

URZĄD PATENTOWY w WARSZAWIE OPIS PATENTOWY

G02b1/10

Nr 32347

Kl. 42 h, 8

Jenaer Glaswerk Schott & Gen., Jena

Powłoka przedmiotu niemetalowego, składająca się z trzech co najmniej warstewek o różnym współczynniku załamania i zmniejszająca odbicie od powierzchni tego przedmiotu

Zgłoszono 10 lipca 1941

Udzielono 8 listopada 1943

Pierwszeństwo: 18 lipca 1940 (Niemcy)

Odbicie od powierzchni szklanej (lub innej powierzchni niemetalowej) można, jak wiadomo, zmniejszyć przez powleczenie jej warstewką materiału o grubości około $0,1 \mu$ i o współczynniku załamania mniejszym od współczynnika załamania samego szkła. Natenczas bowiem powstaje interferencja wiązek świetlnych, odbijających się na granicy pomiędzy powietrzem a warstewką i na granicy pomiędzy warstewką tą a szkłem, która osłabia światło odbite. Może zachodzić nawet zupełne wygaszanie wzajemne, gdy spełniony jest warunek, że współczynnik załamania powłoki jest równy pierwiastkowi ze współczynnika załamania szkła, a jedno-

cześnie grubość optyczna powłoki (tj. grubość d powłoki pomnożona przez współczynnik załamania n) stanowi nieparzystą wielokrotność ćwiartki długości fali światła przenikającego. Ostatni ten warunek można jednak osiągnąć jedynie w odniesieniu do światła o określonej długości fali. Z tego powodu zaleca się dobierać grubość optyczną powłoki w ten sposób, aby odbicie w maksimum wrażliwości oka, tj. przy około $\lambda_0 = 555 \text{ m}\mu$, spadło do zera, a więc w ten sposób, by $0,14 \mu \sim \lambda_0/4$. Idąc w kierunku czerwieni i niebieskiej barwy odbicie wówczas wzrasta stopniowo, tak iż potraktowana w ten sposób powierzchnia szkła odbija światło o ciemnopurpu-

wej barwie. Średnie odbicie subiektywne, to znaczy wrażenie jasności dla oka całkowitego światła odbitego, nie staje się przeto równe zeru. W przypadku źródła światła, którego temperatura odpowiada ciału czarnemu o 3000° — 5000°C , każda z powierzchni odbija ilość R o wartości 0,06%, gdy szkło posiada współczynnik załamania 1,5. Wielkość ta wynosi tylko 1,5% odbicia od niepowleczonej powierzchni szklanej, a więc uzyskuje się wynik bardzo pomyślny, ale potrzeba do tego powłok zgodnie z założeniem o współczynniku załamania $1,22 = \sqrt{1,5}$. Wyniki te można wprawdzie osiągnąć nadając powłoce budowę szkieletu wypełnionego powietrzem, bądź to przez kolejne rozpuszczanie składników warstwy, bądź też przez naparowywanie materiału w szczególnych warunkach; są one jednak tak miękkie i delikatne, że można je stosować tylko w położeniu zabezpieczonym. Jeżeli grubość powłoki zostanie zwiększona do $3\lambda_0/4$, $5\lambda_0/4$ itd., co znowu przy λ_0 prowadzi do odbicia równego zeru, to R wzrasta bardzo szybko.

W celach praktycznych bywa zazwyczaj rzeczą pożądaną, aby powłoki mogły wytrzymywać grubszą obróbkę, to jest aby były odporne na wpływy zewnętrzne oraz częste czyszczenie. Jest to możliwe jedynie wtedy, gdy wykonane są one z materiału dość twardego. Ale już przy niewielkiej wytrzymałości mechanicznej powłoki podobne posiadają współczynnik załamania co najmniej 1,4; na ogół wypada posługiwać się tu liczbą o wartości 1,45 lub jeszcze większej. Warunkowi, iż współczynnik załamania szkła powinien być równy kwadratowi tej wielkości, odpowiadałyby dopiero gatunki szkła o współczynniku załamania wynoszącym 1,95 względnie 2,1. Podobne szkło stosuje się jednak tylko do bardzo nielicznych celów, ponadto każda powierzchnia przybierałaby śred-

nie subiektywne wartości odbicia R wynoszące od 0,17 względnie 0,20%.

Inne znane rozwiązania zagadnienia, które również dopuszczają stosowanie na szklach normalnych powłok wytrzymałych mechanicznie, polega na tym, że wyzyskuje się nie tylko wzajemne osłabianie się dwóch promieni odbitych, lecz stosuje również trzy lub większą liczbę odbić. Warunek wzajemnego wygaszania się tychże w odniesieniu do fal określonej długości polega na tym, że poszczególne odbite składniki światła, jego wielkość i fazy można układać w zamknięty wielobok wektorów. Najprostszy i najkorzystniejszy przypadek urzeczywistnia się wówczas, gdy na szkło zostaje najpierw nałożona warstewka substancji silniej załamującej, a następnie warstewka załamująca słabiej o właściwym współczynniku załamania (każda o grubości $\lambda_0/4$). Obierając stosunki ponownie w ten sposób, by w przedziale widmowym o największej wrażliwości oka, to jest przy $\lambda_0 = 555 \text{ m}\mu$, odbicie ginęło, obrachowuje się taki przebieg odbicia fal pozostałych długości, że w odniesieniu do szkła o współczynniku załamania 1,5 przy stosowaniu warstewki zewnętrznej o współczynniku załamania $n_1 = 1,45$ oraz warstewki wewnętrznej o współczynniku załamania $n_2 = 1,775$ odbicie R wynosi około 0,4%. Podobny układ, nazywany dla odróżnienia dwuwarstwowym, działa przeto optycznie na ogół gorzej, niż wzmiankowany na wstępie układ jednowarstewkowy o grubości $\lambda_0/4$. Ponieważ również i przy układzie jednowarstewkowym R silnie wzrasta wraz z grubością warstewki, jak to nadmieniono wyżej, prowadziło to do błędnego poglądu (Physical Review, tom 55, 1939, str. 402), iż R wypada o tyle niedogodniej, im większa jest całkowita grubość wszystkich warstewek. Wskutek tego nie próbowano dotychczas stosować więcej niż dwu warstewek w celu uzyskania zmniejszenia odbicia. Zadowalano się

raczej we wszystkich znanych przyrządach, a zwłaszcza przy posługiwaniu się mechanicznie wytrzymałymi powłokami, zmniejszeniem średniego odbicia subiektywnego na każdą powierzchnię do 0,4% albo i większym.

