

Stefan Björkert, Tomas Hallberg, Christina Nilsson, Göran Forssell, Eva Hedborg
Karlsson, Carl-Gustaf Ribbing

Översikt av material för optisk signaturanpassning

Forskning inom FOI/FOA senaste 10 åren



TOTALFÖRSVARETS FORSKNINGSINSTITUT

Sensorteknik

Box 1165

581 11 Linköping

FOI-R--0530--SE

Juni 2002

ISSN 1650-1942

Användarrapport

Stefan Björkert, Tomas Hallberg, Christina Nilsson, Göran Forssell, Eva Hedborg
Karlsson, Carl-Gustaf Ribbing

Översikt av material för optisk signaturanpassning

Forskning inom FOI/FOA senaste 10 åren

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0530--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 6. Telekrig	
	Månad, år Juni 2002	Projektnummer E3033
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 62 Signaturanpassning	
Författare/redaktör Stefan Björkert Tomas Hallberg Christina Nilsson Göran Forssell Eva Hedborg Karlsson Carl-Gustaf Ribbing	Projektledare Tomas Hallberg	
	Godkänd av	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Tomas Hallberg	
Rapportens titel Översikt av material för optisk signaturanpassning: Forskning inom FOI/FOA senaste 10 åren		
Sammanfattning (högst 200 ord) Rapporten sammanfattar forskningsresultat inom området material för optisk signaturanpassning, från aktiviteter bedrivna under de senaste ca 10 åren inom det projekt som för närvarande benämns optiska signaturmaterial. Forskningen har framförallt varit inriktad på att kartlägga tekniska möjligheter och begränsningar för att åstadkomma signaturanpassning av vapenbärare inom det optiska spektralområdet och att vidare delge kunskaper inom området genom medverkan i olika studiegrupper. Aktiviteterna täcker inom områden såsom: pigment och bindemedel för lågemissiv färg för IR-området (med pigment i form av olika metaller, resstrålebandsmaterial, fotonbandgapsmaterial, multilagerstrukturer och kromogena material), vidhäftning och optiska egenskaper hos lågemissiva beläggningar, polarisationsegenskaper hos olika ytor samt materialval för konstruktionsmässig utformning. En referensförteckning ger samtliga öppna rapporter som getts ut inom projektområdet och dessutom en bibliografi med övriga rapporter som inte behandlas här.		
Nyckelord signaturanpassning, IR, UV, NIR, lågemissiv färg, pigment, polarisation		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 18 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	Report number, ISRN FOI-R--0530--SE	Report type User report
	Research area code 6. Electronic Warfare	
	Month year June 2002	Project no. E3033
	Customers code 5. Commissioned Research	
	Sub area code 62 Stealth Technology	
Author/s (editor/s) Stefan Björkert Tomas Hallberg Christina Nilsson Göran Forssell Eva Hedborg Karlsson Carl-Gustaf Ribbing	Project manager Tomas Hallberg	
	Approved by	
	Sponsoring agency Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Tomas Hallberg	
Report title (In translation) Overview of materials for optical signature management: Research done at FOI/FOA last 10 years		
Abstract (not more than 200 words) This report summarises research results in the field of materials for low observables in the optical region, conducted during the last ca 10 years. The research activities have mainly been focused on technical possibilities and limitations of signature management of weapon platforms in the optical spectral region and to impart knowledge within the research field through participation in a number of study groups. The activities covers the areas: pigment and binders for low emissive paint in the IR-region (with pigment of different metals, reststrahlen materials, photon band gaps materials, multi layered structures and chromogen materials), adhesion and optical properties of low emissive coatings, polarisation effects of different surfaces and material selection for engineering design. A reference list lists all open reports produced by the project together with a bibliography of other reports not referenced in the text.		
Keywords signature management, stealth technology, IR, UV, NIR, low emissive paint, pigment, polarisation		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 18 p.	
	Price acc. to pricelist	

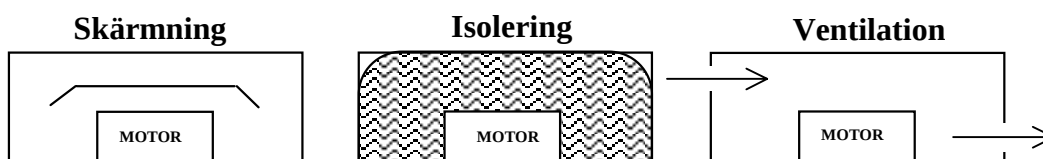
Innehåll

1	INLEDNING.....	5
2	MATERIALVAL FÖR KONSTRUKTIONSMÄSSIG UTFORMNING.....	7
3	MATERIAL MED STYRBAR EMISSIVITET	8
3.1	TERMOKROMA MATERIAL FÖR IR-KAMOUFFLAGE	8
3.2	STYRBARA POLYMERFILMER	9
4	PIGMENT OCH BINDEMEDEL FÖR LÅGEMISSION FÄRG FÖR IR-OMRÅDET	9
4.1	IR-EGENSKAPER HOS BINDEMEDEL	10
4.2	PIGMENT	10
4.2.1	<i>Metallpigment.....</i>	<i>10</i>
4.2.2	<i>Pigment av reststrålebandsmaterial.....</i>	<i>11</i>
4.2.3	<i>IR-transparenta material.....</i>	<i>12</i>
4.2.4	<i>Multilagerstrukturer.....</i>	<i>12</i>
4.2.5	<i>Fotonbandgapsmaterial</i>	<i>13</i>
5	VIDHÄFTNING OCH OPTISKA EGENSKAPER HOS LÅGEMISSIONS BELÄGGNINGAR PÅ SIKTRUTOR.	14
6	PASSIV OPTISK POLARISATION.....	15
6.1	MÄTNINGAR.....	15
7	REFERENSER.....	16
8	BIBLIOGRAFI.....	18

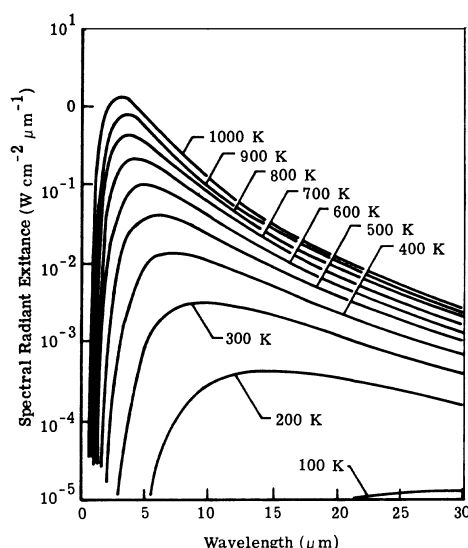
1 Inledning

Forskning inom signaturanpassningsteknik (SAT) har pågått vid FOA/FOI sedan 1950-talet. Under årens lopp har området förändrats i takt med hotets teknikutformning; från att försvåra visuell upptäckt av trupper, vapenplattformar och andra fordon, till reducering av radarreflexer och minskning av den termiska signaturen. Motivet och nyttan med denna forskning är bland annat att våra förband ska kunna verka effektivt i olika miljöer utan att röjas av fiendens sensorer. SAT är omgärdad av hög sekretess internationellt, varför behovet av inhemsk kompetens är stort inom detta område. Vidare kräver internationell verksamhet i vissa fall tillgång till avancerat signaturanpassat materiel. Denna rapport redogör för de forskningsinsatser som gjorts under de senaste ca. 10 åren inom projektverksamhet relaterad till det projekt som för närvarande benämns *Optiska signaturmaterial*. Projektet har under de senaste 3 åren haft en relativt stor personalomsättning, bland annat beroende på projektmedlemmarnas institutionsflytt från Urvik till Linköping. Därför är behovet stort av en sammanställning av tidigare resultat.

