

UPORABA TANKIH PLASTI V PROJEKCIJSKIH APARATIH

Marijan Olenik in Aleš Dolžan, Iskra Vega, Stegne 13a, 61000 Ljubljana, Slovenija

The application of thin films for projection devices

ABSTRACT

Widely used projection devices, such as diaprojectors, overhead projectors (OHP) and episcopes, have substantial light losses. They are caused by reflection of the light on the surfaces of the transmittive optical elements and decrease reflection on the mirrors. The light efficiency of the projection devices can be increased with various vacuum deposited thin films. With antireflection coatings the undesired reflections on transmittive elements can be decreased. The reflection of the reflective elements can be increased with enhanced aluminium and dielectric coatings. We review the optical elements of the projection device and compare improvements in their quality that can be achieved by using various thin film coatings. The quantitative analysis is done for the transmittive OHP, which is the main product of our company.

POVZETEK

Pri projekcijskih aparatih, kot so diaprojektorji, grafoskopi in episkopi imamo opravka z velikimi svetlobnimi izgubami. Te nastanejo zaradi odbojev svetlobe na površinah presevnih optičnih elementov in zmanjšane odbojnosti na zrcalnih elementih. Z uporabo različnih vakuumsko naperjenih tankih plasti na optičnih elementih lahko svetlobni izkoristek projekcijskega aparata znatno povečamo. Z antirefleksnimi plastmi zmanjšamo odboj na presevnih površinah optičnih elementov, na zrcalnih površinah pa povečamo odboj svetlobe z uporabo izboljšanih aluminijastih in dielektričnih zrcalnih plasti. V članku je opisan pregled vseh optičnih elementov, ki sestavljajo projekcijski aparat, in podana izbira možnih tankih plasti, s katerimi dosežemo večjo svetilnost tega aparata. Za kvantitativno analizo sva izbrala primer presevnega grafoskopa, ki predstavlja večino proizvodnje projekcijskih aparatov tovarne Iskre Vege.

1 Uvod

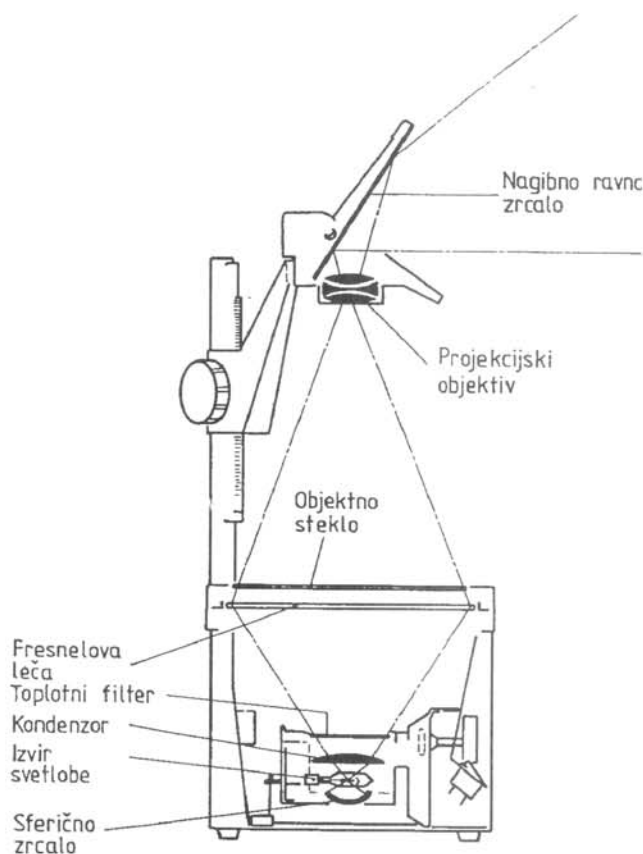
Projekcijski aparati so optične naprave, namenjene za projiciranje povečanih slik različnih slikovnih materialov na svetlobne zaslone v sejnih sobah, predavalnicah, dvoranah in drugih zaprtih prostorih. Delimo jih na grafoskope, diaprojektorje in episkope. Grafoskope uporabljamo za projiciranje presojnih in prirejenih LCD zaslonov. Diafilme, to so fotografski pozitivni filmi, projiciramo z diaprojektorji. Za projiciranje slik iz revij in knjig ter fotografij pa uporabljamo projekcijski aparat, ki ga imenujemo epiprojektor ali episkop. Z episkopom lahko projiciramo tudi ploskve tanjših nepresevnih predmetov.

