

avântul său. După aceasta domeniul de cercetare se dezvoltă foarte repede, numărul de articole originale cifrându-se la sute în fiecare an.

Câmpul conjugat de fază va fi, deci, radiat în direcția *exact opusă* cu cea a unei sonde (figura 5.43) și condiția de acord de fază va fi în mod riguros verificată (vectorul de undă al componente de polarizație $P_{cp,ar}$ fiind egal cu $-k_S \bar{u}_z$).

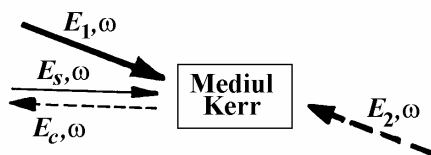


Fig. 5.43.

Conjugarea de fază și inversarea timpului rezultă dacă se consideră expresia care descrie propagarea spațio-temporală a câmpului sondei

$$E_S(z,t) = E_S^0 \exp[-i\omega t + ikz] + c.c. \quad (5.120)$$

și presupunând inversarea sensului timpului. Câmpul obținut:

$$E_S(z,-t) = E_S^0 \exp[i\omega t + ikz] + c.c. \quad (5.121)$$

are aceeași dependență spațio-temporală ca și câmpul unei conjugate $E_c(z,t)$ generat de componenta de polarizație $P_{cp,ar}^0$ (ecuația (5.107)). Rezultă că acțiunea mediului care creează unda conjugată poate fi descrisă ca o inversare a sensului timpului pentru unda sondă incidentă. De fapt, datorită acestui fapt se vorbește uneori de *oglinzi cu întoarcerea timpului* pentru a descrie proprietățile acestor sisteme care generează o undă conjugată. O astfel de denumire este totodată inexactă

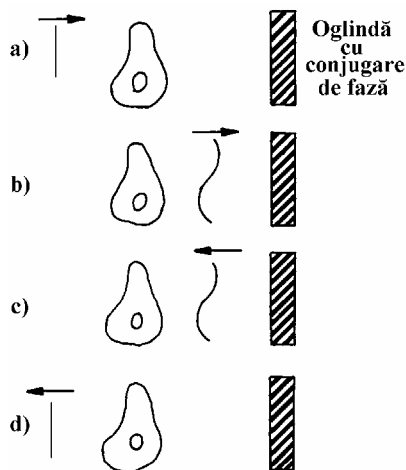


Fig. 5.44.

pentru o undă nemonocromatică, deoarece diversele componente Fourier nu sunt reflectate în același mod de mediul care conjugă faza (datorită dependenței susceptibilității neliniare de ω). Astfel, unda conjugată va urma exact aceeași traiectorie ca unda incidentă, dar în sens invers.

Această proprietate poate fi ilustrată prin considerarea propagării unei unde incidente care este inițial plană (figura 5.44 a) și care la traversarea mediului deformant (O din figura 5.44), se reflectă pe un mediu conjugător de fază (numit *oglinzi cu conjugare de fază*). După traversarea obiectului O , frontul undei este deformat deoarece drumurile optice urmate de diferitele raze

luminoase în mediul O sunt diferite (figura 5.44 b). Acțiunea oglinzii cu conjugare de fază fiind analoagă la o inversare a sensului timpului, obținem după reflexie

(figura 5.44 c) un front de undă identic cu frontul de undă incident din figura 5.44 b. Aplicarea legii de întoarcere inversă a luminii arată că frontul undei reflectate este din nou plan după o a doua traversare a mediului deformant (figura 5.44 d).

Dacă înlocuim mediul conjugător de fază din figura 5.44 cu o oglindă normală, nu are loc bineînțeles, rectificarea frontului undei. Din contră, deformarea este crescută după o a doua trecere prin mediul deformant (figura 5.45).

Din figura 5.45 se observă că diversele etape (a – d) pot fi comparate cu etapele similare obținute în cazul reflexiei pe o oglindă cu conjugare de fază (figura 5.44).

