

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

## **Optiska Signaturmaterial: Slutrapport**



TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Sensorteknik  
Box 1165  
581 11 Linköping

FOI-R--0942--SE

September 2003

ISSN 1650-1942

**Användarrapport**

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

## **Optiska Signaturmaterial: Slutrapport**

<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Sensorteknik Box 1165 581 11 Linköping	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R--0942--SE	<b>Klassificering</b> Användarrapport
	<b>Forskningsområde</b> 6. Telekrig	
	<b>Månad, år</b> September, 2003	<b>Projektnummer</b> E3033
	<b>Verksamhetsgren</b> 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	<b>Delområde</b> 62 Signaturanpassning	
<b>Författare/redaktör</b> Tomas Hallberg                      Hans Kariis Eva Hedborg-Karlsson              Lars-Göran Heimdahl Carl-Gustaf Ribbing Christina Nilsson Stefan Björkert Göran Forssell	<b>Projektledare</b> Tomas Hallberg	
	<b>Godkänd av</b>	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> FM	
	<b>Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Tomas Hallberg	
<b>Rapportens titel</b> Optiska Signaturmaterial: Slutrapport		
<b>Sammanfattning (högst 200 ord)</b> Rapporten beskriver aktiviteter och resultat inom projektet <i>Optiska Signaturmaterial</i> under perioden 2001-2003. Projektets huvudsakliga uppgift har varit att finna eller utveckla lämpliga material, ytbeläggningar och materialstrukturer som ger en låg termisk utstrålning, i syfte att minska signaturen hos t.ex. försvarsmaktens fordon och andra plattformar. Vi har tagit fram flera olika typer av infraröd (IR)-reflekerande pigment som kan användas i lågemissiv kamouflagefärg. I samarbete med Finska PvTT har vi bedrivit utveckling av en sådan färg. Speciellt har vi intresserat oss för ytor och pigment som ger en våglängdsselektiv signatur, såsom en visuellt lågreflekerande yta kombinerad med hög reflektion inom IR-området, eller hög reflektion inom endast atmosfärens IR-transmissionsfönster (3-5 och 8-12 µm). I det senare fallet kan man tillåta avkylning av ytan via utstrålning utanför transmissionsfönstren. Genom att bl.a. använda oxiderade metallpigment eller multilagerstrukturerade pigment har vi påvisat att den visuella reflektansen kan minskas. Med fotonkristaller kan vi erhålla hög reflektans inom endast 3-5 och 8-12 µm. Dessa egenskaper har erhållits genom modellering och tillverkning har påbörjats. Vi förutser även möjligheten att framtida IR-sensorer kommer att vara polarisationskänsliga, för att öka kontrasten mellan mål och bakgrund. Vi har därför utvecklat ytor som depolariserar strålningen och på så sätt liknar en typisk markbakgrund. För att möta framtidens behov på signaturanpassade ytor har vi även påbörjat litteraturstudier inom styrbarhet av optiska egenskaper hos material eller materialsystem.		
<b>Nyckelord</b> Signaturanpassning, lågemissiva ytor, pigment, bindemedel, emittansanpassad färg, polarisationsegenskaper hos ytor		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b>	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 26 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	

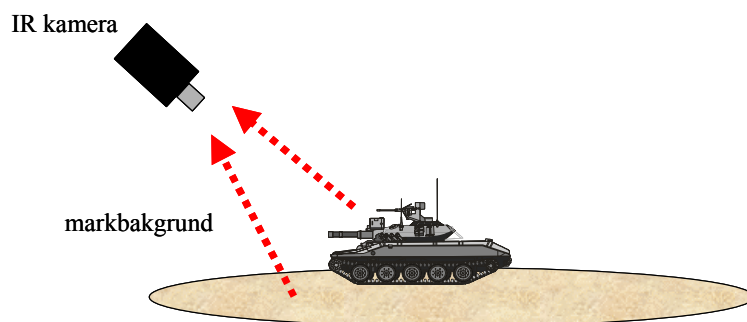
<b>Issuing organization</b> FOI – Swedish Defence Research Agency Sensor Technology P.O. Box 1165 SE-581 11 Linköping	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R--0942--SE	<b>Report type</b> User report
	<b>Programme Areas</b> 6. Electronic Warfare	
	<b>Month year</b> September 2003	<b>Project no.</b> E3033
	<b>General Research Areas</b> 5. Commissioned Research	
	<b>Subcategories</b> 62 Low Observables	
<b>Author/s (editor/s)</b> Tomas Hallberg                      Hans Kariis Eva Hedborg-Karlsson              Lars-Göran Heimdahl Carl-Gustaf Ribbing Christina Nilsson Stefan Björkert Göran Forssell	<b>Project manager</b> Tomas Hallberg	
	<b>Approved by</b>	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Tomas Hallberg	
<b>Report title (In translation)</b> Materials for Optical Signature Suppression: Final report		
<b>Abstract (not more than 200 words)</b> <p>This report presents activities and results obtained in the project <i>Materials for Optical Signature Suppression</i>, during the period 2001-2003. The main goal has been to select or develop materials, surface coatings or material structures capable of giving a low signature in the thermal wavelength region, in order to decrease the signature of e.g., vehicles and other platforms of the Swedish Armed Forces. Different types of infrared (IR) reflective pigments have been developed, for use in low emissive camouflage paint. In collaboration with PvTT in Finland we have been involved with the development of such paint. In particular, we have been interested in surfaces and pigments with wavelength dependent characteristics, such as a visually low reflecting surface combined with high IR reflectance, or a high reflectance only in the atmospheric transmission windows (3-5 and 8-12 µm). In the case of the latter, cooling by radiation will be allowed outside of these transmission windows. We have shown that the visual reflectance can be reduced, e.g., by using oxidized metal pigments or multi-layered pigments. Using photonic crystals we can obtain high reflectance in the 3-5 and 8-12 µm windows, only. These characteristics have been obtained by modelling and material synthesis has started. In order to enhance the contrast between target and background, we anticipate the future use of polarization sensitive IR sensors. In order to meet this threat, we have developed surfaces that depolarize radiation and, thus, give a similar polarized signature as a typical ground background. In order to meet future demands on camouflage we have initiated a literature study in the area of adaptive camouflage.</p>		
<b>Keywords</b> Signature suppression, pigments, binders, low emissivity surfaces, low emissivity paint, polarization properties of surfaces		
<b>Further bibliographic information</b>	<b>Language</b> Swedish	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 26 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	

<b>Innehåll</b>	<b>Sid</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>5</b>
<b>2 Pigment, bindemedel och lågmissiv färg</b>	<b>8</b>
<b>2.1 Lågmissiv kamouflagesfärg för Vis- och IR-området</b>	<b>9</b>
<b>2.2 Metallbelagda cenosfärer</b>	<b>11</b>
<b>2.3 Multilagerstrukturer</b>	<b>15</b>
<b>2.4 Fotonkristaller</b>	<b>17</b>
<b>3 Passiv optisk polarisation</b>	<b>19</b>
<b>4 Vidhäftning och optiska egenskaper hos lågmissiva beläggningar på siktrutor</b>	<b>22</b>
<b>5 Styrbara material, inledande litteraturstudie</b>	<b>23</b>
<b>6 Slutsatser och framtida möjligheter</b>	<b>24</b>
<b>7 Referenser</b>	<b>25</b>

## 1 Inledning

Denna rapport ger en överblick av aktiviteter och framkomna resultat inom projektet *Optiska signaturmaterial*, som pågått under åren 2001-2003. En översikt av forskningen under de senaste 10 åren inom detta och tidigare projekt inom området *material för optisk signaturanpassning* har tidigare sammanfattats [1]. Nedan belyser vi först kort om motiv, mål och nytta med projektet, för att sedan ge en kortare bakgrund till forskningsområdet, följt av en översikt av projektets olika aktiviteter, budget och projektets bemanning.

- Motiv: I takt med sensorutvecklingen ökar hotet för upptäckt och identifiering av farkoster, vilket ökar kraven på signaturanpassningen. För att våra förband skall kunna verka effektivt i olika miljöer, exempelvis vid internationella uppdrag, krävs avancerad signaturanpassad materiel. Vidare är SAT-området (SAT = signaturanpassningsteknik) omgärdat av hög sekretess internationellt, varför behovet av inhemska kompetens är stort inom detta område.
- Mål: Tillgodose försvarsmaktens behov av kunskap, tekniska möjligheter och begränsningar för olika material avseende signaturanpassning i det optiska området.
- Nyttan för Försvarsmakten: Att inför materielanskaffning få förslag på lämpliga material och materialsystem för signaturanpassning, samt genom att klargöra signaturanpassningens möjligheter och begränsningar medverka till utveckling av stridsteknik/taktik och doktriner.



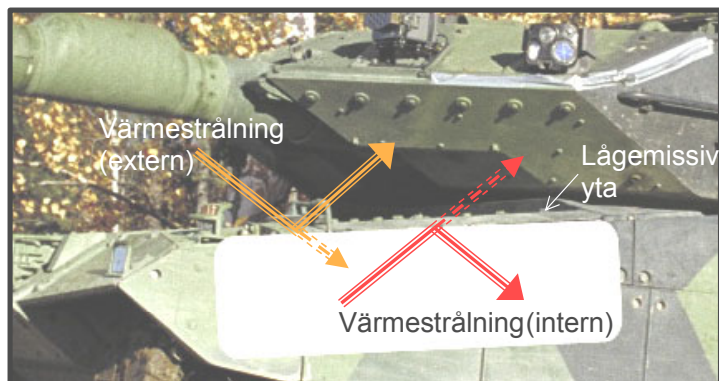
**Figur 1.1. Signaturanpassning inom IR-området innebär att den termiska signaturen från t.ex. en skrovyta skall motsvara den från bakgrunden.**

På grund av de senaste 2-3 decenniernas utveckling av sensorer för bl.a. robotmålsökare och spaningssystem för det infraröda (IR) våglängdsområdet, har forskningen inriktats mot SAT som minskar värmestrålning, främst genom att öka en ytas reflektionsegenskaper inom IR-området. På så sätt reduceras värmeutstrålningen från t.ex. uppvärmda skrovpartier så att IR-signaturen anpassas till bakgrundens signatur och därmed försvaras upptäckt, klassificering och identifiering. I detta sammanhang talar man om s.k. lågemissiva ytor, d.v.s. ytor med låg värmestrålning, eller emittansanpassade ytor, d.v.s. ytor med värmeutstrålning motsvarande bakgrundens. Figur 1.1 och 1.2 illustrerar dessa koncept.

Dessutom går utvecklingen av sensorer mot system med allt bättre prestanda, med bl.a. ökad detektivitet, högre spektral-, rumslig- och temporal upplösning och känslighet inom flera våglängdsband. Sensorsystemen utnyttjar allt mer avancerade signalbehandlingsalgoritmer, vilka bl.a. möjliggör målupptäckt vid låga signal-brusförhållanden och klassificering med multi-

/hyperspektrala sensorsystem. Därmed ökar ständigt kraven på signaturanpassningen, både inom det termiska området och det visuella (Vis) området.