V tovarni Iskra Vega izdelujemo delno ali pa v celoti projekcijske aparate vseh navedenih vrst. Večino proizvodnje predstavljajo grafoskopi. Glede na izvedbo osvetlitvenega sistema delimo grafoskope na dve veliki družini. Gledano z vidika poti svetlobnega žarka skozi presojnico govorimo o presevnih in zrcalnih grafoskopih. Zrcalni grafoskopi so nastali iz potrebe po manjših, zložljivih in prenosnih aparatih. Njihova svetilnost je navadno dokaj slaba. Kvalitetnejšo in svetlejšo projicirano sliko dobimo s presevnim grafoskopom. Presevne grafoskope razvrščamo v kakovostne razrede predvsem po njihovi svetilnosti. Svetilnost grafoskopa je seveda v prvi vrsti odvisna od

moči vgrajenega svetlobnega izvira, tj. od moči uporabljene halogenske žarnice (250, 360 ali 400 W). Pri dani moči žarnice pa je močno pogojena še z izbiro in kakovostjo optičnih elementov, ki jih vgradimo. Tako dobimo grafoskope, ki jih razvrstimo v razrede do 2000, do 3000, do 4000, do 5000 in nad 5500 lumnov svetilnosti. V nadaljevanju bomo spoznali optične elemente, ki sestavljajo presevni grafoskop najvišjega svetilnostnega razreda. Pogledali bomo kakšne in kolikšne so svetlobne izgube na teh optičnih elementih in podali pregled možnosti povečanja svetilnosti projekcijskega aparata z uporabo tankih plasti, ki bi jih nanесли na optične elemente.

2 Optični sistem projekcijskega aparata

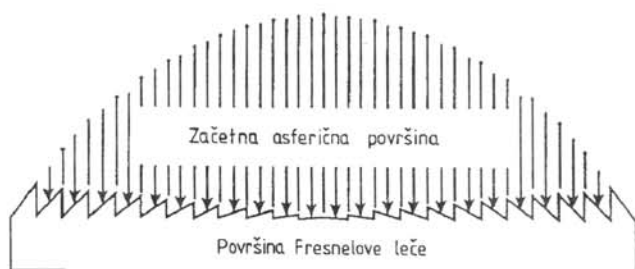
Naloga optičnega sistema v projekcijskem aparatu je zbiranje in usmerjanje svetlobe, ki jo seva žarnica skozi projekcijski objektiv na svetlobni zaslon. Optični sistem sestavljajo trije poglavitni sklopi: osvetlitveni sistem, projekcijski objektiv in nagibno ravno zrcalo. Shema optičnega sistema presevnega grafoskopa s potekom robnih svetlobnih žarkov je podana na sliki 1.



Slika 1. Optični sistem presevnega grafoskopa

Osvetlitveni sistem /1/ presevnega grafoskopa je običajno sestavljen iz naslednjih optičnih elementov: žarnice, sferičnega zrcala, kondenzorja, toplotnega filtra in Fresnelove leče. Močna nizkonapetostna žarnica predstavlja izvir svetlobe. S sferičnim zrcalom (krogelno konkavno zrcalo) odbijemo tisti del svetlobe, ki ga žarnica seva proti dnu grafoskopa. Kondenzor je pri grafoskopu narejen iz ene same plankonveksne steklene leče. Z njim zberemo odbito in direktno svetlobo z žarnice in jo usmerimo na Fresnelovo lečo. Vmes postavimo še toplotni filter, s katerim zadržimo infrardeči del svetlobe. S tem preprečimo premočno gretje slikovnega materiala.

Na področju osvetlitvene optike natančnost optičnih preslikav ni zelo zahtevna, zato lahko klasično lečo z veliko relativno odprtino nadomestimo s "stopničasto" ali Fresnelovo lečo /2/. Uporaba takšne leče pomeni velik prihranek pri teži in vgradnem prostoru. Fresnelova leča je narejena iz tanke plošče plastične mase (navadno polimetilmetakrilat ali pleksi steklo). Na eni strani je ravna, na drugi stani pa ima vrezane koncentrične trikotne utore, ki so nagnjeni pod različnimi koti v odvisnosti od razdalje od središča leče. Če pogledamo Fresnelovo lečo v preseku, (slika 2) ugotovimo, da je podobna žagi, pri kateri strmina zob narašča z oddaljevanjem od optične osi. Vsak trikoten utor deluje lokalno kot majhna prizma.