Rectificarea fronturilor de undă de o oglindă cu conjugare de fază poate fi utilizată în practică⁽⁵¹⁾, asemenea corecției de front de undă găsind aplicații

naturale când radiațiile electromagnetice trebuie să se propage pe distanțe mari în atmosferă. Astfel, se știe că fluctuațiile densității aerului fac ca atmosfera să se comporte ca un mediu deformant (și, în plus, deformațiile frontului de undă fluctuează în timp, una din manifestările acestui fenomen fiind scânteierea sau sclipirea stelelor). De exemplu, un fascicul laser având o distribuție transversală a intensității de formă gaussiană și posedând o simetrie cilindrică la ieșirea din laser, pierde din proprietățile sale pe măsură ce se propagă în atmosferă. Ca urmare a acestui fenomen calitatea fasciculului se degradează destul de rapid. Dacă fasciculul este reflectat asupra lui însuși pe o oglindă normală, deteriorarea calității va fi încă amplificată de drumul de întoarcere și emițătorul va recepționa un fascicul reflectat foarte perturbat. Aceasta prejudiciază calitatea comunicațiilor între două stații îndepărtate. Un mod de a rezolva problema ar fi de a înlocui oglinda normală cu o oglindă cu conjugare de fază. În acest caz, razele luminoase reflectate vor urma același drum ca razele incidente (respectând, bineînțeles, cerința ca timpul făcut de lumină pentru dus-întors să fie mic față de timpul de evoluție a fluctuațiilor mediului material traversat) și fasciculul înapoiat ar fi în mod automat țintit pe stația emițătoare. Transferul de informație între cele două stații putând să se facă, de exemplu, modulând intensitatea fasciculului reflectat.

Acest tip de proprietăți poate găsi aplicații în comunicarea dintre două stații terestre sau între o stație terestră și un satelit. Aplicații, mai puțin pașnice, au fost de asemenea, sugerate pentru distrugerea armelor de tragere sau a aeronavelor. Într-adevăr, orice rază luminoasă difuzată de o armă de tragere va regăsi drumul făcut de aceasta dacă ea este reflectată de o oglindă cu conjugare de fază. Dacă se plasează în

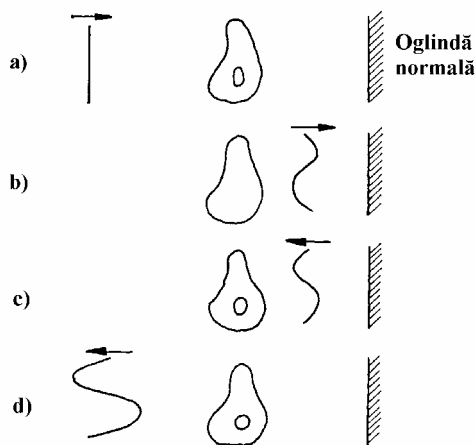


Fig. 5.45.

⁽⁵¹⁾ Robert A. Fisher (ed.), *Optical phase conjugation*, Academic Press, New York-London, Paris, San Diego..., (1983)

fața unei asemenea oglinzi un mediu amplificator, fasciculul reflectat ar putea fi suficient de intens pentru a deteriora arma de tragere și pentru a o neutraliza. Este convenabil, totodată, de a preciza că chiar dacă anumite experiențe de demonstrare au funcționat bine, o astfel de folosire a oglinzilor cu conjugare de fază ridică scenarii de ficțiuni științifice. În general, rațiunea esențială a întârzierii aplicațiilor oglinzilor cu conjugare de fază este absența pe piață a materialelor care să posede simultan proprietățile cerute de rapiditate, de puternice neliniarități și de acromaticitate. Amintim, în același timp, că recenta apariție a oglinzilor cu conjugare de fază în laserii comerciali, unde proprietățile de rectificare a fronturilor de undă sunt exploatate pentru a înlătura fenomenul de lentilă termică care se produce în regim de mare intensitate în barele amplificatoare.

Aplicațiile oglinzilor cu conjugare de fază sunt descrise în articole de popularizare^(52, 53, 54), iar informații complementare sunt găsite în diferite articole de sinteză^(55, 56).

Coeficientul de reflexie și amplificarea prin conjugare de fază. Una din aplicațiile importante ale oglinzilor cu conjugare de fază o constituie faptul că ele pot avea *coeficienți de reflexie superiori la 100%* și astfel, ele prezintă interesul de a funcționa în *regim de amplificator*.

