

RM 2001A000576

RIASSUNTO INVENTIONE CON DISEGNO PRINCIPALE

PROSPETTO A

NUMERO DOMANDA

REG. A

DATA DI DEPOSITO 24/09/2001

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO //

A. RICHIEDENTE(I)

1) Denominazione

2) Denominazione

D. TITOLO: APPARECCHIO PER LA RIPRODUZIONE DELLA FIGURA DI DIFFUSIONE DELLA LUCE DA CAMPIONI FOTOVOLTAICI

Classe proposta (sez./cl./scl)

(gruppo/sottogruppo)

L. RIASSUNTO

Un apparecchio per riprodurre, su lastra fotografica, la figura di diffusione, in riflessione o trasmissione, della luce da un campione piano (c;m), comprendente una sorgente (l) che produce un fascio di luce collimato, selezionato da un diaframma (d) e diretto verso una fotocamera (f) attraverso un otturatore a scatto manuale(o), detta fotocamera essendo costituita, nella sua parte anteriore, da una prima standarda (s1) su cui è montato un supporto (h1), per lastra fotografica (p), e, nella sua parte posteriore, da una seconda standarda (s2), unita alla prima standarda (s1) tramite un soffietto (s), e sulla cui faccia interna è montato il campione (c;m) che, allineato sull'asse ottico z, intercetta il fascio luminoso e determina la diffusione all'indietro per riflessione o in avanti per trasmissione della luce incidente, che viene raccolta, entro l'angolo solido Ω , dalla lastra fotografica (p), che rimane impressionata dalla luce per il tempo di esposizione t_0 , uguale al tempo d'apertura dell'otturatore (o), la fotocamera (f) essendo montata su un supporto a binario, provvisto di una serie di movimentazioni traslatorie e rotatorie che consentono di regolare la distanza ed il parallelismo tra campione e lastra ed il loro allineamento rispetto all'asse ottico del sistema.

M. DISEGNO

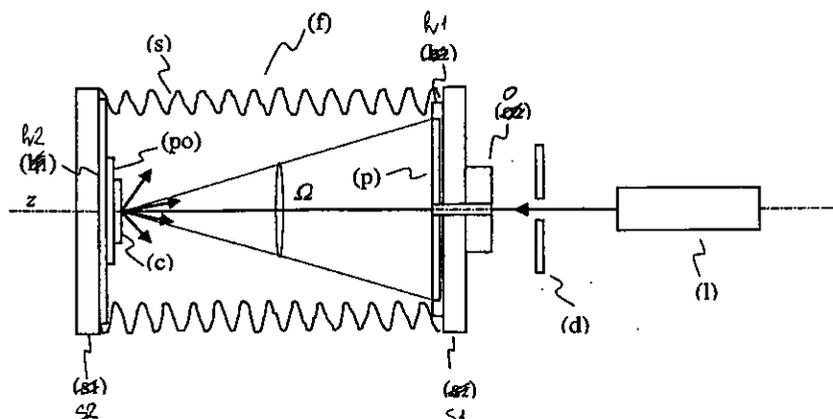


Fig. 1

C-01/14

DESCRIZIONE

a corredo di una domanda di brevetto per Invenzione Industriale avente per titolo:

“APPARECCHIO PER LA RIPRODUZIONE DELLA FIGURA DI DIFFUSIONE DELLA LUCE DA CAMPIONI FOTOVOLTAICI “

a nome: ENEA – Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

Inventori: PARRETTA Antonio e GRANATA Salvatore

La presente invenzione si riferisce in generale agli apparati ed ai metodi per la riproduzione fotografica dei processi d'interazione tra luce e materia e concerne in modo particolare un apparato ed un metodo per la riproduzione su lastra fotografica della figura di diffusione prodotta per effetto della riflessione di un fascio di luce sulla superficie di un campione semiopaco, oppure per effetto della trasmissione dello stesso fascio attraverso un campione semitrasparente. La figura di diffusione prodotta da un fascio di luce di lunghezza d'onda λ su di un campione piano costituisce una sorta di “impronta digitale” della superficie stessa, a quella specifica lunghezza d'onda. Tale figura dipende dalla morfologia superficiale del campione e dalla natura degli strati di materiale sottostante tale superficie, che sono coinvolti nel processo di assorbimento della radiazione e che condizionano il processo di diffusione.

Nel caso specifico dei materiali o dei dispositivi impiegati in campo fotovoltaico, tale figura di diffusione, studiata sia per il caso della

riflessione che per quello della trasmissione della luce, si dimostra uno strumento utile allo studio delle proprietà di raccolta della radiazione da parte del campione fotovoltaico. Superfici rugose, in generale, favoriscono una maggiore raccolta della luce, riducendo la riflessione totale in superficie per l'effetto combinato di riflessioni multiple, e favorendo il suo intrappolamento nel materiale. Il confronto, ad esempio, tra l'intensità della luce diffusa e quella della luce riflessa specularmente fornisce una stima qualitativa delle capacità del campione fotovoltaico di intrappolare la luce. In presenza di superfici fotovoltaiche strutturate, inoltre, quali possono essere quelle dotate di una tessitura superficiale regolare realizzata con processi fotolitografici, la figura di diffusione si presenta sotto la forma di una figura di diffrazione dalla quale, attraverso misure sulle distanze tra i massimi relativi di intensità presenti, si possono derivare informazioni sulla tessitura, quali le dimensioni del passo ed eventualmente anche le omogeneità spaziali delle strutture diffrangenti.

La fotocamera oggetto della presente invenzione costituisce un sistema utile e preciso per registrare, su un supporto di facile manipolazione e trasporto, le figure di diffusione di una qualsiasi superficie, comprese all'interno di un angolo solido Ω , regolabile entro ampi limiti. La registrazione della figura di diffusione su lastra fotografica fornisce, in prima istanza, una visione d'insieme, qualitativa, delle proprietà di diffusione della luce da parte del campione e, al contempo, consente di effettuare su di essa, previa un'opportuna procedura di calibrazione del contrasto sulla lastra, importanti misure quantitative.

L'immagine fotografica rappresenta poi un documento utile per la conservazione e la trasmissione delle informazioni di cui sopra. Essa, inoltre, può essere analizzata con sistemi di lettura digitale dell'immagine e riportata, come tabella di dati, su di un elaboratore al fine di analizzarla impiegando un opportuno software di analisi d'immagine.

Per brevità, nel seguito la figura di diffusione verrà richiamata col termine FDD (Figura Di Diffusione).

STATO DELL'ARTE PER IL SETTORE DELL'INVENZIONE

Non è disponibile attualmente un sistema per la riproduzione integrale della FDD di una superficie. La strumentazione esistente è rappresentata da "scatteroscopi" (vedi Figura 4) che permettono di fare un'analisi discreta, punto per punto, della FDD. Il fascio luminoso del laser (l) è inviato direttamente sul campione (c) e la luce riflessa, o diffusa nelle varie direzioni, individuate dall'angolo di riflessione α e di azimut ϕ , viene misurata dal rivelatore (r), comunemente un fotodiode, letto dal voltmetro (v). Il fotodiode (r) è posto ortogonalmente al raggio diffuso, individuato dal vettore r . Per costruire la FDD è necessario allora spostare il rivelatore (r) nelle varie direzioni spaziali, cambiando l'angolo α da 0° a 90° e l'angolo ϕ da 0° a 360° , mantenendo costante la distanza r . L'angolo di azimut ϕ è individuato dall'orientazione del piano (r, z), ortogonale alla superficie del campione, attorno all'asse ottico z . Nel caso di un campione isotropo la FDD potrà essere costruita variando solo l'angolo α e fissando un qualsiasi valore per l'angolo ϕ . La FDD così costruita può essere eventualmente proiettata su un piano

ortogonale all'asse z . In Figura 5 è mostrata la FDD di un campione di silicio cristallino la cui superficie è stata testurizzata isotropicamente. La sua costruzione ha comportato la raccolta di 425 dati ottenuti per variazioni angolari di 10° sulla longitudine e di 5° sulla latitudine, secondo lo schema indicato in Figura 6. La costruzione della FDD a partire dallo schema di Figura 4 necessita sempre di un certo numero di misure di radiazione, che può variare in funzione della risoluzione richiesta e a seconda che il campione sia isotropo o meno, rispetto a rotazioni attorno all'asse ortogonale alla sua superficie. In quest'ultimo caso, le misure in funzione dell'angolo di riflessione α dovranno essere moltiplicate per il numero dei valori prescelti per l'angolo di azimut ϕ . La risoluzione delle misure, inoltre, presenterà un limite preciso dovuto alle dimensioni finite del rivelatore (r). Per dimensioni lineari tipiche del rivelatore (r) intorno a 1.0 cm e per una distanza $r \approx 20$ cm, la risoluzione del sistema diventa di $\approx 3^\circ$. Essa può essere accettabile qualora si esaminino campioni non strutturati, ovvero non testurizzati regolarmente, ma diventa inaccettabile qualora si vogliano apprezzare le particolarità di una figura di diffrazione prodotta da strutture micrometriche. In Figura 7 è riportato lo schema di una struttura regolare, con passo Δs lungo una direzione parallela alla sua superficie, investita perpendicolarmente da un fascio parallelo di luce di lunghezza d'onda λ . La struttura regolare produrrà un primo massimo di diffrazione in corrispondenza ad un valore dell'angolo di osservazione α misurato a partire dalla direzione del fascio incidente, che si ricava dalla relazione di Bragg:

$$\Delta s \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda \quad (1)$$

Un esempio pratico di struttura micrometrica regolare è mostrato in Figura 8. Si tratta di una cella solare realizzata formando, sulla superficie di silicio, delle strutture micrometriche regolari a forma di piramidi invertite a base quadrata, allo scopo di aumentare l'efficienza di raccolta della luce. Le piramidi di Figura 8 sono state realizzate con un lato della base di circa 10 μm .

Sulla base di questo esempio pratico, si può quindi considerare una tipica struttura regolare diffrangente con un passo $\Delta s \approx 10 \mu\text{m}$. Scegliendo, come lunghezza d'onda, $\lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$ (luce verde), prossima al picco d'intensità della radiazione solare, la Eq. (1), per $k = 1$, fornisce:

$$\arcsin \alpha = \lambda / \Delta s \approx 0.05 \quad (2)$$

da cui si ricava che, stabilita una distanza tra campione e rivelatore di circa 20 cm, è richiesto un rivelatore con dimensioni lineari al di sotto di 1.0 cm, contrariamente a quanto generalmente si dispone in pratica. Per superare le limitazioni presentate dalla strumentazione esistente è necessario quindi progettare strumenti nuovi che consentano di misurare la FDD con alta risoluzione angolare. Una via possibile, dimostrata dalla presente invenzione, è quella di riprodurre, con tecnica fotografica, la FDD proiettata su un piano ortogonale all'asse ottico del sistema, oppure su una superficie cilindrica avente un asse passante per il punto di diffusione ed ortogonale all'asse ottico z. In tal caso si possono sfruttare tutte le potenzialità di una riproduzione fotografica che attualmente presenta una risoluzione di 100 - 1000 linee per millimetro, in relazione alla sensibilità ed al tipo di emulsione.

Per effettuare misure quantitative a partire dalla lastra impressionata, cioè dal negativo, bisognerà tenere conto dei limiti di linearità intrinseci al processo fotografico. Operando in modo che l'annerimento della lastra cada sempre all'interno della regione lineare del diagramma contrasto/intensità di luce incidente, sarà possibile effettuare realmente misure quantitative di luce diffusa. Ciò richiede, come già detto, una calibrazione della fotocamera con fasci di prova di intensità controllata, inviati ad angoli di incidenza variabili sulla lastra, allo scopo di determinare l'influenza da parte della riflettività della lastra sul contrasto prodotto una volta che essa sia stata sviluppata. La fotocamera illustrata nella presente invenzione costituisce quindi un'innovazione tecnologica nello studio della FDD di una superficie.

SOMMARIO DELL'INVENZIONE.

Oggetto specifico della presente invenzione è un apparecchio per la riproduzione, su lastra fotografica, della figura di diffusione, in riflessione o trasmissione, della luce da parte di un campione piano, comprendente una sorgente che produce un fascio di luce collimato, selezionato da un diaframma e diretto verso una fotocamera attraverso un otturatore a scatto manuale (semiautomatico), detta fotocamera avendo una parte anteriore ed una parte posteriore ed essendo costituita, nella sua parte anteriore, da una prima standarda su cui è montato un supporto, o "chassis", per lastra fotografica, e, nella sua parte posteriore, da una seconda standarda, unita alla prima standarda tramite un soffietto, e sulla cui faccia interna è montato il campione che, allineato sull'asse ottico z, intercetta il fascio luminoso e determina la

diffusione all'indietro per riflessione o in avanti per trasmissione della luce incidente, che viene raccolta, entro l'angolo solido Ω , dalla lastra fotografica, la quale rimane impressionata da detta luce per il tempo di esposizione t_0 , uguale al tempo d'apertura dell'otturatore, la fotocamera essendo montata su un supporto a binario, fissabile su un banco ottico, provvisto di una serie di movimentazioni che consentono la traslazione indipendente delle due standard e quindi del campione e della lastra lungo l'asse z e lungo le due direzioni ortogonali ad esso, nonché la rotazione indipendente delle due standard attorno a due assi ortogonali tra loro e all'asse ottico z , in modo tale da regolare la distanza ed il parallelismo tra campione e lastra ed il loro allineamento rispetto all'asse ottico del sistema.

Per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano di piccole dimensioni in riflessione, detta sorgente di luce e detto diaframma nonché detto otturatore sono disposti sul davanti della parte anteriore della fotocamera ed il complesso dell'otturatore, della prima standard e della lastra fotografica con relativo supporto è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce, detto campione essendo portato da un portacampione montato su un supporto fissato a detta seconda standard all'interno della fotocamera.

Per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano di grandi dimensioni, in riflessione, detta sorgente di luce e detto diaframma e detto otturatore sono disposti sul davanti della parte anteriore della fotocamera ed il complesso dell'otturatore, della

prima standarda e della lastra fotografica con relativo supporto è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce, detta fotocamera è estensibile tramite un secondo soffietto applicato a detta seconda standarda per prolungare l'asse ottico fino al punto di misura desiderato e detto campione di grandi dimensioni è giustapposto al fondo della fotocamera estensibile.

