



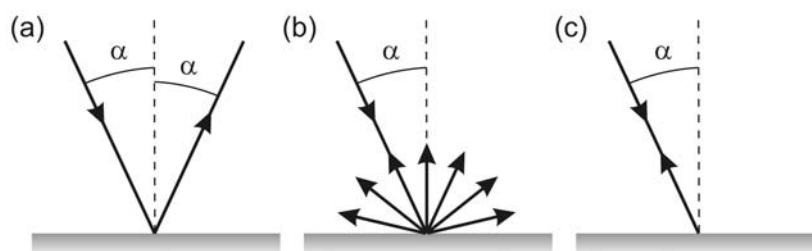
O tym, do czego służą „odblaski”

Katarzyna Cieślak

Słowo „odblaski” większości z nas kojarzy się zapewne z odzieżą i elementami odblaskowymi służącymi zwiększeniu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Jednak technologia ta ma dużo szersze zastosowanie w nauce i technice. Przyjrzyjmy się więc zjawiskom leżącym u podstaw działania materiałów odblaskowych oraz temu, jak produkuje się te materiały i do czego się je wykorzystuje.

Odbicie w kierunku padania

U podstaw działania materiałów odblaskowych leży zjawisko odbicia światła. W zależności od rodzaju powierzchni, padające promieniowanie zostaje w różnym stopniu pochłonięte, przepuszczone i odbite od danego materiału. Jeśli światło odbija się od idealnie gładkiej płaszczyzny to zachodzi znane prawo „kąta odbicia równa się kątowi padania” (Rys. 1a).

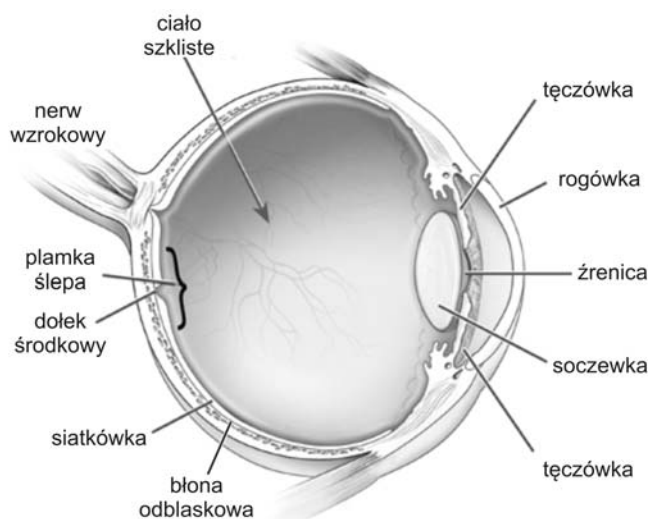


Rys. 1. Odbicie światła od: idealnie gładkiej powierzchni (a), powierzchni chropowatej (b) i powierzchni odblaskowej (c)

W przypadku, gdy materiał jest chropowaty, duża część światła ulega odbiciu rozproszonemu, podczas którego światło odbijane jest równomiernie we wszystkich kierunkach (rys. 1b). Niektóre materiały charakteryzują się taką strukturą, że światło ulega odbiciu w kierunku bliskim do tego, z jakiego pada (nie tylko, gdy pada prostopadle) (rys. 1c). To właśnie ten rodzaj odbicia, noszący nazwę *odbicia współdrożnego, powrotnego* albo *odblaskowego* (ang. *retroreflection*) stanowi podstawę działania materiałów odblaskowych. Przykładem odbicia tego typu występującym naturalnie jest świecenie oczu niektórych gatunków zwierząt prowadzących nocny tryb życia (np. koty, sowy).

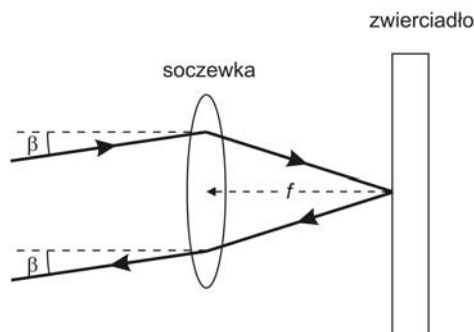
Oczy świecące w ciemności

W jaki sposób dochodzi do odbicia światła z powrotem w tym samym kierunku? Zastanówmy się nad przykładem świecących w ciemności oczu niektórych zwierząt. Oczy tych zwierząt wyposażone są w specjalną silnie odbijającą światło warstwę zwaną błoną odblaskową (*tapetum lucidum*). Warstwa ta położona jest tuż za siatkówką, w płaszczyźnie ogniskowej soczewki oka (rys. 2).