Pentru a calcula *coeficientul de reflexie* se stabilește mai întâi *ecuația undelor*. Se presupune că cele două unde pompe E_1 și E_2 au aceeași intensitate și că propagarea lor în mediul Kerr nu este perturbată de prezențele undelor de slabă intensitate E_s și E_c . În particular, amplitudinile lui E_1 și E_2 sunt presupuse constante în mediu. Pentru a se determina evoluția undelor E_s și E_c în mediul neliniar, este necesar, atunci, să se rezolve un sistem de două ecuații cuplate de tipul (2.70), una relativă la câmpul care se propagă în direcția $+z$ (E_s) și cealaltă la câmpul care se propagă în direcția opusă $-z$ (E_c). În particular, ecuația relativă la câmpul conjugat:

$$E_c(z,t) = E_c^0 \exp[-i\omega t - ikz] + c.c. \quad (5.122)$$

se scrie

$$\frac{\partial E_c^0}{\partial z} = -iKE_s^{0*} \quad (5.123)$$

unde K se deduce din ecuațiile (2.70) și (5.119)

$$K = \frac{\omega}{n_0 c} \chi^{(3)} E_1^0 E_2^0, \quad (5.124)$$

cu n_0 ca indice de refracție al mediului liniar Kerr la frecvență ω , care se află în expresia $n = n_0 + n_2 |E^0|^2$.

⁽⁵²⁾ V. V. Shkunov, B. Y. Zel'dovich, *Optical phase conjugation*, Sci. Am. January, 1986, p.40

⁽⁵³⁾ D. M. Pepper, *Applications of optical phase conjugation*, Sci. Am. January, 1986, p.56

⁽⁵⁴⁾ G. Grynberg, *Revue du Palais de la découverte*, 17 (169), 27, 1989

⁽⁵⁵⁾ D. M. Pepper, *Laser Handbook* (eds. M.L. Stith, M. Brass), Elsevier Science Publisher, Amsterdam, 1985, p. 333

⁽⁵⁶⁾ R. W. Boyd, G. Grunberg, *Contemporary Nonlinear Optics* (eds. G. P. Agarwal, R. W. Boyd, Academic Press, New York, 1992

În cazul reflectivităților slabe, când $|E_c^0| \ll |E_s^0|$, este posibil să se rezolve ecuația (5.123) presupunând al doilea membru constant și impunând condiția la limită:

$$E_c^0(L)=0, \quad (5.125)$$

care exprimă faptul că nici un câmp nu va intra prin spatele mediului de lungimi de lungime L , în direcția $-z$. Soluția ecuației (5.123) este, atunci:

$$E_c^0(z) = -iK(z-L)E_s^{0*} \quad (5.126)$$

pentru $0 \leq z \leq L$. În particular, se poate deduce coeficientul de reflexie (în intensitate) definit ca raportul intensităților câmpului conjugat și câmpului sondă în planul $z=0$; cu alte cuvinte, câmpul conjugat ieșind din mediu și câmpul sondă intrând. Astfel, se găsește:

$$R_c = \frac{|E_c^0(0)|^2}{|E_s^0(0)|^2} = |KL|^2 \quad (5.127)$$

În cazul reflectivităților puternice, soluția exactă se găsește considerând că neliniaritatea sau lungimea mediului este suficient de mare încât R_c să se apropie de 1. Atunci, E_s^{0*} nu se mai poate considera constantă în al doilea membru al ecuației (5.123). Ca atare, este necesar să se plece de la sistemul de ecuații cuplate pentru E_c^0 și E_s^0 . Termenul sursă al ecuației de evoluție (2.70) al anvelopei E_s^0 este proporțional cu componenta de polarizație $P_s = 2\varepsilon_0\chi^{(3)}E_1^0E_2^0E_c^{0*}$, adică cu conjugata unei conjugate. Aceasta conduce la următoarea ecuație pentru câmpul sondă E_s^0 :

$$\frac{\partial E_s^0}{\partial z} = iKE_c^{0*}. \quad (5.128)$$

Complex conjugata ecuației (5.128) și ecuația (5.123) constituie, atunci, un sistem de două ecuații diferențiale liniare cuplate (amplitudinile undelor pompe nefiind afectate de procesul de conjugare de fază):

$$\frac{\partial E_s^{0*}}{\partial z} = -iK^*E_c^0; \quad (5.129)$$

$$\frac{\partial E_c^0}{\partial z} = -iKE_s^{0*}; \quad (5.130)$$

cu condițiile la limită

$$E_s^0(0) = E_{s,0}^0 \quad (5.131)$$

și

$$E_c^0(L) = 0. \quad (5.132)$$

Rezolvarea sistemului de ecuații (5.129) și (5.130) nu prezintă nici o dificultate. El admite ca soluție în intervalul $0 \leq z \leq L$:

$$E_s^{0*}(z) = E_{s,0}^{0*} \frac{\cos[|K|(z-L)]}{\cos(|K|L)} \quad (5.133)$$

și

$$E_s^{0*}(z) = -i \frac{K}{|K|} E_{s,0}^{0*} \frac{\sin[|K|(z-L)]}{\cos(|K|L)}. \quad (5.134)$$