Per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano di piccole dimensioni in trasmissione, detta sorgente di luce e detto diaframma nonché detto otturatore sono disposti sul retro della parte posteriore della fotocamera, detto campione è portato da un portacampione montato su un supporto fissato a detta seconda standarda all'interno della fotocamera ed il complesso dell'otturatore, della seconda standarda e del portacampione con relativo supporto è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce.

Ulteriori particolarità e vantaggi della presente invenzione appariranno evidenti dal seguito della descrizione con riferimento ai disegni allegati, in cui è rappresentata a titolo illustrativo e non restrittivo la preferita forma di realizzazione.

Nei disegni:

la Figura 1 mostra uno schema dell'apparato CARDIFF a lastra piana, nella configurazione per misure della FDD (Figura Di Diffusione) in riflessione su piccoli campioni,

La Figura 1A mostra uno schema che rappresenta un raggio luminoso che, partendo dal punto (0) sul campione (c), incide sul punto

(P) della lastra (l) ad un angolo di incidenza α dopo aver percorso il tratto r ,

la Figura 2 mostra un apparato CARDIFF a lastra piana, nella configurazione per la misura della FDD in riflessione su grandi campioni ed evidenzia che il campione (m) è posto a contatto col soffietto supplementare (ss), che serve a prolungare la fotocamera,

la Figura 3 mostra lo schema di un apparato CARDIFF a lastra piana, nella configurazione per misure di FDD in trasmissione, nella quale si evidenzia che la sorgente di luce (l) si trova ora dalla parte opposta della fotocamera (f),

la Figura 4 schematizza la misura della FDD eseguita in maniera discreta utilizzando uno strumento chiamato "scatteroscopio", in cui il rivelatore (r) viene mosso davanti al campione illuminato, mantenendolo sempre alla stessa distanza e sempre orientato verso di esso,

la Figura 5 mostra la Figura Di Diffusione di un campione di silicio testurizzato isotropicamente, ottenuta seguendo lo schema di misura della Figura 4,

la Figura 6 schematizza la posizione del punto di misura, in coordinate geografiche (longitudine, latitudine), durante la costruzione della FDD mediante uno scatteroscopio secondo la Figura 4,

la Figura 7 mostra una struttura regolare di passo Δs che produce, secondo il fenomeno della diffrazione, dei massimi di intensità in corrispondenza all'angolo α dato dalla relazione di Bragg: $\Delta s \cdot \sin \alpha = k \cdot \lambda$,

la Figura 8 mostra la superficie di una cella solare al silicio cristallino, testurizzata con piramidi invertite regolari a base quadrata, formanti una struttura a "scacchiera" di passo $\sim 10 \mu\text{m}$,

la Figura 9 mostra lo schema di principio della fotocamera CARDIFF a lastra piana (a) confrontato con quello di una normale fotocamera a rifrazione (b),

la Figura 10 mostra la vista laterale di un esempio di fotocamera CARDIFF a lastra piana montata su banco ottico e realizzata modificando una fotocamera commerciale di precisione,

la Figura 11 mostra la standarda (s1) su cui è montato il campione nella fotocamera CARDIFF a lastra piana della Figura 10: si nota la manopola di traslazione verticale (n1) e la "bolla" (b1) che stabilisce la verticalità della standarda (s1),

la Figura 12 mostra in a) la parte estraibile della standarda (s2) (o "chassis") della fotocamera CARDIFF della Figura 10, vista dalla parte in cui si affaccia la pellicola (p), nonché il foro (fo) praticato sulla pellicola, ed in b) la parte della standarda (s2) vista dalla parte dell'otturatore (o2), esterna alla fotocamera,

la Figura 13 mostra in a) i movimenti di traslazione della standarda nella fotocamera CARDIFF a lastre piane di Figura 10 ed in b) i movimenti di rotazione della standarda,

la Figura 14 mostra in a) uno schema di fotocamera CARDIFF a lastra cilindrica, vista dall'alto, in cui tutta la luce diffusa sul piano orizzontale ($\phi = 0^\circ$) viene raccolta dalla lastra fotografica (angolo di

riflessione α nell'intervallo da -90° a $+90^\circ$) ed in b) una vista posteriore della fotocamera,

la Figura 15 mostra la Figura Di Diffrazione (FDD) di un campione di silicio monocristallino testurizzato secondo uno schema regolare, a reticolo quadrato, di piramidi invertite a base quadrata, con fascio di luce su griglia,

la Figura 16 mostra la Figura Di Diffrazione di un campione simile a quello di Figura 15, con fascio di luce su silicio,

la Figura 17 mostra la Figura Di Diffrazione di un campione di silicio monocristallino testurizzato secondo uno schema regolare, a reticolo esagonale, di buche semisferiche, con fascio di luce su silicio,

la Figura 18 mostra la Figura Di Diffusione di un campione di silicio policristallino testurizzato secondo uno schema randomico di piramidi dritte a base quadrata, di dimensioni randomiche, con fascio di luce su silicio,

la Figura 19 mostra la Figura Di Diffusione di un campione di silicio monocristallino ricoperto di uno strato di silicio poroso, con fascio di luce su silicio.

Nella Figura 1 è riportato un esempio di schema molto semplificato della fotocamera nella configurazione relativa all'analisi, in riflessione, di piccoli campioni. Lo schema di Figura 1 è solo un esempio di come può presentarsi una fotocamera per la registrazione della figura di diffusione di un campione piano. Esso non è esaustivo delle possibilità introdotte con la presente invenzione, la quale, oltre alla possibilità di impiego di apparecchi di ripresa diversi dalle fotocamere,

per esempio telecamere CCD o simili, intende includere qualsiasi altra configurazione che si basi comunque sullo stesso principio descritto in questa invenzione, ovvero che un fascio di luce collimato, raggiunga un campione opaco dal quale è retrodiffusa ed impressioni la lastra stessa. Anche se nella Figura 1 è stato omissso, la fotocamera opera tipicamente sul piano di un banco ottico ed è corredata di un meccanismo per il suo fissaggio sul banco e per la movimentazione delle sue diverse parti.

Il fascio collimato di luce di lunghezza d'onda λ , proveniente dalla sorgente laser (l) e diretto lungo l'asse ottico z, attraversa dapprima l'otturatore (o), col quale si stabilisce il tempo di esposizione t_0 del processo, poi la lastra fotografica (p), opportunamente forata al centro e alloggiata nel supporto (h1), o "chassis", a sua volta agganciato alla standarda (s1), per arrivare infine al campione (c) fissato al centro di un portacampioni (po), montato su un supporto (h2) fissato alla standarda (s2). La luce diffusa dal campione (c) ad alti angoli intercetta il soffietto (s) ed è qui assorbita, non interferendo nel processo, mentre la porzione di essa compresa nell'angolo solido Ω , definito dalla distanza tra le due standarde (s1) e (s2) e dalla superficie della lastra fotografica (p), raggiunge la lastra stessa impressionandola per il tempo di esposizione t_0 . Sulla lastra (p) rimarrà quindi impressionata la proiezione su un piano ortogonale all'asse ottico della figura di diffusione del campione. Il soffietto (s) ha la funzione di mantenere oscurata la fotocamera, ma pone un limite fisico sia alla distanza tra le due standarde che all'angolo tra di esse compreso,

qualora non si operi in condizioni di parallelismo tra le stesse. Operando sulla standarda (s2) è possibile variare l'angolo di incidenza θ che il fascio di luce forma con la normale alla superficie del campione (c). Variando la distanza tra campione (c) e lastra (p) è possibile poi variare l'angolo solido entro cui è raccolta la luce diffusa. In particolare, riducendo al minimo consentito la distanza tra (c) e (p), è possibile raccogliere la maggior parte della luce diffusa dal campione. Tale condizione, che comporta l'esposizione della lastra a luce radente, può dare origine ad una certa indeterminazione sulla valutazione dell'intensità dei fasci diffusi corrispondenti. Questo problema potrà essere limitato adottando un diverso disegno della fotocamera, nella quale il supporto della lastra sia sagomato in forma semicircolare, come già descritto nella Figura 14. Ma la soluzione definitiva al problema viene data operando una calibrazione del contrasto sulla lastra fotografica, effettuata variando l'angolo di incidenza del fascio di luce sulla lastra e misurando il corrispondente contrasto.

Al momento dell'analisi della lastra (p) sviluppata, si dovrà tenere conto dei seguenti parametri di carattere geometrico e fisico, che condizionano, in maniera differenziata da punto a punto, il contrasto in bianco/nero dell'immagine prodotta sulla lastra (vedi Figura 1A):

- i) distanza r tra (O), origine della diffusione, e punto (P) sulla lastra;
- ii) angolo di incidenza α del raggio diffuso raccolto sul punto (P);

iii) fattore di riflessione della lastra fotografica in corrispondenza all'angolo di incidenza α , alla lunghezza d'onda λ e al tempo di esposizione t_0 .

La densità luminosa assorbita dalla lastra (p) nel punto (P) sarà allora una funzione dei parametri suddetti secondo la seguente espressione:

$$G_{abs}(d, \alpha, \lambda) = const. \frac{1}{r^2} \cdot \cos \alpha \cdot [1 - R(\alpha, \lambda)] \quad (3)$$

$$G_{abs}(d, \alpha, \lambda) = const. \frac{1}{d^2} \cdot \cos^3 \alpha \cdot [1 - R(\alpha, \lambda)] \quad (3')$$

Avendo posto $r = d / \cos \alpha$ ed avendo specificato la dipendenza del fattore di riflessione dalla lunghezza d'onda luminosa. Le espressioni (3) e (3') valgono naturalmente a parità di irradianza diffusa incidente, come specificato attraverso l'introduzione della costante $const$. Le espressioni (3) e (3') sono espressioni semplificate che non tengono conto del fatto che, durante l'esposizione della lastra, questa viene modificata chimicamente e quindi il suo fattore di riflessione diventa anche una funzione del tempo t , dove $0 \leq t \leq t_0$ e t_0 è il tempo di esposizione. Per maggior precisione, quindi, si dovrà scrivere:

$$G_{abs}(d, \alpha, \lambda, t) = const. \frac{1}{d^2} \cdot \cos^3 \alpha \cdot [1 - R(\alpha, \lambda, t)] \quad (4)$$

e da questa ricavare una irradianza assorbita media:

$$\bar{G}_{abs}(d, \alpha, \lambda, t_0) = const. \frac{1}{d^2} \cdot \cos^3 \alpha \cdot [1 - \bar{R}(\alpha, \lambda, t_0)] \quad (5)$$

mediando il fattore di riflessione della lastra nell'intervallo temporale $0 - t_0$.

Per distanze molto ravvicinate tra campione (c) e lastra (p), si dovrà allora tenere conto della forte influenza che avrà il termine $\cos^3 \alpha$ sulla esposizione del negativo, oltre che sul fattore di riflessione, che molto verosimilmente aumenterà con l'aumentare dell'angolo di incidenza α .

Nella Figura 2 è riportato lo schema dell'apparato nella configurazione per la misura della FDD di un campione (m) di grosse dimensioni, ad esempio un modulo fotovoltaico (FV). Per questa applicazione, la fotocamera dovrà essere leggermente modificata dalla parte della standarda (s2). Verrà rimosso il supporto (h2) su cui è fissata la piastra portacampione (po) e sulla standarda (s2) verrà innestato un soffietto supplementare (ss) che ha la funzione di prolungare l'asse ottico fino al punto di misura stabilito sul campione (m). Le modalità di misura rimangono invariate. Per effettuare misure su grandi campioni, la fotocamera dovrà essere traslata lungo il banco ottico e posta in prossimità del suo bordo, in modo da poter arrivare, con il soffietto (ss), fino al modulo (m) fissato su una struttura separata dal banco ottico stesso.

L'apparato descritto, con minime modifiche, può essere configurato per misure di diffusione in trasmissione (vedi Figura 3). La sorgente di luce (l) verrà montata dalla parte opposta rispetto alla fotocamera (f). Sulla standarda (s2) sarà adesso montato anche l'otturatore (o) che dovrà consentire l'ingresso del fascio dalla parte del campione. Sul portacampione (po) verrà ora montato un campione (c) semitrasparente. Il resto della fotocamera rimarrà invariato.

DESCRIZIONE TECNICA DETTAGLIATA DELL'INVENZIONE

Fotocamera

Verrà descritta nel seguito l'apparecchiatura configurata per misure di FDD in riflessione su piccoli campioni.

Il principio su cui si basa il funzionamento della fotocamera a riflessione, nel seguito indicata con il termine CARDIFF (acronimo di "CAmera per la Riproduzione della Figura di DIFFusione o DIFFrazione"), è schematizzato in Figura 9(a) ed è confrontato, in Figura 9(b), con quello di una normale fotocamera a rifrazione. In Figura 9(b), l'oggetto (r) è esterno alla fotocamera (f) e produce una immagine (i) sul fondo della stessa, dove è posta la lastra fotografica (p). In Figura 9(a), invece, l'oggetto reale (r) è posto sul fondo della fotocamera (f) e la figura di diffusione viene riprodotta sulla parte frontale della stessa, dove è posta la pellicola fotografica (p). Mentre in Figura 9(b) esiste una distanza precisa, d , a cui mettere a fuoco l'oggetto esterno, in Figura 9(a) non esiste una distanza focale e la FDD può essere intercettata a qualsiasi distanza tra (r) ed (f). In Figura 9(b) la fotocamera riproduce, capovolta, l'immagine di un oggetto reale attraverso l'ottica rifrattiva (o), mentre in Figura 9(a) viene riprodotta la trasformata di Fourier della struttura superficiale dell'oggetto (r), come è ben deducibile dalle considerazioni fatte commentando la Figura 7.