I framtiden kommer det att ställas högre krav på försvarets anpassningsförmåga till olika situationer som kan uppträda, t.ex. i samband med internationella operationer med för oss nya miljöförhållanden som ställer nya krav på signaturanpassningen. I ett läge där motståndaren har tillgång till multispektrala sensorer eller ett sensornätverk av olika sensorer är det av stor vikt att vara signaturanpassad i flera våglängdsområden.

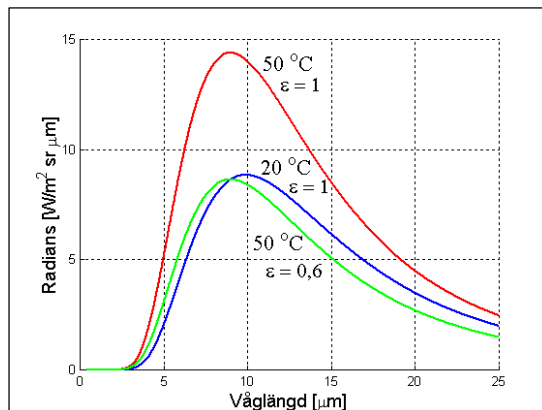


**Figur 1.2. Den emitterade värmestrålningen från en yta kan anpassas till en typbakgrund genom en välavvägd reflektans (emissivitet) hos ytskiktet.**

Då vi nedan talar om spektralområden menar vi:

Optiska området	0,2-30 $\mu\text{m}$
Ultravioletta området	0,2-0,4 $\mu\text{m}$
Visuella området	0,4-0,7 $\mu\text{m}$
Nära IR-området	0,7-2 $\mu\text{m}$
Termiska IR-området	2-12 $\mu\text{m}$

Centrala begrepp inom detta forskningsområde är svartkroppstrålning, reflektans ( $\rho$ ) och emissivitet (emissionstal, emissionsfaktor) ( $\epsilon$ ). Emissiviteten anger bråkdelen av materialets utstrålning i förhållande till en ideal s.k. svartkropp vid samma temperatur, vars yta har  $\rho=0$ . Med andra ord anger  $\epsilon = 1$  att lika mycket utstrålas från en kropps yta vid temperaturen  $T$  som



**Figur 1.3. Svartkroppstrålning för  $T = 20\text{ °C}$  och  $50\text{ °C}$  och effekten av att ändra ytans emissivitet, d.v.s.  $20\text{ °C}$  med  $\epsilon = 1$  motsvaras ungefär av  $50\text{ °C}$  med  $\epsilon = 0,6$ .**

utstrålas från svartkroppsytan vid samma temperatur, medan  $\epsilon = 0$  betyder att ingen värme kan stråla ut. Mellan emissivitet och reflektans finns sambandet  $\rho = 1 - \epsilon$ , under förutsättningen att materialet inte transmitterar strålning. Exempel på svartkroppstrålningskurvor och olika emissionstal ges i figur 1.3.

På grund av atmosfärens transmissionsförhållanden tillverkas normalt IR-sensorsystem, för t.ex. spaningsändamål, så att de endast är känsliga inom våglängdsområdena 3-5  $\mu\text{m}$  (ibland 2-5  $\mu\text{m}$ ) och 8-12  $\mu\text{m}$ . Sålunda är det huvudsakligen inom dessa våglängdsområden som de termiskt lågemissiva egenskaperna hos kamouflage bör eftersträvas. Projektets aktiviteter har framförallt varit inriktade på att ta fram olika ytskikt eller metoder för ytmodifiering, genom att välja material eller materialsystem med speciella reflektionsegenskaper inom det optiska området. Detta kan t.ex. vara en färg med ett pigment som har speciella IR-reflekterande egenskaper och som kan målas på en skrovyta, eller nm-tunna multilagerskikt belagda på en glasruta eller cockpithuv. Samtidigt som man vanligtvis önskar en relativt hög reflektion inom IR-området för att blockera en del av den termiska strålningen, vill man att ytan skall vara lågreflekterande och matt inom det visuella området. Dessutom får inte skikten förstöra övriga signaturreducerande skikt, speciellt om det finns underliggande radarabsorberande material. Det är sålunda ett multispektralt tankesätt som man här måste tillämpa. Vi har därför inom projektet försökt framställa skikt eller ytstrukturer med hög IR-reflektion endast inom de våglängdsintervall där så är önskvärt, samtidigt som radarsignaturanpassningen inte får påverkas negativt.

Projektet har ägnat sig åt följande aktiviteter:

- Ytskikt och pigment för lågemissiv färg, med avseende på egenskaper inom IR och visuella området
  - Metaller (även oxiderade)
  - Dielektriska material
  - Reststrålebandsmaterial
  - Metallbelagda cenosfärer
  - Multilagerstrukturer
  - Fotonkristaller, modellering och framställning (samarbete med Uppsala universitet)
- Bindemedel för lågemissiv färg
- Utveckling av lågemissiv färg i samarbete med PvTT i Finland
- Metallbeläggningar och vidhäftningförmåga på PMMA-substrat
- Polarisationssegenskaper hos ytor inom IR-området
  - Utveckling av mätmetodik
  - Karakterisering av olika ytor
  - Modellering
- Studera möjligheterna till styrbar emissivitet
- Deltagande i studiegrupper med beröring till projektet

I samarbetet med Uppsala universitet inom fotonkristaller har vi under projektperioden till hälften finansierat en doktorandtjänst. Samarbetet med PvTT (Finska försvarsmaktens tekniska forskningsinstitut) är inom ramen av ett MoU (Memorandum of Understanding) och pågår t.o.m. 2003. I tabeller nedan anges projektbudget (tabell I) och bemanningen inom projektet (tabell II).



**Tabell I. Projektets budget**

År	Budget (kkkr)
2001	4800
2002	4800
2003	4500

**Tabell II. Personer aktiva inom projektet**

Namn	Institution/org.	Arbetsområde	Aktiv inom projektet, år
Mikael Georgson	Signaturmaterial	PL, lågemissiv färg, tunnfilmtillväxt	2001
Tomas Hallberg	Signaturmaterial	PL, lågemissiv färg, styrbara material	2001-2003
Hung-Shiun Lee	Signaturmaterial	Polymerkemi, pigment	2001
Carl-Gustaf Ribbing	Signaturmaterial/ Uppsala Universitet	Fotonkristaller	2001-2003
Christina Nilsson	Signaturmaterial	Multilagerstrukturer	2001-2003
Göran Forssell	IR-system	Polarisation	2001-2003
Eva Hedborg-Karlsson	Signaturmaterial	Pigment, bindemedel, tunnfilmtillväxt	2001-2003
Stefan Björkert	Signaturmaterial	Fotonkristaller	2001-2003
Mikael Lindgren	Lasersystem	Ledande polymerer	2001
Jan Fagerström	Signaturmaterial	Modellering	2002
Siv Ek-Setterberg	Signaturmaterial	Administrativt stöd	2002-2003
Lars-Göran Heimdal	Signaturmaterial	Tekniker	2002-2003
Hans Kariis	Signaturmaterial	Styrbara material	2003
Andreas Rung	Uppsala universitet	Doktorand, fotonkristaller	2001-2003

## 2 Pigment, bindemedel och lågemissiv färg

Olika typer av pigment som är högreflektande inom IR-området har utvecklats och karakteriserats för att undersöka deras användbarhet som pigment i en lågemissiv färg. Vi har speciellt intresserat oss för pigment som ger en våglängdsselektiv reflektion, såsom låg reflektion visuellt men hög reflektion inom IR-området, eller hög reflektion endast inom 3-5  $\mu\text{m}$  och 8-12  $\mu\text{m}$ , varvid man kan tillåta en viss avkylning genom att värmen strålar ut utanför atmosfärens transmissionsfönster, där räckvidden för sensorer är mycket kort. Eftersom rena metaller ger en hög reflektion både visuellt och inom IR-området måste reflektansen inom det visuella området minimeras, för att det IR-aktiva pigmentet så lite som möjligt skall påverka glanstal och färgnyans, som det finns specificerade krav för när det gäller vanlig kamouflagefärg. Detta kan ske genom att t.ex. bilda oxidskikt på metallen. Genom att tillverka s.k. multilagerstrukturer (kap. 2.3) kan man genom att variera material och skiktjocklek välja inom vilket våglängdsområde man vill ha låg respektive hög reflektion. På liknande sätt kan man med s.k. fotonkristaller eller fotonbandgapmaterial (kap. 2.4) designa reflektionsegenskaperna, vilka här även kan göras oberoende av infallsvinkeln, vilket inte är fallet för multilagerstrukturer. Cenofärer (kap. 2.2) är ihåliga keramiska partiklar som ger ett lättviktspigment. Dessa partiklar kan metallbeläggas med olika metoder för att öka reflektansen. Bindemedel med hög transmission inom IR-området är nödvändigt för att kunna tillverka en lågemissiv kamouflagefärg. Nedan följer en noggrannare redogörelse för dessa delar.

## 2.1 Lågemissiv kamouflafärg för Vis- och IR-området

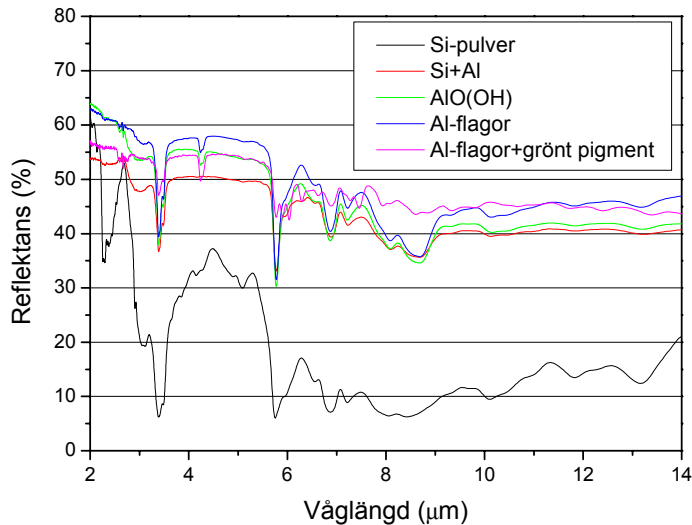
Under år 2000 inleddes samarbete med finska PvTT med att utveckla en lågemissiv färg. PvTT har sedan tidigare erfarenhet av att utveckla kamouflafärg för finska försvaret, vilket gav oss fördelen att arbeta mer tillämpningsnära i vårt forskningsarbete. I samarbetet ingår att hitta lämpliga bindemedel, pigment (inklusive s.k. tilläggsmedel) som ger goda kamouflafärgens egenskaper, inom både IR och det visuella området. PvTT's del i arbetet har varit att ta fram olika kommersiellt tillgängliga bindemedel och aluminiumpigment, medan vi främst har arbetat med att ta fram egna pigment, såsom ytbehandlade metallpigment, dielektriska (IR-transmitterande) material, metallbelagda cenosfärer och multilagerstrukturer. Färgen kommer senare i ett mera färdigutvecklat skede att genomgå olika tester för att klargöra olika egenskaper såsom väderbeständighet, vidhäftningsförmåga på olika underlag och hur rengöring av färgen påverkar dess optiska egenskaper. Färgens radartransmitterande egenskaper är också viktiga att undersöka, även om vi inte i första hand optimerar för maximal radartransmission. Resultat från samarbetet under perioden 2000-2002 finns sammanfattade i [2].