W przeciwieństwie do tego można według wynalazku niniejszego stosując trzy albo lepiej cztery lub jeszcze większą liczbę warstewek o grubości $0,1 \mu$ osiągnąć bardzo wydajne polepszenie wtedy, gdy współczynniki załamania warstewek spełniają warunki określone.

W celu ułatwienia opis poniższy posługuje się następującymi określeniami. Amplituda światła odbitego od powierzchni pomiędzy k -tą i $(k+1)$ -ą warstewką jest oznaczana a_k . Skoro światło pada prostopadle, natenczas a_k jest związane ze współczynnikiem załamania n_k warstewki k -tej oraz współczynnikiem n_{k+1} warstewki $(k+1)$ -ej równaniem Fresnela.

$$1. \quad a_k = (n_{k+1} - n_k) / (n_{k+1} + n_k)$$

przy czym $k = 0$ oznacza ośrodek zewnętrzny, a zatem na ogół powietrze ($n_0 = 1$). Jeżeli liczbę kolejnych warstewek oznacza się przez m , to warstewka $m+1$ odpowiada samemu szkle ($n_{m+1} = n_g$). Warunki takich układów warstewek, w których średnie odbicie subiektywne R jest szczególnie małe, można sformułować bardzo prosto i przejrzysto, posługując się nie samymi współczynnikami załamania, lecz wartościami a_k albo ich ilorazami z podzielenia przez a_0 , to jest przez amplitudę światła odbitego od pierwszej warstewki, a_k/a_0 . Za pomocą prostego rachunku można wówczas w sposób bardzo prosty obliczyć wartości współczynników załamania. Z równania 1 otrzymuje się mianowicie

$$2. \quad n_{k+1} = n_k (1 + a_k) / (1 - a_k).$$

Ponieważ współczynnik załamania n_0 ośrodka zewnętrznego jest znany, otrzymuje się przeto np.

$$3a. \quad n_1 = n_0 \cdot \frac{1 + a_0}{1 - a_0}$$

$$3b. \quad n_2 = n_1 \cdot \frac{1 + a_1}{1 - a_1} = \\ = n_0 \cdot \frac{1 + a_0}{1 - a_0} \cdot \frac{1 + a_1}{1 - a_1}.$$

Podobnie uzyskuje się następne współczynniki załamania, i wreszcie

$$3c. \quad n_g = n_0 \cdot \frac{1 + a_0}{1 - a_0} \cdot \frac{1 + a_1}{1 - a_1} \cdots \frac{1 + a_m}{1 - a_m}.$$

Równanie 3c można zastąpić z zadowalającym przybliżeniem równaniem dogodniejszym

$$3d. \quad [n_g - n_0] : [n_g + n_0] = a_0 + a_1 + a_2 \dots a_m$$

Ponieważ n_g należy również uważać za znane, przeto równania 3c lub 3d dają równania o $m+1$ wartościach a_0 do a_m spełniające się na ogół, gdy poszczególne warstewki są jednorodne pod względem ich współczynników załamania; warunek ten stanowi założenie.

Zmniejszenie odbicia, osiągnięte w obranym układzie, znamionuje równanie.

$$4. \quad a_0 - a_1 + a_2 - a_3 + \dots = 0.$$

Równanie to stanowi wyraz matematyczny znanego ogólnego warunku, aby poszczególne odbite składniki światła można było wyrazić zamkniętym wielobokiem wektorowym, a mianowicie w szczególnym przypadku, gdy poszczególne grubości warstewek wynoszą $\lambda_0/4$, wszystkie boki wieloboku są do siebie równoległe. Natenczas droga odbitych promieni częściowych, rosnąca od warstewki do warstewki o $\lambda_0/2$, musi wywołać przesunięcie fazowe zawsze o 180° , wskutek czego poszczególne (dodatnie lub ujemne) amplitudy światła a_k sumują się ze znakami kolejno się zmieniającymi. Układy, w których osiąga się zamknięcie wieloboku, oznacza się w dalszym opisie jako rozwiązanie zagadnienia. Skoro wielobok wektorowy nie zamknie się,

to również i dla światła o długości fali λ_0 pozostaje wektor reszkowy o wielkości amplitudy $= a_r$, któremu odpowiada wartość odbicia $R_r = 100 a_r^2 \%$. Tylko wtedy, gdy wartość ta jest mniejsza lub co najwyżej dająca się porównać ze średnim subiektywnym odbiciem R spowodowanym zależnością długości fali odbitej od powierzchni, to jest gdy $R_r \leq 0,5\%$ albo $a_r \leq 0,07$, zastosowanie więcej niż dwóch warstewek stanowi postęp. Wszystkie inne przypadki nie dają przeto rozwiązania zadania według wynalazku.

Ponieważ na ogół pożądane jest zmniejszenie odbicia w przypadku, gdy odnośna powierzchnia szklana styka się ze szkłem, zakłada się zawsze w tekście dalszym $n_0 = 1$.

Z obu równań 3d i 4 dla $m + 1$ wielkości a_n do a_m wynika, że jeszcze $m - 1$ rozmaitych wartości a można obrać z góry dowolnie. Można wykazać, że średnie odbicie subiektywne wyraża się wzorem:

$$5. \quad R = a_0^2 N [a_1/a_0, a_2/a_0, a_3/a_0, \dots]$$

w którym N oznacza nieznana tymczasem funkcję stosunków amplitud a_k/a_0 zawierającą podział jasności źródła światła oraz światła odbitego. Wynika stąd, że przy stałej wartości tych stosunków R jest tym mniejsze, im mniejsze jest a_0 , a więc — z uwzględnieniem równania 1 — im mniejsze jest n_1 . Należy przeto współczynnik załamania n_1 warstwy zewnętrznej obierać możliwie małym, o ile pozwalają jeszcze na to warunki wytrzymałości mechanicznej. Według wynalazku należy poza tym dobierać wartości stosunków amplitud a_1/a_0 oraz a_2/a_0 w taki sposób, aby prowadziły one do możliwie najmniejszej wartości funkcji N , a mianowicie w myśl danych następujących.