Slika 2. Shematski prikaz Fresnelove leče

Tako s ploskovnim optičnim elementom (Fresnelovo lečo) nadomestimo močno zbiralno lečo, s katero zberemo svetlobo v stožčast snop in jo pošljemo skozi projekcijski objektiv. Tik nad Fresnelovo lečo imamo še objektno steklo (ravna steklena plošča iz float stekla), ki predstavlja ravnino preslikave. Na njo polagamo prozorne acetatne folije oz. presojnice.

Projekcijski objektiv je običajno trolečni. S spreminjanjem njegove oddaljenosti od objektnega stekla lahko izostrimo projicirano sliko za različne oddaljenosti grafoskopa od svetlobnega zaslona. Z nastavljenim, poševno postavljenim ravnim zrcalom pa lahko do neke mere spreminjamo kot odklona svetlobnega snopa in s tem položaj projicirane slike na zaslonu.

Kvalitetni optični sistem mora zbrati čim več svetlobe, ki jo žarnica seva v celoten prostorski kot. Svetlobni izkoristek optičnega sistema lahko definiramo kot razmerje med svetilnostjo grafoskopa in svetilnostjo žarnice. Iz podatka, da ima halogenska 400 W žarnica svetilnost okrog 14000 lumnov, lahko vidimo, da je svetlobni izkoristek tudi najsvetlejšega grafoskopa (5500 lm) zelo skromen.

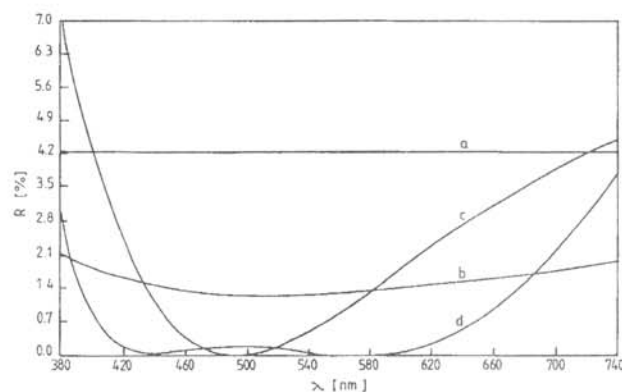
3 Antirefleksna prekritja

Pri prehodu svetlobe skozi mejo dveh optičnih snovi z različnima lomnima količnikoma n_1 in n_2 se del svetlobe odbije, del pa prepusti /3/. Pri pravokotnem vpadu je odbojnost R enaka:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Hitro lahko presodimo, da se na prehodu iz zraka (lomni količnik približno 1) v kronsko steklo z $n = 1,52$ odbije 4,2% vpadne vidne svetlobe. Tolikšen odboj dobimo na vsakem prehodu iz zraka v steklo, kakor tudi iz stekla nazaj v zrak. Z naraščanjem lomnega količnika stekla narašča tudi delež odbite svetlobe na površini stekla. Tako je za visokolomno flintno steklo z $n = 1,8$ ta delež že 8,2%. Z vakuumsko neparjenimi tankimi dielektričnimi plastmi lahko odbojnost površin optičnih elementov uspešno znižamo.

Izvedbe antirefleksnega prekritja se razlikujejo po številu plasti in vrsti uporabljenih dielektričnih materialov /3,4/. Z večanjem števila plasti lahko odbojnost še bolj znižamo. Najenostavnejši primer antirefleksne plasti je približno 100 nm debela plast MgF_2 . Na površini stekla z $n = 1,52$ s tem znižamo odbojnost na 1,4%. Odbojnost tukaj podajamo kot povprečno vrednost odbitega dela vidne svetlobe v intervalu valovnih dolžin od 400 do 700 nm. Pri dvoplastnem prekritju uporabimo kombinacijo visokolomnega in nizkolomnega materiala, npr. TiO_2 in SiO_2 . Odbojnost znižamo na 1%. Za triplastno prekritje naparimo določene debeline Al_2O_3 , TiO_2 in MgF_2 ; povprečna odbojnost pade pod 0,5%. S pet in več plastnimi prekritji lahko odbojnost na površini še bolj znižamo. Teoretične spektralne porazdelitve odbite svetlobe za eno, dvo in triplastna prekritja so prikazane na sliki 3.