Rys. 2. Budowa oka zwierzęcia z zaznaczoną błoną odblaskową

Dla przypomnienia, siatkówka zawiera pręciki i czopki – komórki rejestrujące padające na nie promieniowanie. Dzięki warstwie odblaskowej światło po przejściu przez siatkówkę zostaje odbite i skierowane ponownie w stronę siatkówki. Zwiększa to znacznie szanse zarejestrowania promieniowania przez siatkówkę i przyczynia się do tego, że zwierzęta posiadające *tapetum lucidum* widzą dobrze nawet w warunkach słabego oświetlenia. Warstwa odblaskowa działa w tym wypadku jak lustro ustawione w płaszczyźnie ogniskowej soczewki oka (rys. 3).

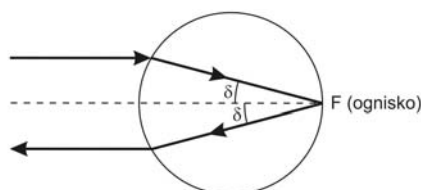


Rys. 3. Schemat działania błony odblaskowej: układ składający się z soczewki skupiającej i zwierciadła umieszczonego w płaszczyźnie ogniskowej

Wydajność odbicia współdrożnego mierzy się podając wartość luminancji, czyli ilości odbitego światła, która dociera do obserwatora. Wydajność ta zależy od kąta, pod jakim światło pada na soczewkę oka zwierzęcia oraz kąta widzenia obserwatora. Oczy wydają się najjaśniejsze (czyli luminancja jest największa), kiedy zwierzę patrzy wprost na źródło światła, w pobliżu którego znajduje się obserwator. Im większy kąt padania światła na soczewkę oka, tym mniej światła zostaje odbite z powrotem w tym samym kierunku.

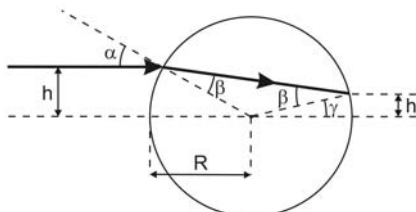
Szklane mikrokuleczki i mikropryzmaty

Podobny efekt silnego odbicia współdrożnego można uzyskać za pomocą szklanej kulki o odpowiednio dużym współczynniku załamania światła. Rozważmy promień światła padający na powierzchnię kulki w pobliżu jej osi symetrii. Jeśli współczynnik załamania światła materiału, z którego wykonana jest kulka $n \approx 2$ (rys. 4), to wówczas wszystkie promienie zostaną zogniskowane w miejscu, gdzie oś symetrii przecina tylną ściankę kulki (patrz ramka).



Rys. 4. Odbicie współdrożne w kulce szklanej o współczynniku załamania światła $n \approx 2$

Wybermy promień padający na powierzchnię kulki o promieniu R i współczynniku załamania n w odległości $h = R/2$ od osi kulki. Wtedy kąt padania $\alpha = 30^\circ$.