Udało się ustalić, że przy czterech warstewkach funkcja N osiąga wartość najmniejszą, gdy a_1 i a_2 przybierają wartości,

które można wyrazić następującymi równaniami dla stosunków amplitud.

$$6. \quad (a_1/a_0)_{(\text{opt})} = 1,66 + 0,31 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}$$

$$7. \quad (a_2/a_0)_{(\text{opt})} = -0,27 + 0,63 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}$$

Natenczas można obliczyć a_3 i a_4 na zasadzie równań 3d i 4 z wartości a_1 i a_2 według wartości a_0 dla danych wartości n_1 .

$$8. \quad a_3 = -a_1 + 0,5 (n_g - 1) / (n_g + 1)$$

$$9. \quad a_4 = -a_0 - a_2 + 0,5 (n_g - 1) / (n_g + 1).$$

Równania 6—9 ustalają dla każdej obranej wartości n_g oraz n_1 pozostałe współczynniki załamania układu czterowarstewkowego. Więc np. $n_1 = 1,23$, a $n_g = 1,50$.

Przykład 1.

$$\begin{array}{llll} n_1 = 1,23 & a_0 = & 0,103 & \\ n_2 = 1,975 & a_1 = & 0,234 & a_1/a_0 = 2,27 \\ n_3 = 2,41 & a_2 = & 0,100 & a_2/a_0 = 0,97 \\ n_4 = 1,84 & a_3 = & -0,134 & \\ n_g = 1,50 & a_4 = & -0,103 & R = 0,003\% \end{array}$$

W celu dodania wektorów odpowiadających temu rozwiązaniu w wielobok wektorów o bokach równoległych sobie z uwagi na wzmiankowane powyżej przesunięcie faz o 180° wektory należące do a_0 , a_2 oraz a_4 należy mierzyć w kierunku odwrotnym do a_1 oraz a_3 . Wartości dodatnie wielkości a_0 , a_2 oraz a_4 , jak również wartości ujemne a_1 oraz a_3 odkłada się na prawo, a wartości ujemne a_0 , a_2 oraz a_4 tudzież wartości dodatnie a_1 oraz a_3 — odkłada się na lewo. Powyższy układ wektorów przedstawia fig. 1. Poszczególne wektory w celu większej jasności są przesunięte nieco względem siebie.

Fig. 2 i 3 wskazują najpomysłniejsze układy dwuwarstewkowe oraz najpomysłniejszy układ jednowarstewkowy. Z porównania z fig. 1 widać, że podstawowy dobór wartości a był nieprzewidywany i w

każdym razie nie wynikał sam przez się, gdyż zamknięcie ciągu wektorów zachodzi nie na drodze najkrótszej, jak dla układu jednowarstwowego lub dwuwarstwowego.

Gdyby więc pozostawiono na fig. 1 bez zmiany długość wektorów dopuszczając jednak inne kąty niż 0° i 180° , to otrzymalibyśmy również rozwiązanie zadania w myśl wynalazku, jak to przedstawiono na fig. 4—6. Podobne rozwiązania są jednak mniej korzystne i nadają się jedynie wówczas, gdy odchylenia od kątów 0° lub 180° są nieznaczne. Posiadają one jednak znaczenie praktyczne o tyle, że pozostawiają pewną swobodę zachowania pożądanej grubości warstwek $\lambda_0/4$. Co do możliwych form można z łatwością zdać sobie sprawę wyobrażając sobie pręty o stałej długości wektorów, połączone ze sobą przegubami, i rozmaite obroty tego układu (fig. 4). Istnieją jeszcze i inne rozwiązania w zakresie wynalazku, otrzymywane np. w ten sposób, że a_3 i a_4 zmieniają się o tę samą wartość, przy czym jednak ich suma pozostaje stała, w tym bowiem przypadku spełnia się równanie 3d. Rozwiązania te podają równania 5 i 6. Również i te rozwiązania posiadają wartość praktyczną jedynie wówczas, gdy odchylenia kątów od 0° do 180° pozostają nieznaczne. Oznaczają one tylko jedynie pewną dodatkową swobodę przy doborze współczynników załamania. Grubość optyczną $n_k d_k$ można obliczyć dla warstwy k -tej z kąta φ_k pomiędzy wektorami a_{k-1} i a_k

$$n_k d_k = (\lambda_0/2) \varphi_k/360^\circ$$

lub

$$n_k d_k = (\lambda_0/2) (\lambda_k + 180^\circ)/360^\circ,$$

stosownie do tego, czy n_k jest większe, czy mniejsze, niż współczynnik załamania jednego tylko lub obu środowisk.

Jeżeli za warstewkę zewnętrzną przyjmie się warstewkę nieporowatą, np. składającą się z fluorku magnezowego MgF_2

o $n = 1,39$, to dla n_3 otrzyma się wartość 3,27, której nie można osiągnąć za pomocą substancji wolnych od pochłaniania. Musi się przeto przedsięwziąć środki, które pod względem subiektywnego obniżenia odbicia są mniej korzystne.

Jeżeli w układzie współrzędnych odłożą się wartości a_1/a_0 jako odcięte, a wartości a_2/a_0 jako rzędne, oznaczy się liczby N odpowiadające parom a_1/a_0 i a_2/a_0 tych wartości i połączy się jednakowe wartości liniami, to otrzyma się obraz według fig. 7 z wartościami N od 0,003 do 0,085. Krzywe tej samej wartości N uzyskuje się w postaci nachylonych o 45° elips współśrodkowych, których środek stanowi najlepsze rozwiązanie równań 6 i 7. Fig. 7 odpowiada wartościom

$$\frac{1}{a_0} \cdot \frac{n_g - 1}{n_g + 1} = 1,08 \text{ i np. dla } n_g = 1,50 \text{ i } n_1 = 1,45,$$

Dla innych wartości n_g i n_1 przesuwają się tylko odpowiednio do równań 6 i 7 położenie środka, wielkość zaś i nachylenie osi elips pozostają te same, jak to będzie wyjaśnione poniżej. Stosunek osi posiada dla wszystkich elips tę samą mniej więcej wartość cyfrową 5. Z wartości N określa się średnie subiektywne odbicie R każdej powierzchni w częściach setnych światła padającego na $100 a_0^2 N$. Można się przekonać, że wzdłuż linii $g_1 g_1$, $g_2 g_2$ i $g_3 g_3$, załamanych przy $a_2/a_0 = 0$, współczynnik załamania warstwy o załamaniu największym pozostaje zawsze stałym, np. dla $g_1 g_1$ $n_{\max} = 2,99$, dla $g_2 g_2$ $n_{\max} = 2,57$ i dla $g_3 g_3$ $n_{\max} = 2,21$, jak to uwidoczniono na fig. 7. Dla danej wartości o załamaniu największym układy o najmniejszej wartości liczby N są przeto te, w których proste te stają się stycznymi elips przy $a_2/a_0 \geq 0$, a więc te, które leżą na prostej, wzdłuż której biegną wielkie osie elips. Przy $a_2/a_0 < 0$ przypadają one na prostych nachylonych nieco słabiej, różnica jest jednak bardzo nieznaczna. Można przeto po-

dać na ogół, że przy zadanej największej wartości $n_{\max}$ wszystkich współczynników załamania warstewek otrzymuje się najkorzystniejsze rozwiązanie równania

