuri cu durata de 2 μ s și frecvența de repetiție de 5 kHz. Pulsurile de excitare sînt date de o diodă electroluminescentă cu emisie în roșu, cu timp de creștere de 10 ns.

3. Utilizarea celulei fotovoltaice ROL 210

Celula fotovoltaică cu patru sectoare ROL 210 este foarte potrivită pentru două tipuri de aplicații:

- centrarea de precizie a unor piese, cum sînt turbinele, elicele etc;

cu $a > l_0$. De altfel, lucrul cu fascicule mici presupune folosirea unei lentile care să focalizeze pe fotodetector, iar alinierea axelor laser și a lentilei devine mult mai pretentivă.

Un alt aspect este legat de existența unei valori optime a parametrului a . Intuitiv se poate ușor presupune că maximum are loc atunci când distanța dintre sectoarele fotosensibile corespunde punctelor de inflexiune ale gaussienei descrisă de relația (2). Se poate ușor deduce că, în cazul geometriei din fig.5, aceasta are loc la $d\sqrt{2}$, lucru ce se observă și din fig.6.

Calculule prezentate ne permit să estimăm concret nivelul semnalului. De exemplu, pentru un fascicul cu $a = 1$ mm (adică un diametru aparent de circa 4 mm), la o putere laser de 1 mW, sensibilitatea este de 145 μ A/mm. Cu o rezistență de sarcină de 500 Ω se vede că se obține un semnal de circa 0,7 mV pentru o deplasare de 10 μ m.

3.2. Rezultate obținute

Folosind celula fotovoltaică ROL 210 s-a realizat un detector de centrare, care pune în evidență deplasări mici, de ordinul zecilor de micrometri. Semnalele de pe fiecare sector de detecție sînt culese pe rezistențe de sarcină egale, iar perechile de semnale de pe sectoare opuse se aplică la intrările unor amplificatoare diferențiale. Legirile amplificatoarelor se aplică unor instrumente indicatoare cu zero central. Prin varierea rezistențelor de sarcină se pot defini trei game de sensibilitate, în raporturile 1,5:25. Pentru sensibilitatea maximă există posibilitatea creșterii constantei de timp în scopul medierii fluctuațiilor produse de condițiile de propagare a fasciculului laser.

Figura 7 arată semnalul funcție de mărimea deplasării, pentru un fascicul cu puterea de 0,4 mW și diverse valori ale parametrului a . Se observă liniaritatea prezisă și de calculule teoretice ca și posibilitatea detectării deplasărilor de zeci de um cu scheme electronice relativ simple.

4. Concluzii

Realizarea unor detectori speciali de către CCSIT-CE Băneasa (cu arie mare sau cu patru sectoare), a permis extinde-

Pentru o distribuție gaussiană a intensității avem:

$$H = H_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a^2}\right) \quad (2)$$

unde $a\sqrt{2}$ este raza la care intensitatea a scăzut de "e" ori, iar H_0 este intensitatea maximă, în centrul fascicului. Pentru a lega mărimea H_0 de puterea P a fascicului (mai ușor măsurabilă), putem considera cu foarte bună aproximație că întreaga putere cade pe un cerc cu raza $3a$. Rezultă imediat:

$$H_0 = \frac{P}{2\sqrt{\pi}a^2} \quad (3)$$

Efectuând calculele se găsește următoarea expresie a curentului diferență raportat la puterea laser:

$$\frac{\Delta I}{P} = S \left[F^2\left(-\frac{d-t/\sqrt{2}}{a}\right) - F^2\left(-\frac{d+t/\sqrt{2}}{a}\right) \right] \quad (4)$$

în care funcția F este dată de

$$F(x) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{u^2}{2a^2}\right) du \quad (5)$$

fiind binecunoscută în statistică și găsindu-se tabelată în numeroase lucrări (vezi de ex. /4/).

Figura 4 reprezintă grafic diferența de curent raportată la puterea laser funcție de deplasarea t pentru trei valori ale parametrului a . S-a considerat sensibilitatea $S = 0,3 \text{ mA/mW}$ la lungimea de undă de 633 nm . Se observă o bună liniaritate în zona deplasărilor mici. O variație asemănătoare se obține și în cazul în care distribuția intensității fascicului laser ar fi uniformă /5,6/.