Il disegno completo della fotocamera a lastra piana montata su banco ottico è mostrato in Figura 10 in vista laterale. Essa può essere realizzata modificando opportunamente una fotocamera commerciale a banco ottico. In quest'ultimo caso essa dovrà essere corredata di tutte

le movimentazioni necessarie a realizzare con accuratezza l'esposizione su lastra fotografica della FDD. Un binario (b) è fissato sul banco ottico (bo). Su di esso sono montate due slitte, (t1) e (t2), muovendo le quali si stabilisce la distanza tra le due standarde (s1) e (s2), e quindi la distanza d tra campione (c) e lastra (p) posti all'interno della fotocamera (f). Ciascuna slitta è provvista, nella parte superiore, di una cremagliera, su cui scorrono, con movimento fine, i supporti (p1) e (p2) delle rispettive standarde. I supporti possono essere traslati finemente e bloccati lungo l'asse ottico tramite le manopole (m1) ed (m2). Essi sono inoltre dotati di altre manopole che servono a traslare finemente le standarde lungo i due assi ortogonali all'asse ottico, ovvero a permettere traslazioni in senso orizzontale e verticale, mantenendo inalterata la distanza tra i piani su cui giacciono le due standarde. I movimenti testé descritti vengono denominati, nella terminologia dell'arte fotografica, movimento di decentramento orizzontale e movimento di decentramento verticale, rispettivamente. Nella Figura 11 è mostrato il particolare della standarda (s2) corrispondente al campione (c). La manopola (n2) opera il decentramento verticale, mentre il decentramento orizzontale è operato con le manopole che si trovano nel blocco sottostante la standarda. La standarda (s2) è costituita da una parte fissa a forma di "U", solidale con la piastra (p2), su cui è fissata una "bolla" di livellamento (b2) che indica la verticalità della standarda, e da una parte mobile a forma di cornice (c2), scorrevole verticalmente tramite la manopola (n2) su cui è presente anche una manopola di blocco. Sulla cornice mobile della standarda

viene fissata la piastra (h2). Questa potrà essere forata nel modo più opportuno per fissare al suo centro una piastra portacampioni (po) su cui sarà a sua volta fissato il campione (c) in misura. La piastra (h2) potrà essere dotata di una piccola serranda per bloccarla in una posizione precisa sulla parte mobile della standarda (s1). La standarda portapellicola (s1) è anch'essa formata da una parte fissa a forma di "U" e da una parte mobile. La parte mobile, estraibile, è costituita da un contenitore (o "chassis") che porta insieme la pellicola (p) e l'otturatore (o) (vedi Figura 12). Lo "chassis" è costituito da una cornice sulla quale è inserito un feltro che ha lo scopo di impedire l'ingresso della luce nella fotocamera attraverso le parti scorrevoli della standarda. Un filtro analogo è presente anche nella standarda (s2). La parte dello "chassis" interna alla fotocamera è mostrata in Figura 12(a). Agendo sulla presa (pr) si estrae un "volet" (v) che serve a liberare il foro (fo), del diametro di circa 10 mm, per il passaggio del raggio luminoso. In Figura 12(b) è mostrato l'altro lato dello "chassis", esterno alla fotocamera (f), su cui è montato l'otturatore (o), comandato dalla leva di armamento (a) e dalla leva di scatto (sc), e impostato dalla ghiera dei tempi (g). Tipicamente si possono impostare tempi tra 1/500" e 1". L'otturatore è poi dotato di due funzioni per l'apertura manuale delle lamelle (la): una funzione "B" in cui l'otturatore rimane aperto per tutto il tempo in cui è premuta la leva (sc) ed una funzione "T" in cui la leva (sc) deve essere azionata due volte, sia per l'apertura che per la chiusura dell'otturatore.

Oltre ai movimenti di traslazione descritti, le due standarde sono provviste di due movimenti detti di "basculaggio", che

corrispondono ad una rotazione della standarda attorno ad un asse verticale e ad una rotazione attorno all'asse orizzontale, perpendicolare all'asse ottico. In Figura 13 sono riassunte tutte le movimentazioni cui possono essere sottoposte le due standarde, La rotazione attorno ai due assi serve a trovare il parallelismo tra le due standarde e l'ortogonalità di entrambe rispetto all'asse ottico.

In Figura 14 è mostrata una diversa configurazione della fotocamera, nella quale il supporto della lastra fotografica è realizzato in forma cilindrica e la lastra ricopre tutta una semicirconferenza. Questa configurazione consente una maggiore raccolta di luce diffusa in condizioni di perpendicolarità sulla lastra, rispetto al caso della lastra piana. Essa, infatti, raccoglie sul piano orizzontale luce diffusa perpendicolare alla lastra tra -90° e $+90^\circ$ di angolo di riflessione (vedi Figura 14(a)). La luce diffusa, contenuta su piani diversi da quello orizzontale, viene raccolta entro un angolo che dipende dal raggio di curvatura R della lastra (ovvero dalla sua lunghezza, πR) e dalla sua altezza, h .

Immaginando di ruotare di un angolo ϕ il piano orizzontale, contenente l'asse z , attorno all'asse z stesso (vedi Figura 14(b)), si avrà che, per $\phi < \phi' = \tan^{-1} (h/2R)$, sarà raccolta luce diffusa da -90° a $+90^\circ$ rispetto alla normale al campione. Per angoli $\phi > \phi'$, l'angolo di raccolta della luce diffusa diminuirà fino a diventare pari ad $\alpha = \pm \tan^{-1} (h/2R)$ in corrispondenza all'angolo $\phi = 90^\circ$.

Materiale fotografico

L'esposizione fotografica della FDD richiede l'uso di opportune lastre fotografiche o pellicole. Esse debbono essere preventivamente forate al centro. Il materiale fotografico da impiegare dipende naturalmente dalla lunghezza d'onda e dall'intensità della luce diffusa sulla lastra. Quest'ultima, naturalmente, dipende dall'intensità della sorgente impiegata, oltre che dalla riflettività del campione in esame. Anche i tempi di esposizione dipendono dai parametri suddetti. Per lunghezze d'onda dell'ordine di 400-580 nm (blu-verde-giallo), si può usare una pellicola "ortocromatica", mentre per luce rossa ($\lambda > 580$ nm) occorre usare carta "pancromatica".

Procedura di misura

Verrà descritta ora la procedura per la registrazione della FDD in riflessione di un campione di piccole dimensioni, illuminato con un laser CW (Continuous Wave = onda continua). Si faccia riferimento, a tale proposito, alle Figure 1, 10, 11 e 12. Le operazioni che precedono la misura della FDD consistono in:

i) allineamento del laser (l) rispetto all'asse ottico della fotocamera. Si utilizzerà in tal caso il sistema di movimentazione fine di cui dovrà essere provvisto il sostegno del laser. La luce laser, prima di raggiungere la fotocamera (f), attraversa un piccolo foro ("pinhole") ($d < 1$ mm) nel diaframma (d) che elimina le parti divergenti del fascio. L'uso di un "pinhole" con $d = 1$ mm produrrebbe, alla distanza di 200 mm, delle frange di interferenza spaziate di circa 0.1 mm, che potrebbero, in alcune circostanze, non costituire un particolare disturbo alla FDD;

ii) bloccaggio del portacampioni (po) sulla piastra (h2) della standarda (s2);

iii) allineamento preliminare delle due standarde, agendo sulle manopole per la traslazione ed il basculaggio, riferendosi alle varie bolle e scale graduate. Un allineamento preciso tra le due standarde, ovvero il controllo di verticalità, parallelismo reciproco e ortogonalità di entrambe rispetto all'asse ottico, sarà effettuato impiegando una opportuna lastra smerigliata e forata, che verrà fissata sulla standarda (s1) al posto dello "chassis".

Durante l'allineamento della fotocamera, in ambiente buio, si osserverà, sulla lastra smerigliata, l'immagine del raggio riflesso speculare del campione (c) e si regolerà l'orientazione delle due standarde, al fine di avere il raggio speculare perfettamente allineato con l'asse ottico. Tenendo conto, però, che il foro sulla pellicola impedisce di vedere il raggio speculare quando questo è perfettamente allineato all'asse ottico, si potranno regolare le standarde in modo da spostare il raggio speculare leggermente fuori dall'asse ottico, qualora si sia interessati proprio ad osservare le particolarità della riflessione speculare e/o della radiazione diffusa nelle sue immediate vicinanze. Nel caso in cui il campione (c) non produca un riflesso speculare, esso sarà momentaneamente sostituito, nell'operazione di allineamento, da uno specchietto.

Una volta che la camera fotografica e la sorgente siano state allineate come desiderato, si oscurerà la fotocamera montando il soffietto (s) e si procederà alla misura vera e propria della FDD.

Servendosi di una camera oscura portatile (sacco nero), nello "chassis" verrà caricata una pellicola forata, che andrà a sostituire la lastra smerigliata. Verrà estratto il "volet" (v) dallo "chassis", in modo da liberare il foro centrale (fo) per il passaggio della luce. Agendo sulla ghiera (g) dell'otturatore (o), si stabilirà il tempo di esposizione. Si armerà l'otturatore agendo sulla leva di armamento (a) e si esporrà poi la camera alla luce agendo sulla leva dello scatto (sc). Una volta chiuso il "volet" (v) dello "chassis", si estrarrà quest'ultimo dalla standarda (s1) e lo si porterà all'interno della camera oscura portatile, dove la pellicola esposta verrà sostituita con una nuova, ripetendo le operazioni sin qui descritte.

Risultati relativi all'esposizione di vari campioni fotovoltaici

Il prototipo di fotocamera CARDIFF a lastre piane, realizzato secondo gli schemi delle Figure 1 - 3 e di cui sono riportati i dettagli nelle Figure 10 - 12, è stato collaudato ed impiegato, insieme ad un laser He-Ne con lunghezza d'onda $\lambda = 633 \text{ nm}$ e potenza $P \approx 25 \text{ mW}$, per riprodurre la luce diffusa da diversi campioni fotovoltaici prototipali. I campioni esaminati erano sia di piccole dimensioni (celle e substrati), ed in tal caso è stato adottato lo schema di Figura 1, oppure di grosse dimensioni (moduli fotovoltaici), e in tal caso è stato adottato lo schema di Figura 2. Non sono riportate in questa descrizione prove di riproduzione della luce diffusa, per trasmissione, da parte di campioni semitrasparenti, essendo tali prove concettualmente e sperimentalmente simili a quelle svolte in condizioni di diffusione per riflessione.

I campioni sono stati selezionati per rappresentare una varietà di strutture superficiali, o testurizzazioni, tutte finalizzate all'aumento dell'efficienza di raccolta della luce incidente, ovvero alla diminuzione delle perdite ottiche del dispositivo. Sono stati esaminati i seguenti tipi di campioni fotovoltaici: i) celle solari di piccole dimensioni, provviste di griglia metallica in superficie; ii) moduli prototipali realizzati con una molteplicità di queste celle e provvisti di una copertura frontale in vetro o in polimero; iii) substrati di silicio opportunamente testurizzati. In Tabella 1 sono riportati tutti i campioni esaminati con la fotocamera CARDIFF. I tipi di testurizzazione esaminati sono stati:

i) testurizzazione a piramidi invertite a base quadrata, disposte regolarmente sulla superficie a formare una struttura a scacchiera [1]; questa testurizzazione ha dato luogo alle figure di diffrazione mostrate nelle Figure 15, 16. In queste figure e nelle seguenti, le zone più scure della FDD corrispondono a zone di maggiore intensità di luce diffusa.

ii) Testurizzazione a buche semisferiche, disposte regolarmente sulla superficie secondo una struttura esagonale [2]. Anche questo tipo di testurizzazione ha prodotto figure di diffrazione: una di esse è mostrata in Figura 17.

iii) Testurizzazione a piramidi dritte randomizzate, sia nella dimensione che nella posizione sulla superficie. Questo tipo di testurizzazione, come previsto, non ha dato luogo a diffrazione per effetto della randomizzazione nella posizione delle piramidi, ma ha prodotto riflessi particolari dovuti alla comune orientazione delle facce delle piramidi lungo determinate direzioni spaziali. In pratica, le faccette delle piramidi

si comportano come quattro campi di specchi, ognuno orientato in una direzione precisa. La figura di diffusione corrispondente a questa testurizzazione è mostrata in Figura 18.

iv) Testurizzazione con strati di silicio poroso. Il silicio poroso presenta una superficie irregolare di dimensioni nanometriche e ha la proprietà di diffondere in maniera isotropa la luce incidente, come è stato già dimostrato (vedi Figura 5). La figura di diffusione ricavata con la fotocamera CARDIFF su questo tipo di campioni è mostrata in Figura 19.

Caratteristica comune di tutti questi dispositivi è il fatto che la superficie presenta una serie continua di sfaccettature, regolari o randomizzate, indispensabile per intrappolare al meglio la luce incidente. Conseguenza di ciò è che la luce riflessa o diffusa da queste superfici si disperde all'indietro in varie direzioni, contrariamente a quanto succede in una superficie piana in cui l'unico raggio riflesso è diretto in una sola direzione, quella speculare. La lastra fotografica esposta alla loro luce retrodiffusa, quindi, rimane impressionata praticamente su tutta la sua superficie. Negli esperimenti discussi, sono state utilizzate pellicole commerciali Kodak T max 100 e Kodak Technical pan.

Conclusioni

E' stata presentato un sistema per la riproduzione, su lastra fotografica, della Figura Di Diffusione, FDD, da parte di campioni fotovoltaici, sia in riflessione che in trasmissione, senza limitazione sulle dimensioni degli stessi. Il sistema è adatto all'analisi della FDD di

qualsiasi campione piano. Il sistema, brevemente indicato con il nome di CARDIFF, è facilmente realizzabile, in quanto costituito da una fotocamera e da un laser. La fotocamera può essere costruita con una geometria planare o cilindrica, secondo quanto precedentemente discusso. Non è esclusa, comunque, qualsiasi altra geometria che lasci inalterato il principio su cui si basa la fotocamera CARDIFF in riflessione, ovvero che "un fascio di luce collimato attraversi la superficie forata di una lastra fotografica, raggiunga un campione semiopaco dal quale è retrodiffusa ed impressioni la lastra fotografica stessa". In maniera del tutto equivalente, si potrà dire, per il funzionamento in trasmissione, che "un fascio di luce collimato raggiunga un campione semitrasparente, dal quale sia diffuso in avanti, e raggiunga una lastra fotografica, impressionandola". La fotocamera a geometria planare è ampiamente discussa nella presente invenzione. Essa può essere costruita modificando, secondo le modalità che fanno parte della presente invenzione, una fotocamera professionale a banco ottico.

Utilizzando la fotocamera CARDIFF a geometria planare, unita ad un laser He-Ne con $\lambda = 633$ nm, sono state registrate le FDD di svariati campioni fotovoltaici, sia di piccole che di grandi dimensioni. La qualità delle riproduzioni e la risoluzione raggiunta sul supporto fotografico sono risultate eccellenti. L'uso di uno "scanner" delle lastre in negativo, o delle riproduzioni in positivo, permette di analizzare quantitativamente le immagini e di trarne importanti informazioni geometriche sulla struttura diffondente.