10. $a_1/a_0 - [a_1/a_0]_{\text{opt}} = a_2/a_0 - [a_2/a_0]_{\text{opt}}$,
przy czym $[a_1/a_0]_{\text{opt}}$ i $[a_2/a_0]_{\text{opt}}$ wynikają z równań 6 i 7. Równanie 10 można przeto napisać jeszcze i tak

$$10a. \quad a_1/a_0 = a_2/a_0 \mp 1,93 - 0,32 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}.$$

Dla wartości $n_g = 1,50$ a $n_1 = 1,45$ zgodnie z fig. 7 najdogodniejsze wartości a_1/a_0 i a_2/a_0 są podane na fig. 8 jako funkcje największego załamania $n_{\max}$. Fig. 9 uwidocznia wartość N i R dla podobnych ukła-

dów jako funkcję $n_{\max}$. Dla innych wartości n_1 oraz n_g odpowiednie krzywe można obliczyć bez trudności za pomocą równania 10a oraz równań przybliżonych

$$11. \quad \frac{1}{a_0} \cdot \frac{n_{\max} - 1}{n_{\max} + 1} - 1 = a_1/a_0 \quad \text{dla } a_2/a_0 \leq 0$$

$$12. \quad \frac{1}{a_0} \cdot \frac{n_{\max} - 1}{n_{\max} + 1} - 1 = a_1/a_0 + a_2/a_0 \\ \text{dla } a_2/a_0 \geq 0.$$

Najkorzystniejszym rozwiązaniem czterowarstewkowym z zastosowaniem warstewek nieporowatych o współczynniku załamania co najwyżej równym 2,89 stanowiłby układ o średnim odbiciu subiektywnym R dla każdej powierzchni równym 0,01%.

Przykład 2.

$n_1 = 1,39$ fluorek magnezu
 $n_2 = 2,60$ mieszanina selenku cynku
z siarczkiem cynku
 $n_3 = 2,89$ selenek cynku
 $n_4 = 1,92$ mieszanina dwutlenku tytanu
z dwutlenkiem krzemu
 $n_g = 1,52$

$a_0 = 0,163$
 $a_1 = 0,303 \quad a_1/a_0 = +1,86$
 $a_2 = 0,0522 \quad a_2/a_0 = +0,32$
 $a_3 = -0,203$
 $a_4 = -0,1142$
 $R = 0,01\%$.

Rozważane dotychczas rozwiązania czterowarstewkowe przechodzą oczywiście w rozwiązania trójwarstewkowe, gdy jedna z wartości a_k/a_0 , a więc a_k staje się zerem. Z równania 1 wynika wówczas, że $n_{k+1} = n_k$, dwie sąsiednie warstewki można wówczas uważać za optycznie jedna-

kowe. Dla $a_2/a_0 = 0$ rozwiązania trójwarstewkowe leżą na prostej A (fig. 7) z najkorzystniejszym układem dla $a_1/a_0 = 0,6$.

W następnym przykładzie warstewka druga posiada wartość $\lambda_0/2$, a pierwsza i trzecia (każda) — grubość $\lambda_0/4$.

Przykład 3.

$n_1 = 1,45$ $a_0 = 0,1835$
druga warstewka: $n_2 = 2,66$ $a_1 = 0,294 \quad a_1/a_0 = 1,6$
 $n_3 = 2,66$ $a_2 = 0 \quad a_2/a_0 = 0$
trzecia warstewka: $n_4 = 1,795$ $a_3 = -0,194$
 $a_4 = -0,0835$
 $n_g = 1,52$ $R = 0,03\%$.

Przykład ten wykazuje jedno tylko średnie odbicie subiektywne 0,03%, należy je przeto uznać za nadzwyczaj dobre. Można nałożyć np. jako warstewkę wewnętrzną mieszaninę dwutlenku tytanu z dwutlenkiem krzemu, a następnie warstewkę z równych części siarczku cynku oraz selenku cynku i wreszcie warstewkę dwutlenku krzemu. Warstewki te nie wykazują na ogół w praktyce pochłaniania i są mechanicznie wytrzymałe. Inne rozwiązania trójwarstewkowe uzyskuje się zakładając $a_4/a_0 = 0$. Wówczas warstewka najniższa jest optycznie jednakowa ze szkłem, a z równania 9 wynika, po wstawieniu wartości n_1 i n_g , że $a_2/a_0 = -0,455$, gdy a_1/a_0 jest dowolne. Te rozwiązania leżą przeto na prostej B według fig. 7. Najkorzystniejszy układ uzyskuje się w punkcie przecięcia się tej prostej z wielką osią elipsy przy $a_1/a_0 = 1,15$.

Następny przykład (4) daje średnie odbicie subiektywne 0,07%, jest przeto praktycznie biorąc bardzo korzystny, jak w przypadku, gdyby zechciano stosować tylko jedną warstewkę, dla której musiałoby być $n_1 = 1,23$ i która ulegałaby łatwo mechanicznemu uszkodzeniu; potrzebny współczynnik załamania $n_2 = 2,23$ można łatwo osiągnąć za pomocą nadającego się technicznie dwutlenku tytanu.

Przykład 4.

$$\begin{array}{llll} n_1 = 1,45 & a_0 = & 0,1835 & \\ n_2 = 2,23 & a_1 = & 0,211 & a_1/a_0 = 1,15 \\ n_3 = 1,885 & a_2 = & -0,0836 & a_2/a_0 = -0,455 \\ n_g = 1,51 & a_3 = & -0,111 & R = 0,07\% \end{array}$$

Wreszcie istnieją jeszcze inne trójwarstewkowe rozwiązania dla $a_3/a_0 = 0$. W tym przypadku przez wstawienie wartości $n_1 = 1,45$ oraz $n_g = 1,5$ do równania 8 uzyskuje się wartość $a_1/a_2 = 0,545$, gdy a_2/a_0 pozostaje dowolne. Rozwiązania te leżą przeto na prostopadłej C (fig. 7) i są najkorzystniejsze dla punktu jej prze-

cięcia z wielką osią elipsy w $a_2/a_0 = -1,06$. Wówczas otrzymuje się jednak bardzo małe wartości dla $n_3 = n_4$, a jak to wynika z fig. 7 — wartości bardzo wielkie dla N , tak że te trzy rozwiązania warstewkowe nie zdają się posiadać znaczenia praktycznego.