Ett kommersiellt tillgängligt polymerbaserat bindemedel (Acronal A706) från företaget BASF valdes ut för provframställning av färg med olika IR-aktiva pigment. Bindemedlet identifierades via IR-spektroskopi som en typ av polymetylakrylat. Bindemedlet har en relativt hög transmission inom IR-området (3-5  $\mu\text{m}$  och 8-12  $\mu\text{m}$ ) vilket är av stor vikt för att kunna framställa en lågemissiv färg. Om däremot transmissionen är låg kommer IR-strålningen (värmestrålningen) som tränger in i färgskiktet att absorberas och värma upp skiktet, istället för att reflekteras tillbaka via pigmentpartiklarna. Gemensamt för polymerer är dock att transmissionen i allmänhet är lägre inom 8-12  $\mu\text{m}$ , jämfört med våglängdsintervallet 3-5  $\mu\text{m}$ . I [3] ges en mer omfattande redogörelse om olika typer av bindemedel. Bindemedlet är vidare vattenlösligt, vilket är en miljö- och hanteringsmässig fördel.

**Tabell III. IR-reflektans hos färg med olika pigment. Reflektansen (integrerad över hela hemisfären) anges som medelvärde inom respektive våglängdsområde för ett antal olika färgprover, för färg med ca 20 % pigment (viktprocent). Asterisk betecknar färg med grönt färgpigment. AgS och AIO(OH) är ytbeläggningar på silverpigment respektive aluminiumpigment.**

Pigment	Refl. färg (%)	
	3-5 $\mu\text{m}$	8-12 $\mu\text{m}$
Al	67	53
Al*	48	39
Ag	20	3
AgS	20	7
Cu	30	15
Multilager	35	25
AIO(OH)	52	38
Si/Al	50	40
Si	30	15

Olika IR-reflekterande pigment har blandats med bindemedlet för att undersöka färgens reflektansförmåga eller emissivitet som funktion av våglängd. Resultaten finns sammanfattade i tabell III och exempel på spektroskopiska mätdata för några enskilda prover ges i figur 2.1. Förutom att själva pigmentmaterialet påverkar reflektansen så påverkas den även av pigmentets storleksfördelning och av ytstrukturen (en porös yta minskar reflektansen). Partikelstorleken hos pigmenten som vi har använt är inom ca 10-50  $\mu\text{m}$ .

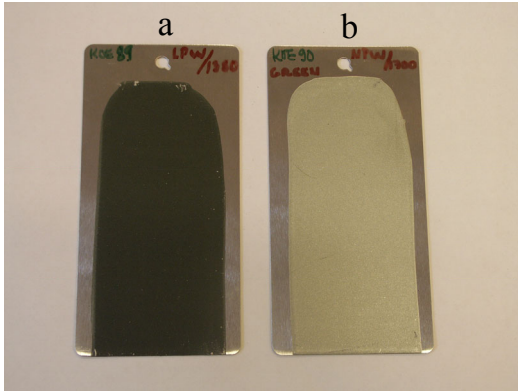


**Figur 2.1. IR-spektrum för några olika färgtyper med IR-reflekterande pigment för att erhålla en visuellt lågreflekterande yta. Resultaten kan jämföras med obehandlade Al-flagor i färg med eller utan grönt pigment.**

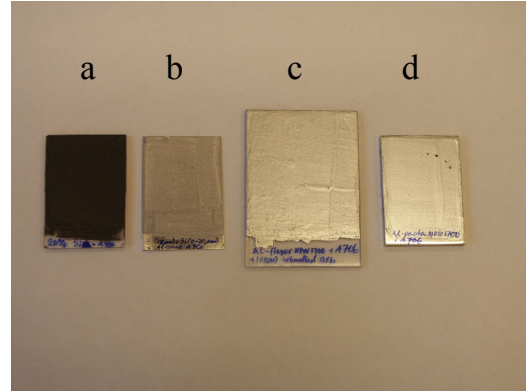
De flesta av pigmenten i tabell III är metaller, med eller utan ytbehandling [4], förutom multilagerstrukturen som är uppbyggd av nm-tunna skikt av guld och titandioxid (se kap. 2.3 och ref. [5]) och pigment av kisel som är ett halvledarmaterial eller s.k. dielektriskt material. Metaller som silver, koppar och aluminium har som släta ytor en reflektans runt 95-99 %. Däremot har ett pulver eller flagor av motsvarande metall en lägre reflektans, ca 30-80 % beroende på pigmentets egenskaper. När sedan pigmentet blandas med bindemedlet kan det vara mera osäkert hur reflektansen påverkas, bl.a. beroende på skillnaden i brytningsindex mellan bindemedel och pigment, kemiska processer eller bindemedlets transmissionsegenskaper.

Enligt tabell III är det tydligt att Al-pigmentet ger högst reflektans, trots att övriga pigment borde kunna ge minst lika hög reflektans. Det återstår dock att finna en slutlig förklaring på detta. En orsak kan vara att det sker kemiska reaktioner mellan pigment och bindemedel, vilket skapar ett gränsskikt som påverkar reflektionen negativt. Aluminiumytor har ett naturligt oxidskikt som är mycket stabilt och kanske därför inte påverkas lika lätt som övriga metaller.

Figur 2.2 visar fotografier av färgprover med grönt pigment och två olika aluminiumpigment. För det ena färgprovet framträder inte den gröna färgen så tydligt, förmodligen p.g.a. att färgpigment och IR-reflekterande pigment är skiktade. Det gröna pigmentet påverkar färgens IR-reflektans något och ger en minskning om ca 5-10 % (se figur 2.1). Figur 2.3 visar fotografier av 4 olika färgprover med IR-pigment (utan färgpigment) som ger olika reflektans visuellt. En metod för att minska den visuella reflektansen är att bilda ett skikt med AlO(OH) på Al-pigmentflagor, en annan att använda kisel som pigment, eller en blandning av kisel och aluminium. Kisel är ett halvledarmaterial och absorberar synligt ljus p.g.a. sitt s.k. bandgap, varför pigmentet ser mörkt ut. Tyvärr har vi ännu inte erhållit tillräckligt hög IR-reflektans i färg med enbart kisel som IR-aktivt pigment, medan blandningen Si/Al både ger låg visuell reflektans och relativt hög reflektans inom IR (se tabell III och figur 2.1).



**Figur 2.2. Färgprov med grönt färgpigment och två olika Al-pigment: (a) 10 µm Al-flagor och (b) 18 µm Al-flagor.**



**Figur 2.3. Färgprov med olika IR-aktiva pigment för att göra färgen mindre visuellt reflekterande. (a) Si-pigment, (b) Si- och Al-pigment blandat 50/50, (c) Al-pigment med AlO(OH)-beläggning och (d) rent Al-pigment.**

Det är svårt att säga vilken reflektans eller emissivitet som en lågemissiv färg bör ha, eftersom den måste anpassas till både skrovtemperatur och bakgrundstemperatur. För idealfallet då skrovtemperaturen är 50 °C och bakgrundstemperaturen är 20 °C så bör reflektansen vara ca 40 % (se figur 1.3), om man bl.a. bortser från inspeglad omgivningsstrålning. Vissa mätningar och simuleringar visar att reflektansen bör typiskt vara mellan 40-60 % för ett skrov mot en markbakgrund. Vid utvecklingen av en lågemissiv färg bör man dock försöka uppnå en så hög reflektans (låg emissivitet) som möjligt, ty genom att variera mängden IR-aktivt pigment i färgen kan lätt önskad reflektansnivå realiseras. Andelen pigment i färgen presenterad här är ca 20 % (viktprocent).

Radartransmissionsmätningar på färg med Al-pigment har gjorts. Resultaten tyder på att transmissionen hos färg med 20 % aluminiumflagor är minst 50 % inom 8-12 GHz.

Samarbetet med PvTT har varit givande då resultaten visar att låg emissivitet inom IR-området och samtidigt låg visuell reflektans är möjligt att erhålla. Om arbetet fortsätter finns det möjligheter att ta fram flera sammansättningar av pigment och bindemedel för att ytterligare optimera egenskaperna. Viktigt är att bl.a. erhålla korrekt färgnyans inom det visuella området med godkänt glanstal. Det finns även möjligheter att använda mer avancerade pigment, såsom våglängdsselektiva fotonkristaller (kapitel 2.4) och pigment med styrbar reflektans, t.ex. termokroma eller elektrokroma material (kapitel 5). Vi bedömer att det troligtvis återstår ca 1-2 år innan färgen, med de IR-reflekterande pigment som beskrivits ovan i texten, kan vara tillräckligt utvecklad för försvarets behov.

## 2.2 Metallbelagda cenosfärer

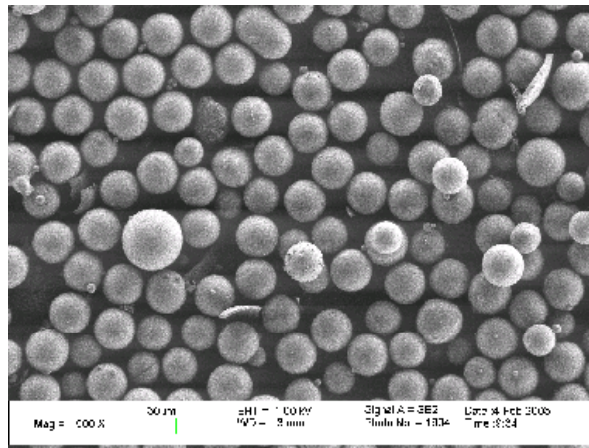
När ljus faller in mot en yta kommer den infallande strålningen att reflekteras alternativt både reflekteras och brytas. Det finns två typer av reflektion. Den ena är spegelreflektion eller spekulär reflektion, även kallad glans. Glans är beroende av infallsvinkeln och ökar med ytans jämnhet. Den andra typen av reflektion är diffus och är mera beroende av pigment och fyllnadsmedel i en färg. IR-strålning som når en färgbelagd yta bryts i ytskiktet innan den når eventuella pigment i färgen. När ljuset når pigmentpartiklarnas yta reflekteras eller bryts

strålarna i olika riktningar och man får en diffus spridning. Den del av strålningen som vänder tillbaka kommer att spridas och lämna ytan i alla riktningar.