Arbetet gäller i första hand termisk signaturanpassning inom de båda atmosfäriska transmissionsfönstren 3-5 och 8-12 μm , ofta benämnda kortvåg respektive långvåg inom det infraröda (IR) spektralområdet. När det gäller SAT-åtgärder för t.ex. farkoster så bör flera åtgärder samverka, vilka planeras redan under designfasen av farkosten. Man kan då vidtaga diverse konstruktionsåtgärder för att bland annat sänka skrovtemperaturen och sprida eller diffusera utsläpp av kylvatten och förbränningsgaser. Exempel på sådana åtgärder ges i Figur 1-1.



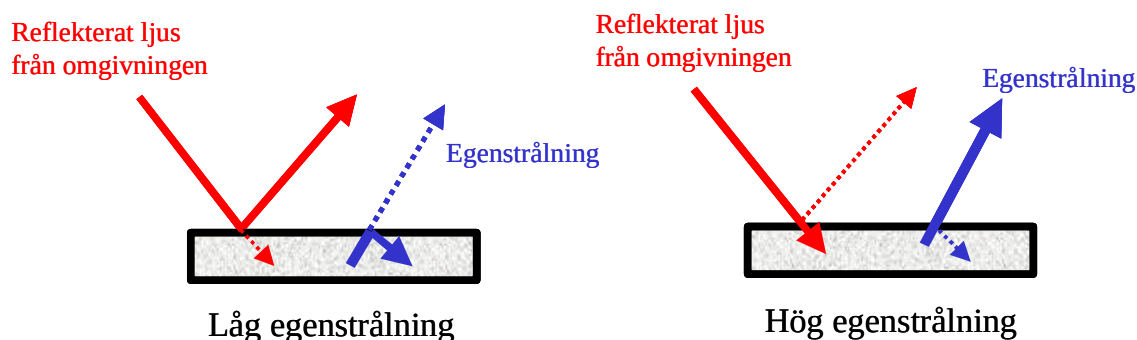
Figur 1-1. Figuren illustrerar olika typer av konstruktionsåtgärder för att minska värmeutstrålningen kring ett motorrum.



Figur 1-2. Svartkroppskurvor för olika temperaturer. Kurvorna anger hur mycket en svartkropp utstrålar vid en viss temperatur. Från Wolfe W.L. och Zissis G.J. red., *The infrared handbook*, reviderat upplaga, ERIM, 1993.

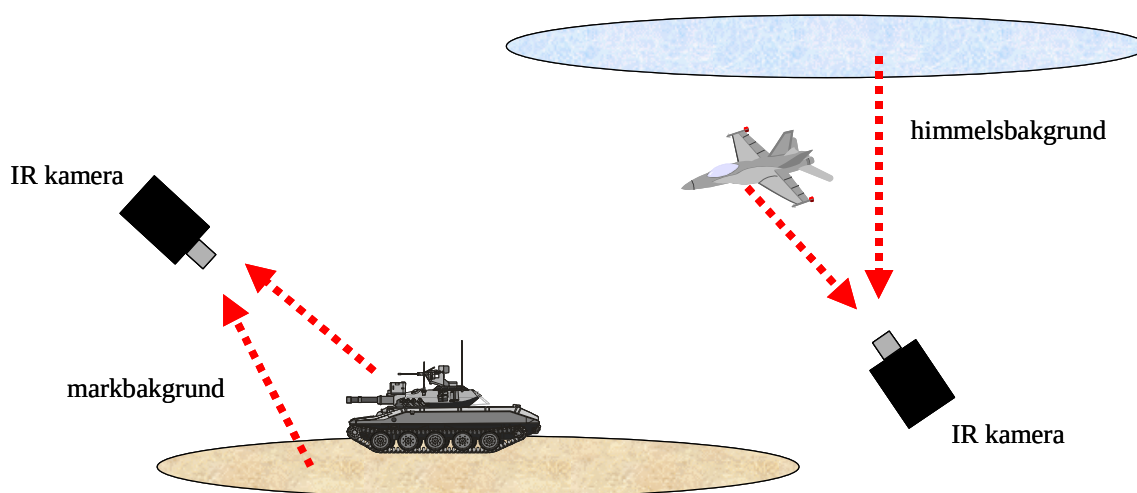
I kombination med dessa åtgärder, eller som enda åtgärd i de fall då föregående konstruktionsåtgärder ej föreligger, kan farkostens skrovyta beläggas med ett tunt skikt som reducerar den termiska utstrålningen.

Skiktets förmåga att hindra den underliggande värmen från att stråla ut beror på ytans emissivitet eller emissionstal (betecknas ε), vilket anger hur stor del av materialets värmeinhåll som kan stråla ut från ytan. Definition för ε är alltså bråkdelen av en kropps utstrålning i förhållande till en svartkropp vid samma temperatur, se Figur 1-2. Med andra ord anger $\varepsilon=1$ att lika mycket utstrålas från en kropps yta vid temperatur T som utstrålas från svartkroppsytan vid samma temperatur, medan $\varepsilon=0$ betyder att ingen värmeinstrålning kan stråla ut. Detta innebär att ju högre ytans IR-reflektans är, desto lägre är dess emissivitet, (se Figur 1-3).



Figur 1-3. Figuren till vänster har en yta med låg emissivitet varvid värmeinstrålningen till en stor del hindras från att stråla ut (låg egenstrålning) och omgivningens strålning reflekteras i dess yta. Figuren till höger har hög emissivitet och släpper därför ut större delen av dess interna värme (hög egenstrålning) och omgivningens strålning absorberas/transmitteras till en stor del i materialet.

Genom att sänka ytans emissivitet vill man minska utstrålad värme tills dess att ytans temperatur motsvarar farkostens bakgrundstemperatur, betraktat med en hotsensor, vilket illustreras i Figur 1-4. Vissa ytor hos en farkost som t.ex. fönster och cockpit-huvar måste anpassas till skrovets/bakgrundens emissivitet för att inte skapa en oönskad kontrast mot skrovet. Man måste dock vara medveten om att lågemissiva material kan ge upphov till en del oönskade reflexer, speciellt från punktformade ljuskällor såsom solen och laserradar. Solens intensitet avtar visserligen ut i IR-området men kan vara av betydelse ut till ca. 3-4 μm . Önskade reflexer, från t.ex. laserradar, kan till en viss del avhjälpas genom att undvika att skrovytorna är vinkelräta mot speciella hotriktningar, på liknande sätt som radarsignaturer minskas.



Figur 1-4. Olika mål med skilda bakgrundstyper betraktade med en IR-kamera.

I sin mest avancerade form kan värmereduktionen göras selektivt och begränsas enbart till de båda atmosfäriska transmissionsfönstren. Därigenom minimeras inverkan på den önskvärda strålningskylningen av farkosten. Man bör även eftersträva hög emissivitet (låg reflektans) för våglängder kortare än 4 μm för att minska solreflektionen i skrov materialet. Eftersom bakgrunden skiftar i takt med

att ett fordon rör sig genom olika terrängtyper eller att en hotsensor ändrar position bör signaturanpassningen ske dynamiskt och vara styrbar. Detta kan t.ex. ske genom att variera ventilationsflöden under skrovet och/eller att man kan styra emissiviteten på den signaturreducerande skrovbeläggningen. I ett framtidsperspektiv är det önskvärt att satsa betydligt större resurser på att ta fram styrbara material.

Det är dock i högsta grad väsentligt att de IR-inriktade åtgärderna utformas så att signaturanpassningen inom det visuella området och för radarområdet inte försämras. Härvid bör man således undvika att lågmissiva skikt reflekterar kraftigt inom det synliga området och att skikten är elektriskt ledande i fall då det finns underliggande radarabsorberande material.

Ytterligare ett hot som ökar IR-kontrasten mellan skrovytor och bakgrund är att använda polarisationsfilter framför en IR-sensor. Eftersom jämna ytor mer eller mindre polariserar emitterad värmestrålning kan man med polarisationsfilter erhålla ljusets polarisationskomponenter, vars intensitet kan skapa en kontrast mot bakgrundens värmestrålning vilken oftast är helt opolariserad (undantag t.ex. vattenbakgrund). Ett sådant hot kan dock avvärjas genom att bl.a. öka en ytas skrovlighet varigenom den emitterade strålningen depolariseras och kontrasten mot bakgrunden minskas.