Slika 3. Spektralne porazdelitve odbite svetlobe, izračunane brez upoštevanja disperzije in absorpcije za nenaparjeno steklo z $n = 1.52$ (a) in za na taki podlagi naparjeno enoplastno (b), dvoplastno (c) in triplastno antirefleksno prekritje (d)

V našem optičnem sistemu imamo sedem presevnih optičnih elementov, na katerih bi lahko naparili antirefleksna prekritja: kondenzor, toplotni filter, Fresnelo-

vo lečo, objektno steklo in tri leče projekcijskega objektiva. Spomnimo se, da sedem optičnih elementov pomeni štirinajst površin, na katerih se svetloba odbije. Za primerjavo učinkovitosti antirefleksnih prekritij bomo normirali prepustnost idealnega optičnega sistema, brez odbojev na površinah na enoto 1 (tabela I). Prepustnosti posameznih optičnih elementov v sistemu se med seboj množijo. Za najslabši primer, ko so vsi elementi v grafoskopu brez antirefleksnih prekritij, dobljeno skupno prepustnost ocenimo na $(0,958)^{14} = 0,54$.

Tabela I: Primerjava učinkovitosti antirefleksnih prekritij pri povečanju svetlobne prepustnosti optičnega sistema. Izračunane vrednosti veljajo za optični sistem, katerega elementi so izdelani iz stekla z lomnim količnikom $n_d = 1.52$

Prepustnost optičnega sistema				
Brez svetlobnih izgub	Brez anti-refleksnega prekritja	Trenutno stanje	Vse površine neparjene z enoplastnim prekritjem	Vse površine neparjene z triplastnim prekritjem
1.00	0.54	0.65	0.82	0.93

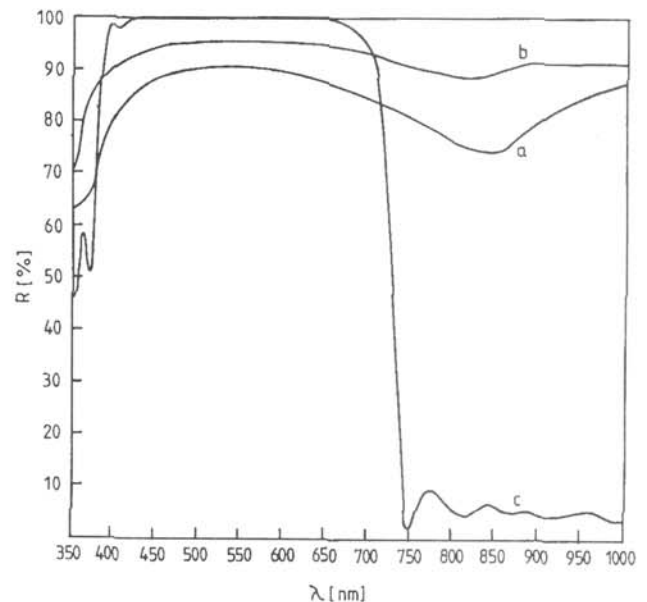
Tudi najsvetlejši serijsko izdelan grafoskop je zelo skromno opremljen z antirefleksnimi prekritji: z enoplastnim prekritjem je neparjenih le vseh šest površin trilečnega projekcijskega objektiva. Teoretična prepustnost takšnega optičnega sistema je le 0,65. Če bi vseh štirinajst površin neparili z enoplastnim antirefleksnim prekritjem, bi se prepustnost povečala na 0,82, s triplastnim antirefleksnim prekritjem pa kar na 0,93. Pri tej presoji nismo upoštevali kotne odvisnosti odbojnosti na dielektričnih površinah, absorpcije svetlobe ter preostalih svetlobnih izgub. Glede na sedanj, delno neparjeni optični sistem presevnega grafoskopa bi torej z napajevanjem triplastnih antirefleksnih prekritij na vse presevne optične elemente dobili na zaslono kar 43% več svetlobe.

4 Zrcalne plasti

Poleg presevnih optičnih elementov imamo v projekcijskih aparatih še zrcalne elemente. Delovanje zrcalnih elementov je neposredno odvisno od kakovosti neparjene zrcalne plasti. Pri presevnih elementih je pomembnejši lomni količnik stekla, krivinski radij in debelina, z antirefleksnimi prekritji pa samo izboljšamo optične lastnosti. V presevnem grafoskopu imamo dva zrcalna optična elementa: sferično zrcalo in projekcijsko ravno zrcalo.