Valoarea coeficientului de reflexie (în intensitate) al oglinzii cu conjugare de fază, definit ca în (5.127), va fi:

$$R_c = \operatorname{tg}^2(|K|L). \quad (5.135)$$

Acest coeficient de reflexie va fi, deci, mai mare decât 1 când $|K|L$ este cuprins între $\pi/4$ și $\pi/2$. Fasciculul reflectat este atunci mai intens decât fasciculul incident. Când $|K|L$ se apropie de valoarea $\pi/2$, coeficientul de reflexie tinde către infinit, în conformitate cu formula (5.135). Acest rezultat, imposibil din punct de vedere fizic, este legat de ipoteza făcută asupra constanței amplitudinilor undelor pompe în mediu. De fapt, când R_c devine mare, undele sondă și conjugată pot avea o amplitudine comparabilă cu cea a undelor pompe și, deci, modifică propagarea lor. Pentru a găsi soluția problemei în acest caz, este necesar să se rezolve sistemul de patru ecuații diferențiale cuplate, deoarece amplitudinea undelor pompe este în acest caz funcție de z . Rezolvarea completă a acestui sistem arată că R_c poate în mod efectiv să devină mai mare când $|K|L$ se apropie de $\pi/2$, observându-se experimental valori de 1000.

Un alt fenomen interesant este că apariția undei conjugată este însoțită de o amplificarea a undei sondă. Într-adevăr, din ecuațiile (5.133) și (5.134), unda sondă la ieșirea din mediul neliniar (în planul $z=L$) are ca amplitudine:

$$E_s^0(L) = \frac{E_{s,0}^0}{\cos(|K|L)}, \quad (5.136)$$

astfel încât coeficientul de transmisie T_s în intensitatea pentru unda sondă este egal cu

$$T_s = \frac{1}{\cos^2(|K|L)}, \quad (5.137)$$

care este în mod evident mai mare decât 1. Este interesant de a observa, combinând ecuațiile (5.135) și (5.137) că avem:

$$T_s - R_c = 1 \quad (5.138)$$

Relația (5.138) semnifică faptul că diferența dintre intensitățile undelor sondă și conjugată este independentă de L și coincide cu intensitatea undei sondă la intrarea în mediu. Creșterea intensității undei sondă este, deci, egală cu intensitatea undei conjugate. Cu alte cuvinte, procesul fizic creează fotoni atât în unda sondă cât și în unda conjugată. Acest lucru este natural după cum se observă din figura 5.42

care descrie conjugarea de fază ca un proces de absorbție a unui foton în fiecare din undele pompe și de emisie a unui foton în undele E_s și E_c .

5.3.3. Amestecul a patru unde degenerate ca o formă a holografiei în timp real

Procesul de amestec a patru unde degenerate este analog holografiei în volum⁽⁵⁷⁾. Holografia este un proces în două trepte în care interferența de bază formată din suprapunerea unei unde obiect E_1 și a unei unde de referință E_3 este înregistrată într-o emulsie holografică. O altă undă de referință E_4 este ulterior transmisă prin emulsie sau reflectată de aceasta, creând

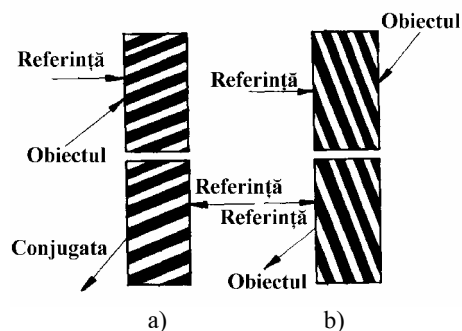


Fig. 5.46.

conjugata undei obiect $E_2 \propto E_4 E_3 E_1^*$, sau replica ei $E_2 \propto E_4 E_1 E_3^*$, depinzând de geometrie (figura 5.46 a și b). Mediul neliniar permite înregistrarea holografică simultan în timp real și procesul de reconstrucție. Acest proces are loc atât în mediul Kerr cât și în mediul fotorefractiv.