2 Materialval för konstruktionsmässig utformning

Intresset för flexibla och lättanpassade plattformar och skydd inom Försvarsmakten (FM) ökar, vilket ställer nya krav på konstruktioner och material. Konstruktionerna skall uppfylla de traditionella kraven på skydd samtidigt som de skall vara anpassade till den rådande hotbilden. Detta betyder bl.a. att de skall vara signaturanpassade i alla elektromagnetiska våglängdsband, UV, VIS, NIR, IR och radar. Några av dessa aspekter behandlas i rapporterna [Forsberg:1999] och [Sjökvist:2000].

Rapporten *Signaturanpassningsteknik för fortifikatoriska skydd - en översikt* [Forsberg:1999] orienterar om begreppen signaturanpassning och fortifikatoriska skydd. I rapporten behandlas signaturegenskaperna hos s.k. lätta snabbyggda splitterskydd (LSS-moduler), som användes av den svenska FN-styrkan i forna Jugoslavien. Traditionellt har man använt bepansringens vikt och maskering som främsta skyddsegenskaper. Utvecklingen av spaningssystem och vapen under senare år gör dock att effektiviteten i de traditionella skyddsmetoderna minskar drastiskt. Då det även sker en stor utveckling på materialsidan är det nu både möjligt och nödvändigt att öka skyddet för vissa funktioner i ett tidigare skede i kedjan: upptäckt - identifiering - målfångning - träff - verkan, genom såväl rörlighet som vikt. Rörlighet står dock i direkt motsats till vikt. Som en konsekvens av detta blir maskeringen än viktigare när utvecklingen går mot ökad rörlighet.

LSS-modulerna är dimensionerade att motstå splitter, d.v.s. att kunna skydda mot en 6 mm stålkula med vikt 0,9 g och hastighet 1200 m/s och finns i två utföranden. Den ena tillverkad av Statoil EuroParts AB innehåller ett Kevlarlaminat som penetrationsskydd och den andra, från Åkers Protection AB, har en 10 mm aluminiumplatta som skydd. Båda elementen väger 46 kg. Enligt rapporten har modulerna i huvudsak samma prestanda i UV-VIS-IR området. Däremot beräknades den termiska signaturen, tidskonstanten för soluppvärmning, till 6 min för Statoil-elementet och 60 min för Åkers-elementet. Vidare är Statoil-elementet delvis radarreflekterande medan Åkers-elementet innehåller en metallplatta och är därför helt radarreflekterande. Rapporten presenterar även en litteraturlista, en förteckning över svensk kompetens inom områdena fortifikation och signaturanpassning samt ett avsnitt avseende ansvarsförhållanden beträffande befästningars upprättande, drift och underhåll.

I rapporten *Värmeöverföringsanalys i olika skrovstrukturer* [Sjökvist:2000] diskuteras konstruktionsutformning för skrovmaterial ur ett värmeöverföringsperspektiv. Avsikten är att ge en förståelse för hur val av material och konstruktion påverkar yttemperaturen och därmed den termiska signaturen som uppkommer p.g.a. emitterad strålning. Mätningar och beräkningar av värmetransport i konstruktioner av sandwich-typ presenteras och jämförs även med beräkningar av olika konstruktioner med mer eller mindre traditionellt snitt. I rapporten visas på möjligheten att beräkna yttemperaturen på

olika skrovkonstruktioner under naturlig påverkan från miljön. Resultat från numeriska beräkningar m.h.a. finita elementmetoden (THAFEM) och finita differensmetoden (Wintherm) redovisas, där de viktigaste parametrarna har varierats för att jämförelse mellan olika uppbyggnadssätt och skrovmaterial ska kunna ske.

Utomhusmätningar av en solbelyst skrovstruktur målad med tre olika färger visar att de olika färgkulörerna har olika solabsorbans och därför erhåller olika yttemperaturer. Beräkningar för ytor med olika optiska egenskaper visar att en variation av emissiviteten och absorbansen mellan 0,8 och 1 ger ett tämligen snävt intervall runt 50 °C av högsta erhållna yttemperatur av en solbelyst yta. Störst skillnad fås då emissiviteten sätts till 0,5 och absorbansen till 0,9, vilket ger en högsta temperatur om 63 °C. Konstruktionsmaterialets inverkan på yttemperaturen visar, med ett undantag, på en minst tiogradig temperaturhöjning, jämfört med en begynnelsestemperatur om 20 °C. De strukturer som har ett yttre skikt av ett material med hög värmekapacitivitet (t.ex. aluminium) visar generellt en mindre temperaturhöjning. Då luft ligger nära ytskiktet tjänar det som en isolator, vilket medför att temperaturen snabbt stiger till en relativt hög nivå.

3 Material med styrbar emissivitet

Föremål med en temperatur som är högre än dess bakgrund strålar ut mera IR-strålning jämfört med bakgrunden och är därför lätta att upptäcka med en IR-kamera. Ett sätt att minska IR-strålningen är att sänka ytans emissivitet, d.v.s. öka dess reflektans, så att föremålets utstrålade temperatur motsvarar bakgrundens. Detta fungerar så länge som temperaturen hos bakgrunden och föremålet är konstant. Om t.ex. föremålet svalnar så kommer det att erhålla en lägre IR-emittans än bakgrunden, varvid kontrasten mellan föremålet och bakgrunden ökar igen. Ett sätt att lösa detta problem är att förse föremålets yta med ett material vars emissivitet kan styras. Med kromogena material menas material som förändrar sina optiska egenskaper (transmission, reflektion, absorption) p.g.a. yttre påverkan, såsom pålagd spänning (elektrokroma), infallande ljus (fotokroma), temperatur (termokroma) eller tryck (piezokroma). Ett termokromt material ändrar t.ex. färg vid ändrad temperatur.

3.1 Termokroma material för IR-kamouflage

Företaget CoAT AB har för vår räkning gjort en del utvecklingsarbete inom termokroma material. En inledande rapport [CoAT:1991] ger en överblick över teknologins standpunkt beträffande termokroma material med inriktning mot material i skiktform. Främst betonas material som kan anses tillämplbara för termisk kamouflering inom temperaturintervallet -50 till +150 °C och våglängdsintervallet 3-12 µm. Målet med användandet av termokroma skikt i detta sammanhang är att erhålla en yta med konstant värmeutstrålning. Rapporten ger även förslag till möjliga vägar att realisera ett sådant kamouflage-material.

En mängd olika exempel ges i [CoAT:1991] på termokroma material, såsom organiska metallfria material, föreningar innehållande metaller samt oorganiska material. För material där mekanismen yttrar sig i en halvledar-metallfasövergång kan vi vänta oss en minskning av emissiviteten med ökande temperatur runt fasövergångstemperaturen, T_t . Detta skulle bidra till att reducera ökningen av utstrålade värmeutstrålning (eller t.o.m. utjämna) vid ökande temperatur. För våra tillämpningar söker vi ett material som förändrar sina optiska egenskaper inom intervallet -50 to +150 °C. Ett material som passar för dessa krav är VO₂, för vilket $T_t = 68$ °C. Materialet förändrar sin reflektans mycket kraftigt för $T \geq T_t$. T_t kan modifieras genom dopning med Nb, Ta, Mo eller W. VO₂ kan tillverkas med en rad olika tekniker såsom reaktiv sputtring, CVD, sol-gel, elektrokemisk deponering, termisk sönderdelning, termisk oxidering, anodisering, etc. För tillämpningar inom signaturanpassning vill vi inte att fasövergången skall ske inom ett alltför snävt temperaturområde. Detta kan åstadkommas genom kontroll av de i ytbeläggningen ingående faserna. Den monoklina VO₂-fasen bör i detta fall eftersträvas, vilken antingen bildas genom

t.ex. reaktiv sputtring vid hög substrattemperatur (~500 °C) eller genom deponering av rent V med efterföljande termisk oxidering. För storskalig produktion torde den första metoden vara att föredra.