Este interesant de văzut care este influența separării metalurgice $2d$ asupra semnalului. Fig.5 arată variația curentului diferență raportată la puterea laser în funcție de separarea d pentru o deplasare $t = 0,05 \text{ mm}$ și trei valori ale parametrului "a". Așa cum era de așteptat, influența este semnificativă pentru valori mici ale dimensiunii fascicului. Din punct de vedere practic, pentru a evita variații de semnal date de modificarea parametrului "a" datorită condițiilor de propagare, este recomandabil să se lucreze cu fascicule

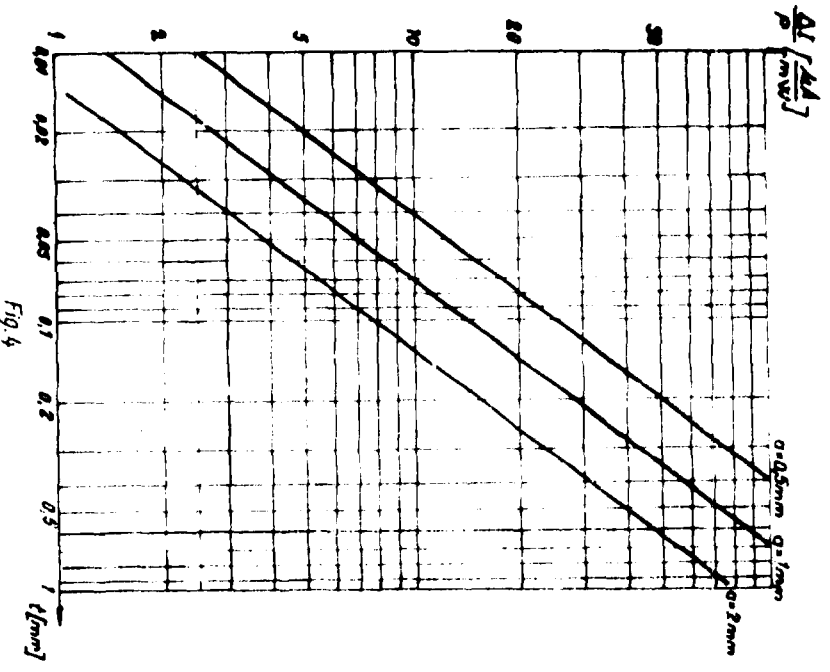
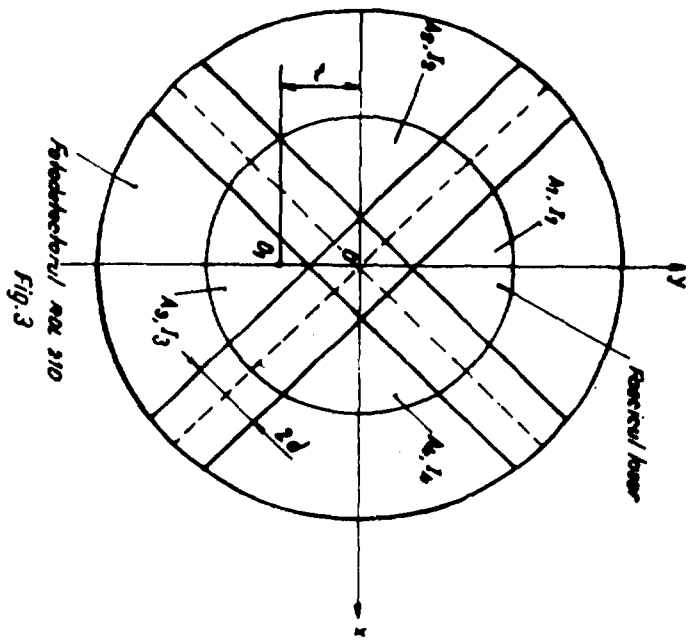
Explicatia figurilor

- Fig.1 - Timpul de crestere al celulei fotovoltaice ROL 5e functie de rezistenta de sarcina
- Fig.2 - Pulsuri cu durata de 2 ps detectate cu celula fotovoltaica ROL 5e. Scara de timp este 0,1 ns/div (sus) si 2 ps/div. (jos).
- Fig.3 - Geometria tipica pentru punerea in evidenta a unor deplasari mici
- Fig.4 - Diferenta de curent raportata la puterea laser pentru celula fotovoltaica ROL 21e pentru trei valori ale parametrului "a".
- Fig.5 - Diferenta de curent raportata la puterea laser functie de marimea separarii metalurgice
- Fig.6 - Diferenta de curent raportata la puterea laser functie de parametrul "a" al fasciculului laser
- Fig.7 - Variatia de curent functie de marimea deplasarii pentru diverse valori ale parametrului "a" al fasciculului laser.

rea aplicațiilor laserilor în economia națională. Au fost dezvoltate în același timp circuite speciale de cuplare cu fotodetectorii, care au exploatat la maximum posibilitățile acestora.