Genom att välja rätt material, storlek och form på pigmenten kan man uppnå en önskad reflektion. Vad det gäller färg är det önskvärt att pigmenten är mindre än 50  $\mu\text{m}$  annars får man problem med färgnyanser, rengöring, m.m.

En vanlig metod är att använda metallflagor som pigment i färg, för att få god reflektion i det termiska IR-området. Metallflagor har låg absorption, men sprider och reflekterar effektivt i detta område. Problemet med metallflagor är att de även har god reflektans i det synliga våglängdsområdet, vilket betyder att föremål som målats med sådan färg är lättare att upptäcka visuellt. Som tidigare nämnts så är det önskvärt att utveckla en färg som har tillräckligt hög reflektion inom IR-området, men som samtidigt har låg reflektion inom det synliga området.

Tanken med detta arbete var att undersöka möjligheterna att byta ut metallpigment i färgen mot metallbelagda cenosfärer. Dels för att dessa inte väger så mycket, vilket ger en lättviktsfärg och dels för att man lättare kan jämföra modellering med experiment, ty cenosfärerna har en väl definierad storlek och form. En annan fördel är att dessa har sämre ledningsförmåga än rena metallpulver, vilket betyder att mikrovågstrålning lättare transmitteras genom färgskiktet. Detta betyder att färgen bör kunna användas på radarabsorberande material.

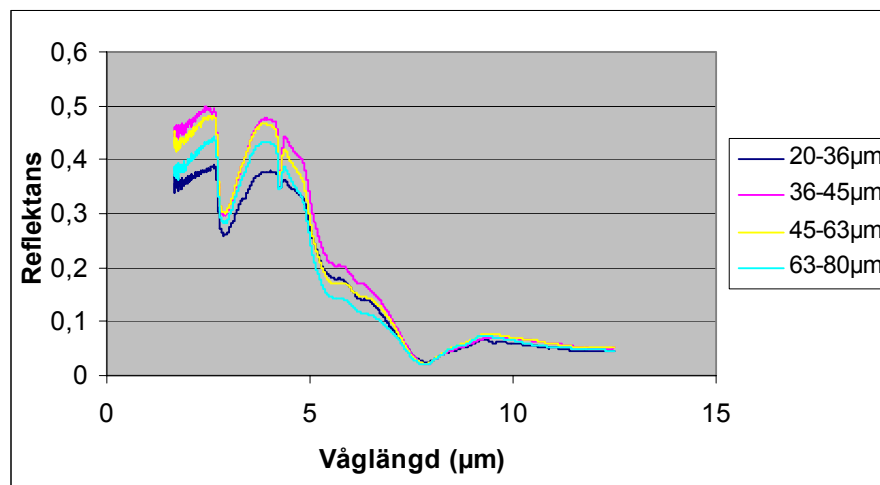


**Figur 2.4. Cenofärer med storleksfördelningen 32-45  $\mu\text{m}$ .**

Cenosfärer är sfäriska partiklar som på grund av sin form, kontrollerbara storlek, hållbarhet, goda värme- och ljudisolerande egenskaper har många tillämpningsområden. En cenosfär är en inert (d.v.s. kemiskt stabil) ihålig sfär. Tjockleken på skalet är ungefär 10 % av cenosfärens radie och består av kiseldioxid ( $\text{SiO}_2$ ) samt aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Gasen inne i sfärerna består i huvudsak av koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) samt kvävgas ( $\text{N}_2$ ) [6]. Figur 2.4 visar en bild av cenosfärer med storleksfördelningen 32-45  $\mu\text{m}$ , tagen med ett svepelektronmikroskop (SEM).

Cenosfärerna hade från början storleksfördelningen 20-80  $\mu\text{m}$ . För att få en uppfattning av storleksfördelningens inverkan på reflektansen siktades cenosfärerna med hjälp av en vibrerande sikt. Reflektansmätningar utfördes sedan på fyra olika partikelstorleksfördelningar: 20-36, 36-45, 45-63 samt 63-80  $\mu\text{m}$ . Av flera skäl har vi valt att använda storleksfördelningen 36-45  $\mu\text{m}$  i våra undersökningar. Dels för att ytorna inte ska bli för skrovliga, dels för att den storleksfördelningen av cenosfärer visade högst reflektion inom IR-området. Reflektanskurvor för rena cenosfärer med olika storleksfördelning visas i figur 2.5. Resultaten finns rapporterade i [6].

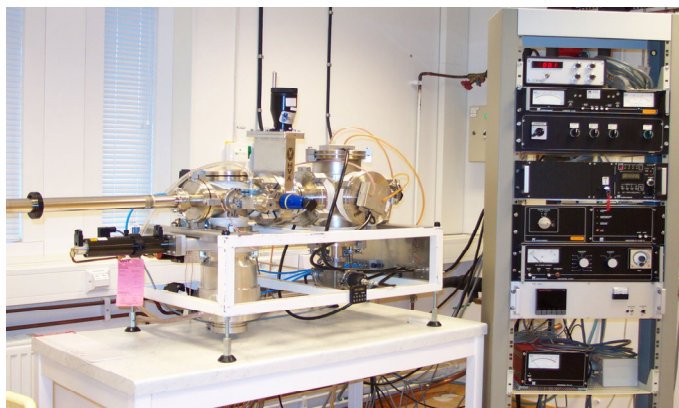
Cenosfärer belades med silver respektive koppar för att man skall kunna göra en jämförelse med traditionella metallpigment [6]. Två olika tekniker har utnyttjats: Sputtring och våtkemisk beläggningsmetod. Sputtring är en process som sker i vakuum (ca  $2 \times 10^{-6}$  torr) där joniserade gasatomer, ofta argon, accelererar mot en negativt laddad s.k. ”target”, i detta fall koppar. Om de inkommande jonerna har tillräckligt hög energi kommer atomer från ”target” att sputtras. Dessa



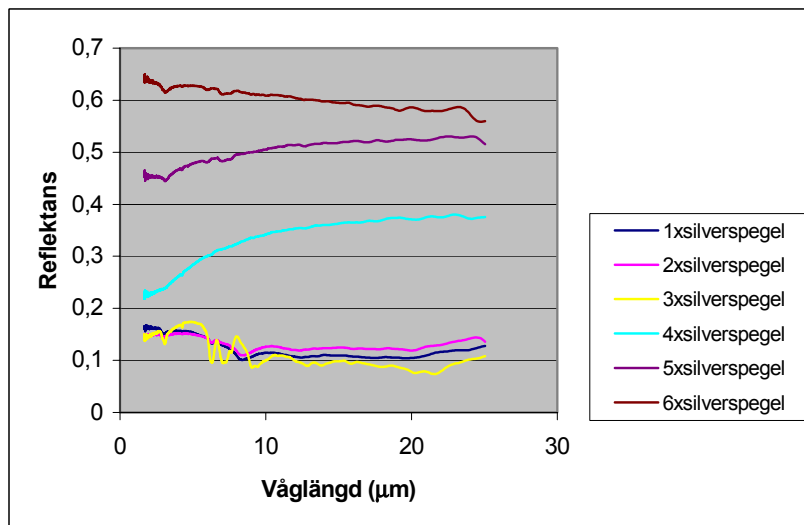
**Figur 2.5. Reflektanskurvor inom IR-området för cenosfärer med olika storleksfördelning.**

partiklar rör sig mot substratet (cenosfärerna), vilka placeras inne i kammaren. Ett fotografi av det använda sputtersystemet återges i figur 2.6.

För silverbeläggning på cenosfärerna har en våtkemisk metod använts, där silverniträt löses i en basisk vattenlösning. Silverjonerna kommer nu att reduceras till metalliskt silver och faller ut på cenosfärerna. Detta upprepades sex gånger. Efter varje beläggning mättes totalreflektansen. Efter ytterligare beläggningar efter den sjätte omgången förändrades inte utseendet på kurvan. Resultaten visas figur 2.7. Efter sex beläggningar mättes även reflektansen i det synliga området. Cenofärer med en tjockare silverbeläggning liknar i hög grad rena silverpartiklar vad gäller reflektansen.



**Figur 2.6. Sputtersystemet: Nordiko Modell 2000.**

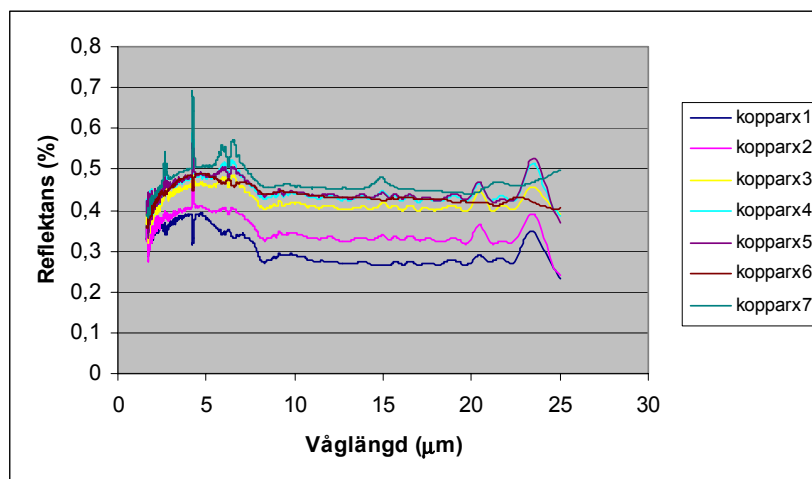


**Figur 2.7.** I figuren visas reflektanskurvor för silverbelagda cenosfärer med olika filmtjocklek.

För att erhålla kopparbelagda cenosfärer användes sputtring med koppar i sju omgångar (ca 0,5 μm per gång). Även här mättes totalreflektansen efter varje beläggning. Resultaten visas i figur 2.8.

Därefter tillverkades en färgblandning, genom att de metallbelagda cenosfärerna blandades i bindemedlet Acronal A706. Blandningen innehöll 20 % cenosfärer. Färgen ströks sedan ut på en aluminiumplåt varefter reflektansen uppmättes på nytt. Jämfört med resultaten från de rena pigmenten, sjönk reflektansen både i det visuella våglängdsområdet och i IR området.

Resultaten som kommit fram här visar att silver och kopparbelagda cenosfärer har samma goda egenskaper som de rena metallpartiklarna, vad gäller reflektans i IR-området. De har även liknande reflektans i det synliga våglängdsområdet, där man dock hade önskat en lägre reflektans. Både bindemedlet och pigmenten har goda egenskaper var för sig, men när man



**Figur 2.8.** Reflektanskurvor för kopparbelagda cenosfärer med olika filmtjocklek.

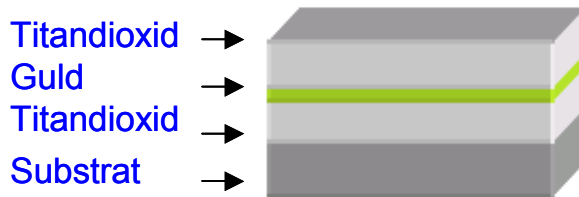
blandar dessa komponenter försämras egenskaperna, framförallt i IR-området. Detta beror troligen på att dessa två metaller reagerar med sidokedjor i den polymer som utgör bindemedlet.