CoAT AB har tillverkat ett antal olika beläggningar av VO₂, dels som odopat material med en omslagstemperatur vid 68 °C [Alldén:1991] och dels ett wolframdotat VO₂ med en lägre T_i vid ca 50 °C [Årman:1993c]. Beläggningarna tillverkades med reaktiv sputtring från en vanadintarget och för dopat VO₂ även från en wolframtarget. Dopningsgraden för det dopade materialet var ca 2 % och kontrollerades genom att variera den tillförda effekten till wolframtargeten. Oxiden har antingen erhållits via temperaturbehandling vid ca 420 °C efter sputtringen eller genom förhöjd substrattemperatur under sputtringen. För den dopade strukturen erhöles en reflektans om ca 0,9 vid 80 °C och ca 0,6 vid 20 °C. Proverna tillverkades genom att först sputtra ett lager kiseloxynitrid på en metallfolie varefter vanadin sputtrades [Alldén:1991, Årman:1993b]. Mellanlagret användes för att inte den låg emissiva metallen skulle inverka på den höga emissiviteten VO₂ har för temperaturer under T_i . I [Årman:1993b] användes mattsad stålplåt som substrat för att erhålla ett lågt glanstal.

3.2 Styrbara polymerfilmer

Bertil Helgee och Kent Skarp vid Chalmers Tekniska Högskola (CTH) har skrivit ett par mindre, sammanfattande rapporter som underlag inom området styrbara polymerfilmer [Helgee:1996a, Helgee:1996b]. Polymera material finner alltmer användning i tillämpningar där man kan utnyttja funktionalisering av polymerstrukturen för att uppnå specifika effekter. Exempel på sådana relativt nya polymerer är vätskekristallina (LC) polymerer, som erbjuder en mängd intressanta fysikaliska egenskaper för optiska, elektrooptiska, piezoelektriska och pyroelektriska tillämpningar. Internationellt pågår forskning kring vätskekristallina polymerer vid ett flertal högskolor, främst koncentrerade till Tyskland, Ryssland, Japan och USA.

Bland intressanta forskningsresultat kan nämnas rapporter om switchbara kirala huvudkedje-polymerer, polysiloxaner där kiraliteten induceras via en asymmetrisk svavelatom samt antiferroelektriska icke-kirala polymerer (kiralitet innebär att en molekyl kan uppträda i två former som är varandras spegelbilder). Nya typer av "side-on" polymerer har syntetiserats, där sidokedjorna är länkade till huvudkedjan via en central spacer. Sådana strukturer är av intresse för att öka omslags hastigheten i polymerfilmer. Av tekniskt intresse är experiment med användning av elektriskt ledande polymerer som kombinerade elektroder/orienteringsskikt, vilka i kombination med ett elektro-optiskt aktivt LC-polymerskikt ger en switchbar "helpolymerfilm".

Vid CTH har man utvecklat syntes och fysikaliska mätningar avseende LC-polymerer och påvisat möjligheten att med en relativt enkel metod belägga en fast yta med LC-polymerfilmer under bibehållande av tillräcklig molekylär ordning för att ge polymerbeläggningen styrbara optiska egenskaper.

4 Pigment och bindemedel för låg emissiv färg för IR-området

Som titeln till detta avsnitt anför så består färg av bindemedel och pigment. Dessutom tillför man tillsatsämnen till bindemedlet för att bland annat minska dess skum- och luftbildningstendens. Bindemedlets uppgift i färgen är att tillföra de mekaniska och kemiska egenskaper samtidigt som den håller pigmentet på plats. Pigmentet å andra sidan styr färgens spektrala egenskaper som blir resultatet av växelverkan mellan de ingående komponenterna, d.v.s. pigment, bindemedel och eventuella tillsatsämnen.

Transmissionen hos bindemedel är i många fall begränsad i 3-5 och 8-12 µm vilket medför att infallande IR strålning absorberas mer eller mindre, vilket minskar den sträcka ljuset kan tillryggelägga i färgskiktet

innan strålningen reflekteras. De absorberande egenskaperna hos bindemedlet försvårar möjligheten att åstadkomma en lågemissiv färg. Pigment med högre reflekterande egenskaper är en metod som kan motverka absorptionen [Staaf:2000a].

För färg är dilemmat att det idag inte finns pigment som ger emittansvärden under 0,4 utan att ge metallglans i det synliga området [Georgson:1999]. NIR egenskaper på kommersiella färgprover från SCANIA har tagits fram och finns dokumenterade i ett FOI/FOA memo [Staaf:2000c]. Ett antal olika pigmenttyper kan dock tänkas komma i fråga [Bohman:2001]; 1) metallpigment, som är i särklass vanligast, av t.ex. aluminium eller silver, 2) reststrålebandpigment av keramiska material, såsom kvarts, kiselkarbid, titanoxid, aluminiumoxid eller berylliumoxid, 3) IR-transparenta material, d.v.s. material som har en låg extinktionskoefficient i det termiska IR-området som t.ex. kisel, germanium eller zinksulfid, 4) multilagerstrukturer uppbyggda som reflektionsfilter för ett eller fler våglängdsband eller 5) fotonbandgapsmaterial där materialet är periodiskt uppbyggt med varierande brytningsindex som åstadkommer totalreflektion för vissa i materialet förbjudna våglängder, t.ex. inversopaler.

4.1 IR-egenskaper hos bindemedel

Största delen av detta avsnitt är baserat på en FOA/FOI-studie [Lee:2000]. Syftet med studien var att undersöka de termiska IR-egenskaperna hos olika tänkbara polymera bindemedel med hjälp av Fourier-transformation infraröd (FTIR) spektroskopi. Från spektrala data beräknades emissionsfaktorn, ϵ , hos polymererna i de två IR-fönstren 3-5 och 8-12 μm och genom att relatera den (kurvanpassning) till tjockleken hos polymerfilmerna kunde en absorptionskoefficient, α , beräknas. α utgör sedan ett värde för att rangordna polymererna såsom lämpligt bindemedel i en lågemissiv kamouflagefärg.

De undersökta polymererna var polyuretaner, vinyler, silikon, epoxihartser, klorerad polyolefin och polyeten. Absorptionskoefficienten låg på 0,0020 till 0,011 μm^{-1} i 3-5 μm bandet och 0,021 till 0,17 μm^{-1} i 8-12 μm bandet. α är med andra ord en faktor tio gånger större i 8-12 μm än i 3-5 μm området. Generellt kan polymererna rangordnas med stigande α i 3-5 μm bandet enligt:

silikon < vinyler $\leq$ klorerad polyolefin < epoxihartser < polyuretaner < polyeten

och i 8-12 μm bandet enligt:

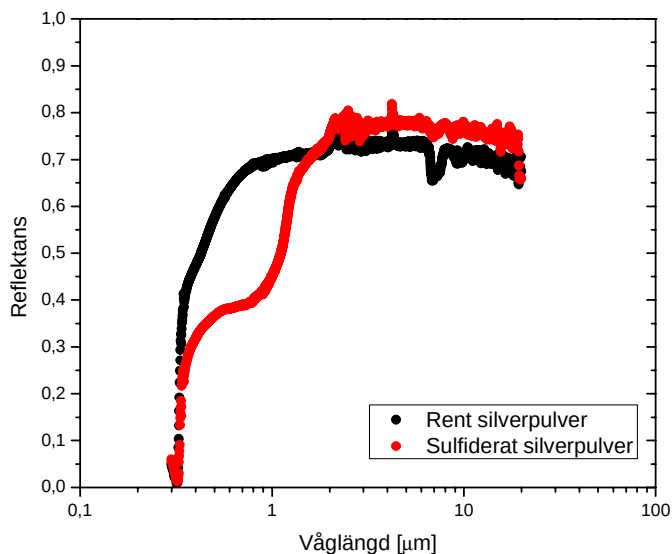
polyeten < vinyler $\leq$ klorerad polyolefin < polyuretaner < epoxihartser < silikon

Av alla undersökta polymerer bedöms samtliga vara tänkbara som bindemedel i lågemissiv färg i 3-5 μm området, medan det i 8-12 μm området endast är polyeten som kan uppvisa en α låg nog för att kunna bära ljusspridande pigment utan alltför hög absorption.