Zrcalne optične elemente dobimo z napajevanjem oz. naprševanjem zrcalnih plasti na izbrano podlago. Uporabljamo predvsem tri vrste zrcalnih plasti: aluminijaste, izboljšane aluminijaste in dielektrične plasti /3/. Spektralne porazdelitve odbite svetlobe za te plasti

so prikazane na sliki 4. Pri navadnem aluminiziranem zrcalu nanesemo od 60 do 100 nm debelo plast aluminija, ki jo pred poškodbami zavarujemo z zaščitno plastjo SiO_2 . Povprečna refleksija takšne plasti navadno ne presega 89%. Izboljšano aluminizirano zrcalo je kombinacija kovinskih in dielektričnih plasti, s katerimi izboljšamo osnovno refleksijo aluminija. Povprečna refleksija takšnega zrcala je do 94 %, za ožje spektralno območje pa tudi do 97%. Dielektrično zrcalo naredimo z izmeničnim napajevanjem visokolomnega in nizkolomnega materiala, npr. TiO_2 in SiO_2 . Z večanjem števila neparjenih plasti širimo spektralni interval, v katerem ima prekritje visok zrcalni učinek. Z 20 do 30 neparjenimi plastmi (odvisno od izbranih materialov za napajevanje) lahko na spektralnem območju od 400 do 700 nm dosežemo refleksijo višjo od 99%. Takšno zrcalo odbija samo vidno svetlobo, prepušča pa ultravijolično in infrardečo. Slednje je zelo zaželeno pri konstrukciji osvetlitvenih sistemov, saj s takim zrcalom zmanjšamo toplotne obremenitve. Zato takšnemu zrcalu rečemo tudi hladno zrcalo.

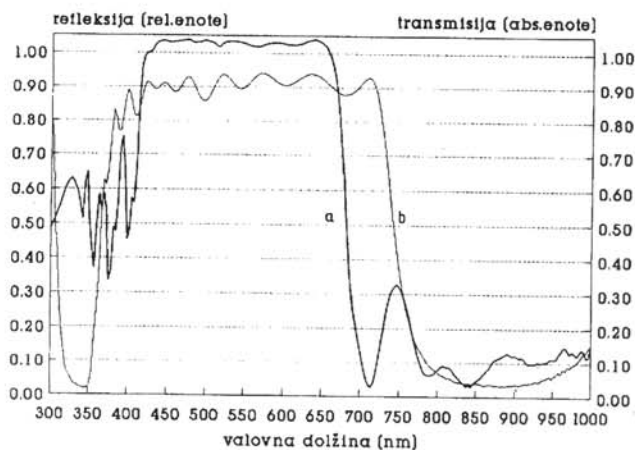


Slika 4. Spektralne porazdelitve odbite svetlobe za različne zrcalne sloje: aluminizirano zrcalo (a), izboljšano aluminizirano zrcalo (b), dielektrično (hladno) zrcalo (c)

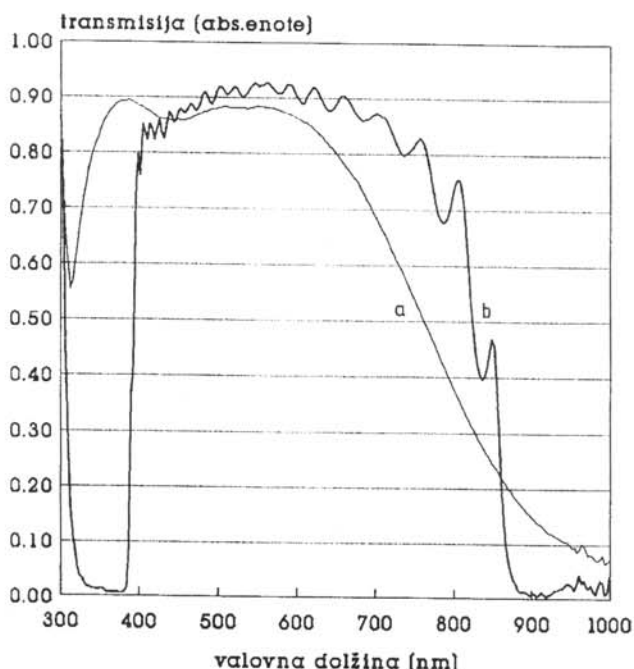
Hladnemu zrcalu komplementaren optični element je zrcalo, ki odbija infrardečo in prepušča vidno svetlobo. Po zgornjem zgledu ga lahko poimenujemo vroče zrcalo /3/. Izdelava vročega zrcala je podobna izdelavi hladnega, le da so neparjene plasti debelejše. Sorodnost obeh optičnih elementov lepo prikazuje slika 5, pri čemer je na eni ordinati diagrama podana odbojnost hladnega zrcala, na drugi pa prepustnost vročega zrcala.