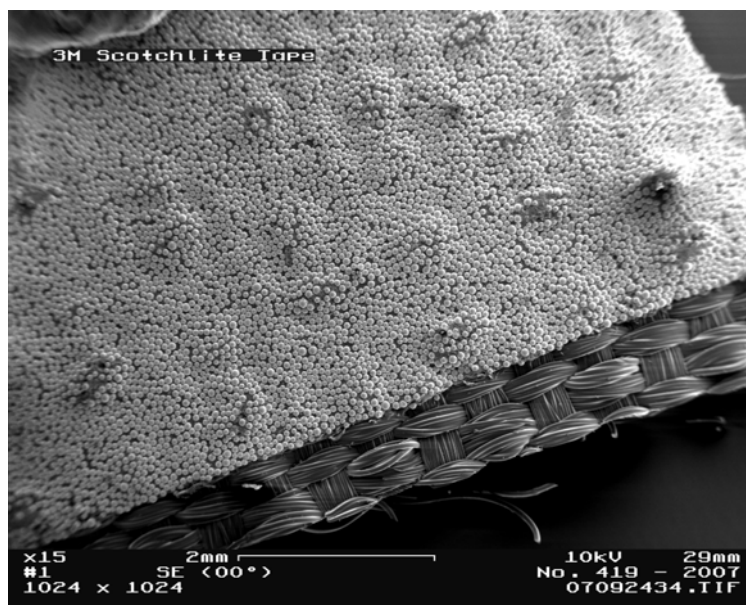


Ponieważ $30^\circ = 0,52$ rad, a $\sin 30^\circ = 0,5$, to możemy zastosować przybliżenie, że $\sin \alpha = \alpha$ oraz $\sin \beta = \beta$. W związku z tym prawo załamania przyjmie postać: $\sin \alpha = n \sin \beta$, a więc stosując przybliżenie małych kątów: $\alpha \approx n\beta$. Z rysunku wynika, że $\gamma = 2\beta - \alpha$, tak więc otrzymujemy: $\gamma \approx 2(\alpha/n) - \alpha$. Ponieważ $h' = R \sin \gamma$, to $h' \approx R(2(\alpha/n) - \alpha) = h(2/n - 1)$.

Z powyższego równania na h' wynika, że jeśli współczynnik załamania $n = 2$, to odległość od osi, w jakiej załamany w kulce promień padnie na tylną ściankę, będzie równa zero, bez względu na odległość h od osi promienia padającego na kulkę. Tak więc wszystkie przyosiowe promienie padające zostaną skupione w jednym punkcie na tylnej ściance kulki.

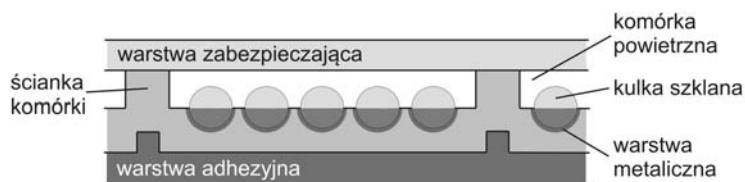
Światło ulega następnie wewnętrznemu odbiciu od tylnej ścianki i po załamaniu na przedniej powierzchni kulki rozchodzi się w powietrzu równoległe do kierunku padającego promieniowania. Choć współczynnik załamania większości szkieł jest równy około 1,5, to poprzez domieszkowanie tlenkami metali (ołowiu, lantanu, bizmutu) można uzyskać szkła charakteryzujące się dużo wyższymi wartościami tego współczynnika ($n \geq 2$).

W praktyce wydajność odbicia współdrożnego na szklanych kulkach ma jednak pewne ograniczenia. Zaledwie około jednej trzeciej powierzchni kulki jest efektywnie wykorzystywane, a podczas odbicia od tylnej ścianki tylko część światła ulega wewnętrznemu odbiciu, a reszta zostaje załamana. Dlatego, żeby zwiększyć luminancję wiązki współdrożnej, tylne ścianki kulek pokrywa się metaliczną warstwą odbijającą. Jeśli umieścimy wiele takich małych odbijających kuleczek na dużej powierzchni, to uzyskamy prototyp warstwy odbłaskowej wykorzystywanej m.in. do pokrywania znaków drogowych, fragmentów ubrań ochronnych i „srebrnych ekranów” w kinach (fot. 1).



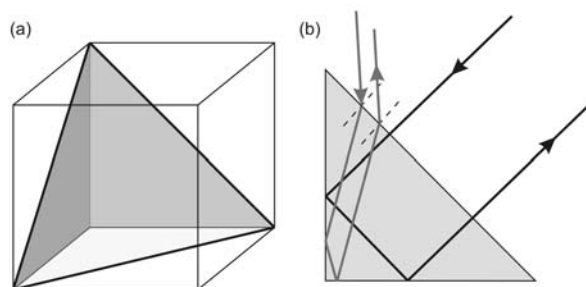
Fot. 1. Zdjęcie taśmy odbłaskowej na powierzchni ubrania ochronnego wykonane przy użyciu mikroskopu elektronowego. Widoczny splot dzianiny i mikroskopijne kuleczki szklane

Poniższy rysunek przedstawia schemat budowy współcześnie produkowanej folii odbłaskowej wysokiej jakości, zawierającej szklane mikrokuleczki. Aby zapobiec gromadzeniu się zabrudzeń na powierzchni kulek, co znacznie zmniejszyłoby efektywność odbicia, folie dzieli się na małe komórki pokryte z wierzchu warstwą zabezpieczającą, wewnątrz których umieszcza się kulki.