Tabella 1. Elenco dei campioni fotovoltaici utilizzati negli esperimenti di riproduzione della figura di diffusione con la fotocamera CARDIFF a lastre piane. La grandezza d rappresenta la distanza campione-lastra.

No.	Campione	Sigla	d (mm)	Testurizzazione	Note
1	Wh07-6	SCAT1	170	Piramidi invertite	Fascio su griglia
2	"	SCAT2	"	"	Fascio su silicio
3	"	SCAT3	"	"	Fascio su griglia
4	PYR	SCAT4	"	"	Fascio su silicio
5	HC	SCAT5	"	Buche semisferiche	"
6	Wd4-4	SCAT6	"	"	"
7	"	SCAT7	"	"	"
8	Poly-Si	SCAT8	"	Piramidi dritte	"
9	Porous Si	SCAT9	"	Nanoporosità	Fascio su silicio
10	Modulo PERL	SCAT10	"	Piramidi invertite	Fascio su griglia
11	"	SCAT11	"	"	"

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma deve essere chiaro che gli esperti nel ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dall'ambito di protezione della presente privativa industriale.

Riferimenti

- [1] J. Zhao, A. Wang, P. Altermatt, M. A. Green, "Twenty-four per cent efficient silicon solar cells with double layer antireflection coatings and reduced resistance loss", Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 3636-3638.
- [2] J. Zhao, A. Wang, M. A. Green, F. Ferrazza, "19.8% Efficient 'Honeycomb' textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells", Appl. Phys. Utt . 73 (1998) 1991-1993.

RIVENDICAZIONI

1.- Apparecchio per la riproduzione, su lastra fotografica, della figura di diffusione, in riflessione o trasmissione, della luce da parte di un campione piano (c;m), comprendente una sorgente (l) che produce un fascio di luce collimato, selezionato da un diaframma (d) e diretto verso una fotocamera (f) attraverso un otturatore a scatto manuale (semiautomatico) (o), detta fotocamera avendo una parte anteriore ed una parte posteriore e costituita, nella sua parte anteriore, da una prima standarda (s1) su cui è montato un supporto (h1), o "chassis", per lastra fotografica (p), e, nella sua parte posteriore, da una seconda standarda (s2), unita alla prima standarda (s1) tramite un soffietto (s), e sulla cui faccia interna è montato il campione (c;m) che, allineato sull'asse ottico z, intercetta il fascio luminoso e determina la diffusione all'indietro per riflessione o in avanti per trasmissione della luce incidente, che viene raccolta, entro l'angolo solido Ω , dalla lastra fotografica (p), la quale rimane impressionata da detta luce per il tempo di esposizione t_0 , uguale al tempo d'apertura dell'otturatore (o), la fotocamera (f) essendo montata su un supporto a binario, fissabile su un banco ottico, provvisto di una serie di movimentazioni che consentono la traslazione indipendente delle due standarde (s1 e s2), e quindi del campione (c;m) e della lastra (p), lungo l'asse z e lungo le due direzioni ortogonali ad esso, nonché la rotazione indipendente delle due standarde attorno a due assi ortogonali tra loro e all'asse ottico z, in modo tale da regolare la distanza ed il parallelismo tra campione e lastra ed il loro allineamento rispetto all'asse ottico del sistema.

2.- Apparecchio per la riproduzione, su lastra fotografica, della figura di diffusione della luce da parte di un campione piano secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che, per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano (c) di piccole dimensioni in riflessione, detta sorgente di luce (l) e detto diaframma (d) nonché detto otturatore (o) sono disposti sul davanti della parte anteriore della fotocamera (f) ed il complesso dell'otturatore (o), della prima standarda (s1) e della lastra fotografica (p) con relativo supporto (h1) è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce (l), detto campione (c) essendo portato da un portacampione (po) montato su un supporto (h2) fissato a detta seconda standarda (s2) all'interno della fotocamera (f).

3.- Apparecchio per la riproduzione, su lastra fotografica, della figura di diffusione della luce da parte di un campione piano secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che, per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano di grandi dimensioni (m), in riflessione, detta sorgente di luce (l) e detto diaframma (d) nonché detto otturatore (o) sono disposti sul davanti della parte anteriore della fotocamera (f) ed il complesso dell'otturatore (o), della prima standarda (s1) e della lastra fotografica (p) con relativo supporto (h1) è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce (l), detta fotocamera (f) è estensibile tramite un secondo soffietto (ss) applicato a detta seconda standarda (s2) per prolungare l'asse ottico fino al punto di misura stabilito e detto

campione di grandi dimensioni (m) è montato al fondo della fotocamera (f) estensibile.

4.- Apparecchio per la riproduzione, su lastra fotografica, della figura di diffusione della luce da parte di un campione piano secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che, per la riproduzione della figura di diffusione della luce di un campione piano (c) di piccole dimensioni in trasmissione, detta sorgente di luce (l) e detto diaframma (d) nonché detto otturatore (o) sono disposti sul retro della parte posteriore della fotocamera (f), detto campione (c) è portato da un portacampione (po) montato su un supporto (h2) fissato a detta seconda standarda (s2) all'interno della fotocamera (f). ed il complesso dell'otturatore (o), della seconda standarda (s2) e del portacampione (po) con relativo supporto (h2) è assialmente forato per il passaggio del raggio di luce emesso da detta sorgente di luce (l).

Roma, 24 SET. 2001

p.p.: ENEA – Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente

TA ING. BARZANO' & ZANARDO ROMA S.p.A.