4.2 Pigment

4.2.1 Metallpigment

En FOI-studie har gjorts [Georgson:1999] med syfte att undersöka om det är möjligt att kombinera lågt emittansvärde inom IR-området och låg metallglans i det visuella området, hos målade ytor med metallpigment täckta med ett tunt oxid- eller sulfidskikt. Genom att utnyttja våglängdsskillnaden mellan IR och synligt ljus kan man få IR-strålningen att reflekteras i partikelkärnan av metall medan de synliga våglängderna absorberas i oxid-/sulfidytterskiktet [Georgson:1999]. De metaller som undersöktes var silver, koppar och järn.

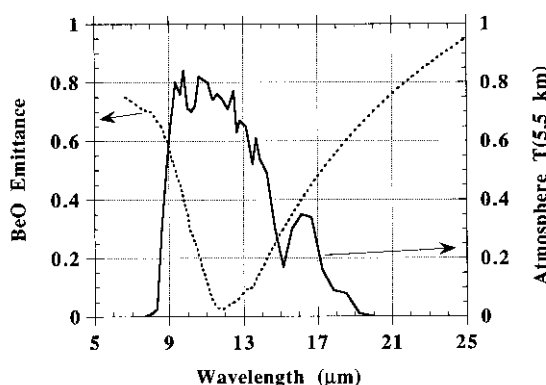


Figur 4-1. Exempel på reflektantskurva av metallpulver med reducerad metallglans i det visuella våglängdsområdet [Georgson:1999].

Studien pekar på möjligheten att tillverka en lågemissiv färg utan att den ger en metallglans i det visuella området. Exempel på resultatet från studien kan ses i Figur 4-1. Arbetet var dock inte fokuserat på att optimera tillverkningsprocessen, varför en systematisk studie av t.ex. oxidationstidens (dvs. oxidationskitets tjocklek) och kornstorlekens inverkan på de optiska egenskaperna skulle kunna ge en större våglängdsselektivitet. Även växelverkan mellan bindemedel och metallpigment med oxid-/sulfidskikt bör utvärderas.

4.2.2 Pigment av reststrålebandsmaterial

Bakgrunden till denna aktivitet är observationen att reststrålebandet i berylliumoxid nära nog sammanfaller med det övre atmosfäriska IR-fönstret vid ca. 8-13 μm . Ett reststråleband innebär hög bulkreflektans, vilket medför att emittansen $\varepsilon=1-R$ (där R är reflektansen) blir låg (jmf. Figur 1-3, sid. 6). En yta som belagts med ett skikt av BeO är sålunda selektivt lågemitterande i det övre atmosfäriska fönstret [Ribbing:1995a].



Figur 4-2. Den normala, spektrala bulkemittansen hos stränggjuten BeO jämförd med transmissionen genom 5,5 km torr, kall atmosfär.

Av Figur 4-2 framgår hur reststrålebandet hos BeO undertrycker den termiska emissionen i det övre atmosfäriska fönstret. Mätningen har gjorts på keramisk berylliumoxid, som kan erhållas till ett överkomligt pris. Figuren visar emellertid också att i intervallet 8-9 μm har en BeO-yta hög utstrålning. I ett senare arbete visades att även denna emission effektivt kan undertryckas med ett lagom tjockt skikt av kisel [Ribbing:1995b].

Berylliumoxid och alternativa reststrålebandsmaterial såsom kiselkarbid, aluminiumoxid och sialon [Andersson:1998] har gemensamt, av fundamentala skäl, starka bindningskrafter och hög smältpunkt. På grund av detta är det svårt att åstadkomma homogena, μm -tjocka beläggningar vid de temperaturer som underlaget kan utsättas för (se [CoAT:1990]). På grund av detta har möjligheten att utnyttja en målarfärg med ett pigment av reststrålebandsmaterial undersökts. Fördelen, i jämförelse med konventionella metallpigment, skulle vara att den målade ytan är selektivt lågemitterande och därmed ger bättre strålningskylning och att metallglans i det synliga området undviks. Problemen i detta fall är att åstadkomma ett färgskikt med tillräckligt hög densitet av pigment och att undvika kanteffekter i pigmentflagorna. För den intresserade läsaren finns mer information om reststrålebandsmaterial i följande referenser [Andersson:1994, Andersson:1995, Andersson:1997, Ribbing:1994, Staaf:1996c] samt mer mättekniska referenser [Ribbing:1997, Staaf:1996a, Staaf:1996b].

4.2.3 IR-transparenta material

Material såsom kisel, germanium och zinkselenid uppvisar liten ljusabsorption i IR-området och då dessa finfördelas till ett pulver erhålls en bakåtspridning av infallande ljus. Med andra ord kan fina partiklar av dessa material vara högreflektande [Staaf:2000a] och pulvret är således "vitt" i IR-området. En hög reflektans, R , medför en låg emittans, ε , även om viss transmittans föreligger, varför denna typ av material är användbara i lågemissiv färg. Graden av bakåtspridning bestäms av materialets brytningsindex och pulvrets kornstorlek i förhållande till ljusvåglängden [Andersson:2000]. Trots att detta har patenterats [Andersson:2000] har tills mycket ringa forskning på området gjorts på FOI.

4.2.4 Multilagerstrukturer

Tunnfilmsteknik utnyttjas allmänt för filterframställning och antireflexbehandling. Om material med omväxlande högt och lågt brytningsindex kombineras till ett multilagerskikt kan man erhålla ett reflektionsfilter eller spegel för den termiska strålningen. I de beräkningar som gjorts på FOA/FOI är tanken att multilagersstrukturer uppbyggda av tunna skikt skall finfördelat kunna utgöra pigmentet i form av flagor i en lågemissiv maskeringsfärg. I stället för att enbart använda materialets höga brytningsindex för reflektionen av värme, nyttjas då även interferens i tunna skikt för att öka reflektansen genom att pigmentflagorna ges en bestämd tjocklek. Genom val av material och skikttjocklek skräddarsys de optiska egenskaperna hos pigmentflagorna till önskade prestanda vad beträffar spektral reflektans. Skiktat material förekommer t.ex. naturligt i glimmer.

I rapporten *Multilagerpigment för lågemissiv maskeringsfärg* [Staaf:2000a] har beräkningar utförts på olika materialsammansättningar och tjocklekskombinationer av dessa. Bästa kombinationen utifrån de beräkningar som gjorts, bedöms vara ett 1-skikts germaniumlager med tjockleken $\frac{3}{4}$ våglängd samt ett 3-skikts Ge/ZnS/Ge-lager av $\frac{1}{4}$ vågstyp om hög reflektans önskas i 3-5 μm området eller ett 3-skikts Ge/ZnS/Ge-lager av $\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ -typ om hög reflektans önskas främst i 8-12 μm området. Från beräkningarna kan följande slutsatser dras:

- högt brytningsindex hos materialet i ett enkellager, liksom i ytterskikten hos ett multilager, ökar reflektansen.
- Stor skillnad i brytningsindex hos materialen i ett multilager ökar också reflektansen
- Ökad optisk tjocklek hos skikten minskar bandbredden
- Flera skikt i ett multilager ökar reflektansen men minskar bandbredden

- Infallsvinklar upp till 45 grader har liten inverkan på reflektansen.

Ett alternativ till rent dielektriska multilagerbeläggningar är att något skikt består av metall. Rapporten *Multilayer structures for low emissive paint* [Nilsson:2001] beskriver beräkningar och tillverkning av multilagerpigment bestående av TiO_2 och Au. 3-lagerstrukturer tillverkades genom sputtring. Därefter avlägsnades skiktet i form av flingor från ett glassubstrat. Reflektansmätningar gjordes på substrat med 3-lagerskikt och på flingorna sedan skiktet avlägsnats, i både visuella och IR-området. Flagorna skickades till samarbetspartners vid DFRIT/PvTT i Finland där färg tillblandades och utvärderades.