Bibliografie

1. V.Variliu, "Utilizarea echipamentelor cu laseri He-Ne în economia națională", Preprint IGEFIZ, LOP-42-1983
2. A.I.Ciura, "Aplicații ale laserilor în controlul nivelării terenurilor", Raport nepublicat
3. A.I.Ciura, A.Nițoiu, "Practical considerations on photo-detector sensitivity", Preprint IGEFIZ, LOP-20-1981
4. M.Tiron, "Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate", Editura Tehnică, București, 1972, pag.50-56 și Anexa 2
5. A.I.Ciura, A.Nițoiu, "Detector de centrare tip DA-1", Lucrare prezentată la sesiunea "Prezent și viitor în optica aplicată", București, 22-24 septembrie 1986
6. A.I.Ciura, "Calculul semnalului în instalații de centrare cu laseri", Sesiunea științifică "Progrese în Fizică", Galați 1986, pag.548



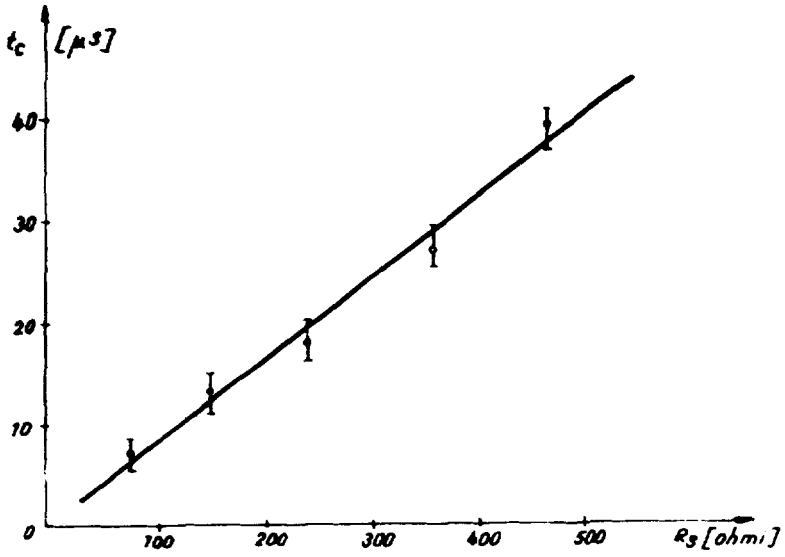


Fig.1

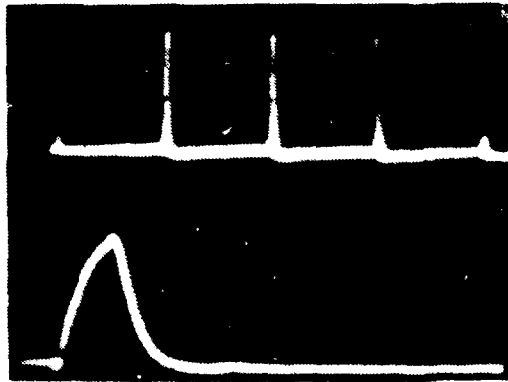
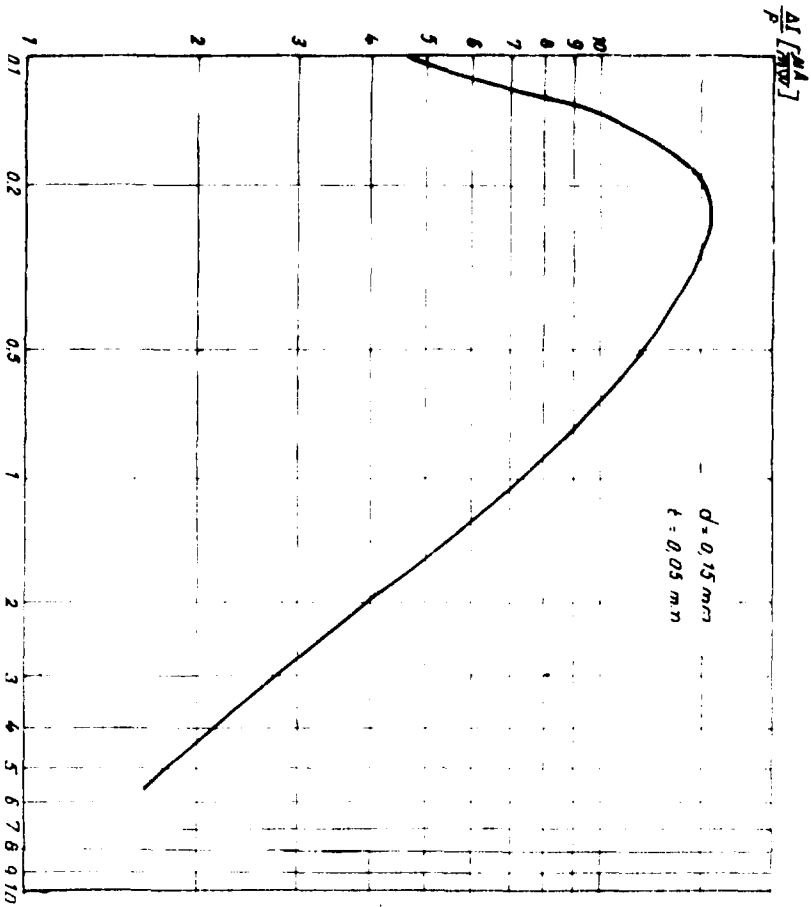