Rys. 5. Schemat budowy folii odbłaskowej zawierającej mikrokulki szklane

Innym sposobem uzyskania efektu odbicia współdrożnego jest zastosowanie tzw. *reflektora rogowego*. Reflektor ten składa się z trzech wzajemnie prostopadłych powierzchni odbijających. Wyobraźmy sobie, że ucinamy róg szklanego sześcienu wzdłuż przekątnych trzech schodzących się w tym rogu ścian (Rys. 6a) – otrzymamy w ten sposób pryzmat, którego trzy ściany będą trójkątami prostokątnymi, a podstawa – trójkątem równobocznym. Jeśli oświetlimy pryzmat np. prostopadle do podstawy, to światło ulegnie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu kolejno od każdej ze ścianek i wróci w kierunku równoległym do kierunku padania (Rys. 6b).

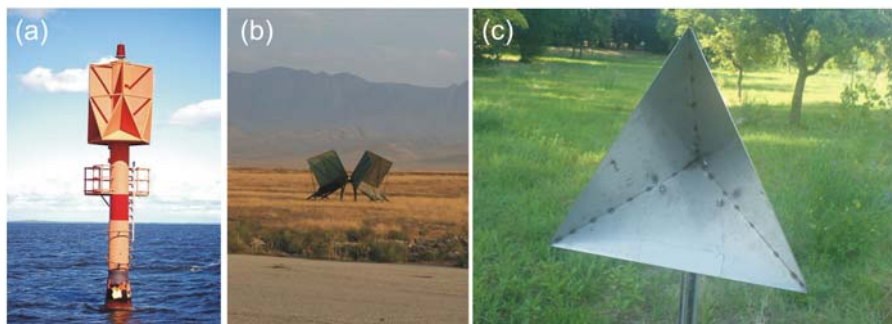


Rys. 6. Reflektor rogowy (a); odbicie współdrożne w reflektorze rogowym (b)

Pryzmaty tego rodzaju używane są w miernictwie geodezyjnym (fot. 2), a metalowe różki odbijające działające na tej samej zasadzie wykorzystywane są w radiolokacji (fot. 3).

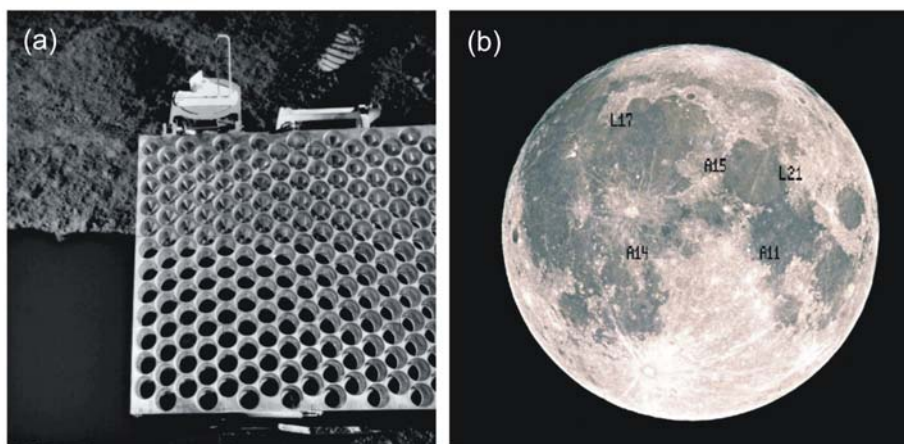


Fot. 2. Pryzmat wykorzystywany do obijania wiązki laserowej w miernictwie geodezyjnym.