Vissa svårigheter fanns i samband med att separera multilagerskikten i form av flagor då det lätt finfördelades till pulver. Om man med lätthet vill kunna avlägsna flagor från sitt substrat är tjockare filmer att föredra, vilket kan åstadkommas med t.ex. 5 eller 7-skikt, varpå dock bandbredden minskar.

4.2.5 Fotonbandgapsmaterial

En fotonkristall är en periodisk struktur med en periodlängd, eller gitterkonstant, som är av samma storleksordning som en ljusvåglängd. För t.ex. synligt ljus, som har våglängder kring $0,5\ \mu\text{m}$ innebär detta att enhetscellen skall vara ca 1000 gånger större än i en vanlig atomär kristall. Om den valda kristallina strukturen är gynnsam och brytningsindex för det valda materialet är tillräckligt stort, har man funnit att ett s.k. *fullständigt fotonbandgap* kan erhållas. Ett sådant gap är ett frekvensintervall inom vilket en elektromagnetisk våg är ”förbjuden”, dvs. starkt dämpad pga. att vågvektorn är imaginär [Ribbing:2002].

Insikten om denna möjlighet att med hjälp av mikrostrukturteknik tillverka komponenter med oväntade optiska egenskaper har väckt stor uppmärksamhet över hela världen. En *dopad fotonkristall*, dvs. med en kontrollerad defekt, kan t ex erbjuda en smalbandig kanal med oöverträffat låg dämpning, och i vilken ljus kan ledas t ex runt skarpa hörn.

Inom detta projekt har vi koncentrerat oss på att en fotonstruktur kan utnyttjas för selektiv signaturanpassning. I ett fullständigt fotonbandgap finns inga tillåtna tillstånd för termiskt emitterade fotoner. Detta innebär att den termiska emissionen undertrycks inom fotonbandgapets frekvensområde. Särskilt intressant är detta för det kortvågiga termiska atmosfärsfönstret $3\text{--}5\ \mu\text{m}$, ty det finns inga reststråleband som är så kortvågiga. Möjligheten att kombinera ett fotonstrukturellt gap i detta område med ett materialbetingat gap i $8\text{--}13\ \mu\text{m}$ intervallet har nyligen patentsökts [Ribbing:2001b].

Under den gångna perioden har tjockleksberoendet av denna typ av emissionsdämpning undersökts med beräkningar för två hypotetiska strukturer. För signaturanpassning är inte nollemission önskvärt, utan en reduktion till nivåer kring $\epsilon=0,2\text{--}0,4$. Beräkningarna har visat att en fotonstruktur med ungefär tjockleken hos ett målarfärgsskikt ger en emissionsdämpning som är av intresse för signaturanpassning [Rung:2002].

Inledande sedimenteringsförsök av kolloida kristaller av polymersfärer har gjorts. Resultaten är delvis uppmuntrande, i och med att kristalliter med hög kristallin ordning har erhållits. En kritisk fråga är emellertid om storleken på dessa kristalliter är tillräcklig. Dessutom återstår vidareutveckling av en sol-gel process, som ger ett tillräckligt tätt och hållbart skelett av ett lämpligt reststrålebandsmaterial och ett tredje steg i vilket sfärerna avlägsnas utan att skada fotonstrukturen [Rung:2001c]. Även försök till framställning av fotonbandgapsstruktur av en epoxyharts, SU-8, har gjorts men det konstaterades att extinktionsvärden för materialet var för lågt för att direkt kunna utnyttjas i en fotonbandgapstillämpning [Rung:2001c]. För den intresserade läsaren finns mer information i följande referenser [Ribbing:1998, Ribbing:2000a, Rung:2001a, Rung:2001b]

5 Vidhäftning och optiska egenskaper hos lågemissiva beläggningar på siktrutor.

För att erhålla god signaturanpassning inom både IR och radarområdet är det önskvärt att belägga siktrutan/huven på flygplan med material som har god vidhäftningsförmåga, hög transmission inom det visuella våglängdsområdet samt hög IR och radarreflektion.

Rapporterna *Lågemissiv beläggning på siktruta/huv* del 1 [Årman:1991] och del 2 [Årman:1992] författades redan 1991 och 1992. I del 1 har man belagt polymetylmetakrylat (PMMA) med elektriskt ledande tennoxid. Skikten är tillverkade med reaktiv sputtering och är 700 nm tjocka med en ytresistans på 50-60 Ω /ruta. Emittansen i våglängdsområdet 8-12 nm var drygt 50 %. Transmissionen i det synliga området är ca 55 %. Ett regnerrosionstest visade på dålig vidhäftning. I del 2 har man försökt förbättra vidhäftningen genom utökat jonbombardemang vid sputteringprocessen. Detta ger starkare bindningar mellan substratet och beläggningen. Genom att tillverka ett något tunnare skikt ökade transmissionen till 70%. Övriga värden var samma som ovan.

Många av de beläggningsprocesser som ger bra vidhäftning kräver att man värmer substratet till höga temperaturer vilket inte är lämpligt då man vill belägga PMMA och liknande substrat. I en sammanfattningsrapport *Tillverkning av hårda transparenta beläggningar* [Årman:1993a] tar man upp olika tillverkningsmetoder där substrattemperaturen inte överskrider 100 °C.

I rapporten *Beläggning av titannitrid på siktruta/huv för militära flygplan* [Staa:1998] har de mekaniska egenskaperna hos titannitrid (TiN) som beläggning på underlag av polykarbonat (PC) och polymetylmetakrylat (PMMA) undersökts med hjälp av ett regnerrosionstest. Vidare har beläggningarnas elektromagnetiska egenskaper mätts i det visuella, det termiska IR- och radarområdet. Hittills gjorda försök visar att TiN fortfarande är en kandidat som beläggningsmaterial på siktruta/huv.

Vidare behandlas de optiska egenskaperna och vidhäftningen hos några plaster som applicerats på metallbelagda substrat i rapporten *Optical properties and adhesion of polymer films coated on reflective substrates* [Lee:1999a]. Plasterna var polymetylmetakrylat (PMMA), fluorinerad etencyklooxyalifatiskt substituerad etensampolymer (Teflon AF) och styren-isoprensampolymer (Kraton D-1161). Substraten utgjordes av guldbelagd polyester (AuPET) indiumtennoxidbelagd polyester (ITOPET) och AgF₈-belagd polykarbonat (EMC). FTIR spektra visar att både AuPET och EMC substraten har en reflektans som är större än 0,8 i det termiska IR-området. ITOPET-substratet däremot har reflektansen 0,4 i samma område. Bland de undersökta plastfilmerna har Teflon AF den bästa vidhäftningen. Emittansen hos Teflon AF/EMC och Teflon AF/AuPET med filmtjockleken 2,8 μ m ligger vid 0,2-0,3 i 3-5 μ m området och ca 0,5 i 8-12 μ m området. PMMA, PS och Kraton D-1161 med filmtjocklekar 0,8-3,3 μ m på EMC och AuPET substrat har emittansvärden från 0,1 hos PS/EMC-filmen i 3-5 μ m området till 0,45 för Kraton/EMC-filmerna i 8-12 μ m området. Undersökning av dessa senare polymerer visar att vidhäftningen till substraten ej är särskilt god.

I rapporten *Adhesion of Low Emissive Coatings on PMMA Substrates* [Lee:1999b] finns ytterligare tester av TiN på PMMA substrat. Man har även tittat på visuellt transmittande skikt av guld, silver och aluminium på PMMA substrat. Detta för att åstadkomma ett lågemissivt skikt på huvmaterialet hos flygplan. Skikten tillverkades på med sputtring och innan deponeringen användes glimning för att modifiera PMMA-ytan. Glimningen syftade till att förbättra vidhäftningen av metallskiktet. Ett tejpstest visade dock att förbehandlingen av ytan inte gav den önskade förbättringen av vidhäftningen. Tester med vattenjet på en titannitrid belagd yta visade inte på några förändringar i erosionsmotstånd för PMMA-ytan.