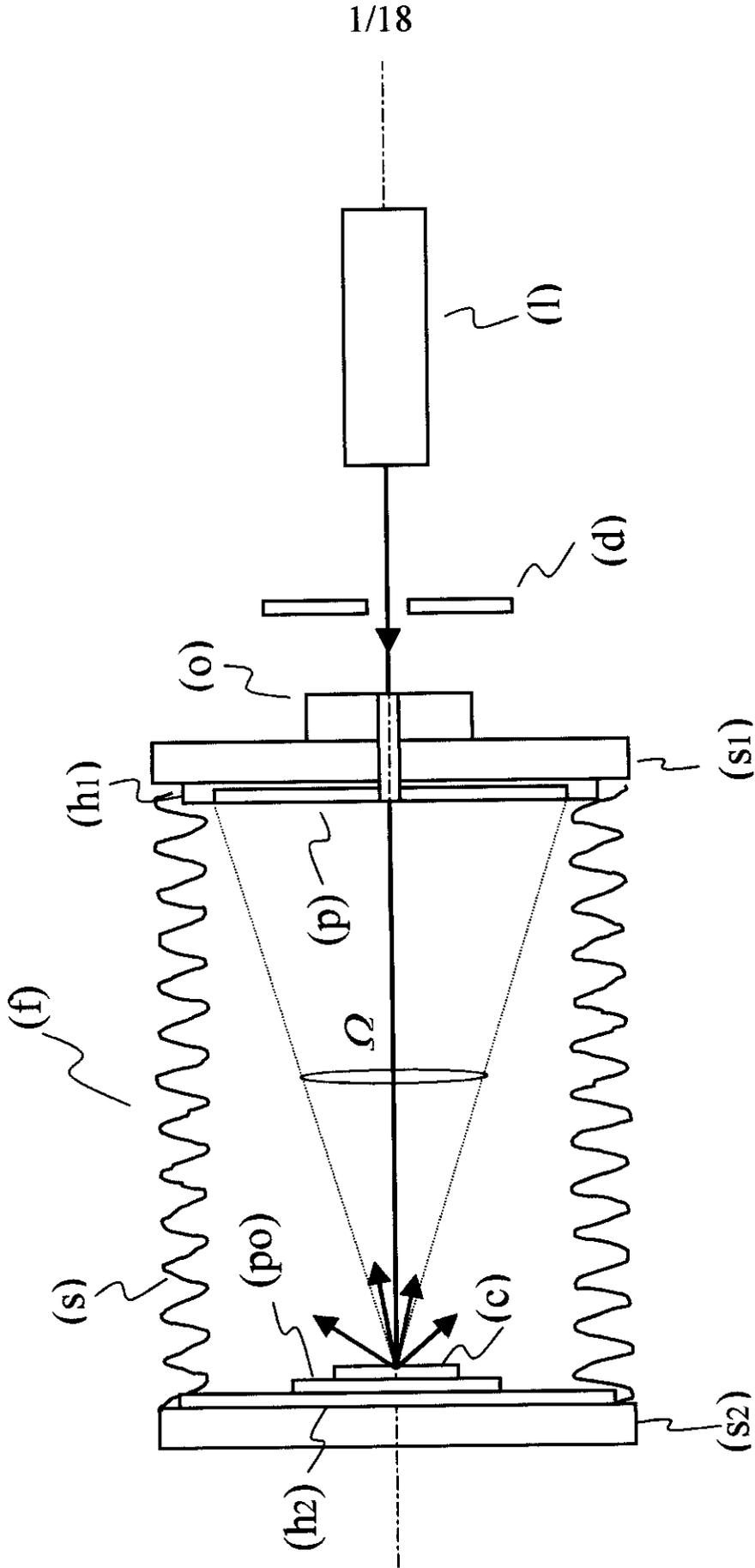


Fig. 1

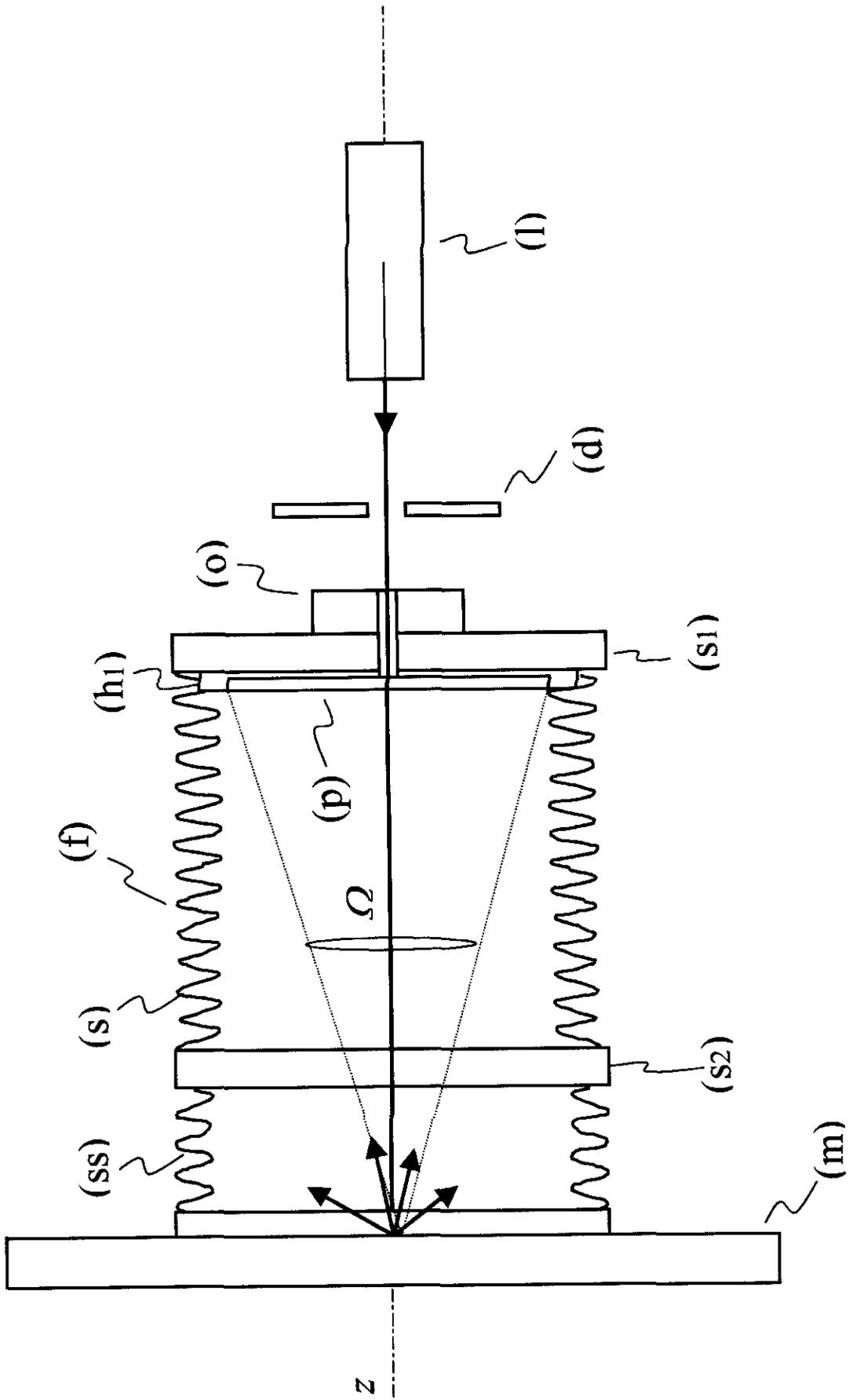


Fig. 2

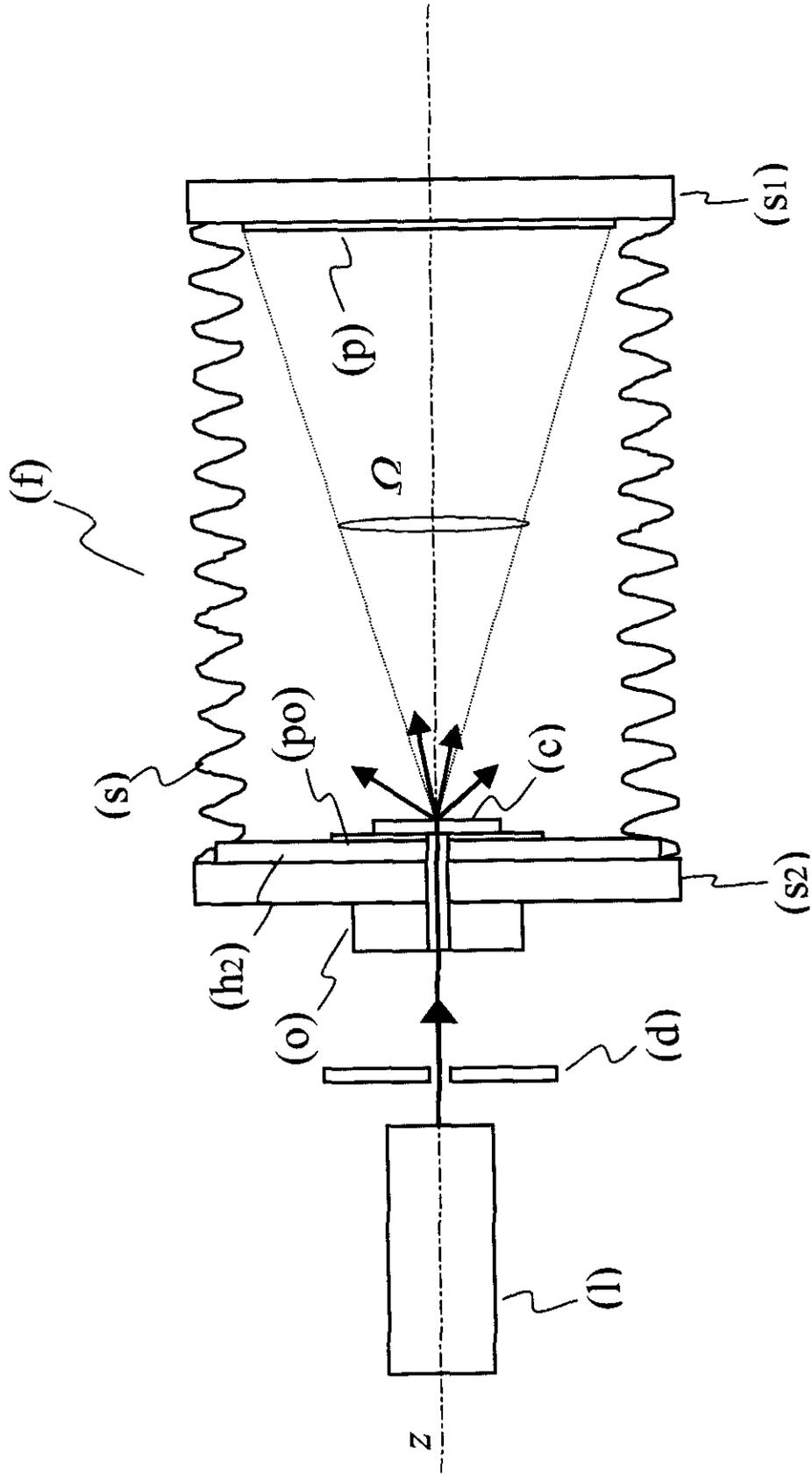


Fig. 3

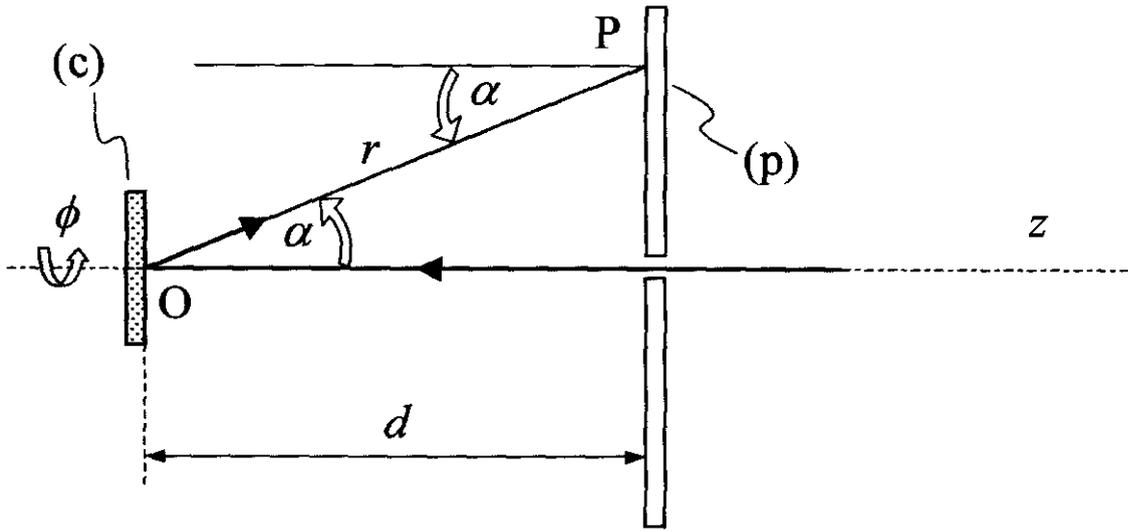


Fig. 1A

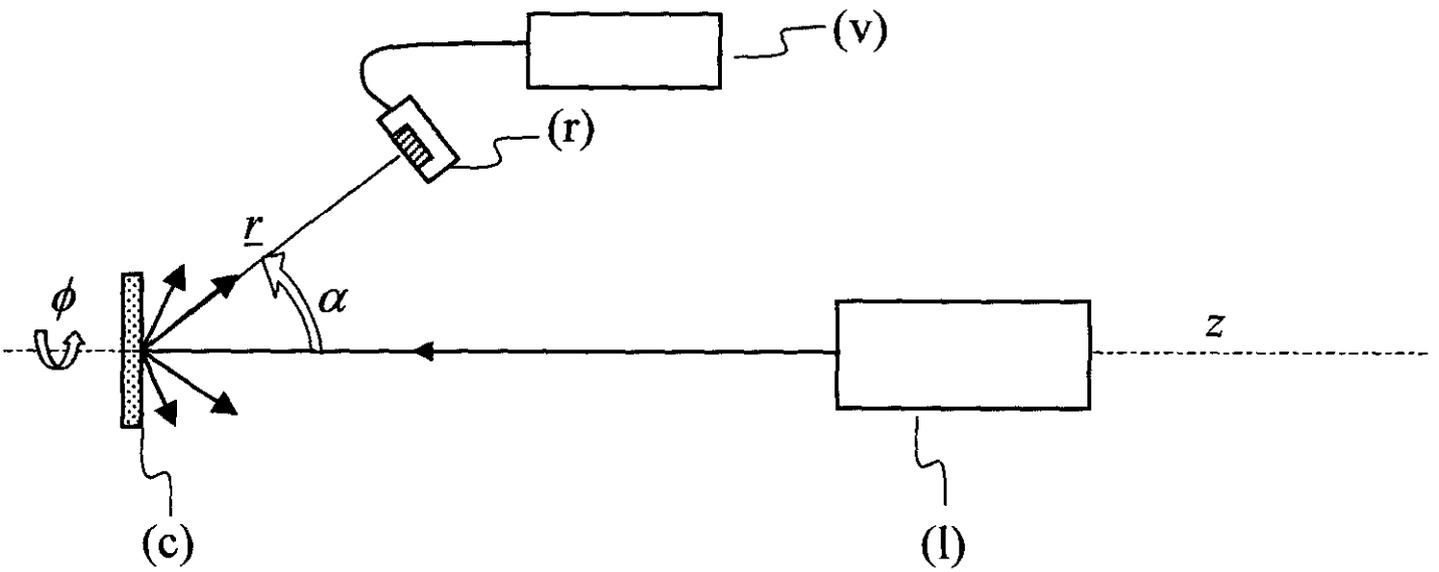


Fig. 4

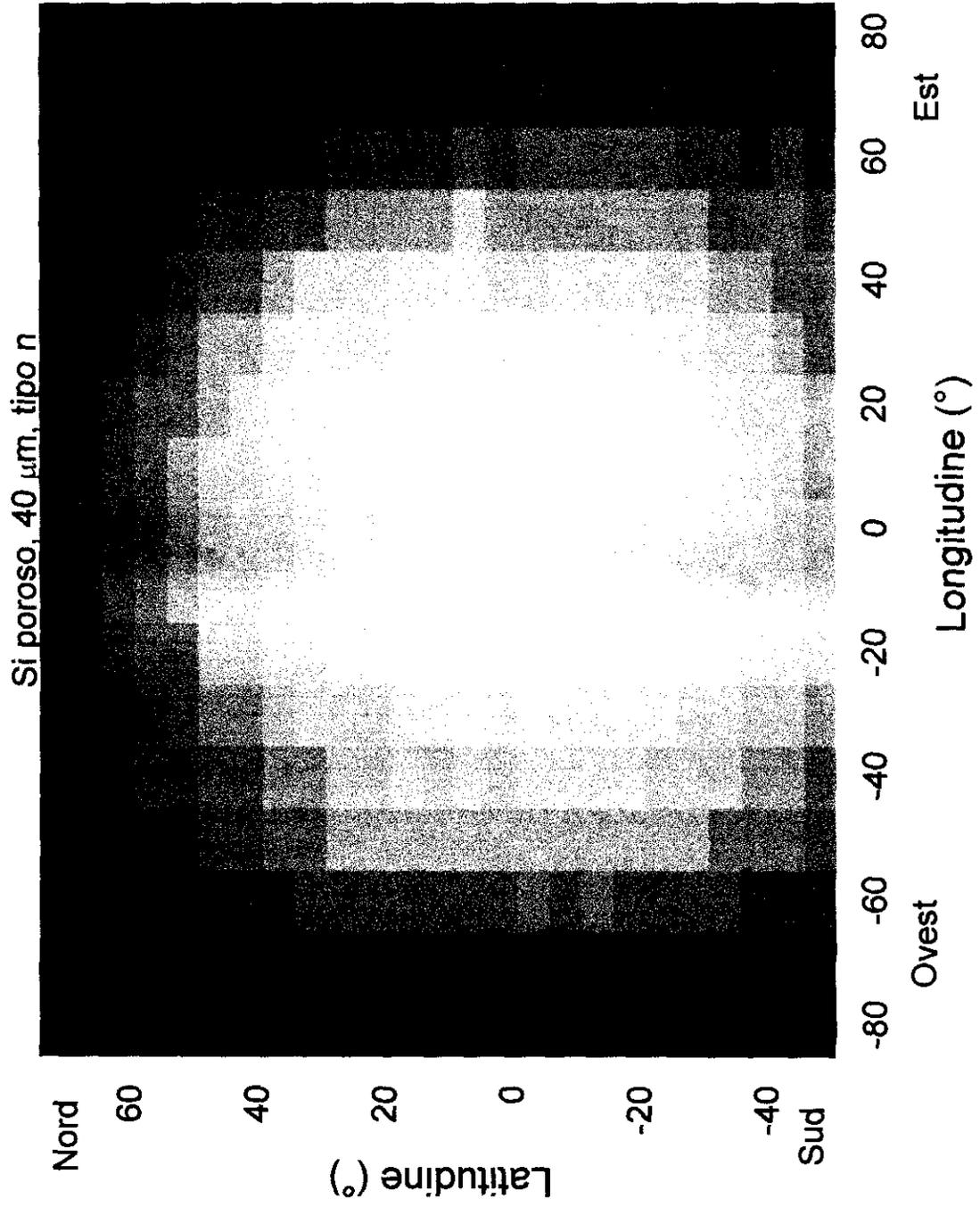


Fig. 5

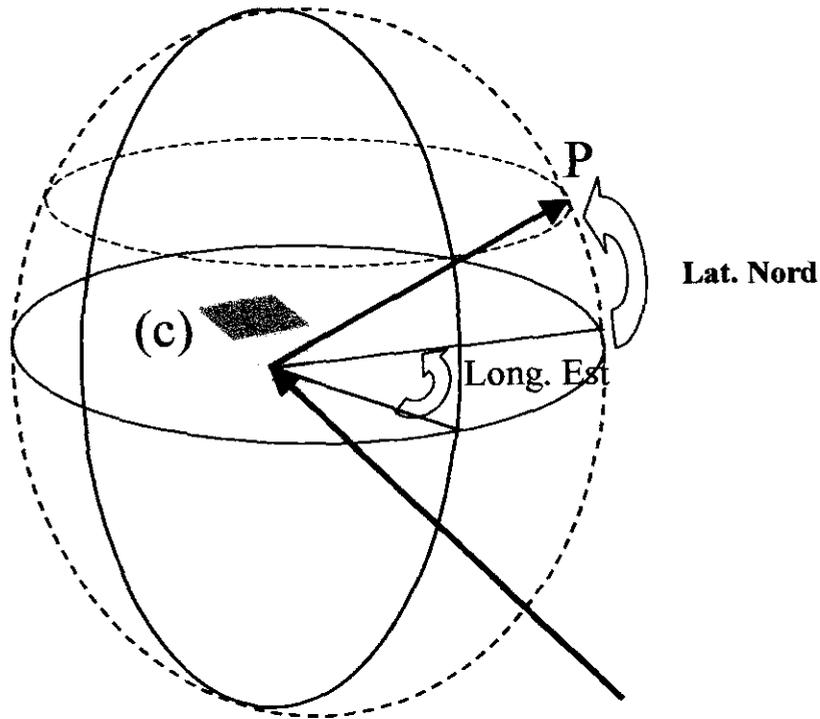


Fig. 6