Fot. 3. Metalowe rożki odbijające wykorzystywane w radiolokacji

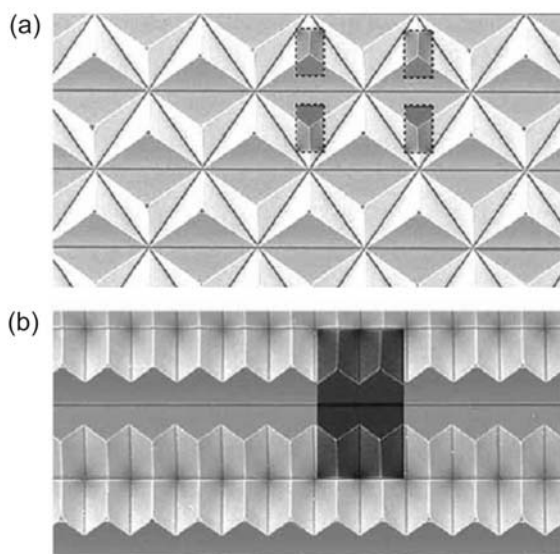
Reflektor rogowy odbija skierowaną na niego wiązkę fal elektromagnetycznych (światła laserowego w przypadku mierników geodezyjnych lub fal radiowych w przypadku pomiarów radarowych), co dzięki znajomości prędkości tych fal pozwala na dokładne obliczenie odległości od reflektora. Zestawy reflektorów rogowych zostały również umieszczone na powierzchni Księżyca w czasie amerykańskich misji Apollo 11, 14 i 15 oraz radzieckich misji Luna 17 i 21 (fot. 4). Umożliwiły one bardzo dokładne pomiary orbity Księżyca.



Fot. 4. Macierz 300 reflektorów rogowych umieszczona na powierzchni Księżyca w ramach misji Apollo 15 (a); lokalizacja zestawów reflektorów rogowych pozostawionych na Księżycu podczas amerykańskich i radzieckich misji kosmicznych (b)

Efektywność odbicia współdrożnego reflektora rogowego zależy od kąta padania wiązki światła i jest stosunkowo wysoka dopóki kąt padania nie przekracza około 10° . Straty zachodzą też w przypadku, gdy wiązka światła pada w pobliżu narożników pryzmatu. Szacuje się, że w ten sposób tracone jest około

35% padającego promieniowania. Sposobem obejścia tego problemu jest... wyeliminowanie tych obszarów. Najnowocześniejsze pryzmatyczne folie odbłaskowe zbudowane są więc nie z pryzmatów ale wyłącznie z ich najwydajniej odbijających fragmentów, co pozwala zminimalizować straty przy odbiciu (rys. 7b).



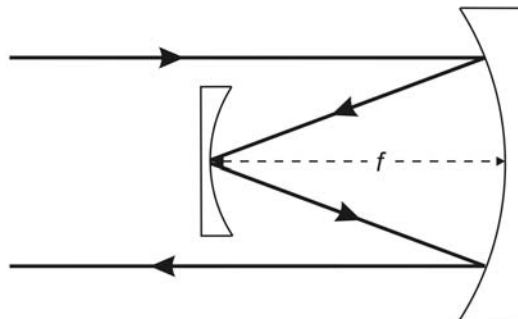
Rys. 7. Schemat budowy pryzmatycznych folii odbłaskowych: (a) standardowa folia mikropryzmatyczna z zaznaczonymi czterema obszarami o maksymalnym odbiciu współdrożnym, (b) 3M Dimond Grade Cubed (DG3)

Folie odbłaskowe wyposaża się czasem dodatkowo w warstwę materiału fluorescencyjnego, która poprawia widoczność w trudnych warunkach atmosferycznych, panujących podczas dużego zachmurzenia, o zmroku lub o świcie.

Oprócz oczywistych zastosowań związanych z bezpieczeństwem ruchu drogowego wspominaliśmy już poprzednio, że efekt odbicia współdrożnego stosowany jest również w pomiarach odległości i radiolokacji. Na zakończenie warto wspomnieć o dwóch innych szczególnych sposobach wykorzystania tego efektu w badaniach naukowych i technice.

Dylatometry

Jak widzieliśmy wcześniej najprostszym układem optycznym zapewniającym odbicie współdrożne jest zestaw: soczewka dwuwypukła + zwierciadło (rys. 3). Analogicznie działa system składający się z dwóch zwierciadeł wklęsłych (rys. 8), z których jedno (mniejsze) umieszcza się w ognisku drugiego (większego).