Când patru unde sunt mixate într-un mediu neliniar, fiecare pereche de unde interferează și creează o rețea, de la care a treia undă este reflectată pentru a produce a patra undă. În figura 5.46 sunt date două medii pentru înregistrarea și reconstrucția unei holograme în volum. O astfel de hologramă este construită prin folosirea unei unde de referință inversă; unda de reconstrucție este o undă conjugată care se propagă într-o direcție opusă la unda obiect originală (figura 5.46 a). O hologramă prin reflexie este obținută unda de referință și obiect sosind de la părți opuse; unda obiect este reconstruită prin reflexie de la rețea (figura 5.46 b). Rolul referinței și obiectului sunt schimbate între cele patru unde, încât există două tipuri de rețele ca cele ilustrate în figura 5.47. Să considerăm primul proces ilustrat în figura 5.47 a.

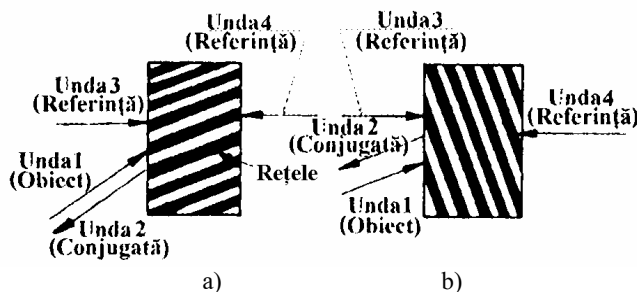


Fig. 5.47.

⁽⁵⁷⁾ H.J. Couplfield (ed.), *Handbook of optical holography*, Academic Press, New York, (1979)

Presupunem că cele două unde de referință (unde 3 și 4) sunt unde plane care se propagă în sens invers. Cele două trepte ale holografiei sunt:

Treapta 1 – Unda obiect 1 este adăugată la unda de referință 3 și intensitatea sumei lor este înregistrată în mediu ca o rețea de volum (holograma).

Treapta 2 – La reconstrucție unda de referință 4 este reflectată Bragg de la rețea pentru a forma unde conjugate (unda 2).

Această rețea este numită rețea de transmisie.

A doua posibilitate, ilustrată în figura 5.47 b, este pentru unda de referință 4 care interferează cu unda obiect 1, numită rețea de reflexie, de care a doua undă de referință 3 este reflectată pentru a crea unda conjugată 2. Aceste două rețele pot să existe împreună, dar ele au în mod uzual eficiențe diferite.

În sumar, amestecul a patru unde poate produce un mijloc pentru holografia în timp real și pentru conjugarea de fază care are un număr important de aplicații în procesarea semnalului optic.

Folosirea conjugatorilor de fază în restaurarea undei. Abilitatea de a reflecta o undă asupra ei însăși astfel încât ea să retraseze drumul ei în direcția opusă sugerează un număr de aplicații folositoare, incluzând îndepărtarea aberațiilor fronturilor de undă. Ideea este bazată pe principiul reciprocității optice, ilustrat în figura 5.48. Razele propagându-se printr-un mediu optic neliniar de la stânga la dreapta ar face același drum dacă l-ar parcurge invers și s-ar înapoia în direcție opusă. Același principiu se aplică undelor.

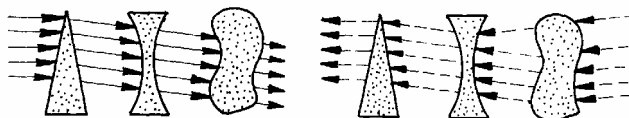


Fig. 5.48.

Dacă frontul de undă al unui fascicul este distorsionat printr-un mediu care produce aberații, unda originală poate fi refăcută prin folosirea unui conjugător care reflectă fasciculul asupra lui însuși și îl transmite o singură dată încă prin același mediu, după cum este ilustrat în figura 5.49.