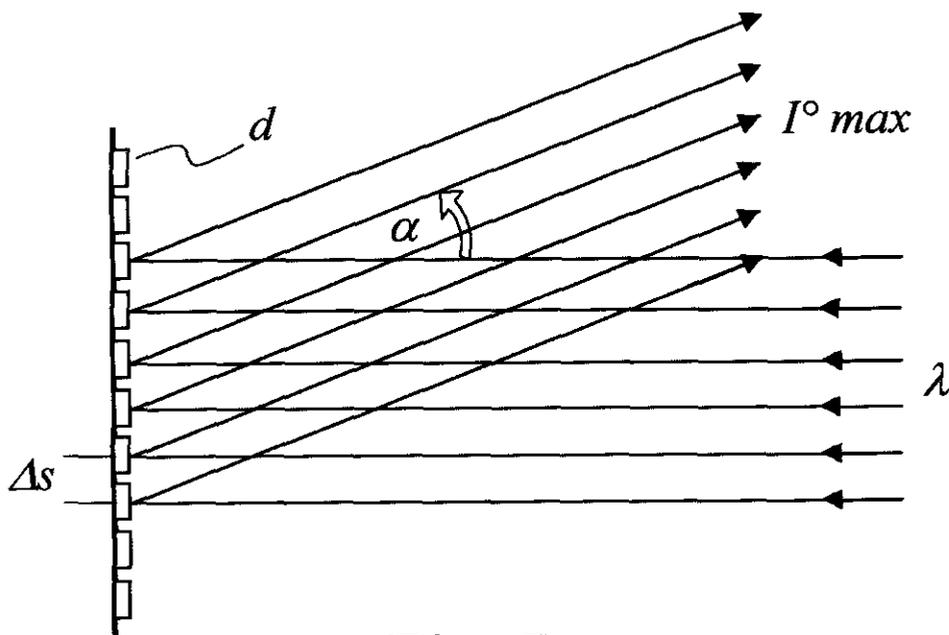


Fig. 7

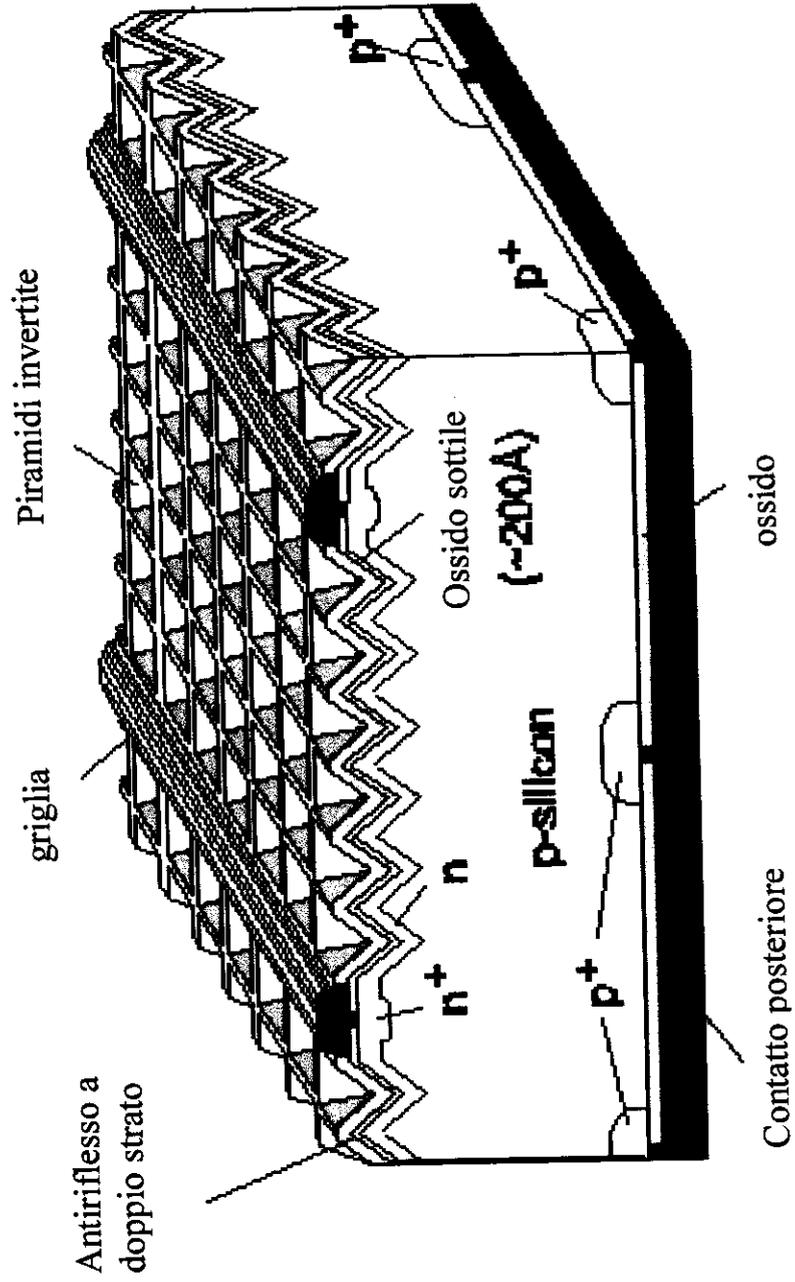
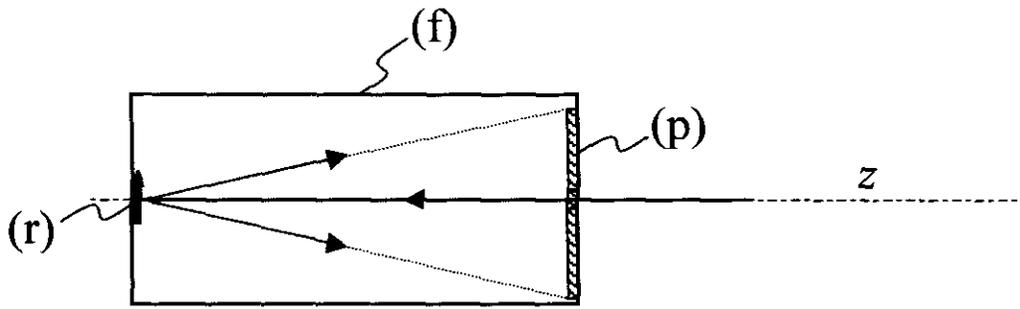
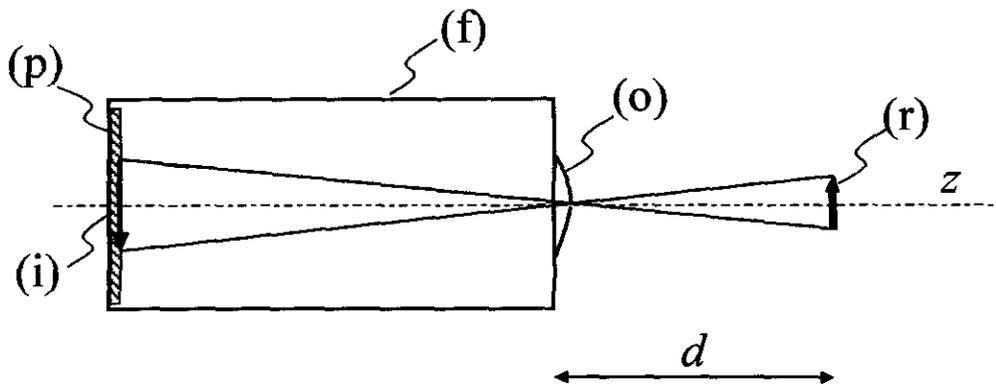


Fig. 8



a)



b)

Fig. 9

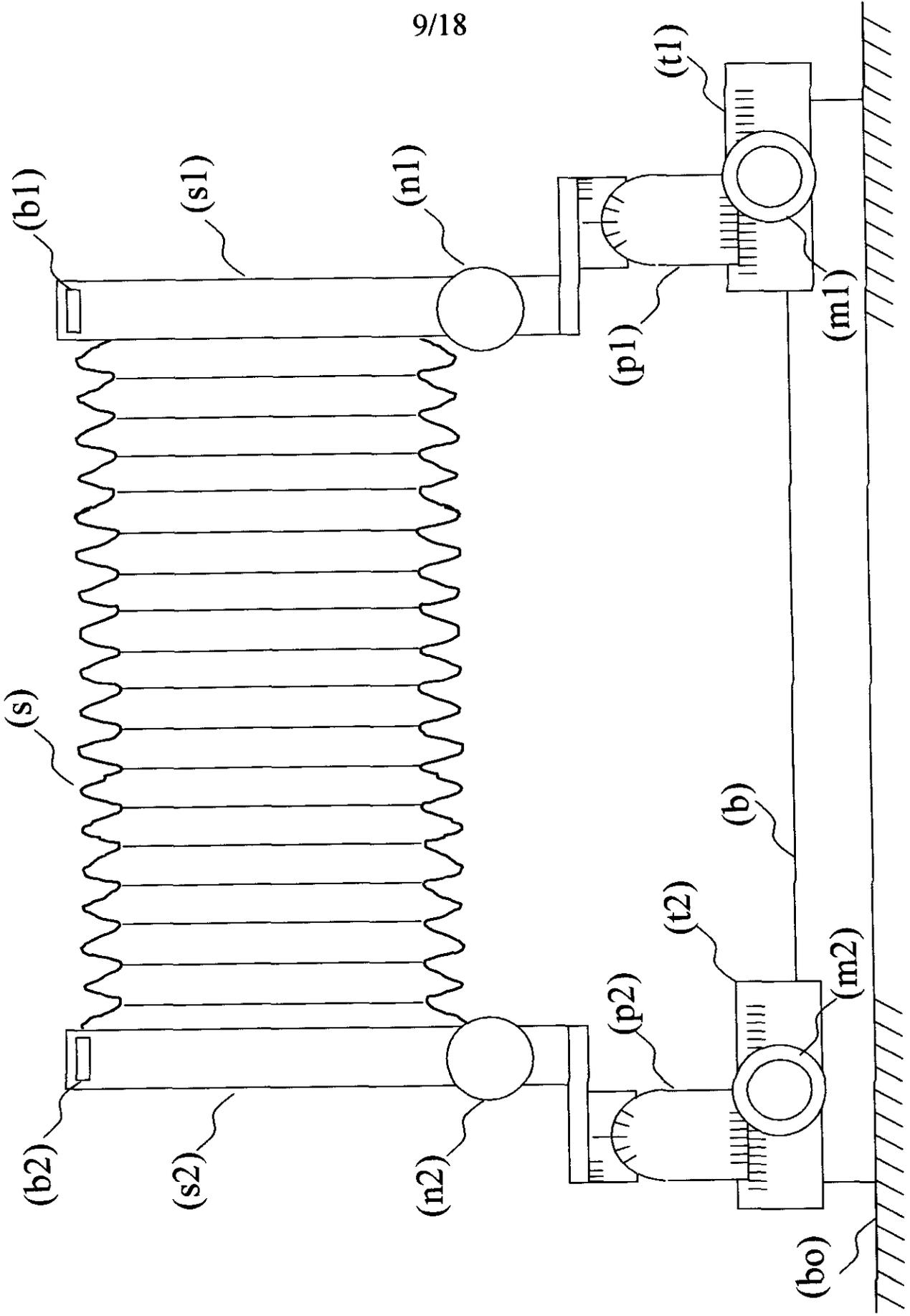


Fig. 10

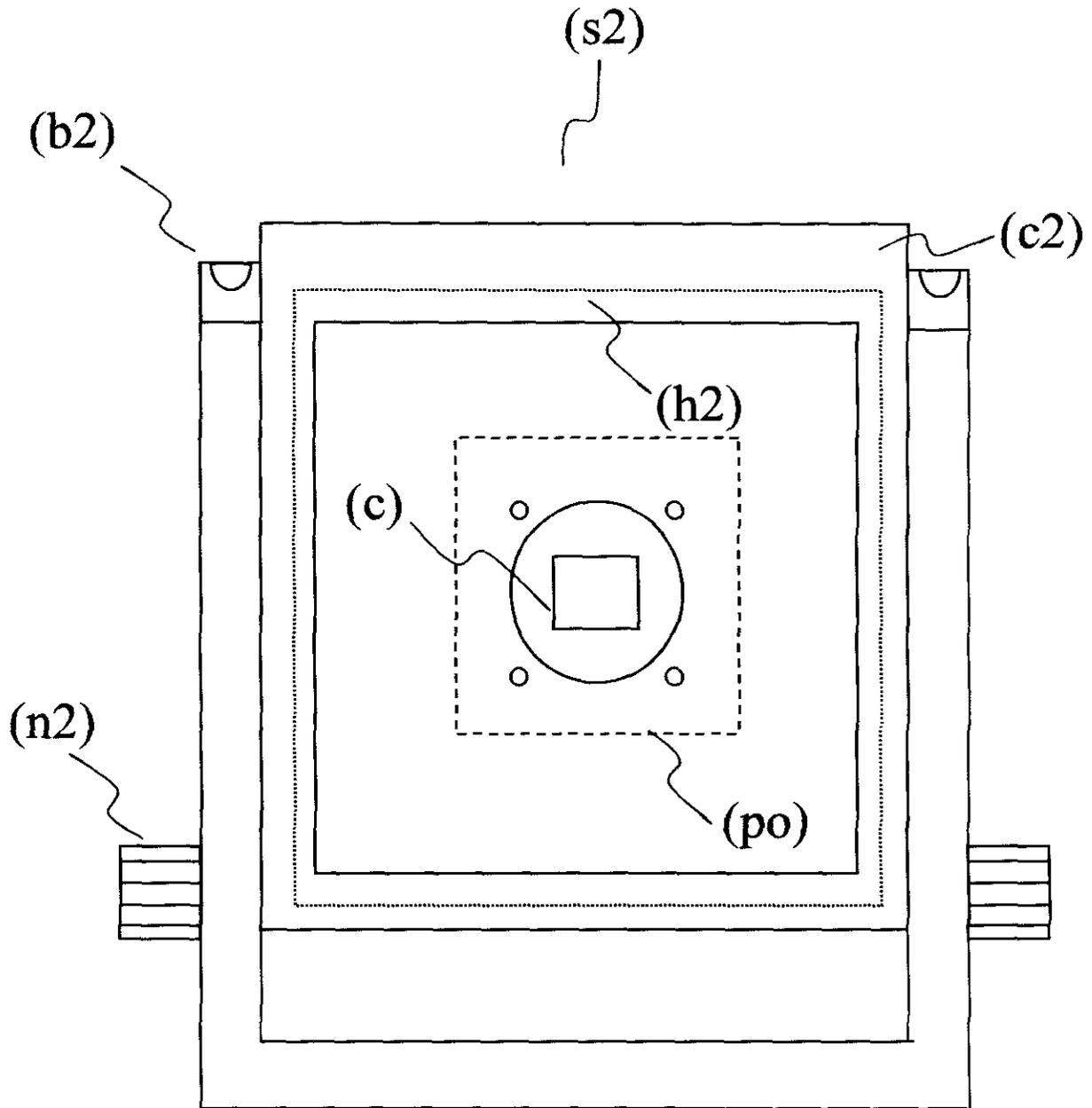
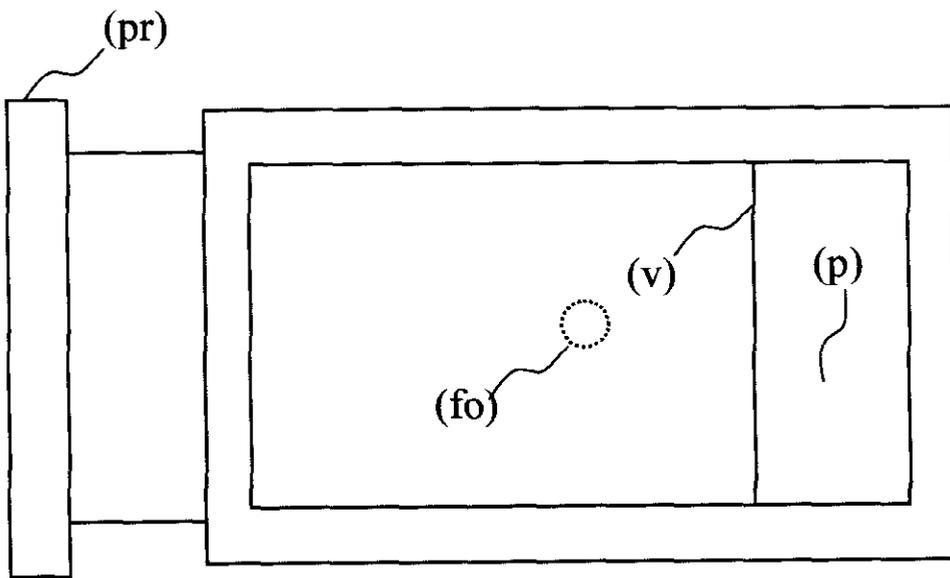
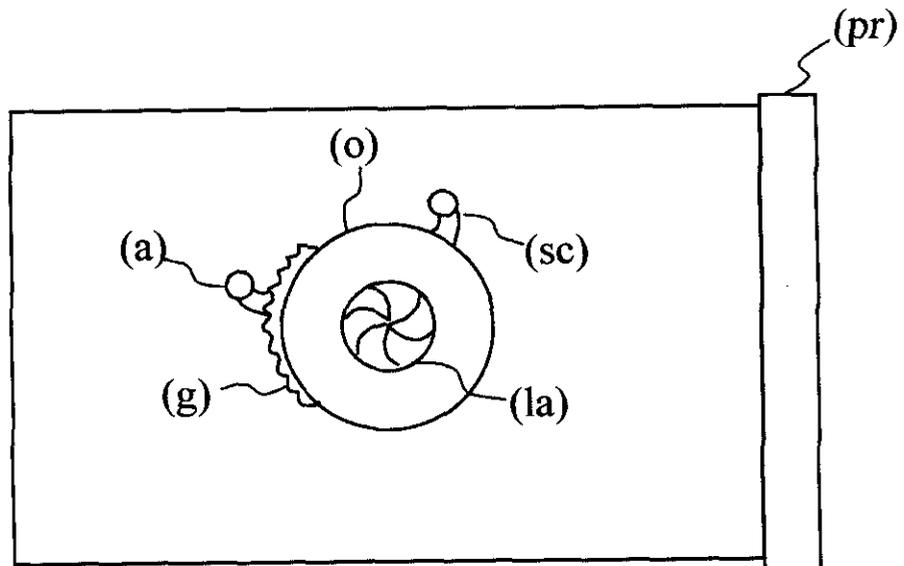