Punkt przecięcia F obu prostych B i C odpowiada oczywiście rozwiązaniu dwuwarstewkowemu, ponieważ zanikają tu jednocześnie a_3 i a_4 , a więc warstewki trzecia i czwarta stają się jednakowe optycznie z samym szkłem. W przypadku wyjaśnionym na fig. 7, to jest dla $n_1 = 1,45$ oraz $n_g = 1,50$, rozwiązaniu dwuwarstewkowemu odpowiada $a_1/a_0 = 0,545$, $a_2/a_0 = -0,455$, to jest n_2 jest równe 1,775 a średnie odbicie subiektywne R wypada przy 0,37% stosunkowo niekorzystne. Dla innych wartości n_g i n_1 punkt F przesuwa się jednak tak, że w myśl równania 4 $a_1/a_0 - a_2/a_0 = 1$, co odpowiada linii przerywanej D na fig. 7.

Punkt przecięcia E prostych D i A daje oczywiście rozwiązanie jednowarstewkowe, gdyż wówczas $a_2 = a_3 = a_4 = 0$ oraz $a_1/a_0 = 1$. Według równania 3d przeto dla tego rozwiązania jednowarstewkowego musi być spełnione równanie

$$13. \quad \frac{n_g - 1}{n_g + 1} = 2 \cdot \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1},$$

które dla $n = 1,5$ daje $n_1 = 1,22$, co odpowiada związkowi $n_1 = \sqrt{n_g}$.

Znane rozwiązania jedno- i dwuwarstewkowe przypadają zatem według fig. 7 w stosunkowo niepomysłnym pod względem zmniejszenia odbicia obrębie o wielkich wartościach N . Ale i ogólne rozwiązania dwuwarstewkowe, dla których równanie 4 nie spełnia się, grubości optyczne natomiast różnią się od $\lambda_0/4$, to jest gdy istnieje zamknięty wprowadzie trójkąt wektorowy, jednakowoż o bokach nie równoległych, nie są pod względem liczby R korzystniejsze.

Powłoki w myśl wynalazku niniejszego

znamionują się przeto tym, że składają się z trzech przynajmniej warstewek o takich wartościach a_1/a_0 i a_2/a_0 , że leżą one wewnątrz elipsy o osi pochylonej o 45° , o środku o współrzędnych $a_1/a_0 = 2$, $a_2/a_0 = 0,42$ i o stosunku osi 1 : 5, przy czym osie przechodzą przez punkt $a_1/a_0 = 1$, $a_2/a_0 = 0$. Elipsa ta jest nakreślona na fig. 7 linią przerywaną jako krzywa graniczna i czyni zadość równaniu

$$14 \quad a_1/a_0 = 1,630 + 0,923 \, a_2/a_0 + \\ + \sqrt{0,395 + 0,118 \, a_2/a_0 - 0,148(a_2/a_0)^2}.$$

Grubość optyczną $n \cdot d$ celowo dobiera się przy tym równą $0,14 \mu$. W obrębie ograniczonym tą elipsą otrzymuje się stosownie do omówionego powyżej szczególnie korzystne rozwiązania, gdy stosunki amplitud a_1/a_0 i a_2/a_0 czynią zadość równaniu 10a, mianowicie:

$$10a. \quad a_1/a_0 = a_2/a_0 + 1,93 - 0,32 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1},$$

co oznacza, że odpowiednie punkty leżą na wielkiej osi elipsy, wyznaczonej równaniem 14. Do rozwiązania najkorzystniejszego dochodzi się przy tym odpowiednio do opisu niniejszego wtedy, gdy stosunki amplitud a_1/a_0 i a_2/a_0 spełniają warunki równania 6 względnie 7, a mianowicie

$$6 \quad (a_1/a_0)_{(opt)} = 1,66 + 0,31 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1},$$

$$7. \quad [a_2/a_0]_{(opt)} = 0,27 + 0,63 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1},$$

co oznacza, że odnośny punkt zlewa się ze środkiem elipsy.

Powiększając liczbę warstewek ponad cztery można uzyskać dalsze jeszcze udoskonalenia; położenie korzystnych wartości a_1/a_0 i a_2/a_0 nie ulegnie przy tym znacznym zmianom, wobec czego dana krzywa graniczna pozostaje ta sama. Przy zastosowaniu pięciu warstewek pokazało się rzeczą korzystną nadanie warstewce naj-

głębszej możliwie małego współczynnika załamania, a w każdym razie mniejszego od współczynnika załamania szkła.

Następujące przykłady (5) i (6) dotyczą rozwiązań pięciowarstwowych o małych wartościach odbicia R .

Przykład 5.

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,450 & a_0 &= 0,1835 \\ n_2 &= 2,405 & a_1 &= 0,248 & a_1/a_0 &= 1,35 \\ n_3 &= 2,076 & a_2 &= -0,073 & a_2/a_0 &= -0,40 \\ n_4 &= 1,460 & a_3 &= -0,174 \\ n_5 &= 1,514 & a_4 &= 0,0184 \\ n_g &= 1,690 & a_5 &= 0,055 & R &= 0,027\%. \end{aligned}$$

Przykład 6.

$$\begin{aligned} n_1 &= 1,450 & a_0 &= 0,1835 \\ n_2 &= 2,405 & a_1 &= 0,248 & a_1/a_0 &= 1,35 \\ n_3 &= 2,154 & a_2 &= -0,055 & a_2/a_0 &= 0,30 \\ n_4 &= 1,533 & a_3 &= -0,169 \\ n_5 &= 1,452 & a_4 &= -0,0273 \\ n_g &= 1,518 & a_5 &= 0,022 & R &= 0,035\%. \end{aligned}$$

Dane według fig. 7 są słuszne nie tylko dla $n_g = 1,50$ i $n_1 = 1,45$. Dla innych wartości przesuwają się na zasadzie równań 6 i 7 punkt środkowy na osi

$$a_1/a_0 \text{ o } x = 0,31 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1} - 1,09,$$

a na osi

$$a_2/a_0 \text{ o } y = 0,63 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} - 1,09.$$

Odczytuje się wówczas w punkcie a_1/a_0 , a_2/a_0 wartość N dla $a_1/a_0 = x$ i $a_2/a_0 = y$. Znalazona w ten sposób wartość N , pomnożona przez $100 \cdot a_0^2$, daje poszukiwane średnie odbicie subiektywne w setnych częściach dla każdej powierzchni.