IR-egenskaperna samt vidhäftningsförmågan på tunna metallfilmer av guld, titan samt en tvålagerstruktur med titan/guld har studerats i rapporten *IR and adhesion properties of metallic coatings on PMMA* [Lee:2001]. Metallfilmerna tillverkades genom DC magnetronsputtering. Tvålagerstrukturen, vilken gav

de bästa resultaten, visade en högre transmittans än rent guld i våglängdsområdet 400-1200 nm samt en hög reflektion om ca. 80% i våglängdsområdet 3-14 μm .

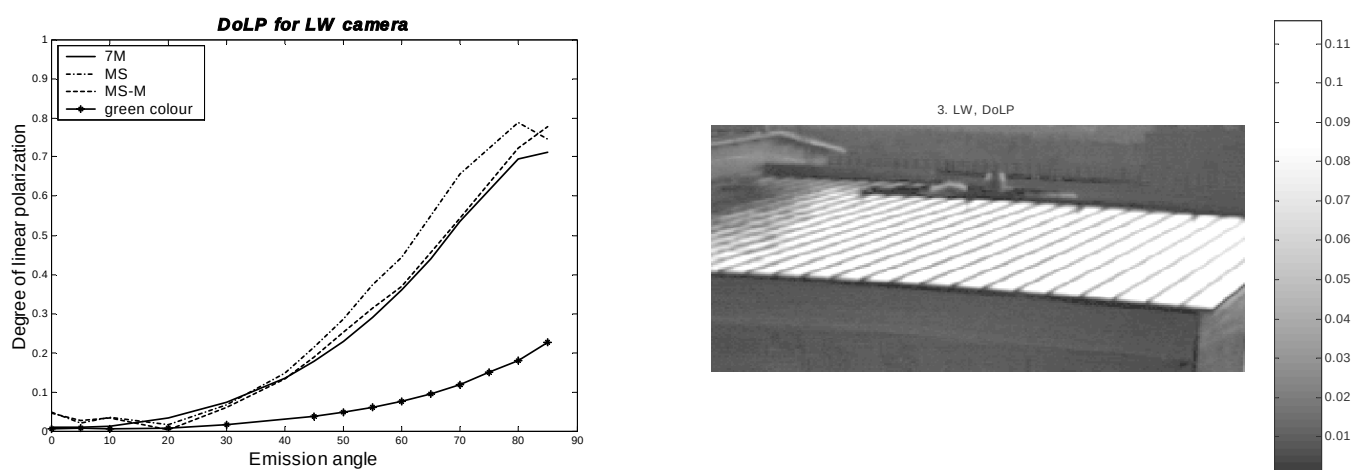
6 Passiv optisk polarisation

Genom att mäta polarisationsegenskaper hos strålning erhålls information om objekt i bakgrund som inte kan erhållas om mätning sker utan uppdelning i polarisationskomponenter. Mätningar [Forsell:2002] har visat att objekt som är delvis täckta och inte observerbara vid mätning utan polarisator, kan observeras om mätningen sker med uppdelning av strålningen i polarisationskomponenter. Ett exempel på tillämpning är mätningar mot delvis täckta minor och snubbeltråd. En annan tillämpning är polarisationsegenskaper hos maskerade fordon. Kunskaper om polarisationsegenskaper är nödvändiga för förbättring av egna SAT-åtgärder.

Arbetet med polarisation på FOI är uppdelat på två olika projekt som hänger intimt samman och delvis överlappar varandra. Inom projektet "Optiska signaturer" sker huvudsakligen mätningar mot bakgrund och verkliga objekt, för att analysera kontraster. I projektet "Optiska signaturmaterial" sker mätningar av fysikaliska polarisationsegenskaper hos olika material. Avsikten är att både utveckla nya material och att förstå materialens användning för signaturanpassning i verkliga objekt. Fysikaliska modellberäkningar av spridningsmodeller för färger har skett [Forsell:2000a].

6.1 Mätningar

Det första arbetet med passiv optisk polarisation genomfördes i en förstudie [Forsell:1995], som påvisade polarisationseffekter och att de skulle kunna utnyttjas av potentiella hotsensorer. I en serie rapporter [Staaf:2000b], [Forsell:2000b] och [Forsell:2001] har utveckling av kalibrerade mätmetoder rapporterats. Vid mätningarna har två IR kameror använts (Agema Thermovision System 900). Den ena kameran är känslig i 3,5-5 μm och den andra i 8-12 μm . Framför kamerorna har vridbara polarisatorer placerats. Med utrustningen har mätningar skett av emittansen som funktion av emissionsvinkeln för olika polarisationsvinklar. Mätningarna har genomförts genom att emittansen mätts med polarisatorn inställd på i tur och ordning vinklarna 0°, 45° och 90°. Från dessa mätningar kan olika polarisationsparametrar beräknas. Ett exempel är "graden av linjär polarisation", DoLP (Degree of Linear Polarization). Denna parameter beror av hur slät den emitterande ytan är. Objekt gjorda av människor har ofta släta ytor. Mätningar har skett mot olika färger och aluminiumytor med olika skrovlighet.



Figur 6-1. DoLP för grön färg uppmätt i laboratorium som funktion av emissionsvinkel. Dessutom visas i figuren DoLP för Al-tytor av olika skrovlighet (vänstra bilden). DoLP för ett hustak målat med rödbrun färg (högra bilden).

För att illustrera resultat av mätningarna visas i Figur 6-1 (vänstra bilden) DoLP [Forssell:2002a] av grön färg som funktion av emissionsvinkel mätt i laboratorium. Högra bilden visar DoLP av ett plåttak målat med rödbrun färg. Vid 60° är DoLP i vänstra bilden ungefär 0,1 och för plåttaket är parametervärdet också ungefär 0,1. Mätningar i laboratorium är alltså konsistenta med mätningar uppmätta i naturen. Färgerna har ungefär samma polarisationsegenskaper i det termiska området. I Figur 6-1 visas dessutom DoLP av aluminiumytor med olika skrovlighet.

7 Referenser

- Allén Björn: 1991, Processbeskrivning: Termokrom skroveläggning, CoAT AB rapport.
- Andersson S K, Ribbing C-G: 1994, Light extinction by bulk voids and surface irregularities in ceramic materials, Phys. Rev. B. Vol. 49, pp 11336-43.
- Andersson S K, Ribbing C-G, Staaf Ö: 1995, Extending a Reststrahlen Band with a dielectric coating, Tech. Digest 17, Tucson Arizona, June 1995.
- Andersson Stefan K, Staaf Örjan: 1997, Measurement of the directional emittance of polycrystalline beryllium oxide, Infrared Physics & Technology 38 443-448 (FOA-B--98-00362-615--SE).
- Andersson Stefan K., Staaf Örjan, Olsson Per-Olof, Malmport Andreas, Ribbing C-G: 1998, Infrared properties of b-sialon as a function of composition, Optical Materials 10, 85-93 (FOA-B--98-00379-615--SE).
- Andersson Stefan K, Staaf Örjan: 2000, Pigment för lågemissiv färg, svenskt patent nr 510336.
- Bohman Lars, Georgson Mikael, Jänis Anna, Larsson Christer, Larsson Fritz, Ljung Per-Erik, Sjökvist Stefan, Staaf Örjan, Zdansky Erik: 2001, SAT-handbok Mark, FOI.
- CoAT: 1990, Folier för IR-Kamouflage i marin miljö, CoAT AB rapport (FOA reg.nr. 91-104/S).
- CoAT: 1991, Termokroma material för IR camouflage, CoAT AB rapport, (FOA reg.nr. 91-236/S).
- Forsberg Ann-Sofie, Staaf Örjan: 1999, Signaturanpassningsteknik för fortifikatoriska skydd - en översikt (FOA-R--98-00950-311--SE).
- Forssell Göran: 1995, Polarisationseffekter i IR-området. En förstudie, (FOA-R--95-00194-3.1--SE).
- Forssell Göran: 2000a, Modellberäkningar för skrovliga ytor - anpassande till reflektansmätningar på färgprover (FOA-R--00-01478-615--SE).
- Forssell Göran, Hallberg Tomas: 2000b, Polarisationsegenskaper i IR-området hos färgprover och skrovliga Al-yltor, (FOA-R--00-01646-615--SE).
- Forssell Göran: 2001, Surface landmine and trip wire detection using calibrated polarization measurements in the LWIR and SWIR, SPIE Vol.4491, p 41.
- Forssell Göran, Tomas Hallberg: 2002, Calibrated sensitive polarization measurement methods in the regions 3-5 μm and 8-12 μm , corrected for contributions to the detector signal from the polarizer, SPIE Vol. 4481.
- Georgson Mikael, Lee Hung-Shiun, Staaf Örjan: 1999, Metallpulver som pigment för lågemissiv färg, (FOA-R--99-01367-615--SE).
- Helgee Bertil, Skarp Kent: 1996a, Styrbara Färgade Polymerfilmer, Göteborg, Chalmers Tekniska Högskola.
- Helgee Bertil, Skarp Kent: 1996b, Styrbara Vätskekristallina Polymerfilmer, Göteborg, Chalmers Tekniska Högskola.