Fig. 11



a)



b)

Fig. 12

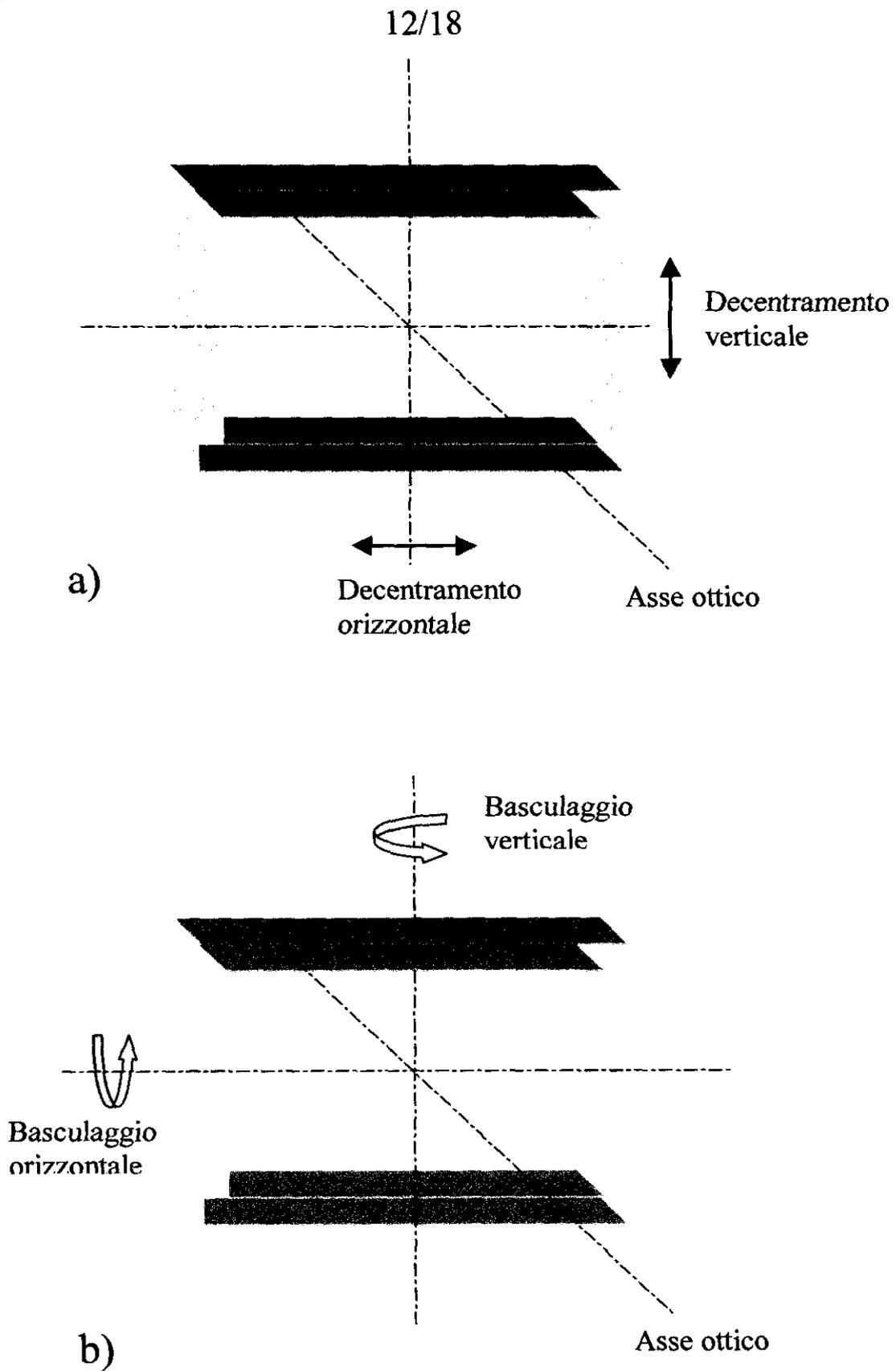
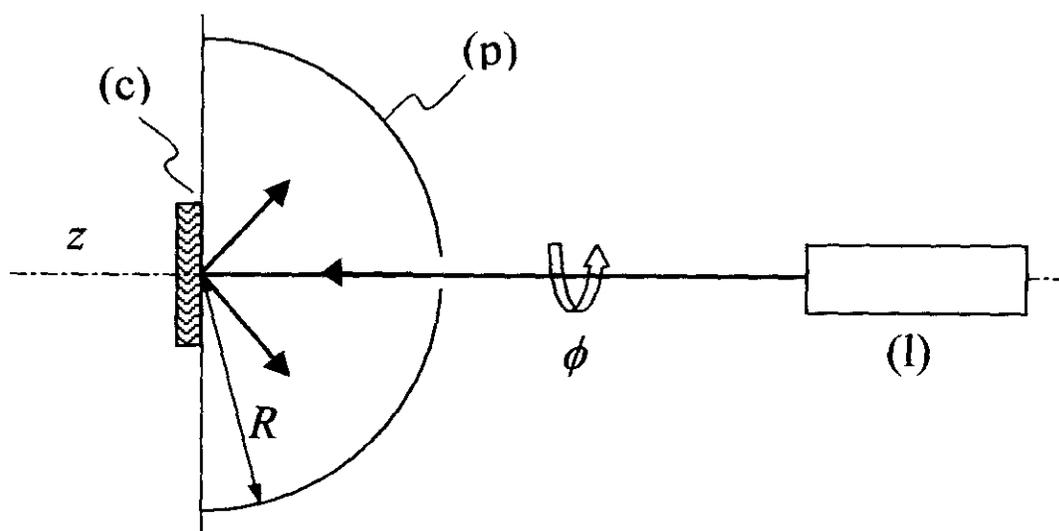
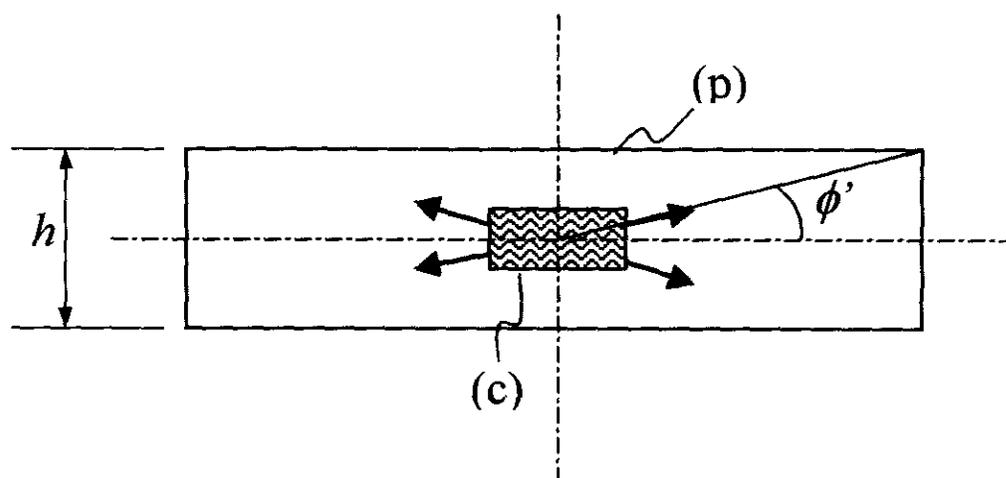


Fig. 13



(a)



(b)