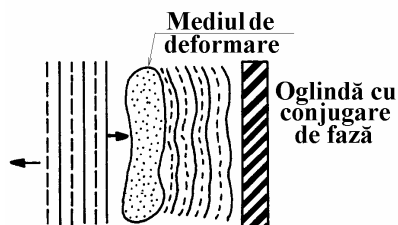


Fig. 5.49

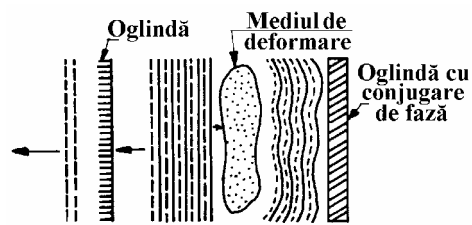


Fig. 5.50.

O altă aplicație importantă este în rezonatori optici. Dacă rezonatorul conține un mediu care produce aberații, înlocuind una din oglinzi cu o oglindă conjugată se asigură ca distorsiunea să fie înlăturată la fiecare trecere, încât au fronturile de undă nedistorsionate transmise prin oglinda ordinară (figura 5.50).

5.4. Observații asupra opticii neliniare de al treilea ordin

Neliniaritatea de ordinul al treilea este neliniaritatea de ordinul cel mai jos care se manifestă într-un mediu care posedă simetria de inversie.

Această neliniaritate are ca efect generarea armonicii a treia și efecte de amestec de unde analoage.

Unul din efectele neliniare de ordinul al treilea cel mai important este *efectul Kerr optic*, care descrie proporționalitatea indicelui de refracție al materialului cu intensitatea câmpului laser care-l traversează. Acest efect este implicat în procese foarte importante din punct de vedere practic, cum ar fi *autofocalizarea, automodularea de fază și de frecvență, propagarea fără deformare a solitonilor, amestecul a patru unde* etc.... Efectul Kerr optic joacă, de asemenea, un rol central în toate dispozitivele de comunicație și de tratare a semnalului complet optic. Exemplul tipic este o cavitate Fabry – Perot umplută cu un mediu Kerr. Aceasta se poate compara cu un veritabil tranzistor optic și poate da naștere la un fenomen de bistabilitate optică de la care se speră să fie exploatat pentru a fabrica memorii optice.

Spectroscopia neliniară dă acces la informație asupra materiei care adesea este imposibil să se obțină prin alte mijloace. Printre tehnicile *spectroscopice de absorbție, spectroscopia neliniară cu doi fotoni fără efect Doppler, ca și absorbția saturată* joacă un rol de prim plan în domeniul metrologiei frecvențelor. *Spectroscopia neliniară în transmisie* se bazează pe procesele de difuzie stimulată. *Efectul Raman stimulat* se produce între nivelele ale moleculelor sau atomilor având energii și populații diferite. Aceasta conduce la obținerea de informații asupra structurii nivelelor și factorilor lor de ocupare. *Difuzia Brillouin stimulată* corespunde difuziei luminii pe fluctuațiile de densitate asociate undelor acustice care se propagă în solide, lichide sau gaze. Acest efect furnizează informații asupra vitezei și dinamicii de propagare a sunetului în materiale. Este vorba de procesul de difuzie stimulată care dă naștere la câștigurile cele mai importante. *Difuzia Rayleigh stimulată*, sau amestecul a două unde, este legată de difuzia de lumină de modulații lente și nepropagative a anumitor observabile ale mediului sub efectul undelor incidente. Aceasta conduce, în general, la informații de natură dinamică asupra fenomenelor de relaxare care se produc în material.

Amestecul a patru unde ocupă un loc privilegiat între efectele neliniare de ordinul trei, prin bogăția proceselor la care dă naștere și, în special, cel mai celebru dintre ele: *conjugarea de fază*. Acest proces permite să se realizeze oglinzi capabile de a rectifica curbura fronturilor de undă după propagarea într-un mediu neomogen. *Aceste oglinzi cu conjugare de fază*, care pot să posedă coeficienți de reflexie mult superiori la 100%, sunt astăzi folosite pentru a ameliora performanțele anumitor laseri de putere. Procesul de conjugare de fază poate, de asemenea, să se manifeste în medii Raman și Brillouin, ca și în materialele fotorefractive. Interesul major al acestor medii este că ele permit să se realizeze *oglinzi cu conjugare de fază "autopompe"*, nenesintând două unde pompe pentru a alimenta constant oglinda. Prețul de plătit este că aceste oglinzi posedă coeficienți de reflexie inferiori la 100%, pentru că unda cu conjugare de fază este de frecvență diferită de cea a unei incidente și pentru că ele nu funcționează decât peste o intensitate incidentă de prag.