Resultaten visar att det är fullt möjligt att byta ut metallpigment mot metallbelagda cenosfärer och därmed få en lättviktsfärg, vilket är speciellt intressant för flygtillämpningar. Problemet att kombinera lågemissiva egenskaper i IR-området med låg reflektans i det synliga området och att ta fram ett mera lämpligt bindemedel kvarstår dock. Ett sådant pigment bör med ovan nämnda krav vara realiserbart i en lågemissiv färg inom ca 2 år.

### 2.3 Multilagerstrukturer

I syfte att åstadkomma en lågemissiv färg som är anpassad till signaturkraven inom det synliga våglängdsområdet, har vi utvecklat multilagerstrukturer som t.ex. kan fungera som pigment i en kamouflagefärg. Fördelen med multilagerstrukturer är att deras reflektansegenskaper kan beräknas och optimeras inom olika våglängdsintervall.

En metallyta eller ett tunt skikt av ett dielektriskt material med högt brytningsindex reflekterar visuellt ljus och värmestrålning bra. Om ett antal nm-tunna skikt kombineras till en s.k. multilagerstruktur (se figur 2.9) inträffar interferens, vilket kan bidra till att öka eller minska reflektansen. Eftersom teorin bakom detta är välkänd kan man, genom att kombinera tunna skikt av material med omväxlande högt och lågt brytningsindex, skraddarsy reflektansen. Önskvärda egenskaper är t.ex. låg reflektans inom det synliga området och hög reflektans inom IR.



**Figur 2.9. En skiss på en tre-lagerstruktur med Au och  $TiO_2$  på ett substrat (PMMA).**

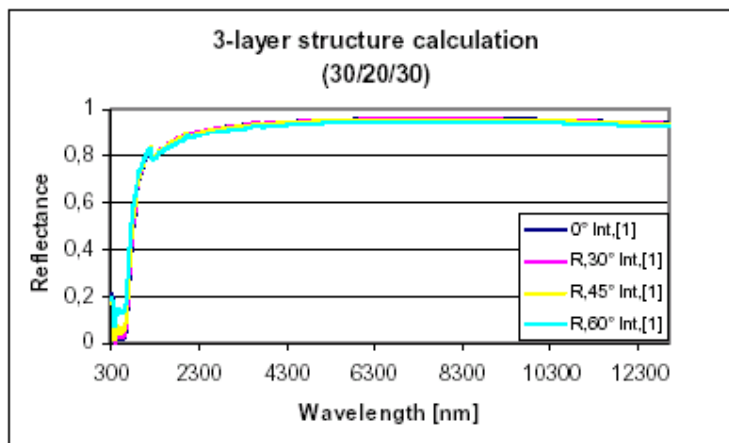
Multilagret är tänkt att finfördelat utgöra pigment i form av flagor i en lågemissiv maskeringsfärg. Detta sker genom att ett multilager tillverkas enligt en önskvärd design. Det totala multilagret får då en viss tjocklek, i storleksordningen från ett tiotal nm upp till någon  $\mu\text{m}$ , beroende på antalet skikt i strukturen. Denna yta belagd på ett substrat skall sedan avlägsnas, vilket sker genom att skrapa bort ytskiktet, vilket då bryts upp i form av flagor. Ju tunnare den totala tjockleken är, desto svårare kan den vara att avlägsna. En totalt tjockare multilagerstruktur underlättar processen eftersom de tunna flagorna hålles samman bättre. Tjockleken på multilagerstrukturen påverkar dock även reflektansen och bandbredden.

Eftersom det inte går att veta hur en flaga orienterar sig i färgen, d.v.s. vad som är upp eller ner hos flagan, bör den vara symmetrisk. Av samma anledning kan sfäriska pigment vara att föredra, framför pigmentflagorna som kan hamna på kant. Om färgskikten är tunna i förhållande till flagornas storlek kan man undvika att flagorna orienterar sig fel.

Under projektets genomförande har en rapport skrivits [5] gällande beräkningar och framställning av multilagerstrukturer. DC magnetronsputtring användes för att framställa tunna filmer. Material som användes var  $TiO_2$  och Au. Endast små ytor om ca  $8 \times 4$  cm kunde beläggas per sputtringstillfälle, varför processen inte är tillräckligt effektiv för att framställa större kvantiteter. För att göra tillverkningen effektivare krävs annan ytbeläggningsmetod eller sputter

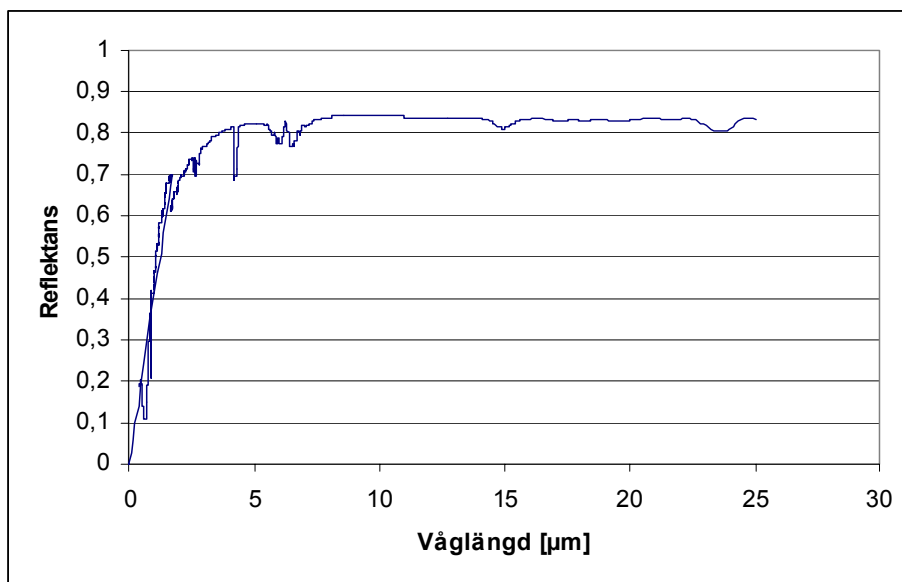


med vakuumkammare med plats för större eller fler substrat. Exempel på beräkningsresultat för en 3-lagerstruktur ges i figur 2.10.



**Figur 2.10. Beräkning av reflektansen för en 3-lagerstruktur för olika infallsvinklar mot ytnormalen.**

För att erhålla optimalt resultat bör man i modelleringen ta hänsyn till att ett bindemedel skall omsluta flagorna. Brytningsindex för det aktuella bindemedlet (Acronal A 706) har erhållits med hjälp av IR-ellipsometri [2].



**Figur 2.11. Mätning på förångat tre-skikt av Au och TiO<sub>2</sub>.**

Försök har nyligen gjorts med förångningsteknik för att om möjligt göra processen effektivare, då fler substrat än vid tidigare sputtring kunde placeras samtidigt i förångningskammaren. Detta kunde dock inte optimalt utnyttjas då inte alla substrat blev jämnt belagda. Resultat från dessa försök visas i figur 2.11, för ett multilager med tre skikt.

För att realisera denna typ av pigment i en lågemissiv färg återstår att hitta ett mera lämpligt bindemedel, då färg med bindemedlet Acronal A706 inte gav tillräckligt hög IR-reflektans, trots att själva pigmentet har hög reflektans [5]. Vidare återstår att effektivisera tillverkningen. Detta skulle kunna realiseras inom 2 år. Det senare kravet kan eventuellt tillgodoses genom att använda ytbeläggningssystem som används för industriell produktion.

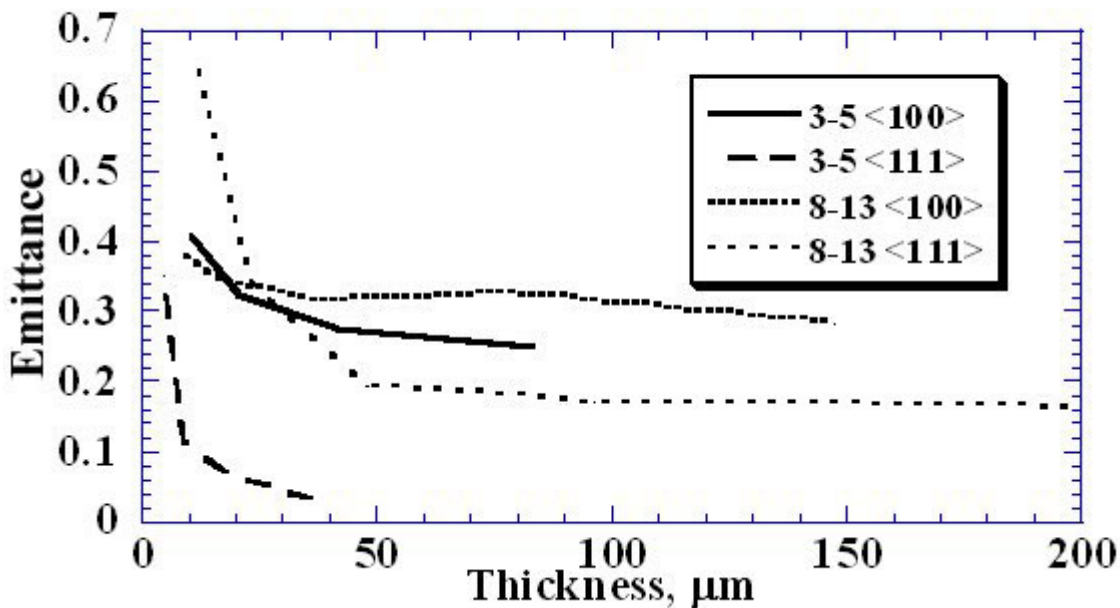
## 2.4 Fotonkristaller

Sedan början av 1990-talet har möjligheten till en ny klass av optikomponenter väckt stor uppmärksamhet. Det gäller s.k. *fotonkristaller*, d.v.s. ett strukturerat medium som är periodiskt på en längdskala ungefär som våglängden av det ljus man önskar manipulera. En fotonkristall innehåller åtminstone två olika material, företrädesvis ett med högt och ett med lågt brytningsindex. Man har visat teoretiskt och även verifierat experimentellt, att i en sådan struktur kan den elektromagnetiska vågen endast fortskrida om den uppfyller ett visst samband mellan frekvens och vågvektor – d.v.s. tillhör ett *fotonband*. Det har i och för sig sedan länge varit känt att en elektromagnetisk våg i ett medium alltid följer en dispersionsrelation, d.v.s. ett samband mellan frekvens och vågvektor. Det är karaktäristiskt för fotonkristaller att detta samband inte längre är en enkel kurva, utan bildar en *fotonbandstruktur*. Det som väckt den största uppmärksamheten är att under gynnsamma omständigheter kommer en sådan bandstruktur att ha *fotonbandgap*, d.v.s. frekvens- eller energiintervall inom vilka elektromagnetiska vågor inte kan fortskrida. Uppkomsten av sådana gap betingas av att de två materialen har tillräckligt stor skillnad i brytningsindex och att fotonkristallen har en lämplig symmetri.