Fig. 14

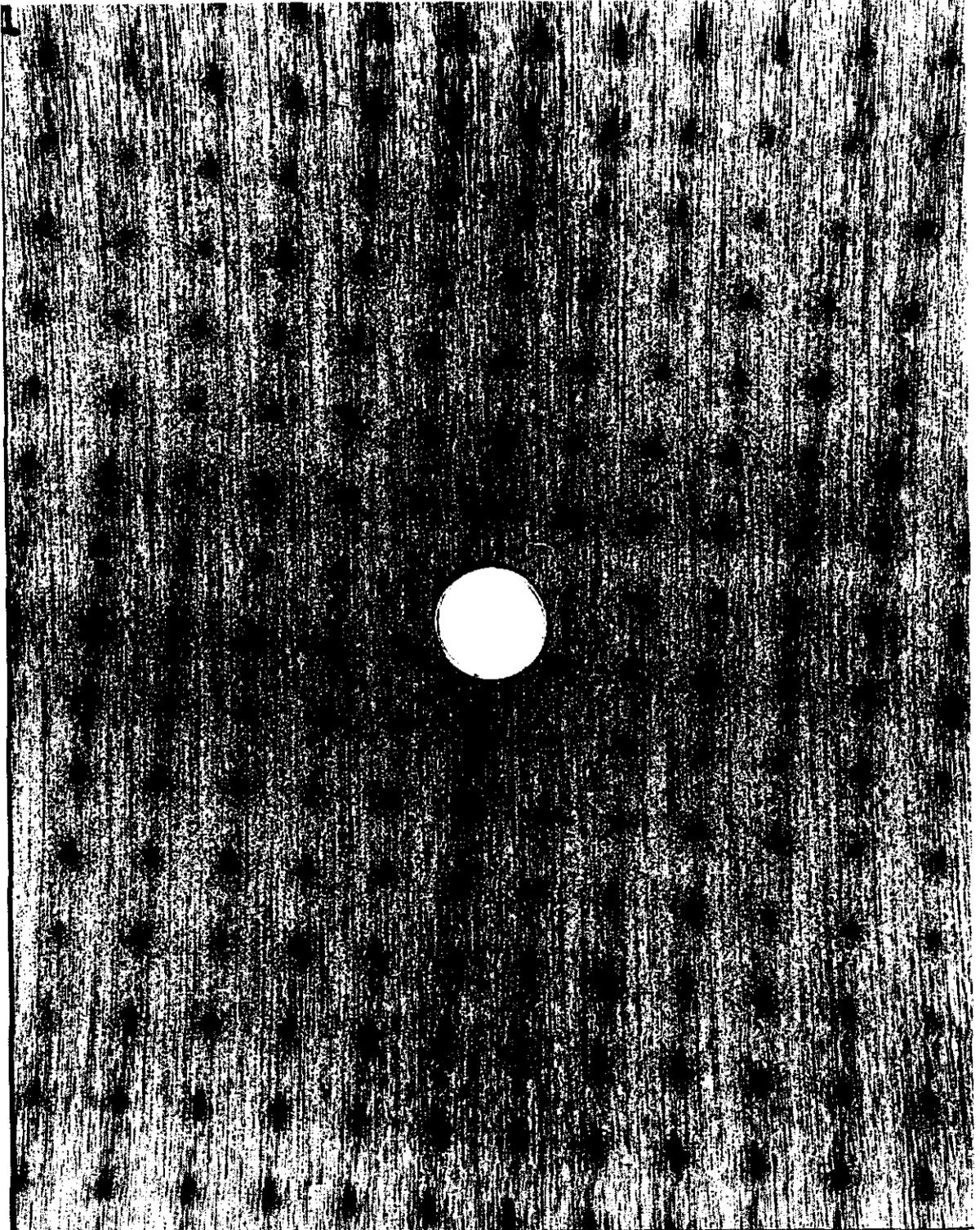


Fig. 15

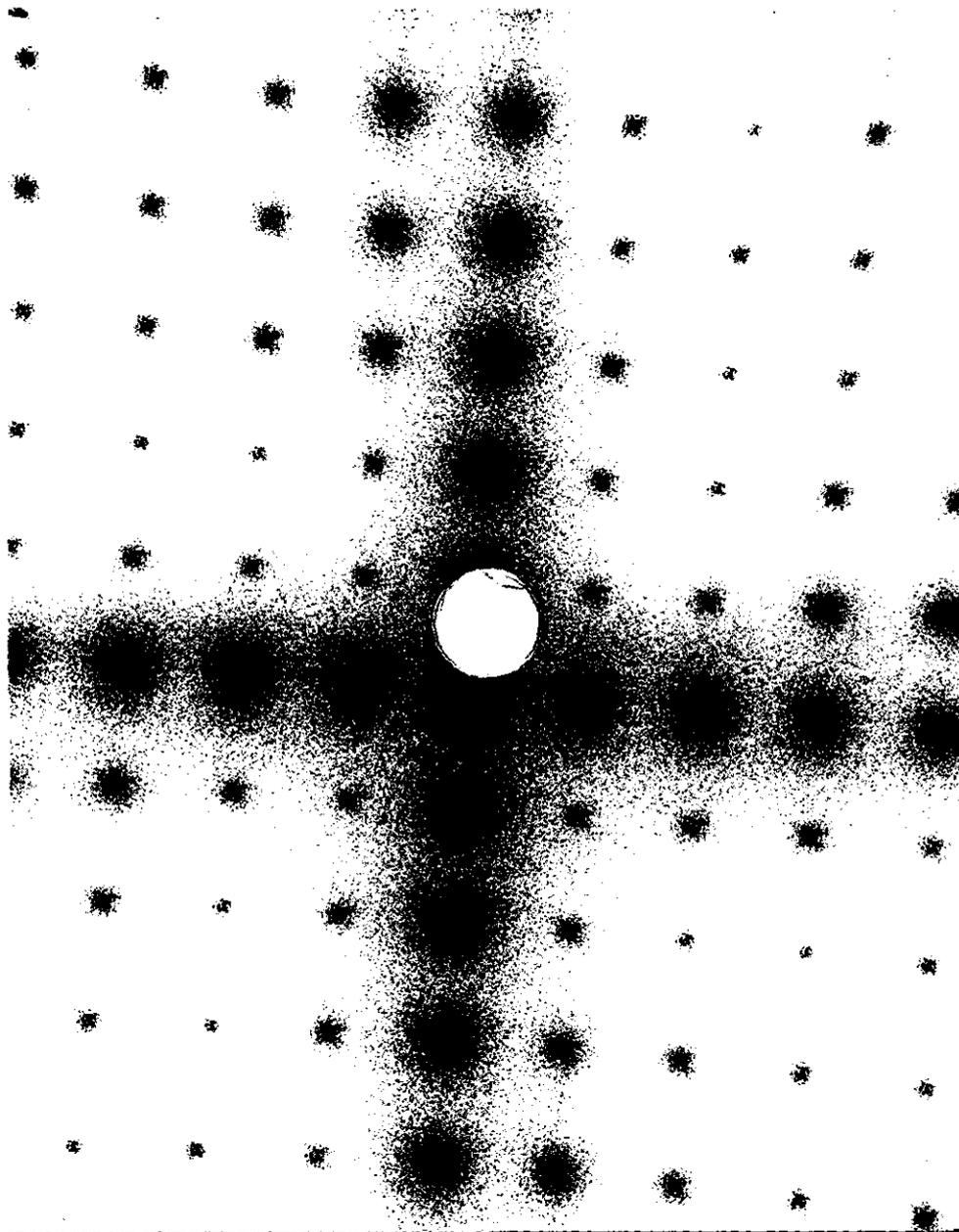


Fig. 16

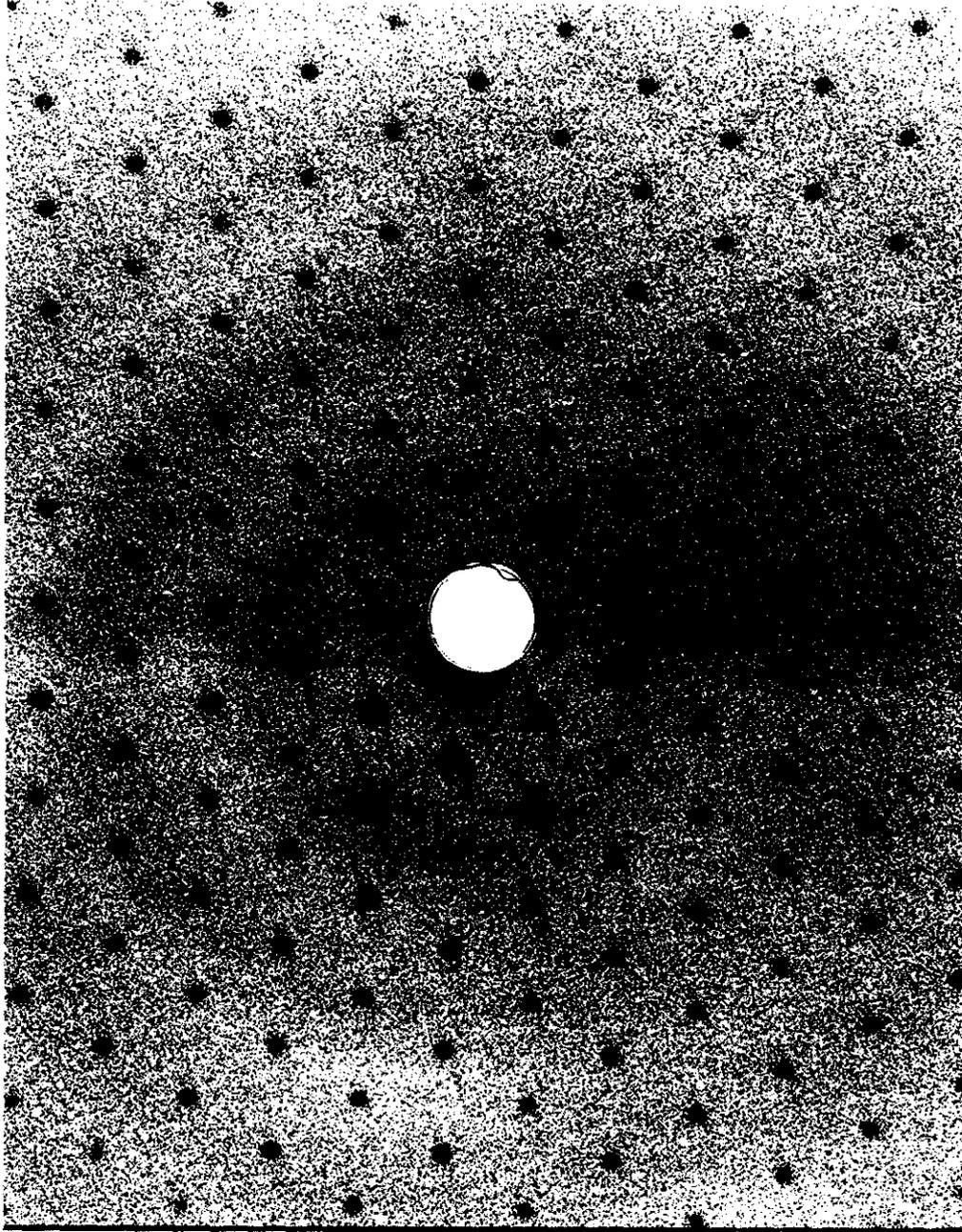


Fig. 17

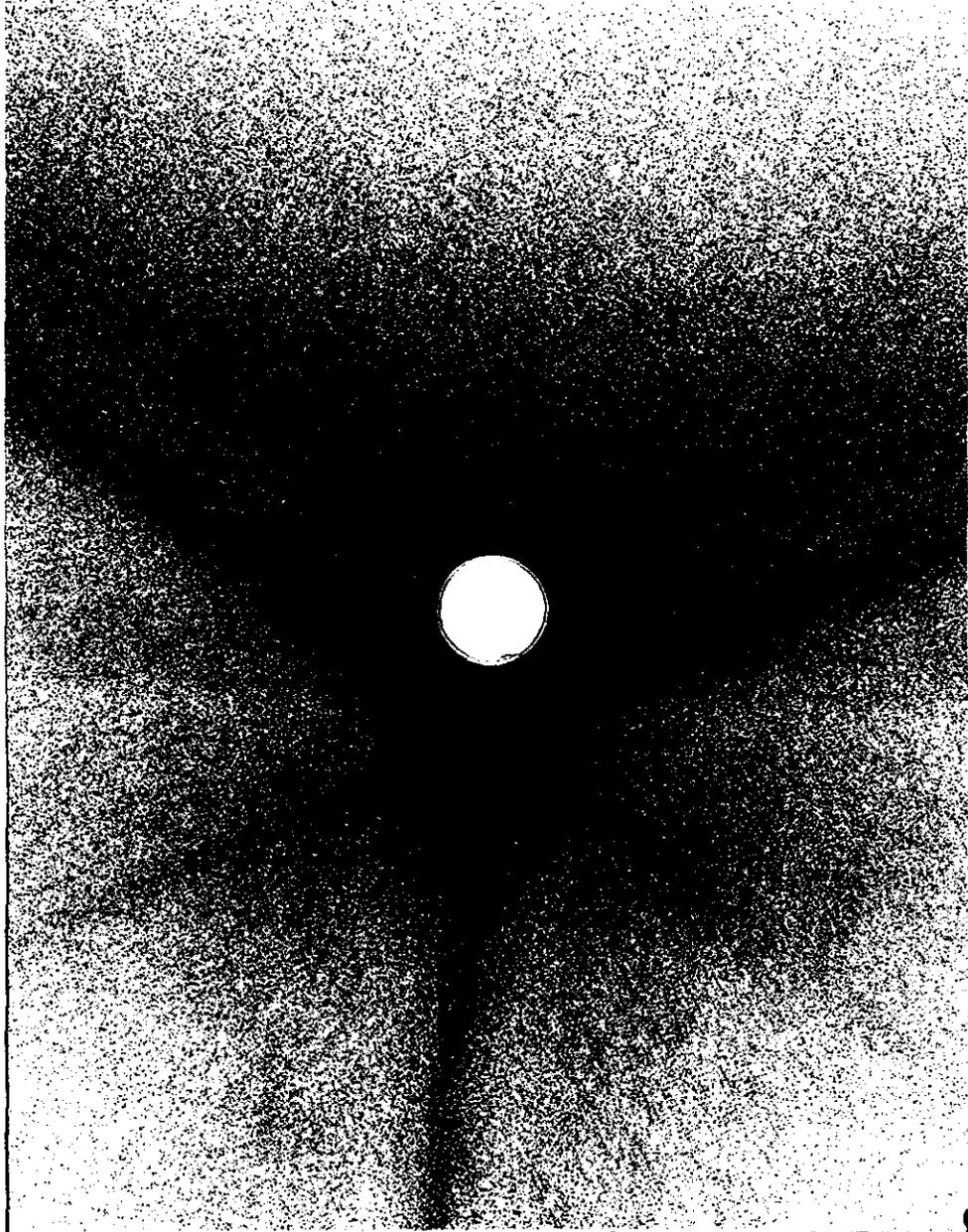


Fig. 18

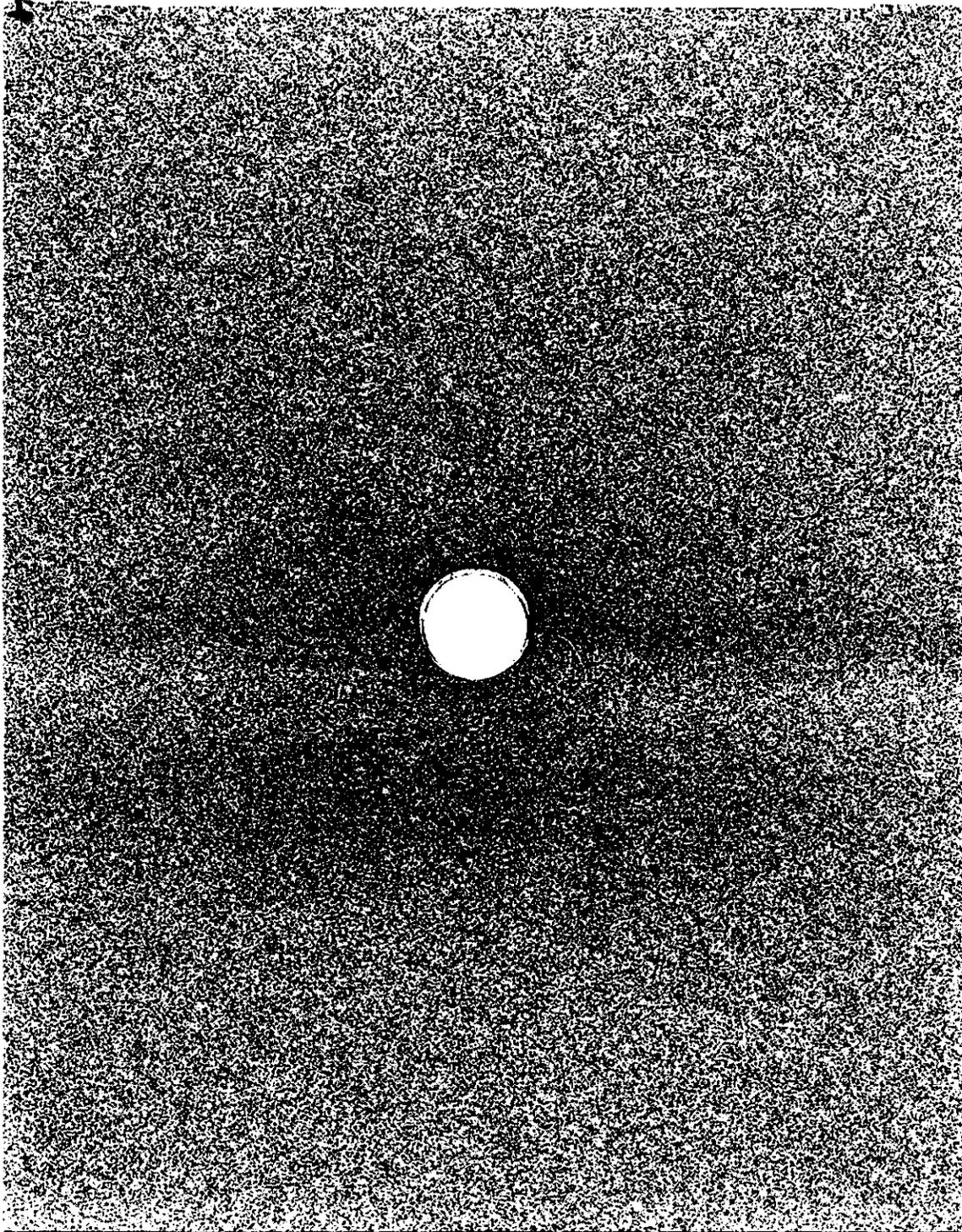


Fig. 19