Fig.2



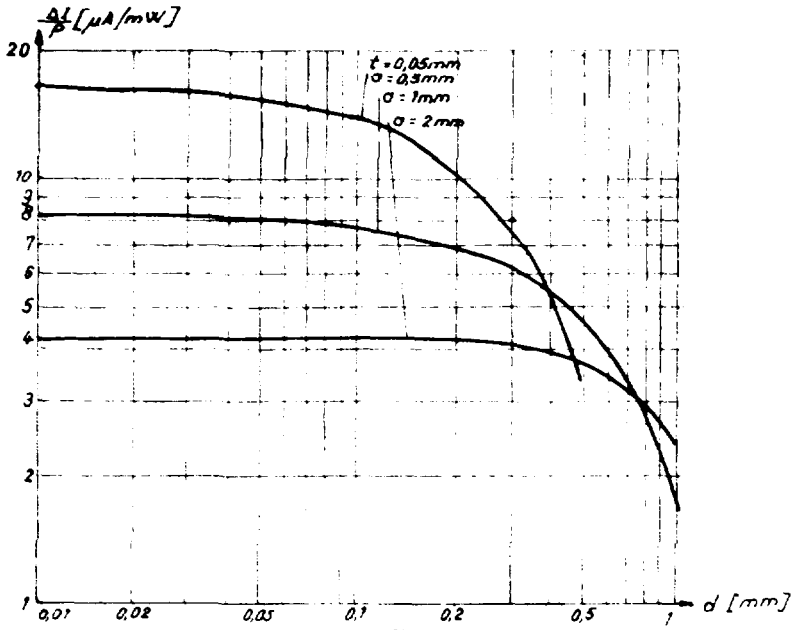


Fig. 5

Fig. 6

d [mm]

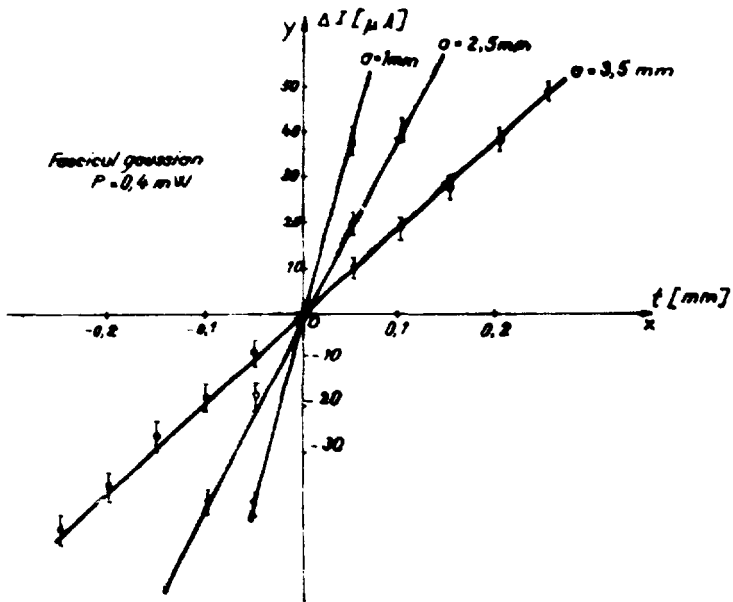


Fig 7