Wytwarzanie warstewek można uskutecznić w sposób znany, np. przez naporowywanie w próżni, natryskiwanie rozтворów koloidalnych, działaniem par chlorków metali itd. Każda warstewka może być wykonana z jednego tylko materiału albo z mieszaniny materiałów o roz-

maitych współczynnikach załamania; mieszaniny podobne można uzyskiwać np. w ten sposób, że materiały jednocześnie naparowywa lub natryskuje się. Doniosły warunek pomyślnego wykonania sposobu polega na tym, aby zarówno współczynnik załamania, jak i grubość poszczególnych warstewek były zachowane ściśle. Uskutecznia się to celowo w drodze pomiarów fotoelektrycznych odbicia od płytek próbnych światła o długości fali $\lambda_0 = 555 \text{ m}\mu$ i jego zmian wskutek przechodzenia przez warstewki powłok. Przy grubości warstewki $\lambda_0/4$ odbicie osiąga największość lub najmniejszość, zależnie od tego, czy współczynnik załamania n_g płytki próbnej jest mniejszy, czy też większy od współczynnika załamania n_x powłoki. Dla danego materiału powłoki można w ten sposób określić, że każda powierzchnia odbija co najwyżej 1%; odbicie jednostronne można z łatwością osiągnąć przez zaczernienie nie powleczonej powierzchni płytki próbnej. Wówczas n_x można obliczyć z równania:

$$\frac{n_x - 1}{n_x + 1} - \frac{n_g - 1}{n_g + 1} = \sqrt{0,01 I}.$$

Po określeniu współczynników załamania materiałów zastosowanych można kontrolować w drodze pomiarów fotoelektrycznych nakładanie warstewek o grubości optycznej $\lambda_0/4$ [przypadek wieloboku wektorowego, o bokach równoległych] sposobem następującym, np. według przykładu 4. Po nałożeniu warstewki o współczynniku załamania $n_3 = 1,885$ na szkło o współczynniku załamania $n_g = 1,51$ dodają się dwa składniki odbicia, a mianowicie składnik powstały wskutek odbicia na granicy pomiędzy powietrzem i tą warstewką uwarunkowany związkiem $a'_3 = 0,885/2$, $885 = 0,307$ oraz składnik powstały wskutek odbicia na granicy pomiędzy warstewką tą i szkłem i uwarunkowany związkiem $a_3 = 0,111$. Ten drugi

składnik należy ze względu na przesunięcie fazowe o $\lambda_0/2$ zaopatrzyć w znak mniej, wobec czego $a' = 0,307 + 0,111 = 0,418$. Przy właściwej grubości warstewki pomiar natężenia całkowitego światła odbitego o długości fali λ_0 musi dać wartość $100a'^2 = 17,5\%$. Po nałożeniu następującej warstewki o współczynniku załamania $n_2 = 2,23$ dodają się trzy składniki odbicia, a mianowicie $a'_2 = 1,23/3$, $23 = 0,381$, $a_2 = -0,0835$ i $a_3 = -0,111$, z których a_2 ze względu na przesunięcie fazowe $\lambda_0/2$ należy zaopatrzyć w znak mniej. A więc $a' = 0,381 + 0,0835 - 0,111 = 0,3536$, tak iż przy właściwej grubości warstewki pomiar musi dać natężenie $I = 12,5\%$. Po nałożeniu warstewki zewnętrznej o współczynniku załamania $n_1 = 1,45$ otrzymuje się oczywiście

$$a' = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 = \\ = 0,1835 - 0,211 - 0,0835 + 0,111 = 0,$$

przy właściwej grubości warstewki pomiar musi przeto dać natężenie $I = 0$ dla światła o długości fali λ_0 . Natężenie nie zanika jednak dla światła o innej długości fal, wobec czego osiąga się tutaj średnie odbicie subiektywne $R = 0,07\%$ na powierzchni.

Ponieważ wszystkie powyższe rozważania nie ulegną zmianie w razie powlekania odmiennych od szkła przedmiotów niemetalowych warstewkami powłokowymi, wynalazek przeto obejmuje również i te inne przedmioty niemetalowe. Gdy dla rozwiązań jednowarstewkowych wypada używać warstewek łatwo mechanicznie uszkodzalnych i o współczynniku załamania pomiędzy 1,2 oraz 1,4, a dla rozwiązań dwuwarstewkowych przybywa warstewka o dużym współczynniku załamania, która nawet przy zwiększeniu swego współczynnika załamania oprócz możliwości stosowania powłok mocniejszych mechanicznie, nie obiecuje żadnych zalet co do zmniejszania odbicia powierzchniowego, to użycie trój-

i więcej warstewkowych rozwiązań, w myśl wynalazku niniejszego, zapewnia bardzo istotny postęp przez zastosowanie powłok o najwyższym współczynniku załamania $n_{\max}$. Dla danego $n_{\max}$ można wyznaczyć inne współczynniki załamania z fig. 9 i równania 10a.

Rozwiązania według wynalazku niniejszego wyróżniają się tym, że dopuszczają, jak rozwiązania dwuwarstewkowe, powłoki mechanicznie odporniejsze, które jednak, w przeciwieństwie do rozwiązań dwuwarstewkowych, pozwalają na osłabienie wrażenia jasności światła odbitego od powierzchni powleczonej do mniej niż 0,4% białego światła padającego. Swoista właściwość tych rozwiązań dla $\lambda_0 = 555$ m μ polega na tym, że ich odbicie jest szczególnie małe dla ograniczonych tylko długości fal, mniej więcej od 455 m μ do 655 m μ , zewnątrz zaś tych granic szybko wzrasta; łatwo przeto poznać układ podobny. Również i małe średnie odbicie zachodzi tylko dla obrębu, w którym kąt padania światła nie przekracza około 50°; przy wzrastaniu kąta tego powyżej 60° odbicie silnie się zwiększa. Zależność kątowa dla małych i średnich kątów wypada przy rozwiązaniach według wynalazku znacznie korzystniej, niż w układach jedno- i dwuwarstewkowych. Może stanowić to zaletę przy zastosowaniu w przyrządach optycznych o wielkim kącie rozwarcia.