- Lee Hung-Shiun: 1999a, Optical properties and adhesion of polymer films coated on reflective substrates, (FOA-R--99-00982-615--SE).
- Lee Hung-Shiun, Staaf Örjan, Georgson Mikael: 1999b, Adhesion of low emissive coatings on PMMA substrates, (FOA-R--99-01312-615--SE).
- Lee Hung-Shiun, Staaf Örjan, Ghaemi Hossein: 2000, IR-properties of some binders for the coatings industry, (FOA-R--00-01576-615--SE)
- Lee Hung-Shiun, Georgson Mikael, Lindgren Mikael: 2001, IR and adhesion properties of metallic coatings on PMMA, (FOI-S-0221-SE).
- Nilsson Christina, Hallberg Tomas: 2001, Multilayer structures for low emissive paint, (FOI-R--0278--SE).
- Ribbing C-G: 1994, Reststrahlen material bilayers: an option for tailoring in the infrared, Appl. Opt. 32, 5531.
- Ribbing Carl G, Staaf Örjan, Andersson Stefan K: 1995a, Beryllium oxide - A material for selective suppression of thermal emission domes, (FOA-B--95-00038-2.4--SE).
- Ribbing Carl-Gustaf, Staaf Örjan, Andersson Stefan K: 1995b, Selective suppression of thermal emission from radomes and materials selection therefore, Optical Eng. 34, 3314-22, (FOA-B--96-00134-2.4--SE).
- Ribbing Carl-Gustaf, Staaf Örjan, Andersson Stefan K: 1997, Temperature correction of radiometric emission factors for nongray objects, Optical Engineering 36 [12] 3416-3424, (FOA-B-98--00320-615--SE).
- Ribbing Carl-Gustaf, Staaf Örjan: 1998, Mikromekanik på hårstrå-nivå ska lura ljuspartiklar att gå åt rätt håll. Uppsala universitet och FOA-forskare letar metoder för att minska värmestrålning. Mikromekanik ger "kallare" fordon, FOA-tidningen 3, 12-13.
- Ribbing Carl-Gustaf: 2000a, Delrapport. Fotonbandgap - inventering och forskningsbevakning, (FOA-R--00-01432-318--SE).
- Ribbing C-G, Staaf Ö: 2000b, Ceramic surface polariton sensor, Proc. SPIE vol. 4103, "Optical Diagnostic Methods for Inorganic Materials II" (Ed. L. M. Hanssen) San Diego, August 4-3, 116-125.
- Ribbing Carl-Gustaf, Staaf Örjan: 2001a, Ytpolaritonexcitation i keramita, (FOI-R--0069--SE).
- Ribbing C-G., Rung A.: 2001b, Sätt att skapa ett material med låg emittans i ett eller två bestämda våglängdsområden. Sv. pat-ans nr 0104195-3.
- Ribbing C-G.: 2002, Ch. 2: Photonic Structures as Interference Devices, in *Springer Series in Photonics – Optical Interference Coatings*, Eds; Pulker J. and Kaiser N., to be published.
- Rung A, Ribbing C-G: 2001a, Calculated photonic structures for infrared emittance control, Optical Interference Coatings VIII, July 15-20, 2001, Banff, Canada, ThE5-1, (FOI-S--0263--SE).
- Rung A, Ribbing C-G: 2001b, Photonic crystal structures for thermal signature reduction - thickness effects, Nordic Symposium on Military Electro-optics, Helsinki, October 17-18, (FOI-S--0262--SE).
- Rung A, Ribbing C-G: 2001c, Framställning av tredimensionella fotonstrukturer, FOI Memo, (Dnr. 01-2956).
- Rung A., Ribbing C-G.: 2002, Calculated photonic structures for infrared emittance control, Acc. Applied Optics, March.
- Sjökvisst Stefan, Georgson Mikael: 2000, Värmeöverföringsanalys i olika skrovstrukturer, (FOA-R--00-01761-615--SE).

- Staaf Ö, Ribbing C-G, Andersson S K: 1996a, Temperature dependence of the band emittance for nongray bodies, Appl. Optics 35, 6120-25.
- Staaf Örjan, Ribbing Carl G, Andersson Stefan K: 1996b, Broadband emission factors - temperature variation for non-gray samples, Proc. Thermosense XVIII: International conference on thermal sensing and imaging diagnostic applications Orlando, Florida 10-12, SPIE 2766, 334-345, (FOA-B--96-00173-2.4--SE).
- Staaf Örjan, Ribbing Carl G, Andersson Stefan K: 1996c, Temperature dependence of the emission factors for beryllium oxide in the upper and lower atmospheric windows, Proc. Optical radiation measurements III. Denver, SPIE 2815, 106-116 (FOA-B--97-00219-615--SE).
- Staaf Örjan, Björkqvist Magnus: 1998, Beläggning av titannitrid på siktruta/huv för militära flygplan, (FOA-R--98-00741-615--SE).
- Staaf Örjan: 2000a, Multilagerpigment för lågmissiv maskeringsfärg, (FOA-R--00-01598-615--SE).
- Staaf Örjan, Forssell Göran: 2000b, Polarisationsegenskaper hos maskeringsfärger, (FOA-R--00-01484-615--SE).
- Staaf Örjan: 2000c, Mätning av färgprover från SCANIA, FOA Memo, (FOA dnr. 00-3177/L).
- Årman Stefan: 1991, Lågmissiv beläggning på siktruta/huv: Tillverkning av prov för utvärdering, CoAT AB rapport (FOA reg.nr. 91-3825/S).
- Årman Stefan: 1992, Lågmissiv beläggning på siktruta/huv (Del 2: Förbättrad vidhäftning): Tillverkning av prov för utvärdering, CoAT AB rapport.
- Årman Stefan: 1993a, Tillverkning av hårda transparenta beläggningar: Rapport om olika tillverkningsmetoder, CoAT AB rapport (FOA reg.nr. 93-1671/S).
- Årman Stefan: 1993b, Termokrom beläggning på mätterad metallplåt, CoAT AB rapport.
- Årman Stefan: 1993c, Termokrom beläggning med sänkt omslagstemperatur, CoAT AB rapport.

8 Bibliografi

- Fagerström J, Georgson M: 1998, Bakgrundsklotter i ett signaturperspektiv. Slutrapport för studiegrupp BAKGRUND inom projektet SAT/mark (FOA-R--98-00884-615--SE).
- Larsson Fritz, Staaf Örjan, Nilsson Martin, Olsson Per-Olof, Savage Steven, Svensson Lars, Dickman Ola: 1999, Kommersiella signaturmaterial. En marknadsöversikt, (FOA-R--99-01274-615--SE).
- Staaf Örjan: 1999, Upptäckbarhet med bildförstärkare av NIR-filtrerad strålning och av värmestrålning, (FOA-R--99-01282-615--SE).