Dessa insikter har givit upphov till förhoppningar om nya optiska komponenter med överraskande och användbara egenskaper. Förekomsten av ett förbjudet frekvensintervall innebär bl.a. att ljus inte emitteras termiskt och om det emitteras av en störatom eller defekt kan det ”frysas in” i kristallen under en mätbar tidrymd. Ännu mer uppmärksamhet har det väckt att en optisk fiber, utformad som en tvådiemensionell fotonkristall med en sådan störnivå i fotongapet kan fungera som en nära perfekt optisk kommunikationslänk. En sådan fiber kan t.ex. leda ljuspulser i räta vinklar i motsats till en konventionell fiber, som behöver avsevärda och därför utrymmeskrävande krökningsradier. Denna typ av fibrer finns redan på marknaden.

Den del av projektet som berör fotonkristaller bygger på att termisk emission, vars frekvens ligger inom ett fotonbandgap, undertryckes. Detta innebär sålunda en ny möjlighet till att selektivt undertrycka den termiska emissionen inom endera av de båda termiska fönstren 3-5  $\mu\text{m}$  och 8-12  $\mu\text{m}$ . Selektiv signaturreduktion är fördelaktig, eftersom den i mindre grad minskar objektets strålningskylning och dessutom medger goda egenskaper i det visuella området.

Under det senaste tre åren har vår forskning mest varit inriktad mot beräkningar [7-11], men under det senaste året har vi även påbörjat tillverkning av fotonkristaller [12]. De flesta av resultaten har presenterats vid konferenser och som artiklar i vetenskapliga tidskrifter. Bl.a. har vi teoretiskt undersökt hur effektivt ett ytskikt i form av en fotonkristall kan vara, vars fotonbandgap motsvarar ett termiskt fönster. Det effektivitetsmått, som därvid är av praktiskt intresse, är hur tjockt ett sådant skikt måste vara för att den termiska emittansen skall reduceras tillräckligt mycket för att upptäcktsrisken skall minska signifikant. För en bulkfotonkristall gäller att den termiska emissionsfaktorn,  $\epsilon = 0$  (d.v.s.  $\rho = 100\%$ ) inom bandgapet. Det är dock klart att detta inte är önskvärt i en kamouflagetillämpning, då objektet kommer att visa en negativ kontrast. Det optimala värdet på emissiviteten beror, som sagts tidigare, på den bakgrund mot vilken objektet observeras och måste anpassas därefter. I figur 2.12 visas slutresultat för två olika fall. De är beräkningar av  $\epsilon$  i de två transmissionsfönstren 3-5 och 8-12  $\mu\text{m}$ , för ett fotonkristallint skikt i några huvudriktningar som funktion av skiktjocklek [10].

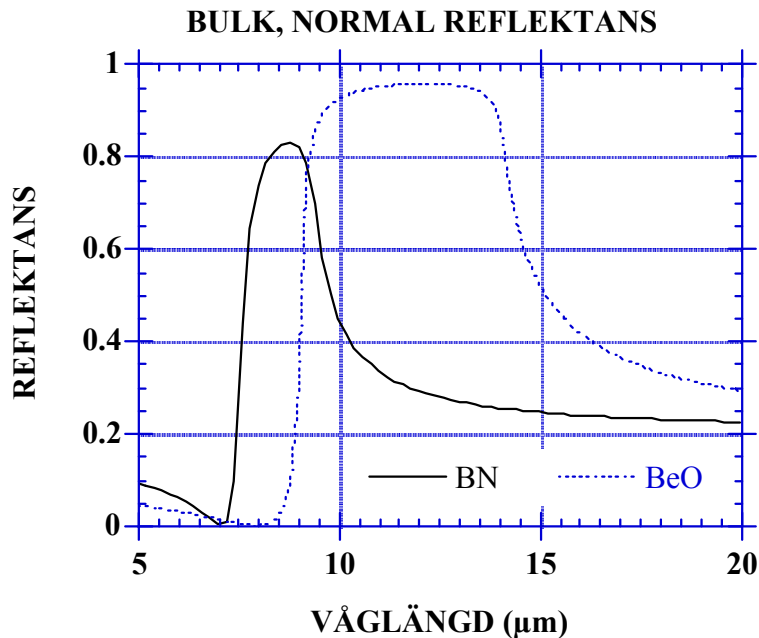


**Figur 2.12. Emittansfaktorn som funktion av skiktjocklek för ett periodiskt skikt med s.k. opalstruktur i angivna våglängdsintervall och riktningar. För 3-5 μm skall gitterkonstanten vara 1,55 μm och för 8-13 μm, 2,2 μm. Högindexfärerna skall ha radien 0,55 μm resp 1,3 μm, och matrisen en polymer med brytningsindex 1,22.**

Dessa beräkningar ger uppenbart inga besked om hur en sådan ordnad beläggning skall åstadkommas, men det är lovande ur tillämpningssynpunkt att tekniskt värdefulla effekter kan förväntas för så måttliga skikt som 50 μm. Detta motsvarar ungefär tjockleken hos ett lager målarfärg.

En ytterligare aktivitet inom området avser ett uppslag om att nyttja en för fotonkristaller ny materialgrupp med s.k. reststråleband, d.v.s. föreningar som i någon utsträckning är jonbundna. Den internationella forskningen på området har hittills nära nog uteslutande avsett dielektriska och i viss utsträckning metalliska komponenter. Genom att välja ett material med reststråleband i ett atmosfäriskt fönster fås där ett materialbetingat fotonbandgap. Genom att sedan periodiskt strukturera detta material, kan man eventuellt åstadkomma ett fotonkristallint skikt, som undertrycker den termiska emissionen i båda de atmosfäriska fönstren. För att illustrera att sådana material existerar, citeras i figur 2.13 reflektansspektra för bornitrid och berylliumoxid [7]. Denna möjlighet att samtidigt signaturanpassa i två olika våglängdsintervall patentsöktes i december 2001 och i augusti 2003 beviljade PRV detta patent med publ-nr 520 490 [7], men med invändningsfrist till april 2004.

För att kunna tillverka fotonkristaller som är användbara som pigment i en lågmissiv färg återstår dock en hel del utvecklingsarbete, vilket under det senaste året har påbörjats med hjälp av några olika tillverkningsprocesstekniker. Vi bedömer dock att det krävs ytterligare minst 2 års forskningsarbete innan tillverkningsprocessen är tillräckligt optimerad.



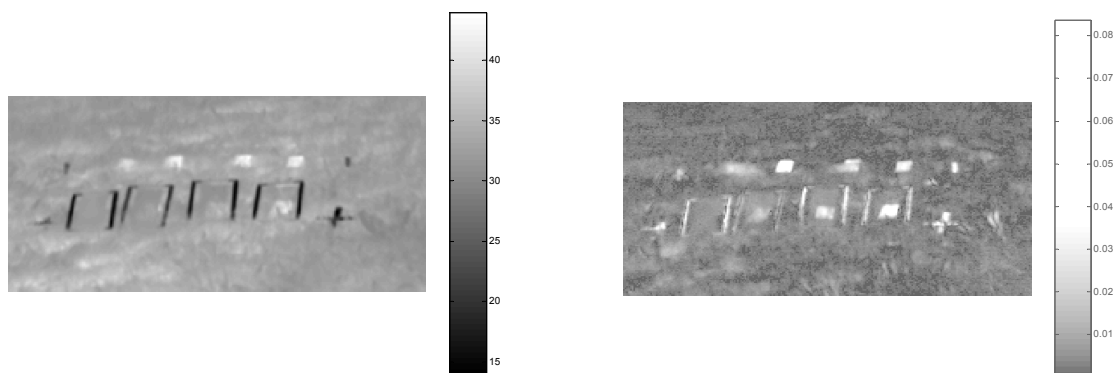
**Figur 2.13. Reflektansspektra för normalt infall mot ytan i termiska IR-området för två keramiska material: Kubisk bornitrid och hexagonal berylliumoxid. Dessa spektra är beräknade, men stämmer väl med experimentella resultat. Notera att hög reflektans motsvaras av låg emittans:  $\epsilon = 1 - \rho$ .**

### 3 Passiv optisk polarisation

Polarisation, liksom våglängd, är en inneboende egenskap hos elektromagnetisk strålning. Strålningen kan beskrivas som en vågrörelse och vågen kan ha olika våglängder. Strålningens polarisation kan beskrivas så att strålningens vågrörelse svänger i olika plan, eller vrider sig fram som en spiral i höger eller vänstervarv. Om strålningen svänger i endast ett plan, t ex horisontellt kallas strålningen för horisontellt plan (lineär) polariserad strålning. Om strålningen vrider sig fram som en spiral, kallas strålningen cirkulär eller elliptiskt polariserad strålning.

I praktiken finns olika komponenter av våglängder och polarisationstillstånd samtidigt i ett strålknippe. Om man, vid mätning, får samma svar oberoende av vid vilken våglängd man mäter, så kallas strålningen för vitt strålning (vitt ljus). Om man vid mätning får svar endast vid en våglängd så kallas strålningen monokromatisk. På motsvarande sätt kallas strålningen helt opolariserad om svaret vid mätning är lika oberoende av vilket polarisationstillstånd som mäts. Strålningen är helt polariserad om man vid mätning av alla polarisationstillstånd får svar endast vid ett tillstånd. Tillstånd mellan dessa två, helt polariserad och helt opolariserad strålning är det vanligaste och betecknas delvis polariserad. En polarisationsparameter kallad Graden av Lineär Polarisation (Degree of Linear Polarization, DoLP), beskriver strålningen mellan polariserat och opolariserat tillstånd.

När strålning växelverkar med ett objekt, (reflektion mot och/eller transmission genom objektet) så kommer olika komponenter att undergå olika växelverkan. Genom att analysera våglängdsberoendet får man information om denna växelverkan och kan därmed härleda materialegenskaper, t.ex. objektets kemiska sammansättning och geometriska struktur. Vid



**Figur 3.1. Vänstra figuren visar strålningen utan polarisationsanalys av ett område med 4 objekt täckta till 20, 45, 60 och 90 % täckningsgrad, från höger (inom de svarta ramarna). Högra bilden visar samma område mätt med polarisator och bilden har bildpunkt för bildpunkt omräknats till DoLP.**

analys av polarisationstillståndet får man också information om denna växelverkan och kan därur härleda materialegenskaper. Som exempel kan nämnas polarisationsparametern DoLP, som mäter hur stor del av den totala strålningen som är lineärt polariserad. Parametern ger ett mått på hur slät en yta är. Av människan tillverkade objekt är i allmänhet slätare än naturliga objekt och syns därmed tydligare i en bild som är omräknad till DoLP [13] (figur 3.1). En annan framräknad polarisationsparameter, theta, ger information om hur den släta ytan är orienterad i rummet.