Wzrostowi odbicia w obrębie czerwonego i niebieskiego światła można w poszczególnych przypadkach przeszkadzać przez wprowadzanie na drogę promieni filtrów pochłaniających czerwone i niebieskie promienie, wskutek czego pełne odbicie zostaje zmniejszone jeszcze bardziej. Ponieważ przeważnie niebieski składnik światła odbitego jest szczególnie szkodliwy, więc zastosowanie warstewek o najwyższym współczynniku załamania, działających jako żółte filtry i dopuszczających rozwiązania w bezpośrednim są-

siedztwie najkorzystniejszych rozwiązań, zapewnia szczególniejszy pożytek w celu najskuteczniejszego usunięcia średniego odbicia subiektywnego.

Jeżeli chce się osłabić działanie światła odbitego nie na oko, lecz na jakikolwiek inny odbiornik, np. na kliszę fotograficzną, to należy odbicie najmniejsze przesunąć w miejsce nie największej wrażliwości oka, lecz wrażliwości wzmiankowanego odbiornika, np. w nadfioletowe lub podczerwone okolice. Natenczas zmienia się tylko wartość λ_0 , obrachowywana z podziału wrażliwości odbiornika, i dostosowane do niej odbicie średnie. Wszystkie inne rozważania pozostają na ogół bez zmiany.

Zastrzeżenia patentowe.

1. Powłoka przedmiotu niemetalowego, składająca się z trzech co najmniej warstewek o rozmaitym współczynniku załamania i zmniejszająca odbicie od powierzchni tego przedmiotu, znamienna tym, że współczynniki załamania n_k poszczególnych warstewek, następujących w kolejności $k = 1, 2, 3, \dots$ od strony zewnętrznej ku wewnętrznej, są dobrane w ten sposób, iż stosunki amplitud a_1/a_0 oraz a_2/a_0 leżą w obrębie wartości objętych elipsą

$$a_1/a_0 = 1,630 + 0,923 a_2/a_0 \pm \pm \sqrt{0,395 + 0,118 a_2/a_0 - 0,148 [a_2/a_0]^2}$$

przy czym

$$a_k = (n_{k+1} - n_k) / (n_{k+1} + n_k), \text{ a } k = 0$$

oznacza ośrodek graniczący z warstewką zewnętrzną.

2. Powłoka według zastrz. 1, znamienna tym, że każda warstewka posiada grubość optyczną o wartości 0,140 μ .

3. Powłoka według zastrz. 1, znamienna tym, że wartości a_1/a_0 oraz a_2/a_0 spełniają równanie

$$a_1/a_0 = a_2/a_0 + 1,93 - 0,32 \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}$$

przy czym n_g oznacza współczynnik załamania przedmiotów niemetalowych.

4. Powłoka według zastrz. 3, znamiona tym, że

$$a_1/a_0 = 1,66 + 0,31 \cdot \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 + 1}{n_1 - 1}$$

$$a_2/a_0 = -0,27 + 0,63 \cdot \frac{n_g - 1}{n_g + 1} \cdot \frac{n_1 - 1}{n_1 + 1}$$

5. Powłoka według zastrz. 1, składająca się z pięciu warstewek, znamiona tym, że współczynnik załamania warstewki najgłębszej jest mniejszy od współczynnika załamania przedmiotu niemetalowego.

Jenaer Glaswerk
Schott & Gen.