Z vročim zrcalom lahko nadomestimo toplotni filter, ki smo ga sprva vgrajevali v naš optični sistem, prikazan na sliki 1. Primerjava spektralnih porazdelitev prepustne svetlobe vročega zrcala in absorpcijskega filtra je podana na sliki 6. Iz diagrama razberemo, da je

povprečna prepustnost vročega zrcala do 7% večja od prepustnosti absorpcijskega filtra. Druga prednost vročega zrcala pred absorpcijskim filtrom je v brezbarvnosti za pravokoten vpad svetlobe. Absorpcijski filter je v presevani svetlobi zelenkast, saj poleg infrardeče zadrži tudi del rdečega dela vidne svetlobe. Zaradi tega je slika na zaslonu drugačnih barv kot na presojnici.



Slika 5. Primerjava spektrov hladnega zrcala, izmerjenega v refleksiji (a), in vročega zrcala, izmerjenega v transmisiji (b). Refleksijska ordinata je podana v relativnih enotah; za referenčno vrednost smo uporabili zrcalo z izboljšanim aluminijastim prekritjem



Slika 6. Spektralni porazdelitvi prepuščene svetlobe absorpcijskega filtra (a) in vročega zrcala (b)

Vroče zrcalo toplotno sevanje odbija, absorpcijski filter pa ga absorbira in zadrži v sebi. Absorpcijske filtre moramo zato kaliti, kar podraži njegovo izdelavo. S kaljenjem popustimo notranje napetosti v steklu, ki bi pri segrevanju filtra na višje temperature povročile lom stekla. Vročih zrcal ni potrebno kaliti.

5 Sklep

V projekcijske aparate, ki jih izdelujemo v tovarni Iskri Vegi, že dalj časa vgrajujemo projekcijska zrcala z izboljšanim aluminijastim prekritjem. Ravno tako že več let v aparate z višjo svetilnostjo vgrajujemo sferična zrcala z dielektričnim zrcalnim prekritjem. Z bolj masovno uporabo 400 W žarnic v presevnih grafskopih (navadni grafskopi imajo le 250 W žarnico) je v zadnjem letu tudi izredno narasel delež grafskopov, v katere vgrajujemo toplotne filtre. Iz močnejše vgrajene žarnice resda dobimo večji svetlobni tok in s tem višjo svetilnost aparata, vendar z njo tudi večje toplotno sevanje, ki lahko močno ogreje delovno površino grafskopa. Na objektnem steklu, na katerega polagamo presojnice in LCD zaslone, je po DIN standardu dovoljeni dvig temperature le 35°C nad okolico. Zato moramo svetlobo, ki jo daje žarnica, "ohladiti". Prvi korak je seveda vgradnja hladnega sferičnega zrcala pod žarnico. Če le to ne zadostuje, pa vgradimo še toplotni filter. Zaradi ugodnejših optičnih lastnosti (višja presevnost v vidnem delu) smo absorpcijske filtre skoraj v celoti nadomestili z naperjenimi vročimi zrcali.

Iz zgoraj naštetega lahko vidimo, da smo na področju uporabe zrcalnih plasti izkoristili prednosti že skoraj vseh kvalitetnejših prekritij. Velike rezerve pri doseganju večje svetilnosti grafskopov pa imamo pri antirefleksnih prekritjih. Naparevanje le-teh na objektno steklo in Fresnelovo lečo je resda pogojeno s precejšnjimi tehnološkimi težavami (velikost podlag, podlaga iz plastične mase), zato pa ni nobenih tehnoloških problemov z naparevanjem antirefleksnih prekritij na preostale preseвне optične elemente. Tehnološki postopki naparevanja so že razviti, problematične pa so žal proizvodne kapacitete v oddelku za naparevanje tankih plasti. Vsekakor pa je naša prva naloga prehod na triplastno antirefleksno prekritje pri trilečnih projekcijskih objektivih, s katerim bi pridobili še okrog 8% izhodne svetlobe in izboljšali kontrast projicirane slike.

6 Literatura

- /1/ H. Naumann, G. Schröder: Bauelemente der Optik, Hanser, München, 1987
- /2/ Katalog firme Fresnel Optics, Rochester, New York, 1993
- /3/ H. K. Pulker, Coatings on Glass, Elsevier, Amsterdam, 1984
- /4/ A. Demšar, Antirefleksna pokritja, Vakuumist, št. 10, 1986