Som exempel visas två bilder (figur 3.1) registrerade med en Agema Thermovisionskamera, för våglängdsbandet 8-12  $\mu\text{m}$ . Mätningen har skett med en vridbar polarisator framför kamerans objektiv. Bilderna visar ett område med 4 objekt (personminor), som är täckta av 4 ramar beklädda med bomullstråd, så att täckningsgraden av objekten är respektive 20, 45, 60 och 90 % från höger. Den vänstra bilden visar radiansen utan polarisator. Den högra bilden visar DoLP för samma område i naturen. Därvid har 3 polarisationstillstånd registrerats och från dessa har DoLP beräknats för varje bildpunkt och presenterats. Bilderna visar att även delvis täckta objekt kan ses i DoLP även om det inte är möjligt att observera objekten utan polarisationsanalys.

### *Hotbild och problemställning*

Det finns inte några snabba polarisationssensorer tillgängliga idag. Däremot finns i USA utvecklade prototyper som vissa forskningsgrupper i USA har tillgång till. FOI har idag inte möjlighet att testa dessa prototyper.

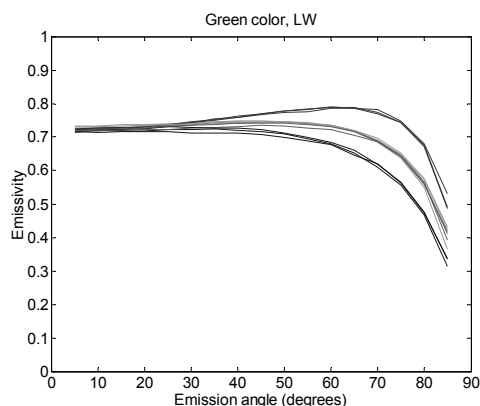
Innan polarisationssensorer finns kommersiellt tillgängliga utgör polarisation inte ett stort hot. Däremot är det strategiskt viktigt att redan nu arbeta för att öka kunskapen om och konsekvenser av framtida operativa polarisationssensorer. Det finns två aspekter som har studerats i detta projekt.

- Kan kontrasten hos ett objekt i förhållande till bakgrunden förbättras genom en analys av polarisationen? I figur 3.1, där kontrasten är låg på grund av att objektet är delvis täckt, syns en tydlig förbättring av kontrasten med polarisationsanalys.
- Hur skall ytan av ett objekt utformas så att den inte detekteras bättre med en polarisationssensor?

### Genomförande och resultat

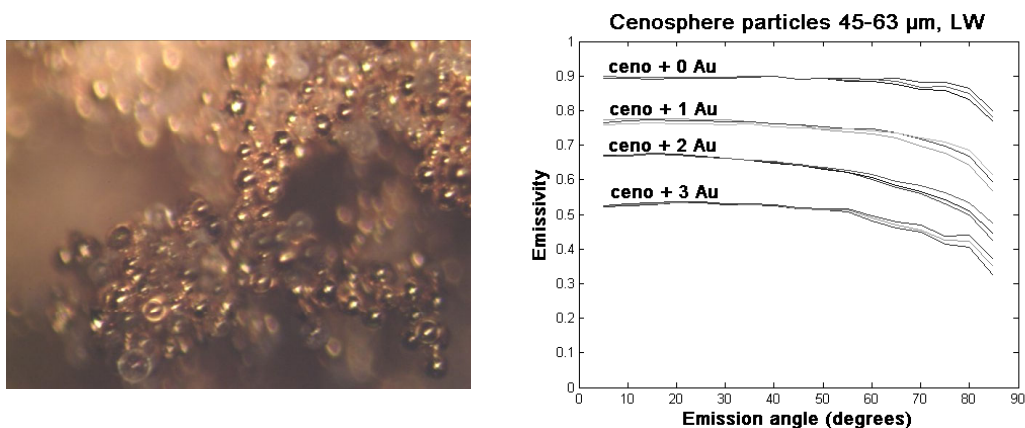
I detta projekt har en utveckling och förbättring av mätmetoder för mätning av polarisationsegenskaper genomförts [14, 15]. Dessutom har utveckling av ytor skett, som har en depolariserande effekt på strålning och även har en förutbestämd emissivitet [16-18].

Mätmetoder har utvecklats för att mäta emissiviteten från en yta som funktion av emissionsvinkel. Ett exempel visas i figur 3.2 som visar mätningar av de horisontellt (översta kurvskaran) och vertikalt (understa kurvskaran) lineärt polariserade strålningskomponenterna. I en första approximation kan sägas att skillnaden mellan de horisontellt och vertikalt polariserade komponenterna är lika med DoLP. Detta innebär att man direkt i diagrammet får ett mått på effektiviteten av en polarisationsanalys genom dessa mätningar.



**Figur 3.2. Emissiviteten i våglängdsintervallet 8-12  $\mu\text{m}$  som funktion av emissionsvinkeln för grön färg. De tre kurvskarna visar polarisationskomponenterna, horisontell (övre), vertikal (undre) och 45 graders (mittre) polarisation.**

För att konstruera ytor som depolariserar emitterad eller reflekterad strålning och som samtidigt har en förutbestämd emissivitet, har använts cenosfärer som lagts på en färgbass. På dessa sfärer har förångats guld av olika täckningsgrad för att få prover med olika emissivitet. Figur 3.3 visar på vänstra bilden ett exempel på guldbelagda cenosfärer, registrerade med ett SEM-mikroskop. Till höger visas mätresultatet av emissivitetsmätningar för 4 olika cenosfärsprover med olika guldtäckning. Man kan observera att de horisontellt och vertikalt polariserade komponenterna



**Figur 3.3. SEM-mikroskopbild av guldbelagda cenosfärer, till vänster. Emissiviteten som funktion av emissionsvinkel för 4 olika guldbeläggningar, till höger.**

nästan sammanfaller, vilket tolkas så att strålningen är nästan helt depolariserad. Dessutom ger olika guldtäckning olika emissivitet.

### *Slutsats*

I projektet har utvecklats ytor som i polarisationshänseende har önskvärda egenskaper, vilket visar att det går att skydda sig mot hotet från polarisationssensorer. Den största användningen av just dessa ytor med cenosfärer är att det har visats att dessa ytor kan användas som kamouflerande skydd. En annan nytta är troligen att de kan användas för kalibrering av utrustning.

## **4 Vidhäftning och optiska egenskaper hos lågemissiva beläggningar på siktrutor**

Flygplanshuvar utsätts för stora påfrestningar under flygning, framförallt vad gäller nötningseffekter. Det är ett stort problem att kombinera önskade optiska egenskaper med önskade mekaniska egenskaper. För att erhålla god signaturanpassning inom både IR och radarområdet är det önskvärt att belägga siktrutan/huven på flygplan med material som har hög transmission inom det visuella våglängdsområdet samt hög IR- och radarreflektion. För att undvika ovan nämnda nötningseffekter vill man även uppnå bra vidhäftningsförmåga.

För att uppnå god radarreflektion belägger man flygplanshuvar med ett elektriskt ledande lager av t.ex. en tunn metall. Detta hindrar radarvågor att penetrera in genom fönstret till cockpit, varifrån de kan spridas och därmed reflektera tillbaka till radarsensorn. Det är av stor vikt att sikthuvuven har rätt utformning så att radarreflektionen sker i riktning från radarsensorn. Normalt är detta lager placerat på insidan alternativt mellan skikt i vindrutan.

Många av de beläggningsprocesser som ger bra vidhäftning kräver att man värmer substratet till höga temperaturer, vilket inte är lämpligt då man vill belägga t.ex. PMMA och liknande substrat, vilka är de vanligaste materialen i flygplanshuvar. Man har tidigare tittat på olika tillverkningsmetoder där substrattemperaturen inte överskrider 100°C. Detta finns beskrivet i en sammanfattningsrapport [19].

I rapporten *IR and adhesion properties of metallic coatings on PMMA* [20] har man undersökt möjligheterna att belägga vindrutan på utsidan. Fördelen med detta är att man inte bara förhindrar radarvågor att tränga in i cockpit utan även hindrar absorption av IR-strålning i vindrutan. På detta sätt förhindrar man uppvärmning av materialet, vilket i sin tur minskar IR-emission från vindrutan. Risken att upptäckas av en IR-detektor minskar därmed betydligt.

IR-egenskaperna samt vidhäftningsförmågan hos tunna metallfilmer av guld, titan samt en tvålagerstruktur med titan/guld studerades. Metallfilmerna tillverkades vid rumstemperatur genom DC magnetronspjutning. 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.

För att testa vidhäftningen användes *Scotch 3M-tape test*. Genom att fästa en bit tape och sedan dra bort den kan man göra en bedömning av metallfilmens vidhäftning. Guld visade något bättre resultat än titan. Dessa resultat var inte helt tillfredställande och vidare utveckling vad gäller vidhäftning är önskvärt.

Under de två sista åren har det dock inte skett mycket forskning inom detta område. Orsaken till detta är att de personer som arbetade inom området slutade sina anställningar inom FOI.

## 5 Styrbara material, inledande litteraturstudie

Tidigare beskrivna material är begränsade på så sätt att deras emissivitet är statisk och kamoufleringen måste anpassas efter en typbakgrund. Eftersom bakgrunden skiftar i takt med att t.ex. ett fordon rör sig genom olika terrängtyper eller att en hotsensor ändrar position, bör helst signaturanpassningen ske dynamiskt och vara styrbar eller adaptiv. Sålunda vill man utnyttja material eller materialsystem som är styrbara, både visuellt, inom IR-området och även inom radarområdet. Inom detta projekt har vi påbörjat en litteraturstudie för att undersöka möjligheterna till att utveckla ytor med styrbar emissivitet, i första hand visuellt och inom IR-området. I ett efterkommande projekt till detta, vilket även inkluderar radarområdet, ämnar vi fortsätta detta arbete.



*Figur 5.1. Principbild för hur kamouflage med bildskärm kan fungera.*

Material som i detta sammanhang är intressanta är sådana som kan ändra sina optiska egenskaper, d.v.s. reflektion, transmission och absorption, genom yttre påverkan, såsom pålagd spänning, infallande ljus, temperatur eller tryck. Dessa material kallas elektrokroma, fotokroma, termokroma respektive piezokroma. För styrbar kamouflering är elektrokroma material att föredra, då man relativt enkelt och snabbt kan variera spänningen över en yta vid behov, medan termokroma pigment i en färg kan vara användbara då man t.ex. vill minska signaturen för en solbelyst varm yta. Ett vanligt termokromt material är vanadinoxid medan volframoxid, nickeloxid, molybdenoxid och iridiumoxid är elektrokroma (även vanadinoxid är elektrokromt). Andra material såsom sällsynta jordartsmetaller, t.ex. yttrium och lantan, bildar vid vätgasabsorption s.k. hydrider, vars optiska egenskaper kan styras beroende på gasflödet. Tunna filmer av dessa material kan fås transmittande eller reflekterande. För kamouflagetillämpningar gäller det att hitta material som kan göras styrbara både inom det visuella området och IR-området. Den civila forskningen och industrin är intresserade av dessa material för bl.a. fönsterbeläggningar för energibesparing eller som ”persienner”, bilbackspeglar med automatisk avbländningsfunktion, visir, m.m.