Zastępca: M. Skrzypkowski
rzecznik patentowy

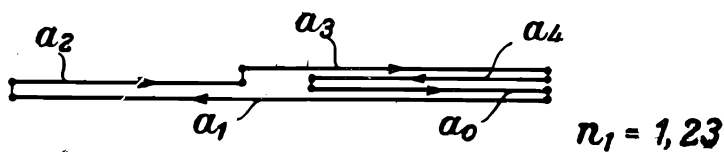


Fig. 1

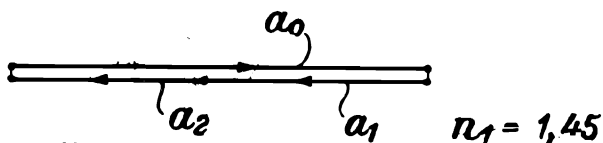


Fig. 2

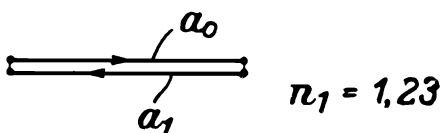


Fig. 3

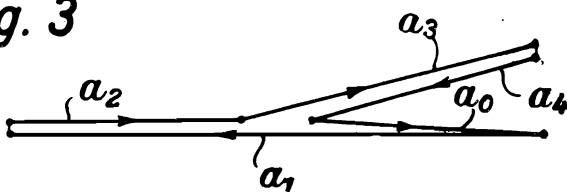


Fig. 4

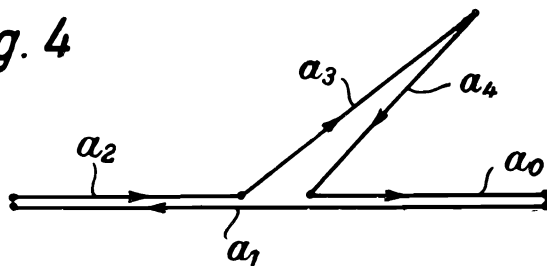


Fig. 5

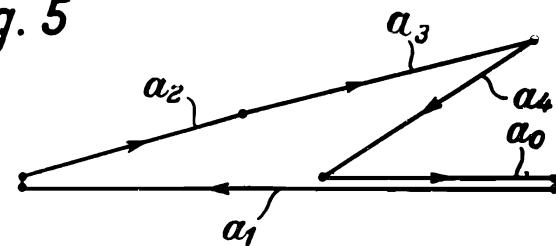


Fig. 6

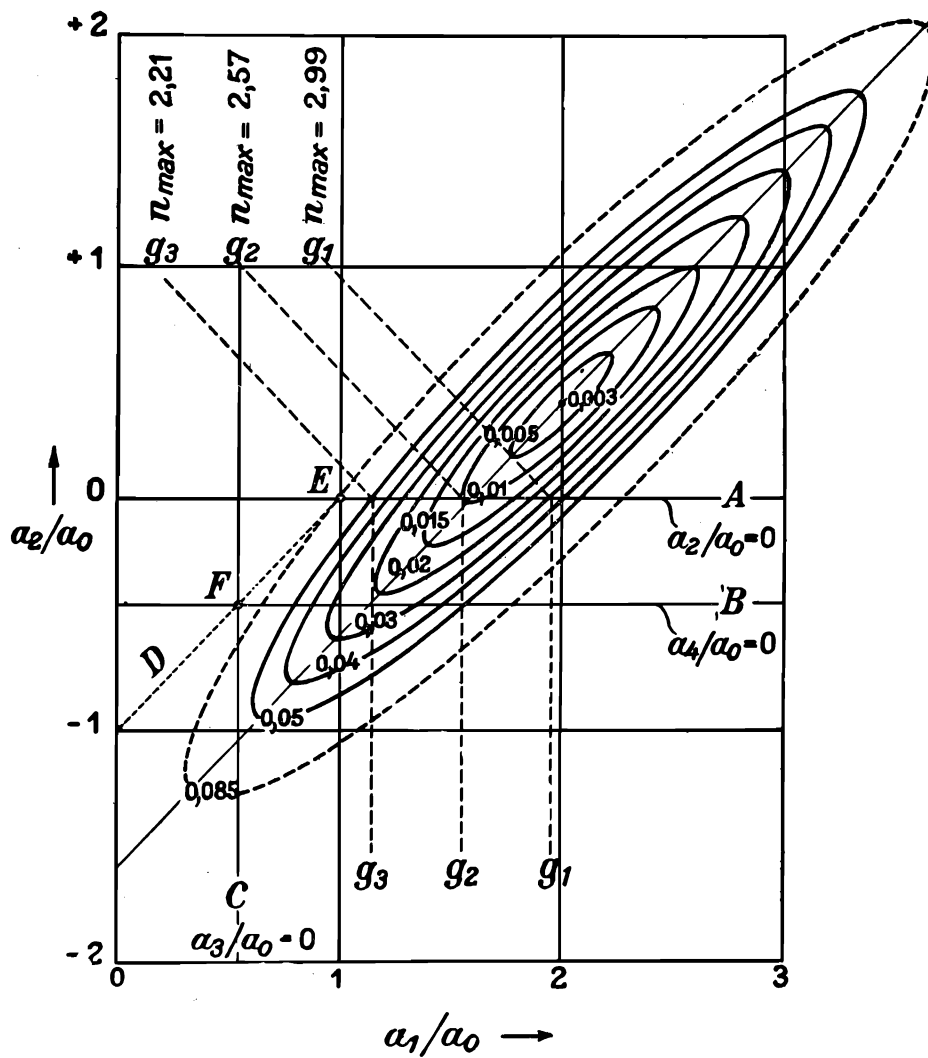


Fig. 7

$n_1 = 1.45$ $n_g = 1.50$

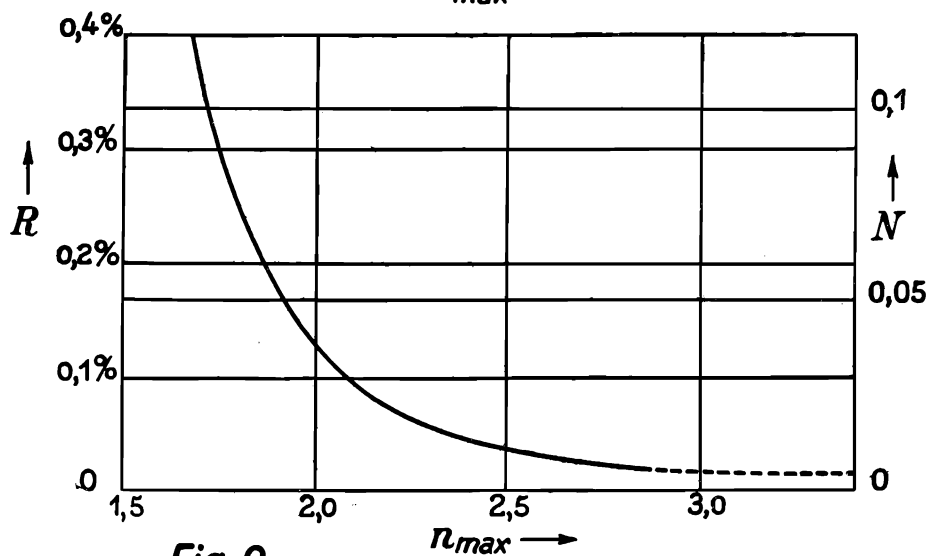
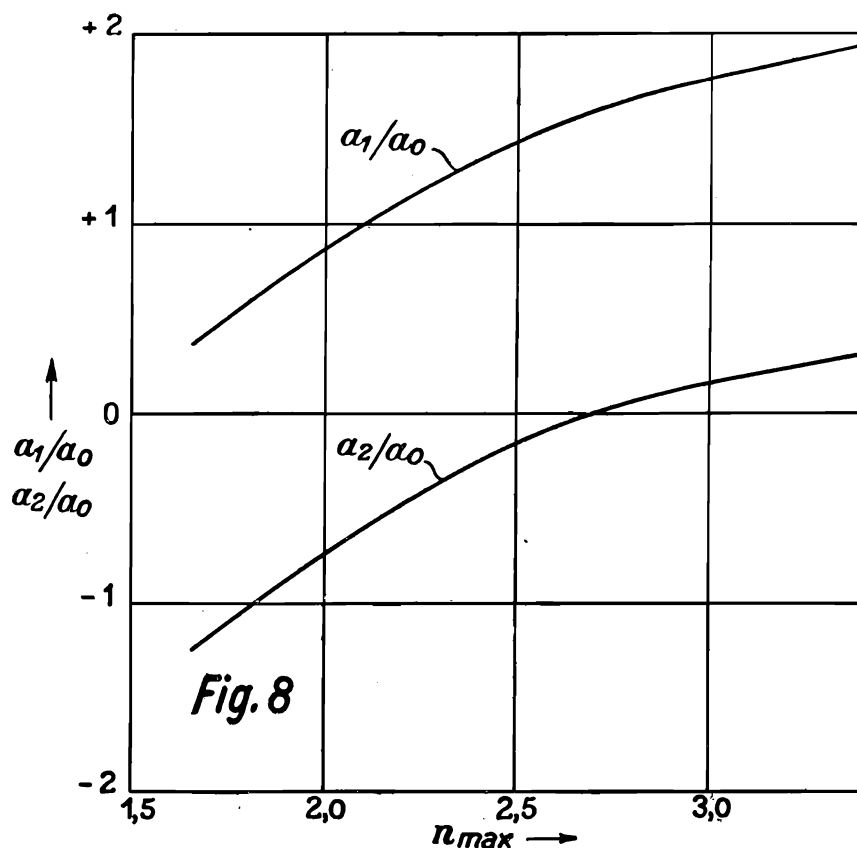


Fig. 9

$n_1 = 1,45$ $n_g = 1,5$