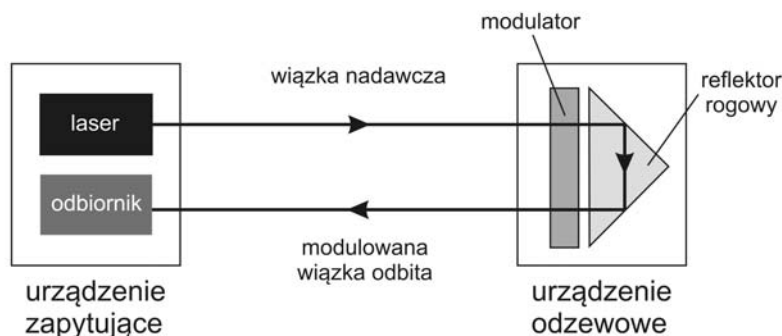


Rys. 8. Odbicie współdrożne w układzie dwóch zwierciadeł wklęsłych

Układy tego typu stosowane są w laserowych interferometrach do pomiaru rozszerzalności cieplnej, tzw. *dylatometrach*. Urządzenia te służą do śledzenia zmian rozmiarów obiektów poddawanych obróbce cieplnej, a także do monitorowania przebiegu procesów chemicznych, w których dochodzi do znacznych zmian objętości (np. polimeryzacja).

Modulujące reflektory odbłaskowe

Połączenie pasywnego odbicia współdrożnego z metodami elektro-optycznej modulacji wiązki światła laserowego doprowadziło również do powstania nowoczesnej metody asymetrycznej komunikacji przy użyciu tzw. *modulujących reflektorów odbłaskowych* (ang. *modulating retroreflectors*). Podstawowe zalety tej metody to możliwość bardzo szybkiego przesyłu dużej ilości danych, małe ryzyko przechwycenia transmitowanej informacji, oraz niskie zużycie mocy. Z tego względu techniką tą interesuje się m.in. wojsko oraz grupy badawcze zajmujące się udoskonalaniem komunikacji na pokładach statków kosmicznych. Zasada transmisji sygnału przy pomocy modulującego reflektora odbłaskowego przedstawiona została schematycznie na poniższym rysunku (rys. 9).



Rys. 9. Schemat działania modulującego reflektora odbłaskowego

Sygnal nadawczy w postaci wiązki światła laserowego zostaje wysłany przez tzw. *urządzenie zapytujące* w stronę *urządzenia odzewowego*, w którego skład wchodzi reflektor rogowy lub inny odblaskowy układ optyczny (układ soczewek i luster). Urządzenie odzewowe wyposażone jest w system modulujący padającą wiązkę światła. System ten umieszczony jest na przedniej ścianie reflektora rogowego (lub w ognisku układu odblaskowego). W ten sposób pasywnie odbita przez reflektor wiązka przechodzi przez modulator zanim zostanie przesłana z powrotem w kierunku urządzenia zapytującego. Jako modulatory wykorzystuje się różnego typu „przełączniki” sterowane elektronicznie, takie jak: modulatory elektroabsorpcyjne, akustooptyczne, mikromechaniczne (MEMS) i inne. Zasada ich działania polega na zmianie współczynnika załamania lub absorpcji przechodzącego przez nie światła albo na modulacji natężenia światła poprzez umieszczenie na drodze odbitej wiązki ruchomej przesłony.

Powyższe przykłady sugerują, że współczesne zastosowania materiałów odblaskowych w technice i nauce są więc bardzo szerokie: od produkcji powłok znaków drogowych i ekranów kinowych, poprzez badania orbity Księżyca, precyzyjne pomiary interferometryczne, aż po nowoczesne metody komunikacji. Z pewnością ich kariera na tym się nie skończy.

Literatura

- [1] J. Lloyd, *A brief history of retroreflective sign face sheet materials*, Understanding retroreflectivity, 2008 (www.rema.org.uk/pdf/history-retroreflective-materials.pdf)
- [2] C.E. Mungan, *The cat's eye retroreflector*, 2001 (<http://www.usna.edu/Users/physics/mungan/Scholarship/Retroreflector.pdf>)
- [3] I. Berkes, *La physique de tous les jours*, Vuibert 2006
- [4] D. Ren, K.M. Lawton, J.A. Miller, *Application of cat's-eye retroreflector in micro-displacement measurement*, Precision Engineering, 2007
- [5] W. Rabinovich, P.G. Goetz, R. Mahon, L. Swingen, J. Murphy, M. Ferraro, H.R. Burris Jr., C.I. Moore, M. Suite, S. Binari, *45-Mbit/s cat's eye modulating retroreflectors*, Optical Engineering, 2007