Ett annat stort område med civila tillämpningar är utvecklingen av bildskärmar för en mängd olika tillämpningar, t.ex. mindre displayer för mobiltelefoner och kameror, elektroniska böcker och tidningar och stora annons- och reklamskärmar. I många fall behöver man flexibla skärmar som kan fästas på krökta ytor eller som kan rullas ihop. När det gäller militära tillämpningar skulle speciellt stora böjbara bildskärmar vara lämpade för kamouflage.



Inom framförallt det visuella området diskuterar man nu möjligheten att med böjbara plastbildskärmar fästa eller bygga in dessa direkt i skrovet på t.ex. fordon, på vilka man då kan återge bakgrunden i realtid upptagen med en sensor. Principen för detta är illustrerad i figur 5.1, där bakgrunden återges i en tunn datorbildskärm. Sådana bildskärmar kan t.ex. tillverkas av vätskekristaller omgivna av en matris med böjbart plastmaterial. En annan teknik är s.k. elektroforetiskt bläck, där varje pigmentpartikel kan liknas vid en bubbla innehållande elektriskt laddade mörka och ljusa partiklar, vars läge kontrolleras med en spänning. Mörka (negativt laddade) eller ljusa partiklar (positivt laddade) kan fås att ansamlas sig överst eller underst i bubblan genom att variera med positiv eller negativ spänning över bubblan. Att med displayliknande teknik återge bakgrunden inom IR-området bör också vara möjligt, men eftersom industrin främst är intresserad av tillämpningar inom det synliga området krävs speciella forskningsatsningar för IR-området.

En dynamisk signaturkontroll kräver att man känner till och kan värdera sin egen signatur relativt bakgrunden gällande relevanta hotriktningar. För att möta hotet på det framtida NBF-slagfältet förväntas sådan styrbar eller adaptiv signaturanpassning vara nödvändig. Den är speciellt lämpad för strid i urban miljö, i vilken det är svårt att hitta en typbakgrund och där avstånden mellan stridande parter är relativt korta.

## 6 Slutsatser och framtida möjligheter

Denna slutrapport har översiktligt presenterat de viktigaste resultaten framkomna inom projektet *Optiska Signaturmaterial*, som pågått under åren 2001-2003. Forskningen har varit inriktad mot att ta fram material, ytiskt, beläggningar och materialsystem för att inom det optiska området signaturanpassa framförallt skrovytor, för t.ex. fordon och andra plattformar. Speciellt är det inom det termiska området som emission av värmestrålning från varma skrovparter måste anpassas till bakgrundens signatur, för att minska upptäcktsannolikheten från IR-sensorer i t.ex. robotsökarsystem och spaningssystem. Men det visuella området är också viktigt, speciellt då låg termisk emission oftast fås genom att öka en ytas reflektans inom IR-området, vilket inte får påverka den glans och färgnyans man önskar visuellt. Samtidigt får dessa optiskt signaturreducerande åtgärder inte påverka signaturanpassningen inom radarområdet.

Dagens kamouflagefärg som försvarsmakten använder är överhuvudtaget inte anpassad för att minska den termiska emissionen. Forskningsarbetet inom detta projekt visar dock att man med lämpligt val av pigment och bindemedel kan tillverka en kamouflagefärg som är signaturanpassad inom både det visuella området och IR-området. Målet var att utveckla en färg med reflektansen 40-60 % inom IR-området, vilket vi också lyckades med.

För att möta det framtida hotet gällande militära optiska sensorsystem kommer dagens signaturanpassning på försvarets materiel inte att vara tillräckligt bra för att effektivt kunna utföra sina uppgifter. Med en lågemissiv kamouflagefärg, utformad efter de principer som vi har utarbetat, kan försvarets fordon och andra plattformar effektivt och relativt lätt signaturanpassas över hela det optiska området, även med hänsyn tagen till radarområdet. En sådan kamouflagefärg bör, för att fungera så optimalt som möjligt, anpassas efter det enskilda fordonet och den typiska miljö som den normalt verkar inom.

Det fortsatta forskningsarbetet beträffande IR-aktivt pigment för lågemissiv kamouflagefärg bör utformas efter följande tre riktlinjer:

- Låg visuell reflektans och anpassad högre IR-reflektans
- Anpassad högre IR-reflektans inom enbart atmosfärens transmissionsfönster
- Styrbar reflektans

Gällande dessa riktlinjer bör, när det gäller statisk signaturanpassning, fortsatt forskning vara inriktad mot multilagerstrukturer, cenosfärer och fotonkristaller. Multilagerstrukturer möjliggör på ett flexibelt sätt kravet på låg visuell reflektans och anpassad högre IR-reflektans, men tillverkningsprocessen måste effektiviseras. Cenofärer kan genom vidare forskning även göras visuellt lågreflekterande, t.ex. genom oxidskikt på metallbeläggningen, men har dessutom fördelen av att depolarisera emissionen. Vidare är cenofärer lämpliga som lättviktspigment för tillämpningar där så erfordras. Möjligheten finns även att utforma cenofäerna så att de dessutom är lämpliga för signaturanpassning inom radarområdet. Fotonkristaller har stor potential för att kunna utgöra formen av ett mera avancerat pigment, vilka tillåter strålningskyllning av t.ex. en skrovyta utanför atmosfärens transmissionsfönster och dessutom är emissionens vinkelberoende mindre kritiskt för ett sådant pigment. Dessa pigment kan troligtvis realiserats inom 2-5 år, där längre forskningsinsatser krävs för fotonkristallerna.

För att möta försvarets behov på lite längre sikt bör forskningen även inriktas mot material med styrbar reflektans eller emissivitet, där ett sådant material förmodligen kan realiserats som kamouflage inom 5-10 år. Här bör man dessutom tillgodose kraven på multispektralitet inom både det optiska området och radarområdet. Vi planerar att inleda forskning inom detta område i ett nytt projekt (Styrbara signaturmaterial) från och med år 2004. Vissa material eller materialsystem som vi har arbetat med inom nuvarande projekt kan dessutom göras styrbara, såsom multilagerstrukturer och fotonkristaller. Inom fotonkristallforskningen kommer vi även att samarbeta med verksamhet inom försvarsmaktens forskningsprogram inom nanoteknologi, där vi bl.a. kan skapa viktiga kontakter med industrin.

## 7 Referenser

1. S. Björkert, T. Hallberg, C. Nilsson, G. Forssell, E. Hedborg-Karlsson and C.-G. Ribbing, *Översikt av material för optisk signaturanpassning*. FOI-R--0530--SE, 2002.
2. T. Hallberg, E. Hedborg-Karlsson and S. Björkert, *Development of low emissive IR paint by FOI and PvTT: Progress report*. FOI Memo 02-2416, 2002.
3. H. S. Lee, Ö. Staaf and H. Ghaemi, *IR-properties of some binders for the coatings industry*. FOA-R--00-01576-615--SE, 2000.
4. M. Georgson, H.-S. Lee and Ö. Staaf, *Metallpulver som pigment för låg emissiv färg*. FOA-R--99-01367-615--SE, 1999.
5. C. Nilsson and T. Hallberg, *Multilayer structures for low emissive paint*. FOI-R--0278--SE, 2001.
6. E. Hedborg-Karlsson, L. G. Heimdahl and T. Hallberg, *Optiska egenskaper hos metallbelagda cenofärer*. FOI-R--0878--SE, 2003.
7. C. G. Ribbing and A. Rung, Sätt att skapa ett material med låg emittans i ett eller två bestämda våglängdsområden. Sv. pat-ans nr 0104195-3, (2001).
8. A. Rung and C. G. Ribbing. *Calculated photonic structures for infrared emittance control*. in *Optical Interference Coatings VIII*. 2001. Banff, Canada (FOI-S--0263--SE).
9. A. Rung and C. G. Ribbing. *Photonic crystal structures for thermal signature reduction - thickness effects*. in *Nordic Symposium on Military Electro-optics*. 2001. Helsinki, Finland (FOI-S--0262--SE).
10. A. Rung and C. G. Ribbing, *Calculated photonic structures for infrared emittance control*. Applied Optics, 2002. **41**(16): p. 3327-3331. (FOI-S--0693--SE).

11. A. Rung, *Modelling photonic band structures*. FOI-R--0838--SE, 2003.
12. A. Rung and C. G. Ribbing, *Framställning av tredimensionella fotonstrukturer*. FOI Memo: 01-2956, 2001.
13. G. Forssell. *Surface landmine and trip wire detection using calibrated polarization measurements in the LWIR and SWIR*. in *Polarization analysis, Measurement, and Remote sensing IV*. 2001. San Diego: SPIE.4491 41-51 (FOI-S--0361--SE).
14. G. Forssell and T. Hallberg, *Polarisationsegenskaper i IR-området hos färgprover och skrovliga Al-yltor*. FOA-R--00-01646-615--SE, 2000.
15. G. Forssell and T. Hallberg. *Calibrated sensitive polarization measurement methods in the regions 3-5  $\mu\text{m}$  and 8-12  $\mu\text{m}$ , corrected for contributions to the detector signal from the polarizer*. in *Polarization analysis, Measurement, and Remote sensing IV*. 2001. San Diego: SPIE.4481 257-269 (FOI-S--0401--SE).
16. G. Forssell and E. Hedborg-Karlsson, *Mätning med passiv IR polarisation av skrovliga ytor bestående av cenosfärer belagda med guld. Ansats till modellering av sådana ytor*. FOI Memo 02-3130, 2002.
17. G. Forssell and E. Hedborg-Karlsson. *Passive IR polarisation measurements applied to rough surfaces consisting of cenosphere particles covered with gold*. in *Polarisation measurement, analysis, and applications V*. 2002. Seattle: SPIE.Vol. 4819 145-156 (FOI-S--0614--SE).
18. G. Forssell and E. Hedborg-Karlsson. *Measurements of the polarization properties of camouflaged objects and of the denial of surfaces covered with gold*. 2003. Orlando: SPIE.Vol. 5075.
19. S. Årman, *Tillverkning av hårda transparenta beläggningar: Rapport om olika tillverkningsmetoder*. Coat AB rapport, FOA reg. nr. 93-1671/S, 1993.
20. H. S. Lee, M. Georgson and M. Lindgren. *IR and adhesion properties of metallic coatings on PMMA*. in *Optical Interference Coatings VIII*. 2001. Banff, Canada (FOI-S--0221-SE).